

Jarno Asser Nieminen

TIMANTTIPYÖRÖSAHAN KULUMISEN MALLINTAMINEN

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kari Koskinen
Henri Vainio
Tammikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Jarno Nieminen: Timanttipyörösahan kulumisen mallintaminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan DI-tutkinto-ohjelma
Tammikuu 2023

Kulumisen mallintaminen on ollut tiedeyhteisön kiinnostuksen alla jo pitkään. Kulumisesta aiheutuvat kustannukset ovat huomattavia ja kulumisen vähentämisellä ja ennakoinnilla on suuri vaikutus tehokkuuteen. Malli, jolla voitaisiin simuloida lukuisia ”mitä jos” tilanteita tarkasti, olisi hyvin arvokas väline kulumisen ennustamiseen.

Tässä työssä tutustuttiin olemassa olevaan tutkimukseen kulumisen mallintamisesta ja luotiin niiden pohjalta tehdasympäristössä saavutettavalla datalla toimiva matemaattinen kulumismalli, jolla voidaan simuloida timanttipyörösahan terän kulumista sahatessa betonilaattoja. Kulumisen simuloimiseksi selvitettiin Archardin kulumiskaavaan tarvittava k-arvo, joka asettui kirjallisuuden mukaan vähäisen kulumisen alueelle.

Kehitetyn mallin soveltuvuutta ja hyödyllisyyttä PPX-liiketoiminnan kannalta selvitettiin ja pohdittiin parannuksia.

Avainsanat: Timanttisaha, kuluminen, kulumismalli, betonilaatta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Jarno Nieminen: Modelling the wear of a diamond circular saw
Master thesis
Tampere University
Degree programme in Mechanical engineering
January 2023

Wear modelling has been of interest to the scientific community for a long time. The costs of wear are significant and reducing and predicting wear has a major impact on efficiency. A model that could simulate numerous "what-if" scenarios accurately would be a very valuable tool for predicting wear and tear.

In this work, existing research on wear modelling was reviewed and used to create a mathematical wear model using data available in a factory environment to simulate the wear of a diamond circular saw blade when sawing concrete slabs. To simulate the wear, the k-value required for the Archard wear curve was determined, which was found in the literature to be in the low wear range.

The suitability and usefulness of the developed model for the PPX business was investigated and improvements were considered.

Keywords: Diamond saw, wear, wear model, concrete slab

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin mekatroniikan tutkimusryhmässä osana SNOBI-projektia Tampereen yliopistossa.

Tampereella, 26.02.2023

Jarno Nieminen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuskysymys ja menetelmät.....	1
2. KULUMISEN MALLINTAMINEN	3
2.1 Kulumisilmiön perusteet	3
2.2 Kulumismallien kehitys.....	5
2.3 Timanttisahan kulumistutkimukset.....	7
3. BETONILAATAN TIMANTTISAHAUS.....	9
3.1 Timanttisahan rakenne ja toiminta.....	10
3.2 Betonilaattojen rakenne	14
3.3 Timanttisahan kuluminen	15
4. TIMANTTISAHAN TOIMINNAN MITTAAMINEN	19
4.1 Mittausjärjestelyt ja laitteet	19
4.2 Mittaustulokset	21
5. TIMANTTISAHAN KULUMISEN MALLINTAMINEN.....	23
5.1 Matemaattinen malli ja parametrit	23
5.2 Simulaation toteutus.....	26
5.3 Simulointitulokset	33
5.4 Toimet datan parantamiseksi	34
6. SIMULOINTIMALLIN HYÖDYNTÄMINEN LAATTATEHTAILLA	37
7. TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	38
LÄHTEET.....	40
LIITTEET.....	43

LYHENTEET JA MERKINNÄT

2D	Kaksiulotteinen
PPX	Pay-per-something
XAAS	Everything as a service
d	Terän leveys
$\Delta\theta$	Kulmaresoluutio
Δt	Aika-askel
ΔW	Kulumisen muutos
dt	Aika-askeldifferentiaali
dW	Syvyyskulumisdifferentiaali
F_N	Normaalivoima
F_μ	Liukukitka
H	Materiaalin kovuus
K	Archardin yhtälön dimensioton vakio
L	Kosketusmatka
μ	Liukukitkakerroin
Φ	Kulumisvuon tiheys
P	Sahausteho
p	Pintapaine
r	Terän säde
s	Liukumatka
θ	Kulma
t	Ajanhetki
v_k	Kehänopeus
W	Säteellinen kuluminen
W_n	Kuluminen ajanhetkellä t_n
W_V	Tilavuuksellinen kuluminen

1. JOHDANTO

Asioiden tekeminen tehokkaasti säästää rahaa ja useassa tapauksessa myös ympäristöä. Tehokkaasti toimiminen vaatii prosessin ymmärtämistä ja hyvää käsitystä siitä, mitä halutaan tavoitella. Mikäli tehostettava asia on kuitenkin taloudellisesti vähäpätöinen, sitä ei pienessä mittakaavassa kannata tehdä. Taloudellisen intressin luomiseksi tapausta pitäisi saada skaalattua isommaksi.

Tuotteiden palveluistuminen on nykyajan trendi. Tähän liittyen on syntynyt konsepteja kuten everything as a service (XAAS) ja pay per something (PPX). Palveluliiketoiminnan perustuessa tuotetun hyödykkeen määrään tai koneen käyttöaikaan syntyy palvelun tarjoajalle motivaatio tuottaa palvelua tehokkaasti niin ajallisesti kuin resurssillisesti. Tällöin pienetkin optimoinnit yksinään vähäpätöisissä asioissa voidaan skaalata isoiksi ongelmiksi, joiden ratkaisemiseen kannattaa käyttää vaivaa. Palveluliiketoimintojen tarjoaminen mahdollistaa asiakkaille mahdollisuuden tehdä yritystoimintaa ilman että joutuu sitomaan isoja pääomia tuotantolaitteisiin. Palvelujen tarjoaja saa vastineeksi pääomariskin ottamisesta tasaisempaa kassavirtaa, kuin laitekokonaisuuksia myymällä. Suhteet palveluliiketoiminnassa ovat yleensä pitkäaikaisia ja mahdollistavat teollisten symbioosien synnyn.

Tässä työssä tutkittiin mahdollisuuksia timanttipyörösahan kulumisen arviointiin motivaattorina mahdollisen palveluliiketoiminnan hinnoittelun mahdollistaminen. Kyseessä on edellä mainittu tilanne, että yksittäisen sahan toiminnan optimointiin ei kannata käyttää taloudellisia resursseja, mutta mikäli tarjoaa palveluna ”maksu per leikkaus” useammalle asiakkaalle, on sahauksen optimoinnilla paljon taloudellisia mahdollisuuksia.

1.1 Tutkimuskysymys ja menetelmät

Tutkimuskysymyksiä oli selvittää:

1. Kuinka muodostaa timanttipyörösahan kulumismalli tuotanto-olosuhteista saatavalla datalla
2. Miten muodostettua mallia voidaan hyödyntää timanttisahan toiminnanohjauksessa
3. Mitä mahdollisuuksia tulokset antavat ”Pay Per Something” näkökulmasta.

Tässä työssä hyödynnettiin olemassa olevaa kulumistutkimusta, jonka pohjalta suunniteltiin timanttisahalla tehtävät mittaukset. Mittausten perusteella luotiin timanttisahan kulumisen matemaattinen malli, jolla pyritään simuloimaan timanttisahanterän kulumista. Muodostetun mallin soveltuvuutta sahausprosessin toiminnanohjaukseen ja PPX hinnoittelun mahdollistamiseen pohdittiin.

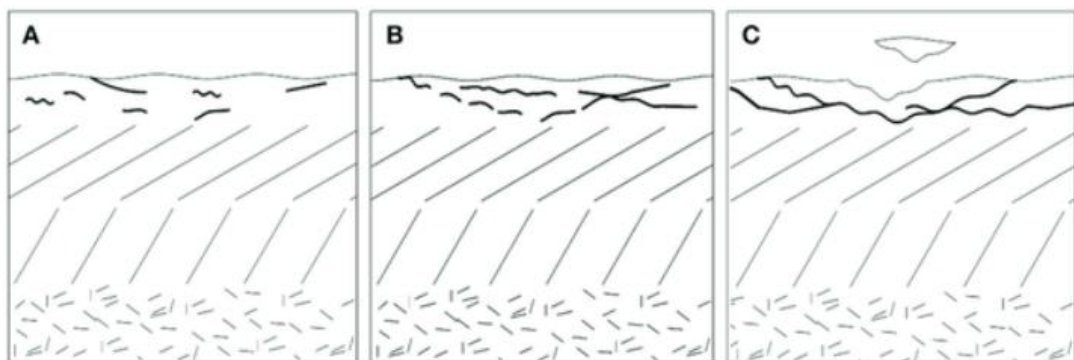
2. KULUMISEN MALLINTAMINEN

Tässä kappaleessa esitellään kulumisilmiötä, matemaattisen kulumismallin teoriaa ja kehitystä ja sen pohjalta tehty oma matemaattinen malli. Tämä kappale koostuu seuraavista osioista: Osiossa 2.1 käsitellään kulumisilmiötä yleisesti, 2.2 pohjustus kulumisen mallintamiseen ja 2.3 esitellään olemassa olevaa tutkimusta timanttisahan kulumisen arviointiin.

2.1 Kulumisilmiön perusteet

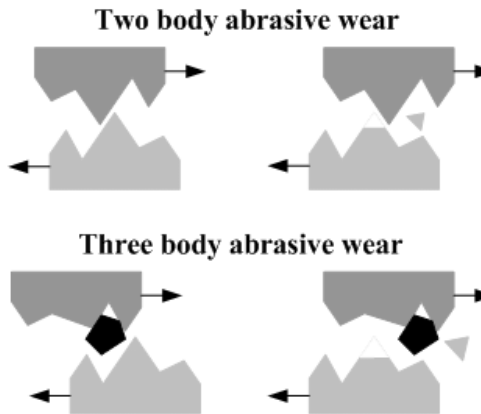
Kuluminen on kiinteän kappaleen plastista deformaatiota tai atomien vaiheittaista irtoamista toisiaan vasten liikkuvien pintojen vuorovaikutuksen takia. Kuluminen tapahtuu mekaanisesti tai kemiallisesti kulumistyyppin mukaan. Kulumista yritetään pääsääntöisesti välttää, minimoida ja tarkkailla, koska se aiheuttaa kustannuksia huoltojen ja prosessin tehokkuuden heikkenemisen takia [1]. Pahimmillaan kuluminen voi aiheuttaa keskeytyksiä tuotantoon. Tässä osiossa esitellään työn kannalta oleellimmat kulumisilmiöt.

Iskukulumiselle on tyypillistä lyhyt vaikutusaika ja voimakas mekaaninen impulssi, mikä aiheuttaa paikallisen plastisen muodonmuutoksen mikrosäröjen muodossa. Mikrosäröjen kasvaessa syntyy lopulta kappaleeseen lohkeamia (kuva 1). Tapahtuman ollessa nopea on materiaalien viskoplastisilla, viskoelastisilla ja lämmönjohto ominaisuuksilla suuri vaikutus kulumisnopeuteen. [1]



Kuva 1 Mikrosäröily etenee progressiivisesti, kunnes palanen lopulta irtoaa [2]

Abrassiivisessa kulumisessa kovempi pinta tekee pehmeämpään pintaan vaurioita normaalivoiman vaikutuksesta. Tyypillisesti kuluminen alkaa kahden kappaleen abrassiivisesta kulumisesta, mutta kulumispartikkeleiden muodostuminen kahden kappaleen välille muuttaa tilanteen kolmen kappaleen kulumiseksi (kuva 2). Kulumispartikkelit ovat muokkauslujittumisen vuoksi kovettuneet, mikä nopeuttaa kulumista molemmilla pinnoilla [1].



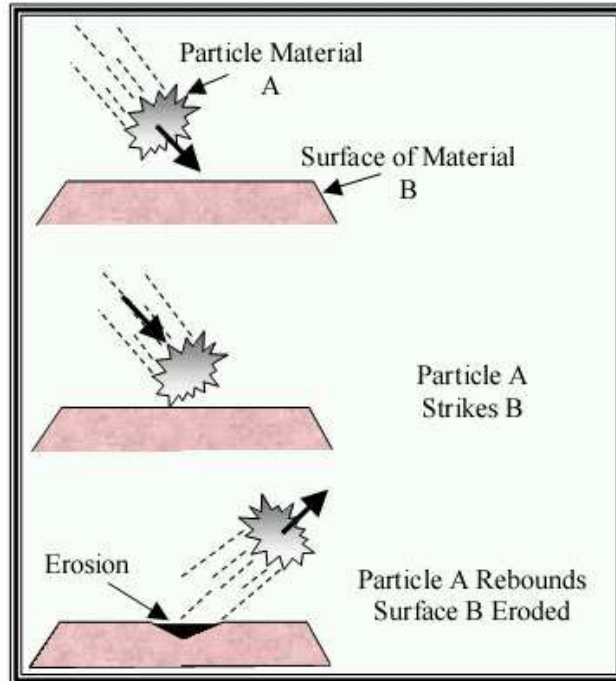
Kuva 2 Ylempänä 2 kappaleen tilanne ja alempana 3 kappaleen. 3 kappaleen kuluminen on tyypillisesti kuluttavampi tilanne. [3].

Epäedullisessa kulumustilanteessa abrassiivinen kuluminen nopeutuu tahmautumisen takia, joka on adhesiivista kulumista. Silloin toisiinsa osuvat pinnat hitsautuvat kontaktissa toisiinsa ja sen takia syntyy repeämiä (kuva 3), jotka synnyttävän 3 kappaleen kulumistapauksen. Tahmautumisen riski lisääntyy, mikäli toisiinsa osuvat materiaalit ovat kiderakenteeltaan ja kemiallisilta ominaisuuksiltaan samanlaisia [4].



Kuva 3 Kaplan-turpiinin säätölenkin ristikappaleeseen kiinnittävä tappi on tahmautumisen takia kokenut vaurioita irrotuksen aikana.

Erosio kulumisessa kuluttavat partikkelit osuvat kappaleeseen huomattavalla suhteellisella nopeudella, jolloin kappaleen pinta kuluu (kuva 4). Kulumisesta itsestään syntyy lisää kappaletta kuluttavia partikkeleita, mikä voi suljetuissa järjestelmissä kulumista entisestään. Kulumisnopeus on eroosiossa suorassa suhteessa partikkelien kineettiseen energiaan eli nopeuden neliöön [1].



Kuva 4 Periaatekuva eroosioilmistä [5]

Termisessä kulumisessa lämpö nopeuttaa kulumista kemiallisia reaktioita nopeuttamalla ja varsinkin eri materiaaleista kootuissa rakenteissa erilaiset lämmönjohtavuudet ja lämpölaajenemiskertoimet aiheuttavat jännityksiä edesauttaen kulumista[6]. Korkea lämpötila nopeuttaa materiaalien hapettumista ja 2 pinnan vuorovaikutuksesta syntyvää lämpötilan aiheuttamaa hapettumiskulumaa kutsuaan tribokemialliseksi kulumiseksi. Jos kahden koskettavan aineen liukoisuus keskenään on suuri, nopeutuu tämä ilmiö entisestään [7].

2.2 Kulumismallien kehitys

Tekniikan alan tärkeä ja pysyvä tavoite on muodostaa ja kehittää muuttujien ja parametrien välisiä riippuvuuksia. Kun muuttujien väliset riippuvuudet tunnistetaan, voidaan kehittää matemaattinen malli haluttuun ilmiöön tai tilanteeseen. Kulumisen mallintamisessa on paljon taloudellisia intressejä, varsinkin jos sillä voidaan ennustaa epänormaalin nopeaa kulumista.

Kulumisen ilmiönä on haastavaa mallintaa ja ymmärtää fysikaalisesti, sillä mikrotasolla tapahtumat vuorovaikutukset ovat monimutkaisia ja olosuhteista riippuvia. Tämän takia monista tutkimuksista materiaalin kulumisesta ei olla saatu täysin johdonmukaisia tuloksia, koska muuttujia ei ole onnistuttu tunnistamaan tai niiden välisiä vuorovaikutuksia ei ole onnistuttu simuloimaan oikein heterogeenisissä olosuhteissa. Tämä on johtanut sovelluskohtaisiin kulumismalleihin, jotka kuvaavat vain yhtä tilannetta tiettyjen Ennalta määritettyjen raamien sisällä. Ollaan vielä hyvin kaukana universaalista ratkaisusta. [8]

Vaikka kulumisen ilmiönä on todella haastava mallinnettava, on kuitenkin sen teoreettinen ymmärtäminen, mallintaminen ja simuloiminen suuren kiinnostuksen kohteena niin akateemisessa yhteisössä kuin teollisissa sovelluksissa. Mallintaminen ja simuloiminen on huomattavasti halvempaa ja nopeampaa kuin tarkkojen kokeellisten menetelmien tekeminen, sillä kokeellisten datojen tekeminen voi kestää jopa viikkoja tai kuukausia, riippuen siitä miten laboratoriossa tai tehtaalla pystyy testejä tekemään, kun taas tietokonesimulaatio voidaan suorittaa parhaimmillaan muutamassa minuutissa, riippuen kuinka tarkkoja simulaatioita tehdään. Onnistuneet simulaatiot auttaisivat koneiden, säätöjen ja leikkuuohjelmien suunniteluissa, jolla säästettäisiin mahdollisesti paljon kustannuksissa, jos ei tarvitsisi kuluttaa teriä, koneita ja raaka-aineita epäoptimaalisissa teollisissa sovelluksissa. Hyvillä ja onnistuneilla simulaatioilla voitaisiin pystyä arvioimaan koneiden ja terien kulumisen aiheuttamat kustannukset, joita voitaisiin hyödyntää palveluliiketoiminnan hinnoittelussa, joka on nykyaikana yleistyvää tapa tuottaa jopa teollisia palveluita sen tuoman etujen takia.

Kulumista ennustetaan tällä hetkellä yleisimmin tilastollisin menetelmin. Tämä on kokemusperäistä kulumisen arviointia, joka ei odottamattomissa olosuhteiden muutoksissa toimi. Tästä on esimerkkinä Oulun seudulla tapahtuneet autojen jakopäiden tilastollisia nopeammat hajoamiset poikkeavasta tien raaka-aineesta johtuen[9]. Nykyaikana koneoppiminen on kehittynyt sille tasolle, että sillä voidaan opetusdatalla muodostaa malli, jolla voidaan ennustaa ilmiötä. Koneoppiminen pystyy muodostamaan riippuvuussuhteita datasta, joita ihminen ei pysty tunnistamaan. On kehitetty lukuisia koneoppimisalgoritmeja, joihin syötetään kaikki mahdollinen data, joista koneoppimisalgoritmi luo mallin. Tutkimuksessa [10] testattiin eri koneoppimismenetelmiä erääseen kulumistapaukseen ja todettiin, että koneoppimismenetelmissä oli tehokkuus ja tarkkuuseroja riippuen datan vaihtelevuudesta. Konealgoritmit tunnistavat muuttujien välisiä riippuvuuksia, mutta eivät anna selitystä miksi.

Joihinkin sovelluksiin on kehitetty jo omia laskennallisia malleja[11]–[15]. Edellä mainituista kaikki hyödyntävät Archardin kulumiskaavaa. John Frederick Archard paransi Holmin vuonna 1946 ehdottamaa mallia tilavuuksellisesta adhessiivisesta kulumisesta tietyn liukumatkan funktiona 1953 [16]:

$$W_V = K \frac{F_N}{H} s, \quad (1)$$

missä W_V onko tilavuuksellinen kuluminen, K on dimensioton vakio, F_N on normaalivoima, s on liukumatka ja H on materiaalin kovuus. Archardin suosion suurin tekijä on sen yksinkertaisuus. Laskentatehon rajallisuus pakottaa tekemään mallit mahdollisimman yksinkertaisiksi ja varsinkin elementti ja reunaelementtilaskennassa tämä on tärkeää. Näillä menetelmillä päästään

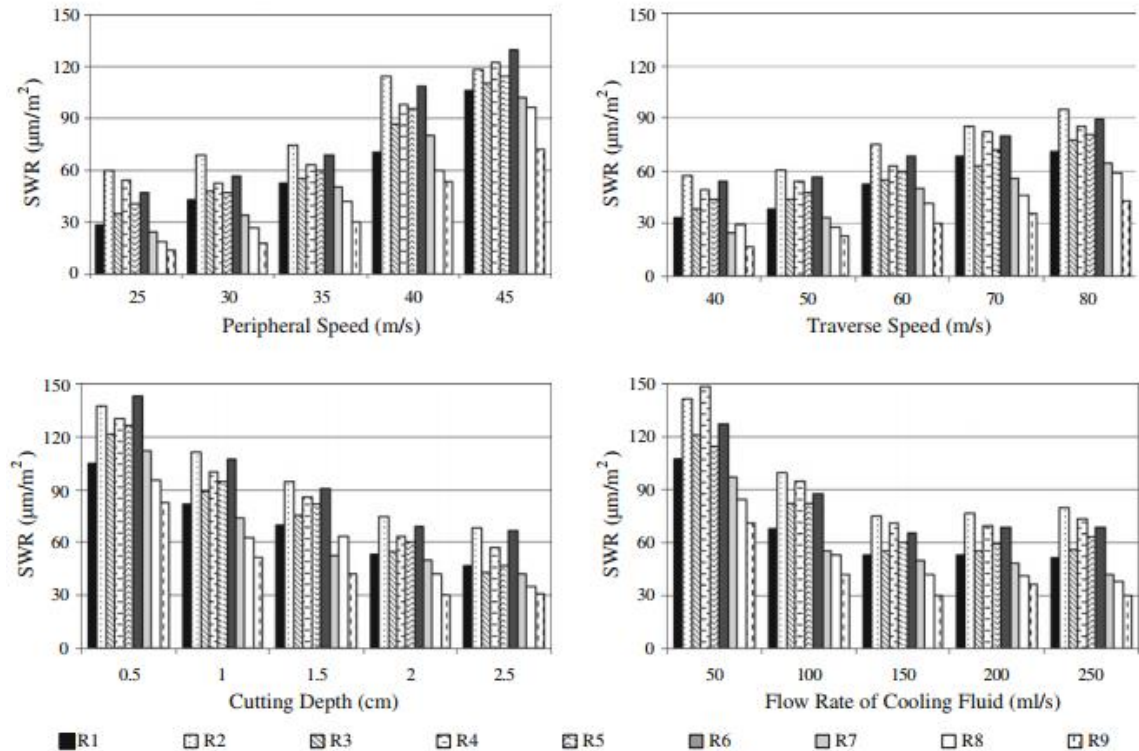
Monesti simulaatioilla on kuitenkin saatu vaihtelevia ja jopa heikkoja tuloksia, jotka eivät ole vastanneet todellista kulumista, jotka testeillä on todettu. Ne mallit, jotka ovat tuoneet hyviä tuloksia, ovat tarvinneet usein empiirisesti määritettyjä syöttöparametreja, jotka usein ovat vaikeita määrittäviä, toimivat vain erityisissä tilanteissa, jolloin jokaiselle tilanteelle ne pitäisi määrittää erikseen, sekä näille parametreille ei aina edes ole työkaluja niiden määrittämiseen, joka on myös tässä työssä ollut pullonkaulana. Archardin yhtälö on vieläkin yleisin malli useissa eri kulumista mallintavissa simulaatioissa.

2.3 Timanttisahan kulumistutkimukset

Osa olemassa olevista tutkimuksista on lähestynyt timanttipyörösahan kulumisen arviointia regressioanalyysien kautta [17]–[20]. Regressioanalyysien avulla on kyetty löytämään mitkä tekijät kulumisen kannalta oleellisempia kuin toiset. Kivien koostumukset vaihtelevat kivityypeittäin koostuen eri kovuuksisista mineraaleista. Tyypillisesti mitä kovempia mineraaleja leikattava aine sisältää, sitä suurempaa on kuluminen. Erityisesti korkea puristuslujuus ja kovuus ovat merkittävimmät kulumisen nopeutta nostavat tekijät. Kovia mineraaleja on esimerkiksi Suomessakin yleisesti esiintyvät kvartsi ja maasälpä.

Sahausparametrien on havaittu vaikuttavan kulumiseen merkittävästi (kuva 5). Pyörösahan kulumisnopeus lähtee kasvamaan merkittävästi 35 m/s nopeampien kehänopeuksien jälkeen. Syöttönopeudella kasvulla on sama kulumista nopeuttava vaikutus, mutta selvää rajaa, jolloin syöttönopeutta ei kannata enää kasvattaa ei ole havaittavissa. Leikkaussyvyyden kasvattamisella on taas kulumista vähentävä vaikutus. Kuluminen on kuitenkin suhteutettava leikkausmääriin ja kehänopeuden, leikkaussyvyyden ja syöttönopeuden kasvattaminen nopeuttavat leikkausta.

Jäähdytysveden käytössä on havaittavissa selkeä raja, jolloin jäähdytysveden lisääminen ei ole hyödyllistä.



Kuva 5 Sahausparametrien vaikutuksia kulumiseen eri kivilaatujen välillä[18].

Tutkimuksessa [21] luotiin oma teoreettinen malli, jossa pyritään mallintamaan timantteja ympäröivän matriisin kulumista ja timantin irtoamishetkeä. Mallissa tosin joudutaan käyttämään empiirisesti määritettäviä syöttöparametreja.

Tutkimuksessa [22] luotiin Ansys LS-DYNA ohjelmistolla malli timanttisahan ja kiven interaktioista. Tutkimuksessa muodostettiin vauriomalli kivelle, mutta ei terälle. Mallilla saadaan simuloitua timanttiterään kohdistuvat voimat ja sahattavan kiven leikkautuminen. Tämän mallin pohjalta on mahdollista tutkia, minkälaisilla sahausparametreilla saadaan sahaus toteutettua tehokkaimmin ja mikäli myös terälle tehdään vauriomalli, voi kulumista arvioida.

3. BETONILAATAN TIMANTTISAHAUS

Timanttisahaus on kustannustehokas ja pinnanlaadultaan siisti tapa toteuttaa hauraiden ja kovien materiaalien leikkaus kuten betoni [23]. Moderneilla laattatehtailla betonilaattojen leikkaus on toteutettu automaattitimanttisahalla. Automaattisaha mittaa laatan pituuden ja leikkaa käyttäjän määrittämän leikkaussyklin koneenkäyttäjälle jäädessä lähinnä tarkkailijan rooli. Työssä tarkasteltiin erään valmistajan automaattisaha. Kuvassa 6 on nähtävissä Elematic'in E9 automaattisaha (A), THK systems THK-saw (B) ja Echo precastin MAS (C).



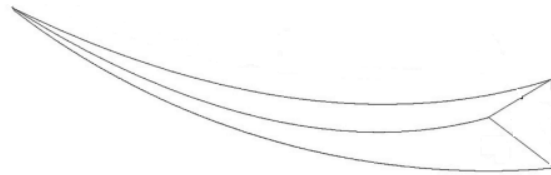
Kuva 6 Eri valmistajien automaattisahoja [24]–[26]

Timanttiterän valintaan vaikuttaa betonin ja laattojen ominaisuudet sekä se, mitä terältä halutaan. Jos terältä painotetaan leikkausnopeutta, tapahtuu se yleensä terän kestävyuden kustannuksella, jos muut parametrit ovat optimit. Kappaleessa 3.1 selostetaan timanttisahan toiminta ja pyörösahaamisen erikoispiirteet. Betonilaatat eroavat toisistaan niin rakenteen kuin betonin ominaisuuksien mukaan. Esimerkiksi koko, betonin lujuus ja esijännitysvaljierien määrä. Näillä ominaisuuksilla on merkitystä timanttisahaamisen kannalta ja niistä kerrotaan kappaleessa 3.2. Terän kulumiseen vaikuttavista mekanismeista kerrotaan kappaleessa 3.3.

3.1 Timanttisahan rakenne ja toiminta

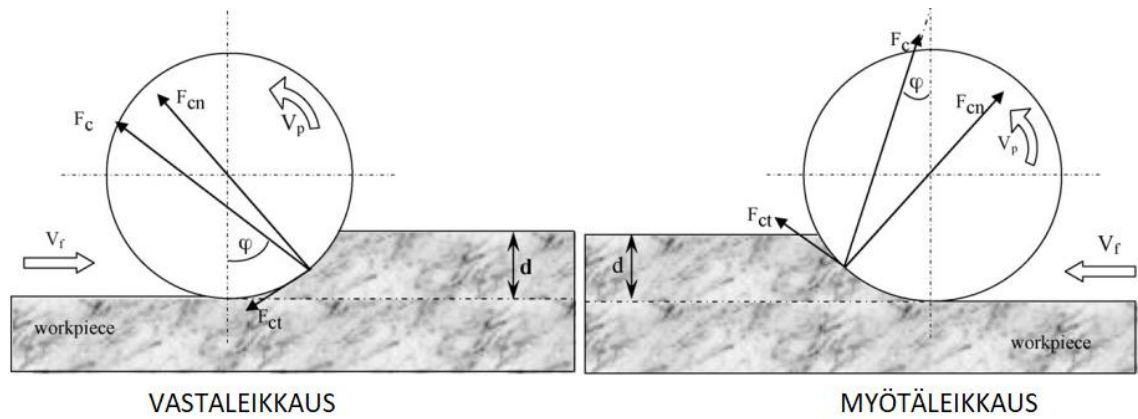
Työn kohteena oleva timanttipyörösaha on itseteroittuva vesijäähdytetty timanttisegmenttipyörösaha, jossa teräsrunkoon on kiinnitetty joko juottamalla tai laserhitsaamalla jauhemetallurgisesti valmistettuja paloja, jotka sisältävät timantteja. Terätyypin mukaan, sillä voi leikata lukuisia eri materiaaleja.

Pyörösahan lastun geometria eroaa horisontaalisesta sahauksesta pyörimisliikkeen vuoksi. Tilanne voidaan mieltää mikrojrnsinnäksi ja täten samat lainalaisuudet pätevät. Siinä missä horisontaalisessa sahauksessa lastun paksuus pysyy vakiona, muuttuu se pyörösahauksessa (kuva 7).



Kuva 7 Lastun geometria pyörösahauksessa. Lastun koko on oheneva tai paksuuntuva riippuen lastuamissuunnasta.

Leikkaus voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, vasta- tai myötäleikkauksena. Tavat eroavat toisistaan huomattavasti lastun muodostuksessa ja voimareaktioissa. Vastaleikkauksessa syöttöliike on pyörimissuuntaan nähden vastakkainen (kuva 8). Leikkaus alkaa lastun 0 vahvuudesta ja kasvaa lastun katkeamiseen asti. Terää joudutaan pakottamaan leikattavaa kappaletta vasten, jolloin syntyy kitkan takia korkea lämpötila ennen leikkauksen alkamista. Toisaalta iskumaiset kuormat sisäänmenovaiheessa pienevät, koska sisäänmenovaiheen rajut iskuvoimat puuttuvat. Työstövoimat pyrkivät työntämään terää ja leikattavaa kappaletta irti toisistaan ja radiaaliset voimat pyrkivät nostamaan leikattavaa kappaletta irti leikkauspöydältä. Myötäleikkauksessa syöttöliike on pyörimissuunnan kanssa sama (kuva 8). Lastun paksuus alkaa ohenemaan kosketuksen jälkeen päättyen nolnaan. Tällöin teräsarmat eivät hankaudu kappaletta vasten ennen leikkausta, mutta toisin kuin vastaleikkauksessa, terään kohdistuu iskumaisia kuormituksia lastun paksuuden ollessa korkeimmillaan kosketuksen alussa. Työstövoimat painavat leikattavaa kappaletta leikkauspöytää vasten ja radiaalivoimat pyrkivät viemää terää eteenpäin, mikä tarkoittaa että syöttömoottorin tehtäväksi voi jäädä vain hallitsemattoman syötön estäminen[27].



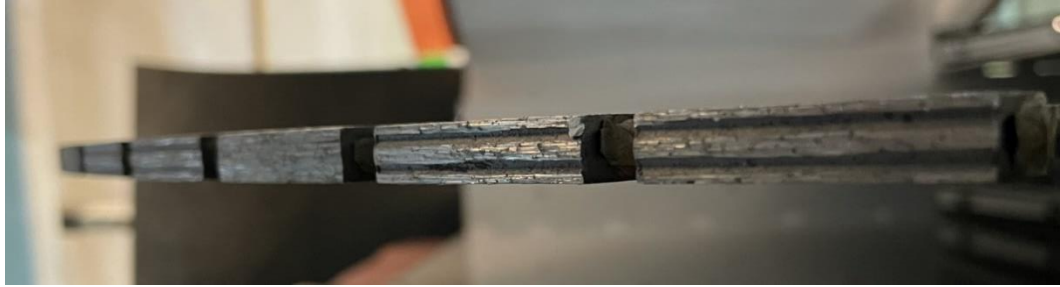
Kuva 8 Vasta- ja myötäleikkaamisen kinematiikat ja voimat. Muokattu kuva lähteestä [20].

Timanttisahan ominaisuuksia säätelee kolme tekijää: timantteja sisältävän segmentin timantteja ympäröivän materiaalin kovuus, timanttien koko ja segmentin timanttipitoisuus. Segmentin kovuudella on suora yhteys timanttisahan kestävyteen. Mitä kovempaa segmentti materiaali on, sitä pidemmän aikaa timantit pysyvät kiinni segmentissä. Itseteroittuvissa terissä on toisaalta oleellista, että timantit irtoavat oikea-aikaisesti ollessaan tylsiä. Tylsä timantti ei kykene leikkaamaan, vaan tuottaa pelkästään kitkalämpöä, jolloin terä palaa ja lopettaa toimintansa. Jos segmentin seos ei ole tarpeeksi kovaa, irtoavat timantit ollessaan vielä teräviä, mikä nopeuttaa terän kulumista, mutta toisaalta lisää leikkuunopeutta ja vähentää lämmöntuottoa, koska tylsiä timantteja ei pääse syntymään. Pääsääntöisesti pehmeitä materiaaleja leikatessa käytetään kovaa terää ja kovaa seota leikatessa pehmeää terää. Varsinkin itseteroittuvissa terissä on turvallisempaa käyttää mieluummin liian pehmeää terää kuin liian kovaa lasittumisriskin takia.

Timanttien kokoa muuttamalla vaikutetaan terän leikkausnopeuteen, leikkauskykyyn ja leikatun pinnan laatuun. Isommilla timanteilla saadaan leikkausnopeutta kasvatettua lastun koon kasvaessa, mutta samalla menetetään kykyä leikata kovempia materiaaleja, koska timantin leikattavaan materiaalin kohdistama paine alenee timantinkoon kasvaessa, ellei moottorin tehoa nosteta. Pienet timantit tekevät leikkauksen siistimmällä pinnanlaadulla sen lisäksi, että leikkaavat kovempia materiaaleja. Tutkimuksessa [28] on kehitetty kaavoja syöttönopeuksien optimoimiseen eri timanttimäärille ja koolle.

Segmentti valmistajat ovat kehittäneet monikerroksisia teräpaloja, joilla saadaan yhdistettyä samaan teräpalaan sekä leikkuukyky sekä kestävyys. Teräpalojen reunat ovat tyypillisesti timanttipitoisuudeltaan tiheämpiä, jotta terän profiili ei pääse muodostumaan kuperaksi, mikä heikentää leikkuuominaisuuksia terän kosketuspinta-alan kasvun takia. Keskelle terää sijoitetaan isompia timantteja ja/tai vähennetään

timanttihiheyttä, mikä parantaa leikkuunopeutta. 3 kerroksen segmenttiä kutsutaan ”voileipä” segmentiksi. Segmenttejä saa myös 11 kerroksisina. Näissä rakenteissa ei välttämättä joka kerroksessa kuitenkaan ole timantteja. Näitä kutsutaan ei työskenteleviksi kerroksiksi. Timantittomien kerroksien tehtävä on pitää segmentin profiili mahdollisemman hyvänä leikkauskykyä ajatellen, koska ne kuluvat nopeammin kuin timantilliset kerrokset muodostaen kuvan 9 mukaisen profiilin terään [29], [30].



Kuva 9 Timanttisahan teräsegmenttejä

Terien valmistajat hakevat kilpailuetuja valmistamalla teriä eri segmenttien pituuksilla ja sahan runkoa muokkaamalla. Kuvassa 10 on nähtävissä kaksi erilaista ratkaisua. Toisessa pidemmät segmentit on kiinnitetty juottamalla kiinni teräsrunkoon (A) ja toisessa taas lyhyemmät segmentit on laserhitsattu teräsrunkoon kiinni (B). Hitsatun terän (B) runkorakenteeseen on myös segmenttien väliin laser-/vesileikattu varsin erilainen ratkaisu toiseen terään verrattuna.



Kuva 10 Kaksi erilaista timanttipyörösahan toteutusta

Segmentin timanttipitoisuudella säädellään terän käyttöikä ja leikkauksen pinnanlaatua. Timanttipitoisuuden kasvattaminen lisää käyttöikä erityisesti pehmeiden mutta kuluttavien materiaalien leikkauksessa kuten hiekkakivi. Timanttipitoisuuden

kasvattaminen parantaa leikkauksen pinnanlaatua, mutta taas vähentää terän kykyä leikata kovempia materiaaleja, koska pintapaine vähenee kosketuksissa olevien timanttien määrän kasvaessa. [31]

Timanttisirkkelin leikkaustehokkuuden kannalta timanttikiteet ovat suuressa roolissa. Teräsegmentin pinnalla olevan timantit ovat eräässä tutkimuksessa jaettu seuraavasti.

- (a) Kokonainen kide (kuva 11). Tämä kide on paras mahdollinen leikkaukseen, koska se säilyttänyt terävät särmänsä ja korkeutensa, joka mahdollistaa suuremman aineenpoiston



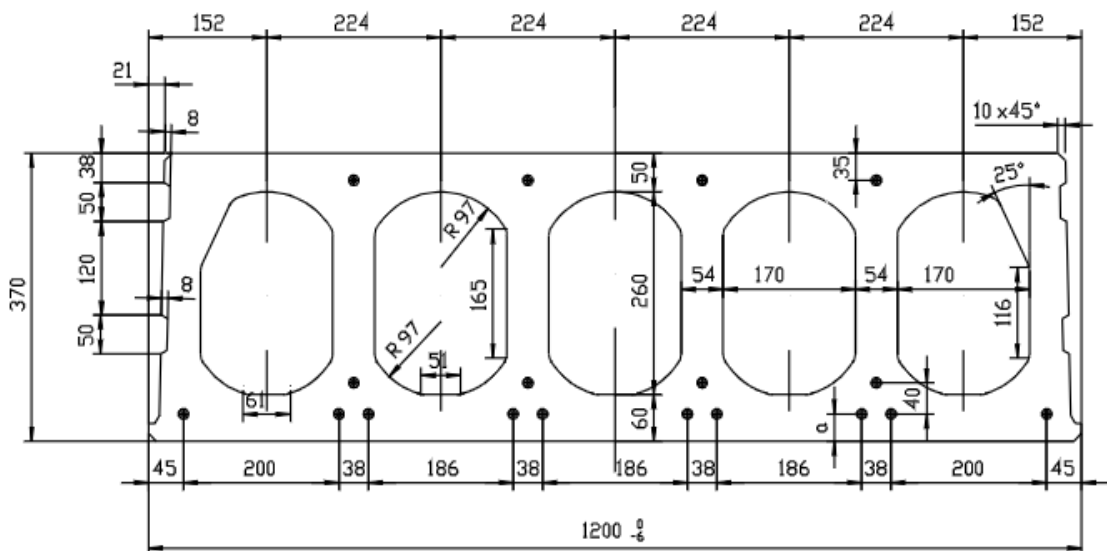
Kuva 11 Kokonainen timanttikide kiinnittyneenä matriisiin [18]

- (b) Kiillottunut kide. Kiteen terävät särmät ovat pyöristyneet tai kosketuksissa oleva pinta on tasainen. Tämä on epätoivottu kiteen muoto, koska se leikkaamisen sijaan energiaa kuluu kitkalämmön tuottamiseen ja riski terän lasittumiseen kasvaa.
- (c) Kiteet mikromurtumilla. Toivottavin vauriomekanismi kiteille. Timanttikiteen toimintapinnoilla esiintyy pieniä murtumia ja halkeamia samalla säilyttäen kuitenkin terävän leikkuusärmän.
- (d) Kide huomattavilla murtumilla. Mikromurtumien edessä saavutetaan lopulta huomattava vaurio kiteellä. Tämä ei ole toivottava kidemuoto, koska syntyy sama lasittumisriski kuin kiillottuneella kiteellä leikkaavien särmien hävitessä.
- (e) Kiteen irtoamisen jättämä kraatteri. Timanttien oikea aikainen irtoaminen on edellytys sahan toiminnalle. Mikäli kuitenkin timantteja irtoaa ennen hyödyllisen eliniän saavuttamista, kuluu terä liian nopeasti ja pahimmillaan voi lopettaa leikkaamisen kokonaan, mikäli kraatterien suhteellinen määrä kasvaa terän leikkuupinnalla liian suureksi.

Terän toimintaan vaikuttaa missä suhteessa edellä esiteltyjä kidemuotoja esiintyy. kokonaisten timanttien, kiillottuneiden timanttien ja irronneiden timanttien jättämien kuoppien suhteen ylittäessä yhden kolmasosan kaikista timanteista, alkaa terän leikkuukyky heikkenemään. Huomattavan murtuman kiteiden ja kraatterien ylittäessä yhden kolmasosan kaikista timanteista, terällä on riski lopettaa toimintansa kokonaan. [32]

3.2 Betonilaattojen rakenne

Työssä tarkasteltavat laatat rajataan ontelo- ja kuorilaattoihin. Ontelo- ja kuorilaatat teräsbetonista valmistettuja rakenneseosia. Laatan rauditusvaijerit ovat normaalitapauksessa laatan alapinnassa ja niihin valmistusvaiheessa aiheutettu esijännitys parantaa laatan vetolujuutta. [33] Äärimmäisissä olosuhteissa vaijereita on myös yläpinnassa (kuva 12). Ontelolaatoissa poikkeustapauksia lukuun ottamatta pitkittäissuuntaisia pyöreän muotoisia onteloita koko laatan matkalla massan vähentämiseksi. Kuorilaatat ovat umpinaisia kappaleita. [34], [35]



Kuva 12 370 ontelolaatta kaikilla mahdollisilla lujitusvaijereilla. Mukautettu lähteestä[36]

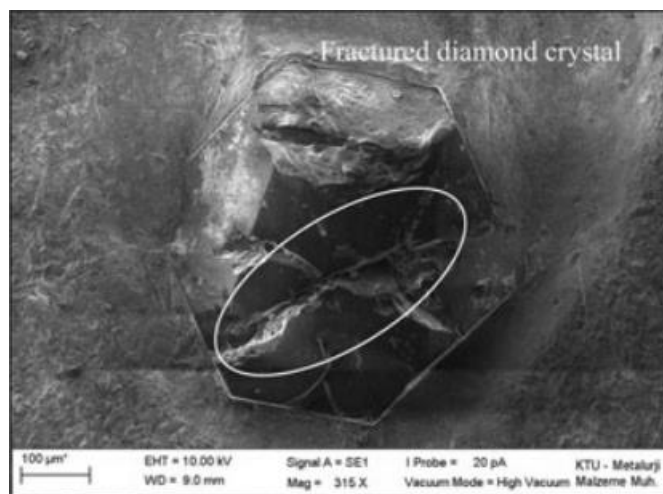
Laattoja valmistetaan sovelluksen tarpeitten mukaan eri betonien puristuslujuuksilla. Ontelolaattojen betoni on puristusluokkia c40 ja c50 ja kuorilaattojen c40[37].

Puristuslujuuteen vaikuttaa muun muassa betonin sementinlaatu, sideaineen määrä ja laatu, kiviaineksen laatu, kuivumisnopeus ja tapa [38]. Kiviainesta betonista on keskimäärin 2/3-osaa ja laattavalmistajien intressinä on kasvattaa sitä entisestään. Sementti on kiviainesta kalliimpaa ja kustannussäästöjä saadaan lisäämällä kiviaineksen määrää suhteessa sementtiin. Mitä laadukkaampi laatan puristusvaluprosessi, sitä enemmän voidaan käyttää kiviainesta [39]. Tulevaisuutta kohti kiviainesta tullaan valmistamaan lähinnä murskaamalla kallioita, koska luonnonsora ja hiekka ovat uusiutumaton luonnonvara [40]. Luonnonkiviaineksen etu murskattuun nähden on sen pyöreäksi hioutuneet särmä ja parempi muoto. Pyöreät kivet tekevät betonimassasta juoksevampaa ja ovat vähemmän abrasiivista teräsegmentille [41], [42].

3.3 Timanttisahan kuluminen

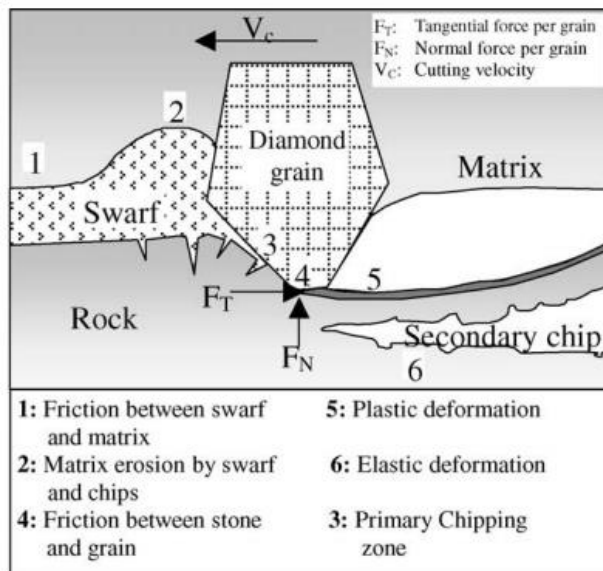
Tutkimukset timanttisegmenttien kulumismekanismeista kertovat, että kuluminen metallijauhematriisilla tapahtuu eroosion ja abraasion kautta ja timanttien kohdalla abraasion, termisen kulumisen ja iskukuluminen kautta [6], [19], [43], [44]. Seuraavaksi esitellään edellä mainitut kulumismekanismien vaikutukset timanttisahan tapauksessa.

Kuvassa 13 on nähtävissä timantti, joka on haljennut ja säröytynyt iskukuluminen takia. Lohkeamisen ilmaantuvuutta lisää timanttien anistrooppisuus, mikä tarkoittaa lujuuden vaihtelevan timanttikiteessä huomattavasti suunnan mukaan. Tutkimuksen mukaan paineet yksittäisellä timantilla olisivat kuitenkin vain 4 % timantin puristuslujuudesta, mikä viittaisi anistrooppisuuden vaikuttavan lohkeamisiin [7], [45]. Aikaisemmin esitellyssä kuvassa 10 sahan terässä (B) on nähtävissä haljennut teräsegmentti, mikä ei kuitenkaan ole tavanomaista hyvin toimivassa sahausprosessissa.



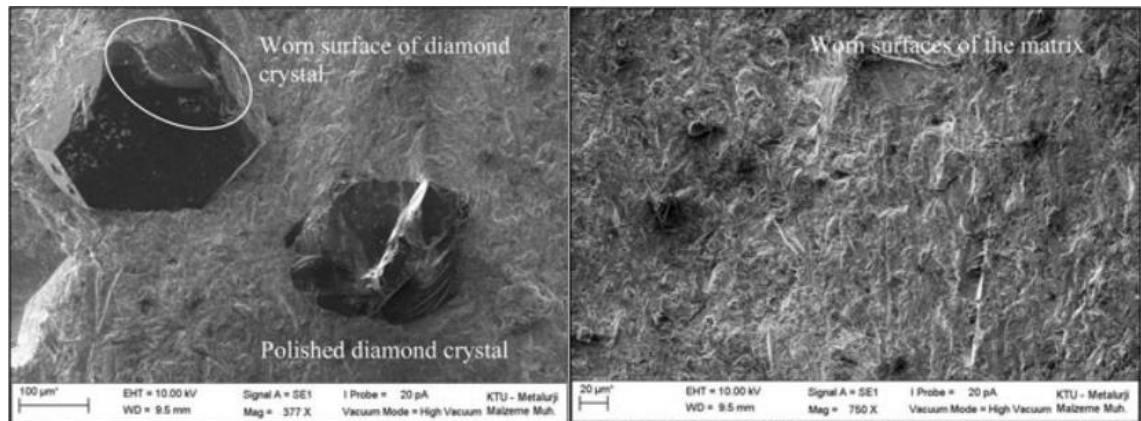
Kuva 13 Iskukulumisesta vaurioitunut timanttikide [18]

Kuvassa 14 nähdään eroosion ilmenevän voimakkaampana kulumisena timanttikiteen juurella pyörteilevästi virtaavan leikkauslietteen vuoksi. Mitä suurempi leikkausnopeus, sitä voimakkaammin liete vaikuttaa matriisin kulumiseen. Vesijäähdytteisen timanttisahan tapauksessa eroosio aiheuttaa myös abrasiivista kulumaa.



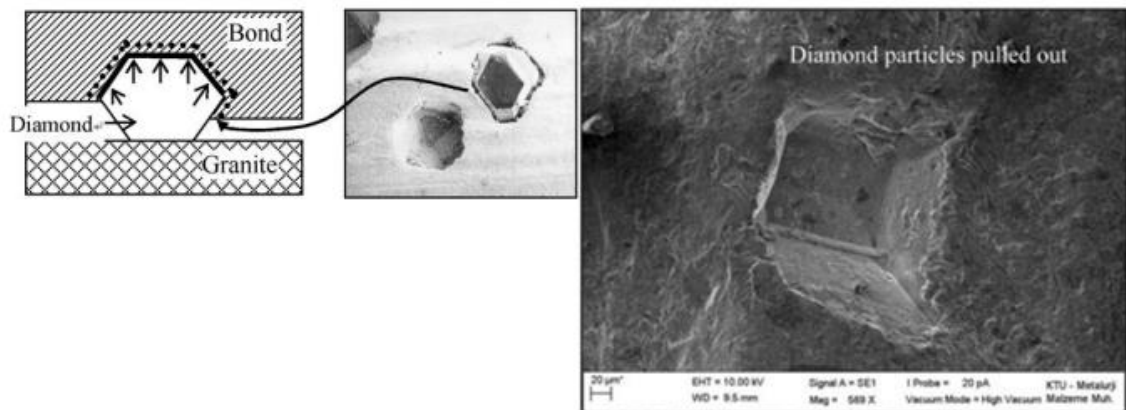
Kuva 14 Eroosion kuluttama alue merkattu numerolla 2 [46]

Abrasiivisessa kulumisessa kovempi pinta tekee pehmeämpään pintaan vaurioita normaalivoiman vaikutuksesta. Tyypillisesti kulumisen alkaa kahden kappaleen abrasiivisesta kulumisesta, mutta kulumispartikkeleiden muodostuminen kahden kappaleen välille muuttaa tilanteen kolmen kappaleen kulumiseksi. Kulumispartikkelit ovat muokkauslujittumisen vuoksi kovettuneet, mikä nopeuttaa kulumista molemmilla pinnoilla[1]. Abraasio on pääasiallinen kulumismekanismi matriisilla leikkauksesta syntyvän betonilietteen takia, mutta lämpökulumisen heikentämä timantti on myös altis abraasiolle. Kuvassa 15 on nähtävissä kaksi tasaiseksi hioutunutta timanttia ja abraasion aiheuttamat vauriot matriisilla. Matriisilla on mahdollista syntyä adhessiivista kulumista, kun terä osuu betonilaatan teräksisiin lujitevaijereihin, koska pääsääntöisesti matriisi koostuu metallijauheesta.



Kuva 15 Kaksi termisen/abrassiivisen kulumisen vaurioittamaa timanttia ja abraasion jäljet matriisilla [18]

Termisessä kulumisessa lämpö nopeuttaa kulumista kemiallisia reaktioita nopeuttamalla ja varsinkin eri materiaaleista kootuissa rakenteissa erilaiset lämmönjohtavuudet ja lämpölaajenemiskertoimet aiheuttavat jännityksiä edesauttaen kulumista, mikä voi ilmetä esimerkiksi timantin irtoamisena (kuva 16) [6].



Kuva 16 Timantin lämpölaajeneminen aiheuttaa välyksen timantin ja matriisin välille, mikä aiheuttaa timantin irtoamisen aiheuttama jättäen kraatterin matriisiin [18], [44].

Timanttien kohdalla yli 400–600 celsius asteen lämpötiloissa timantin kiderakenne muuttuu kovemmasta kuutiollisesta rakenteesta pehmeämpään heksagoniseen rakenteeseen, mikä nopeuttaa timantin kulumista. Korkea lämpötila nopeuttaa materiaalien hapettumista ja 2 pinnan vuorovaikutuksesta syntyvää lämpötilan aiheuttamaa hapettumiskulumaa kutsuaan tribokemialliseksi kulumiseksi. Jos kahden koskettavan aineen liukoisuus keskenään on suuri, nopeutuu tämä ilmiö entisestään. Esimerkiksi ontelolaattojen esijännitysvaijerien teräksen sisältämällä hiilellä on haitallinen vaikutus terän timanttien kestävyys. Timanttisahalla leikatessa lämpötila

timantilla leikkuukosketuksessa saattaa nousta jopa 900 celsius asteeseen, mikä riittää aiheuttamaan timantin palamista, muuttumista grafiitiksi tai kiderakenteen muuttumista heikommaksi [7], [44]. Terminen kulumisen siis nopeuttaa muidenkin kulumismekanismien aiheuttamaa kulumista.

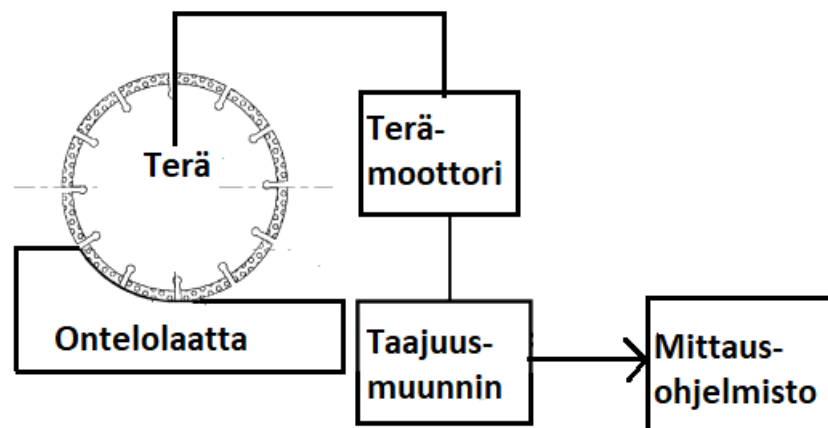
4. TIMANTTISAHAN TOIMINNAN MITTAAMINEN

Mittaukset suoritettiin automaattisahalla laattatuotannon aikana ja järjestelyt ovat sen mukaiset. Automaattisahalta oli mitattavissa työstöarvot hyödyntämällä Mitsubishin taajuusmuuntajien dataloggaus ominaisuutta. Automaattisahan kaikki liikkeet oli toteutettu sähkömoottoreilla, mikä mahdollisti teho ja vääntöparametrien tallentamisen. Timanttisahanterän kulumista tarkkailtiin käsin mittaamalla. Kulumislukemat yhdistettiin koneen automaattisesti tallentamiin leikkausmääriin, jotka oli jaoteltu laattatyypin mukaan.

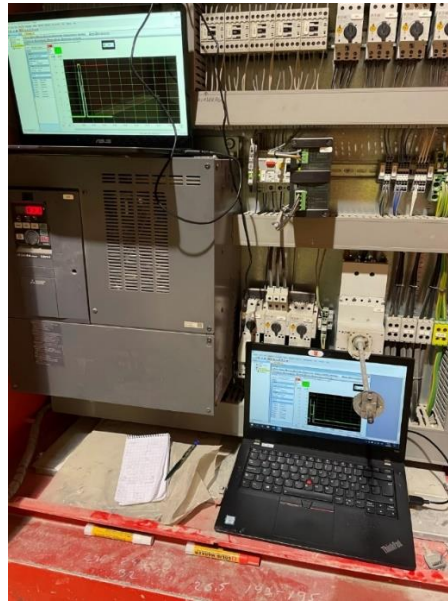
4.1 kappaleessa käydään läpi mittausjärjestelyt ja mittauksiin käytetyt laitteet ja 4.2 kappaleessa esitellään mittaustulokset.

4.1 Mittausjärjestelyt ja laitteet

Sahausprosessin tehoarvoja mitattiin automaattisahan taajuusmuuntajilta Mitsubishi Electric:in FR Configurator 2- ohjelmistolla, joka on tarkoitettu Mitsubishin taajuusmuuntajien säätämiseen ja mittaamiseen. Kannettava tietokone ohjelmistoinen kytkettiin terämoottorin taajuusmuuntajaan kiinni. Terämoottoria ohjasi taajuusmuuntaja, josta ohjelmistolla mitattiin tehodataa (kuva 17). Kuvassa 18 mittausjärjestely tehdasympäristössä. Ohjelmisto tunnisti taajuusmuuntajan automaattisesti hoitaen taajuusmuuntajakohittaiset säädöt samalla. Ohjelmassa oli määrätty tallennettaville datapisteille raja. Jotta yksi leikkaus saataisiin yhteen mittaukseen, oli näytteenotto taajuudeksi säädettävä 7,5 millisekuntia. Sahausprosessista mitattiin terämoottorin tehoa leikatessa HC370 laattaa eli 370 millistä ontelolaattaa. Mittauksen aloitus ja lopetus määritettiin manuaalisesti silmämääräisesti tarkkailemalla sahaustapahtumaa.



Kuva 17 Havainnollistava kuva mittausjärjestelyistä. Mukautettu kuva[47]



Kuva 18 Mittausinstallaatio tehdasympäristössä

Teräpalasegmenttien kulumista mitattiin Powerfix-digitaalityöntömitalla. Mitta otettiin kuvan 19 mukaisesti teräpalan liitoskohdan ja leikkuupään välillä. Tällä tavalla mittaamalla tulee kuitenkin merkittäviä epätarkkuuksia, koska teräsegmenttien hitsausaumamat erosivat silminnähdn palan mukaan ja aiheuttaa mittauksen vaikean toisinnettavuuden takia 0,3 mm virheitä. Mittaus suoritettiin jokaiselle 120 segmentille. Ensimmäinen mittaus tehtiin 30.3.2022 ja toinen 13.4.2022. Näillä tiedoilla voidaan yhdistää kulumismäärä ja leikatut laatat.



Kuva 19 Teräpalasegmenttien mittaustekniikka

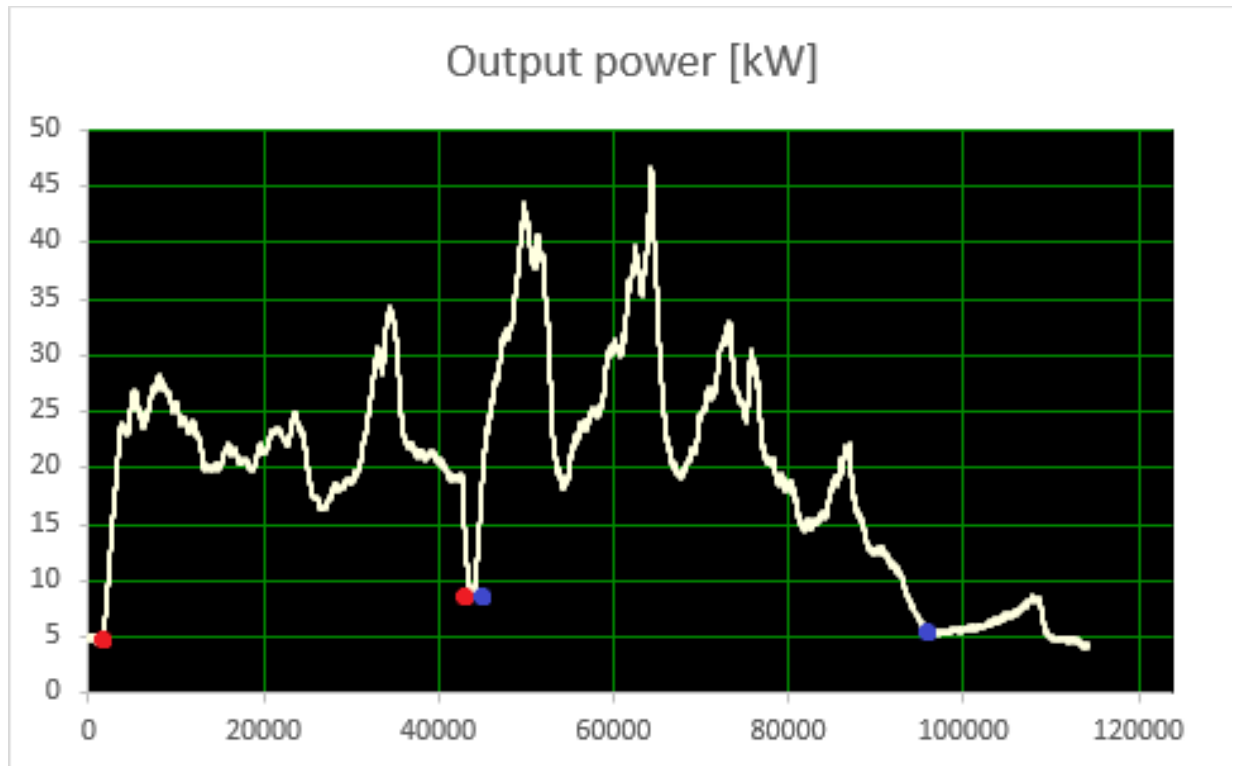
4.2 Mittaustulokset

Jokaisesta teräpalamittaustapahtuman tuloksista muodostettiin keskiarvo ja keskiarvoja vertailemalla laskettiin timanttisahan säteiskuluma aikavälille 30.3.2022 – 13.4.2022. Aikajaksolla terä kului säteissuunnassa 3,32 mm. Automaattisahan tallentamat leikkausmäärät aikavälille 30.3.2022 – 13.4.2022 (kuva 20) tallennettiin muistitikulle. Kuluminen ja leikkausmäärät saatiin näin yhdistettyä.

PÄIVÄ	Terä ID	Tuote	Cuts/Total
13.4.2022 8.27	21	HC265	5
13.4.2022 7.43	21	HC265	2
13.4.2022 5.20	21	HC320	13
13.4.2022 4.18	21	HC265	7
13.4.2022 0.09	21	HC265	12
12.4.2022 23.27	21	HC400	32
12.4.2022 6.26	21	HC265	1
12.4.2022 6.19	21	HC265	57
11.4.2022 23.04	21	HC400	35
11.4.2022 18.52	21	HC320	20
10.4.2022 19.33	21	HC400	66
8.4.2022 20.00	21	HC265	6
8.4.2022 5.11	21	HC320	2
8.4.2022 5.08	21	HC265	10
8.4.2022 4.33	21	HC400	57
7.4.2022 19.53	21	HC320	26
7.4.2022 9.18	21	HC320	43
6.4.2022 23.20	21	HC400	32
6.4.2022 19.59	21	HC320	29
5.4.2022 23.43	21	HC400	36
5.4.2022 9.49	21	HC320	55
4.4.2022 22.09	21	HC320	1
4.4.2022 21.29	21	HC320	1
4.4.2022 21.21	21	HC320	24
4.4.2022 10.29	21	HC400	81
3.4.2022 21.06	21	HC320	30
1.4.2022 6.19	21	HC400	68
31.3.2022 22.57	21	200	29
31.3.2022 20.43	21	HC400	5
31.3.2022 0.34	21	370	14
30.3.2022 23.34	21	HC400	11
30.3.2022 22.48	21	370	17
30.3.2022 20.26	21	HC400	13
30.3.2022 7.12	21	370	10
30.3.2022 6.28	21	HC400	31

Kuva 20 Automaattisahan leikkausloki ajalta 30.3.2022 – 13.4.2022

Automaattisahalta mitatut HC370 laatan leikkaamisessa toteutuneet tehokemat tallentuivat CSV-tiedostoiksi, jotka sisälsivät datapisteitä 7,5 millisekunnin välein. Datapisteistä piirretyillä käyrällä (kuva 21) pystytään erottamaan sahan laattaan osumiskohta, sahausliikkeen suunnanmuutos ja sahauksen valmistuminen.



Kuva 21 Tehokäyrässä on erotettu ylhäältä alaspäin liike (Z-liike) punaisilla palloilla ja sivuttaisliike (Y-liike) sinisillä palloilla

5. TIMANTTISAHAN KULUMISEN MALLINTAMINEN

Tässä kappaleessa esitetään simulaatio leikkausohjelmasta, jossa timanttiterä leikkaa annettua ontelo- tai umpibetonilaattaa annetulla ohjelmalla, ja samalla arvioi terän radiaalikulumista leikkauksen aikana. Simulointia varten kehitettiin koodi MATLAB® -ohjelmistolla, jolla pystyttiin luomaan terä ja betonilaatat monikulmio-olioina kaksiuotteisessa (2D) avaruudessa, joiden paikkaa pystytään muuttamaan komennoilla, sekä määrittämään terän ja laatan kosketuspisteet annetuilla ajanhetkillä. Terä- ja betonilaattaoliot koostuvat 2D-avaruuden alueista, jotka jäävät määritellyn reunan (englanniksi boundary) sisälle. Tämä reuna määritellään 2D-avaruuden pisteistä, joiden resoluutiota lisäämällä saadaan tarkempi kuvaus terä- sekä betonilaattaolioista 2D-tasossa, mutta silloin laskentatehon vaatimus nousee rajusti. Simulaatiossa timanttiterä liikkuu ontelolaattaa kohti halutulla askelpituudella ja jokaisella askeleella tarkistetaan, mikä osio laattaolion reunasta leikkaa teräolion kanssa. Leikkaavien osioiden avulla voidaan määrittää, paljonko laatasta poistetaan sekä voidaan arvioida terän kulumista askeleen aikana käyttämällä Archardin kulumisyhtälöä differentiaalimuodossa. Askelpituutta laskemalla saadaan tarkempia tuloksia laskenta-ajan kustannuksella. Simuloinnissa siis pitää ottaa huomioon, kuinka tarkalla ruudukolla kappaleet halutaan määrittää, sekä kuinka pienenä pidetään aika-askelta terän liikkumisesta simuloitessa.

Osiossa 5.1 esitetään matemaattinen malli ja sen parametrit. Osiossa 5.2 esitetään simulaatio yksityiskohtaisesti, näyttämällä kappaleiden luonti 2D-tasoon, leikkausohjelman määrittäminen sekä terän liikkumisen simulointi. Tässä osiossa myös näytetään, miten jokaisella ajanhetkellä malli arvioi leikatessa tapahtuvaa terän kulumista annettujen parametrien sekä kosketusmatkan mukaan.

5.1 Matemaattinen malli ja parametrit

Timanttisahan segmentin kulumisessa on kyse eroosiokulumisesta tai kolmen kappaleen abrassiivikulumisesta, ja lähde [48] osoittaa, että Archardin yhtälön pystyy muodostamaan abrassiiviselle kulumiselle, jolloin yhtälön muodosta tulee sama, mutta parametrien merkitykset muuttuvat hieman [49].

Tämän työn tilanteessa näitä samoja yhtälöitä voidaan käyttää olettamalla timanttiterän betonin sahaamista timanttiterän ja betonin hankaukseksi. Tarkemmin määriteltynä

tarkastellaan betonivesilietteen aiheuttamaa kulumista teräsegmentille. Sovittamalla oleelliset parametrit kulumisyhtälöksi, pystytään arvioimaan timanttiterän kulumista ajan funktiona.

Yleisellä tasolla kulumista voidaan mallintaa, kun taustalla olevat vaikuttavat elementit ja niiden vaikutukset tunnetaan tarpeeksi hyvin. Jos pystytään mallintamaan, paljonko kulumista tapahtuu tietyssä ajanhetkenä, voidaan kokonaiskulumisen määrittää kaikkien kulumishetkien summana, matemaattisesti ajateltuna integraalina kulumiseen [12], [14]. Inkrementaalinen kulumisen lisäys tietyllä ajanhetkellä voidaan yleisesti mallintaa niiden parametrien funktiona, jotka osallistuvat kulumiseen. Tämän työn tilanteeseen kuuluvat parametrit koostuvat seuraavista asioista: kuluhan materiaalin kovuus, materiaalien välinen pintapaine johtuen kitkasta, pyörimisnopeus sekä materiaalin välinen kontaktimatka, sekä muut huomioimatta jääneet tekijät.

$$dW = f(H, p, v_k, \text{muut tekijät}) dt, \quad (2)$$

missä dW on syvyyskulumisdifferentiaali (metri), p on pintapaine (Newton/neliometri), v_k on kehänopeus (metriä/s), H on kuluhan aineen kovuus (Newton/neliometri), dt on aika-askeldifferentiaali (sekunti).

Työn tilanteessa sovelletaan radiaalista Archardin kulumismallia kulumisfunktiossa ja mallinnetaan oheisella yhtälöllä inkrementaalisia kulumisen lisäyksiä, tietyn differentiaalisen aika-askelen aikana:

$$dW = \frac{K p v_k}{H} dt, \quad (3)$$

missä K on dimensioton kulumisvakio, joka määritetään empiirisesti. Yleisesti, kaikki vuorovaikutukset leikkaavan ja leikattavan materiaalin välillä sisältyvät tähän vakioon, jolloin mallista tulee sitä tarkempi, mitä paremman arvon sovittaa kokeellisen datan pohjalta.

Tähän K -arvoon pohjautuu Archardin yleisyys sekä yksinkertaisuus. Pienetkin muutokset leikkaamisolosuhteissa tulee vaikuttamaan suuresti tähän vakioon. K täytyy määrittellä empiirisesti jokaisessa tilanteessa ja sen arvoon vaikuttavat lukuisat eri asiat, kuten leikattavan materiaalin kovuus, voiteluaine materiaalien välissä, kulumismekanismi, hankaavien materiaalien pintojen karheus, lämpötila, mahdolliset muut hankaamiseen liittyvät kappaleet, irronneiden kappaleiden poisto. Täten K -arvo on hyvin yksityiskohtainen suure, joka pitää määrittää omalle tilanteelle ennen simuloinnin aloittamista. Kun K on määritelty hyvin, Archardin yhtälö on tarkka riippuen siitä, kuinka tarkasti aika-askelia otetaan ja kuinka tarkasti pintapaine pystytään määrittämään jokaiseen kappaleen osaan [13].

Pintapainetta ei tässä työssä pystytä mittaamaan suoraan, vaan se pitää määrittää epäsuorasti tehodatasta. Tangentiaalinen voima on sahaustilanteessa terän ja betonin välinen liukukitka, joka määrittyy kaavalla (4) [17]:

$$F_{\mu} = \frac{P}{v_k}. \quad (4)$$

Normaalivoima saadaan ratkaistua liukukitkasta seuraavalla kaavalla:

$$F_N = \frac{F_{\mu}}{\mu}, \quad (5)$$

missä μ on betonin ja sahanterän välinen liukukitkakerroin.

Jakamalla kokonaisnormaalivoima kosketusmatka L kerrottuna terän leveydellä d kaavan (6) mukaisesti tulee tulokseksi terään vaikuttava pintapaine:

$$p = \frac{F_N}{L \cdot d} = \frac{F_{\mu}}{\mu \cdot L \cdot d} = \frac{P}{\mu \cdot L \cdot d \cdot v_k} \quad (6)$$

Tässä työssä ei ole mahdollista määrittää suoraan betonin ja sahanterän välistä liukukitkakerrointa. Tästä syystä sisällytämme tämän suureen Archardin kaavan vakioon määrittämällä k -arvon seuraavasti:

$$k = \frac{K}{\mu} \quad (7)$$

Tällöin sijoittamalla kaavat 6 ja 7 kaavaan 3 saamme Archardin seuraavaan muotoon:

$$dW = \frac{k \Phi}{H} dt, \quad (6)$$

missä Φ on kulumisvuon tiheys:

$$\Phi = \frac{P}{L \cdot d}. \quad (6)$$

Kokonaiskuluminen $\Delta W_{12} = W_2 - W_1$ ajanhetkestä t_1 ajanhetkeen t_2 saadaan integroimalla yhtälö (3) oheisella aikavälillä:

$$\Delta W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{k \Phi}{H} dt, \quad (7)$$

ja olettamalla simulaation ajoitusajanhetkeksi $t_1 = 0$, saamme, että kuluminen W ajassa t_1 on annettu seuraavasti:

$$W = \int_0^{t_1} \frac{k \Phi}{H} dt. \quad (7)$$

Yllä oleva yhtälö on differentiaalimuodossa. Se täytyy diskretoida äärellisiin aika-askeliin, kun tehdään numeerista simulaatiota. Tällöin differentiaalit dt muuttuvat aika-askeliksi Δt , jolloin kuluminen jokaisella aika-askeleella on

$$\Delta W = \frac{k \Phi}{H} \Delta t. \quad (8)$$

Integraali muuttuu diskretoidessa summaksi:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{k_i \Phi_i}{H} \Delta t \quad (9)$$

Yhtälöllä (9) pystytään laskemaan kulumisen simulaation aikana. Yleisesti k ja Φ ovat ajasta riippuvia suureita, joten ne täytyy määrittää erikseen jokaisella indeksillä i . Tässä tilanteessa kuitenkin Φ on eniten vaihteleva suure sahauksen aikana, koska se riippuu moottorin pyörimistehosta P ja terän ja laatan kosketusmatkasta L , joiden arvo vaihtelee suuresti sahauksen aikana. Riippuen ontelolaatan tyypistä, ja leikkauksen vaiheesta kosketusmatka voi vaihdella suuresti, kun leikataan aukon kohdalta. Täten määritetään k -arvon yksinkertaistuksen vuoksi vakioksi, koska oletetaan muiden ympärillä olevat olosuhteiden pysyvän vakiona sahauksen aikana. MATLABilla pystytään mallintamaan tarkasti kosketusmatka, jos resoluutio laitetaan tarpeeksi pieneksi, mutta muut suureet täytyy määrittää joko kokeellisen datan perusteella tai koneesta annettavan tiedon perusteella.

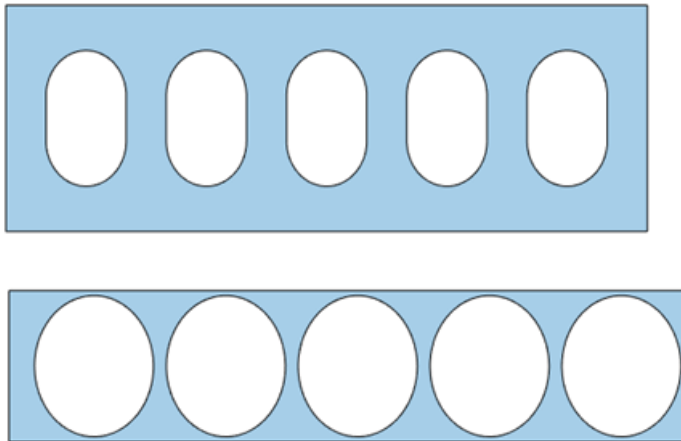
5.2 Simulaation toteutus

MATLAB-koodi aloittaa simulaation luomalla halutun ontelolaatan, jonka muoto määrittyy annettujen parametrien perusteella. Laattojen luonti alkaa tekemällä ensin betonilaattaa kuvaava monikulmio-olio. Tämä onnistuu MATLABin *polyshape*-komennolla, joka luo *polyshape*-olion, joka on monikulmio, jonka sijainti tulee annettujen kulmapisteiden koordinaattien mukaisesti. Tällä pystytään luomaan umpinainen laatta haluttuun paikkaan 2D koordinaatistossa (kuva 22): Tässä esimerkkisimulaatiossa palkit ovat 3-yksikköä korkeita ja 10-yksikköä leveitä.



Kuva 22 Polyshape-komennolla luotu suorakulmio, joka simuloi umpinaista betonilaattaa

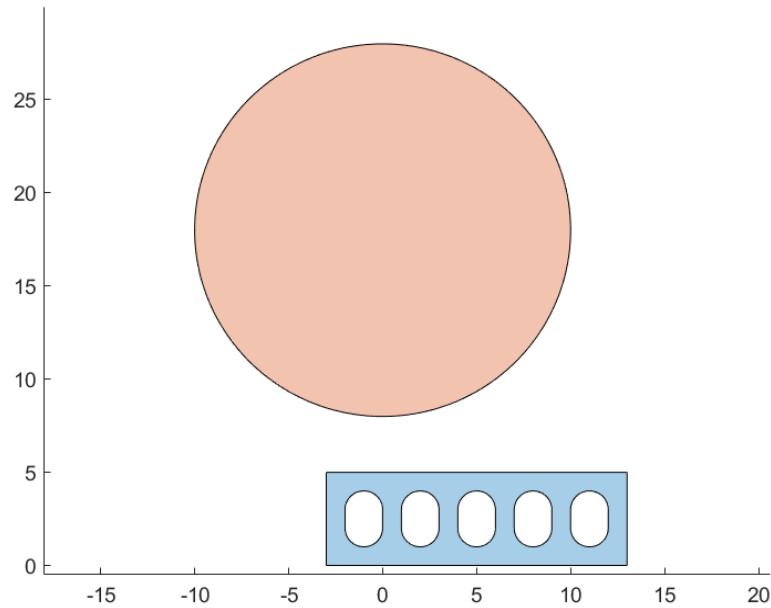
Umpinaiseen laattaan pystytään luomaan ontelot `addboundary`-komennolla, jonka parametreiksi annetaan ontelon sulkevat reunapisteet. Alla (kuva 23) kaksi esimerkilaattaa:



Kuva 23 Addboundary-komennolla luodut ontelot

Terä luodaan myös `polyshape`-komennolla. Terä approksimoidaan simulaatiossa ympyräksi antamalla kulmapisteet parametrisoituna ympyrän kehän pisteinä, ja ympyrästä tulee sitä tarkempi, mitä enemmän kehän pisteitä antaa kulmapisteiksi. Tässä esimerkksimulaatiossa terän säteeksi otetaan 10-yksikköä. Kuvassa 24 on terä ja betonilaatta samassa kuvassa, terä laatan yläpuolella.

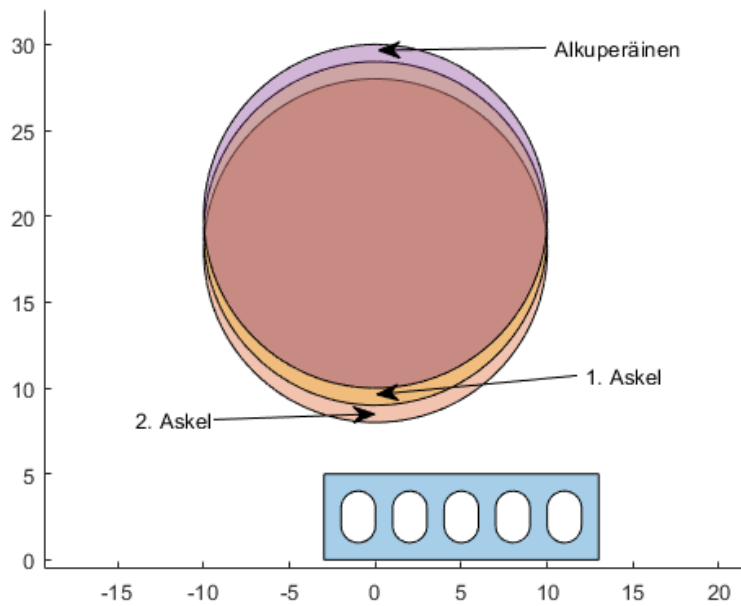
Sekä laatat että terä saadaan piirrettyä koordinaatistoon `plot`-komennolla, jolloin ne ilmestyvät niihin kuuluviin koordinaatiston pisteisiin.



Kuva 24 Terä ja laatta piirrettynä 2D-koordinaatistossa.

Tässä havainne simulaatiossa akselien yksiköt ovat dimensiottomia, suhteellisia arvoja, ja tarkat arvot määräytyvät palkista ja terästä annettujen parametrien perusteella lopullisessa simulaatiossa.

Terän liikkumista simuloidaan MATLABin *polyshapeille* tarkoitetulla *translate*-komennolla, jonka arvona tulee ulos uusi terä, jota on liikutettu haluttu matka x- ja y-suuntaan 2D avaruudessa, jolloin terän rata voidaan määrittää x- ja y-arvoina paljonko terän alkuperäisestä paikasta pitää liikkua mihinkin suuntaan. Aika-askeleet Δt määräytyvät mitattujen tehokäyrien aikaresoluution mukaan. Askel matka saadaan kaavalla $\Delta s = v \Delta t$, missä v on terän etenemisnopeus yksikkönä mm/s . Riippuen siitä mennäänkö ylhäältä alaspäin vai sivulle, teräoliota liikutetaan *translate*-komennolla joko y-suunnassa alaspäin tai x-suunnassa oikealle Δs verran, simuloiden terän etenemistä aika-askeleen aikana. Tämä prosessi on havainnollistettu kuvassa 25, jossa pystysuuntainen liike on näytetty kahden askeleen verran. Terä-olion keskipistettä muutetaan haluttuun suuntaan määritetyn askeleen verran, jonka jälkeen tarkistetaan terän kosketus betonilaattaan, jolloin laskettaisiin tapahtuva kuluminen. Pienempi askel lisää simulaation tarkkuutta lisäten samalla simulaatioon tarvittavaa laskentamäärää.



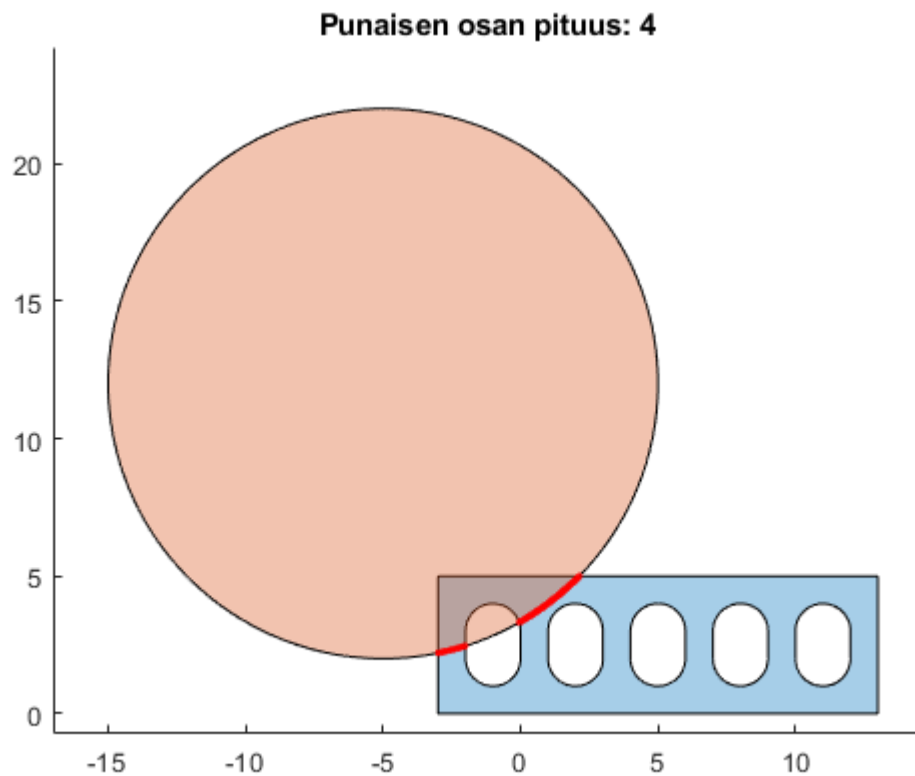
Kuva 25 Havainnekuva terän liikkumisesta simulaation aikana.

Kun terää liikutetaan askel askeleelta eteenpäin, tulee tilanne, jossa osa terästä on palkkiolion sisällä. Tämän takia jokaisella askeleella katsotaan, onko osa terästä palkin sisällä. Tämä saadaan selville käyttämällä *intersect*-komentoa, joka ottaa syöttödatana terän ja palkin alueet antaen ulostulona yhteisen alueen (ts. ”leikkauksen”) terästä ja palkista *polyshape*-oliona, sekä *shapeID*-arvot, jotka kertovat kummasta monikulmiosta tulee yhteisen alueen kulmapisteet. Kulmapisteistä voidaan määrittää mitkä osat leikkauksesta ovat terälle kuuluvia reunoja, jolloin terän ja kappaleen kosketusmatka voidaan määrittää. Terän koskettava matka pystytään määrittämään ottamalla kaikki leikkauksen kulmapisteet, joiden *shapeID* vastaa terän indeksiä. Tämä kosketusmatka on havainnollistettu kuvassa 26 punaisella viivalla. Kosketuspisteet ovat ympyrän kehän pisteitä laatan sisällä, joilla pystytään laskemaan punaisen viivan pituus kaavalla $s = r \theta$, jossa s on matka kehällä, r on terän säde ja θ on se kulmamäärä ympyrästä, paljonko kehästä on punaista viivaa. Diskreetissä tilanteessa, jossa kosketuspisteitä M kappaletta, pystytään laskemaan tämän punaisen osuuden pituus kaavalla

$$L = \sum_{m=1}^M r \cdot \Delta\theta, \quad (8)$$

missä $\Delta\theta$ on kulmaresoluutio radiaaneina. Kulmaresoluutio määräytyy, kuinka tiheästi olemme terää piirittäessä määrittäneet kulmapisteet eli kuinka tarkan diskretoinnin olemme tehneet. On ilmiselvää, että kulmapisteitä terään lisäämällä kulmaresoluutio tihenee, mikä lisää leikkauspisteitä. Kun $\Delta\theta$ lähestyy nollaa, niin kaava (8) muuttuisi

integraaliksi, mutta numeerisessa laskennassa sen täytyy olla äärellinen. Kuvassa 26 on annettu kuvassa olevan punaisen viivan laskettu pituus. Simuloinnissa kosketusmatkat muuttuvat jatkuvasti, jolloin jokaisella askeleella erikseen pitää määrittää yhteiset kosketuspisteet ja laskea niistä kosketusmatka. Terän ja laatan yhteinen kosketusmatka määritetään MATLABin `intersect`-komennolla ja kosketusmatka saadaan määritettyä käyttämällä kaavaa (8). Se osuus laatasta, joka on terän sisällä saadaan poistettua käyttämällä `subtract`-komentoa.



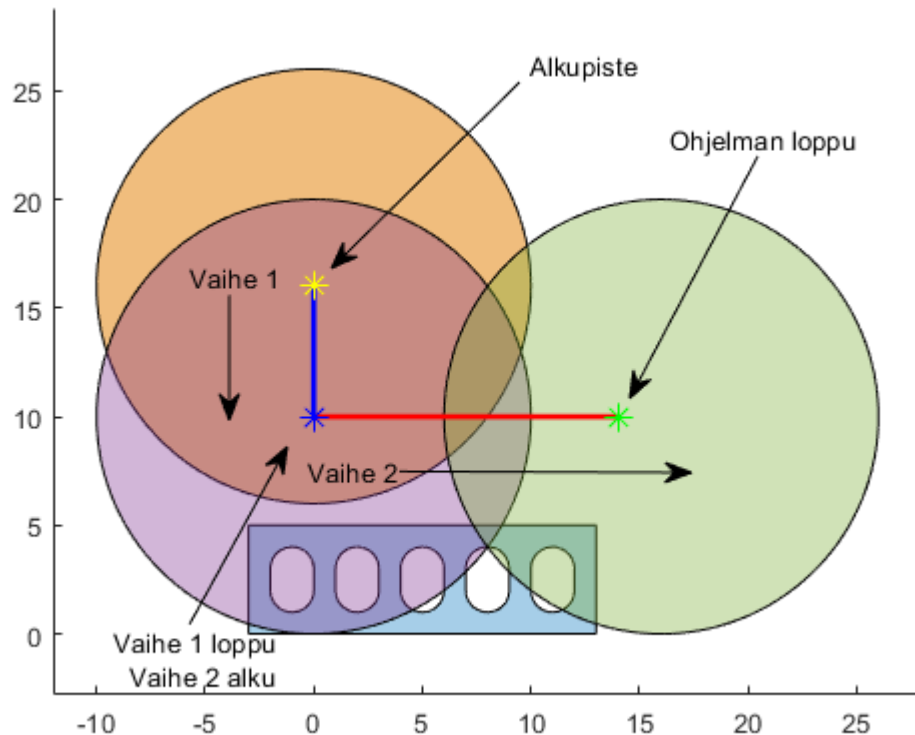
Kuva 26 Terän ja laatan yhteinen kosketusmatka havainnollistettuna punaisella.

Laskettua kosketusmatkaa käyttäen pystytään laskemaan Archardin kaavan mukaisen terän kulumisen, käyttämällä kaavaa (6). Muut parametrit, kuten teho tulevat kokeellisesta datasta.

Kun terän ja palkin leikkaus on määritetty, poistetaan sahatun osuuden eli yhteisen alueen siten että käytetään `subtract`-komentoa, joka ottaa syöttödatana nykyisen palkin ja terän ja palkin leikkauksen, jolloin palkista poistetaan se alue, joka jäi terän sisään. Tämä on havainnointu kuvassa 28. Tämän jälkeen askel on valmis ja siirrytään

seuraavalle askeleelle, jossa terää liikutetaan taas askeleen eteenpäin, jolloin taas osa terästä on juuri muokatun palkin sisällä ja prosessi alkaa uudestaan.

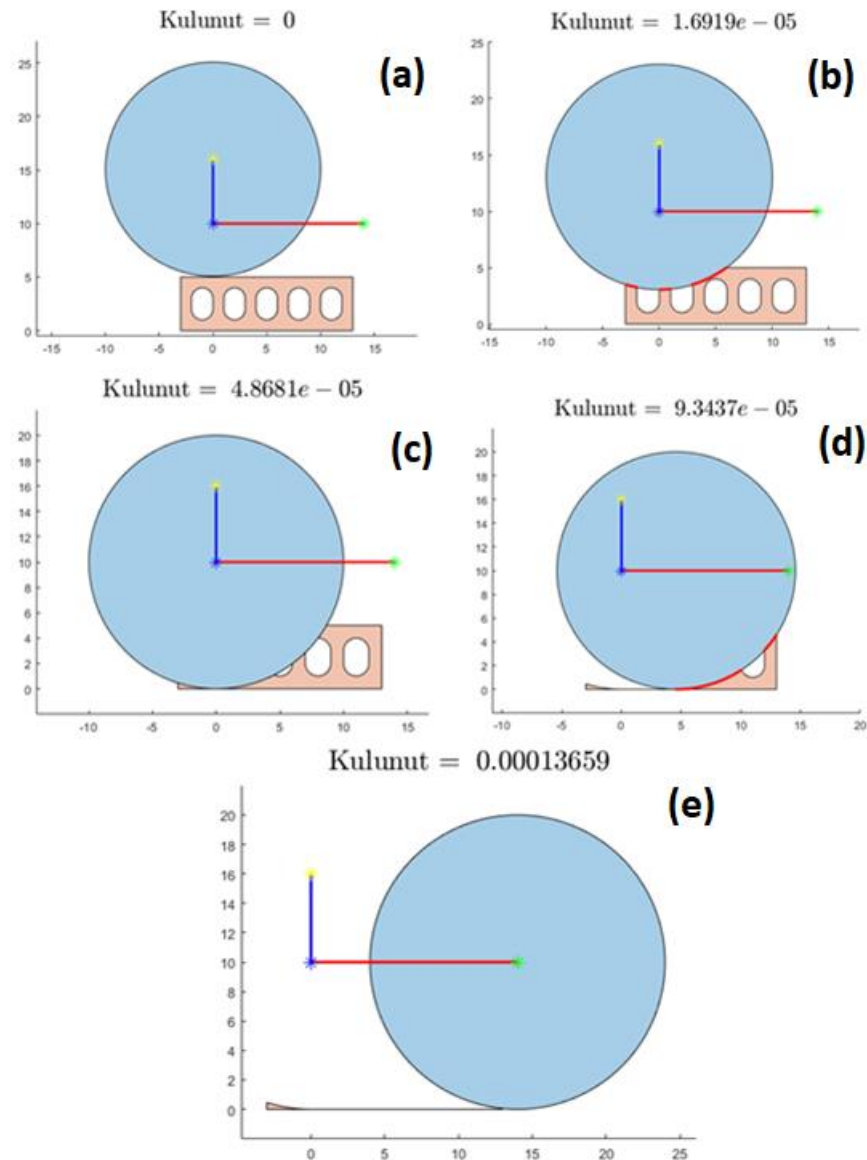
Simuloinnin rata määritetään antamalla jono x- ja y-arvoja, jotka kertovat paljonko liikutaan x- ja y- suunnassa terän alkupaikasta. Työn simulaatiossa terän alkupisteen x-koordinaatti on betonilaatan vasemman laidan puolella ja y-koordinaatti on sen yläpuolella. Tässä esimerkkisimulaatiossa terän keskipiste on 11-yksikköä palkin ylälaidan yläpuolella, eli terän alareuna on 1-yksikön verran palkin ylälaidan yläpuolella, mikä on havainnollistettu kuvassa 27 keltaisena tähtimerkinä. Laatan leikkausohjelmassa terä liikkuu ylhäältä alas, kunnes terän alalaita osuu betonilaatan alareunaan eli terä liikkuu tässä vaiheessa 6 yksikköä alas. Sininen viiva kuvassa 27 kuvaa terän keskipisteen liikettä. Vaiheen 1 jälkeen terä liikkuu oikealle 14-yksikköä, mikä näkyy punaisena viivana kuvassa.



Kuva 27 Havainnekuva simulaation vaiheista.

Kuvassa 28 esitetään yhden laatan leikkaamisen simulaatio kokonaisuudessaan, sekä laskettu kokonaiskuluminen joka vaiheessa. Simulaatiossa esitetään vasemmalla yläreunassa (a) tilanne juuri ennen terän osumista laattaan: Kokonaiskuluminen on 0, koska yhtään laattaa ei ole leikattu. Vaiheessa 1, terä on liikkumassa alaspäin ja on osumassa laattaan. Kuvan oikeassa yläreunassa (b) terä on laskenut hetken matkaa alaspäin ja leikannut laattaa sen mukaisesti. Kulumisen määrä on tässä vaiheessa 1.69 ·

10^{-5} . Vaiheessa (c) terän laskeutumisvaihe on ohi ja tämän jälkeen terän liike jatkuu horisontaalisesti. Kulumisen määrä on tässä vaiheessa $4.87 \cdot 10^{-5}$. Vaiheessa (d) terä on puolessa välissä sivuttaisleikkuuta. Tässä vaiheessa kulumisen määrä on $9.34 \cdot 10^{-5}$. Betonilaatta on leikattu loppuun vaiheessa (e). Lopullisen kulumisen määrä on $13.7 \cdot 10^{-5}$.



Kuva 28 Kokonainen simulaatio esitettyinä eri vaiheissa.

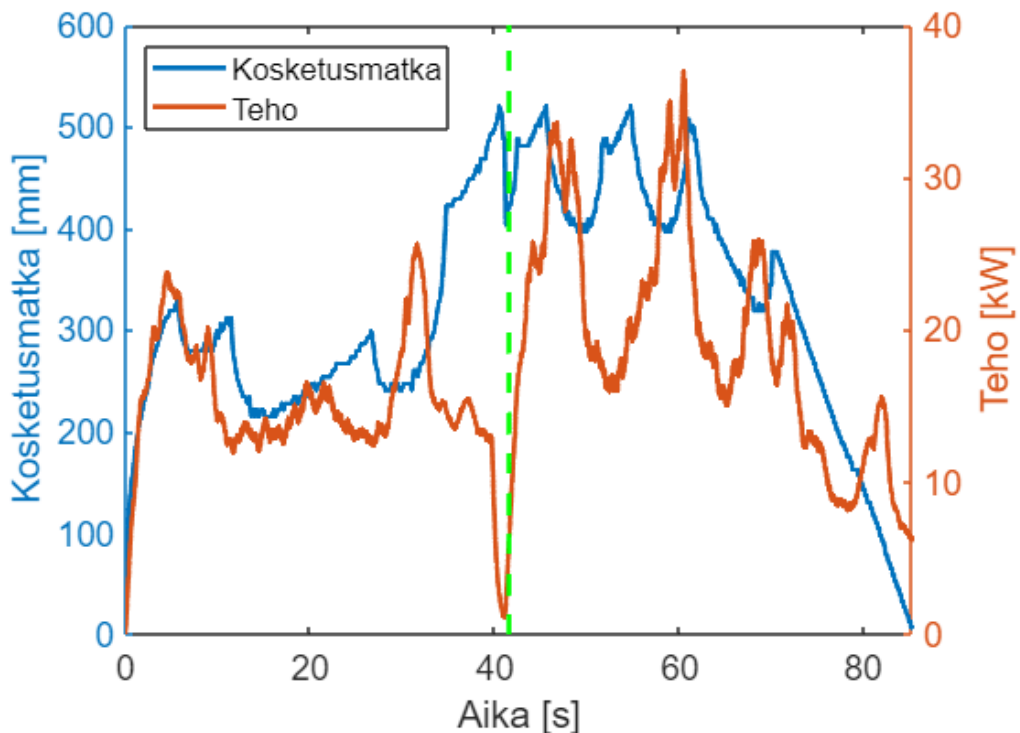
Tämä oli esimerkksimulaatio kokonaisuudessaan. Oikeissa simulaatioissa oheisia havaintokuvia ei tietenkään ole, vaan on vain kiinnostuttu kulumisen määrästä. Tämän mallin toiminta kuitenkin avaa mahdollisuuden käyttää tarkempia menetelmiä tulevaisuudessa, koska malli ei ole pelkästään rajoitettu Archardin käyttöön, vaan

muitakin differentiaaliyhtälömenetelmiä voidaan implementoida jokaisella aika-askeleella.

5.3 Simulointitulokset

Simulaatiomallia käytetään ensimmäiseksi k -arvon määrittämiseksi. Mitatulla 3.32 mm kulumisella ja kuvan 16 mukaisilla leikkausmäärillä saatiin simulaation avulla sovitettua kulumistilannetta kuvaava k -arvo. Simulaatiomalli hyödyntää laskennassa kuvan 29 kaltaisia laattakohtaisia teholumkia ja simulaatiomallin laskemaa kosketusmatkaa.

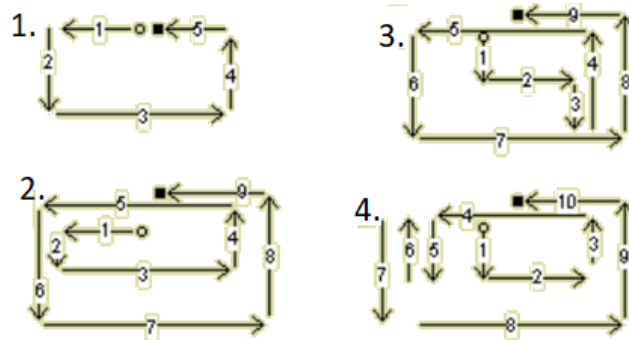
k -arvoksi saatiin $6,7 \cdot 10^{-6}$, mikä osuisi nykyisen tiedon valossa realistiselle vaihteluvälille [50]. Vaihteluvälin ollessa $10^{-8} - 10^{-2}$, tarkoittaisi tämä, että timanttisahan kulumisen olisi lähempänä vähäisen kulumisen aluetta kuin vakavan kulumisen aluetta. k -arvon osumisesta vaihteluvälille voidaan päätellä, että simulaatiomallilla on potentiaalia, mutta malliin kerättävän datan tulisi olla parempaa, että sillä tosiasiallisesti voitaisiin kuvata oikeaa tuotantoa.



Kuva 29 Ontelolaatta 370 kosketusmatkat ja tehot sovitettuna. Z- ja Y-liike erotettu vihreällä katkoviivalla

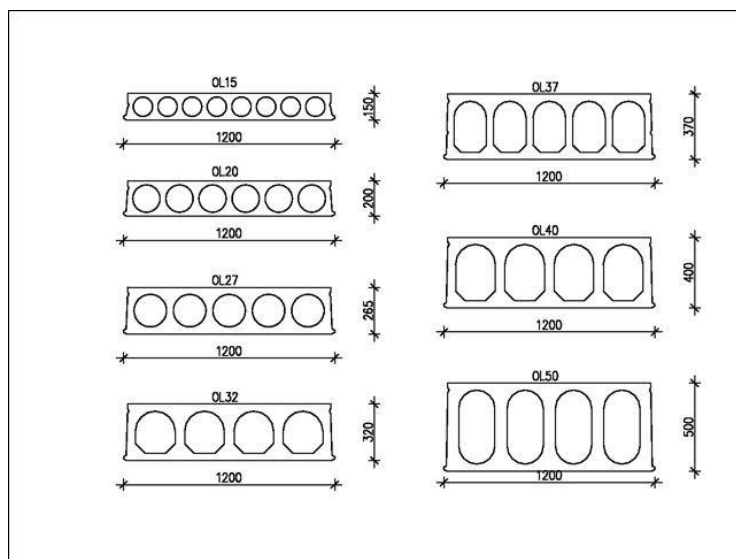
5.4 Toimet datan parantamiseksi

Tutkimusta tehdessä tuli ilmi, että umpilaatoille ei koneessa ole omia laattakohtaisia sahausohjelmia, joten ne tallentuvat leikkauslokiin sahaajan valitseman ohjelman mukaan jonakin ontelolaattana. Sahaajat käyttivät ainakin 370 ontelolaatan kohdalla 400 ontelolaatan sahausohjelmaa, mikä vähentää datan käytettävyyttä. Leikkausmäärä tallennin ei ota huomioon laattojen vaijerien määriä. Saman laattatyypin sisällä vaijerimäärät voivat vaihdella huomattavasti, riippuen mihin kohteeseen laattaa valmistetaan. Leikkausloki ei myöskään tallenna sitä, millä leikkausliikeradoilla (kuva 30) laatta on leikattu. Mittauksia tehdessä ainoa käytetty ohjelma oli P1. Leikkausohjelmaa vaihdellaan laatan koon, sahaajan tahdon ja vaijereiden määrän mukaan, mutta tietoja ei dokumentoida tällä tasolla.

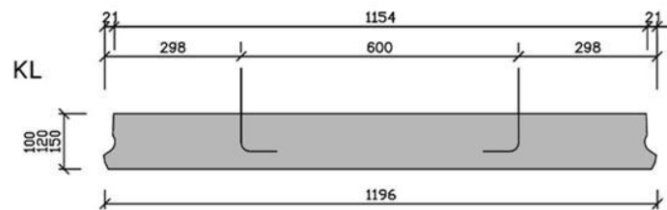


Kuva 30 Sahausohjelmien P1-4 liikeradat

Leikattavia laattatyyppejä voi olla koon mukaan jaoteltuna 10 (kuvat 31 ja 32), mutta huomattavasti enemmän, mikäli otetaan huomioon eri vaijerimäärät. Yhtä laattatyyppiä mittaamalla ei kyetty arvioimaan muiden laattojen tehokäyriä, joten ratkaisu olisi mitata jokainen laattatyyppi erikseen.

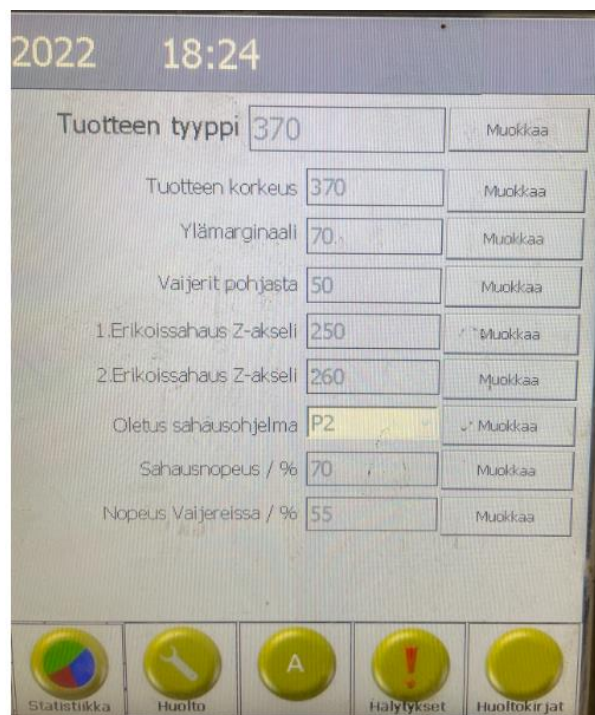


Kuva 31 Ontelolaattatyyppejä [35]



Kuva 32 Kuorilaattatyypit [34]

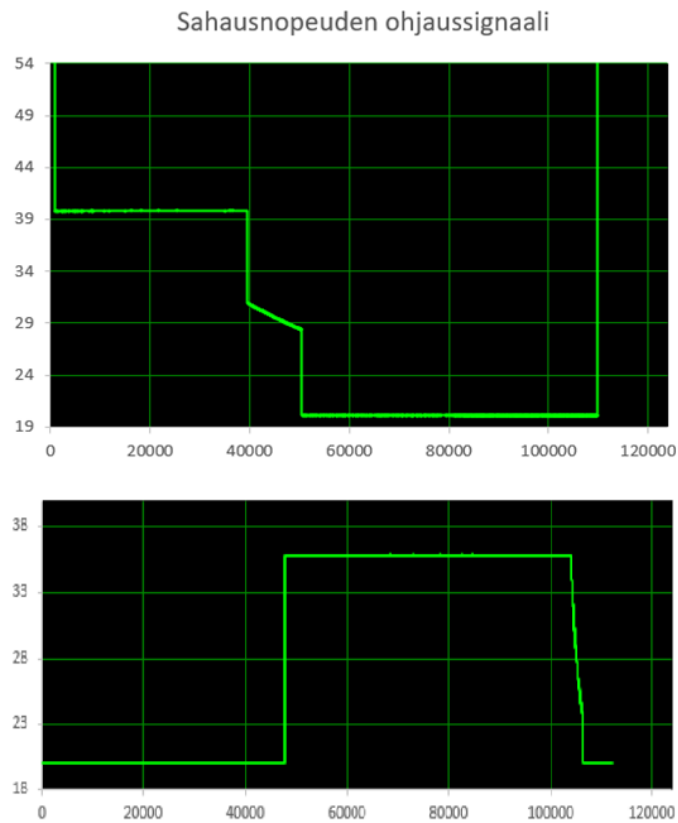
Sahaohjelmien kaikkiin parametreihin ei ollut tarjolla numeerisia arvoja ilman merkittävää työpanosta niiden selvittämiseksi. Liikeratojen koordinaatteja ei automaattisahalta selvinnyt, joten turvauduttiin näköhavaintojen varaiseen liikeradan mallintamiseen. Sahausnopeus tarkoittaa tässä yhteydessä syöttönopeutta, ja siihen ei ollut tarjolla numeerisia arvoja, vaan ne oli ilmoitettu prosenttiarvona asetetusta tuntemattomasta perusarvosta (kuva 33).



Kuva 33 Ontelolaatta 370 sahausparametrit

Simulaatiomalliin tarvittavan syöttönopeuden pystyi laskemaan tasaisena nopeutena 370 ontelolaatan terämoottorin tehokäyrästä (kuva 21), jossa oli erotettavissa ja laskettavissa terän työtä tekemä aika. Leikkausajan ja leikkausmatkan tietämällä oli laskettavissa tasaisen syöttönopeus. Ylhäältä alaspäin sahatessa (Z-liike) saha tekee

rajun ohjelmallisen hidastuksen (kuva 34) ennen vajereihin osumista, joten tässä syöttönopeus ei ole oikeasti tasainen. Samaa ilmiötä ei ollut sivulle päin sahatessa (Y-liike), vaikka terä osuu vajereihin myös sivuttaisliikkeessä. Syöttönopeuden laskeminen tehokäyristä ei ole optimaalinen tapa. Automaattisahan syöttönopeutta säätelee kuvan 34 mukaiset syöttönopeussignaalit. Mikäli tiedettäisiin, mitä nopeutta mikäkin signaaliviesti vastaa milläkin ajanhetkellä, ei tarvitsisi olettaa syöttönopeutta tasaiseksi.



Kuva 34 Ylemmässä kuvassa Z-liikkeen nopeuden ohjaussignaali ja alemmassa Y-liikkeen

6. SIMULOINTIMALLIN HYÖDYNTÄMINEN LAATTATEHTAILLA

Kulumisen simuloinnilla on teollisuudessa paljon taloudellisia mahdollisuuksia. Yhdistettynä tuotantolaitosten tuotannonohjausjärjestelmiin voidaan tarvittavat huollot ja tuotanto aikatauluttaa keskenään tuotantohäiriöiden minimoimiseksi. Timanttisahauksessa sillä ei yksinään välttämättä saavuteta parhaita tuloksia, koska laattatehtailta normaalitilanteessa laattojen valut suoritetaan päivävuorossa ja sahataan yövuorossa. Ei ole todennäköinen tilanne, että terän loppuun kulumisen pysäyttää tuotannon, koska päivävuorossa on aikaa tarkastaa ja vaihtaa terä tarvittaessa. Pelkällä kulumismallilla voidaan optimoida uusien terien toimituksia simuloimalla tulevaa tuotantoa etukäteen. Tällä hetkellä terä kestää 1–2 kuukautta, joten yksittäisen tehtaan tasolla ei puhuta isosta taloudellisesta intressistä 1300 mm terän maksaessa 1500–2000 €. Kulumismallin tärkeys määrittyy käytettävän terän kulumisnopeuden mukaan, mutta näissä olosuhteissa kulumisen on hidasta. Olosuhteissa, joissa terä kuluu nopeammin, kulumismallinkin hyödyntämisen tärkeys korostuu.

Taloudellisten hyötyjen saavuttamiseksi ja PPX-toimintamallin kannalta on simulaatiomallista tehtävä kokonaisvaltaisempi. Simulaatiomallin hyödyllisyyttä voisi parantaa lisäämällä siihen lastugeometrian laskemisen ja riittävällä datalla voitaisiin hyödyntää koneoppimista, jolloin tuotantoprosessi voidaan optimoida käytössä olevan online-datan avulla. Ontelolaattaa leikatessa profiili, johon terä osuu, muuttuu koko ajan ja samalla muuttuu optimi syöttönopeus oikean paksuisen lastun muodostamiseksi. Optimoidulla lastunkoolla voidaan vähentää kulumista leikattua neliötä kohden sekä terämootorin virrankulutusta. Kulumisen simulointikin olisi tällöin yksinkertaisempaa, kun voidaan laskemalla määritellä syöttönopeudet simulaatioon, mikä vähentää prosessin vaihtelua verrattuna siihen, että yksittäiset sahankäyttäjät tekevät sahausohjelmia.

Yksittäisellä laattavalmistajalla ei välttämättä ole taloudellisia intressejä lähteä kehittämään näin raskasta mallia, mutta sahalaitteiston toimittajan kohdalla asia voi olla eri, koska mallin luomiseen tarvittavaa dataa saataisiin useammalta sahalta ja mahdolliselta tuotekehityssahalta. Taloudelliset edut tietenkin skaalautuvat sitä isommiksi, mitä useampaa sahaa toimittaja operoi palvelumallilla. Tämä tosin edellyttää yhteistyötä asiakasyrityksien kanssa ja ennen kaikkea toimivaa tietojen vaihtoa, koska kulumismallin osalta on tarkkaan tiedettävä missä olosuhteissa terää käytetään ja minkä tyyppistä betonia leikataan.

7. TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tuloksena muodostettiin nykyisiin kulumisteorioihin perustuva malli, jolla voidaan simuloida sahasta saatavilla parametreillä timanttisahan kulumista. Matemaattisella mallilla ja MATLAB-koodilla voidaan simuloida betonilaatan sahausta käyttämällä MATLAB:in monikulmio-olioita. Olioille on määritetty komennot, joilla pystytään määrittämään jokaisella hetkellä terän kosketusmatka monimutkaisemmankin betonilaatan kanssa. Kulumisen mallintamiseen käytettiin sovellettua Archardin yhtälöä, joka on yleisesti käytetty monessa eri kulumisen mallintamissovelluksessa. Tehtyä mallia ei tarvitse rajoittaa Archardiin, vaan voidaan soveltaa mitä tahansa differentiaaliyhtälöä, joka mallintaisi kulumista terän ja laatan kontaktimatkan perusteella. Mallin vahvuus on sen yksinkertaisuus, monipuolisuus ja muokattavuus. Tätä mallia pystytään soveltamaan monenlaisille betonilaatoille, jos ne on määritetty MATLABissa *polyshape*-olioina. Mallissa voi käyttää erilaisia materiaaleja ja olosuhteita, kunhan ensin määrittää tilanteille sopivat k -arvot, pintapaineet ja terän pyörimisnopeudet. Tämä malli antaa pohjan kulumisen mallinnukseen, kunhan testeillä ensin määritetään sopivat parametrit, joita käytetään Archardin yhtälössä. Mallin yksinkertaisuus on kuitenkin myös sen heikkous. Tällä mallilla tulokset voivat olla vaihtelevia, jos leikkausprosessi ei pysy samanlaisena kuin k -arvoa määrittäessä. Malli ei pysty ottamaan huomioon kaikkia asioita, joita leikatessa voi syntyä. Malli olettaa todella homogeenisen tilanteen betonilaatan ja terän välillä, mikä ei kuvaa täysin tosielämää, sillä terä voi kulua epätasaisesti tai voi tapahtua muita häiriötilanteita. Mikäli epähomogeenisuudet kuitenkin jakautuvat tasaisesti, pystyy k -arvo ottamaan ne huomioon, mikä on tärkeää Archardin yhtälön toiminnan kannalta. Parametrit voi myös olla vaivalloisia määrittää, jos ei ole välineitä määrittää niitä. k -arvo olisi hyvä määrittää jokaiselle laattatyypille ja olosuhteelle erikseen, koska ainakin ontelolaatan ja umpilaatan leikkauksissa on selviä eroja niin onteloiden määrässä ja betonin lujuudessa.

Mallia ei tämän työn aikaikkunassa päästy validoimaan, koska arvioitiin malliin syötettävän datan olevan nykyisillä tiedonkeruumenetelmillä laadutonta. Kulumista tapahtumaa kuvaava k -arvo tulisi saada mahdollisimman tarkaksi. Työssä kerätyllä datalla muodostettu k -arvo oli kirjallisuuden mukaan realistinen, riippumatta datankeruun haasteista. Automaattisaha tietää sijaintinsa ja kuluttamansa tehon, joten mallin käyttö reaaliajassa ei olisi epärealistinen ajatus, mutta tämä vaatisi sahavalmistajalta toimia tämän mahdollistamiseksi. Tutkimuksen [18] kaltaisen laser-

mittausjärjestelmä sahatta mahdollistaisi hyvinkin tarkat k -arvon määritykset laattakohtaisesti.

Palveluliiketoiminnan näkökulmasta on nähtävissä haasteita mallin käytössä. Vaikka laatat ovat standardisoituja, on betonireseptit yrityssalaisuuksia, joilla betonialan yritykset hakevat kilpailuetua toisiinsa nähden. Jos yritysten betonit eroavat paljonkin varsinkin kiviaineksen osalta, olisi jokaiselle tehtaalla tehtävä omat mittaukset k -arvon määrittämiseksi. Betonireseptejä kehitetään koko ajan hiilivapaampaan suuntaan, joten on hyvinkin mahdollista, että leikkaustapahtuman kuluttavuus muuttuu niin paljon, että k -arvoa jouduttaisiin päivittämään betonireseptien mukana.

LÄHTEET

- [1] Seppo. Kivioja, Seppo. Kivivuori, ja Pekka. Salonen, *Tribologia - kitka, kuluminen ja voitelu*, 5. korj. p. Helsinki: Otatieto, 2007.
- [2] C. Zhang *ym.*, "Effect of Tempering Temperature on Impact Wear Behavior of 30Cr3Mo2WNi Hot-Working Die Steel", *Frontiers in materials*, vsk. 6, 2019, doi: 10.3389/fmats.2019.00149.
- [3] M. Salot, *STUDY ON WEAR RESISTANCE OF Al-Si ALLOY USING A 3- BODY DRY ABRASIVE WEAR TESTING MACHINE*. 2016.
- [4] M. Jenkins, Mike. Jenkins, ja Artemis. Stamboulis, *Durability and reliability of medical polymers*, 1st edition. Cambridge, U.K. ; Woodhead Pub., 2012.
- [5] Shibe ja V. Chawla, "Enhancement in wear resistance by hardfacing: a review", *Mechanica Confab*, vsk. 3, tammi 2013.
- [6] X. Xu, "Study on the thermal wear of diamond segmented tools in circular sawing of granites", *TRIBOLOGY LETTERS*, vsk. 10, nro 4, ss. 245–250, touko 2001, doi: 10.1023/A:1016614231427.
- [7] W. B. (William B. Rowe, *Principles of modern grinding technology*. Oxford: William Andrew, 2009.
- [8] H. C. Meng ja K. C. Ludema, "Wear models and predictive equations: their form and content", *Wear*, vsk. 181, ss. 443–457, 1995, doi: 10.1016/0043-1648(95)90158-2.
- [9] J. Untinen *ym.*, "Autojen jakopäiden ennenaikainen kuluminen Oulun alueella Keskeisimmät tutkimustulokset ja menetelmät". <https://unioulu.sharepoint.com/sites/Liitetiedostot-Attachments/Shared%20Documents/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2FLiitetiedostot%2DAttachments%2FShared%20Documents%2FProjektit%2FRaportti%5Fotikko%5Ftekstina%2Epdf&parent=%2Fsites%2FLiitetiedostot%2DAttachments%2FShared%20Documents%2FProjektit&p=true&ga=1> (viitattu 17. joulukuuta 2022).
- [10] M. S. Hasan, A. Kordijazi, P. K. Rohatgi, ja M. Nosonovsky, "Triboinformatics Approach for Friction and Wear Prediction of Al-Graphite Composites Using Machine Learning Methods", *J. Tribol*, vsk. 144, nro 1, 2022, doi: 10.1115/1.4050525.
- [11] W. G. SAWYER, "Wear predictions for a simple-cam including the coupled evolution of wear and load", *Lubrication engineering*, vsk. 57, nro 9, ss. 31–36, 2001.
- [12] A. Flodin ja S. Andersson, "A simplified model for wear prediction in helical gears", *Wear*, vsk. 249, nro 3, ss. 285–292, 2001, doi: 10.1016/S0043-1648(01)00556-7.
- [13] J. Andersson, A. Almqvist, ja R. Larsson, "Numerical simulation of a wear experiment", *Wear*, vsk. 271, nro 11, ss. 2947–2952, syys 2011, doi: 10.1016/j.wear.2011.06.018.
- [14] G. K. Sfantos ja M. H. Aliabadi, "Application of BEM and optimization technique to wear problems", *International journal of solids and structures*, vsk. 43, nro 11, ss. 3626–3642, 2006, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.09.004.
- [15] L. Rodríguez-Tembleque, R. Abascal, ja M. H. Aliabadi, "A boundary element formulation for wear modeling on 3D contact and rolling-contact problems", *International Journal of Solids and Structures*, vsk. 47, nro 18, ss. 2600–2612, syys 2010, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2010.05.021.
- [16] J. F. Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", *Journal of applied physics*, vsk. 24, nro 8, ss. 981–988, 1953, doi: 10.1063/1.1721448.
- [17] R. M. Goktan ja N. Gunes Yılmaz, "Diamond Tool Specific Wear Rate Assessment in Granite Machining by Means of Knoop Micro-Hardness and Process Parameters", *Rock Mech Rock Eng*, vsk. 50, nro 9, ss. 2327–2343, 2017, doi: 10.1007/s00603-017-1240-0.

- [18] G. Aydin, I. Karakurt, ja K. Aydiner, "Wear Performance of Saw Blades in Processing of Granitic Rocks and Development of Models for Wear Estimation", *Rock Mech Rock Eng*, vsk. 46, nro 6, ss. 1559–1575, 2013, doi: 10.1007/s00603-013-0382-y.
- [19] A. Ersoy, S. Buyuksagic, ja U. Atici, "Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks", *Wear*, vsk. 258, nro 9, ss. 1422–1436, 2005, doi: 10.1016/j.wear.2004.09.060.
- [20] I. S. Buyuksagis, "Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade", *Journal of materials processing technology*, vsk. 183, nro 2, ss. 399–406, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.034.
- [21] A. Di Ilio ja A. Togna, "A theoretical wear model for diamond tools in stone cutting", *International journal of machine tools & manufacture*, vsk. 43, nro 11, ss. 1171–1177, 2003, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00101-9.
- [22] Z. Wang, Q. Zeng, Z. Lu, L. Wan, X. Zhang, ja Z. Liu, "Investigation of Cutting Performance of a Circular Saw Blade Based on ANSYS/LS-DYNA", *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, vsk. 67, nro 12, ss. 649–665, 2021, doi: 10.5545/sv-jme.2021.7322.
- [23] J. Fernandes, S. Pinto, P. Amaral, ja L. Rosa, "Development of a New Testing Method for Assessing the Wear Behaviour of Circular Cutting Discs", *Materials Science Forum - MATER SCI FORUM*, vsk. 587–588, ss. 966–970, kesä 2008, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.587-588.966.
- [24] "Saw E9", *Elematic precast technology*. <https://www.elematic.com/product/saw-e9/> (viitattu 16. maaliskuuta 2022).
- [25] "THK-SAW". <http://www.drivetec.fi/tuotteet/saw/sawENG.html> (viitattu 4. kesäkuuta 2022).
- [26] "Concrete Sawing Machine", *Echo Precast*. <https://www.echoprecast.com/en/products/sawing-machine> (viitattu 4. kesäkuuta 2022).
- [27] "Myötäjärsintä vs. vastajärsintä", *Sandvik Coromant*. <https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx> (viitattu 13. syyskuuta 2022).
- [28] J. Konstanty, "Theoretical analysis of stone sawing with diamonds", *Journal of materials processing technology*, vsk. 123, nro 1, ss. 146–154, 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00071-7.
- [29] "The difference between sandwich segment and grove segment-LINXING diamond tools". <https://www.linxingstone.com/industry-news/The-difference-between-sandwich-segment-and-grove-segment.html> (viitattu 2. heinäkuuta 2022).
- [30] "What is sandwich diamond segments? why do we use sandwich segments?" <http://www.diamond-blade.org/m/view.php?aid=233> (viitattu 2. heinäkuuta 2022).
- [31] "Diamond Blade Guide, Understand Diamond Blades - SMART CUT". https://www.ukam.com/diamond_blade_guide.htm (viitattu 18. maaliskuuta 2022).
- [32] S. Y. Luo, "Characteristics of diamond sawblade wear in sawing", *International journal of machine tools & manufacture*, vsk. 36, nro 6, ss. 661–672, 1996, doi: 10.1016/0890-6955(95)00071-2.
- [33] "Betoniin lujuus | Betoni". <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-lujuus/> (viitattu 17. maaliskuuta 2022).
- [34] "Kuurilaatat | Laatat | Runkorakenteet | Elementtisuunnittelu", *fi*. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/laatat/kuorilaatat> (viitattu 17. maaliskuuta 2022).
- [35] "Ontelolaatat | Laatat | Runkorakenteet | Elementtisuunnittelu", *fi*. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/laatat/ontelolaatat> (viitattu 14. maaliskuuta 2022).
- [36] "Hyyho_ville.pdf". Viitattu: 11. helmikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/262744/Hyyho_ville.pdf?sequence=2&isAllowed=y

- [37] "Betonilujuudet | Runkorakenteet | Elementtisuunnittelu", *fi*. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/betonilujuudet> (viitattu 17. maaliskuuta 2022).
- [38] "Betonin lujuus", *Finnsementti*. <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/betonin-lujuus/> (viitattu 17. maaliskuuta 2022).
- [39] "How to save cement in hollow-core slab production?", *Elematic precast technology*. <https://www.elematic.com/blogs/how-to-save-cement-in-hollow-core-slab-production/> (viitattu 27. syyskuuta 2022).
- [40] "Kalliomurskeen rooli betoninvalmistuksessa on kasvamassa!", *Lujabetoni*, 27. tammikuuta 2020. <https://lujabetoni.fi/2020/01/27/kalliomurskeen-rooli-betoninvalmistuksessa-on-kasvamassa/> (viitattu 29. toukokuuta 2022).
- [41] "Cutting Concrete - How to Cut Concrete With Diamond Saw Blades - Concrete Network", *ConcreteNetwork.com*. <https://www.concretenetwork.com/products-saw-blade/buyers-guide.html> (viitattu 29. toukokuuta 2022).
- [42] T. Haara, "Kalliokiviaineksen käyttö betonissa", s. 18, loka 2015.
- [43] H. M. Soltani ja M. Tayebi, "Determination of wear parameters and mechanisms of diamond/copper tools in marble stones cutting", *INT J REFRACT MET H*, vsk. 87, s. 105172, 2020, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105172.
- [44] X. P. Xu, Y. Li, W. Y. Zeng, ja L. B. Li, "Quantitative analysis of the loads acting on the abrasive grits in the diamond sawing of granites", *Journal of materials processing technology*, vsk. 129, nro 1, ss. 50–55, 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00574-5.
- [45] X. Xu, "Study on the thermal wear of diamond segmented tools in circular sawing of granites", *Tribology Letters*, vsk. 10, nro 4, ss. 245–250, 2001, doi: 10.1023/A:1016614231427.
- [46] H. K. Tönshoff ja H. Hillmann-Apmann, "Diamond tools for wire sawing metal components", *Diamond and related materials*, vsk. 11, nro 3–6, ss. 742–748, 2002, doi: 10.1016/S0925-9635(01)00727-0.
- [47] X. P. Xu ja Y. Li, "The Effects of Swarf in the Diamond Sawing of Granite", *Key engineering materials*, vsk. 250, ss. 187–193, 2003, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.250.187.
- [48] "Friction and wear of materials: E. Rabinowicz, Wiley, London, 1965; 244 pp.; price: £ 4/10/0", *Wear*, vsk. 8, nro 6, ss. 491–491, 1965, doi: 10.1016/0043-1648(65)90145-6.
- [49] A. Ghanbarzadeh *ym.*, "A Semi-deterministic Wear Model Considering the Effect of Zinc Dialkyl Dithiophosphate Tribofilm", *Tribol Lett*, vsk. 61, nro 1, ss. 1–15, 2015, doi: 10.1007/s11249-015-0629-8.
- [50] I. Hutchings ja P. Shipway, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Oxford: Elsevier Science & Technology, 2017.

LIITTEET