

Anssi Mustonen

## Valmet Paper Lab -analysaattorin

### leikkausteknologian kehittäminen



Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Kevät 2019



KAMK • University  
of Applied Sciences

## Tiivistelmä

**Tekijä(t):** Mustonen Anssi

**Työn nimi:** Valmet Paper Lab analysaattorin leikkausteknologian kehittäminen

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), konetekniikka

**Asiasanat:** analysaattori, paperi, Paper Lab, ultraääni, laser, työkaluteräs, vetolujuus, saksileikkaus

Tämä opinnäytetyö käsittelee Valmetin Paper Lab -analysaattorin vetolujuusmoduulin leikkausmenetelmää ja sen kehitystä. Työn toimeksiantajana toimi Valmet Automation Oy Kajaanin toimipiste. Opinnäytetyön tarkoituksena oli saada kehitettyä leikkausmenetelmä sellaiseksi, että leikkauksen aikana muodostuva leikkajäte olisi mahdollisimman vähäistä ja leikkausterien kesto olisi optimaalinen.

Kehitystyössä selvitettiin useita vaihtoehtoisia leikkausmenetelmiä nykyisen menetelmän parantamiseksi. Kehitysvaihtoehtoista valittiin ultraäänen avulla tapahtuva leikkaus ja terien valmistusmateriaalin vaihto. Ultraäänileikkauksen testaamista varten valmistettiin prototyyppi. Terän uudeksi valmistusmateriaaliksi valittiin pulveriteräs.

Leikkausmenetelmien tutkimisessa käytettiin hyväksi sekä paperikone ympäristössä käytettäviä menetelmiä, että kokonaan uudenlaisia menetelmiä joita ei ole vielä sovellettu paperimateriaalien leikkauksessa tällä tavoin. Leikkaavien terien materiaalivaihtoehtoja etsittiin terästoimittajien valikoimista ja tunnettujen leikkausmenetelmien terämateriaaleista. Jatkokehityksen aikana valittu leikkausmenetelmä sovitettiin moduulin rakenteisiin SolidWorks- ja Creo-suunnitteluohjelmistoja hyväksikäyttäen. Prototyyppiin tarvittavat osat valmistettiin joko alihankkijan toimesta tai itse toimeksiantajan tiloissa.

Lopputulokset prototyypin testaamisesta on esitelty työn lopussa. Prototyypillä testattiin myös saksileikkausmenetelmää. Ultraäänimenetelmä osoittautui haasteelliseksi ja saksileikkausmenetelmä lupaavaksi jatkoa ajatellen. Työn lopussa kuvataan vielä erilaisia kehitysvaihtoehtoja vetolujuusmoduulissa käytössä olevan leikkausmenetelmän parantamiseksi ja analysaattorin käyttäjän suorittamien huoltotoimenpiteiden helpottamiseksi.

## **Abstract**

**Author(s):** Mustonen Anssi

**Title of the Publication:** Development of Valmet Paper Lab Analyzer Cutting Technology

**Degree Title:** Bachelor of Engineering, Mechanical Engineering

**Keywords:** analyzer, paper, Paper Lab, ultrasound, laser, tool steel, tensile strength, score slitting

This thesis deals with the cutting technology of the tensile stiffness module of Valmet Paper Lab and its development. The work was commissioned by Valmet Automation Ltd, Kajaani office. The purpose of the thesis was to develop the cutting method in such a way that the generated cutting waste decreases and the cutting blade duration is optimal.

In this development work, several alternative cutting methods were researched to improve the current method. From these development options, the ultrasonic cutting method was chosen and the blade material replaced. A prototype was manufactured to test ultrasonic cutting. Powder steel was chosen as the material of the new blade.

To study paper cutting methods, we used the paper machine environment and totally new methods that had not been used before in that way. We searched cutting blade material options from different steel suppliers and materials we know have been used for paper cutting methods. The selected cutting method was fitted to the module structures using SolidWorks and Creo design software. The needed parts for the prototype were manufactured by a subcontractor or at the principal's premises.

The final results of the prototype testing are introduced at the end of the thesis. The prototype was also used for testing the score slitting method. In the tests, the ultrasound method proved to be challenging. The score slitting method, instead, turned out to be very promising when thinking about the future. At the end of this thesis, the different development options are introduced to improve the cutting methods used for the tensile strength module. In addition, ways to facilitate the maintenance procedures that the analyzer operator does are also dealt with.

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Paperin ja kartongin valmistus .....	3
2.1	Paperin ja kartongin rakenne .....	4
2.2	Raaka-aineet.....	4
3	Paperin ja kartongin leikkausmenetelmät ja valmistusmateriaalit .....	7
3.1	Leikkausmenetelmät .....	7
3.1.1	Laserleikkaus .....	8
3.1.2	Ultraäänileikkaus.....	10
3.1.3	Mekaaniset leikkausmenetelmät .....	11
3.2	Valmistusmateriaalit .....	16
3.2.1	Seostamattomat työkaluteräksset.....	18
3.2.2	Seostetut työkaluteräksset .....	18
4	Paperista ja kartongista mitattavat ominaisuudet .....	21
4.1	Mitattavat ominaisuudet valmistuksen aikana .....	21
4.2	Mitattavat ominaisuudet lopputuotteesta .....	22
4.2.1	Vetolujuuden mittaus.....	22
4.2.2	Standardi ISO 1924-3.....	23
5	Valmet Paper Lab.....	25
5.1	Toimintaperiaate .....	26
5.2	Analysaattorin pääosat.....	27
5.3	Moduulit.....	28
5.4	Leikkaavat moduulit .....	28
5.5	Vetolujuusmoduuli .....	29
5.5.1	Leikkaustekniikka .....	31
5.5.2	Terän profiili ja materiaali .....	32
6	Kehitystarpeet .....	34
6.1	Leikkausjätteen aiheuttajat ja sen huoltotoimenpiteet nykyisessä järjestelmässä..	34
6.1.1	Aiheuttajat.....	34
6.1.2	Huoltotoimenpiteet .....	35

6.2	Leikkausterien vioittuminen ja niiden huolto nykyisessä järjestelmässä .....	36
6.2.1	Terien vikojen aiheuttajat .....	36
6.2.2	Huolto.....	39
6.3	Johtopäätökset.....	40
7	Kehitysvaihtoehtoja.....	41
7.1	Nykyisen leikkausmenetelmän kehitysvaihtoehdot.....	41
7.1.1	Leikkausjätteen poistaminen leikkauksen aikana .....	41
7.1.2	Leikkausterien materiaalivaihtoehdot .....	42
7.2	Vaihtoehtoiset leikkausmenetelmät .....	43
7.2.1	Ultraäänileikkaus.....	43
7.2.2	Laserleikkaus .....	44
7.2.3	Mekaaniset leikkaustavat.....	44
8	Leikkausterien ja prototyypin valmistus.....	46
8.1	Leikkausterien valmistus .....	46
8.2	Prototyypin suunnittelu ja valmistaminen .....	48
8.2.1	Teräpaketin luontaisen resonanssitaajuuden laskenta.....	48
8.2.2	Mallintaminen .....	49
8.2.3	Valmistaminen .....	51
9	Prototyypin testaus .....	52
9.1	Ultraäänileikkaus.....	54
9.1.1	Paininrullien muutos .....	56
9.1.2	Ultraäänileikkaus erimuotoisilla terillä .....	58
9.2	Saksileikkaus.....	59
10	Tulokset .....	61
10.1	Ultraäänileikkauksen tulokset.....	61
10.2	Saksileikkauksen tulokset .....	63
11	Leikkaavien moduulien muita kehitysehdotuksia .....	66
12	Yhteenveto .....	67
	Lähteet.....	68
	Liitteet	

## Symboliluettelo

Abrasiivinen kuluminen	Kosketuspintojen välissä hiovia ainesosia.
Adhesiivinen kuluminen	Koskettavien pintojen pinnankarheet leikkautuvat toisiaan vasten.
AISI-SAE luokittelu	Työkaluterästen yleinen luokittelustandardi.
Analysaattori	Mittaa näytteestä erilaisia ominaisuuksia.
Fokusoiva	Tarkentava.
Homogeeninen	Koostumukseltaan yhtenäinen tai aineksiltaan tasakoosteinen.
ISO 1924-3 standardi	Paperin vetolujuuden testaamista koskeva standardi.
Koherentti	Säde, jonka kaikki aallot ovat samassa vaiheessa ja sisältävät vain yhtä aallonpituutta.
Lävistäminen	Suljetun muodon leikkaaminen aihioon pistimen ja tyynyn avulla.
Mineraali	Luonnossa kiinteässä muodossa esiintyvä alkuaine tai epäorgaaninen yhdiste.
Moduuli	Yksittäinen analysaattori, joka sijaitsee Paper Lab-analysaattorissa.
Myötölujuus	Raja, jonka jälkeen materiaali ei palaudu enää alkuperäisiin mittoihinsa.
Orgaaninen pigmentti	Luonnosta saatava väriaine, joka voi olla läpikuultava tai peittävä, koostuu hiilivety-yhdisteistä.
Paper Lab	Automaattinen paperin ja kartongin testaukseen käytettävä analysaattori.
Poikkiratanäyte	Näyte, joka on leikattu valmiista konerullasta koko rullan leveydeltä.

Resonaattori

Laite, joka värähtelee luonnostaan tietyillä taajuuksilla.

## 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön aiheena on Valmet Paper Lab -analysaattorin leikkaavien moduulien leikkausteknologian kehittäminen. Työ keskittyy analysaattorin vetolujuusmoduulin leikkausteknologiaan ja sen kehittämisehdotuksiin. Toimeksiantajana toimi Valmet Automation Oy, Kajaanin toimipiste.

Valmet Oyj on maailman johtava teknologian, automaation ja palveluiden toimittaja ja kehittäjä sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle. Sillä on yli 220 vuoden historia teollisuudessa, ja sen juuret ulottuvat aina 1750-luvulle. Nykyään noin 12 000 henkilöä työskentelee globaalisti yli 30 maassa. Heidän tarjoamat palvelut asiakkaille kattavat kaiken kunnossapidon ulkoistuksesta, tehtaiden ja voimalaitosten parannuksiin ja varaosiin. [1.]

Liiketoiminta on jaettu neljään eri liiketoimintalinjaan, jotka sijaitsevat viidellä eri maantieteellisellä alueella. Liiketoimintalinjat ovat automaatio, sellu ja energia, palvelut ja paperit. Valmetin automaatioliiketoimintalinja toimii paperi- ja selluteollisuudessa automaation, teknologian ja palveluiden toimittajana. Sen tuotelinjat ovat mm. automaatiojärjestelmät, laatusäätöjärjestelmät, analysaattorit ja mittalaitteet. Pääasiakasryhmiin kuuluu massa- ja paperiteollisuus, energiantuotanto, meriteollisuus, öljy- ja kaasuteollisuus sekä muu prosessiteollisuus. Sen automaatiotratkaisujen tehtävänä on parantaa asiakkaiden liiketoimintojen kannattavuutta sekä kustannus-, energia- ja materiaalitehokkuutta. [2.]

Kajaanin toimipiste kuuluu automaatioliiketoimintalinjaan. Siellä työskentelee reilu 100 henkilöä analysaattoreiden, mittalaitteiden, kunnonvalvontajärjestelmien ja automaatiojärjestelmien parissa. Kajaanin toimipisteen juuret ulottuvat aina vuoteen 1968, jolloin se toimi peitenimellä Oy Jänkä Electronics Ab. Sen jälkeen on tapahtunut useita yrityskauppoja, joiden johdosta toimipiste on tunnettu muun muassa nimillä Kajaani Elektroniikka Oy ja Metso Oyj. Kajaanissa on tuotekehitys-, tuoteryhmä- ja tuotannonyksiköt.

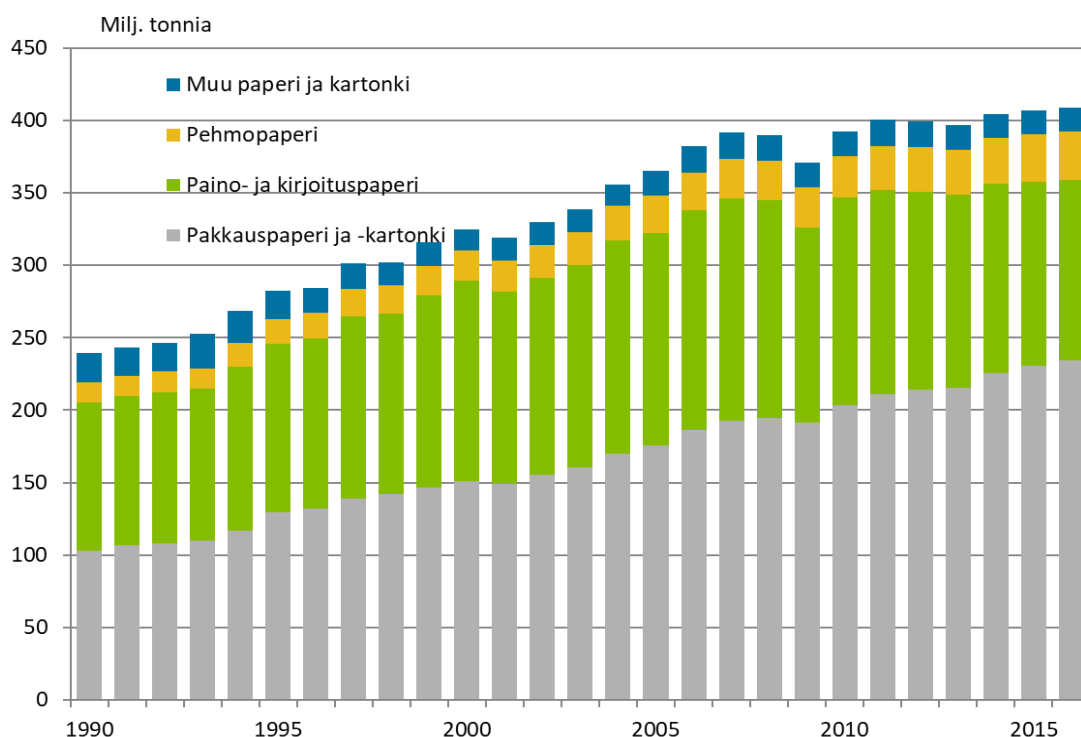
Paper Lab analysaattorin kehitystarve on ilmennyt, koska nykyinen moduulien leikkaustekniikka tuottaa runsaasti näytteestä irtoavaa leikkausjätettä. Menetelmä myös kuluttaa leikkaavia teriä suhteettoman paljon joillakin näytelaaduilla. Tavoitteena oli leikkausjätteen muodostumisen vähentäminen ja terien käyttöiän kasvattaminen. Työssä tutkittiin vaihtoehtoisia leikkausmenetelmiä nykyisen leikkausmenetelmän tilalle. Tavoitteena oli myös kehittää nykyisen leikkausmenetelmän ongelmakohtia ja valmistaa prototyyppi valitusta kehitysvaihtoehdosta.



Erilaisia leikkausmenetelmiä sekä terien valmistusmateriaaleja on tutkittu paperikoneissa käytössä olevien leikkausmenetelmien pohjalta. Valitusta kehitysvaihtoehdosta suunnitellaan toimiva prototyyppi SolidWorks- ja Creo-ohjelmia apuna käyttäen. Suurin osa prototyypin osista valmistetaan alihankkijan toimesta. Prototyypillä testataan ultraääni- ja saksileikkausta toimeksiantajan tiloissa.

## 2 Paperin ja kartongin valmistus

Maailmassa valmistetaan vuosittain paperia ja kartonkia yli 400 milj. tonnia (v. 2016), kuten kuvasta 1 selviää [3]. Vuonna 2000 tuotanto oli yli 300 milj. tonnia, ja silloin ennustettiin tuotannon kasvavan vuoteen 2010 mennessä 120 miljoonalla tonnilla. Tämä ei ole kuitenkaan aivan toteutunut, koska erityisesti paino- ja kirjoituspaperin kysyntä on ollut laskusuuntainen viestinnän digitalisoitumisen ja ihmisten kulutustottumusten myötä. Suomen osuus maailman koko tuotannosta on vain noin 5 %, mutta suurin osa Suomessa valmistetusta paperista ja kartongista on kirjoitus- ja painopaperituotantoa, jonka osuus on noin neljännes maailmankaupasta. [4, s. 19–21.]



Kuva 1. Paperin ja kartongin tuotanto maailmassa lajeittain [3].

Paperin ja kartongin ollessa nykyajan tärkeimpiä hyödykkeitä, ovat niiden laatuvaatimukset ja laadun tasaisuusvaatimukset koko ajan kasvaneet. Tämän johdosta on niiden valmistusprosessin aikainen ja lopputuotteesta mitattavien ominaisuuksien testaaminen tärkeää. Erityisesti lopputuotteesta mitattavien ominaisuuksien testaus on tärkeää, jotta tiedetään valmistusprosessin toimivuus ja valmiin tuotteen lopullisten ominaisuuksien vastaavuus kyseiselle valmistuslaadulle.

## 2.1 Paperin ja kartongin rakenne

Paperi ja kartonki ovat rakenteeltaan ohuita levymäisiä, tyyppillisesti puukuidusta valmistettuja tuotteita. Tavallisesti levyrakenteet ovat homogeenisiä, mutta paperille ja kartongille on ominaista heterogeeninen rakenne, koska ne ovat sekakoosteisia. Kuitenkin paperin voidaan ajatella olevan homogeeninen, koska se on ns. yksikerrostuote, toisin kuin kartonki on. Paperin neliömassa on tyyppillisesti alle 225 g/m<sup>2</sup>, esimerkiksi tavallisen kopiopaperin neliömassa on 80 g/m<sup>2</sup>. Kartonkia valmistetaan tyyppillisesti useista eri kuitukerroksista, joten se luokitellaan monikerroksiseksi tuotteeksi. Tällainen valmistustapa mahdollistaa jokaisen kerroksen optimoinnin erikseen niin laadun kuin raaka-aineen käytön suhteen. Kartongin neliömassa vaihtelee yleensä 150–600g/m<sup>2</sup> välillä. Selvää rajaa on kuitenkin vaikea vetää näiden kahden välille, mutta voidaan kuitenkin ajatella, että paperia käytetään pääosin kirjoitus- ja painotarkoituksiin ja kartonkia lähinnä pakkauksiin. Kartongista valmistettua pahvia valmistetaan liimaamalla useita kartonkikerroksia päällekkäin. [4, s. 8.]

Paperissa ja kartongissa raaka-aineet ovat aina epätasaisesti jakautuneita sekä tason suunnassa että paksuussuunnassa. Kuidut muodostavat erikokoisia kuitukimppuja, ja ne suuntautuvat pääasiassa paperikoneen konesuuntaan eli koneensuuntaisesti. Tätä suuntajakauman epäsymmetrisyyttä kutsutaan kuituorientaatioksi. Lisäksi raaka-aineiden seossuhde saattaa vaihdella arkin eri kohdissa. Kuidut ovat tärkeimpiä tekijöitä paperin ja kartongin rakenteessa. Ne muodostavat paperin rakenteen ja vaikuttavat suuresti sen lujuusominaisuuksiin. [4, s. 50.]

Paperin ja kartongin pintaan voidaan tehdä myös mm. pintaliimaus, päällystys tai kalanterointi eri loppukäyttökohteen mukaan, jolloin sen pintaan saadaan sopivia ominaisuuksia esimerkiksi painatusta varten tai saadaan parannettua sen pölyämättömyyttä.

## 2.2 Raaka-aineet

Paperin ja kartongin pääraaka-aineet ovat puusta tehty sellu tai mekaaninen massa, täyteaineet, lisäaineet ja erilaiset liimat. Paperin ja kartongin valmistuksessa raaka-ainekoostumus vaihtelee valmistettavan lajin mukaan. Kukin eri paperi- ja kartonkilaji vaatii oman tietyn kuitukoostumuksen, täyteaineet, liimauksen ja lisäaineet. Esimerkiksi aikakauslehtipaperilta vaaditaan hyviä pai-

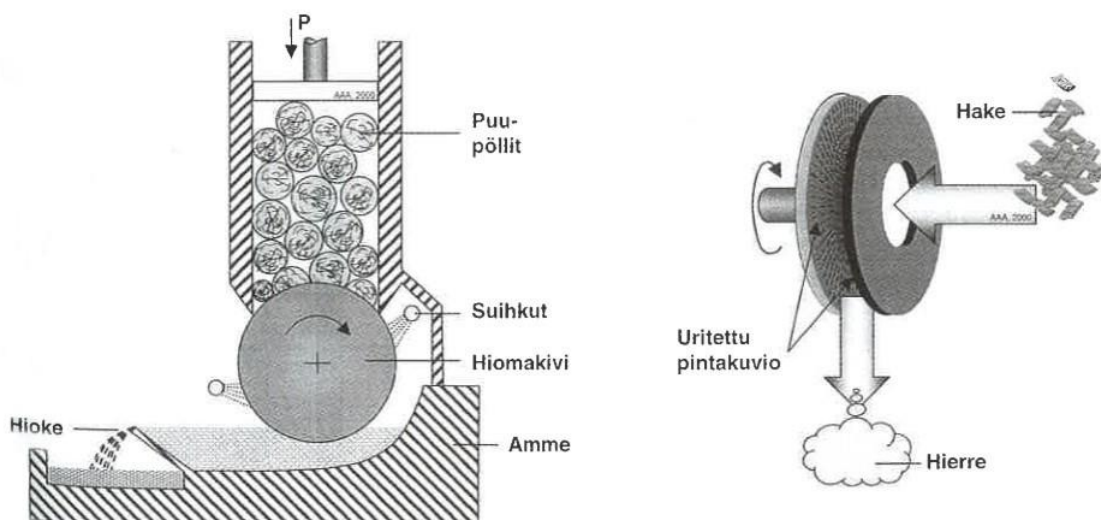
natusominaisuuksia, kun taas kartongilta vaaditaan usein hyviä lujuusominaisuuksia. Usein ominaisuudet ovat ristiriidassa keskenään, jolloin raaka-aineiden valinnassa joudutaan turvautumaan kompromissiratkaisuihin. [4, s. 15.]

Sellua saadaan, kun puu hajotetaan kemiallisesti keittämällä, kun taas mekaanista massaa saadaan puuta hiertämällä tai hiomalla. Raaka-aineeksi sopii myös kierrätyskuitu eli uusiomassa, mutta sen joukkoon tarvitaan myös uutta ensikuitua, koska pelkän kierrätyskuidun käyttö haurastuttaa paperia. Uusiomassan raaka-aineeksi sopii lähes kaikki paperi ja kartonki. [5]

Kemiallisia massoja eli selluja on kahdenlaisia, sulfiitti- ja sulfaattikeitto. Molemmat menetelmät on kehitetty 1800-luvulla, ja ne eroavat toisistaan vain keittämisessä käytettävien kemikaalien suhteen. Suomessa käytettävä kemiallinen massa on havu- ja lehtipuusulfaattisellua. Enää harvoin käytetään sulfiittimenetelmällä keitettyä sellua, koska sen rikkipäästöt ovat huomattavasti suuremmat. Muualla maailmassa on sen sijaan vielä paljon sulfiittisellutehtaita. Kemialliset massat valmistetaan keittämällä puuhaketta valkolipeässä. Menetelmässä puukuituja sitova ligniini liukenee, mikä saa aikaan kuitujen eroamisen. [4, s. 31.]

Lehtipuusellusta saadaan tuotteelle hyvät painatusominaisuudet, kun taas havupuusellulla saadaan erityisesti hyvät lujuusominaisuudet. Kemiallisia massoja käytettäessä on tuotteen vaaleuden pysyvyys hyvä, koska paperin keltaisuutta aiheuttava ligniini on liuennut pois sellun valmistusprosessissa. [4, s. 15.]

Mekaanista massaa valmistetaan puuta joko hiomalla tai hiertämällä. Mekaanisten massojen valmistusperiaate on esitetty kuvassa 2. Puun kuidut irrotetaan toisistaan lämmön ja mekaanisen rasituksen avulla. Lämpö pehmentää puukuituja sitovaa ligniiniä, joten se edesauttaa puukuitujen välisten sidosten avautumisessa. Hiomalla valmistettu mekaaninen massa valmistetaan kuusipölyistä, jotka painetaan hiomakiveä vasten. Hiertämällä valmistettu massa taas tehdään kuusihakkeesta. Se jauhetaan kiekkojen välissä ja valmistuksen apuna voidaan käyttää lämpöä tai kemikaaleja. [6.]



Kuva 2. Hiokkeen ja hirteen valmistusprosessi [4, s. 33].

Täyteaineiden tarkoitus on täyttää puukuitujen väliin jäävät huokokset paperissa ja kartongin pintakerroksessa. Ne on valmistettu luonnon mineraaleista, mutta myös orgaanisia pigmenttejä käytetään jossain määrin. Orgaanisten pigmenttien käyttö on kuitenkin harvinaista kalleutensa vuoksi. Täyteaineet ovat tehtaalle tullessaan joko lietteenä tai jauheena, mutta jauhemainen täyteaine lietetään kuitenkin veteen ennen sen sekoittamista sellun sekaan. Täyteaineiden määrä vaihtelee valmistettavan paperi- tai kartonkilaadun mukaan. Yleensä niiden osuus jää alle kolmannekseen valmiin päällystämättömän paperin painosta. [4, s. 37.]

Valmistusprosessissa käytettävät lisäaineet ja liimat voidaan jakaa kahteen ryhmään, toiset vaikuttavat itse paperin laatuun ja toiset prosessin toimivuuteen. Paperin laatuun vaikuttavia lisäaineita ovat mm. erilaiset liimat, kirkasteet ja rasvan hylkivyyttä parantavat aineet. Esimerkiksi liimoja on monenlaisia. Niiden tarkoituksena on parantaa raaka-aineiden sitoutumista lopullisen tuotteen erilaisissa käyttötarkoituksissa. Prosessin toimivuuteen vaikuttavia aineita ovat mm. pH:n säätö-, vaahdonesto- ja pesuaineet. [4, s. 42.]

### 3 Paperin ja kartongin leikkausmenetelmät ja valmistusmateriaalit

Paperikoneilla käytettäviä leikkausmenetelmiä on mekaaninen leikkaus, laserleikkaus ja vesisuihkuleikkaus. Vesisuihkuleikkaukseen ei perehdytä tässä työssä tarkemmin, koska se ei ole aiheellista tämän kehitystyön kannalta. Mekaaniset leikkaustavat ovat yleisimpiä, koska niillä on pitkä käyttöhistoria ja niiden investointi kustannukset ovat alhaiset, verrattuna muihin menetelmiin.

Leikkaavien terien valmistusmateriaalin vaikutus niiden käyttöikänsä on suuri. Yleisesti ottaen, mitä kovempaa materiaali on, sitä pitempi on terän käyttöikäkin. Valmistusmateriaalin valinnassa onkin suuressa roolissa leikattava materiaali ja sen leikkausmenetelmä. Terän eli työkalun valmistusmateriaali on yleisesti perinteinen työkaluteräs. Kuitenkin nykypäivänä käytetään yhä enemmän erilaisia jauhemetallurgisesti valmistettuja materiaaleja niiden kestävyysden takia.

#### 3.1 Leikkausmenetelmät

Paperikoneilla käytetään pääsääntöisesti kolmea erilaista mekaanista leikkausmenetelmää, saksileikkaus, teräleikkaus ja puskuleikkaus. Kuvassa 3 on esitetty periaatteet näistä menetelmistä. Näistä kaikista on olemassa vielä omia variaatioita. Muitakin vaihtoehtoisia menetelmiä on olemassa, kuten laserleikkaus. Laserleikkaus ei ole kuitenkaan vielä yleistynyt leikkausmenetelmänä sen hinnakkuuden ja muiden ongelmien takia [7, s. 98–101]. Ultraäänileikkausta ei ole vielä sovellettu paperikoneilla. Se on käytössä lähinnä ruoka- ja tekstiiliteollisuudessa. Ultraääntä käytetään myös konepajateollisuudessa erilaisissa lastuavissa työstömenetelmissä työkalun kuluminen ehkäisemiseksi.



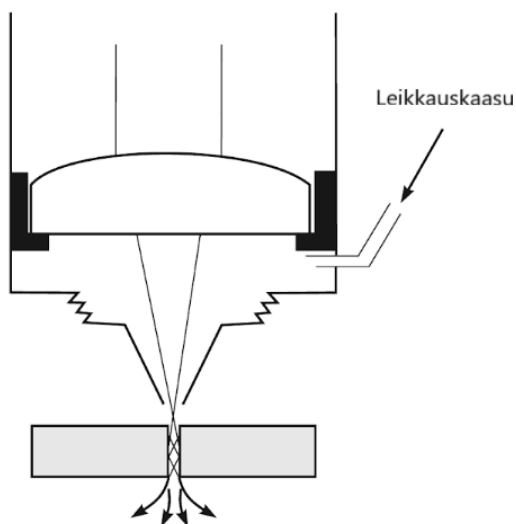
Kuva 3. Leikkausmenetelmiä, mukailtu lähteestä [7].

### 3.1.1 Laserleikkaus

Lasersäde muodostetaan optisessa laitteessa, joka muuttaa valon säteet samaan vaiheeseen ja samalle aallonpituudelle. Tätä ilmiötä kutsutaan optiikassa nimellä stimuloitu emissio. Laserleikkauksessa säde muodostetaan erillisellä resonaattorilla, puolijohteella tai näiden yhdistelmällä. [8, s. 169.]

Laserleikkaus on terminen leikkausmenetelmä, jossa materiaalin leikkaus tapahtuu lasersäteen polttaessa leikattavaa materiaalia, jonka jälkeen palanut materiaali poistuu painovoiman ja leikkauskaasun avulla. Tyypillinen laserleikkauslaitteisto koostuu lasersäteen lähteestä ja leikkauspästä. [9, s. 31.]

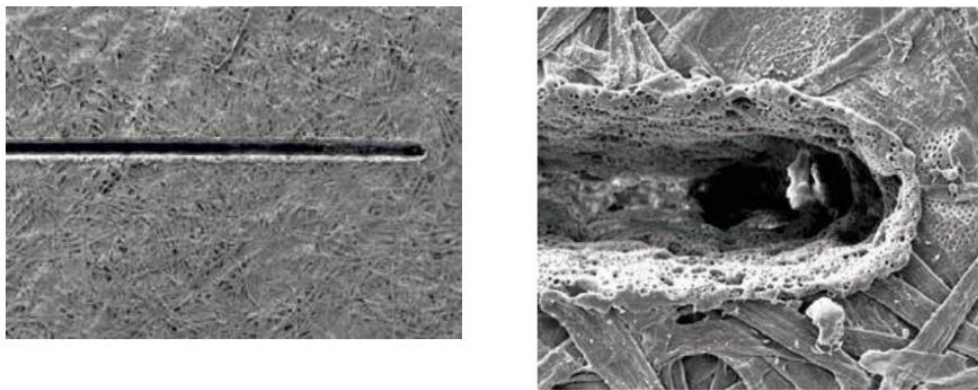
Kuvassa 4 näkyy leikkauksessa käytettävä leikkauspää, johon johdetaan koherenttia lasersädettä. Leikkauspäässä sijaitsee yksi tai useampia säteen fukusioivia linsejä, joiden tehtävänä on keskitää säde pienelle alueelle. Leikkauksissa käytetään pääsääntöisesti leikkauskaasua, jonka tehtävänä on paperimateriaalien leikkauksessa jäähdyttää leikkauspäätä ja poistaa lasersäteen sulattama materiaali. [10, s. 266.]



Kuva 4. Laserleikkauksen periaate, mukailtu lähteestä [11, s.18].

Paperin tai kartongin laserleikkaus on vielä suhteellisen vähän käytetty leikkausmenetelmä, ainakin paperiteollisuudessa, vaikka laserteknologian mahdollisuuksia paperiteollisuudessa on tutkittu jo yli 30 vuoden ajan [12]. Konepajateollisuudessa laserleikkaus on suuremmassa roolissa. Sitä käytetään mm. putkien ja levyjen leikkaamiseen, koska sen leikkauks jälki ja nopeus on parempi kuin esimerkiksi polttoleikkauksessa.

Paperin ja kartongin laserleikkauksessa leikkausjälki on erittäin hyvä, se on siisti ja suora. Kuvassa 5 on suurennokset laserleikatusta paperista. Kuvasta nähdään, kuinka leikatut reunat ”sulavat” kiinni ja tämän takia laserleikkauksen aikana ei vapaudu kuitupölyä läheskään niin paljon kuin mekaanisessa leikkauksessa. Sen etuna on myös joustavuus, koska se ei vaadi niin tarkkoja kohdistustoimenpiteitä huollon jälkeen kuin mekaaniset leikkaustavat eikä työkalua tarvitse muuttaa leikkausgeometrian muuttuessa. Laserleikkauksessa ei synny mekaanista kosketusta työkalun ja leikattavan materiaalin välille. Tästä johtuen työkalu ei kulu samalla tavalla kuin mekaanisessa leikkauksessa. Leikkausnopeudet ovat yhtä suuria tai jopa suurempia kuin mekaanisissa leikkauksimenetelmissä. [12.]



Kuva 5. Suurennokset laserleikatusta paperista [12].

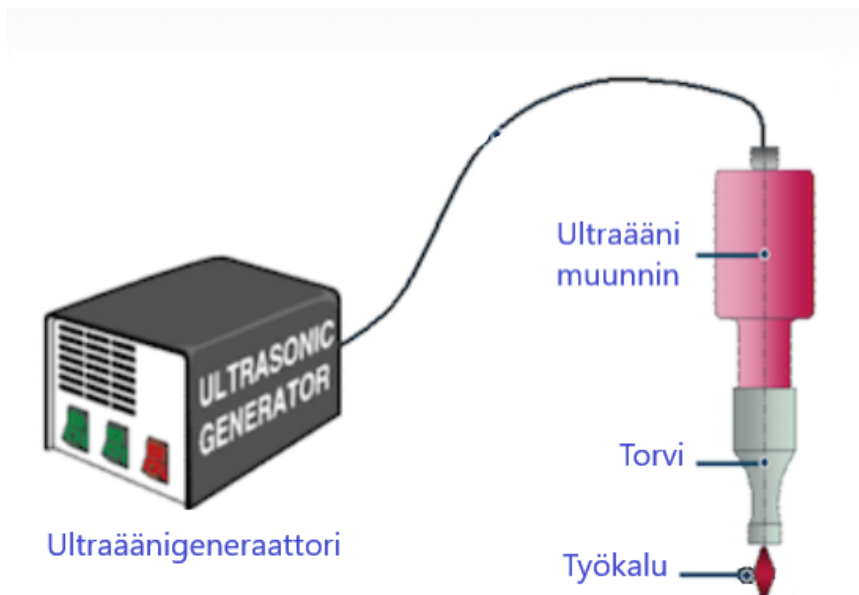
Menetelmässä on kuitenkin negatiivisia puolia, jotka haittaavat sen yleistymistä paperiteollisuudessa. Yksi ongelmista mekaaniseen leikkaukseen verrattuna on laitteiston alkuinvestoinnin kalleus. Kuitenkin kokonaisuudessaan ero ei ole enää huomattavan suuri, kun vertailussa otetaan huomioon myös laserlaitteiston kunnossapidon vähäinen tarve. Kuitenkin mahdolliset varalaitteistot nostavat leikkauksjärjestelmään sijoitettavan pääoman määrää. Turvallisuus on toinen ongelma, koska paperikoneen ympäristössä oleva pöly ja kuuma lasersäde mahdollistaa räjähdysvaaran. Tätä on kuitenkin mahdollista ehkäistä muun muassa ympäristön tarpeeksi korkealla kosteudella ja pölyn hallinnalla. [12.]



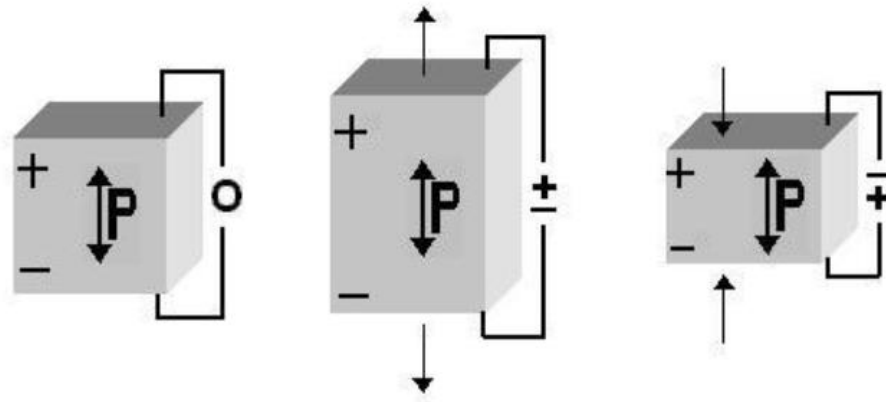
### 3.1.2 Ultraäänileikkaus

Ultraääni on mekaanista aaltoliikettä, jonka taajuus on yli 20 kHz. Se tarvitsee edetäkseen jonkin väliaineen, kuten kaasun tai nesteen, jossa se etenee pitkittäisenä aaltoliikkeenä, tai kiinteän aineen, jossa eteneminen tapahtuu myös poikittaisena aaltoliikkeenä. Kaasuissa ultraääni vaimenee nopeasti, mutta kiinteissä ja nestemäisissä väliaineissa se etenee hyvin. Etenemisnopeus riippuu väliaineesta ja sen lämpötilasta. Paperin ultraäänileikkauksessa käytettävä taajuus on yleensä 40 kHz, koska tällä taajuudella työkalu leikkaa paperia tehokkaasti.

Ultraäänileikkauksessa leikkaava työkalu viritetään värähtelemään ultraäänen taajuudella. Järjestelmä koostuu ultraäänigeneraattorista, ultraäänimuuntimesta, työkalusta ja mahdollisesta torvesta. Ultraäänigeneraattorin tehtävänä on muodostaa halutun taajuista ja tehoista vaihtosähköä ultraäänimuuntimelle. Ultraääni muodostuu ultraäänimuuntimessa, joka sisältää yhden tai useamman pietsokiteen. Kun pietsokiteeseen syötetään vaihtosähköä, se saa aikaan kiteen supistumisen ja kasvamisen, kuten kuvassa 7 on esitetty. Ultraäänimuuntimella on rakenteellinen resonointitaajuus, johon se on viritetty muunninta valmistaessa. Tällä taajuudella muunnin resonoi kiinnityspinnastaan voimakkaimmin. Leikkaava työkalu on kiinnitetty joko suoraan ultraäänimuuntimeen tai, kuten kuvassa 6, torveen. Torven tehtävänä on vahvistaa tai heikentää ultraäänen amplitudia, eli toisin sanottuna se muuttaa mekaanisen liikkeen voimakkuutta. [13.]



Kuva 6. Ultraäänileikkajärjestelmä [13].



Kuva 7. Pietsokiteen toimintaperiaate [14].

Ultraäänileikkaus voidaan myös eräällä tapaa luokitella mekaanisiin leikkausmenetelmiin, koska leikkaavalla terällä ja leikattavalla materiaalilla on fyysinen kontakti. Kuitenkin ultraäänen taajuudella värähtelevä terä helpottaa leikkaustapahtumaa, joten terän ja materiaalin välille ei synny niin suurta voimaa kuin perinteisissä mekaanisissa leikkausmenetelmissä. Tästä johtuen kulumisen ei ole yhtä suurta kuin perinteisissä leikkausmenetelmissä.

### 3.1.3 Mekaaniset leikkausmenetelmät

Kaikissa mekaanisissa leikkausmenetelmissä on tunnusomaista fyysisen kontaktin syntyminen leikkattavan materiaalin ja leikkaavan terän välille. Leikkausmenetelmästä riippuen kontakti voi syntyä myös leikkaavan terän vastaparille tai vastimelle. Nämä kontaktit aiheuttavat väistämättä terän kulumista ja leikattavasta materiaalista irtoavia ainesosia. Paperi ja kartonki sisältävät useita terää kuluttavia ainesosia. Näistä erityisesti täyteaineet sisältävät kuluttavia aineita, koska ne ovat usein luonnon mineraaleja.

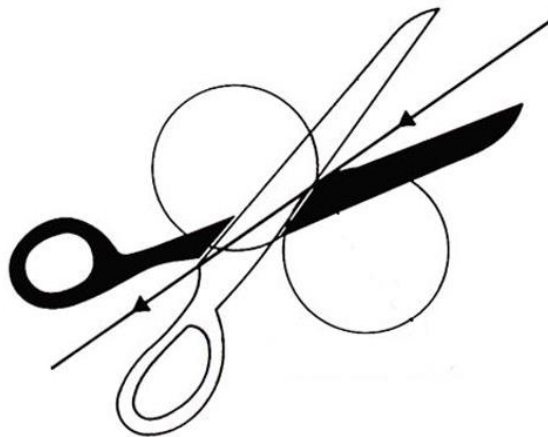
Saksileikkauksessa (engl. score slitting) käytetään kahta limittäin pyörivää terää, joiden välissä paperi tai kartonki leikkaantuu. Kuvassa 8 on saksileikkausmenetelmässä käytettäviä teriä, yläterät ovat kuvassa yläpuolella ja alaterät alapuolella. Molemmat terät on valmistettu joko kovametallista, pulveriteräksestä tai työkaluteräksestä. Kuitenkin molemmat terät eivät ole samaa materiaalia kulumisen hallitsemiseksi. Leikkauksessa yläterä on se, joka pääsääntöisesti leikkaa mate-

riaalin ja kuluu enemmän. Tämä johtuu yläterän kapeammasta teräprofiilista ja täten pienemmästä teräkulmasta. Valittaessa terämateriaaleja saadaan kovametallilla ja pulveriteräksillä aikaiseksi parempi kulutuskestävyys ja leikkausreunan laatu kuin käytettäessä perinteistä työkaluterästä. Menetelmää käytetään yleisesti leikatessa kartonkeja ja papereita. [15.]



Kuva 8. Erilaisia saksileikkausmenetelmässä käytettäviä teriä [15].

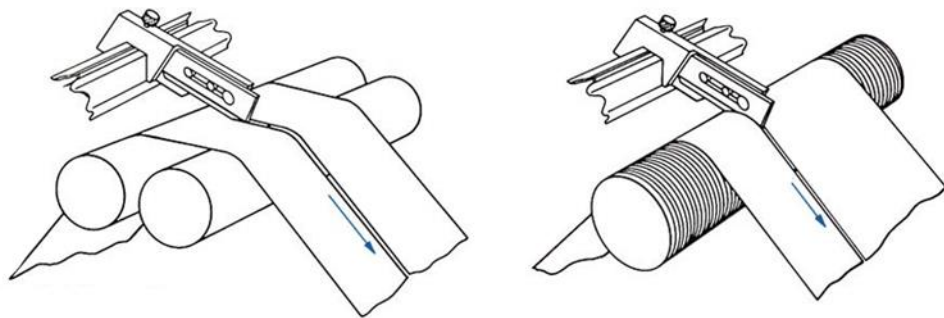
Menetelmä mukailee kuvan 9 tilannetta, jossa avatuilla saksilla työnnetään paperia pitkin, niiden samalla leikatessa. Terän sopiva limitys on yksi avain onnistuneelle leikkaukselle, aivan kuin leikatessa saksilla paperia, tietyllä terien kulmalla ne leikkaavat puhtaasti ja pienellä voiman käytöllä. Toinen tärkeä tekijä onnistuneessa leikkauksessa on terien nopeus suhteessa leikattavan materiaalin nopeuteen. Tämänkin huomaa leikatessa saksilla paperia. Sopivalla nopeudella saksia työnnettäessä paperi leikkaantuu helposti ja siististi. Terien oikea kulma ja nopeus, yhdessä voiman kanssa, joka painaa teriä yhteen, vaikuttavat leikkauksen onnistumiseen. [7, s. 6.]



Kuva 9. Saksileikkausmenetelmä [7, s. 6].

Saksileikkausmenetelmässä leikkaavaa terää kuluttavat kontaktit muodostuvat terän, vastaterän ja leikattavan materiaalin välille. Näistä kontakteista leikattavalla materiaalilla on suurin kuluttava vaikutus terään. Kulumismekanismi on pääsääntöisesti abrasiivista, koska terän ja vastaterän välissä on hiovia partikkeleita, jotka tulevat leikattavasta materiaalista. Adhesiivista kulumista esiintyy myös terän ja vastaterän kulkiessa limittäin toisiaan vasten.

Teräleikkausmenetelmässä (engl. razor blade slitting) käytetään nimensä mukaisesti terävää terää, joka leikkaa materiaalin joko ilman vastinta tai vastimen kanssa. Kuvassa 10 on esitetty nämä molemmat menetelmät. Ilman vastinta leikattaessa leikkausnopeudet ovat pääsääntöisesti suurempia, mutta leikkaus ei ole yhtä tarkka kuin vastinta käytettäessä. Vastinta käytettäessä on vastin uritettu. Tämän ansiosta leikkauksesta saadaan tarkempi, koska ura tukee leikkaustapahtumaa terän kulkiessa tarkasti urassa. Kuitenkin vastinta käytettäessä mekaanista kosketusta ei synny vastimen ja terän välille, koska se tylsyyttäisi terän välittömästi. [7.]

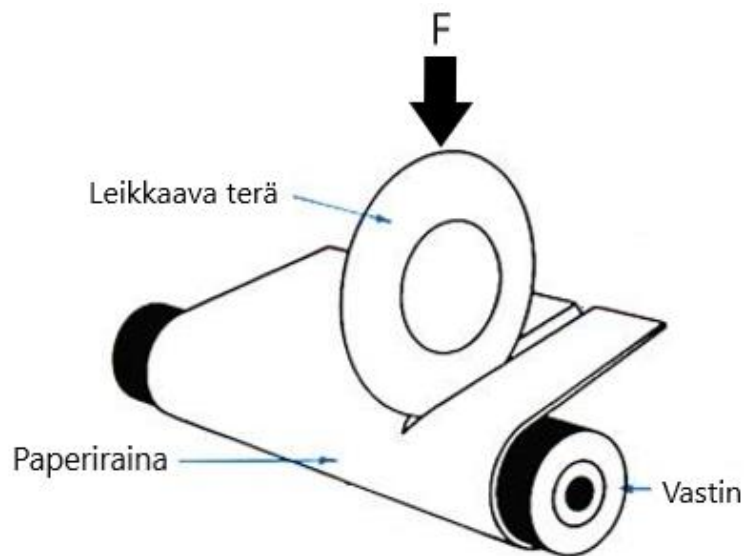


Kuva 10. Teräleikkausmenetelmä [7, s. 5].

Teräleikkausmenetelmä on kustannuksiltaan halvin verrattessa muihin mekaanisiin leikkausmenetelmiin. Kuitenkin huollosta aiheutuu merkittäviä kustannuksia, jos leikattava materiaali kuluttaa teriä paljon. Se on helppo asentaa mihin tahansa ympäristöön, mutta asennuksessa on kuitenkin otettava huomioon turvallisuus, huollon ja käytön kannalta. Teräleikkauksessa käytettävät terät ovat todella teräviä ja niiden suojaus käyttäjän kosketukselta ei ole aina mahdollista kaikissa sovelluksissa. Turvallisuutta voidaan kuitenkin parantaa esimerkiksi käyttämällä mahdollisimman laadukkaita teriä, jolloin terien vaihtoväli pitenee. Vaihtovälin pidentyessä käyttäjän ei tarvitse koskea teriin yhtä useasti, joten turvallisuus kasvaa. Menetelmiä käytetään leikatessa kevyimpiä materiaaleja, koska jäykät ja raskaat materiaalit sisältävät muun muassa hankaavia mineraaleja, jolloin terän kesto ei ole toivotunlaista. [16.]

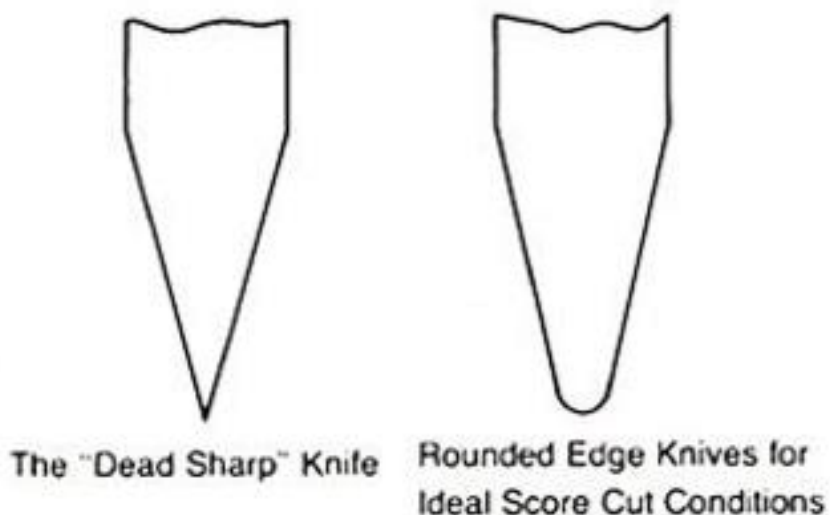
Teräleikkauksessa terää kuluttaa kontakti leikattavan materiaalin välillä. Kulumismekanismit voidaan luokitella abrasiivinen kuluminen. Leikkausmenetelmää ei suositella materiaaleille, jotka sisältävät paljon täyteaineita niiden kuluttavien mineraalien vuoksi.

Puskuleikkaus (engl. score slitting) on vanhin tunnettu leikkausmenetelmä ja se muistuttaa melkein enemmän murskaamista kuin leikkaamista. Puskuleikkauksen periaate esitetään kuvassa 11. Siinä leikattava materiaali leikkautuu terän ja tasaisen vastimen välissä terän aiheuttaman paineen takia. Vastimen ollessa tasainen karkaistu teräsakseli ei leikkaava terä voi olla täysin terävä, kuten kuvan 12 terävä terä, koska ohuen terävän terän painautuessa kovaan vastimeen aiheuttaisi se välittömästi terän tylsymisen tai vaurioitumisen. Vastimen materiaali on aina valittu kovemmaksi kuin leikkaavan terän, koska vastimen huolto on hankalaa ja kallista. [7, s. 12.]



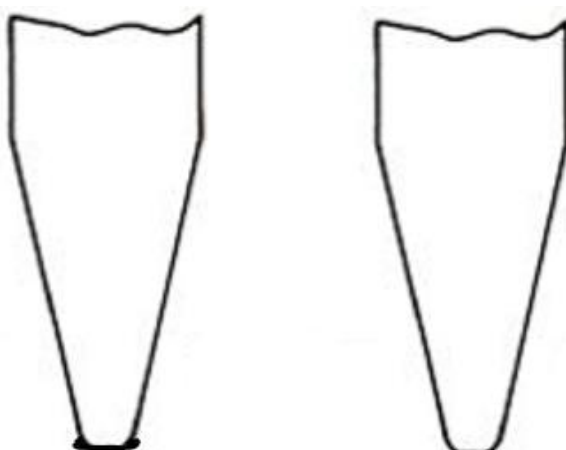
Kuva 11. Puskuleikkausmenetelmä. Mukailtu lähteestä [7, s. 14.]

Kuten kuvassa 12 näkyvässä terän poikkileikkauksessa, on puskuleikkauksessa käytettävän terän kärki pyöristetty, mikä mahdollistaa onnistuneen leikkauksen. Leikkaustekniikasta johtuen leikkauksen aikana muodostuu enemmän pölyä ja muita irtonaisia ainesosia leikattavasta materiaalista kuin muissa mekaanisissa leikkausmenetelmissä. Leikkausreuna ei ole myöskään yhtä siisti kuin esimerkiksi saksileikkauksessa. Pääsääntöisesti voidaan ajatella, että mitä homogeenisempää materiaali on, niin sitä vähemmän leikkauksessa muodostuu pölyä. Leikkausmenetelmä onkin optimaalinen leikkattaessa ohuita filmimäisiä materiaaleja, kuten teippejä. Kuitenkin menetelmää käytetään myös esimerkiksi kumin ja hiomapaperin leikkaukseen. [7, s. 13.]



Kuva 12. Poikkileikkaukset teräprofileista, vasemmalla terävä terä ja oikealla puskuleikkauksessa käytettävä terä [7, s. 12].

Terää kuluttavat mekanismit muodostuvat terän, vastimen ja leikattavan materiaalin välille. Eri-tyisesti terän ja vastimen välinen kontakti kuluttaa terää, koska terää painetaan kovalla voimalla vastinta vasten, joka on materiaaliltaan kovempaa kuin terä. Jos terä kuluu abrasiivisesti tai siinä tapahtuu plastinen muodonmuutos, joka aiheuttaa terän poikkileikkauksen muuttumisen kuvan 13 osoittamalla tavalla, vaatii onnistunut leikkaus suurempaa terää alaspäin painavaa voimaa. Terää alaspäin painavan voiman suurentaminen voi johtaa terän muokkauslujittumiseen. Tällaisella terällä leikkaus voi aiheuttaa vastimen vaurioitumisen, joka johtaa vastimen vaihtoon. [17, s. 5,13.]

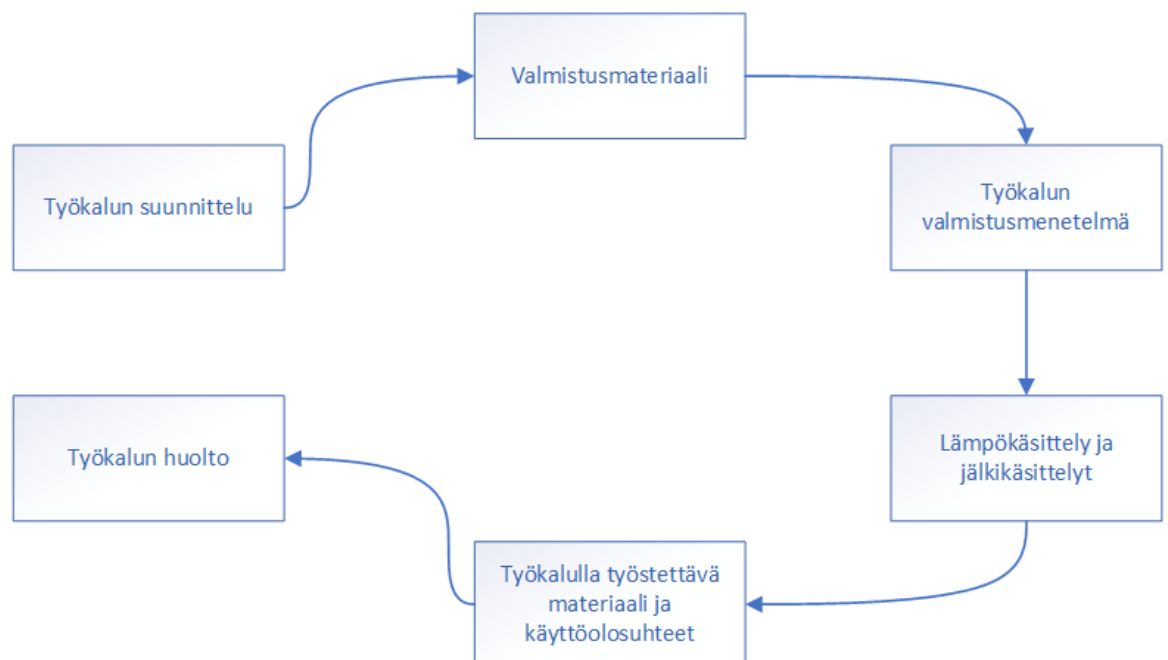


Kuva 13. Poikkileikkaus kuluneesta terästä.

Materiaalin muokkauslujittumisella tarkoitetaan tilannetta, jossa kylmään teräkseen kohdistuva voima liikkuu toistuvasti materiaalin kimmoisella muodonmuutosalueella. Tällöin materiaali muokkauslujittuu tiettyyn pisteeseen asti. Tämä tarkoittaa myös myötölujuuden kasvamista. Lopulta materiaalin myötölujuus ei voi kasvaa enää, vaan materiaali murtuu voiman ylittäessä sen. [18, s. 67.]

### 3.2 Valmistusmateriaalit

Työkalun eli tässä tilanteessa leikkaavien terien materiaaleilta vaaditaan hyvinkin erilaisia ominaisuuksia eri tilanteissa. Useimmin esiintyvät vaatimukset kohdistuvat kovuuteen, kulumiskestävyyteen ja sitkeyteen. Toki vaatimuslista kasvaa, kun otetaan huomioon myös muut ominaisuudet käytön ja valmistuksen kannalta. Useasti materiaalilta vaaditaan kahden tai useamman ominaisuuden yhdistelmää, kuten esimerkiksi haettaessa työkalulta hyvää kulumiskestävyyttä ja sitkeyttä ovat ne harvoin saman materiaalin hyviä ominaisuuksia. Materiaalivalinnassa joudutaankin usein turvautumaan kompromissiratkaisuun, jolla pyritään mahdollistamaan työkalulle mahdollisimman hyvä kestävyys. Työkalun käyttöikään vaikuttavat tekijät on esitetty kuvassa 14. [18, s. 148.]



Kuva 14. Työkalun käyttöikään vaikuttavat tekijät, mukailtu lähteestä [19].

Tässä työssä työkaluteräkset on jaettu kahteen eri pääryhmään, seostamattomat ja seostetut työkaluteräkset. Seostetut työkaluteräkset on jaettu vielä kolmeen alaryhmään, kylmätyöstöteräkset, kuumatyöstöteräkset ja pikateräkset. [20, s. 182.]

Kuitenkin on olemassa erilaisia luokitteluja, kuten esimerkiksi taulukon 1 AISI-SAE-luokittelu, joka on yleisin työkaluterästen luokitteluun käytetty standardi. Karkeasti jaoteltuna seostamattomat työkaluteräkset kuuluvat taulukon 1 kylmätyöteräkset veteen karkenevat-lokeroon ja seostetut muihin. [21.]

Käyttökohde	Tunnus	Ominaisuus
Pikateräkset	M	Molybdeeniä sisältävät
	T	Volframia sisältävät
Kuumatyöteräkset	H1-19	Kromia sisältävät
	H20-39	Volframia sisältävät
	H40-59	Molybdeeniä sisältävät
Kylmätyöteräkset	D	Korkea hiili- ja kromipitoisuus
	A	Ilmaan karkenevat
	O	Öljyyn karkenevat
	W	Veteen karkenevat
Iskunkestävät	S	Koostumukset vaihtelevat
Muottiteräkset	P	Koostumukset vaihtelevat
Erikoisteräkset	L	Niukkaseosteiset
	F	Hiiltä ja volframia sisältävät

Taulukko 1. AISI-SAE-työkaluteräsluokat, mukailtu lähteestä [21].



### 3.2.1 Seostamattomat työkaluteräksset

Seostamattomia työkaluteräksiä käytetään yleisesti halvimmissa ja yksinkertaisimmissa sovelluksissa, esimerkiksi meisseleissä, sahanterissä ja saksien terissä. Niille on tunnusomaista vähäinen karkenevuus, eli karkaisu ulottuu vain joitakin millimetrejä pinnasta sisälle päin kappaleen sydänosan säilyessä pehmeänä. Tästä ominaisuudesta on hyötyä tietyissä sovelluksissa, esimerkiksi kylmätyssäyöstökaluissa, joissa vaaditaan työkalulta tietynlaista joustavuutta käytön aikana. Karkaisussa saavutettu kovuus alkaa laskea noin 200 °C lämpötilassa, joten työkalun käyttölämpötilan on oltava tämän lämpötilan alapuolella. [20, s. 182.]

### 3.2.2 Seostetut työkaluteräksset

Seostettuihin työkaluteräksiin lisätään valmistusvaiheessa eri seosaineita, jotka lisäävät materiaalin kestävyyttä eri käyttötarkoituksissa. Niiden käyttökohteet ovat huomattavasti laajemmat kuin seostamattomien työkaluterästen. Yleisimmin käytettävät seosaineet ovat hiili, kromi, mangaani, molybdeeni, pii ja volframi tai niiden erilaiset yhdistelmät. [20, s. 181.]

Kylmätyöstöteräksiä käytetään, kun työkalu ja työstettävä kappale eivät oleellisesti lämpene työkalun käytön aikana. Työkalun ja työstettävän kappaleen lämpötilan on pysyttävä alle 200 °C, koska teräksen karkaisussa saavutettu kovuus alkaa laskea tämän lämpötilan jälkeen, aivan kuten seostamattomilla työkaluteräksillä. Niiden tyyppilliset käyttökohteet ovat pienet käsityökalut ja ohutlevytöiden työkalut. [20, s. 183.]

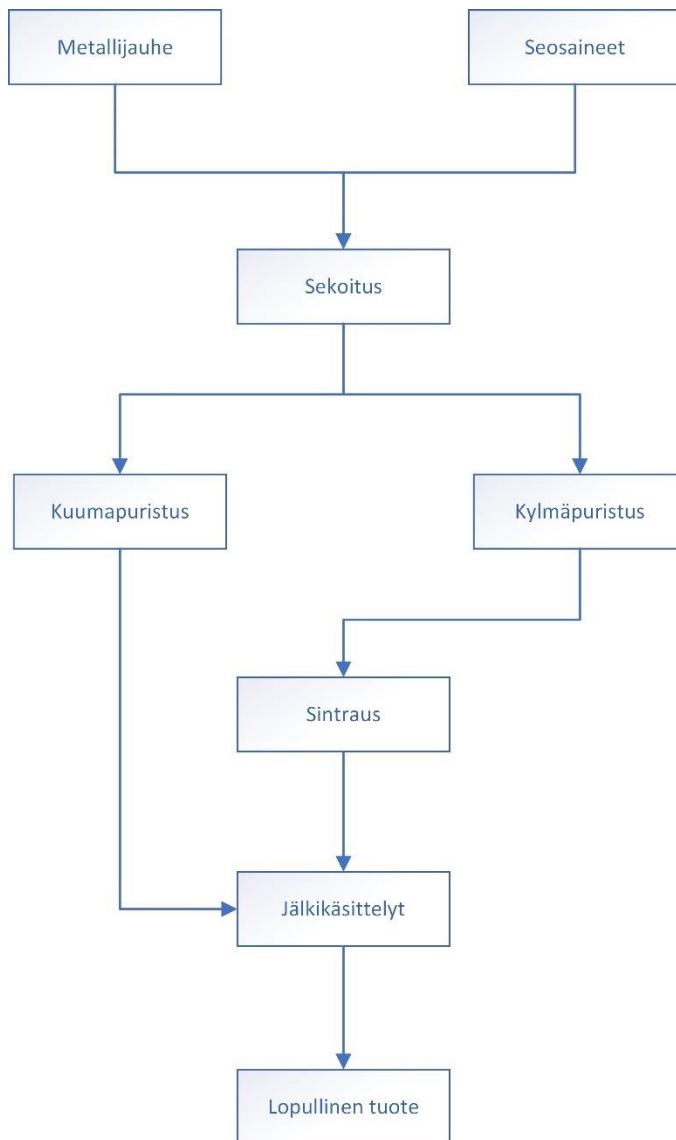
Kuumatyöstöteräksiä käytetään, kun työkalu ja työstettävä kappale lämpenevät tai jos työkalu joutuu vuorotellen lämpenemään ja jäähtymään työstön aikana. Käyttölämpötilat näillä työkaluilla ovat tyyppillisesti yli 200 °C. Yleisimpiä käyttökohteita kuumatyöstöteräksestä valmistetuilla työkaluille ovat painevalu- ja taontamuotit ja vetotyökalut. Seostuksen määrä on yleensä runsas, koska se takaa teräksen hyvän karkenevuuden ja työskentelylämpötilaa suuremman päästölämpötilan eli korkean kuumalujuuden. [20, s. 186.]

Pikateräksestä valmistettuja työkaluja käytetään pääsääntöisesti lastuaviin työstömenetelmiin, mutta niitä käytetään myös jossain määrin muovaaviin työkaluihin ja leikkaimiin. Pikateräksillä saavutetaan hyvä kuumalujuus, niiden kemiallisen koostumuksen ja lämpökäsittelyn ansiosta. Pikateräksestä valmistetut työkalut säilyttävät leikkuukykynsä jopa 600 °C lämpötilaan saakka. Niiden pääasialliset seosaineet ovat hiili, kromi, volframi, vanadiini ja molybdeeni, myös kobolttia

voidaan käyttää kuumakovuuden parantamiseen. Pikaterästen ollessa runsaasti seostettuja niiden rakenne muodostuu helposti epähomogeeniseksi. Epähomogeenisyys vaikeuttaa mm. työkalun valmistusta, koska materiaali ei ole tasalaatuista. Pikateräksestä valmistettuja työkaluja voidaan myös pinnoittaa. Pinnoituksen ansiosta mm. työkalun pinnan kovuus paranee ja sitä kautta sen käyttöikä pidentyy. [20, s. 189.]

Erilaiset kovametallit ja keraamiset teräaineet ovat syrjäyttäneet jonkin verran pikateräksiä paremman kestäväytensä ansiosta. Pikateräs on silti merkittävässä asemassa, koska siitä on halvempi valmistaa työkaluja sen paremman lastuttavuuden ansiosta.

Nykypäivänä on yhä kovempia ja kestävämpiä materiaaleja, mikä on aiheuttanut yhdessä tuotantotehokkuus vaatimusten kasvaessa sen, ettei pikaterästen käyttö ole aina enää kannattavaa ja tarkoituksenmukaista työkalujen materiaalina. Pikateräksistä on olemassa erilaisia variaatioita, kuten jauhemetallurgisesti valmistettu pikateräs. Se tarjoaa mahdollisuuden valmistaa materiaali, jossa kovien karbidien osuus voidaan nostaa jopa 90 prosenttiin asti perinteisen pikateräksen 30 prosentin sijaan. Jauhemetallurgisesti valmistettu tuote valmistetaan seostetusta metallijauheesta, joka puristetaan haluttuun muotoon ja kiinteytetään lopuksi sintraamalla. Kuvassa 15 on jauhemetallurginen valmistusprosessi. Tästä valmistusmenetelmästä on etua, koska pikateräkselle helposti muodostuva epähomogeeninen rakenne saadaan poistettua käyttämällä hienojakoista homogeenistä jauhetta. [20, s. 192.]



Kuva 15. Jauhemetallurginen valmistusprosessi, mukailtu lähteestä [10].

Perinteinen kovametallikin valmistetaan jauhemetallurgisesti. Tästäkin on olemassa monia eri variaatioita seosaineiden suhteen, joilla säädellään materiaalin lopullisia ominaisuuksia. Kovametalleja voidaan päällystää esimerkiksi titaanikarbidikerroksella, jolloin sen kulumiskestävyys paranee huomattavasti pinnan koventuessa. [20, s. 192.]

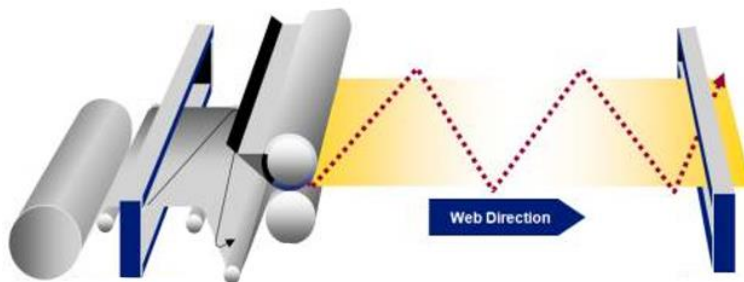
Keraamiset materiaalit tulivat markkinoille jo 1930-luvulla, ja niiden käyttö on ollut koko ajan lisääntymään päin, mutta haurautensa vuoksi ne eivät sovellu sellaisiin käyttötarkoituksiin, missä esiintyy jännityksiä. Keraamien käyttöä rajoittaa haurauden lisäksi niiden korkea hinta ja vaikea työstettävyys. Keraamien etuihin voidaan luokitella suuri jäykkyys, kovuus ja korkea sulamispiste. Keraamien rakenne on hyvin homogeeninen, koska nekin valmistetaan jauhemetallurgisesti. [20, s. 193.]

#### 4 Paperista ja kartongista mitattavat ominaisuudet

Paperista ja kartongista on mitattava erilaisia ominaisuuksia sekä valmistusprosessin aikana että lopputuotteesta. Ominaisuuksien mittaaminen on tärkeää, että valmistuksen aikana tulevat mahdolliset poikkeamat prosessissa osataan korjata. Näiden mittausten avulla osataan säätää prosessin toimivuutta haluttuun suuntaan. Lopputuotteesta tehtävillä mittauksilla voidaan varmistaa kunkin laadun laatukriteerien täytyminen.

##### 4.1 Mitattavat ominaisuudet valmistuksen aikana

Paperin ja kartongin ominaisuuksien online-mittauksia alettiin kehittämään jo 40-luvulla. Tällöin mittalaitteet olivat yksinkertaisia, paikallaan pysyviä antureita, jotka mittasivat mm. paksuutta, neliömassaa ja kosteutta. Vasta myöhemmin 60-luvulla traversoivat eli rainan yli edestakaisin liikkuvat anturit yleistyivät. Nykypäivän tehokkaisiin prosessoreihin yhdistettynä nämä anturit ovat tärkeä osa paperikoneen laadunhallintajärjestelmää. Niiden avulla onnistuu reaaliaikainen prosessin säätö paperikoneen käydessä. Kuitenkin tällaisilla mittalaitteilla on heikkoutena se, että ne voivat mitata vain pienen osan valmistettavasta laadusta, koska anturin liikuessa 40 sekunnissa 10 metriä leveään rainan yli on samanaikaisesti raina liikkunut jopa 1200 metriä. Tästä muodostuu rainaan kuvan 16 kaltainen z-muotoinen mittarata. Online-mittauksilla pystytään parhaimmillaankin vain arvioon mitattavasta suureesta, koska ne ovat pääsääntöisesti epäsuoria mittauksia. Epäsuoralla mittauksella tarkoitetaan, että esimerkiksi neliöpainon mittaaminen perustuu rainan paksuuden, kosteuden ja muiden arvojen mittaukseen. Neliöpainoa ei voida mitata suorasti, ottamalla rainasta palasta ja punnitsemalla sitä. [4, s. 236.]



Kuva 16. Paperin online-mittaus [22].

## 4.2 Mitattavat ominaisuudet lopputuotteesta

Online-mittauksien lisäksi tarvitaan tarkempia mittauksia prosessin säätelyyn ja laadun mittaukseen. Tämä onnistuu ottamalla valmiista konerullasta näyte, jota voidaan analysoida erillisillä mittalaitteilla. Mitattavia ominaisuuksia on olemassa kymmeniä erilaisia. Valmiin tuotteen laadun mittaamiseen tarkoitettuja analysointilaitteita on olemassa joko manuaalisia tai automaattisia, jotka mittaavat ominaisuuksia valmiista tuotteesta. Valmiista tuotteesta voidaan mitata erilaisia ominaisuuksia sekä kone- että poikkisuuntaisesti. Konerullan konesuunta on se suunta, johon konerulla kiertyy. Konerullasta otettava näyte on paperikoneen poikkisuuntaisesti otettu, jolloin siitä käytetään nimeä poikkiratanäyte.

Manuaaliset mittalaitteet ovat suhteellisen yksinkertaisia laitteita verrattuna automaattisiin paperianalysointilaitteisiin. Niissä käyttäjä leikkaa oikeankokoisen mitattavan näytteen erillisellä leikkurilla ja asettaa sen mittalaitteeseen mittausta varten. Niissä ei ole minkäänlaista automatiikkaa näytteen leikkaukseen tai kuljetukseen, kuitenkin mittaustapahtuma on yleensä osittain automatisoitu tuloksen luotettavuuden takia. Näistä asioista johtuen manuaalinen mittalaite kykenee mittaamaan näytteestä vain yhden ominaisuuden kerrallaan. Se on huomattavasti hitaampi ja epätarkempi paperin ominaisuuksien analysoinnissa verrattuna automaattiseen analysointilaitteeseen.

Paperin ja kartongin ominaisuuksien mittaamiseen tarkoitettuja automaattisia analysointilaitteita on olemassa paria erilaista. Niissä molemmissa on sama perusperiaate, käyttäjä syöttää määrälävyisen näytteen koneeseen ja kone mittaa siitä halutut arvot. Mekaanisesti koneet eroavat toisistaan, esimerkiksi paperista leikattavan näytteen leikkausmenetelmällä. Toinen laite leikkaa esimerkiksi neliömassan mittausta varten tarvittavan vakiokokoinen näytteen lävistämällä ja toisessa se tapahtuu puskuleikkaamalla. Kuitenkin mittausten menetelmät noudattavat samoja standardeja molemmissa.

### 4.2.1 Vetolujuuden mittaus

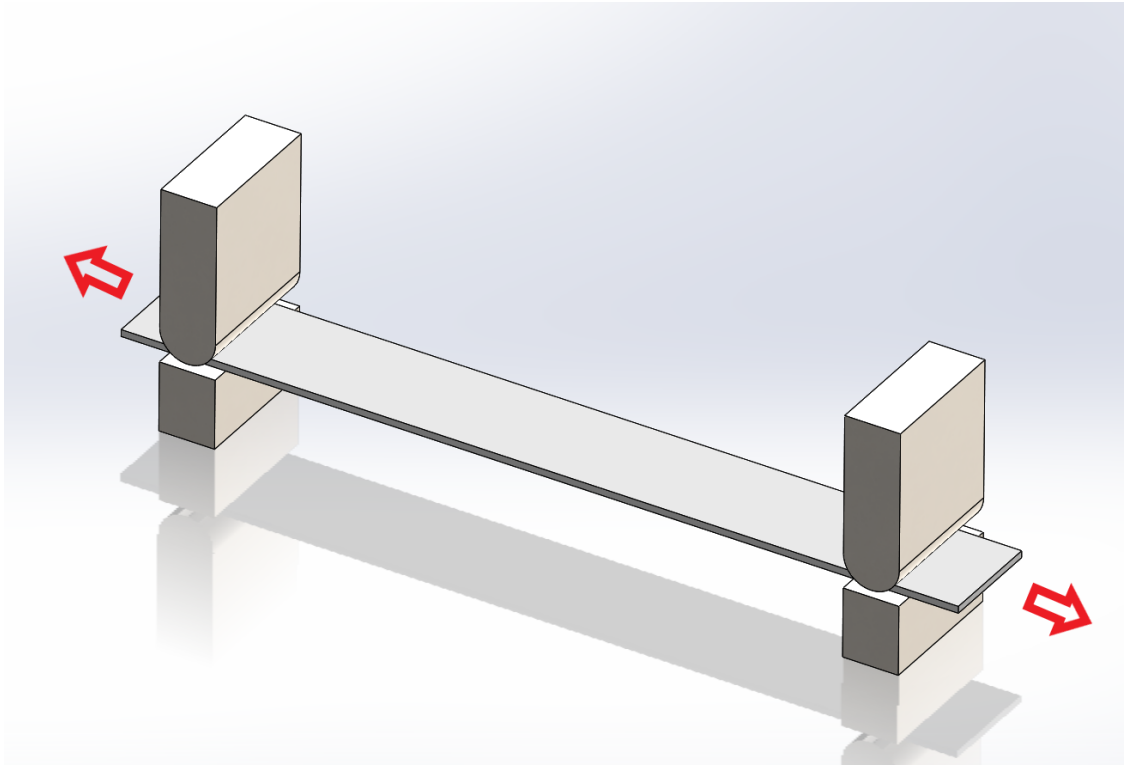
Vetolujuuden mittaus on yleisin mittaus valmiin tuotteen lujuusmittauksista. Paperin ja kartongin vetolujuutta mitataan useista eri syistä. Vetokokeiden tulosten avulla voidaan muun muassa hienosäätää valmistukseen käytettävän materiaalin koostumusta ja siitä voidaan ennustaa materiaalin käyttäytymistä muissakin kuormituksen muodoissa. Vetolujuuden mittaustapa määritellään tarkemmin standardissa ISO 1924-3. [23.]

#### 4.2.2 Standardi ISO 1924-3

Standardi ISO 1924-3 määrittelee vetolujuuden mittauksessa käytettävän mitattavan testiliuskan muodon ja mittausmenetelmän. Standardi käsittää menetelmän, jossa käytetään vakiovenytysnopeudella tapahtuvaa mittausta. Standardissa on määrätty testiliuskan koosta ja muodosta seuraavaa. Pitkien reunojen on oltava suoria, puhtaasti leikattuja ja yhdensuuntaisia. Yhdensuuntaisuus ei saa poiketa enempää kuin 0,1 mm. Pitkien reunojen etäisyys toisistaan on 15 mm  $\pm$ 0,1 mm, mutta myös 25 mm ja 50 mm etäisyyksiä voidaan käyttää samalla toleranssilla. Testattava näyte ei saa olla vahingoittunut eikä sitä saa altistaa kosteudelle, lämmölle tai muulle kosteutta muuttavalle tekijälle. Näytteen kosteuspiitoisuuden muutos vaikuttaa suuresti mittaustulokseen. [24.]

Standardi ISO 187 määrittää tarkemmin mittauspaikan sekä näytteen säilytyspaikan standardiolosuhteet. Standardissa mainitaan muun muassa, että ympäristön lämpötilan on oltava 23 °C  $\pm$  1 °C ja kosteuden 50 %  $\pm$ 2 %. Standardi käsittelee myös tarkemmin käytettävän mittalaitteiston lämpötilalle ja kosteudelle, sekä testattavan näytteen totuttamisen ympäristön lämpötilaan. [26.]

Mittausmenetelmä on määritelty standardissa huomattavasti tarkemmin kuin testiliuskan koko ja muoto. Mittaamisen aikana testiliuska kiinnitetään kahdella puristimella 100 mm etäisyydeltä toisistaan. Puristimien kiinnityspintojen täytyy olla muodoltaan sylinterimäisiä tai vaihtoehtoisesti toinen pinta voi olla tasopinta, kuten kuvassa 17. Kiinnitysvoiman on oltava niin suuri, ettei liuska pääse luistamaan puristimien välissä mittauksen aikana. Puristimien on oltava yhdensuuntaisia toisiinsa nähden ja niiden oltava kohtisuorassa liuskaan nähden. Itse vetolujuuden mittaus tapahtuu puristimien liikkeessä toisistaan poispäin. Puristimien liike jatkuu niin kauan, kunnes liuska on mennyt poikki. Tästä voimasta, joka tarvitaan liuskan katkaisemiseen, saadaan laskettua vetolujuus. [24.]



Kuva 17. Vetolujuuden mittaus standardin 1924-3 mukaan, mukailtu lähteestä [24].

Vetolujuus saadaan laskettua kaavasta 1. [24].

$$\sigma_T^b = \frac{\bar{F}_T}{b}$$

missä

$\sigma_T^b$  = Vetolujuus (kN/m)

$\bar{F}_T$  = Maksimivoima (kN)

b = Testiliuskan leveys (m)

## 5 Valmet Paper Lab

Paperin ja kartongin ominaisuuksien testaus manuaalisesti ei vastaa enää nykypäivän vaatimuksia. Se vie enemmän aikaa ja ei ole niin kustannustehokasta verrattuna automaattiseen testaukseen. Automaattisen testauksen etuna on myös pienempi virheen mahdollisuus, koska kone hoitaa testauksen automaattisesti ilman ihmisen tuomaa ”virheen mahdollisuutta”.

Valmet Paper Lab -analysointilaitte, kuva 18, on monipuolinen automaattinen paperin ja kartongin testauslaitte. Se pystyy testaamaan lähes kaikkien paperi- ja kartonkilaatujen useat eri tärkeitä ominaisuuksia paperin valmistuksen ja loppukäytön kannalta. Analysointilaitte voidaan sijoittaa sinne, mistä siitä saadaan suurin hyöty. Kuten esimerkiksi tuotantolinjan viereen jolloin se on helposti koneenkäyttäjien saatavilla. Näytteestä mitattavat ominaisuudet riippuvat laitteessa olevasta moduulikonaisuudesta, jonka asiakas on saanut itse määrittellä. Mitattuja parametreja voidaan lukea suoraan tietokoneen näytöltä, ja ne voidaan myös tulostaa erilliselle paperille. Laitte voidaan myös linkittää tehtaan tietojärjestelmään, jolloin mittaustulokset ovat helposti luettavissa eri sijainneista. [25.]



Kuva 18. Valmet Paper Lab [27].



## 5.1 Toimintaperiaate

Paper Lab -analysointiin voidaan syöttää erikokoisia arkinäytteitä ja määrälevisiä rullalle kierrettyjä poikkiratanäytteitä. Ennen näytteen testausta laitteeseen syötetään näytetiedot, joiden perusteella mittaukset suoritetaan ennalta ohjelmoidun testaussekvenssin mukaisesti. Näytetiedot voidaan lukea näytteestä myös viivakoodinlukijalla. Käyttäjä asettaa näytteen syöttölaitteen kasettiin, josta näyte siirtyy analysointin mittausmoduuleille. Näytteen mittauksen jälkeen mitaustulokset ovat luettavissa ohjauslaitteiston näytöltä, erillisestä tulostetusta raportista ja/tai ne ovat siirtyneet tehtaan tietojärjestelmään.

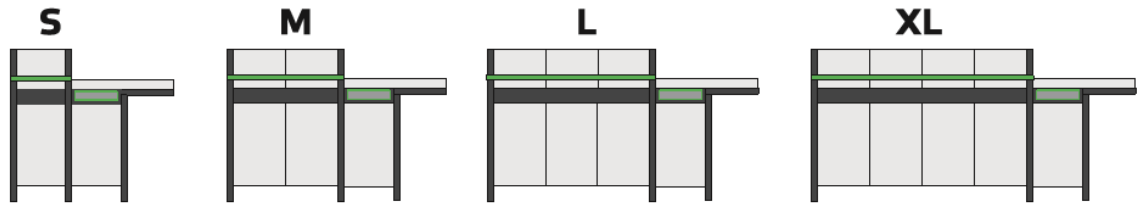
Analysointilla voidaan testata myös erikokoisia ja -muotoisia näytteitä manuaalisesti. Tällöin moduulikehikko avataan, näyte asetetaan kuvan 19 mukaisesti halutun moduulin päälle, kehikko suljetaan ja mittaus käynnistetään.



Kuva 19. Irrallisen näytteen testaaminen [25].

## 5.2 Analysaattorin pääosat

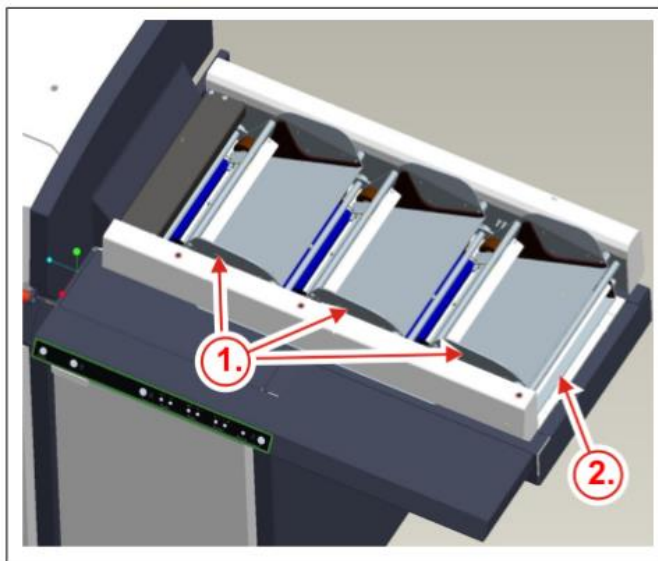
Paper Lab -analyssaattorin pääosiin kuuluu perusyksikkö, syöttölaitteisto, mittaavat moduulit ja ohjauslaitteisto. Sitä on saatavana neljänä eri kokoonpanona s, m, l ja xl, jotka on esitetty kuvassa 20. Pienin niistä sisältää yhden perusyksikön ja suurin neljä perusyksikköä. Analyssaattorin muut pääosat ovat samat kaikissa kokoonpanoissa.



Malli	Paper Lab S	Paper Lab M	Paper Lab L	Paper Lab XL
Leveys	1610 mm	2060 mm	2510 mm	2960 mm
Korkeus	1300 mm	1300 mm	1300 mm	1300 mm
Syvyys	820 mm	820 mm	820 mm	820 mm
Koko (soluja)	15	30	45	60
Paino (ilman moduuleita)	230 kg	n. 350 kg	n. 470 kg	n. 590 kg

Kuva 20. Paper Lab analyssaattoreiden koko vaihtoehdot [25].

Perusyksikkö koostuu avattavasta moduulikehikosta. Kehikon ylä- ja alaosassa on molemmissa 15 kappaletta neliön muotoista solua. Moduulikehikon modulaarisen rakenteen vuoksi laite on helpposti muunneltavissa asiakkaan tarpeisiin, koska mittausmoduulit on mitoitettu solujen mukaan. Kuvassa 21 on syöttölaitteisto. Syöttölaitteistossa on kolme kasettisyksikköä ja yksi ohisyöttöyksikkö. Ohisyöttöyksikköön voidaan asentaa optiona saatavana neljäs kasettisyksikkö.



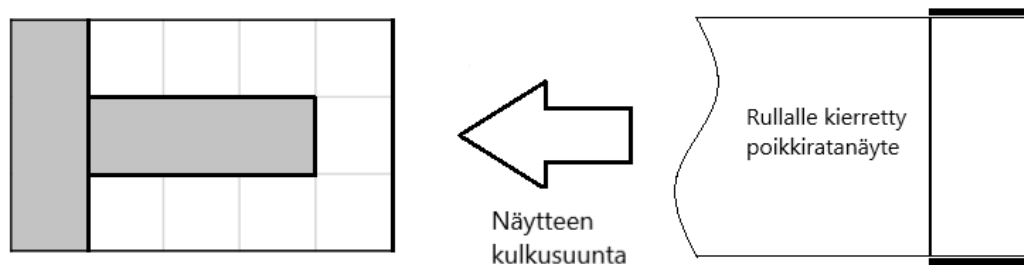
Kuva 21. Syöttölaitteisto: 1. kasettisyksiköt 2. ohisyöttöyksikkö [25].

Analysaattorin ohjauslaitteiston pääosat koostuvat ohjaustietokoneesta, näytöstä ja käyttöpaneelista. Ohjaustietokoneen käyttöliittymänä toimii nykyisin Linux, joka on korvannut entisen Windows-pohjaisen käyttöliittymän. Käyttöpaneeliin on sijoitettu käytönkannalta oleelliset merkivalot ja ohjauspainikkeet.

### 5.3 Moduulit

Paper Lab analysaattoriin on saatavana yli 20 erilaista mittaavaa moduulia, jotka pystyvät mittaamaan yhteensä yli 400 ominaisuutta paperista. Moduulit täyttävät sekä ISO- että paperiteollisuusyhdistysten asettamat standardit. [27.]

Analysaattorin modulaarisen rakenteen ansiosta moduulit voidaan sijoittaa laitteeseen koneen- tai poikkisuuntaisesti, kuten kuvassa 22 on esitetty. Näin poikkiratanäytteestä onnistuu näytteen analysointi paperikoneen- ja/tai poikkisuuntaisesti. Paperikoneen poikkisuunta on näytteen kulkusuunta analysaattorissa.

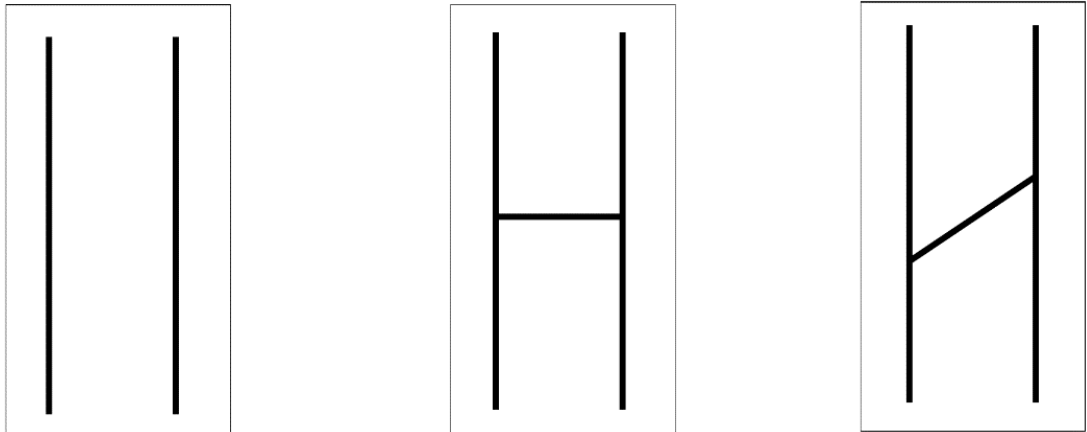


Kuva 22. Moduulien sijoittelu analysaattorissa koneen- ja poikkisuuntaisesti.

### 5.4 Leikkaavat moduulit

Paper Labissa on kuusi erilaista moduulia, joiden mittaustapahtumaa varten tarvitaan näytteen leikkaamista. Moduulit mittaavat näytteen vetolujuutta, puristuskestävyyttä, taivutusjäykkyyttä ja neliöpainoa. Taivutusjäykkyydmoduulista on omat versiot paperille ja pahville. Neliöpainomoduulista on kaksi eri kokoversiota. Moduulit on sijoitettu testiradan loppupäähän eli analysaattorin vasempaan reunaan, jotta leikattu näyte ei häiritsisi näytettä rikkomattomien moduulien toimintaa.

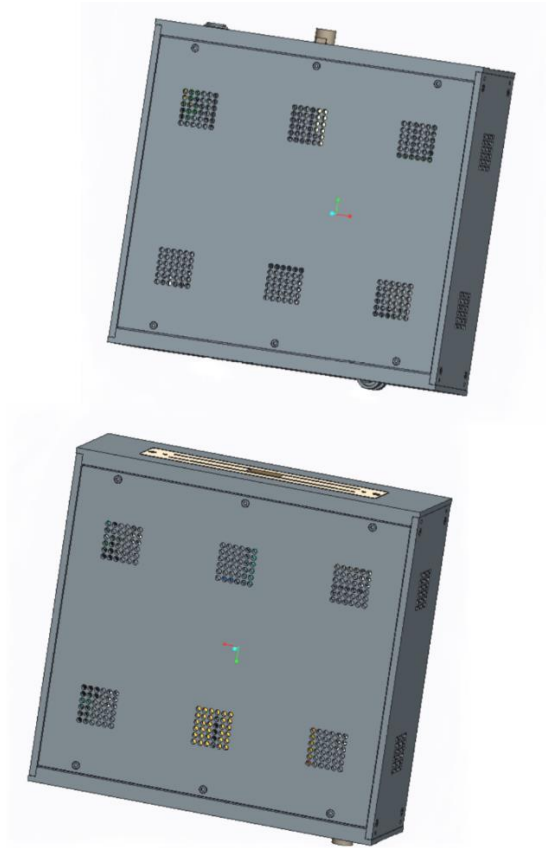
Näytteen leikkaus tapahtuu automaattisesti ennen näytteen varsinaista mittaamista kussakin moduulissa. Vetolujuus- ja puristuskestävyysmoduuleissa näytteeseen leikataan kaksi samansuuntaista viiltoa, taivutusjäykkäysmoduuleissa leikataan näiden samansuuntaisten viiltojen välille lisäksi viilto  $90^\circ$  tai  $45^\circ$  kulmaan riippuen mitattavan näytteen laadusta, kuten kuvassa 23 on esitetty. Neliöpainomoduuleissa leikattavan näytteen muoto on pyöreä. Näytteestä leikattavan testiliuskan koko ja muoto on tarkoin määritelty standardeissa.



Kuva 23. Vetolujuus-, puristuskestävyys- ja taivutusmoduulien leikkausmuodot.

### 5.5 Vetolujuusmoduuli

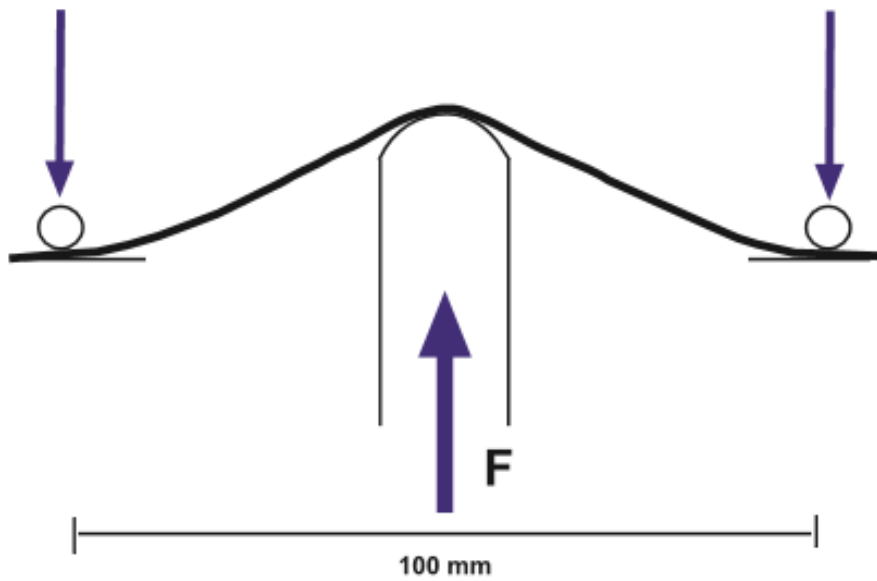
Vetolujuusmoduuli, kuvassa 24, mittaa paperin tai kartongin vetolujuutta, joka on monelle eri laadulle tärkein lujuusominaisuus. Vetolujuusmoduuli sisältää ylä- ja alamoduulin, jotka yhdessä mahdollistavat näytteestä mm. vetolujuuden ja vetoindeksin mittaamisen. Sekä ylä- että alamoduuli ovat kolmen solun kokoisia ja ne voidaan asentaa Paper Lab-laitteeseen joko koneen- tai poikkisuuntaisesti.



Kuva 24. Vetolujuusmoduulin ylä- ja alamoduuli

Moduuli leikkaa näytteeseen kuvan 23 vasemman reunan mukaiset yhdensuuntaiset viillot, jotka ovat noin 120 mm pitkiä ja 15 mm etäisyydellä toisistaan. Leikkauksen aikana näytettä pidetään paikoillaan ylämoduulista laskeutuvien tappien avulla. Leikattu testiliuska kiinnitetään kahdella kiinnittimellä, joiden välinen etäisyys on 100 mm. Tämän jälkeen testiliuskaa painetaan keskeltä ylöspäin, jolloin testiliuskaan kohdistuu venyttävä voima. Painamista jatketaan niin kauan, että liuska katkeaa. Voimasta, mikä tarvitaan liuskan katkaisemiseen, voidaan laskea vetolujuus, murtovenymä ja murtotyö. Moduulin mittaussuunnitelma pohjautuu standardiin ISO 1924-3. [25.]

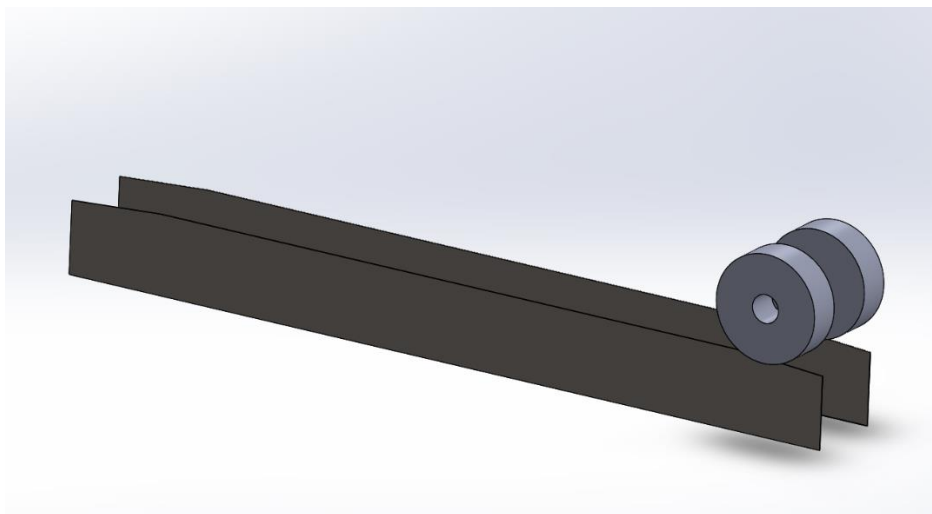
Valmetin vetolujuusmoduulin mittaussuunnitelma eroaa standardista siten, että siinä testiliuskaa pitävät puristimet eivät liiku. Puristimet pitävät liuskaa paikoillaan ja erillinen painin painaa liuskaa, jolloin siihen kohdistuu vetoa, kuten kuvassa 25 on esitetty.



Kuva 25. Vetolujuusmoduulin mittausperiaate [25].

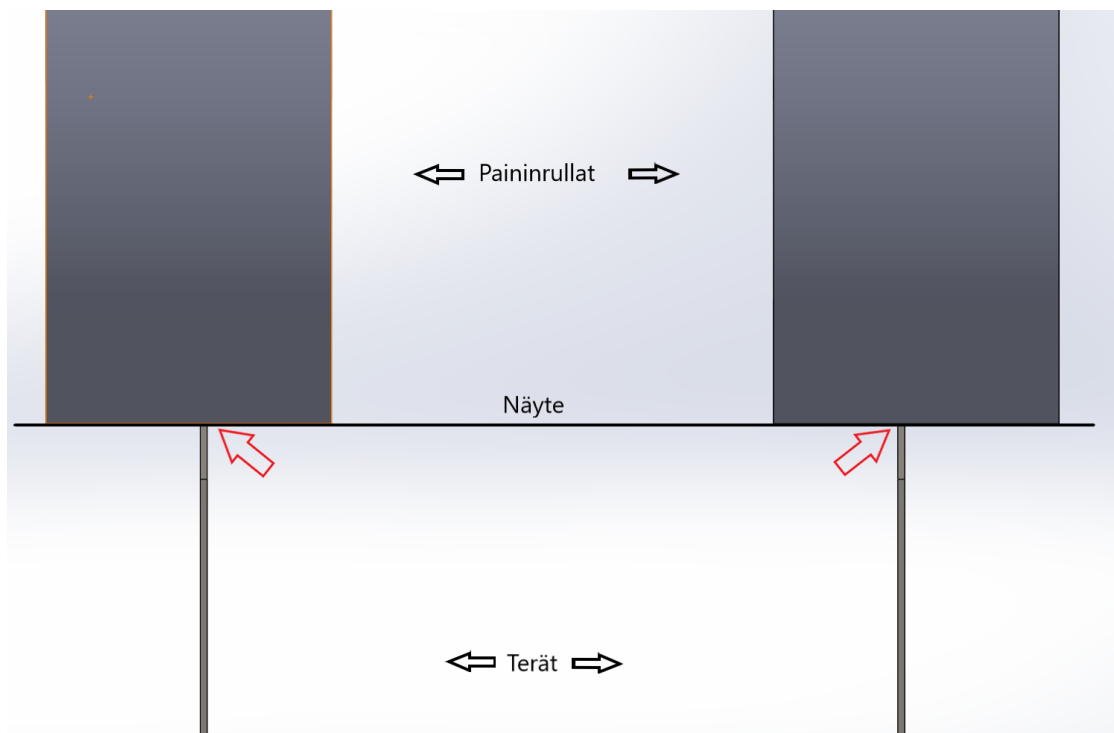
#### 5.5.1 Leikkaustekniikka

Moduulin leikkaustekniikkaa voi verrata puskuleikkaukseen. Leikkaavina terinä käytetään alamoduulissa sijaitsevia teriä, jotka pysyvät paikoillaan leikkauksen aikana. Teriä vasten rullataan laakeroituja paininrullia, jolloin näyte ”murskaantuu” niiden välissä ja leikkaus tapahtuu. Paininrullat ja niiden mekanismi sijaitsee ylämoduulissa. Kuvassa 26 on periaatekuva vetolujuusmoduulin leikkausmekanismista. Kuvassa nähdään terät ja paininrullat, jotka rullaavat teriä pitkin edestakaisin noin 120 mm matkalla yli 0,5 m/s keskinopeudella. Keskinopeus on laskettu kaavalla 2.



Kuva 26. Vetolujuusmoduulin leikkausmekanismi.

Paininrullien painaessa terää vasten näyte leikkautuu kuvassa 27 näkyvien leikkaavien kulmien kohdalta. Paininrullat liikkuvat eräänlaisen heilurimekanismin avulla, kuitenkin niin, että rullat seuraavat terän pintaa koko ajan. Mekanismin käyttövoimana toimii paineilma. Leikkaustapahtuman alussa terät nousevat alamoduulista esiin ja rullat laskeutuvat ylämoduulista alamoduulin pinnalle terien toiseen päähän, kuten kuvassa 26. Leikkaustapahtuman lopuksi rullat nousevat takaisin ylämoduulin sisään samasta paikasta ja terät laskeutuvat alamoduulin sisään.

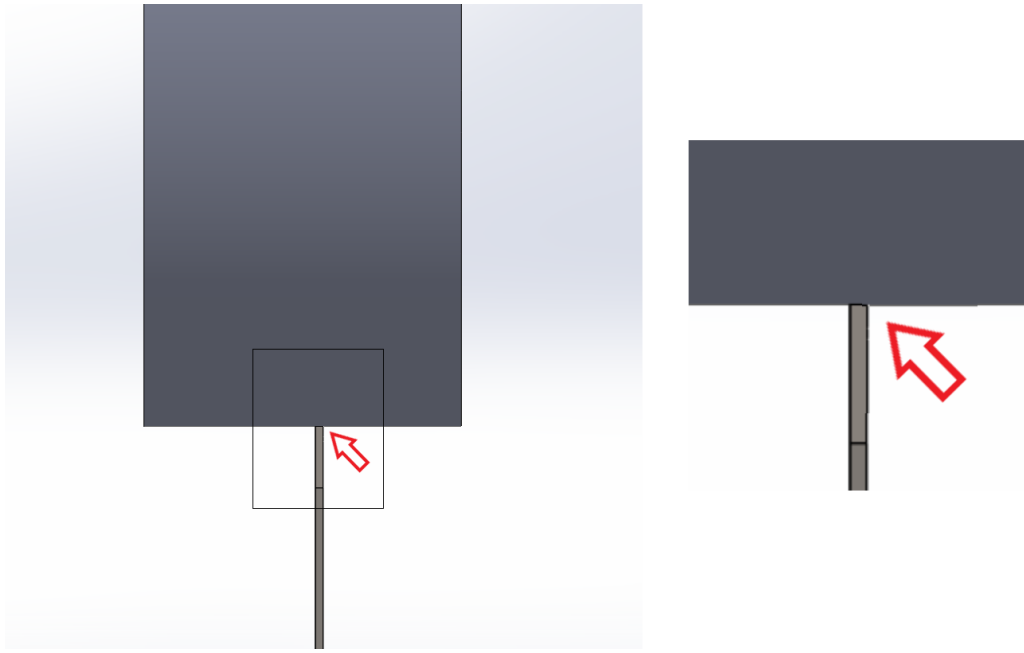


Kuva 27. Poikkileikkaus leikkausperiaatteesta.

### 5.5.2 Terän profiili ja materiaali

Vetolujuusmoduulin terät on valmistettu karkaistusta pikateräsaihiosta. Käytetyn pikateräksen laatu on AISI T-1/DIN 1.3355, joka sisältää mm. 18 % volframia. Käytetty materiaali on yleisesti käytössä esimerkiksi leikkaustyökaluissa. T-1-laatua käyttämällä saavutetaan työkalulle korkea kovuus, lujuus, sitkeys ja lämmönkestävyys. Lämpökäsitellyn terän lopullinen kovuus on noin 62–66 HRC. [28].

Koska vetolujuusmoduulissa käytetty leikkausmenetelmä muistuttaa puskuleikkausta, terän profiili ei voi olla täysin terävä. Kuvassa 28 nähdään suurennos terän ja paininrullan poikkileikkauksesta. Terän profiili on tasainen siitä kohdasta, johon paininrulla vastaa.



Kuva 28. Poikkileikkaus terän ja paininrollan kosketuspinnasta.



## 6 Kehitystarpeet

Vetolujuusmoduulissa näytteen leikkaustapahtumassa muodostuu moduulin sisälle ja ympäristöön näytteestä tulevaa leikkausjätettä. Leikkausjäte koostuu pölystä ja muista näytteestä irtoavista ainesosista. Osa leikkauksen aikana irtoavista ainesosista kulkeutuu näytteen mukana Paper Lab -analysaattorista ulos, mutta osa irtoaineksesta jää laitteen sisälle.

Vetolujuusmoduulissa käytettävä leikkaustapahtuma vioittaa leikkausteriä. Leikkausterien vioittuminen on vaihtelevaa, riippuen mitattavan näytteen laadusta ja moduulin käyttöpaineesta. Vaikeimmissa käyttökohteissa terät menettävät leikkauskykynsä jo parin kuukauden käytön jälkeen, kun taas parhaassa tapauksessa terät kestävät vuoden vaihtovälin.

### 6.1 Leikkausjätteen aiheuttajat ja sen huoltotoimenpiteet nykyisessä järjestelmässä

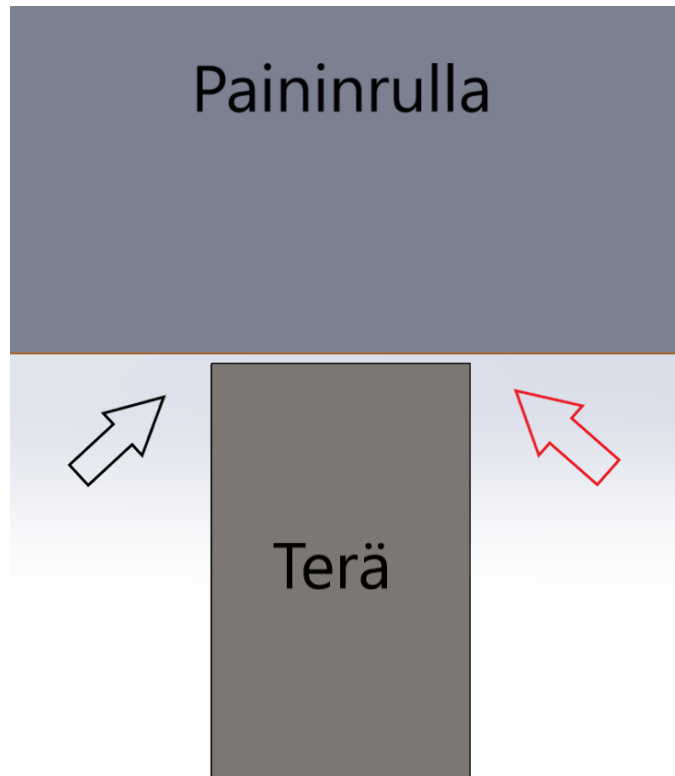
Pölyvän leikkausjätteen muodostuminen on koitunut analysaattorissa ongelmaksi. Se aiheuttaa jatkuvaa huollontarvetta laitteen käyttäjälle. Moduulin sisälle kertyvä pöly ja hyvin pienet näytteen palaset voivat aiheuttaa häiriöitä toimintaan. Tällöin moduuli on jopa irrotettava laitekehikosta ja lähetettävä huoltoon tai vaihtoehtoisesti tilattava huoltokäynti laitteen valmistajalta.

#### 6.1.1 Aiheuttajat

Leikkausjäte muodostuu pääsääntöisesti käytettävän leikkausmenetelmän takia. Puskuleikkausmenetelmä yhdistettynä paininrullien sahaavaan liikkeeseen aiheuttaa joillakin materiaaliladuilla todella paljon näytteestä irtoavaa leikkausjätettä. Kuten jo aikaisemmin on selvinnyt, puskuleikkaus aiheuttaa kaikista eniten irtoavia ainesosia mekaanisista leikkausmenetelmistä. Yleensä puskuleikkauksessa käytetään terää, jonka leikkaava kärki on pyöristetty. Tässä tapauksessa terä on tasainen leikkaavalta pinnalta. Terän tasainen muoto todennäköisesti lisää irtoavan aineksen määrää, koska näytteen murskaantuessa tasaisen pinnan välissä siitä vapautuu ilmaan ja ympäristöön ainesosia.

Puskuleikkausmenetelmä yhdistettynä paininrullan edestakaiseen liikkeeseen aiheuttaa näytteestä irtoavia suikaleita. Suikaleiden muodostuminen johtuu käytettävän terän profiilista, koska

näyte pyrkii leikkautumaan myös kuvassa 29 näkyvän terän leikkaavan särmän vastakkaisella särmällä. Kuvaan 29 on merkitty punaisella nuolella särmä, joka on tarkoitettu leikkaavaksi reunaksi. Kuitenkin myös mustalla nuolella merkitty särmä leikkaa näytettä joissakin tilanteissa. Terän muoto on yksinkertaistettu, se on tietoturvasyistä kuvattu näin. Tällä tavalla leikkautunut näyte lisää entisestään leikkausjätteen määrää, koska leikattua reunaa muodostuu enemmän.



Kuva 29. Terän leikkaavat särmät.

Pölyä ja pientä irtoainesta muodostuu myös moduulin mittaustapahtuman aikana. Mittauksen aikana näyteliуска katkeaa repeytymällä, jonka johdosta tästäkin tapahtumasta vapautuu pölyä ja hyvin pientä irtoainesta. Tällä tavalla syntynyt roska on kuitenkin pieni osa kokonaismäärästä, ja sen syntyä on mahdotonta estää johtuen mittausten menetelmästä.

### 6.1.2 Huoltotoimenpiteet

Pölyn ja muun näytteestä syntyvän irtoaineksen poistamiseksi on moduulin käyttöohjeessa ylläpito-ohje. Irtonaiset roskat on poistettava kerran vuorossa imuroimalla alamoduulin päältä ja viikoittain moduulin kansilevyn alta [25]. Kansilevyn alta puhdistaminen vaatii kansilevyn irrotuksen.

Tämä toimenpide varsinkin aiheuttaa laitteen käyttäjälle ylimääräistä taakkaa muiden töiden lomassa. Kansilevyn irrotus on suhteellisen helppoa, mutta kuitenkin osalla asiakkaista toimenpide jää tekemättä. Huollon laiminlyöminen aiheuttaa materiaalin kertymisen myös syvemmälle moduulin sisään, jolloin pelkkä imurointi ei enää puhdistaa moduulia kunnolla. Pölyn ja irtoaineksen kertyminen alamoduulin sisään johtuu osittain myös terien ja mittauspään liikkeestä. Irtoaineksen peitossa olevien osien laskeutuessa moduulin sisään ne kuljettavat mukanaan ainesosia moduulin sisään.

## 6.2 Leikkausterien vioittuminen ja niiden huolto nykyisessä järjestelmässä

Leikkausterien leikkaustehon menetys on ongelma varsinkin silloin, kun joudutaan leikkaamaan samalla laitteella kahta tai useampaa laatua ja varsinkin silloin, kun laadut poikkeavat paljon ne-liöpainoltaan. Terien kuluminen johtaa epäonnistuneeseen leikkaukseen, mikä taas vaikuttaa mittauksen luotettavuuteen ja laitteiston toimintavarmuuteen.

### 6.2.1 Terien vikojen aiheuttajat

Vaikeasti leikattavilla materiaalilaaduilla terien kuluminen on nopeampaa. Vaikeasti leikattavalla tarkoitetaan laatuja, jotka ovat herkkiä terän kulumiselle, josta seuraa leikkauskyvyn menetys. Toisin sanottuna leikattaessa kuluneella terällä on eri laatuojen välillä suuri ero leikkauksen onnistumisessa. Joissakin tilanteissa samalla laitteella mitataan helposti ja vaikeasti leikkautuvia laatuja. Tällöin moduulin käyttöpaine ja leikkaussykliojen määrä joudutaan asettamaan vaikeasti leikkautuvan laadun mukaan. Tämä johtaa turhiin leikkaussykleihin helpommin leikkautuvilla laaduilla, koska paininrulla jatkaa liikkumista, vaikka näyte olisikin jo leikkautunut.

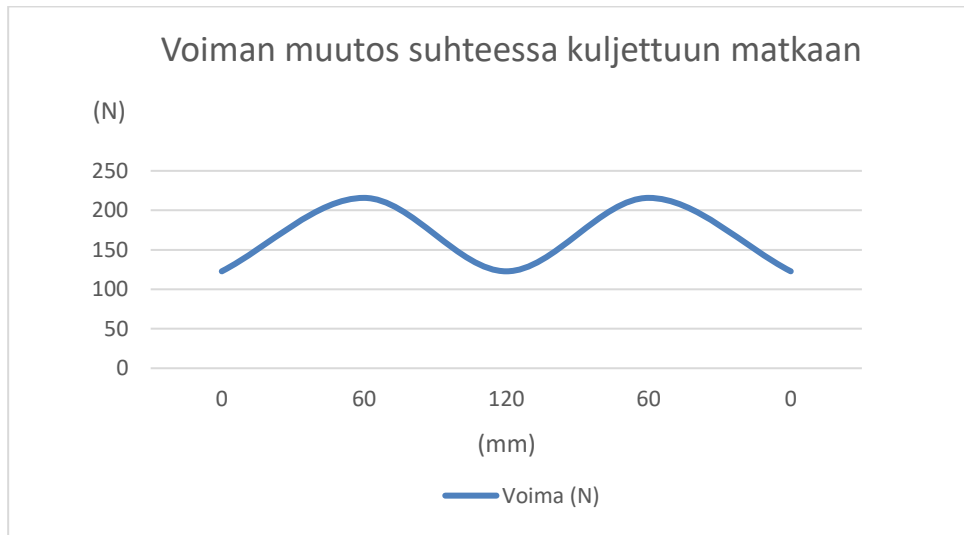
Terien leikkauskyvyn menetys johtuu suhteellisen kovasta voimasta, joka painaa paininrullia teriä vasten ja paininrullien turhasta liikkeestä, jolloin leikattava materiaali ei ole enää välissä. Näiden yhteisvaikutuksesta terissä tapahtuu plastinen muodonmuutos. Terien muodonmuutos on mahdollista, koska paininrullat ovat materiaaliltaan kovempia kuin terät. Muodonmuutos tapahtuu terän yläpinnalla leikkaavien särmien kohdilla kuvan 32 osoittamalla tavalla. Terän plastinen muodonmuutos tapahtuu, kun siihen kohdistuva voima ylittää materiaalin myötölujuuden.

Leikkaustapahtuman aikana ilmenee erilaisia rasituksia teriin ja paininrulliin. Pääasiassa terään kohdistuvat voimat ovat pystysuuntaisia. Ne muodostuvat paininrullan painaessa terää vasten ja dynaamisista voimista, jotka aiheutuvat paininrullan liikkuesssa terää pitkin sekä myös iskumaisista voimista paininrullan laskeutuessa terään kiinni leikkaustapahtuman alussa. Iskumainen voima muodostuu myös sellaisessa tilanteessa, kun näyte on vain osittain leikkaantunut leikkauksen aikana, kuten kuvassa 30 on tapahtunut. Silloin paininrulla laskeutuu näytteen päältä terän päälle leikkaustapahtuman aikana. Kuitenkin näin syntyvän iskumaisen voiman voidaan olettaa olevan vähäinen, koska näytteen materiaalista johtuen terän ja näytteen rajapintaan muodostuu eräänlainen liuska.



Kuva 30. Osittain leikkautunut näyte.

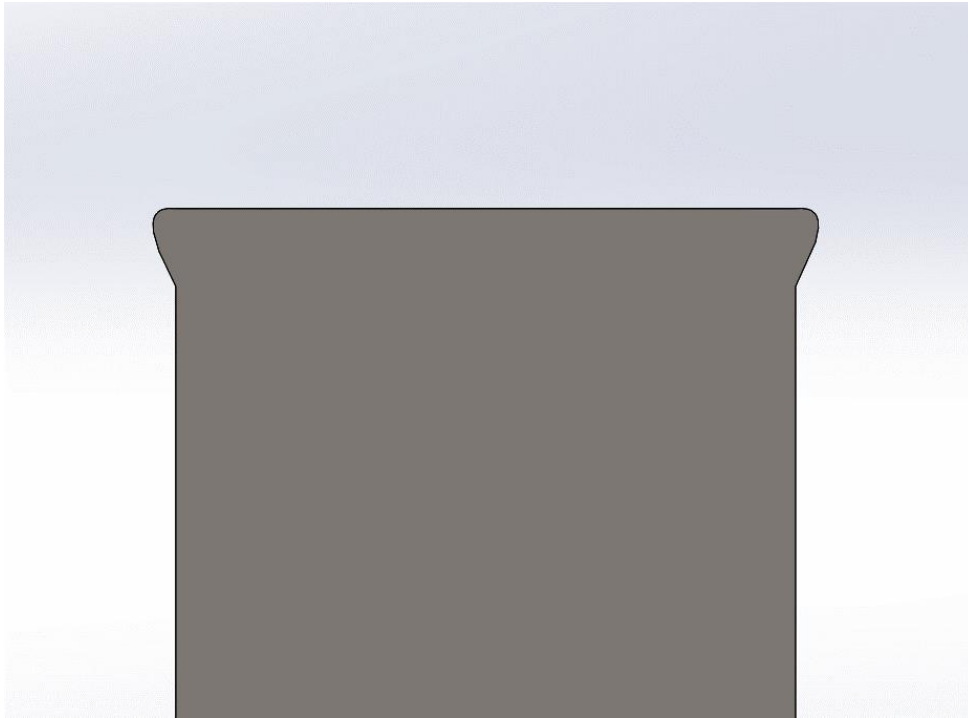
Koska paininrullia liikuttava mekanismi toimii heilurin tavoin ja sen käyttövoimana on paineilma, on rullien aiheuttama voima teriin muuttuva. Liitteessä 1 olevien kaavojen 3–6 perusteella voidaan todeta, että leikkauksen alkaessa yhteen terään kohdistuva voima on 122,75 N ja paininrullan ollessa terän puolivälissä voima on 215,75 N. Kuvassa 31 nähdään voiman muutos suhteessa kuljettuun matkaan. Kuvassa on esitetty paininrullan kulkema matka edestakaisin aloituspisteestä takaisin aloituspisteeseen.



Kuva 31. Paininrullan aiheuttama voima yhteen terään.

Kuten aikaisemmin todettiin, on terään kohdistuva puristava voima kohtalaisen suuri. Terään kohdistuva kosketusjännitys vaihtelee  $1750\text{--}2320\text{ N/mm}^2$  välillä 5 bar käyttöpaineella. Terän ja paininrullan välisen kosketuspinnan kosketusjännitys on laskettu liitteen 1 kaavalla 7. Teriin kohdistuvien voimien laskennassa ei ole otettu huomioon paineilmajärjestelmän mahdollisia paineenrajoittimia tai muita komponentteja, jotka voivat rajoittaa paineen nousua sylinterin painuessa kokoon.

Muodonmuutoksen tapahtuessa terässä sen leikkaamiseen tarkoitettu särmä pyöristyy, kuten kuvassa 32 on tapahtunut. Muodonmuutos alkaa terässä välittömästi, kun tarpeeksi suuri voima vaikuttaa siihen. Tätä tukee myös se, että helposti leikkautuvia laatuja leikatessa ja moduulin käyttöpaineen ollessa matala on terien kestävyys jopa yli viisinkertainen verrattuna suurella käyttöpaineella leikatessa. Kuitenkin terän kuluessa laitteen käyttäjä lisää monesti moduulin käyttöpainetta, jotta leikkaus onnistuisi. Tällä tavoin käyttäjä voi pidentää jo kuluneiden terien huoltoväliä säätämällä terän ja paininrullan välisen pintapaineen määrää.



Kuva 32. Plastinen muodonmuutos terässä.

Terissä tapahtuvan muodonmuutoksen ja muokkauslujittumisen myötä paininrullienkin pintaan muodostuu jälkiä teristä. Paininrullien pinta voi vioittua tilanteessa, jossa moduulin käyttöpainetta on jouduttu nostamaan halutun leikkaustuloksen aikaansaamiseksi. Käyttöpaineen noustessa ja terän muokkauslujituessa terän pinnasta tulee kovempi kuin paininrullien pinta. Käyttöpaineen nosto voi aiheuttaa myös paininrullassa olevan laakerin valmistajan suosittelemien kuorimitusarvojen ylittymisen. Varsinkin leikkaustilanteen alkuvaiheessa, kun paininrulla törmää terään suurella voimalla. Laakereiden vioittuessa on mahdollista, että ne eivät enää pyöri kunnolla. Tällöin on mahdollista, että ne laahaavat terää pitkin ja tilanteessa muodostuu adhesiivista kulumista yhdessä muodonmuutoksen kanssa.

### 6.2.2 Huolto

Terien vaihdolle ei ole käyttöohjeessa määritelty minkäänlaista vaihtoväliä. Terät vaihdetaan tarvittaessa. Terät toimitetaan kiinnitettynä teräyksikköön, joten käyttäjän on helppo suorittaa vaihtotyö. Terien vaihdon yhteydessä on vaihdettava myös paininrullat, koska vioittunut paininrulla kuluttaa uuden terän nopeammin [25].

Kuluneet terät voidaan huoltaa yhden kerran. Tällöin leikkaavista särmistä ja tasopinnasta hiontaan muodonmuutos pois. Terä luonnollisesti madaltuu tämän seurauksena, joten hiontaa ei voida tehdä kuin kerran, jotta voidaan taata terän toimivuus kaikilla materiaaleilla.

Hankalasti leikkautuville materiaaleille on olemassa myös erilainen terä, jota käytetään joissakin erikoistapauksissa. Sen teräprofiili on hieman erilainen verrattuna pääsääntöisesti käytössä olevaan terään. Kuitenkin leikkausperiaate on samanlainen kuin toisessakin terässä, leikkaavia särmämiä on kaksi ja terän päällä on tasopinta, jossa paininrulla rullaa. Terää käytetään yleisesti ohuimmille laaduille, koska teräprofiilin takia se ei ole soveltuva paksuimmille laaduille.

### 6.3 Johtopäätökset

Nykyisellä menetelmällä leikkausjätteen muodostuminen on väistämätöntä, mutta sen kehityksellä voitaisiin hallita tätä haittaa paremmin. Käytetyllä leikkausmenetelmällä on kuitenkin hyviä puolia. Sen toimintavarmuus ja terien kesto on useimmilla paperi- ja kartonkilaaduilla todella hyvä. Toimintavarmuus muodostuu suhteellisen yksinkertaisesta leikkausmekanismista sekä terien kestosta. Terien keston ollessa jopa vuoden luokkaa, kestäen satojatuhansia leikkauksia voi harkitsemattomalla leikkausmenetelmän muutoksella joutua helposti ojasta allikkoon. Vaikeimmissa käyttökohteissa terien kesto ei ole edes tyydyttävällä tasolla, jos terien kesto on 20 % siitä mitä ne kestävät parhaimmillaan. Leikkausterien kulumisen yhdessä puskuleikkauksen ja edestakaisin liikkuvien paininrullien kanssa muodostaa väistämättä leikkausjätettä leikkauksen aikana, joten jätteen hallinnalle olisi todella tarvetta.

## 7 Kehitysvaihtoehtoja

Erilaisia kehitysvaihtoehtoja ryhdyimme miettimään pääsääntöisesti joko leikkaustekniikan muutoksella tai nykyisen menetelmän kehityksellä paremmaksi, jotta leikkausterien kesto ja leikkausjätteen muodostuminen olisi halutulla tasolla. Perustavan laatuinen leikkausmenetelmän muutos olisi haasteellista, johtuen moduulin tiiviistä rakenteesta ja analysaattorin modulaarisuuden aiheuttamista reunaehdoista.

### 7.1 Nykyisen leikkausmenetelmän kehitysvaihtoehdot

Nykyisen leikkausmenetelmän muutoksessa oli päällimmäisenä mielessä leikkausjätteen muodostumisen ehkäisy tai sen hallittu poisto leikkaustapahtuman aikana, sekä nykyisten terien kulumiskestävyyden parantaminen tai leikkaustapahtuman tehostaminen leikkauskertojen vähentämiseksi ja siten kulumisen vähentämiseksi.

#### 7.1.1 Leikkausjätteen poistaminen leikkauksen aikana

Leikkausjätteiden poistaminen leikkauksen aikana olisi tehokkain tapa hallita irtoaineksien kulkumista moduuliin ja sen ympäristöön. Poistaminen voisi tapahtua leikkauskohtaan kohdennetulla imulaitteistolla. Kohdennettu imu tulisi sijoittaa sekä näytteen ylä- ja alapuolelle, jotta sen hyöty saataisiin maksimoitua ja siitä syntyisi merkittävää hyötyä. Imulaitteiston tehokkuuden olisi oltava suuri ja kohdennettu suoraan leikkauskohtaan. Imulaitteisto ei pysty poistamaan niitä paperisuikaleita ja pölypartikkeleita, jotka ovat vielä osittain kiinni näytteessä, koska nämä roskat varisevat yleensä näytteestä vasta myöhemmässä vaiheessa näytteen liikkeen tai mittauksen aikana. Irtoaines voi tarttua myös osittain staattisen sähköön vaikutuksesta näytteeseen ja moduulin osiin.

Pölynpoistolaitteisto voisi koostua ejektorilla toteutetusta imulaitteesta. Ejektorin toiminta perustuu paineilmaan, joten käyttövoima olisi helposti saatavilla moduulista. Ejektorin imun tulisi olla kuitenkin tarpeeksi tehokas, jotta se poistaisi irtonaiset roskat näytteestä ja sen ympäristöstä. Staattista sähköä pystyisi torjumaan erillisellä ionisaattorilla, joka poistaisi staattisen sähköön



muodostamat sidokset näytteestä ja sen irtonaisista ainesosista. Tällöin imulaitteisto pystyisi parempaan tehokkuuteen.

Paper Lab-analysointilaitteissa on aikaisemmin kokeiltu jo eräänlaista pölynpoistolaitteistoa. Tämä ei ole kuitenkaan toiminut toivotulla tavalla. Haasteeksi on koitunut muun muassa laitteiston heikko teho ja sijoitus analysointilaitteisiin. Samat ongelmat olisivat edessä ejektorilla toteutetuissa laitteistossa. Ionisaattori voisi korjata hieman hyötysuhdetta, mutta toimivan laitteiston sijoitus moduulin sisälle on nykyisellä kokoonpanolla lähes mahdotonta.

### 7.1.2 Leikkausterien materiaalivaihtoehdot

Terien leikkauskyvyn heikentyminen johtuu useimmiten terän leikkaavien särmien muodonmuutoksesta. Muodonmuutosta voi ehkäistä erilaisella terämateriaalilla tai yksinkertaisesti vähentämällä terään kohdistuvan pintajännityksen määrää. Koska pintajännityksen määrää vähentämällä ei saavuteta onnistunutta leikkausta, ovat ainoat vaihtoehdot joko vaihtaa nykyisen terän lämpökäsittelyä tai valita kokonaan uusi materiaali terään. Nykyisen terämateriaalin ollessa laadun AISI T-1/DIN 1.3355 pikaterästä ei sen lämpökäsittelyä muuttamalla päästäisi parempaan myötölujuuteen.

Leikkausterien vaihtoehtoiseksi materiaaliksi on olemassa useampiakin vaihtoehtoja. Nykyinen materiaali on laajasti käytetty esimerkiksi lastuavissa työkaluissa, joten se ei välttämättä ole aivan optimaalinen tällaiseen sovellukseen, jossa tarvitaan korkeaa myötölujuutta. Kuitenkin materiaalia vaihdettaessa on huomioitava, että materiaalin myötölujuuden lisääntyessä lisääntyy helposti myös lohkeiluriski. Nykyisessä terässä ei ole esiintynyt lohkeilua, joten uuden materiaalin ei tämän tekijän ei tarvitse olla niin suuressa roolissa valintaa tehdessä. Materiaalin valinnassa kannattaa pääpaino antaa materiaalin puristuskestävyydelle, kuitenkin unohtamatta kulumisen kestoa. Huomattavaa parannusta haettaessa materiaalin myötölujuudelle on siirryttävä erikoisteräksiin, jotka on valmistettu jauhemetallurgisesti. Tällä menetelmällä valmistettuja teräksiä ovat esimerkiksi Uddeholm Vanadis 8 SuperClean, CPM REX T15 ja Böhler S390 MICROCLEAR.

Kotimaisten materiaalitoimittajien kanssa käydyissä keskusteluissa nousi esille kaksi teräslaatua, jotka voisi sopia tähän tarkoitukseen. Ne olivat Uddeholm Vanadis 8 SuperClean ja Böhler S390. Koska Böhler S390 -teräksestä on olemassa jo kokemuksia ja se ei ole osoittautunut tähän menetelmään sopivaksi, jää tässä tilanteessa ainoaksi vaihtoehdoksi Vanadis 8-teräs.

Syyt miksi päädyimme tähän materiaaliin, olivat yksiselitteisiä. Teräs oli helposti saatavilla kotimaisilta terästoimittajilta ja se oli ainut, jota suositeltiin korvaavaksi materiaaliksi materiaalitoimittajien puolelta. Toki esimerkiksi kovametalliterää tai pikateräkseen juotettua kovametallipalaa mietittiin, mutta sen jatkojalostus jätettiin tämän työn ulkopuolelle. Niiden valmistukseen sopivien materiaalien ja toimittajien etsintään olisi kulunut kohtuuttoman paljon aikaa, huomioon ottaen käytettävän aikataulun.

## 7.2 Vaihtoehtoiset leikkausmenetelmät

Nykyisen leikkausmenetelmän muutosten lisäksi on hyvä punnita erilaisia vaihtoehtoja nykyiselle leikkausmenetelmälle. Menetelmiä arvioitiin asiantuntijaistunnoissa ja keskusteluissa. Menetelmistä tarkempaan arviointiin valittiin laserleikkaus ja ultraäänen avulla tehostettu leikkaus. Myös erilaiset mekaaniset leikkausmenetelmät, kuten saksileikkaus ja lävistäminen, nousivat puheenaiheeksi. Niistäkin tehtiin alustavaa tutkimusta jatkoa ajatellen.

### 7.2.1 Ultraäänileikkaus

Paperimateriaalien leikkausta ultraäänellä avulla on lähinnä kokeiltu erilaisten veitsien avulla, joihin on kiinnitetty ultraäänikide [29]. Ultraääntä pystyisi hyödyntämään nykyisessä leikkausmenetelmässä kiinnittämällä nykyiseen teräpakettiin ultraäänimuuntimen tai vaihtoehtoisesti pietsokiteen. Ultraäänen johtuessa nykyisiin teriin niiden leikkaustapahtuma tehostuisi. Ultraäänen avustamana paininrullien ei tarvitse painaa niin kovasti teriä vasten, jolloin teoriassa terän kesto parantuu ja paininrullien tekemää liikkeen määrää voidaan vähentää. Paininrullien tekemä liike muodostaa irtoainesta ja osittain näytteessä kiinni olevia liuskoja, joten näiden epätoivottujen asioiden ajateltiin vähenevän.

Tämä leikkausmenetelmä valittiin jatkokehitykseen, koska sen toimivuus on suhteellisen helposti kokeiltavissa jo paikan päältä löytyvillä laitteilla, ultraäänikomponenteilla ja moduulin osilla.

### 7.2.2 Laserleikkaus

Puupohjaisten materiaalien laserleikkaus on vielä suhteellisen vähän käytetty menetelmä. Puupohjaisten materiaalien leikkaukseen käytettävä hiilidioksidilaserlaitteisto on fyysisesti kookas ja hinnakas, joten sen asennus ei ole pienimpiin laitteisiin mahdollista ja kannattavaa. Hiilidioksidilaserin aallonpituuden ollessa 10,6  $\mu\text{m}$  se absorboituu hyvin vaaleisiin puupohjaisiin materiaaleihin [30]. Halvempiakin ja pienempiä laserlaitteistoja on saatavilla, ne pohjautuvat puolijohdelaserin käyttöön. Puolijohdelaserin käytössä on omat vaikeutensa sen tuottaman laservalon aallonpituudessa. Puolijohdelaserin aallonpituus on 750–870 nm. Se ei ole sopiva valkoisten puupohjaisten materiaalien leikkaukseen, johtuen valon huonosta absorboitumisesta [30]. Se ei yksinkertaisesti tehoa vaaleaan paperiin tai kartonkiin. Puolijohdelaserilla puupohjaisten materiaalien leikkaus vaatisi leikkauskohdan värjäämisen musteella tai laserin tehon olisi oltava hyvin suuri [30]. Leikkauskohdan värjääminen vaatisi monimutkaisia tulostinratkaisuja analysaattoriin, joten se ei tässä tilanteessa ole vaihtoehto. Suuritehoinen puolijohdelaser on taas fyysisesti liian suuri tähän tarkoitukseen.

Näiden teknisten reunaehtojen takia laserleikkaus tulisi olemaan suhteellisen haasteellinen toteuttaa analysaattorin moduulirakenteisiin. Lisäksi ongelmaksi voi muodostua laitteen käyttäjän turvallisuus ja vaikutelma laitteesta. Esimerkiksi lasersäteen polttavan vaikutuksen vaarallisuus ja mahdollinen leikkauksen aikana muodostuva savu ja haju on asioita, joiden estäminen ja käsittely on monimutkaista nykyisessä laitteessa työturvallisuuden kannalta.

### 7.2.3 Mekaaniset leikkaustavat

Erilaiset mekaaniset leikkaustavat ovat varteen otettavia vaihtoehtoja nykyisen menetelmän tilalle. Niistä erityisesti saksileikkaus ja lävistämisen tyylinen leikkaus ovat sellaisia, jotka voisivat olla hyviä menetelmiä leikkauksien suorittamiseen. Teräleikkausmenetelmällä on omat hankaluutensa, koska menetelmä soveltuu hyvin vain tietyille näytelaaduille. Paper Lab analysaattorilla voidaan leikata samassa käyttökohteessa useita eri näytelaatuja, joten sopivan terämateriaalin löytäminen olisi hankalaa, jotta se toimisi toivotulla tavalla kaikilla testattavilla näytelaaduilla.

Saksileikkausmenetelmän hyviä puolia ovat vähäinen pölyn muodostuminen verrattuna puskuleikkaukseen. Sen negatiivisena puolena on mekaanisesti monimutkikkaampi järjestelmä ja optimaalisen leikkausnopeuden, terämateriaalin ja profiilin löytäminen kullekin leikattavalle laadulle.

Leikkausnopeutta voidaan säätää ohjelmallisesti ennen kutakin näytelaatua, mutta terämateriaalin ja profiilin olisi oltava sellainen, joka käy kaikille eri laaduille, koska samalla analysaattorilla saatetaan mitata rakenteeltaan hyvinkin erilaisia näytteitä.

Lävistäminen olisi leikkausmenetelmänä toimintavarma, koska se sisältää liikkuvia osia todella vähän. Lävistämässä käytetään erillistä pistintä, joka painautuu leikattavan materiaalin läpi vastimena toimivaan tyynyn sisään. Tästä menetelmästä ei ole kuitenkaan toistaiseksi kokemusta sen terän kestoilta kuin leikkausreunan laadultaakaan. Lävistäminen on käytössä kilpailevan yrityksen analysaattorissa neliöpainon mittauksessa, mutta analysaattori on mekaaniselta rakenteeltaan erilainen kuin Paper Lab. Paper Lab-analysaattorissa lävistäminen olisi hankala toteuttaa, koska moduulikehikot liikkuvat saranan välityksellä, joten lävistämässä tarvittavia tarkkoja toleransseja terän ja tyynyn välillä voisi olla hankala toteuttaa. Niinpä menetelmien jatkokehitys jätettiin tämän työn ulkopuolelle.

## 8 Leikkausterien ja prototyypin valmistus

Työssä päädyimme testaamaan uutta terämateriaalia ja valmistamaan prototyypin. Prototyypissä käytettäisiin ultraääntä apuna leikkaustapahtumassa ja uudet terät valmistettaisiin Uddeholmin Vanadis 8 SuperClean-materiaalista. Näitä päätöksiä tuki osaltaan se, että prototyyppi olisi suhteellisen helppo valmistaa sekä kokeilla sen toimivuutta ja uudella terämateriaalilla saataisiin nopeasti tuloksia. Prototyyppi suunniteltiin SolidWorks- ja Creo-ohjelmia apuna käyttäen.

### 8.1 Leikkausterien valmistus

Terän valmistuksen onnistumiseen liittyy oleellisesti materiaali, työstö, lämpökäsittely ja viimeistely eli lopullinen teroitus. Näiden kaikkien tekijöiden ollessa linjassa keskenään syntyy lopputuloksesta onnistunut.

Terän lämpökäsittelylle saatiin ohjeet materiaalintoimittajalta [31]:

- Materiaalin toimituskovuus on 270 HB.
- Se kannattaa karkaista korkeimpaan kovuuteen, eli 64 HRC. Kuitenkin karkaisussa täytyy huolehtia tarkasti prosessista, jotta terän pintaan ei muodostu hiilenkatoa, joka johtaa terän alentuneeseen kovuuteen.

Näiden perusteella kysyttiin terän valmistajalta mahdollisia ongelmakohtia terän valmistuksessa tämänlaisesta materiaalista. Terän valmistaja ei nähnyt esteitä, etteikö terää voisi valmistaa kyseisestä materiaalista.

Materiaalia tilattiin toimittajalta kahteenkymmeneen terään, eli siitä saataisiin kymmenen valmista terää. Kuitenkin terävalmistajan ollessa yhteydessä lämpökäsittelijään kävi ilmi, että materiaali on niin hankalasti lämpökäsiteltävää, että on varauduttava mahdollisiin hukkakappaleisiin. Lämpökäsittelyn hankaluus johtui suurimmaksi osaksi terän profiilista, koska terän kapeimman ja leveimmän kohdan ero on merkittävä. Lämpökäsittelijä arvioi, että terä luultavasti vääntyilee ja osa teristä voi mennä pilalle lämpökäsittelyn aikana. Terän valmistajan arvio oli, että valmiita teriä saadaan noin 14 kappaletta, koska osalla teristä pitäisi kokeilla oikeaa lämpökäsittelytapaa. [32.]

Materiaalitoimittajan arvio lämpökäsittelystä oli hieman päinvastainen kuin lämpökäsittelijän. Heidän mukaansa lämpökäsittelyn onnistumisessa ei pitäisi olla esteitä. Lämpökäsittelyn voi suorittaa esimerkiksi laittamalla aihiot puristusjigiin, jotta vääntyily estyisi. Aihiot voisi myös esiko-neistaa lähelle oikeita mittoja ja lämpökäsittelyn jälkeen ne työstettäisiin oikeisiin mittoihin oikeilla työkaluilla ja oikeilla menetelmillä. Työstössä olisi huolehdittava, että terä ei lämpene työstön aikana, jotta se ei päästy takaisin pehmeäksi. Jos työstettäessä käytetään hiontalaikkoja, niiden on oltava ehdottomasti boorinitridilaikkoja. Alumiinioksidilaikat olisivat liian pehmeätä materiaalia työstämiseen. [31.]

Näiden selvitysten ja useiden sähköpostikeskusteluiden jälkeen tilasimme terät helmikuun alussa. Lopulliseksi terien määräksi arvioitiin 14 kappaletta. Toimitusajaksi arvioitiin terien valmistajan puolelta noin neljä viikkoa, kuitenkin emme ole saaneet uusia teriä vielä huhtikuun alussa. Terien valmistajan antamien väliaikatietojen mukaan terät ovat vääntyilleet lämpökäsittelyn aikana, kuten kuvasta 33 huomaa. Terien lopullisen teroituksen aikana selviää, onko niitä mahdollista oikaista ja työstää sen jälkeen lopullisiin mittoihin. Lämpökäsittelyssä oli käytetty materiaalitoimittajan ehdottamia menetelmiä vääntyilyn estämiseksi.



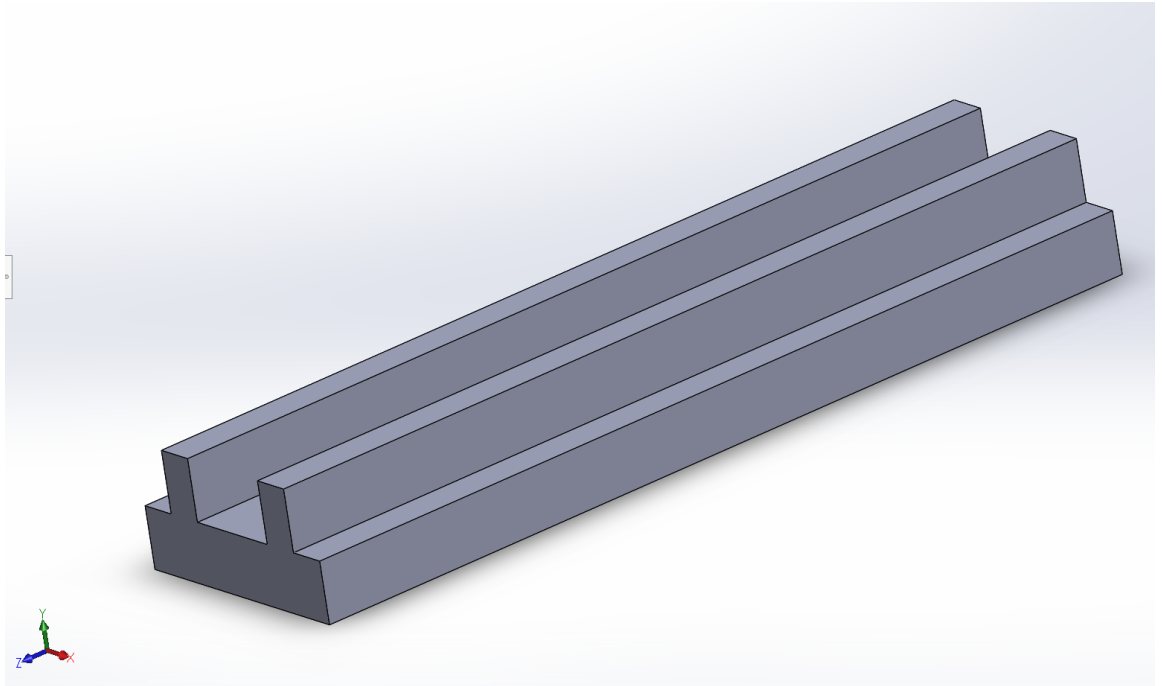
Kuva 33. Kolmen terän aihiot lämpökäsittelyn jälkeen.

## 8.2 Prototyypin suunnittelu ja valmistaminen

Prototyypin valmistuksessa oli ajatus käyttää jo olemassa olevia ultraäänikomponentteja ja varastosta löytyviä runkoa ja teräpakettia. Suunnittelun lähtökohtana oli asentaa ultraäänimuunnin teräpaketin päähän tai pohjaan. Niitä pitäisi pystyä käyttämään tarvittaessa yhtä aikaa ja niiden olisi mahdollista moduulin rungon sisään, jotta prototyyppiä voitaisiin tarvittaessa käyttää Paper Lab -analysaattorissa. Teräpaketin kiinnityksen moduuliin olisi oltava mahdollisimman samantyylinen, kuin se on normaalistikin vetolujuusmoduulissa. Lisäksi ultraääninmuuntimien olisi tarvittaessa oltava kiristettävissä teräpakettia vasten joko ruuvien tai jousen avulla.

### 8.2.1 Teräpaketin luontaisen resonanssitaajuuden laskenta

Teräpaketin luontaisen resonanssitaajuuden laskemisessa käytettiin SolidWorks-ohjelman Simulation-lisäosan frequency-tyyppiä. Luontaisen resonanssitaajuuden laskemisella haettiin sopivaa taajuutta, jota voitaisiin käyttää prototyyppissä. Prototyypin testaamisessa haluttiin välttää näitä luontaisia resonanssitaajuuksia. Luontaisen resonanssitaajuuden käyttö aiheuttaa rakenteisiin ei-toivottua resonointia, jolla puolestaan on haittaa moduulin käyttöikään. Ennakkotietojen mukaan paperin ultraäänileikkauksessa käytetään 40 kHz taajuutta, joten siksi valitsimme tämän taajuuden laskentaan. Simuloinnissa käytettiin muokattua teräpakettia eli sitä kokoonpanoa, joka tulisi käyttää myös prototyyppissä. Kokoonpanon kiinnityspisteet määrättiin simulaatiossa samanlaiseksi kuin ne tulisivat olemaan prototyyppissä. Ohjelma määrättiin laskemaan 200 kappaletta teräpaketin luontaisia resonanssitaajuuksia, jotka olisivat mahdollisimman lähellä 40 kHz taajuutta. Laskennan jälkeen tuloksista valittiin taajuudet, jotka ovat mahdollisimman lähellä 40 kHz taajuutta, mutta eivät kuitenkaan olisi luontaisia resonanssitaajuuksia. Taajuudet valittiin siten, että ne liikuttavat terää mahdollisimman paljon z-suunnassa sekä mahdollisimman vähän x- ja y-suunnassa. Tällä tavoin pyrittiin valitsemaan testausvaiheeseen oikea taajuus, joka mahdollistaisi terien mahdollisimman suuren liikkeen z-suunnassa. Terien z-suunnan liike saa aikaan niissä sahaamista muistuttavan liikkeen, tämän liikkeen takia leikkaustapahtuma helpottuu. Teräpaketin suunnat simulaatiossa on esitetty kuvassa 34. Laskennasta saadut taajuudet olivat käytössä prototyypin testaamisessa.

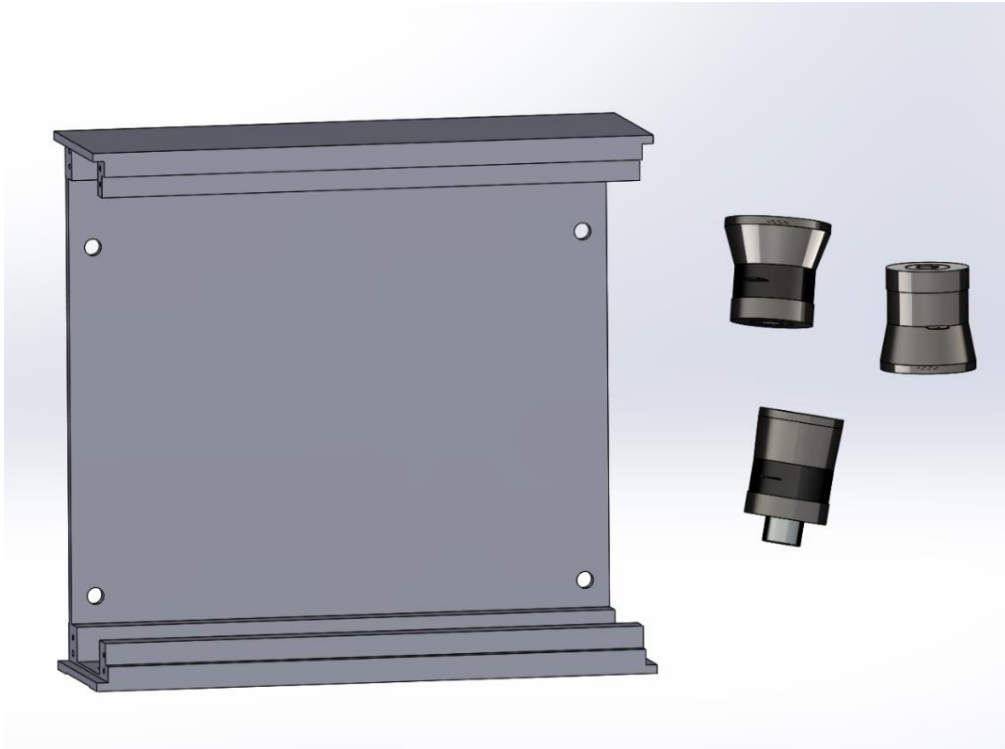


Kuva 34. Havaintokuva terien liikesuunnasta.

### 8.2.2 Mallintaminen

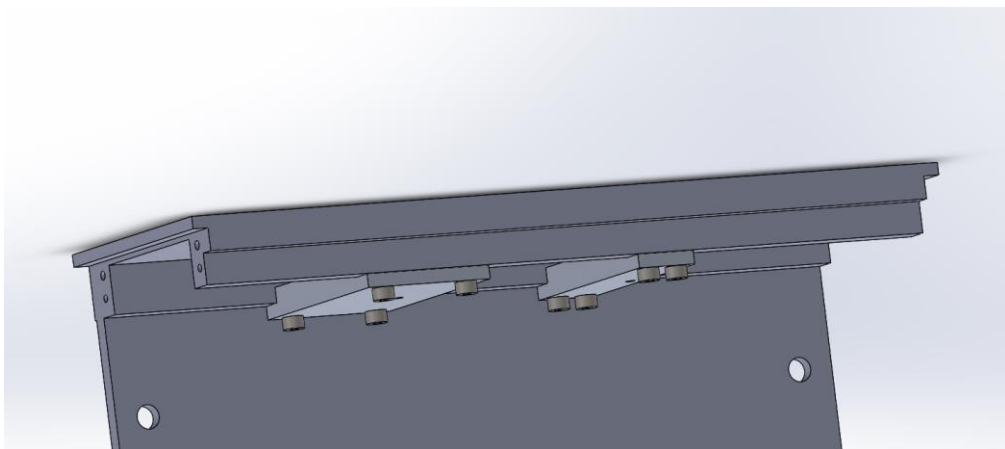
Prototyypin suunnittelun aloitin mallintamalla jo käytettävät ultraäänikomponentit ja teränpiti-  
men terineen. Runkona käytin tyhjää moduulin runkoa, jota työstettäisiin tarpeen vaatiessa. Run-  
koa ei tarvinnut mallintaa, koska siitä löytyi jo olemassa oleva SolidWorks-malli. Kuvassa 35 on  
moduulin runko ja ultraäänimuuntimia.





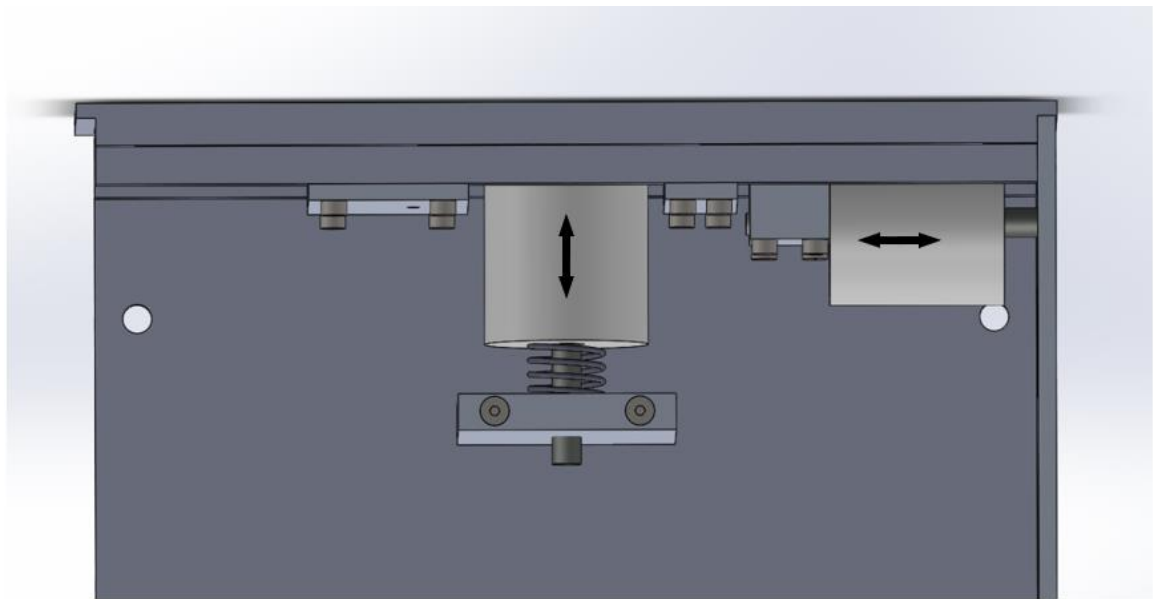
Kuva 35. Tyhjä moduulin runko ja ultraäänimuuntimia.

Seuraava vaihe oli asettaa teräpaketti oikealle paikalle moduuliin. Paikoituksen mitoituksessa käytettiin apuna Creo-ohjelmalla tehtyä vetolujuusmoduulin kokoonpanoa. Teräpaketti asetettiin yläasentoon eli siihen tilanteeseen, jossa leikkaus tapahtuu. Teräpaketin oli tarkoitus olla vain tässä asennossa, koska prototyypillä oli tarkoitus analysoida vain leikkaustapahtumaa. Teräpaketin kiinnityksiperiaate esitetään kuvassa 36. Se on samantyylinen kuin vetolujuusmoduulissa. Tällä pyrittiin varmistamaan mahdollisimman samankaltainen tilanne teräpaketille kuin vetolujuusmoduulissa.



Kuva 36. Teräpaketin kiinnitys.

Teräspaketin kiinnityksen jälkeen oli vuorossa ultraäänimuuntimien kiinnityksen suunnittelu. Ultraäänimuuntimien kiinnityspinnassa on M10x1-kierre, jota hyödynnettiin kiinnittämisessä. Muuntimen kiinnittämiseksi teräspaketin pohjaan mallinsin yksinkertaisen T-mallisen kiinnittimen. Teräspaketin päähän asennettava muunnin vaati enemmän laskelmia ja suunnittelua, koska sen vaatima tila olisi optimaalisessa asennuspaikassa vaatinut moduulin rungon kansilevyn muokkaamista. Runkoa ei haluttu muokata, jotta moduulia voitaisiin käyttää myös Paper Lab -analyysatorissa. Kuitenkin pienillä teräspaketin muutoksilla ja muutospalalla muunnin mahtuu moduulin sisään. Ultraäänimuuntimet haluttiin tukea myös sen takapuolelta, jotta testausvaiheessa voisimme kokeilla muuntimen puristamisen vaikutusta ultraäänen muodostumiseen. Muuntimien tuet suunniteltiin siten, että sitä voi puristaa teräspakettia vasten joko ruuvilla tai jousella. Kuvassa 37 on ultraäänimuuntimien kiinnitys ja tukeminen joko jousella tai ruuvilla. Muunninta jousella puristettaessa löysätään ruuvia ja jousi asetetaan ruuvilla ympärille. Näin ruuvi pitää jousen paikoillaan testaamisen aikana.



Kuva 37. Ultraäänimuuntimien kiinnitys.

### 8.2.3 Valmistaminen

Prototyypin osista tehtiin valmistuspiirustukset. Valmistettavia ja muokattavia osia oli yhteensä 10 kappaletta. Suurin osa työpiirustuksista lähetettiin alihankkijalle, joka valmisti tai muokkasi osat sopiviksi. Osan osista valmistin itse tai muokkasin sopivaksi toimeksiantajan työstökoneilla. Tarvittavien osien valmistuksessa kesti noin kolme viikkoa, jonka jälkeen suoritettiin prototyypin kokoonpano toimeksiantajan tiloissa.

## 9 Prototyypin testaus

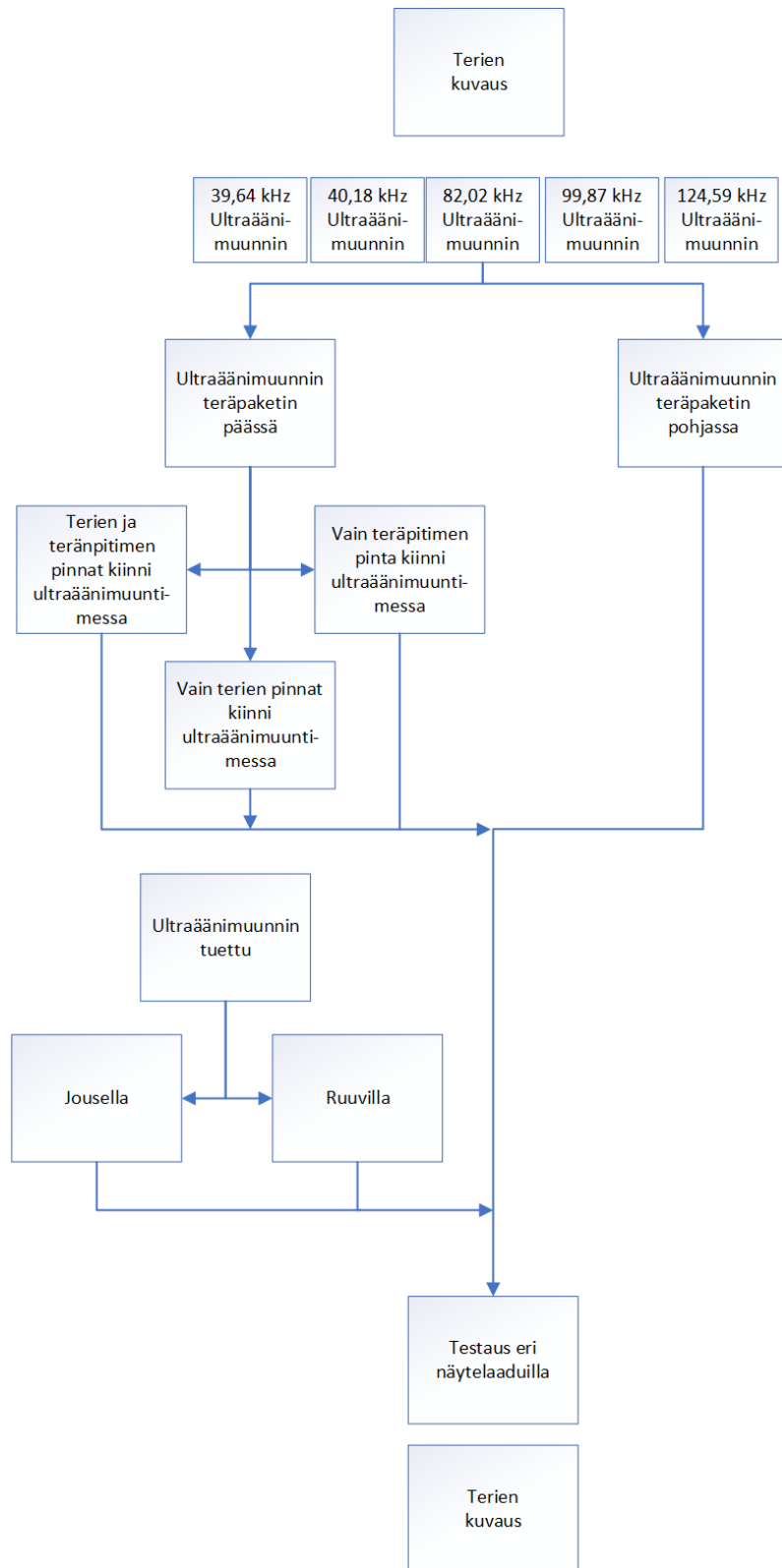
Testaaminen aloitettiin testiympäristön kokoamisella ja terien leikkaavien särmien kuvaamisella. Terien kulumisen väheneminen oli yksi tärkeä tavoite ultraäänileikkauksen testaamisessa. Prototyyppi asennettiin eräänlaiseen testaustelineeseen, jossa voidaan testata moduulien toimintaa käytännössä. Testaustelineeseen voi laittaa sekä ylä- että alamoduulin yhtä aikaa paikoilleen luonnolliseen toiminta asentoon. Ennen testausvaihetta laadittiin kuvassa 38 oleva testausuunitelma, jota käyttämällä pystyttiin tehokkaasti seulomaan parhaimmat asetukset prototyyppiin.

Käytetty ultraäänilaitteisto oli:

- Erilaisia resonanssitaajuuden omaavia ultraäänimuuntimia
- Macroni Instruments 2024-signaaligeneraattori
- Kalmus 225LC-CE 25W-signaalinvahvistin
- Electronics & Innovation RF Power amplifier 2100L 100W-signaalivahvistin

Käytetty mittauslaitteisto oli:

- Fluke 199C-oskilloskooppi
- LEM PR20-pihtivirtamittari
- Digital microscope 10x-250x



Kuva 38. Testaussuunnitelma.

## 9.1 Ultraäänileikkaus

Prototyypin testaaminen aloitettiin mahdollisimman yksinkertaisella järjestelmällä, ilman ylimääräisiä moduulin osia, jotka voisivat estää tai häiritä teräpaketin värähtelyä ultraäänen taajuudella. Ultraäänimuuntimelle syötettiin koko testauksen ajan signaalia taajuudeltaan 34–110 kHz ja teholtaan 10–90 W, riippuen käytettävästä ultraäänimuuntimesta. Ennen varsinaisen ultraäänen käyttöä leikkauksessa moduuli säädettiin käyttöpaineen avulla siten, että leikkaus ei ole mennyt läpi asti, kuten kuvassa 30. Tällä pyrittiin saada myös näkyviin mahdollinen ultraäänen avustava vaikutus leikkauksessa. Testattavana näytteenä käytettiin neliöpainoltaan 80 g/m<sup>2</sup> kopiopaperia. Seuraavaksi alkoi ultraäänen värähtelyn lisääminen teräpakettiin leikkauksen aikana. Ensimmäisissä testauksissa käytettiin pienempitehoista signaalivahvistinta, jonka maksimiteho on 25 W. Tämä kuitenkin osoittautui liian heikkotehoiseksi, vaikka terät selvästi värähtelivät jo tälläkin tehoilla. Värähtely kuitenkin lakkasi paininrullien painaessa teriä vasten. Tämän huomasi siitä, että värähtelyn aiheuttama resonointi terässä lakkasi. Silmämääräisesti vertaillen ei leikkaustuloksissa ollut eroa leikatessa ilman ultraääntä tai leikatessa sen kanssa.

Seuraavassa vaiheessa vaihdettiin signaalinvahvistin tehokkaampaan versioon. Ultraäänimuuntimelle syötettiin signaaligeneraattorin ja vahvistimen avulla noin 40 ja 90 kHz taajuutta. Ultraäänen aiheuttama resonointi suureni selvästi aiheuttaen kovan korkean äänen. Korkean äänen aiheutti terän rakenteellinen resonanssi. Kuitenkin tämäkään ei antanut tuloksiin toivottua poikkeavuutta, vaikka testissä käytettiin kaikkia viittä eri luontaisen resonointitaajuuden omaavaa ultraäänimuunninta. Myöskään ultraäänimuuntimen paikan vaihtaminen tai puristaminen sitä teräpakettia vasten ei tuottanut tulosta. Ultraäänimuuntimen värähtelevän pinnan kosketuksella teriin, teräpakettiin tai molempiin yhtä aikaa ei ollut vaikutusta leikkauksen toimivuuteen.

Koska toivottua tulosta ei saatu näillä menetelmillä, kokeilimme seuraavaksi hakea terien luontaista resonointitaajuutta manuaalisesti signaaligeneraattorin sweep-toiminnolla. Sweep-toiminto mahdollistaa taajuuksien automaattisen rullaamisen portaittain tietystä taajuudesta tiettyyn taajuuteen. Moduuli sijoitettiin pöydälle, ja terien päälle laitettiin paperi jonka päälle paino. Tällä tavalla etsittiin taajuutta, jolla paperi liukuisi terien päällä helposti. Toisin sanottuna kitka olisi mahdollisimman pieni terän ja paperin välissä. Sweep-toiminnolla testattiin kaikki ultraäänimuuntimet ja niiden asennot teräpaketissa. Löydettyä sopiva taajuus se kirjattiin muistiin, jotta sitä voitaisiin hyödyntää seulonnassa. Sopivia taajuuksia löytyi viisi kappaletta. Näitä taajuuksia kokeiltiin vielä erikseen, ja niistä valittiin kaksi parhainta. Parhaimmat taajuudet olivat 40,450 ja 38,836 kHz. Näillä kahdella taajuudella jatkettiin leikkaustestejä. Parhaiten teräpaketin

sai värähtelemään sijoittamalla ultraäänimuuntimen teräpaketin pohjaan. 40,450 kHz taajuudella leikkaustuloksissa olikin huomattava ero verrattuna aikaisempiin tuloksiin. Ultraäänen avustama leikkaus oli täysin onnistunut, kun taas ilman ultraääntä leikkaus oli vain osittain leikkautunut läpi. Ultraäänen kanssa leikatessa leikkaus onnistui jo toisella tai kolmannella paininrullien liikesekvenssillä. Ilman ultraääntä leikatessa liikesekvenssien määrä oli kuusi kappaletta ja siltikään leikkaus ei täysin onnistunut. Tällä taajuudella jatkettiin leikkaustestejä satunnaisesti ilman ultraääntä ja ultraäänen kanssa. Näin pyrittiin varmistamaan mahdolliset sattumalta onnistuneet leikkaukset. Tulokset olivat silti samanlaisia, joten voitiin varmasti sanoa, että ultraäänen käytöstä on hyötyä. Ultraäänimuuntimen painaminen teräpakettia vasten huononsi leikkausta, värähtely heikkeni selvästi voiman lisääntyessä, joten niiden käyttöä ei jatkettu enää. Näillä samoilla ase-  
tuksilla jatkettiin testausta myös kartongilla, jonka neliöpaino on 190 g/m<sup>2</sup>. Tulokset jatkuivat aluksi samanlaisina, mutta kun kokonaisuudessaan ultraäänen kanssa tehtyjä leikkauksia oli kertynyt noin 40 kpl, tapahtui tuloksissa vähitellen muutos. Ultraäänen kanssa leikatessa ei ollut enää niin suurta eroa verrattuna tavalliseen leikkaukseen. Kopiopaperia leikatessa tulokset olivat samanlaisia, eli ultraäänileikkaus ei enää toiminut aiemmalla tavalla. Tästä johtuen kokeilimme aluksi nostaa moduulin käyttöpainetta toivotun leikkauksen aikaansaamiseksi, mutta tämäkään ei toiminut. Edes käyttöpaineen nosto normaalille tasolle ei tuottanut onnistunutta leikkausta ilman ultraääntä. Päätimme ottaa terät tarkastelun kohteeksi, koska luultavasti niissä oli tapahtunut jotain muutosta, joka aiheutti leikkauksen epäonnistumisen.

Terien pintaa mikroskoopilla tutkittaessa huomattiin terien leikkaavien särmien lohkeilleen ja niiden välissä olevan tasopinnan vaurioituneen. Kuvassa 39 on suurennos vaurioituneesta terästä vasemmalla ja uudesta terästä oikealla. Kuvasta huomaa, kuinka suuri ero uuden ja kuluneen terän välillä on.



Kuva 39. Ultraäänileikkauksessa rikkoontunut terä ja uusi terä.

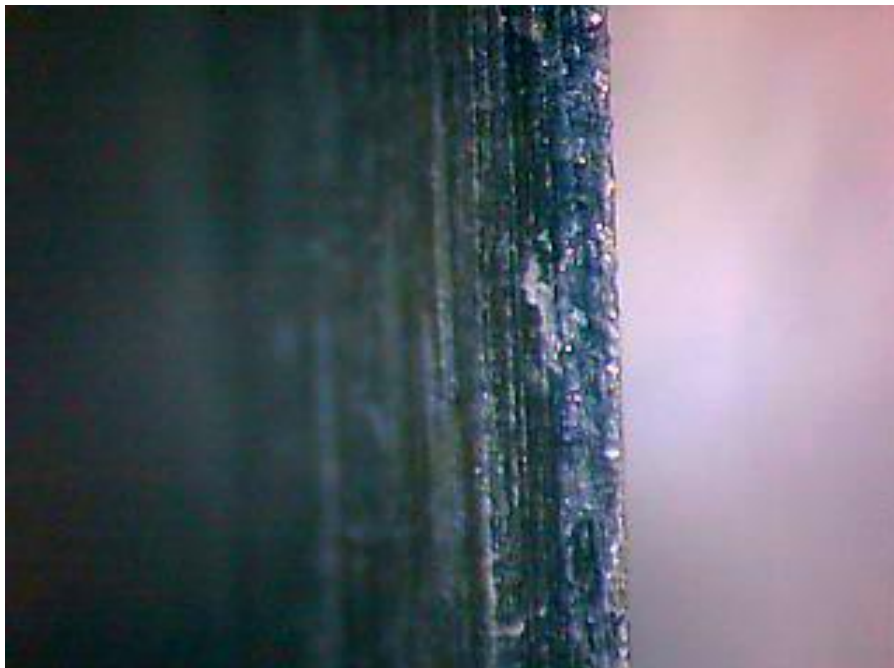
Terien kuluminen näin paljon hyvin vähäisellä leikkausten määrällä on merkki jostain isosta ongelmasta menetelmässä. Koska leikkausmenetelmä on samanlainen kuin vetolujuusmoduulissa oleva, on ongelman aiheuttaja melko selvästi ultraääni. Terissä ei ole esiintynyt sellaista laatu- vaihtelua, joka selittäisi tämän lohkeilun ja pinnan rikkoontumisen. Keskustelimme asiasta yhdessä ohjaustiimin kanssa ja päädyimme johtopäätökseen, että kokeilisimme vielä ultraäänen vaikutusta leikkaukseen. Tällä kertaa paininrullan materiaalina käytettäisiin materiaalia, joka on pehmeämpää kuin terän materiaali. Hyvin todennäköinen syy terän rikkoontumiseen oli ultraääni yhdessä kovan paininrullan aiheuttaman paineen kanssa.

#### 9.1.1 Paininrullien muutos

Paininrullien materiaalina kokeiltiin kumia ja kahta eri muovia. Paininrullien materiaalin muutosta mukailtiin laittamalla paininrullien päälle joko kutistesukkaa tai tekemällä niiden päälle muovista holkit. Kutistesukasta tehdyt paininrullan pinnat hajosivat heti ensimmäisen leikkauksen aikana, joten näillä ei päästy tekemään leikkauksia ultraäänen avustamana. Nailon muovista tehdyt holkit kestivät leikkauksia noin kolme kertaa. Sen jälkeen ne menivät urille ja eivät pysyneet enää paininrullan päällä. Valmistin vielä yhden holkit muovista, joka oli huomattavasti kovempaa kuin nylon. Näiden holkkien kesto oli huomattavasti parempi kuin aikaisemmin kokeiltujen, joten pääsimme testaamaan ultraäänen vaikutusta leikkaukseen. Tällaisen muutoksen jälkeen vaatii useampia leikkauksia ennen kuin järjestelmä on saatu viritettyä vertailukelpoiseen leikkauskuntoon,

jotta tuloksia voi verrata aiempiin. Ultraäänen kanssa leikatessa tuloksissa oli eroavaisuutta, mutta ero ei ollut yhtä selkeä kuin aikaisemmin kovalla paininrullalla tehdyissä leikkauksissa. Holkkien kuluessa uralle noin 25 leikkauksen jälkeen ei leikkaus enää onnistunut. Uralla oleva paininrullan pinta rypistää näytettä terien välissä ja näyte pyrkii repeytymään.

Tästä kovemmassa muovista valmistetuilla holkeilla saimme noin 15 kappaletta onnistuneita leikkauksia ultraäänen avulla. Testauksen aikana varmistin, että kova paininrulla ei koske missään vaiheessa terään ultraäänen avulla leikatessa. Tällä tavalla pystyi varmistamaan sen, että mahdollinen terän kulumisen ei johtuisi kovan paininrullan ja terän kontaktista. Kuvassa 40 on suurennos terästä, joka on ollut käytössä ultraääniavusteisissa leikkauksissa muovisen paininrullan kanssa. Kuvasta huomaa hyvin selkeästi leikkaavien särmien epätasaisuuden, ja myös tasopinna on lohkeilun ja kulumisen merkkejä. Tämän kuvan perusteella voi päätellä ultraäänen värinän aiheuttavan välittömästi lohkeilua terässä.



Kuva 40. Suurennos terästä, ultraäänen ja muovisen paininrullan kanssa tehdyistä leikkauksista.

Kuvassa 41 on vetolujuusmoduulissa käytössä ollut, terä jolla ei ole leikattu ultraäänen avustuksella. Terän tasopinta on kulunut, mutta leikkaavat särmät ovat tasaiset, niissä ei esiinny lohkeilua. Tämäkin osaltaan vahvistaa ultraäänen vaurioittavaa vaikutusta teriin, joten päätimme lopettaa prototyypin testauksen näiltä osin.





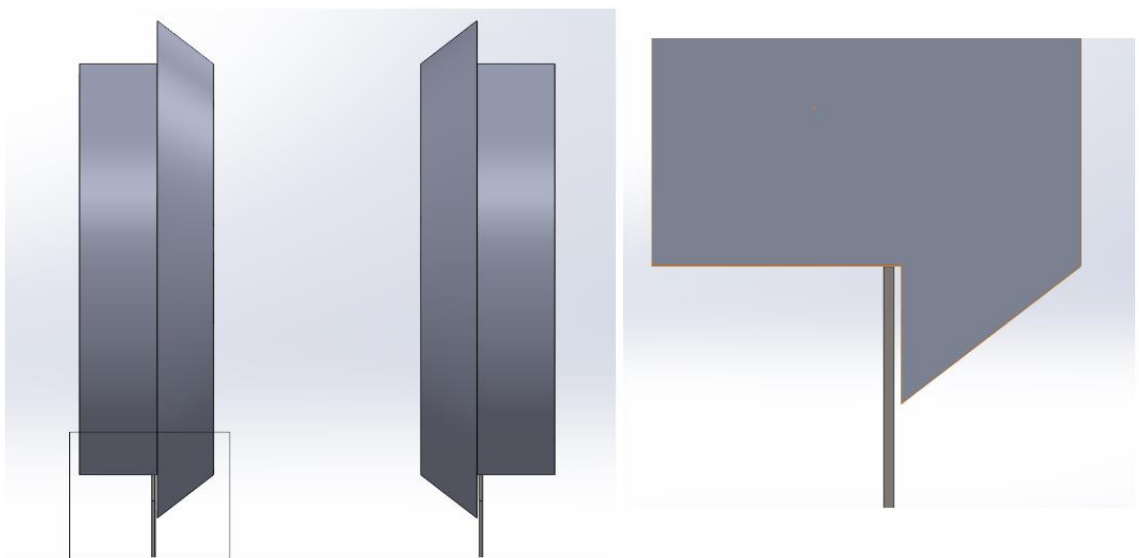
Kuva 41. Vetolujuusmoduulin käytetty terä.

#### 9.1.2 Ultraäänileikkaus erimuotoisilla terillä

Näiden testitulosten jälkeen siirryimme testaamisessa erityyppisien terien testaamiseen. Testauksen tarkoituksena oli kokeilla erilaisten terien käyttäytymistä ultraäänen kanssa. Tutkimisen kohteena oli sahalaitaisen terän ja terävän terän leikkauskyky ultraäänen avustuksella. Terät asennettiin nykyiseen teräpakettiin, mutta terien muodon takia moduulia ei voitu asentaa testaustelineeseen, joten toimivuutta testattiin moduulin ollessa irrallaan pöydällä. Testauksen aikana ultraäänimuunninta kokeiltiin teräpaketin pohjassa ja päässä, mutta kuten aikaisemminkin, ultraääni johtui terään parhaiten ultraäänimuuntimen ollessa teräpaketin pohjassa. Molemmissa terissä oli ongelmana saada se värähtelemään oikealla taajuudella, jotta ultraäänen käytöstä olisi hyötyä. Sahalaitaista terää ei saatu toimimaan halutulla tavalla, mutta terävä terä toimi tietyllä taajuudella osittain. Terävä terä leikkasi hyvin vain pienellä osalla terästä. Tämä kuvastaa hyvin ultraäänen kulkeutumista kiinteässä aineessa, aallon voimakkuus on aina suurimmillaan seisovan aallon kohdalla. Seisovan aallon kohta osui juuri tuohon kohtaan, jolla terä leikkasi hyvin.

## 9.2 Saksileikkaus

Kokeilimme myös saksileikkaustyylistä leikkausmenetelmää prototyypillä. Saksileikkaus on ollut aikaisemmin käytössä yhdessä moduulissa, mutta siinä on ollut ongelmia paksuimpien materiaalien leikkauksissa. Prototyypissä käytettiin teräparina vanhan moduulin saksileikkausteriä ja nykyisiä suorita teriä. Pyöreät saksileikkauksessa käytettävät terät asennettiin paininrullien tilalle ylämoduuliin, ja nykyiset terät olivat teräpaketissa kiinni alamoduulissa. Kuvasta 42 selviää terien asento leikkaustilanteessa.

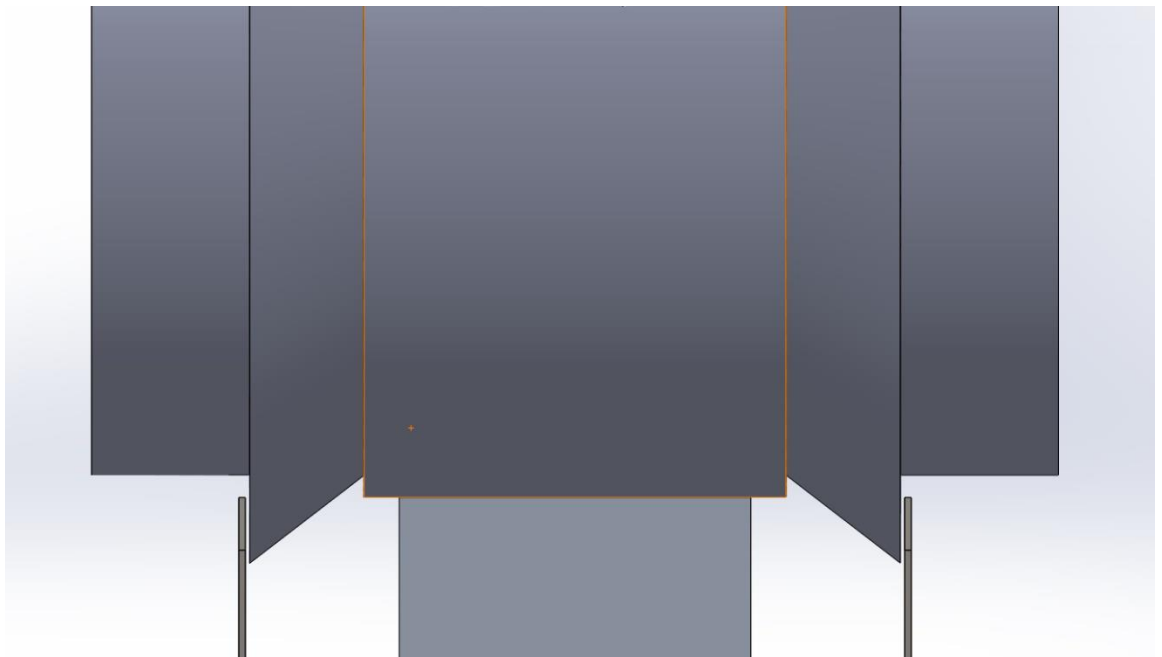


Kuva 42. Prototyypin saksileikkausperiaate.

Pyöreiden yläterien asemointi alateriin oli haastavaa, koska leikkausmekanismia ei ole suunniteltu tämän tyyliiseen leikkaukseen. Leikkausmekanismissa olevat välykset haittasivat terien aivan optimaalista kohdistusta suhteessa alateriin. Yläterien ja alaterien väliin tuli jättää välystä, jotta yläterät osuisivat aina alaterien väliin mekanismin laskeutuessa ylämoduulista. Toisin sanottuna yläterien kyljet eivät kulkeneet alaterien kyljissä kiinni, vaan niiden välissä oli pieni rako, kuten kuvan 42 suurennoksesta näkyy.

Ensimmäiset testit eivät toimineet toivotulla tavalla, näyte rypistyi ja liikkui heti leikkauksen alkuvaiheessa ja yläterät eivät pysyneet alaterien välissä. Nämä asiat johtuivat liian kovasta paineesta ylä- ja alaterän välissä, leikkausmekanismin liian nopeasta liikkeestä ja terien liian suuresta limityksestä. Terien limitystä pienennettiin aluksi laittamalla holkit yläterien juureen, jotta niiden halkaisija suurenisi ja limitys pieninisi. Tämä ei kuitenkaan ollut kestävä ratkaisu, koska kapean terän

tunkeutuessa holkin ja terän väliin se väänsi holkin irti. Paremmaksi ratkaisuksi osoittautui laittaa teräpaketin pohjalle tanko ja yläterien väliin holkki, kuten kuvassa 43. Tämän kaltainen ratkaisu ei kuitenkaan toimi näytteen mittaustilanteessa, koska paperi litistyy tangon ja holkin väliin aiheuttaen näytteeseen rakenteellisia muutoksia ja vääristymiä mittaustulokseen. Tällä testauksella pyrittiin vain näkemään saksileikkausmenetelmän toimivuus kyseisellä rakenteella. Testilaitteiston ylämoduuliin rakennettiin vielä tämän jälkeen kaksipaineinen paineilmajärjestelmä, jotta paininrullia painavan sylinterin painetta voitiin säätää muun järjestelmän toimiessa toisella paineella. Nämä olivat välttämättömiä toimenpiteitä, että leikkaus saatiin onnistumaan.



Kuva 43. Periaate saksileikkauksen terien limityksen säädöstä.

Parannuksien jälkeen testaus aloitettiin kopiopaperilla, tulokset olivat hyviä. Leikkaus onnistui todella pienellä yläterää painavalla voimalla, muun järjestelmän toimiessa normaalilla 5 bar käyttöpainella. Kopiopaperin jälkeen siirryttiin 190 g/m<sup>2</sup> painoiseen kartonkiin. Nämäkin leikkaukset sujuivat ongelmitta, kun yläteriä painavan sylinterin painetta lisättiin hieman. Onnistuneiden leikkausten jälkeen leikkasimme systemaattisesti varastosta löytyviä laatuja. Aloitimme pienimmän neliöpainon omaavasta paperista 45 g/m<sup>2</sup> ja siirryimme asteittain aina 400 g/m<sup>2</sup> painavaan kartonkiin. Kaikki leikkaukset joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta onnistuivat. Epäonnistuneet leikkaukset johtuivat näytteen liikkumisesta leikkauksen aikana. Saksileikkausmenetelmää käytettäessä ei voitu käyttää terien päällä kansilevyä, joten leikkauksen aikana näytteen paikallaan pitävät tapit eivät toimineet oikein.

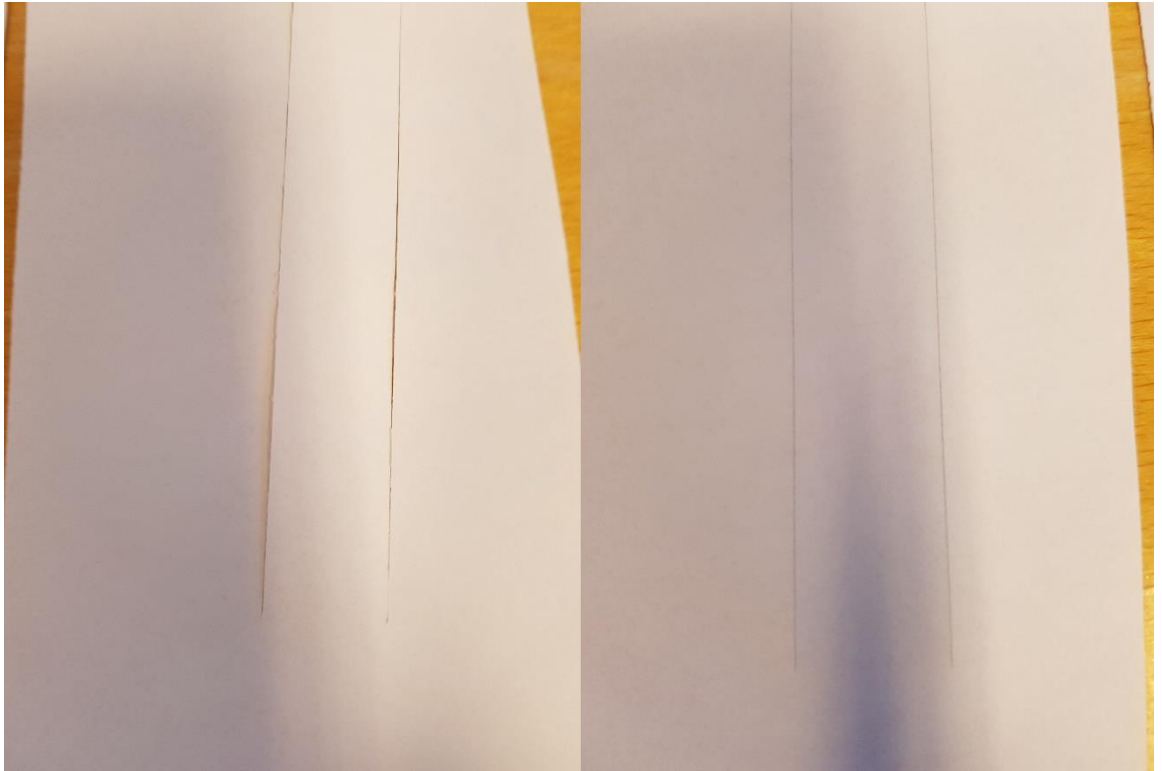
## 10 Tulokset

Opinnäytetyön tuloksena suunniteltiin ja valmistettiin prototyyppi ultraäänen avustaman leikkauksen testaukseen. Kuitenkin prototyypillä kokeiltiin myös pienimuotoisesti saksileikkauksen toimintaa vetolujuusmoduulissa. Leikkausmenetelmien testaukset tehtiin helmi- ja maaliskuun aikana 2019. Prototyyppi suunniteltiin itse, ja suurimman osan laitteen osien valmistuksesta hoiti alihankkija. Laitteen kokoonpano ja muutokset testauksen aikana suoritettiin itse. Kaiken kaikkiaan testauksen aikana suoritettiin noin 400 kappaletta leikkauksia, joiden avulla tutkittiin leikkausmenetelmien toimivuutta. Opinnäytetyössä valittiin myös uusi valmistusmateriaali vetolujuusmoduulin terille. Terät ovat tällä hetkellä vielä terien valmistajalla, joten niiden toimivuudesta ei ole saatu tuloksia.

### 10.1 Ultraäänileikkauksen tulokset

Prototyypin pääasiallinen käyttötarkoitus oli ultraäänen värähtelyn testaaminen leikkaustulokseen. Moduulien käyttöpaine laskettiin 2 bar tasolle, jotta ultraäänen vaikutus leikkauksessa olisi nähtävissä. Käyttöpaineen laskulla saatiin aikaan epäonnistunut leikkaus, koska paininrullat eivät jaksaneet enää murskata näytettä teriä vasten rikki. Ultraäänen käytöllä oli selvästi vaikutusta leikkauksen onnistumiseen, mutta leikkauksen onnistumiseen vaikutti suuresti käytettävä ultraäänimuunnin ja sen paikka teräpaketissa.

Toimivimmaksi ratkaisuksi osoittautui ultraäänimuuntimen sijoitus teräpaketin pohjaan. Ultraäänimuuntimelle syötettävä taajuus ja sen voimakkuus olivat myös suuressa roolissa leikkauksen onnistumisessa. Parhaimmaksi ratkaisuksi osoittautui 39,64 kHz ominaisresonanssitaajuuden omaava ultraäänimuunnin, johon syötettiin 40,45 kHz taajuutta teholtaan 50–70 W. Kuvassa 44 nähdään vasemmalla puolella näillä asetuksilla leikattu ja oikealla puolella ilman ultraääntä leikattu kopiopaperi. Kuvasta erottaa hyvin erot näiden kahden välillä. Ultraäänen kanssa leikattu paperi on täysin leikkautunut, kun ilman ultraääntä paperiin on jäänyt vain jäljet terästä. Näillä asetuksilla tehtiin kymmeniä onnistuneita leikkauksia, kunnes terät menettivät vähitellen leikkauskykynsä. Terien leikkauskyky heikkeni lopulta niin pahasti, etteivät ne leikanneet edes normaalilla käyttöpaineella. Terien leikkauskyvyn menetys johtui leikkaavien särmien ja niiden välisen tasopinnan lohkeilusta. Kuvassa 39 näkyy rikkoutuneen ja uuden terän pinnoista suurennos.



Kuva 44. Kopiopaperin leikkaus ultraäänen kanssa ja ilman.

Ultraäänileikkausta kokeiltiin myös erilaisilla paininrullan materiaaleilla, jotta nähtäisiin paininrullan materiaalin vaikutus terien pintojen lohkeiluun. Paininrullien materiaalina käytettiin kumia ja kahta erilaista muovia. Paininrullien materiaalin vaikutusta terän lohkeiluun ei kuitenkaan voitu todistaa, koska materiaali ei kestänyt terän aiheuttamaa pintajännitystä. Rullien kuluessa urille näyte pyrki rypistymään, mikä esti onnistuneen leikkauksen. Terissä näkyi muutoksia jo 15 ultraäänen kanssa leikatun näytteen jälkeen. Kuvassa 40 ovat nämä muutokset selvästi havaittavissa.

Kaikista näistä testituloksista voi päätellä, että ultraäänen avustama leikkaus vetolujuusmoduulissa vähentää leikkaukseen tarvittavaa voimaa. Ultraääni kuitenkin vaurioittaa terää niin paljon, että sen käyttö nykyisellä terän profiililla ja materiaalilla ei ole järkevää. Tuloksista käy myös ilmi, että uritetun paininrullan käyttö voi aiheuttaa näytteen rypistymistä ja siten epäonnistuneen leikkauksen. Uritettu paininrulla voi toimia tilanteessa, jossa paininrullan ura toimisi saksileikkauksen tavoin. Tällöin uran ja paininrullan profiilin täytyisi vastata terän profiiliin sopivalla tavalla, jotta rypistyminen estyisi. Ultraäänileikkaus voisi olla sovellettavissa vetolujuusmoduulin leikkausmenetelmäksi, mutta se vaatisi oikean terämateriaalin ja leikkausekvenssin, jotta terien kestävyys olisi halutunlainen.

Leikkausmenetelmän pölypartikkeleiden ja irtonaisten ainesosien muodostuminen leikkauksen aikana oli vähäisempää kuin nykyisessä leikkausmenetelmässä. Pölyä ilmestyi hyvin vähän alamo-  
duulin päälle leikkausten jälkeen ja ohuita paperisuikaleita ei esiintynyt näytteissä. Kuitenkin on oltava kriittinen näiden suhteen, koska ultraäänen kanssa leikkauskertoja kertyi vain noin 60 kappaletta.

## 10.2 Saksileikkauksen tulokset

Prototyypillä testattiin myös saksileikkausmenetelmää. Leikkaavina terinä käytettiin vanhasta leikkuumenetelmästä jääneitä saksileikkausteriä ja alaterinä toimivat nykyiset vetolujuusmoduulin leikkausterät. Saksileikkausmenetelmästä saatiin suhteellisen hyviä tuloksia, ottaen huomioon, että moduulin mekaniikkaa ei ole suunniteltu tämän kaltaiseen leikkausmenetelmään. Saksileikkausmenetelmää käytettäessä oli tärkeää saada säädettyä yläteriä painavaa voiman suuruutta. Leikkauksien onnistumiseksi oli myös tärkeää yläterien liikenopeuden ja terien limityksen säätö. Vetolujuusmoduulin mekaniikan takia ylä- ja alaterien etäisyys toisistaan ei ollut aivan optimaalinen, kuten kuvasta 43 selvisi. Kuitenkin lähes poikkeuksetta toinen yläteristä kulki alaterän kyljessä kiinni, joten leikkauksen laatu oli toisen viillon osalta vertailtavissa muiden leikkausmenetelmien laatuun.

Terien limitys ja leikkauksenopeus yhdessä yläterää painavan voiman kanssa olivat ratkaisevassa asemassa leikkauksen onnistumisen kanssa. Leikkaus ei onnistunut, jos terien limitys oli liian suuri tai pieni. Suuri limitys pyrki repimään paperia, kun taas liian pieni limitys ei leikkannut paksuimpia materiaaleja läpi asti. Myös leikkauksenopeus vaikutti leikkauksen onnistumiseen. Pieni nopeus aiheutti epätasaista leikkautumista ja repeytymistä, kun suuri nopeus nosti yläterän leikattavan näytteen pinnalle ja leikkaus ei mennyt läpi asti. Terää alaspäin painavan voiman vähentäminen sai yläterän nousemaan näytteen pinnalle, jolloin leikkaus ei onnistunut ja voiman suurentaminen liian isoksi aiheutti leikkauksen jälkeä repeilyä.

Yhdessä kaikki nämä tekijät sopivilla arvoilla mahdollistivat onnistuneen leikkauksen. Neliöpainoltaan pienimmillä laaduilla terien limitys oli oltava pienempi kuin painavimmilla laaduilla. Sopiva terien limitys oli noin 1–2 mm. Leikkauksen keskinopeus vaihteli noin 0,25–0,5 m/s alueella, mutta suurin osa leikkauksista tapahtui 0,5 m/s vauhdilla. Tämä nopeus oli sopiva kaikille laaduille. Kun nopeutta kompensoitiin yläterää painavan voiman suurentamisella, tällöin yläteri ei noussut näytteen päälle ja leikkaus onnistui. Voima, joka painoi yläteriä alateriä vasten, vaihteli

12 ja 130 newtonin välillä, sylinterin käyttöpaineen ollessa 0,5–3 bar:n välillä. Voimat on laskettu käyttämällä kaavoja 2–5, minimivoima 0,5 bar paineella sylinterin varren ollessa ulkona ja maksimivoima 3 bar paineella sylinterin varren ollessa sisään painuneena.

Kuvassa 45 on 400 g/m<sup>2</sup> painava kartonki, joka on leikattu saksileikkausmenetelmällä, leikkauksen keskinopeuden ollessa 0,5 m/s ja sylinterin käyttöpaineen ollessa 2,2 bar. Ylemmän leikkauksen tehnyt teräpari on ollut leikkauksen aikana kiinni toisissaan, mutta alemman leikkauksen tehneet terät ovat olleet irti toisistaan. Tämän huomaa leikkauksen laadusta. Ylempi leikkaus on siistimpi kuin alempi.



Kuva 45. Saksileikkausmenetelmällä leikattu kartonki, paino 400 g/m<sup>2</sup>.

Terien etäisyyden vaikutuksen huomasi kaikissa onnistuneissa leikkauksissa. Kuvassa 46 on kopio-paperi 80 g/m<sup>2</sup>. Sen leikkauksen laadusta huomaa vielä selvemmin, kuinka tärkeää on terien kul-keminen leikkauksen aikana kyljistään kiinni. Kuten kuvassa 45, terät ovat olleet kiinni toisissaan ylemmässä leikkauksessa ja irti toisistaan alemmassa leikkauksessa.



Kuva 46. Saksileikkausmenetelmällä leikattu kopiopaperi, paino 80 g/m<sup>2</sup>.

Saksileikkausmenetelmällä saadut tulokset ovat lupaavia jatkokehitystä ajatellen, ottaen huomioon käytetyn testilaitteiston, joka ei ollut tarkoitettu käytettäväksi tämän tyyllisellä leikkausmenetelmällä. Koska aihe oli rajattu vain yhden leikkausmenetelmän testaamiseen, ei tätä menetelmää testattu laajamittaisemmin, joten esimerkiksi irtoaineksen muodostumisesta leikkauksen aikana ja terien kulumisesta ei pysty näillä tuloksilla kovin paljoa kommentoimaan. Kuitenkin pus-kuleikkausmenetelmässä syntyviä ohuita paperisuikaleita ei esiintynyt tässä menetelmässä, vaikka leikkauksia kertyi noin 100 kappaletta. Oletettavasti muukin irtoaines vähentyy tällaisella leikkausmenetelmällä oikeanlaisilla leikkausparametreilla.



## 11 Leikkaavien moduulien muita kehitysehdotuksia

Nykyisen käytettävän leikkaustekniikan mukaillessa puskuleikkausta on sille luontaista pölyn ja muun irtoaineksen esiintyminen leikkaustapahtuman aikana ja jälkeen. Näiden ei-toivottujen asioiden muodostumista ajatellen olisi tarpeellista saada leikkaustapahtuma loppumaan heti, kun leikkaus on mennyt läpi asti. Tämän voisi toteuttaa ohjelmallisesti siten, että analysaattorille olisi määrätty mitattavan paperi- tai kartonkilaadun mukaan käyttöpaine ja paininrullien liikemäärä. Vaihtoehtoisesti moduuliin voisi sijoittaa laitteiston joka, tunnistaisi leikkauksen olevan läpi asti, kuten jännitemittauksen. Mittaus tunnistaisi paininrullan ja terän välisen jännite-eron. Jännite-eroa vertaamalla tiedettäisiin, milloin terä ja paininrulla koskettavat toisiaan koko terän matkalta, mikä tarkoittaa leikkauksen olevan onnistunut. Näin saataisiin paininrullien ylimääräinen liike minimoitua, koska kaikki ylimääräinen liike näytteen päällä irrottaa leikatusta näytteestä lisää pölyhiukkasia ja ainesosia.

Osalla analysaattorin käyttäjistä jää tärkeä pölynpoistotoimenpide tekemättä, varsinkin kansilevyn alta. Kansilevy olisikin hyvä olla helposti irrotettavissa, jopa ilman työkalua. Nykyisin tämän toimenpiteen suorittamiseksi tarvitaan työkalua, jolla irrotetaan kaksi pientä ruuvia. Kansilevy on kyllä helposti irrotettavissa nykyisinkin, mutta käyttäjälle voi muodostua mielikuva hankaludesta, koska irrotettavat ruuvit ovat pieniä ja helposti häviäviä. Pienen ruuvin tai työkalun tippuminen moduulin sisään aiheuttaa välittömästi analysaattorin sammuttamisen, jotta ne eivät aiheuttaisi oikosulkua moduulin sisällä. Huoltotapahtuma helpottuisi huomattavasti, jos kannen saisi nostettua yhdellä kädellä pois ja toisella imuroitua kannen alusen. Tällöin huoltotoimenpiteen suorittamiseen ei kuluisi juuri ollenkaan aikaa ja puhdistuksia suoritettaisiin enemmän.

## 12 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia vaihtoehtoisia leikkausmenetelmiä ja etsiä erilaisia kehitysvaihtoehtoja nykyisen vetolujuusmoduulin leikkaustekniikkaan. Vetolujuusmoduulin ongelmat ovat leikkauksesta aiheutuva pöly ja irtoaines sekä leikkausterien kulumisen normaalia nopeammin tietyillä materiaalilaaduilla. Työn aikana perehdyttiin erilaisiin leikkaustekniikoihin ja terien valmistusmateriaaleihin sekä tutkittiin nykyisen leikkausmenetelmän kehittämismahdollisuuksia. Työssä testattiin ultraääni- ja saksileikkausmenetelmiä ja pohdittiin niiden vaikutusta pölyn ja muun irtoaineksen muodostumiseen sekä leikkausterien kulumiseen ultraäänileikkauksen aikana. Työssä myös pohdittiin nykyisen leikkausmenetelmän pölyn ja irtoaineksen syntymekanismeja sekä näiden epätoivottujen asioiden hallintaa, järjestelmän konseptiin suuremmin puuttumatta.

Työssä käytetty prototyyppi suunniteltiin SolidWorks- ja Creo-ohjelmia käyttäen. Tarvittavat osat mallinnettiin sekä niiden piirustukset tehtiin SolidWorks-ohjelmalla. Suurin osa prototyypin osista valmistettiin alihankkijalla. Loput osat ja testaamisen aikana tapahtuneet muutostyöt sekä prototyypin kokoonpano ja testaus tehtiin toimeksiantajan tiloissa.

Testauksen aikana suoritettiin yhteensä noin 400 leikkausta, ultraäänileikkauksia noin 300 kappaletta ja saksileikkausmenetelmällä noin 100 kappaletta. Testattavana materiaalina ultraäänileikkauksen aikana käytettiin pääasiassa 80 g/m<sup>2</sup> kopiopaperia ja 190 g/m<sup>2</sup> kartonkia. Saksileikkausmenetelmän aikana testattiin kahdeksaa eri näytelaatua, alkaen 45 g/m<sup>2</sup> painavasta paperista 400 g/m<sup>2</sup> painavaan kartonkiin. Testauksen aikana saadut tulokset antoivat konkreettista tietoa menetelmien toimivuudesta nykyisellä kokoonpanolla. Saksileikkausmenetelmän tulokset ovat lupaavia jatkokehitystä ajatellen. Ultraäänileikkaus nykyisessä kokoonpanossa ja nykyisillä terillä ei osoittautunut toimivaksi ratkaisuksi.

Työ oli haastava ja monipuolinen. Näiden takia siitä muodostui todella mielenkiintoinen kokonaisuus. Työn aikana dokumentoitiin valtavasti teoriaa, josta vain pieni osa on dokumentoitu tähän työhön. Haastavuuden aiheutti osaksi referenssitutkimusten puuttuminen tai niiden hankala saatavuus. Aihealueen laajuus, yhdistettynä paperimateriaalien laajaan testausalueeseen, toivat työhön monipuolisuutta. Nämä asiat yhdistettynä mukavaan työympäristöön antoivat minulle todella paljon kokemusta tuotekehityksestä ja teollisesta mekaniikkasuunnittelusta. Työn kulku oli mielenkiintoinen, koska joka kerta jonkin asian tyssätessä avautui uusi portti johonkin toiseen suuntaan tutkimuksessa.

## Lähteet

- (1) Valmet Suomen maasivusto. Saatavilla: <https://www.valmet.com/fi/>. Haettu 14.1.2019.
- (2) Valmet Suomi automaatio. Saatavilla: <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/liiketoiminnat/automaatio/>. Haettu 14.1.2019.
- (3) Tilasto Metsäteollisuus. Saatavilla: <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/massa-ja-paperiteollisuus/> Haettu 16.1.2019.
- (4) Häggblom-Ahnger U, Komulainen P. Paperin ja kartongin valmistus. Helsinki: Opetushallitus; 2000.
- (5) Biotalous, paperi. Saatavilla: <https://www.biotalous.fi/paperi/>. Haettu 18.1.2019.
- (6) Paperin kemiaa. Saatavilla: <http://paperinkemiaa.blogspot.com/p/paperin.html>. Haettu: 25.1.2019.
- (7) Parkinson technologies, slitting techniques guide. Saatavilla: <https://www.parkinsontechnologies.com/slitting-techniques-guide> Haettu: 11.2.2019.
- (8) Oulun yliopisto, Fysiikka, Laser. Saatavilla: <http://web.archive.org/web/20070328152818/http://physics oulu.fi/fysiikka/oj/761104P/2006/38.pdf>. Haettu: 13.3.2019.
- (9) Feasibility of industrial implementation of laser cutting into paper making machine, Alexander Stepanov. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:978-952-265-837-1>. Haettu: 23.3.2019.
- (10) Ihalainen E, Ihalainen E. Valmistustekniikka. 14. p. ed. Helsinki: Otatieto; 2014.
- (11) Caristan, Charles L. (2004). Laser cutting guide for manufacturing.
- (12) Industrial lasers, cutting paper. Saatavilla: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-21/issue-7/features/application-report/cutting-paper.html>. Haettu: 13.3.2019.
- (13) Decoup, ultrasonic technology. Saatavilla: <http://www.decoup.com/en/content/how-does-it-work>. Haettu: 14.3.2019.
- (14) Boston piezo optics, transducer crystals. Saatavilla: <https://bostonpiezooptics.com/intro-to-transducer-crystals>. Haettu: 14.3.2019.
- (15) Adamet, kiekkoterät. Saatavilla: <https://www.adamet.fi/kiekkoterat>. Haettu 19.3.2019.
- (16) Tidland, razor slitting. Saatavilla: [http://www.maxcess.eu/sites/default/files/documents/files/Tidland\\_RazorSlitting.pdf](http://www.maxcess.eu/sites/default/files/documents/files/Tidland_RazorSlitting.pdf). Haettu: 19.3.2019.
- (17) Dienes, crush cutting guide. Saatavilla: [http://www.beltlink.com/catalogs/Dienes\\_Crush\\_Cutting\\_Guide.pdf](http://www.beltlink.com/catalogs/Dienes_Crush_Cutting_Guide.pdf). Haettu: 19.3.2019.

(18) Laitinen E, Laitinen E, Niinimäki M, Tiainen T, Tiilikka P, Tuomikoski J, et al. Konetekniikan materiaalioppi. 12-14. uud. p. ed. Helsinki: Edita; 2011.

(19) Uddeholm, tool steels for cold work tooling Saatavilla: [https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/46/2017/12/Uddeholm\\_cold\\_work\\_eng\\_-1710\\_e14.pdf](https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/46/2017/12/Uddeholm_cold_work_eng_-1710_e14.pdf) Haettu 4.2.2019.

(20) Valorinta V. Koneenrakentajan metallioppi. Tampere: Pressus; 1983.

(21) University of Southern Indiana, AISI-SAE tool steel code. Saatavilla: <https://www.usi.edu/science/engineering/machasst/material/aisitool.htm>. Haettu 25.3.2019.

(22) Advances in On-Line Measurement and Control. Saatavilla: [https://www.aim-cal.org/uploads/4/6/6/9/46695933/mcgowan\\_abstract.pdf](https://www.aim-cal.org/uploads/4/6/6/9/46695933/mcgowan_abstract.pdf). Haettu: 28.1.2018.

(23) Davis JR, Davis JR. Tensile Testing. : ASM International; 2004.

(24) Standardi ISO 1924-3.

(25) Valmet Oyj, sisäinen materiaali.

(26) Standardi ISO 187.

(27) Valmet, Paper Lab. Saatavilla: <https://www.valmet.com/automation-solutions/analyzers-and-measurements/analyzers/paper-lab/>. Haettu 28.1.2019.

(28) Astm steel, T-1 tools steel. Saatavilla: <http://www.astmsteel.com/product/t1-tool-steel-aisi/>. Haettu: 18. 3. 2019. <http://www.astmsteel.com/product/t1-tool-steel-aisi/>.

(29) Sonotec, cutter. Saatavilla: <https://www.sonotec.com/en/product/cutter/>. Haettu: 25.3.2019.

(30) Demonstration of paper cutting using single emitter laser diode and infrared-absorbing ink. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/26265492\\_Demonstration\\_of\\_paper\\_cutting\\_using\\_single\\_emitter\\_laser\\_diode\\_and\\_infrared-absorbing\\_ink](https://www.researchgate.net/publication/26265492_Demonstration_of_paper_cutting_using_single_emitter_laser_diode_and_infrared-absorbing_ink). Haettu: 21.3.2019.

(31) Törmälä R, sähköpostikeskustelu. 2019.

(32) Keinänen J, sähköpostikeskustelu. 2019.

Liitteet

Liite 1 Laskukaavat ja laskut

Liite 1 Laskukaavat ja laskut

Kaava 2. Lasketaan paininrullien keskinopeus.

$$v = \frac{s}{t}$$

s = Paininrullien kulkema matka (m)

t = Aika (s)

$$v = \frac{0,120}{0,206875}$$

$$v = 0,58 \text{ m/s}$$

Kaava 3. Lasketaan paininrullia painavan sylinterin tilavuus sylinterin varren eri asennoissa.

$$V = \pi r^2 * h$$

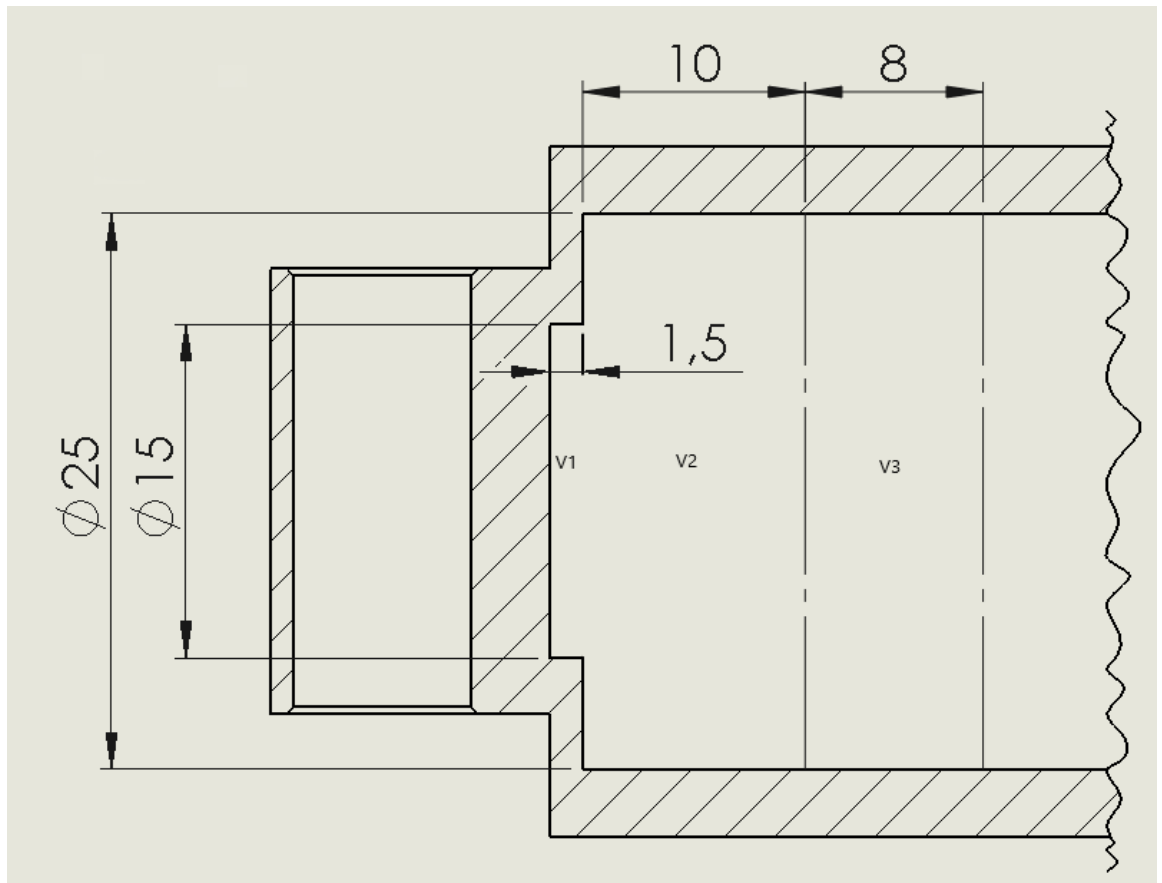
V = sylinterin tilavuus (m<sup>3</sup>)

r = sylinterin säde (m)

h = korkeus (m)

V<sub>1</sub> + V<sub>2</sub> + V<sub>3</sub> = Tilavuus sylinterin varren ollessa ulos työntyneenä (m<sup>3</sup>)

V<sub>1</sub> + V<sub>2</sub> = Tilavuus sylinterin varren ollessa sisään työntyneenä (m<sup>3</sup>)



$$V_1 = \pi * 0,0075^2 * 0,0015$$

$$V_1 = 2,65 * 10^{-7} m^3$$

$$V_2 = \pi * 0,0125^2 * 0,01$$

$$V_2 = 4,91 * 10^{-6} m^3$$

$$V_3 = \pi * 0,0125^2 * 0,008$$

$$V_3 = 3,93 * 10^{-6} m^3$$

Tilavuus, sylinterin varren ollessa ulos työntyneenä,  $V_u$

$$2,65 * 10^{-7} + 4,91 * 10^{-6} + 3,93 * 10^{-6}$$

$$= 9,11 * 10^{-6} m^3$$

Tilavuus, sylinterin varren ollessa sisään työntyneenä,  $V_s$

$$2,65 * 10^{-7} + 4,91 * 10^{-6}$$

$$= 5,18 * 10^{-6} m^3$$

Kaava 4. Lasketaan paineen muutos sylinterissä, kun sylinterin mäntä on puristanut ilman kokoon liikkueensa.

Sylinterissä oleva paine on 5 bar, kun sylinterinvarsi on ulos työntynyt.

Paineen muutos voidaan laskea Boylen lain mukaan kaavasta:

$$p_1 V_u = p_2 V_s$$

$$\Rightarrow p_2 = \frac{p_1 V_u}{V_s}$$

$$p_1 = 5 \text{ bar}$$

$p_2$  = Paine, kun sylinteri on sisään työntynyt (bar)

$$V_u = 9,11 * 10^{-6} m^3$$

$$V_s = 5,18 * 10^{-6} m^3$$

$$p_2 = \frac{5 * 9,11 * 10^{-6}}{5,18 * 10^{-6}}$$

$$= 8,79 \text{ bar}$$

Kaava 5. Lasketaan sylinterin männän pinta-ala

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

A = Sylinterin männän pinta-ala (m<sup>2</sup>)

D = Sylinterin männän halkaisija (m)

$$A = \frac{\pi * 0,025^2}{4}$$

$$A = 4,909 * 10^{-4} m^2$$



Kaava 6. Lasketaan sylinterin tuottama voima yhteen paininrullaan sylinterinvarren eri asennoissa.

1 bar = 100 000 pascal

Paineen aiheuttama voima voidaan laskea kaavasta:

$$p = \frac{F}{A} * g$$

$$\Rightarrow F_{1,2} = pAg$$

$F_1$  = Sylinterin aiheuttama voima sylinterinvarsi ulos työntyneenä (N)

$F_2$  = Sylinterin aiheuttama voima sylinterinvarsi sisään työntyneenä (N)

$p_1$  = Paine sylinterissä, kun sylinterinvarsi on ulos työntyneenä (pascal)

$p_2$  = Paine sylinterissä, kun sylinterinvarsi on sisään työntyneenä (pascal)

A= sylinterin männän pinta-ala (m<sup>2</sup>)

Lasketaan  $F_1$ :

$$F_1 = p_1 * A$$

$$F_1 = 500\,000 * 4,909 * 10^{-4}$$

$$F_1 = 245,5\, N$$

Lasketaan yhteen paininrullaan vaikuttava voima:

$$\frac{245,5\, N}{2} = 122,75\, N$$

Lasketaan  $F_2$ :

$$F_2 = p_2 * A * g$$

$$F_2 = 879\,000 * 4,909 * 10^{-4}$$

$$F_2 = 431,5\, N$$

Lasketaan yhteen paininrullaan vaikuttava voima:

$$\frac{431,5 \text{ N}}{2} = 215,75 \text{ N}$$

Kaava 7. Kosketusjännitys terän ja paininrullan välillä sekä sylinterinvarsi ulkona että sisällä.

Kosketusjännitys voidaan laskea kaavasta:

$$p_0 = 0,798 * \sqrt{\frac{F_{1,2}}{DL \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}}$$

$F_1$  = Yhtä paininrullaa painava voima sylinterin varsi ulkona (N)

$F_2$  = Yhtä paininrullaa painava voima sylinterin varsi ulkona (N)

$D$  = Paininrullan halkaisija (m)

$L$  = Terän leveys jolle rulla koskettaa (m)

$\nu_1$  = Poissoninvakio, paininrulla

$\nu_2$  = Poissoninvakio, terä

$E_1$  = Kimmomoduuli, paininrulla (Pa)

$E_2$  = Kimmomoduuli, terä (Pa)

Lasketaan kosketusjännitys sylinterinvarsi ulkona:

$$p_0 = 0,798 * \sqrt{\frac{122,75}{0,019 * 0,00015 \left( \frac{1 - 0,30^2}{210 * 10^9} + \frac{1 - 0,28^2}{200 * 10^9} \right)}}$$

$$p_0 = 1750 \text{ MPa}$$

$$p_0 = 1750 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan kosketusjännitys sylinterinvarsi sisään painuneena:

$$p_0 = 0,798 * \sqrt{\frac{215,75}{0,019 * 0,00015 \left( \frac{1 - 0,30^2}{210 * 10^9} + \frac{1 - 0,28^2}{200 * 10^9} \right)}}$$

$$p_0 = 2320 \text{ MPa}$$

$$p_0 = 2320 \text{ N/mm}^2$$