

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

KAPEAMMAN VANNESAHAN TERÄVÄLYKSEN KANNATTAVUUS
TALVISAHAUKSESSA

VIABILITY OF NARROWER BANDSAW'S BLADE WIDTH DURING WINTER

Lappeenrannassa 13.3.2018

Lauri Viitanen

Tarkastaja Tkt Timo Kärki

Ohjaaja Tkt Marko Hyvärinen

Ohjaaja DI Antti Waajakoski, UPM Kymmene

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Lauri Viitanen

Kapeamman vannesahan terävällyksen kannattavuus talvisahauksessa

Kandidaatintyö

2018

38 sivua, 16 kuvaa ja 4 liitettä

Tarkastaja: TkT Timo Kärki

Ohjaaja: TkT Marko Hyvärinen

Ohjaaja: DI Antti Waajakoski, UPM Kymmene

Hakusanat: vannesaha, terävälly, poskivälly, jäätynyt puu, puru

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää kapeamman vannesahan terävällyksen kannattavuutta talvisahauksessa. Tukkivannesahaukseen pohjautuvan kirjallisuusselvityksen ja aikaisempien kokemusten tueksi suoritetaan käytännön mittauksia sahan normaalin tuotannon ohessa. Tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan sahauspintaan jäätyneen purukerroksen paksuutta ja massaa, muutoksia sahatuotteen mittatarkkuudessa, sekä teränauhojen ja terien ajolämpötilaan ja mekaanista kestoja.

Koeajoja suoritettiin 0,7 mm pohjatyssätyillä, 0,4 mm ja 0,5 mm pohjatyssäämättömillä terillä. Mittauksia suoritettiin yhteensä 66 eri koekappaleelle, joista purukerroksen paksuutta ja mittatarkkuutta mitattiin yhteensä 495 mittauspisteestä ja purun massa mitattiin yhteensä 583 metriltä sahattua pintaa. Mittausjakson aikana puu oli lämpimimmillään -2 °C ja kylmimmillään -18 °C.

Tarkasteltaessa -12 °C ja lämpimämissä olosuhteissa saatuja mittaustuloksia on haastavaa tehdä luotettavia johtopäätöksiä minkään terävällyksen eduksi. -17 °C ja -18 °C lämpötilassa suoritetuista mittauksista voidaan todeta kapeamman terävällyksen olevan parempi. Testausjakson aikana saatiin toteutettua valitettavan pieni määrä mittauksia kylmimmissä lämpötiloissa, mikä vähentää tulosten luotettavuutta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Lauri Viitanen

Viability of narrower bandsaw's blade width during winter

Bachelor's thesis

2018

38 pages, 16 figures and 4 appendices

Examiner: D. Sc. (Tech.) Timo Kärki

Supervisor: D. Sc. (Tech.) Marko Hyvärinen

Supervisor: M. Sc. (Tech.) Antti Waajakoski, UPM Kymmene

Keywords: bandsaw, blade width, frozen wood, sawdust

The goal of this research is to find out viability of narrower blade width when using bandsaw with frozen wood. Conclusion is based on theory of log band sawing, user experiences and measurements from sawed logs during normal production of sawmill. The focus of research is on thickness and mass of sawdust layer that froze on sawed surface, dimensional accuracy of product and temperature and mechanical wear of blades.

In the research used test blades were with 0,7 mm blade width with gullet bottom swaging, 0,4 mm blade width and 0,5 mm blade width without gullet bottom swaging. Measurements were taken from total of 66 different test units. Thickness of frozen sawdust layer and dimensional accuracy were measured from total of 495 different points and mass of frozen sawdust was measured from total of 583 meters. During the test period wood was -2 °C on warmest and -18 °C on coldest.

When evaluating test results from -12 °C and warmer it is hard to make any reliable conclusion for any blade width's advantage. Inspecting results at -17 °C and -18 °C narrower blade width can be noted to be more effective. Though the amount of test data is quite limited at colder temperatures, which questions reliability of conclusion.

ALKUSANAT

Tein tämän kandidaatintyön yhteistyössä Kaukaan sahan kanssa, joten kiitos UPM Kymmenelle mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö mielenkiintoisesta aiheesta. Kiitokset Kaukaan sahan henkilökunnalle joustavuudesta koejärjestelyiden suhteen ja perehdyttämisestä vannesahaukseen ja sahateollisuuteen, sekä terähuoneen kahvinkeitin keittämistä kahveista. Erityiskiitokset kuuluvat Antti Waajakoskelle työn ohjauksesta, Heikki Vaittiselle koeterien ja niiden kierron huolehtimisesta ja Pekka Makkoselle suuresta avusta mittausten tekemisessä.

Lauri Viitanen

Lappeenrannassa 13.3.2018

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
SYMBOLILUETTELO	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Tutkimusmenetelmät	8
1.2 Tavoitteet	8
2 KIRJALLISUUSKATSAUS	10
2.1 Vannesahaus	10
2.2 Terägeometriat	12
2.3 Puun lastuaminen	15
2.4 Terävällys vannesahauksessa.....	15
2.5 Puun termiset ominaisuudet.....	18
2.6 Talvisahaus	19
3 TUTKIMUSMENETELMÄT	22
3.1 Testausjärjestelyt ja ajankohdan merkitys	22
3.2 Purun jääminen kiinni	22
3.3 Sahatuotteen dimensiotarkkuus	23
3.4 Teränauhojen ajolämpötila ja mekaaninen kesto	23
3.5 Käytetyt mittausvälineet	24
3.6 Tiedon kerääminen ja järjestely	24
4 TULOKSET	25
4.1 Koetilanteen vastaavuus edellä esitettyä.....	25
4.2 Kiinnijääneen purun määrä	28
4.3 Dimensiotarkkuus	31
4.4 Teränauhojen ajolämpötila ja mekaaninen kesto	32
5 YHTEENVETO	34
5.1 Tulosten luotettavuus ja vertailukelpoisuus.....	34
5.2 Kapeamman terävällyksen kannattavuus	34

5.3 Ilmenneet tutkimustarpeet.....	36
LÄHTEET	37
LIITTEET	

LIITE I: Kiinnijäätynen purun massa

LIITE II: Purukerroksen paksuus ja dimensiotarkkuus

LIITE III: Lämpötilat eri sahauksen vaiheissa

LIITE IV: Teränauhan lämpötila sahauksen aikana

SYMBOLILUETTELO

h	Asetteen määrittämä laudan leveys [m]
m_a	Kiinni jääneen purun massa pinta-alayksikköä kohden [g/m^2]
m_m	Kiinni jääneen purun massa [g]
m_p	Kiinni jääneen purun massa pituusyksikköä kohden [g/m]
s_i	Yksittäisen koekappaleen pituus [m]

SI -yksiköistä poiketen purun massaa mitataan grammoina käytännöllisyyden vuoksi, mittatavan purun määrän ollessa yksittäisillä mittauskerroilla suurimmillaan kymmeniä grammoja. Pehdyttäessä vannesahan toimintaan käytetään nopeuden yksikköinä m/s ja m/min eri tilanteisiin yleisesti vakioituneiden käytäntöjen mukaan.

1 JOHDANTO

Sahattaessa tukkitavaraa vannesahalla talvisin aiheutuu ongelmia purun vuotaessa ohi purutilasta teränauhan ja sahatun pinnan väliin ja jäätyessä sahatavaraan kiinni. Ongelmia ilmenee jäätyneen purun kulkeutuessa sahatun puumateriaalin mukana eteenpäin prosessissa, teränauhan ylimääräisestä lämpenemisestä lisääntyneen kitkan takia, sekä teränauhan puristuessa jäätyneiden purupintojen väliin. Kaikki asiat aiheuttavat mittatarkkuusvirheitä lopputuotteeseen, mistä seuraa automaattisessa dimensiotarkastuksessa hävikkiä, sekä haasteita prosessiin seuraavissa vaiheissa. Ohivuotoa ja sen aiheuttamia ongelmia pyritään kiertämään testaamalla kapeampaa terävälystä vannesahan terissä. Kapeamman terävällyksen kannattavuutta testataan UPM Kymmenen Kaukaan sahalla yhdellä sahauslinjalla normaalin tuotannon ohessa tammi- ja helmikuussa 2018.

1.1 Tutkimusmenetelmät

Vertailukelpoista materiaalia pyritään tuottamaan tammi- ja helmikuun aikana mahdollisimman kylmien pakkasjaksojen aikana. Testiajoja suoritetaan nykyisin käytössä olevalla pohjatyssäyillä leveämmällä terävällyksellä, sekä kapeammilla tyssäämättömillä testiterillä. Purun määrää ja dimensiotarkkuutta tutkitaan tekemällä mittauksia olosuhteiden salliessa mahdollisimman paljon sahatusta tuotteesta. Lisäksi tarkkaillaan mahdollisia muutoksia testiterien kestävydessä.

Tällä hetkellä sahataan 0,7 mm terävällyksellä, kyljen nousukulman ollessa 3° ja purutilan päädyssä pohjatyssäys estämässä purun pakenemista. Testiterien terävälly on 0,4 mm, sivun nousukulma 2°, eikä purutilassa ole pohjatyssäystä. Myös 0,5 mm terävällyksellä ilman pohjatyssäystä kokeillaan sahata, mikäli 0,4 mm terävälly aiheuttaa odottamattomia haasteita.

1.2 Tavoitteet

Tavoitteena on saada luotettava ja vertailukelpoinen arvio siitä, onko kannattavampaa sahata talvikuukausina käyttäen kapeampaa tyssäämätöntä terävällystä. Lopputulos saadaan arvioitaessa kiinni jääneen purun määrää, dimensiotarkkuuden muutosta ja terien kestoikää.

Johtopäätös tehdään vertailemalla eri mittausarvojen yhteisvaikutusta, tekemällä kirjallisuusselvitystä aiheeseen liittyen, sekä haastatteleamalla sahan työntekijöitä heidän kokemuksistaan talvisahauksesta ja terävälyksen vaikutuksesta. Testaukset rajataan koskemaan 0,7 mm pohjatyssätyä terää ja 0,4 mm ja 0,5 mm pohjatyssäämättömiä teriä. Tarkasteltaessa sahattuja pintoja ei erotella erikseen puun sydänpuolen ja ulkopuolen sahauspintoja.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Vannesahaus on yleinen tekniikka pyörösaahauksen ohessa sahausteollisuudessa. Vannesahan idea on suljetun lenkin muodostava teränauha, johon on koneistettu lastuavat terät. Teränauhan terien geometria vaikuttaa sahausominaisuuksiin ja on olennainen osa vannesahayksikön suunnittelussa. Puun ominaisuudet muuttuvat lämpötilan laskiessa ja puun jäätyessä. Sopivan terägeometrian ja varsinaisen puuta lastuavan teräpalan ominaisuudet ovat olennaisessa osassa etenkin suomalaisessa sahausteollisuudessa, joka toimii ympäri vuoden.

2.1 Vannesahaus

Vannesahaus perustuu teränauhaan, joka on kiristetty kahden pyörän välille ja sahattava materiaali syötetään teränauhan liikesuuntaa kohtisuoraa vastaan. Teränauhat ovat yleensä yksiteräisiä, kuten kuvasta 1 havaitaan, joskin myös kaksiteräisiä voidaan käyttää haluttaessa mahdollisuus sahata molempiin suuntiin. Vannesahat ovat mekaanisessa metsäteollisuudessa yleensä osana pidemmissä, useamman sahausyksikön sisältävissä tuotantolinjoissa. Vannesahoja voidaan käyttää pystysuuntaisena eli sahaussuunta on ylhäältä alaspäin tai vaakasuuntaisina, jolloin sahataan oikealta vasemmalle tai vasemmalta oikealle. Pohjoismaisessa sahausteollisuudessa pystysuuntainen sahaus on yleisempää. Pystysuuntaisen vannesahauksen eduksi voidaan lukea tukevuus; terien liikkua alaspäin kohdistuu sahausvoimat alapuolella olevaa kuljetinta vasten. (Paajanen 1989, s. 14 – 17; Varis 2017, s. 97)

Teränauha kiristetään vetopyörän ja kääntöpyörän välille $120 - 180 \text{ N/mm}^2$ jännitykseen. Molemmat pyörät ovat yhtä suuret, joskin vetopyörä on painavampi. Kääntöpyörällä vain käännetään teränauhan liike. Molemmat pyörät ovat teräksestä hitsaamalla tai valamalla valmistettuja, yleensä $1500 - 1800 \text{ mm}$ halkaisijalla sahattaessa tukkitavaraa. Nykyään pyörien ulkopinta on muotoiltu kaarevaksi, eli bombeerattu, keskikohdan ollessa yleensä noin $0,2 - 0,3 \text{ mm}$ korkeammalla. Bombeerauksella yhdessä teränauhojen jännittämisen kanssa saadaan teränauha keskittämään itsensä pyörän päällä ja pysymään siellä. Tällä on positiivinen vaikutus teränauhojen kestoikään ja sahatavaran mittatarkkuuteen. Teränauhan kiristys tapahtuu kääntöpyörän sijaintia säätämällä hydraulisesti tai mekaanisesti.

Kiristysjärjestelmä sisältää myös teränauhan automaattisen vaimennusjärjestelmän, joka vastaanottaa terään kohdistuvia iskuja ja auttaa pitämään sahauksen aikana terän kiristysvoima vakiona. (Paajanen 1989, s. 27 – 37; Varis 2017, s. 98 – 99)



Kuva 1. Vannesahayksikkö takaapäin neljällä yksipuoleisella teränauhalla ja kahdeksalla pyörällä. Tarkasteltaessa teränauhan lämpötilaa sahauksen aikana etälämpömittarilla, kannattaa mittaus tehdä pyörän pinnasta, teränauhan pinnan ollessa liian kiiltävä.

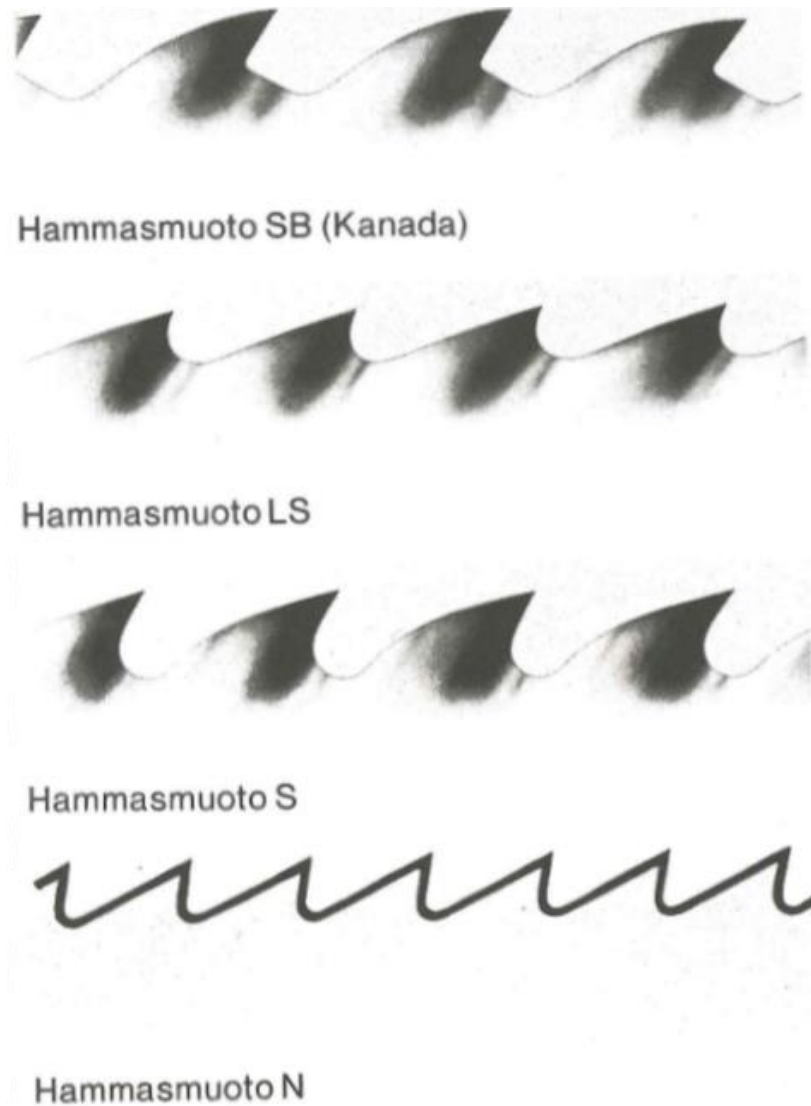
Suomessa yleensä käytettävät teränauhat ovat noin 184 – 225 mm leveitä, 1,47 mm paksuja ja 10 000 mm pitkiä. Teränauhoihin koneistetaan yhdelle tai kahdelle puolelle hampaat ja purutilat, joskin terät molemmilla puolilla on harvinaista suuremmissa tuotantolinjoissa, molempaan suuntaan sahaamisen ollessa hidasta suurempien läpikulkevien tuotantomäärien vuoksi. Terän liikenopeus on yleensä 50 – 70 m/s ja sahattavan tavaran syöttönopeus 30 – 120 m/min. Nykyään teränauhan liikenopeus säädetään automaattisesti taajuusmuuttajalla vastaamaan syöttökuljettimen nopeutta (Varis 2017, s. 98 – 99).

Vannesahoissa käytetään teränohjaimia parantamaan sahauksen laatua. Mahdollisimman lähelle sahattavan tavaran ylä- ja alapuolelle sijoitetaan kulutusta kestävätkuitupalat, jotka puskevat teränauhaa ulospäin saaden sen kulkemaan suoraan ohjainten välillä. Sahattavan tavaran koon muuttuessa siirretään yleensä ylempää ohjainta automaattisesti vastaamaan asetteen mittoja. Tarpeen vaatiessa voidaan myös käyttää teräohjaimia molemmilla puolilla teränauhaa. Nykyään on olemassa myös magneettisia ohjaimia, joilla voidaan pitää teränauha paremmin hallussa ja vaimentaa sivuittaisia voimia. (Paajanen 1989, s. 38 – 41; Varis 2017, s. 98)

2.2 Terägeometriat

Vannesahoihin käytettävän terämateriaalin pitää olla lujaa ja kestävä, materiaalin vetolujuuden ollessa 1400 – 1700 N/mm². Käytettävän teräksen lämpökäsittelyn pitää olla tasaista ja valmiille tuotteelle on tarkat toleranssit tasaisuudesta ja suoruudesta. Materiaalin oltava myös hitsattavaa ja sovelluttava tyssäykseen ja steliittipaloitukseen. Kovuus on yleensä 44 – 50 HRC. Tunnettuja valmistajia ovat itävaltalainen Uddeholmstrip ja japanilainen Daido (Paajanen 1989, s. 73; Varis 2017, s. 109 - 110).

Käytettävän vannesahan ominaisuudet vaikuttavan terägeometrian valinnassa muun muassa teränauhan leveyteen, paksuuteen, hammasmuotoon, hammasjakoon ja rintakulmaan. Yleisimmät terägeometriat ovat: SB (Kanadan terägeometria), LS, S ja N. Terägeometriat on myös esitetty kuvassa 2. Tukkiannesahoissa käytetään yleensä tyssätyinä muotoja SB ja LS, halkaisuvannesahoissa tyssätyinä muotoja LS ja S ja puusepän vannesahoissa haritettuna muotoa N. Näistä voi olla myös variaatioita vastaamaan sahan tarpeita (Paajanen 1989, s. 80; Varis 2017, s. 110). Kuvassa 3 on käytössä oleva variaatio SB-terägeometriasta.

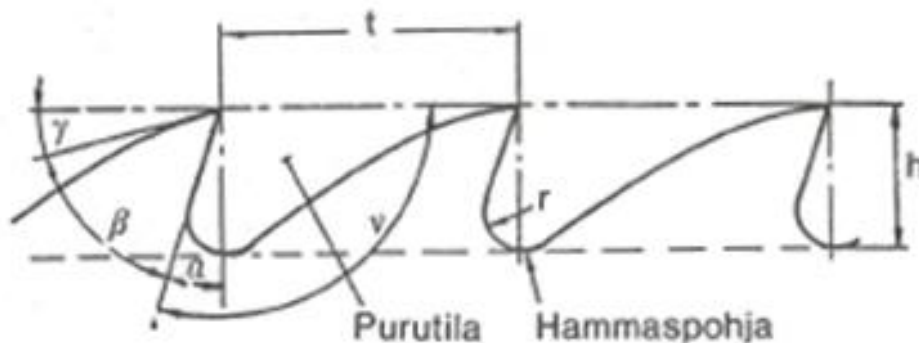


Kuva 2. Neljä yleisintä hammasmuotoa (Paajanen 1989, s. 80).



Kuva 3. Variaatio SB-, eli Kanadan teräogeometriasta. Kuvan terässä pohjatyssä estämässä purun ohivuotoa.

Määritettäessä terägeometriaa tarkastellaan muun muassa rintakulmaa, päästökulmaa, teräkulmaa, hammasväliä ja sahausrakoa. Kuvassa 4 on esitettyä olennaiset terägeometrian mitoituksessa huomioitavat mitat. Rintakulman määrittämisessä huomioidaan puun ominaisuudet, leikkuunopeus, syöttönopeus ja hammasmuoto. Suuremmalla kulmalla hammas leikkaa helpommin, tosin liian suurella kulmalla hampaan vakaus heikkenee, mikä näkyy sahausksen laadussa. Tätä voidaan kompensoida madaltamalla terää, joka toisaalta pienentää purutilaa. Mikäli rintakulma pienenee eli lähestyy nolaa, muuttuu puun lastuaminen kaapimiseksi, mikä heikentää hampaan kestävyyttä ja aiheuttaa hammassärmän tylsistymistä. Kovaa puuta sahattaessa terägeometrian rintakulma on yleensä $12^\circ - 25^\circ$ ja pehmeämmillä puulla $26^\circ - 35^\circ$. Syöttönopeuden kasvaessa tarvitaan suurempaa päästökulmaa, sen ollessa yleensä $8^\circ - 16^\circ$. Hampaan päästökulma ei saa olla alle 5° , koska tällöin hampaan selkä painuu puuta vasten, mistä seuraa hampaan lämpenemistä. Teräkulma ei saa olla alle 45° , jotta hammas pysyy tarpeeksi tukevana. Tuoretta puuta sahattaessa hammasväli yleensä $45 - 50$ mm ja kuivahalkaisussa $30 - 35$ mm. Tuoretta puuta sahattaessa sahausrako on kaksi kertaa terärungon vahvuus, kuivalla puulla $0,1 - 0,2$ mm pienempi (Paajanen 1989, s. 83 – 84; Varis 2017, s. 110).



Kuva 4. Periaatekuvan hammasgeometrian sivuprofiilista ja sen oleellisista kulmista (Paajanen 1989, s. 83). Kuvan muuttujat:

- γ = päästökulma
- β = teroituskulma
- α = rintakulma
- v = lastukulma ($\alpha + 90^\circ$)
- t = hammasjako
- r = pyöristyssäde
- h = hammaskorkeus

Purutilan suuruutta mitoitettaessa huomioidaan leikkuunopeus, syöttönopeus, sahattavan kappaleen leikkuukorkeus, puulaji ja tyssäyslevitys. Hammaspohjan kannattaa olla mahdollisimman avara, koska tällöin sahauksessa paine jakaantuu laajemmalle alalle ja hammaspohjan repeämän riski pienenee (Paajanen 1989, s. 78 – 79).

2.3 Puun lastuaminen

Puun sahaaminen on lastuavaa työstöä ja syntyvän purun ominaisuudet riippuvat lastuamistapahtumasta ja ominaisuuksista. Puusta irtoaa lastu leikkuuvoiman vaikutuksesta, mikä voidaan jakaa kahteen komponenttiin, pääleikkuuvoimaan ja leikkuupaineeseen. Pääleikkuuvoima määrää terän liikuttamiseen vaaditun voiman ja leikkuupaine syntyy terän painamisesta lastuttavaa pintaa vasten (Heikinheimo 1964, s. 1361).

Lastun irtoamiseen ja päälastuamisvoimiin yleisimpiä suomalaisia puuta sahattaessa vaikuttaa olennaisimmin lastuamissuunta puun syihin nähden, lastuavan terän terävyys, terägeometria ja puun kosteus. Leikkuunopeudella ei ole merkittävää vaikutusta lastuamisvoimiin (Heikinheimo 1964, s. 1363 – 1390). Puun jäätyminen ei juurikaan testitulosten mukaan vaikuta lastunmuodostukseen (Kokkonen 2005 s. 103).

2.4 Terävällys vannesahauksessa

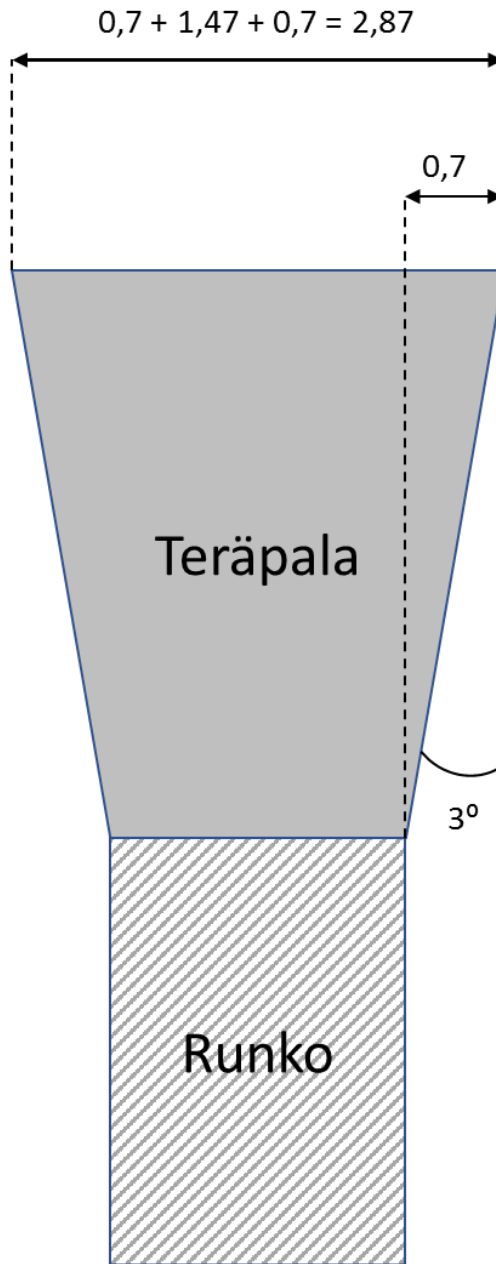
Varsinainen puuta lastuava osa terästä on leveämpi, jotta teränauhan ja puun välillä olisi mahdollisimman vähän kitkaa. Kuvasta 5 voidaan havaita levennys kiiltävinä alueina rungon reunoilla. Tätä kutsutaan terävällykseksi tai niin sanotuksi poskivällykseksi ja se tehdään esimerkiksi harittamalla, tyssäämällä tai stelliittipaloituksella. Kuvassa 6 on esitettyä todellisessa käytössä olevan terävällyksen mittasuhteet. Mitä kuituisempaa ja pehmeämpää puu on, sitä suurempi poskivälly tarvitaan vastasahatusta pinnasta ulkonevien kuitujen takia. Nykyään sahateollisuudessa käytetään lähinnä tyssätyjä ja stelliittipaloitettuja teriä, koska niillä päästään tehokkaampaan sahaukseen, yhtäjaksoisen sahausajan noustessa haritettujen terien parista tunnista stelliittipaloitettujen terien jopa 12 – 24 tuntiin. Tyssäys on kylmämuovausmenetelmä, jossa hampaan kärki levitetään terän runkoa leveämmäksi. Paloituksessa hampaan pinta pinnoitetaan kulutusta kestäväällä materiaalilla kuten stelliitillä (esimerkkikoostumus: kobolttia 52 %, kromia 30 %, volframia 9 %, hiiltä 1,8 %). Paloitus

tehdään nykyään yleensä automaattisella paloituskoneella plasma- tai vastushitsauksella. (Varis 2017, s. 113 – 115)

Sahatessa syntyy purua, joka aiheuttaa haasteita sahatun tuotteen mittatarkkuuteen, terien kulumiseen sekä seuraaviin sahatuotteen käsittelyvaiheisiin, kuten kuivaukseen. Tavoitteena on saada puru pysymään purutilassa ja poistumaan vasta silloin, kun kyseinen kohta on poistunut puun sisältä ja puru voidaan käsitellä helpommin pois sahauksen tieltä. Useasti ongelmana on se, että terän ollessa sahaamassa puun sisällä puru ei pysy sille tarkoitetussa purutilassa vaan tapahtuu ohivuotoa, eli puru pääsee pakenemaan sivuille terän ja sahatun pinnan väliin. Puru terän ja sahauspinnan välissä aiheuttaa terän lämpenemistä kitkan kasvaessa, mikä aiheuttaa teränauhan poikittaissuuntaista liikettä sahauksen liikesuuntaan nähden. Tästä seuraa mittatarkkuusvirheitä valmiissa sahatuotteessa (Makkonen 2018; Muurman 2018; Vaittinen 2018).



Kuva 5. Teräpala edestäpäin kuvattuna, alareunassa nähtävissä pohjatyssäys, jonka tarkoitus estää purun ohivuotoa. Kuvan terän dimensiot samat kuin kuvassa 6.



Kuva 6. Esimerkki terästä edestäpäin kuvattuna. Terävällys 0,7 mm, paksuus 1,47 mm ja nousukulma 3°. Teräpalan kokonaisleveyteen huomioidaan terävällys molemmilta puolilta ja itse rungon paksuus. Tällöin kokonaisleveydeksi saadaan 2,87 mm. Kuvassa esitetty kuvan 5 käytössä olevan terän mitat.

Tavoitteena on pitää puru mahdollisimman hyvin purutilassa ja estää ohivuoto. Terän juuri voidaan tyssätä (kuva 5), milloin purun on vaikeampaa paeta purutilasta. Tämä tosin lisää repeilyriskiä terän juuressa, mikä lisää huoltoväliä ja lyhentää terän ikää. Kapeammalla terä- eli poskivälöksellä purulla on vähemmän tilaa paeta sivuille. Myös pienemmällä nousukulmalla terän sivulla voidaan vaikuttaa purun pakenemiseen. Tukkikoon suureneminen pitää huomioida purutilan koossa, sinne syntyvän purun määrän ja terän puun sisällä olevan ajan kasvaessa (Makkonen 2018; Muurman 2018; Vaittinen 2018).

Terävälkykseen ja sen muodossa pysymiseen vaikuttaa terän muodon kulumisen. Terä kuluu voimakkaimmin reunoistaan, joissa kosketuspinta-ala on pienin. Sahausnopeuden ja -paineen kasvu lisää kulumista teräpalassa. Teräpalan kuluessa pienenee terävälky ja sivun nousukulma pienenee. Teräpalan reuna ottaa puuhun kiinni tällöin suuremmalta alalta, mistä seuraa luonnollisesti kulumista suuremmalta alalta (Fischer, R. 1997, s. 631 – 640).

2.5 Puun termiset ominaisuudet

Puu on termisiltä ominaisuuksiltaan anistrooppista, eli ominaisuudet ovat riippuvaisia suunnasta. Esimerkiksi puun lämpölaajeneminen on huomattavasti voimakkaampaa tangentin ja säteen suunnassa kuin syiden suunnassa. Absoluuttisen kuivalla männyllä, jonka tiheys on noin 430 kg/m^3 , syiden suuntaisen lämpölaajenemiskertoimen ollessa vain $3,4 * 10^{-6} \text{ 1/K}$ on tangentin ja säteen suuntaiset kertoimet yli kymmenkertaiset $35,0 * 10^{-6} \text{ 1/K}$. Edellä mainituista arvoista voidaan havaita syiden suuntaisen laajenemisen olevan suhteellisen merkityksetöntä, kun taas tangentin ja säteen suuntainen laajeneminen absoluuttisen kuivalla puulla voimakkaampaa kuin esimerkiksi raudalla ($12 * 10^{-6} \text{ 1/K}$). (Kuikka, Kunelius 1993, s. 36; Kärkkäinen 2003, s. 233)

Lämpötilan laskiessa välille $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ - $-7 \text{ }^\circ\text{C}$ puun lämpölaajenemiskerroin suurenee voimakkaasti ja tapahtuu pakkaskutistumista. Kyseinen ilmiö johtuu puun sisäisestä kuivumisesta, eli puun rakenteessa vesi alkaa siirtyä soluseinämiä soluntuoliin ja soluväleihin, mistä seuraa seinämän kutistuminen. Kosteusprosentin ollessa 12 - 15 % tapahtuu puussa olevan veden jäätyminen vasta noin $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Suuremmilla

kosteusprosentilla puun dimensio pysyy paremmin vakiona, sisäisen kuivumisen aiheuttaman kutistumisen ja veden jäätyminen aiheuttaman laajenemisen kompensoidessa toisiaan (Kärkkäinen 2003, s. 234). Täysin märällä puulla dimensiot voivat kasvaa ja ilmetä puun halkeilua ja vaurioitumista veden jäätyminen takia (Kärkkäinen 2003, s. 256).

Lämpötilan alentuessa puun lujuusominaisuudet paranevat. Ilmakuivan, eli kosteusprosentin ollessa noin 12 %, männyn lämpötilan alentuessa välillä 50 °C - -20 °C kasvaa vetolujuus noin 10 %, taivutuslujuus 50% ja puristuslujuus yli 100 %. Vaikutus on suoraviivaista ja johtuu todennäköisesti sisäisestä kuivumisesta, mikä aiheuttaa manto- eli pintapuuhun tangentin suuntaista vetojännitystä, mikä lisää puun jäykkyyttä ja lujuutta. Puun kosteusprosentin kasvaessa suurenee myös lämpötilan vaikutus puun lujuusominaisuuksien muuttumiseen. (Kärkkäinen 2003, s. 220 - 221)

2.6 Talvisahaus

Sahattaessa puuta terämateriaalin ja puun välinen kitka johtuu selluloosan ja puun ainesosien hydroksyyliyhymien vuorovaikutuksesta teräksen oksidikerroksen kanssa ja puun muodon muuttumisesta teräspinnan liukuessa sitä vasten. Myös Van der Waalsin voimat vaikuttavat kitkan suuruuteen, joskin niiden vaikutus suhteessa edellä kuvattuun adheesioon ja muodon vaikutukseen on pieni. Adheesiota tarkasteltaessa havaitaan nopeuden kasvamisella olevan vähäinen merkitys kitkan suuruuteen normaaleilla liikenopeuksilla. Yli 50 m/s nopeuksilla kitkakertoimen kasvu on olematon. Puun muodon muuttumisen vaikutus kitkan suuruuteen vähenee liukuvan teräspinta-alan kasvaessa. (Kärkkäinen 2003, s. 245) Teräspinnan sileyden paraneminen lisää kitkaa sahattaessa erityisesti märkää sulaa puuta. Myös mitä tuoreempaa puu on, sitä suurempi kitkavaikutus. (Kuikka, Kunelius 1993, s. 38). Myös liian huono pinnanlaatu, esim. ruosteisuus lisää kitkan suuruutta luonnollisesti (Kärkkäinen 2003, s. 246). Teränauhan jännityksen kasvaessa paranee sahauspinnan pinnanlaatu. Tutkimus jäätyneen ja sulan puutavaran sahatun pinnan pinnanlaadusta osoittaa myös, että pinnanlaatu paranee puun jäätyessä. Tämä johtuu pienemmästä kitkakertoimesta jäätyneen puun ja teränauhan välillä, sekä pienemmästä elastisesta muodonmuutoksesta ja palautumisesta jäätyneellä puulla (Yu et al. 1997, s. 77 – 79).

Sahauksessa syntyvän purun ohivuodon vuoksi valmiiseen sahapintaan kiinni jäävän purun määrä on merkittävästi suurempi jäätyneellä puulla purun jäätyneen vuoksi, kuten

testitulokset osoittavat (Yu et al. 1997, s. 77 - 79). Kuvista 7 ja 8 voidaan havaita ero kiinni jääneen purun määrässä 0 °C ja -10 °C välillä. Myös ajalla, minkä puru on puristuksessa sahattua pintaa vasten vaikuttaa siihen, kuinka hyvin puru jäätyy kiinni. Testitulokset osoittavat kiinni jäätyneen purun määrän kasvavan, mitä pidempään se on paineen alla sahattua, jäistä puupintaa vasten (Kokkonen 2005, s. 98 – 99).

Suurimmat ohivuotaneen purun jäätymisestä seuraavat ongelmat ovat purun kulkeutuminen mukana, teränauhan ohjautuminen puristuksessa ja terän lämpeneminen kitkan kasvaessa. Uudelleen jäätynyt ja mukana kulkeutunut puru vääristää myöhemmässä vaiheessa konenäöllä mitattua dimensiota sahatuotteelle. Tästä seuraa turhaa hävikkiä oikeanlaisen tuotteen tullessa mitatuksi väärin mittoihin. Jäätyneen purun kulkeutuminen mukana ja sulaminen myöhemmin aiheuttaa myös lisätyötä ja ongelmia seuraavissa käsittelyvaiheissa, kuten kuivauksessa. Purun jäätyessä heti ohivuodon tapahduttua sahattuun pintaan kiinni, jää teränauha puristuksiin molemmilta puolilta. Tällöin sahattavan puun epätäydellisuudet, kuten käyryys ja lenkous pääsevät kosketuksen kautta liikuttamaan teränauhaa sivusuunnassa, mistä seuraa mittatarkkuusvirhettä valmiissa sahatuotteessa. Ylimääräinen puru teränauhan ja sahatun pinnan välissä aiheuttaa myös lämpenemistä terässä, mistä seuraa teränauhan poikittaissuuntaista liikettä syöttösuuntaan nähden. Tämä aiheuttaa mittatarkkuusvirhettä valmiiseen sahatuotteeseen. Purun jäätyneen tuomat ongelmat kasvavat etenkin lämpötilan laskiessa alle -15 °C (Makkonen 2018; Muurman 2018; Vaitinen 2018).



Kuva 7. Purun jääminen kiinni sahauspinnoille on vähäistä 0 °C lämpötilassa.



Kuva 8. Purua jää enempi kiinni jo -10 °C lämpötilassa.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Mittaukset on tarkoitus suorittaa tammi- ja helmikuussa 2018. Tarkasteltavina asioina ovat kiinni jääneen purun massa pituusyksikköä ja sahauspinta-alaa kohden, purukerroksen paksuus ja sahatuotteen dimensiotarkkuus koko laudan pituudella. Lisäksi seurataan, ilmeneekö koeterissä poikkeuksellista lämpenemistä ajon aikana tai onko kulumisen voimakkaampaa.

3.1 Testausjärjestelyt ja ajankohdan merkitys

Puun jäätymisominaisuuksien vuoksi on testausjärjestelyissä oleellista odottaa muutama päivä sopivan pakkasjakson alettua, jotta testattava tukkimateriaali on jäänyt ja mittaustulokset ovat vertailukelpoisia. Tutkittavat arvot mitataan käsin UMP Kymmenen Kaukaan sahalla.

3.2 Purun jääminen kiinni

Purun poistumista testataan keräämällä sahauksen jälkeen linjastolla olevasta sahatavarasta kiinni jäänyt purumassa ja punnitsemalla se. Jokaisella testauskerralla otetaan kaksi pelkkää, mikä tarkoittaa asetteesta riippuen 8 – 12 sahauspintaa, jolta puru kerätään. Testilaudat nostetaan muovisen pressun päällä oleville tuille ja käyttäen metallilevyä, jonka yksi sivu on teroitettu, kaavitaan kiinni jäänyt puru alla olevan muovipressun päälle. Muovipressu viikataan huolellisesti kasaan, jottei purua pääse pakenemaan. Puru kerätään huolellisesti harjaamalla muoviasiaan ja punnitaan vaa'alla. Muoviasian massa mitataan myös tyhjänä, jolloin saadaan purun massa vähentämällä muoviasian massa edellä mainitusta mittauksesta purun ollessa muoviasiaassa.

Kaavittaessa puru testipinnalta, mitataan jokaisen laudan pituus rullamitalla puolen senttimetrin tarkkuudella, jolloin saadaan kokonaispituus s_i , jolta purua on kerätty. Kiinni jääneen purun massa m_m jaetaan pituudella, jolta puru on kaavittu. Tällöin eri mittauserroilla saadut purun määrät ovat keskenään vertailukelpoisia saman asetteen sisällä. Purun massa pituutta kohden m_p lasketaan seuraavalla yhtälöllä:

$$m_p = \frac{m_m}{\sum s_i} \quad (1)$$

Yhtälössä 1 m_p on mitatun purun määrä [g/m], m_m mitatun purun massa [g] ja s_i testilautojen pituus [m].

Purun määrää verrataan myös mitattuun pinta-alaan, jakamalla mitatun purun massa m_m kaavintapituuden s_i ja koelaudan leveyden h tulolla. Tällöin saadaan purun massa pinta-ala kohden m_a . Näin laskettaessa huomioidaan asete ja voidaan vertailla mittaustuloksia eri asetteiden välillä. Massa pinta-ala kohden lasketaan seuraavalla yhtälöllä:

$$m_a = \frac{m_m}{h \cdot \sum s_i} \quad (2)$$

Yhtälössä 2 m_a on mitatun purun määrä [g/m²] ja h on asetteen määrittämä leveys laudalle [m].

3.3 Sahatuotteen dimensiotarkkuus

Sahatuotteen dimensiotarkkuuden mittaukset suoritetaan kiinnijääneen purun massan mittauksen yhteydessä. Työntömitalla mitataan lankun paksuus purun ollessa vielä kiinni pinnassa, puru kaavitaan pois ja mitataan paksuus paljaan sahatuotteen pinnasta. Dimensiomittauksesta suoritetaan kolmesta kohtaa lankkua; 20 cm päästä latvasta, keskeltä ja 20 cm päästä tyvestä. Tuloksissa tarkastellaan purukerroksen paksuutta, paljaan sahatuotteen dimensioita ja mittaustulosten hajontaa lankun pituudella, eli sitä kuinka ”aaltoileva” mitattu lankku on. Hajonnan tunnusluvuista käytetään koko populaatioon perustuvaa varianssia. Mittausdata käsitellään Microsoft Office Excel 2016 - taulukkolaskentaohjelmalla ja varianssi lasketaan käyttäen Excelin *VAR.P* -funktioita.

3.4 Teränauhojen ajolämpötila ja mekaaninen kesto

Sahauksen aikana myös mitataan terän ja teränauhan lämpötilaa käsikäyttöisellä etälämpömittarilla ja tarkastellaan, onko eroja teränauhan lämpötiloissa ajon aikana eri terävälkyksillä. Kyseisellä lämpötilamittarilla saatavat arvot eivät ole absoluuttisen oikeita ja mittaustavan huomioon ottaen on virhe mittaustuloksissa todennäköinen. Tavoitteena ei kuitenkaan ollut saada absoluuttisen tarkkoja mittaustuloksia tässä osa-alueessa, vaan enemmänkin suuntaa-antavia arvoja.

Terien mekaanista kestoja tarkastellaan numeroimalla testiterät ja ajon aikana kirjataan ylös terähuoltojen yhteydessä, kuinka monta tuntia kullakin terällä on ajettu. Tulokset saadaan vertailemalla, kuinka monta tuntia on ajettu yksittäisillä terillä. Myös teränauhoihin tai teriin syntyneet epänormaalit vauriot kirjataan ylös.

3.5 Käytetyt mittausvälineet

Käytettävä lämpömittari on FLIR E6. Purukerroksen paksuuden ja dimensiotarkkuuden mittaamiseen käytetään digitaalista työntömittaa. Puru kaavitaan pois metallisilla kaapimilla 1,5 m * 6 m kokoiselle muovipressulle. Apuna purun kaapimisessa käytetään kahta jalallista telinettä, jotka sijoitetaan kaapimisen ajaksi edellä mainitun pressun päälle. Koekappaleet nostetaan telineiden päälle kaapimisen ajaksi. Puru harjataan pressulta tavallisella lattiaharjalla noin 20 cm * 20 cm * 5 cm muoviastian Harja puhdistetaan aina ennen purun harjaamista. Puru punnitaan muoviastiassa yhden desimaalin tarkkuudella näytävällä vaa'alla.

3.6 Tiedon kerääminen ja järjestely

Mittausdata eri terävältyksien välillä pyritään keräämään mahdollisimman samankaltaisissa lämpötilaolosuhteissa ja mielellään mahdollisimman kylmällä tukkitavaralla. Mittausdataa pyritään keräämään olosuhteiden salliessa mahdollisimman paljon. Pääpaino on kiinni jääneen purun määrässä, sekä dimensiotarkkuudessa. Myös terien lämpötilaa seurataan ajon aikana, sekä seurataan ilmeneekö odottamattomia häiriöitä. Tavoitteena on saada mitattua mahdollisimman paljon alle -15 °C lämpötilassa, mutta myös lämpimämmissä olosuhteissa mitataan, mikäli testausajankohtana ei ulkolämpötila laske kylmemmäksi tai pysy riittävän kauan tavoitelämpötilan alapuolella.

4 TULOKSET

Ensimmäiset 0,4 mm terävälyksellä olevat testiterät laitettiin ajoon 23.1.2018 kello 9:00. Kyseisillä testiterillä tapahtui välittömästi voimakasta poikittaissuuntaista liikettä, mistä seurasi dimensiovirheellistä sahaustuotetta. 0,4 mm testiterillä ei jatkettu testiajoja sahan normaalin tuotannon ohessa tapahtuvien testausten luonteen vuoksi. Loput koeajot suoritettiin 0,5 mm ja 0,7 mm terävälyksillä. Loput koeajot sujuivat suunnitellusti ja 0,7 terävälyksellä tehdyistä koeajoista suoritettiin yhteensä yhdeksän erillistä mittauskertaa ja 0,5 mm terävälyksellä kuusi erillistä mittauskertaa. Puun lämpötila vaihteli eri mittauskertojen -2 °C ja -18 °C välillä, mediaanilämpötilan ollessa selvästi suurimmalla osuudella -10 °C. Viimeiset mittaukset suoritettiin 7.2.2018.

4.1 Koetilanteen vastaavuus edellä esitettyä

Aiemmin todettiin, että jäätynyttä puuta sahattaessa puru sulaa lastuttaessa ja vuotaessa ohi purutilasta jäätyy takaisin sahattuun pintaan. Käyttäen käsikäyttöistä etälämpömittaria mitattiin sahattavan puun lämpötila juuri ennen sahausta, välittömästi sen jälkeen, sekä myöhemmässä vaiheessa kuljettimelta. Lämpökamerakuvat mittaustilanteista on esitettyinä kuvissa 9, 10 ja 11.

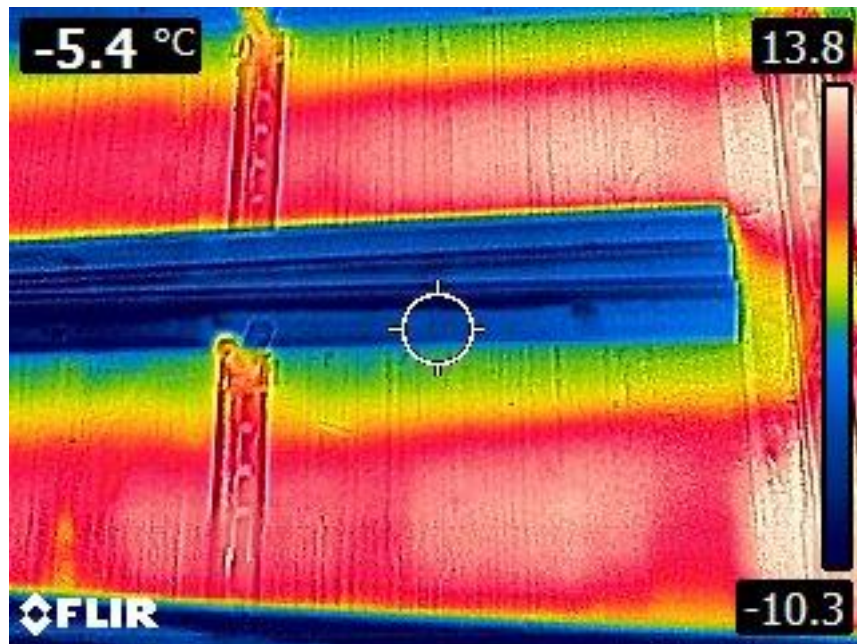
Testaus suoritettiin 24.1.2017 kello 16:00 – 17:00, ulkoilman lämpötilan ollessa -5 °C. Jokaisessa kohdassa tehtiin 20 erillistä mittausta samasta kohtaa ja kirjattiin lukemat ylös ja laskettiin keskiarvo mittaustuloksille. Mittausten keskiarvona saatiin puun lämpötilaksi ennen vannesahausyksikköä -6,9 °C (Kuva 9). Välittömästi puun poistuttua vannesahan teränauhojen välistä oli lämpötila -3,7 °C (Kuva 10) ja myöhemmässä vaiheessa kuljettimella sahauspintojen lämpötila oli -5,7 °C (Kuva 11).



Kuva 9. Puun lämpötila ennen vannesahausta. Mitattu aiemmin pelkkahakkurilla haketetulta pinnalta, ei puun ulkopinnasta. Lämpötilalukema kuvan vasemmassa yläreunassa.

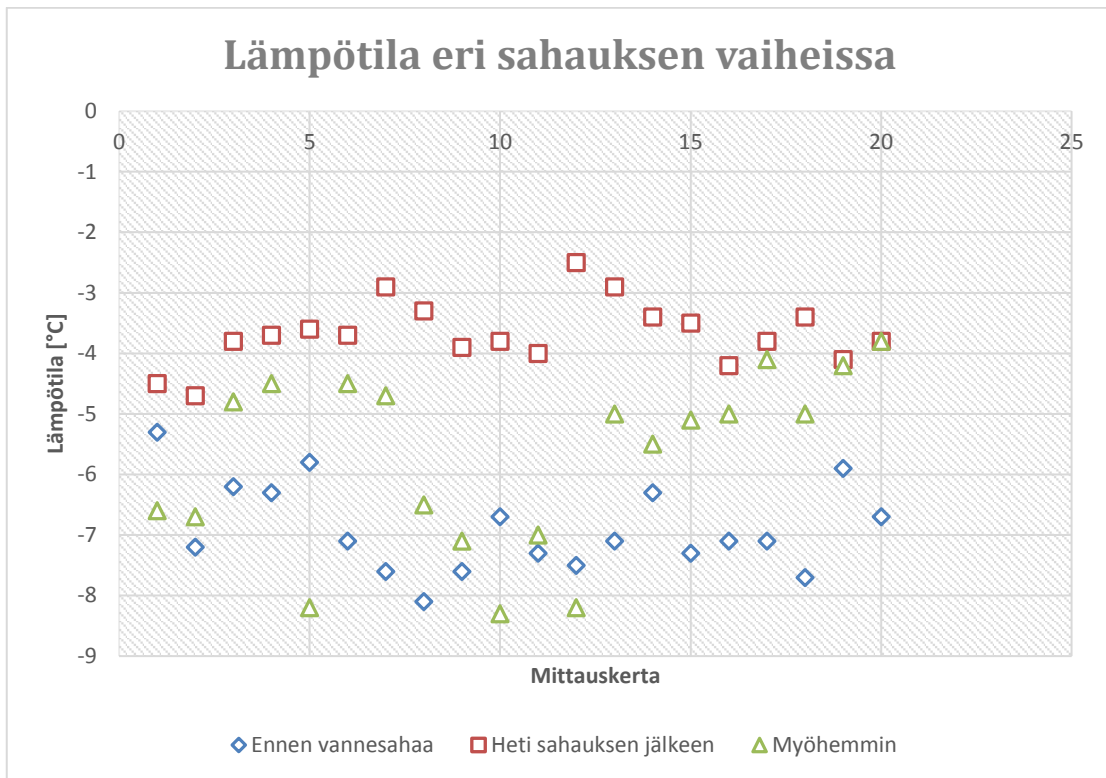


Kuva 10. Sahatun pinnan lämpötila heti sahausken jälkeen.



Kuva 11. Sahauspinnan lämpötila laskenut myöhemmässä käsittelyvaiheessa sahauksen jälkeen.

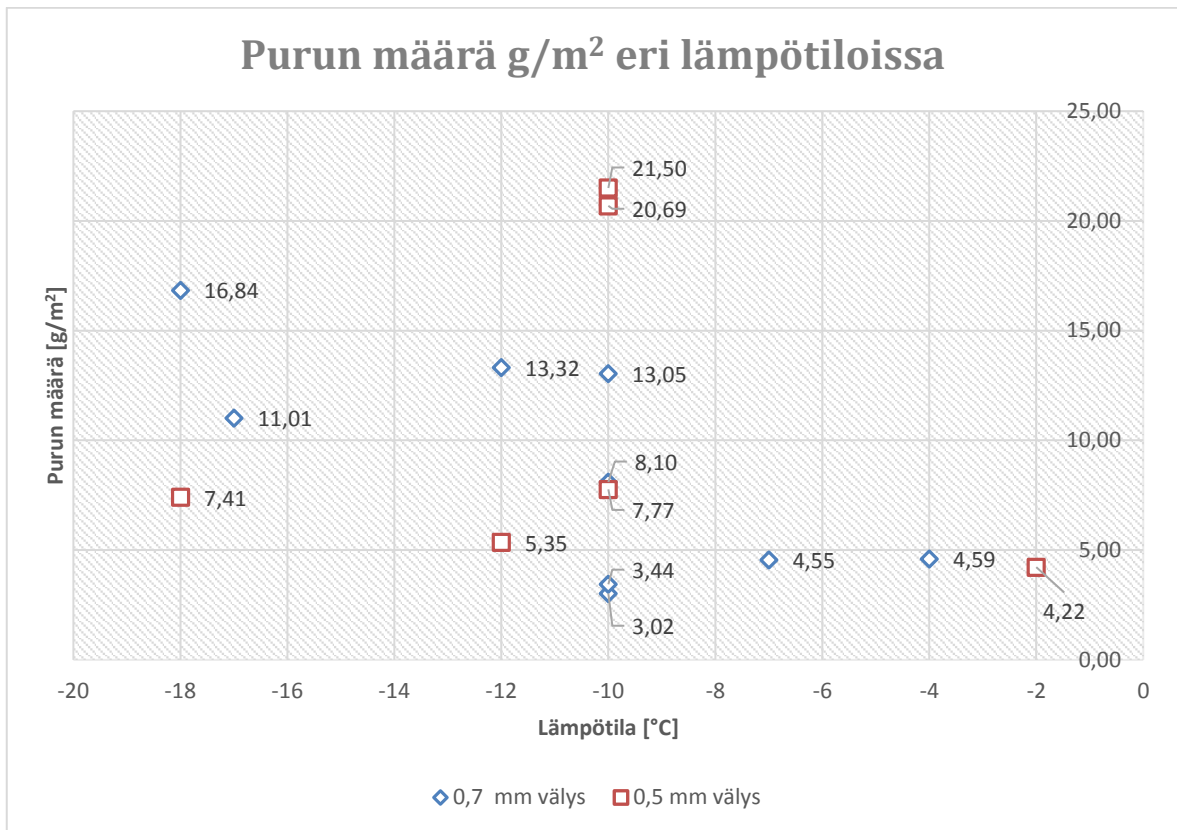
Kuvassa 12 on esitettyä kaikki yksittäiset mittauspisteet ja tarkasteltaessa niitä havaitaan mittauspisteen kaksi, eli heti sahauksen jälkeen saatujen tulosten sijoittuvan selvästi erilleen ennen sahausta ja myöhemmin kuljettimelta saaduista tuloksista. Huomataan, että sahatun pinnan lämpötila oli korkeampi juuri sahauksen jälkeen, minkä jälkeen pinta jäähdyi. Mittaustapa ei anna täysin todellisia lämpötila-arvoja, mutta suuntaa antavien lämpötilojen jakautuminen vastaa edellä teoreettisesti esitettyä ilmiötä. Mittaustuloksista voidaan todeta myös, ettei puu ehdi lämmentä merkittävästi kulkiessaan ulkoilmasta linjaa pitkin vannesahalle.



Kuva 12. Kuvaajan vaaka-akselilla yksittäiset mittauskerrat, pystyakselilla lämpötilat kyseisiltä mittauskerroilta. Heti sahauksen jälkeen lämpötila on selvästi korkeampi puun pinnassa.

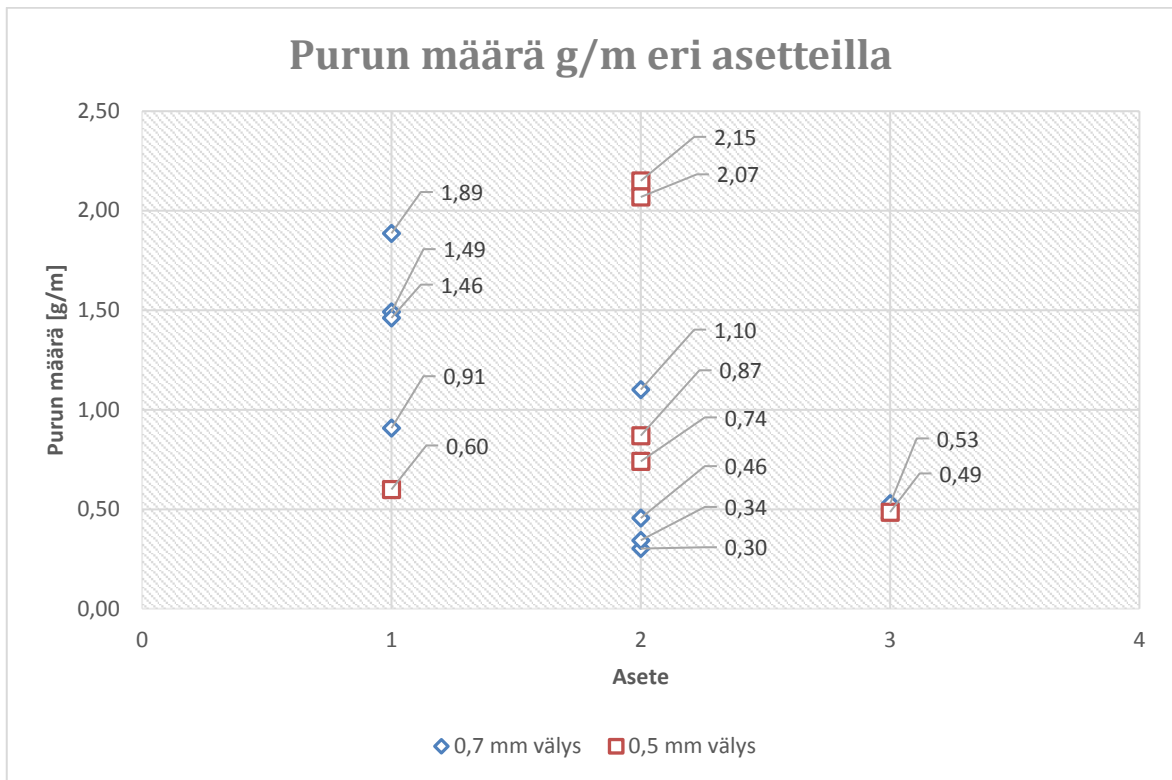
4.2 Kiinnijääneen purun määrä

Purun määrän mittaukset onnistuivat edellä kuvatun suunnitelman mukaisesti. Purun määrää tarkasteltiin yhteensä 66 eri koelaudalta. Puru kaavittiin laudan molemmilta puolin, yhteensä 583 metrin matkalta. Kuvassa 13 on esitettyä purun massa sahattua pinta-alaa kohden eri lämpötiloissa ja kuvassa 14 purun massa sahattua pituutta kohden. Kuvassa 15 on esitettyä purukerroksen paksuus eri lämpötiloissa. Mittaukset suoritettiin yhteensä 495 eri kohtaa purukerroksen kanssa ja ilman.



Kuva 13. Purun määrä pinta-alaa kohden laskettiin käyttäen yhtälöä 2. Kuvassa ei ole eroteltu asetteita, koska sahatun laudan leveyden vaihtuminen asetteesta riippuen on huomioitu tulosten laskemiseen käytetyssä yhtälössä.

Tarkasteltaessa kiinni jääneen purun määrää kaavintapinta-alaa kohden (Kuva 13) yksikössä g/cm² havaitaan kylmimmissä mittauslämpötiloissa 0,5 mm välyksellä olevien koeterien jättävän selvästi vähemmän purua sahaustuotteen pintaan. Noin -10 °C tuntumassa on haastavaa erotella selvää etua kummallekaan koeterällekoolle, kahden mittauskerran tulosten ollessa erityisen vahvasti alkuhypothesia vastaan. Lähestyttäessä 0 °C lämpötilaa eri koeterien välinen ero kaventuu merkityksettömäksi.

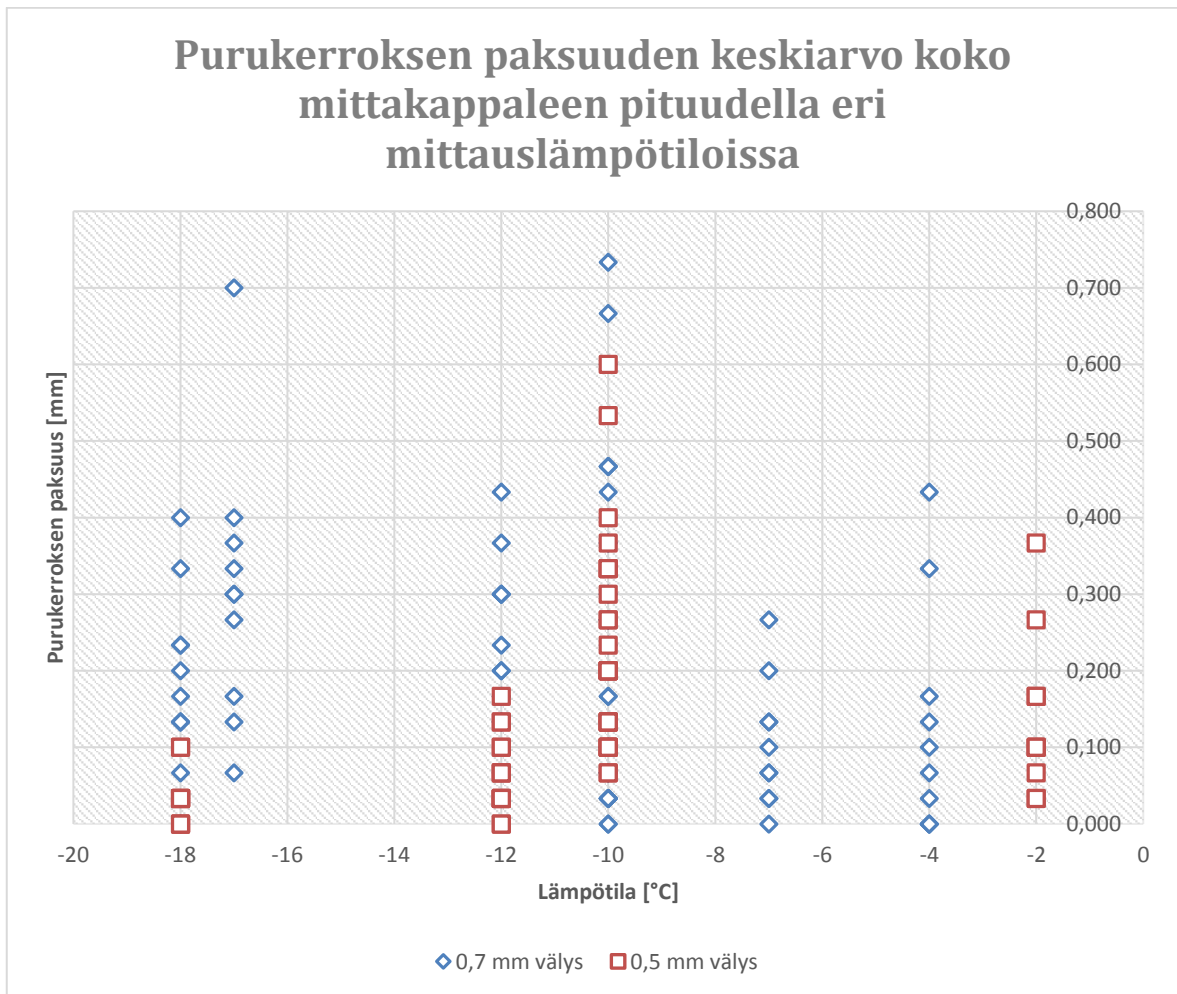


Kuva 14. Mittaustuloksia on kerätty käyttäen kolmea eri asetetta. Purun määrät on laskettu käyttäen yhtälöä 1. Kyseinen yhtälö ei huomioi asetetta, joten eri asetteet on eroteltu.

Kun huomioidaan eri asetteet, joilla koeajoja tehtiin ja vertaillaan purun määrää mittauspituutta kohden yksikössä g/m (Kuva 14), voidaan havaita 0,7 mm terävälöksellä jäävän noin 0,5 - 3 kertaa enempi purua kiinni kuin 0,5 mm välöksellä käytettäessä asetetta 1. Mittauskertojen lämpötilat tällä asetteella järjestyksessä ylhäältä alaspäin kuvassa 14 olivat: -18 °C, -12 °C, -10 °C, -10 °C ja -12 °C. Tulee kuitenkin huomioida mittauskertojen epätasainen jakautuminen, 0,7 mm välöksellä on 4 erillistä mittauskertaa, 0,5 mm välöksellä ollessa vain 1 mittauskerta.

Asetteella 2 tulokset ovat epäselvemmät, joskin 0,7 mm välitys näyttää jättävän vähemmän purua kiinni. Mittauskertojen lämpötilat ylhäältä alaspäin kuvassa 14 olivat: -10 °C, -10 °C, -17 °C, -10, -18 °C, -7 °C, -10 °C ja -10 °C.

Kolmannella asetteella on molemmilla koevälöksillä vain yksittäiset mittauskerrat, eikä niiden väliltä ole havaittavissa merkittävää eroa. Mittauskertojen lämpötilat ylhäältä alaspäin kuvassa 14 olivat: -4 °C ja -2 °C.

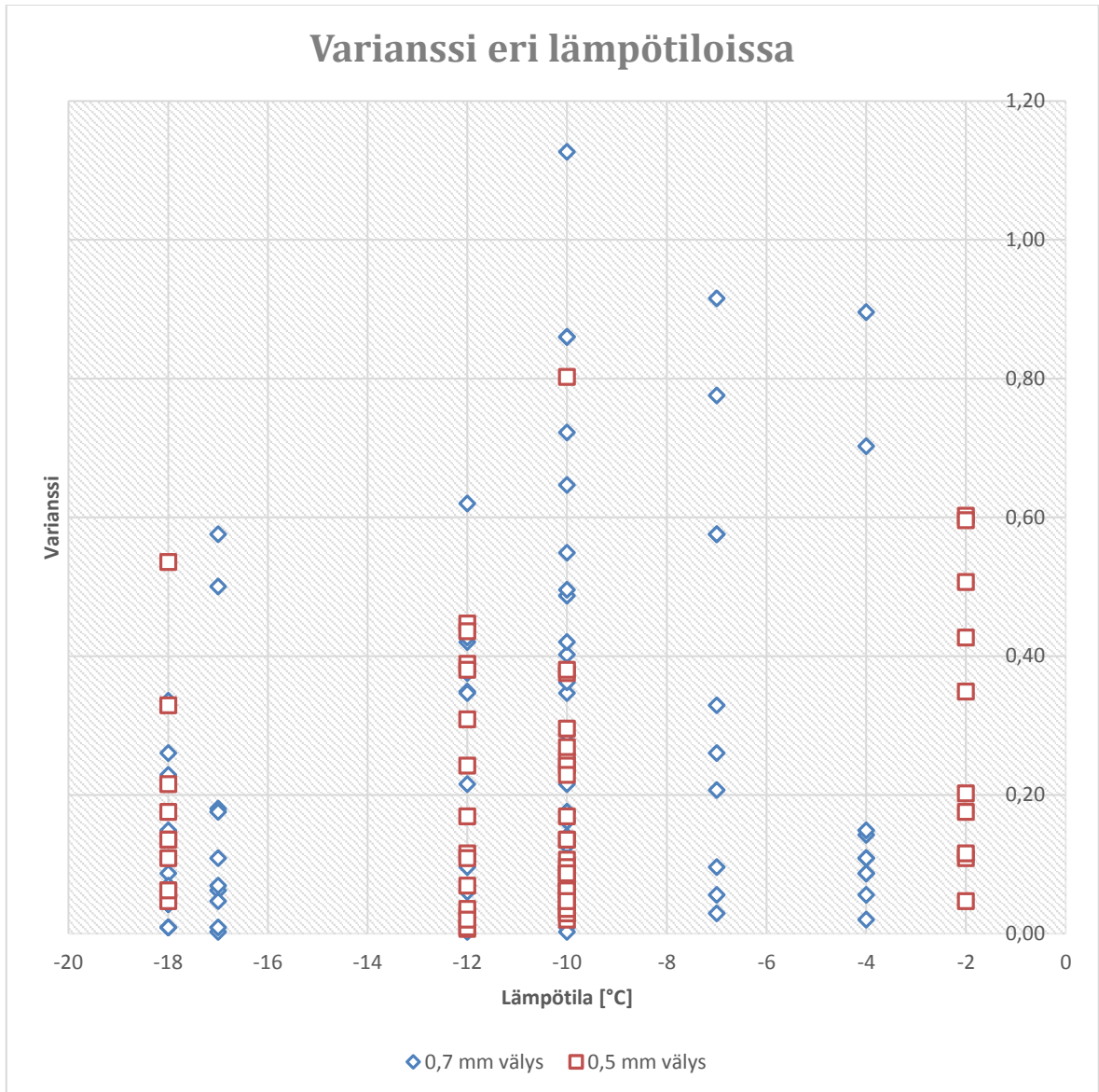


Kuva 15. Purukerroksen paksuuden mittaustulokset antavat samansuuntaisia tuloksia purun massan mittausten kanssa (Kuva 13). Kuvassa esitetty helpomman luettavuuden vuoksi vain keskiarvot jokaisesta testilaudasta. Mittauspistekohtaiset tulokset ovat luettavissa liitteestä II.

Tarkasteltaessa purukerroksen paksuutta eri teräväläyksillä (Kuva 15) havaitaan 0,5 mm välyksellä jäävän pienempi kerros purua kuin 0,7 mm välyksellä lämpötilan ollessa -18 °C tuntumassa. Lämpötilan ollessa noin -10 °C on haastavaa havaita selvää eroa kahden eri koeterän välillä. Lähestyttäessä 0 °C lämpötilaa ei myöskään ole havaittavissa selvää eroa eri teräväläyksillä.

4.3 Dimensiotarkkuus

Dimensiotarkkuuden mittaukset sujuivat suunnitelman mukaan ja sahautuotteen paksuutta mitattiin 495 eri kohdasta purun kanssa ja pinta kaavittuna puhtaaksi. Samasta mittauksesta saatiin tietoa purukerroksen paksuudesta (Kuva 15) ja paksuuden varianssista eli dimensiotarkkuudesta, joka on esitettyä kuvassa 16.



Kuva 16. Sahaustuotteen pituudella kolmen eri mittauskohdan variansseissa ei ole havaittavissa merkittäviä poikkeamia eri terävälkyksien tai lämpötilojen välillä.

Tarkasteltaessa varianssia koekappaleen pituudella, eli kuinka hyvä dimensiotarkkuus tuotteella on (Kuva 16) ei voida havaita eri lämpötiloilla tai terävälkyksillä selvää vaikutusta mittaustulosten varianssiin. Kuvaajasta on skaalattu ulos yksi -10 °C lämpötilassa 0,5 mm välkyksellä tullut varianssin mittapiste, jonka suuruus on 3,00.

4.4 Teränauhojen ajolämpötila ja mekaaninen kesto

Tarkasteltaessa terien lämpötilaa etälämpömittarilla ajon aikana, osoittautui haasteeksi teränauhojen kiiltävä pinta. Mitattaessa suoraan teränauhan pinnasta heijastuu mittariin

ympäröivän ilman tai kiinteiden pintojen lämpötila. Ongelma ratkaistiin mittaamalla lämpötila vannesahan pyörän reunasta (Kuva 1), joka on maalattu mustaksi eikä merkittävästi heijasta. 0,5 mm ja 0,7 mm koeterillä ajettaessa tehtiin molemmilla 20 erillistä mittausta vannesahan teränauhan lämpötilasta. Myös satunnaisesti tarkasteltiin teränauhojen lämpötilaa ja todettiin tulosten vastaavan 20 kirjatun mittauksen lämpötila-alueita. 0,7 mm välyksellä keskiarvo teränauhan lämpötilasta oli 32 °C suurimman arvon ollessa 33 °C ja pienimmän 30 °C. 0,5 mm välyksellä keskiarvolämpötila oli 34 °C suurimman arvon ollessa 35 °C ja pienimmän 33 °C. Lämpötiloissa eri välyksien välillä ei ole merkityksellistä eroa.

Koeajojen aikana ei havaittu 0,5 mm koeterissä poikkeuksellisia vaurioita tai kulumisia, jotka olisivat aiheutuneet normaalin ajon aikana. Koeterillä ajettiin tosin vain yhteensä 24 tuntia, yksittäisen terän ajoajan ollessa 4 – 8 tuntia. Tulosten todenmukaisuus teränauhojen kestävydestä on kyseenalainen vähäisten käyttötuntien vuoksi.

5 YHTEENVETO

Testausten suorittaminen tavoitteiden mukaisesti osoittautui haastavaksi epävakaiden ulkolämpötilojen vuoksi. Kokemusperäisen tiedon mukaan ongelmia esiintyy etenkin lämpötilan laskiessa alle $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koeaikana onnistuttiin suorittamaan vain kolme mittauskertaa lämpötilan ollessa alle tämän. Muut mittaukset suoritettiin $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai lämpimämmissä olosuhteissa. Ulkolämpötilojen voimakas vaihtelu myös asettaa kyseenalaiseksi sen, kuinka tasaisesti sahattava puu jäätynyt pinnasta mitattuun lämpötilaan. Myös asetteen vaihtumisen eri mittauskertojen ja koeterien välillä estää kaikkien tulosten vertaamisen suoraan keskenään. Yksittäisen asetteen sisällä vertailtavien mittauskertojen määrä jää tällöin vähäisemmäksi. Olosuhteiden vaihtelevuus ilmeni erityisesti asetteen 1 tuloksia vertaillessa, $0,5\text{ mm}$ välyksellä ollessa vain yksi mittauskerta ja $0,7\text{ mm}$ välyksellä ollessa neljä mittauskertaa.

5.1 Tulosten luotettavuus ja vertailukelpoisuus

Mittaustulokset ovat itsessään luotettavia, testauksen onnistuttua suunnitellulla tavalla. Dimensio- ja purukerroksen paksuus mittauksissa saatiin 990 yksittäistä mittauskertaa, joten voidaankin todeta mitausten antavan realistisia tuloksia yksittäisen mitaushetken tilanteesta. Purun massaa tarkasteltaessa työympäristön siisteydestä pidettiin huolta, ettei sahan normaalista toiminnasta syntyvää purua ja pölyä pääsisi mukaan punnittavaan massaan, eikä kaavittua purua pääsisi poistumaan, esimerkiksi kenkien pohjassa mitaustilanteesta. Kaikki mittaukset suoritettiin samalla tavalla suunnitelman mukaan, muuttamatta toimintatapaa koejakson aikana.

5.2 Kapeamman terävälkyksen kannattavuus

Dimensiotarkkuuden kannalta ei mitaustulosten variansseissa ole havaittavissa merkittävää eroa $0,7\text{ mm}$ pohjatyssätytyn terän ja $0,5\text{ mm}$ tyssäämättömän välillä. Eli mitaustulosten mukaan käytettäessä $0,5\text{ mm}$ terävälkyä vannesahauksessa ei teränauha tee merkittävästi enempää poikittaissuuntaista liikettä sahaussuuntaan nähden kuin $0,7\text{ mm}$ terävälkyksen teränauhoissa. Koevaiheen alussa todettiin $0,4\text{ mm}$ terävälkyksellä varustettujen teränauhojen tekävän merkittävää poikittaissuuntaista liikettä sahausksessa, jolloin sen voidaan todeta olevan liian kapea välykset talvisahaukseen. Varianssia eli dimensiotarkkuutta koskeva

johtopäätös mittaustulosten mukaan pätee koko testauksen lämpötila-alueella, eikä ole havaittavissa poikkeamaa lämpötilan muuttuessa.

Tarkasteltaessa kiinni jääneen purun massaa pituus- ja pinta-alaa kohden ei voida todeta 0,5 mm tyssäämättömän terän jättävän vähemmän purua puun pintaan mittaustulosten ollessa lämpimämpi kuin -12 °C. Tarkasteltaessa yksittäisten päivien tuloksia (Liite D), -10 °C lämpötilassa samalla asetteella oli 0,5 tyssäämättömän koeterän jäljiltä 7-kertainen (1.2.2018) ja 6-kertainen määrä (5.2.2018) purua kiinni kuin 0,7 mm tyssätyn terän jäljiltä. Muina testauskerroilla samalla lämpötila-alueella 0,5 mm tyssäämättömillä terillä oli vähempi purua kiinni kuin 0,7 mm tyssätyillä terillä. Myöskään purukerroksen paksuuden mittaustulokset eivät anna selvää tulosta kumpaankaan suuntaan.

Lämpötilan ollessa alle tavoitelämpötilan, eli -15 °C voidaan 0,5 mm koeterien todeta jättäneen vähempi purua kuin 0,7 mm terät. -17 °C ja -18°C mitatut purun massat ovat selvästi vähäisemmät 0,5 mm välyksellä kuin 0,7 mm välyksellä. Myös purukerroksen paksuuden antamat tulokset vastaavat tätä johtopäätöstä. Tulee kuitenkin huomioida arvion perustuvan vain kolmeen mittaukseen näissä lämpötiloissa, minkä vuoksi arvion tekeminen ei ole yhtä luotettavalla pohjalla kuin lämpimämpien tulosten alueella.

Saadut tulokset tukevat edellä esitettyä kirjallisuuteen ja kokemukseräiseen tietoon perustuvaa arviota ja alkuhypothesia -17 °C ja -18 °C lämpötiloissa mitattujen tulosten osalta. Näiden pohjalta voidaan todeta 0,5 mm terävälyksen jättävän vähempi jäätynyttä purua sahaustuotteen pintaan kuin leveämpi 0,7 mm terävälyks.

Sen sijaan -2 °C ja -12 °C lämpötilojen välillä saadut tulokset eivät tue edellä esitettyä kirjallisuuteen perustuvaa arviota. 0,7 mm välyksen terien pohjatyssäyksen vaikutusta on mahdotonta arvioida tulosten pohjalta. Voi siis olla, että tällä epäselvien tulosten alueella 0,7 mm välyksen terien pohjatyssäys on vähentänyt purun määrää. -17 °C ja -18 °C alueella puolestaan tyssäämättömien 0,5 mm koeterien kapeampi välys on vähentänyt purua tehokkaammin kuin leveämpi 0,7 mm välys pohjatyssäyksen kanssa.

5.3 Ilmenneet tutkimustarpeet

Kuten edellä todettiin, on haastavaa erotella pohjatyssäyksen vaikutusta tuloksiin verrattuna terävälyksen suuruuden vaikutukseen. Olisi siis kannattavaa myös testata 0,5 mm koeterissä pohjatyssäystä, jolloin olisi mahdollista erotella pohjatyssäyksen vaikutus kiinni jääneen purun määrään.

Testausolosuhteet eivät olleet kovin hyvin hallittavissa puun lämpötilan kannalta. Mielekkäänä tutkimuskohteena voisi pitää saman testauksen suorittamista paremmin hallituissa olosuhteissa, jolloin voitaisiin saada luotettava riippuvuuskäyrä lämpötilalle ja kiinni jääneen purun määrälle mahdollisesti usealla eri välyksellä.

Purun pysymiseen purutilassa ja ohivuotoon vaikuttaa merkittävästi terägeometria ja sen sopivuus käytettyihin sahauskoneisiin ja sahattavan tukkitavaran ominaisuuksiin. Purun pysymistä purutilassa voisi pyrkiä parantamaan tarkastelemalla parasta geometriaa eri sahausolosuhteisiin. Mikäli ohivuotoa voidaan rajoittaa, vähenee myös purun jäätyminen sahattuun pintaan.

LÄHTEET

Fischer, R., 1997. A way to observe and to calculate edge wearing in cutting wood-materials. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar. University of British Columbia, Vancouver, Canada. 17-20.6.1997. s. 631 – 640

Heikinheimo, O., 1964. Mekaaninen puuteollisuus II. Joensuu: Pohjois-Karjalan Kirjapaino Oy. s. 1361, 1363 - 1390

Kuikka, K. & Kunelius, K., 1993. Puutekniikka: 2. Materiaalit. Helsinki: Otava. s. 36, 38

Kokkonen, S., 2005. Diplomityö: Lastunmuodostus jäätyneen ja sulan puun pyörösahaustuksessa. s. 98 – 99, 103

Kärkkäinen, M., 2003. Puutieteen perusteet. Helsinki: Metsälehti 2003. s. 220 – 221, 233 – 234, 245 – 246, 256

Paajanen, T., 1989. Käsittele puuta oikein 5 Vannesahaus. 2. painos. Helsinki: Metlas. s. 14 – 17, 27 – 37, 38 – 41, 73, 80, 78 – 79, 80, 83 – 84

Makkonen, P. 2018. Sahatyöntekijä; laadun- ja mittauksenvalvoja, UPM Kymmene. Haastattelu 13.2.2018. Haastattelijana Lauri Viitanen. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Muurman, J. 2018. Puutalouden insinööri; työnjohtaja, UPM Kymmene. Haastattelu 20.2.2018. Haastattelijana Lauri Viitanen. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Vaittinen, H. 2018. Sahatyöntekijä; vanhempi terähoitaja, UPM Kymmene. Haastattelu 13.2.2018. Haastattelijana Lauri Viitanen. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Varis, R., 2017. Sahateollisuus. Helsinki: Suomen Sahateollisuusmiesten Yhdistys ry s. 97 – 99, 109 – 110, 113 – 115

Yu, J & Tanka, C & Kai, T.L & Zhu, G & Yan, M, 1997. Surface Roughness On Sawing Frozen Wood And Non-frozen Wood Using Band Saw. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar. University of British Columbia, Vancouver, Canada. 17-20.6.1997. s.77 – 79

LIITTEET

LIITE I: Kiinnijäätynen purun massa

Taulukko 1. Mittaustulokset taulukoituna jäätynen purun massasta sahattua pituutta ja pinta-alaa kohden

PVM	Asete	Leveys	Vällys	T [C]	Pituus [cm]	Pituus [m]	Ala [m ²]	Purun määrä[g]	Purun määrä [g/m]	Purun määrä [g/m ²]
23.tammi	1	112	0,7	-18	2651	53,02	5,94	100	1,89	16,84
23.tammi	2	100	0,5	-18	1823	36,46	3,65	27	0,74	7,41
23.tammi	2	100	0,7	-17	1771	35,42	3,54	39	1,10	11,01
24.tammi	1	112	0,7	-12	2513,5	50,27	5,63	75	1,49	13,32
24.tammi	1	112	0,5	-12	2752,5	55,05	6,17	33	0,60	5,35
24.tammi	2	100	0,7	-7	1537	30,74	3,07	14	0,46	4,55
25.tammi	3	115	0,7	-4	1895	37,9	4,36	20	0,53	4,59
25.tammi	3	115	0,5	-2	1956	39,12	4,50	19	0,49	4,22
1.helmi	2	100	0,5	-10	1674,5	33,49	3,35	72	2,15	21,50
1.helmi	2	100	0,7	-10	1653	33,06	3,31	10	0,30	3,02
5.helmi	2	100	0,5	-10	1861	37,22	3,72	77	2,07	20,69
5.helmi	2	100	0,7	-10	1598	31,96	3,20	11	0,34	3,44
7.helmi	1	112	0,7	-10	1711	34,22	3,83	50	1,46	13,05
7.helmi	1	112	0,7	-10	1708,5	34,17	3,83	31	0,91	8,10
7.helmi	2	112	0,5	-10	2069	41,38	4,63	36	0,87	7,77

LIITE II: Purukerroksen paksuus ja dimensiotarkkuus

Taulukko 2. Mittaustulokset taulukoituna purukerroksen paksuudesta ja dimensiotarkkuudesta. Taulukossa "Hajonta" sarakkeisiin ja riveihin on laskettu mittaushetken populaatiosta riippumaton varianssi käyttäen Excelin VAR.P -funktiota. "KA" riveillä on yhden mittauskerran tulosten keskiarvot kyseisessä sarakkeessa. Tutkimuksen tekijällä hallussa tarkempi Excel-tiedosto, joka sisältää mittauspistekohtaiset arvot. "HAJONTA" riveillä edellä mainitun mittauskerran yksittäisten tulosten välinen varianssi.

	Asete	Vällys	T [C]	Paksuus w/ puru [mm]	Paksuus w/o puru [mm]			Purun määrä [mm]			KA purun määrä [mm]	Hajonta		
				Tyvi	Keski	Latva	Tyvi	Keski	Latva	Tyvi			Keski	Latva
KA	1	0,7	-18	36,6	36,7	36,6	36,5	36,6	36,4	0,1	0,1	0,2	0,147	0,10
HAJONTA	1	0,7	-18	0,220	0,282	0,362	0,149	0,230	0,341	0,025	0,015	0,045	0,013	0,01
KA	2	0,5	-18	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	0,0	0,0	0,1	0,037	0,18
HAJONTA	2	0,5	-18	0,078	0,082	0,536	0,071	0,074	0,540	0,002	0,001	0,014	0,001	0,02
KA	2	0,7	-17	52,7	52,6	52,8	52,4	52,4	52,4	0,3	0,2	0,4	0,303	0,17
HAJONTA	2	0,7	-17	0,588	0,232	0,615	0,405	0,116	0,522	0,074	0,041	0,070	0,028	0,04
KA	1	0,7	-12	36,8	36,8	36,8	36,6	36,6	36,6	0,2	0,2	0,2	0,211	0,23
HAJONTA	1	0,7	-12	0,349	0,318	0,957	0,304	0,272	0,936	0,027	0,026	0,054	0,012	0,04
KA	1	0,5	-12	37,0	36,8	37,0	37,0	36,8	36,9	0,1	0,1	0,1	0,067	0,18
HAJONTA	1	0,5	-12	0,288	0,197	0,788	0,300	0,240	0,814	0,008	0,007	0,005	0,002	0,03
KA	2	0,7	-7	52,7	52,6	52,6	52,6	52,6	52,5	0,2	0,1	0,1	0,103	0,38
HAJONTA	2	0,7	-7	0,211	0,104	1,302	0,171	0,118	1,337	0,044	0,004	0,005	0,006	0,09
KA	3	0,7	-4	54,09	54,05	54,06	53,99	53,88	53,95	0,1	0,17	0,11	0,127	0,24
HAJONTA	3	0,7	-4	0,313	0,129	1,104	0,383	0,142	1,237	0,018	0,022	0,027	0,020	0,08
KA	3	0,5	-2	54,32	54,45	54,5	54,25	54,34	54,26	0,07	0,11	0,24	0,14	0,31
HAJONTA	3	0,5	-2	0,566	0,120	1,998	0,628	0,134	2,082	0,018	0,011	0,024	0,010	0,04
KA	2	0,5	-2	48,16	48,25	48,18	47,94	47,99	47,91	0,22	0,26	0,28	0,254	0,23

HAJONTA	2	0,5	-2	0,242	0,438	1,568	0,236	0,383	1,318	0,042	0,023	0,045	0,021	0,05
KA	2	0,7	-2	52,48	52,51	52,47	52,43	52,45	52,38	0,05	0,06	0,09	0,067	0,42
HAJONTA	2	0,7	-2	0,076	0,111	1,896	0,070	0,125	1,894	0,002	0,002	0,031	0,005	0,08
KA	2	0,5	-10	53,06	52,82	52,69	52,93	52,63	52,4	0,13	0,19	0,29	0,2033	0,44
HAJONTA	2	0,5	-10	0,672	0,274	1,695	0,794	0,266	1,542	0,034	0,015	0,039	0,014	0,74
KA	2	0,7	-10	52,37	52,08	52,34	52,19	51,99	52,19	0,18	0,09	0,15	0,140	0,15
HAJONTA	2	0,7	-10	0,210	0,202	0,336	0,151	0,199	0,363	0,044	0,011	0,004	0,007	0,02
KA	1	0,7	-10	36,72	36,7	36,6	36,14	36,36	36,27	0,58	0,34	0,33	0,417	0,15
HAJONTA	1	0,7	-10	0,148	0,270	0,554	0,052	0,166	0,384	0,164	0,036	0,052	0,045	0,02
KA	1	0,7	-10	36,49	36,64	36,72	36,29	36,35	36,4	0,2	0,29	0,32	0,270	0,32
HAJONTA	1	0,7	-10	0,513	0,052	1,184	0,543	0,080	1,224	0,014	0,035	0,036	0,013	0,11
KA	2	0,5	-10	52,32	52,29	52,3	52,13	52,09	52,12	0,19	0,2	0,18	0,190	0,07
HAJONTA	2	0,5	-10	0,056	0,177	0,276	0,084	0,215	0,320	0,037	0,016	0,036	0,013	0,00

LIITE III: Lämpötilat eri sahauksen vaiheissa

Taulukko 3. Mittaustulokset taulukoituna lämpötilan muutoksista sahauksen eri vaiheissa

nro	Ennen vannesahaa	Heti sahauksen jälkeen	Myöhemmin
1	-5,3	-4,5	-6,6
2	-7,2	-4,7	-6,7
3	-6,2	-3,8	-4,8
4	-6,3	-3,7	-4,5
5	-5,8	-3,6	-8,2
6	-7,1	-3,7	-4,5
7	-7,6	-2,9	-4,7
8	-8,1	-3,3	-6,5
9	-7,6	-3,9	-7,1
10	-6,7	-3,8	-8,3
11	-7,3	-4	-7
12	-7,5	-2,5	-8,2
13	-7,1	-2,9	-5
14	-6,3	-3,4	-5,5
15	-7,3	-3,5	-5,1
16	-7,1	-4,2	-5
17	-7,1	-3,8	-4,1
18	-7,7	-3,4	-5
19	-5,9	-4,1	-4,2
20	-6,7	-3,8	-3,8
KA	-6,9	-3,7	-5,7
Max	-5,3	-2,5	-3,8
Min	-8,1	-4,7	-8,3

LIITE IV: Teränauhan lämpötila sahauksen aikana

Taulukko 4. Mittaustulokset taulukoituna teränauhan lämpötilasta sahauksen aikana

	0,7	0,5
	30	34,7
	31,4	35
	31,9	34,1
	32,4	34
	32,7	33,9
	31	34,4
	31,4	35,2
	32,3	33,8
	32,6	34,7
	32,2	33,7
	30,1	33,3
	30,6	33,8
	31,8	33,1
	32,6	33,5
	29,8	33,1
	33	34,5
	32	32,8
	32,6	32,6
	32,3	33,3
	32,6	32,7
KA	31,8	33,8
max	33,0	35,2
min	29,8	32,6