EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Märt Nõmme

KEERMETE FREESIMINE

THREAD MILLING

Magistritöö
Tootmistehnika õppekava

Juhendaja: Tõnu Leemet, PhD
Kaasjuhendaja: Marten Madissoo, PhD

Tartu 2025

SISUKORD

SISSEJUHATUS 5
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE 6
1.1. Keermestus tehnoloogiad 6
1.2. Keermefreesimise tehnoloogia 7
2. ISO KEERE JA STANDARDID 9
2.1. ISO keerme standardid 9
2.2. ISO keerme profiil 10
3. KEERMEFREESID 12
3.1. Ühepunktiline keermefrees 12
3.2. Mitmehambalised keermefreesid 13
3.3. Vahetatava lõikeplaadiga keermefreesid 14
3.4. Lühikese lõikeosaga keermefreesid 14
3.5. Mitmerealine keermefrees 16
3.6. Kombineeritud keermefrees 16
3.7. Kombineeritud puur- ja keermefrees 17
4. KEERMEFREESIMISE NC-KOOD 19
4.1. NC-kood 19
4.2. Keermefreesimise NC-koodi kirjutamine 20
4.3. Keermefreesimise makro 20
4.4. NC-koodi generaatorid. 23
4.5. NC-koodi loomine CAM tarkvaraga 27
5. KEERME KVALITEET 38
6. KATSED 40
6.1. Keermestamine keermepuuriga 40
6.2. Keermestamine keermefreesiga 43
7. ÕPPEMATERJALI LOOMINE 47
7.1. Õppematerjal 47
7.2. NC-koodi generaatori õppematerjal 48
7.3. CAM õppematerjal 48
KOKKUVÕTE 50
ALLIKALOEND 51
LISAD 53
Lisa 1. Genereeritud NC-kood 54
Lisa 2. Tehniline joonis 56
Lisa 3. Õppematerjalid 57

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Märt Nõmme		Õppekava: Tootmistehnika	
Pealkiri: Keermete freesimine			
Lehekülgi: 67	Jooniseid: 38	Tabeleid: 2	Lisasid: 3
ETIS-e valdkond ja CERCS-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika, T130 Juhendaja(d): Tõnu Leemet, Marten Madissoo Osakond või õppetool: Biomajandustehnoloogiate õppetool Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2025			
Keermete freesimine on tootmis tehnoloogia, kus tehnoloogia valik sõltub materjalist, keerme omadustest ja tootmisnõuetest. Käesolev töö keskendub keermefreesimise tehnoloogiale, mis sobib erinevate keermegeomeetriate loomiseks, pakkudes eeliseid võrreldes traditsiooniliste keermestusmeetoditega, eriti väiksema lõikejõu ja tööriistade universaalsuse osas. Töö eesmärk on uurimustöö põhjal luua õppematerjal, mis toetab keermefreesimise tehnoloogia õpetamist Eesti Maaülikooli lõiketöötlemisega seotud õppeainetes. Töös kasutatakse tehnilist kirjandust, CNC-töötlemise juhendeid ja praktilisi katseid, sealhulgas keermefreesimise katseid erinevate lõikeparameetritega ning NC-koodi loomist nii generaatorite kui CAM-tarkvara abil. Tulemused näitavad, et keermefreesimine võimaldab toota keermed ka piiratud spindlivõimsusega seadmetel, kui kasutada sobivaid lõikeriistu ja lõikeparameetreid. Katsete käigus võrreldi erinevaid tööparameetreid ja nende mõju keermete kvaliteedile. Töös loodud õppematerjal sisaldab teoreetilist osa, praktilisi juhendeid, visuaalseid skeeme ja näidisülesandeid, mis toetavad õppijate arusaamist ja oskuste kujunemist. Materjal on rakendatav nii kutseõppes kui ka tööstuspraktikas ning pakub tuge NC-koodi ja CAM-süsteemide kasutamisel keermefreesimise protsessis.			
Võtmesõnad: Keermefreesiminie, õppematerjal, NC-kood,			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master's Thesis	
Author: Märt Nõmme		Curriculum: Production engineering	
Title: Thread milling			
Pages: 67	Figures: 38	Tables: 2	Appendices: 3
ETIS research field and (CERCS) code: 4. Natural Sciences and Engineering, T130 Supervisor(s): Tõnu Leemet, Marten Madissoo Department / Chair: Chair of Biosystems Engineering Place and year of defence: Tartu, 2025			

Thread production is a machining process, where the choice of technology depends on the material, thread characteristics, and production requirements. This thesis focuses on thread milling technology, which is suitable for creating various thread geometries. Compared to traditional threading methods, thread milling provides advantages such as lower cutting forces and the ability to use a single tool for multiple thread sizes.

The aim of this thesis is to develop educational material to support the teaching of thread milling in machining-related courses at the Estonian University of Life Sciences.

The study utilizes technical literature, CNC machining manuals, and practical experiments, including thread milling tests with different cutting parameters and the generation of NC-code using both code generators and CAM software.

The results demonstrate that thread milling enables the production of threads even with limited spindle power, provided that appropriate tools and cutting parameters are used. The experiments compared different machining parameters and their effects on thread quality. The developed educational material includes theoretical content, practical guides, visual diagrams, sample tasks, and CNC programming examples to support learners' understanding and skill development. The material is applicable in both vocational education and industrial practice and emphasizes the use of NC code generators and CAM systems to automate the thread milling process.

Keywords: Thread milling, educational material, NC-code

SISSEJUHATUS

Keermefreesimine on tehnoloogiline freesimis protsess, kus pöörlev keermefrees freesib keeret kasutades spiraalset töörada, et luua keere. Keermefreesiga on võimalik toota parem- ja vasak sise- ja väliskeermeid.

Keermefreesimise eeliseks teiste töötlemistehnoloogiate ees on olenemata keerme nimimõõdust on lõikejõud väiksemad, kui keermepuurimisel. Näiteks, EMÜ CNC õppelaboris olemasoleva HAAS Super Mini Mill töötlemiskeskuse spindli nominaalvõimsus võimaldab toota ohutult M12x1,75 keeret konstruktsiooniterasesse. Suuremate sisekeermete tootmiseks on vaja rohkem jõudu, kui spindel võimaldab.

Käesoleva magistritöö eesmärk on luua õppevahend kasutamiseks EMÜ lõiketöötlemisga seotud õppeainetele. Sellisteks õppeaineteks on käesolevalt näiteks TS.0002 APJ, TS.0008 CAM süsteemid I ja täienduskursused. Eesmärgi täitmiseks täidetakse järgmised ülesanded:

- koostada ülevaade keermefreesimise tehnoloogiast
- keermefreesimise tööpõhimõtete mõistmine, ISO-standard keermete parameetrite olulisus selles protsessis
- keermete profiilide parameetrite olulisus selles protsessis
- ISO-standard keermetega.
- keermete tootmise praktilised aspektid freesimise teel.
- Keermefreesimise katsed
- Õppevahendi koostamine

Ülevaate põhjal koostatakse õppematerjal, mida on võimalik kasutada praktilises õppes. Õppematerjali eesmärk on toetada õppeprotsessi, pakkudes kasutajale arusaadavat ja süsteemset ülevaadet erinevatest lõiketöötlustehnoloogiatest. Materjal aitab mõista, millised tehnoloogiad on olemas ning milliseid tooteid või detaile on nende abil võimalik toota.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Keermestus tehnoloogiad

Keermete tootmiseks on olemas erinevaid tehnoloogiaid, valik sõltub mitmest tegurist, sealhulgas materjalist, keerme asukohast ja disainist ning rakenduse vajadustest.

Keermete tootmiseks on olemas erinevaid tehnoloogiaid, valik sõltub mitmest tegurist, sealhulgas materjalist, keerme asukohast, disainist, rakenduse vajadustest, kujust, tootmismahust, nõutavast täpsusest ja tugevusest.

Lõikamise puhul eemaldatakse tooriku pinnalt materjali, et moodustada soovitud keermeprofiil. See meetod võimaldab paindlikkust kuna sobib erinevate keermegeomeetriate loomiseks. Üks lõikemeetodeid on treimine, kus keerme kuju lõigatakse treipingil pöörleva tooriku pinnale. Treimine sobib sise- ja väliskeermete valmistamiseks ning võimaldab kasutada erinevaid tööriistageomeetriaid [1].

Keermefreesimine on keermestus tehnoloogia, kus keerme kuju lõigatakse spiraalse trajektooriga pöörleva lõikeriista abil. Freesimine võimaldab luua nii sise- kui väliskeermed, kasutada ühte lõikeriista erinevate keerme suuruste jaoks[1].

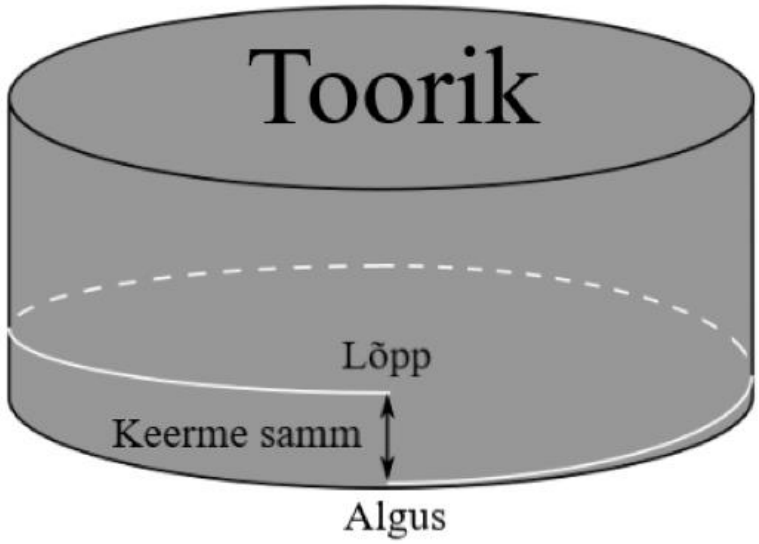
Lihvimisel kasutatakse abrasiivketast, mis järgib soovitud keermeprofiili. Abrasiivketas on võimeline töötlema karastatud või kuumtöödeldud detailide. See sobib näiteks mõõtevahendite ja täppisjuhtkruvide valmistamiseks [2].

Teine keermete valmistamise kategooria on vormimine, kus keerme kuju saavutatakse materjali plastse deformeerimise teel, mitte selle eemaldamisega. Vormimisel pressitakse materjal soovitud kujule, säilitades selle sisemise struktuuri, mis muudab keerme tugevamaks ja vastupidavamaks. Seda protsessi kasutatakse külmvormimise teel [3].

Keermestus tehnoloogia valik sõltub konkreetse rakenduse nõuetest. Iga meetodil on oma eelised ja piirangud, mistõttu tuleb valik teha tehniliste ja majanduslike kaalutluste põhjal.

1.2. Keermefreesimise tehnoloogia

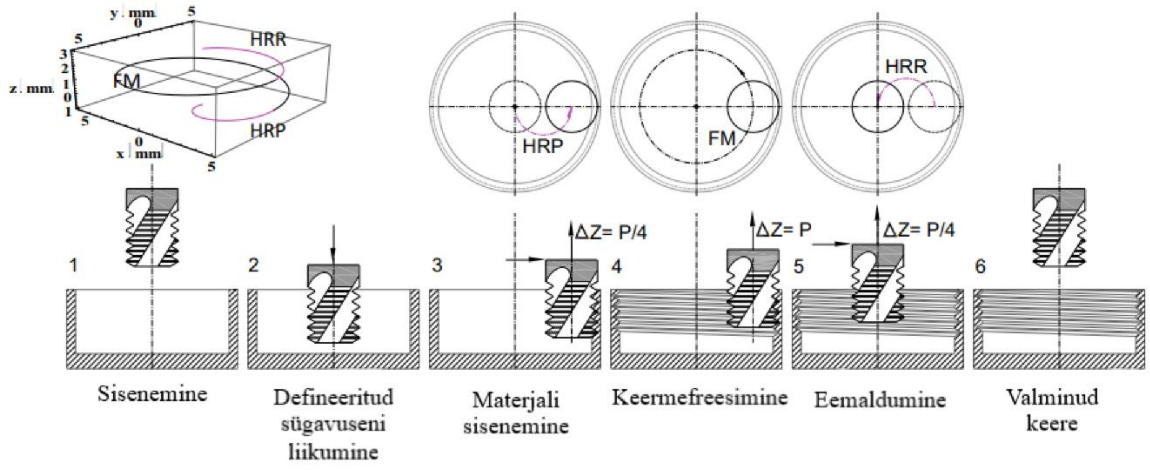
Keermefreesimisel liigub keermefrees spiraalses trajektooris mööda silindrilist või koonilist pinda. Joonisel 1 on kujutatud keermefreesimise spiraalset trajektoori. Keermefreesiga on võimalik toota sise- ja väliskeermete, vasak- ja paremakeermeid. See teeb keermefreesimisest mitmekülgse alternatiivi teistele keermestustehnoloogiatele. Keermefreesimis tehnoloogiaga on võimalik toota keermeid materjalidesse, kuhu teised keermestus tehnoloogiad ei ole võimelised või ei ole kuluefektiivne. Töödeldes erisulameid võivad teistel keermestustehnoloogiate kasutamisel koormused ulatada lõikeriistade jaoks liiga suureks, mis võib vähendada lõikeriista eluiga, seeläbi efektiivsust ja tootlikust. Keermepuuril on lõikes korraga lõik lõikeservad, mille tulemusel tekib voolavlaast ja töötlemisel suurem koormus. Keermefreesimisel on lõikes osa keermefreesist ja tekib murdelaast. Tulemuseks on väiksem koormus töötlemisel ja hallatavam laast [4].



Joonis 1. Spiraalne trajektoor [5].

Keermefreesimise protsess koosneb kuuest etapist. Olenevalt keermefreesi tüübist võib olla vajalik keermefreesimisele eelnevalt luua keermeava, mille mõõdud on saadaval keerme profiili tabelist. Esmalt joondatakse keermefrees keermeava teljega. Seejärel liigub frees

töötlusavasse kuni defineeritud sügavuseni, määrates keerme sügavuse. Kolmandas etapis liigub keermefrees radiaalsuunas tooriku sisse ja hakkab materjali eelmadamine. Neljandas etapis toimub keerme freesimine, mille käigus liigub lõikeriist spiraalses trajektooris, iga täisringiga on liigutud mööda aksiaaltelge keerme sammu võrra edasi. Pärast keermefreesimist eemaldatakse lõikeriist detailist sama liikumisstrateegia abil, mida kasutati sisenemisel. Lõpuks eemaldatakse frees täielikult toorikust. Joonisel 2 on kujutatud keermefreesimis protsesse [6].



Joonis 2. Keermefreesimise protsess [6].

Erinevalt keermepuurimisest, kus iga keerme suuruse ja tüübi jaoks on vaja eraldi lõikeriista, võimaldab keermefreesimine laiemat kasutusala ühe lõikeriistaga. Võimalik on toota erineva suurusega, aga sama keerme sammuga keermeid. Näiteks on 1.5mm sammuga keermefreesiga võimalik toota M10x1.5 ja M16x1.5 keermeid. See vähendab vajadust mitme erineva lõikeriistade varu järele [13].

2. ISO KEERE JA STANDARDID

2.1. ISO keerme standardid

ISO meetrilistel keermetel on sümmeetriline V-kujuline profiil 60° küljenurgaga. Neid tähistatakse tähega 'M', millele järgneb nominaalläbimõõt millimeetrites, näiteks M8 ja valikuliselt samm, näiteks M8x1.25 [7].

Peamised ISO keermestandardid on järgmised:

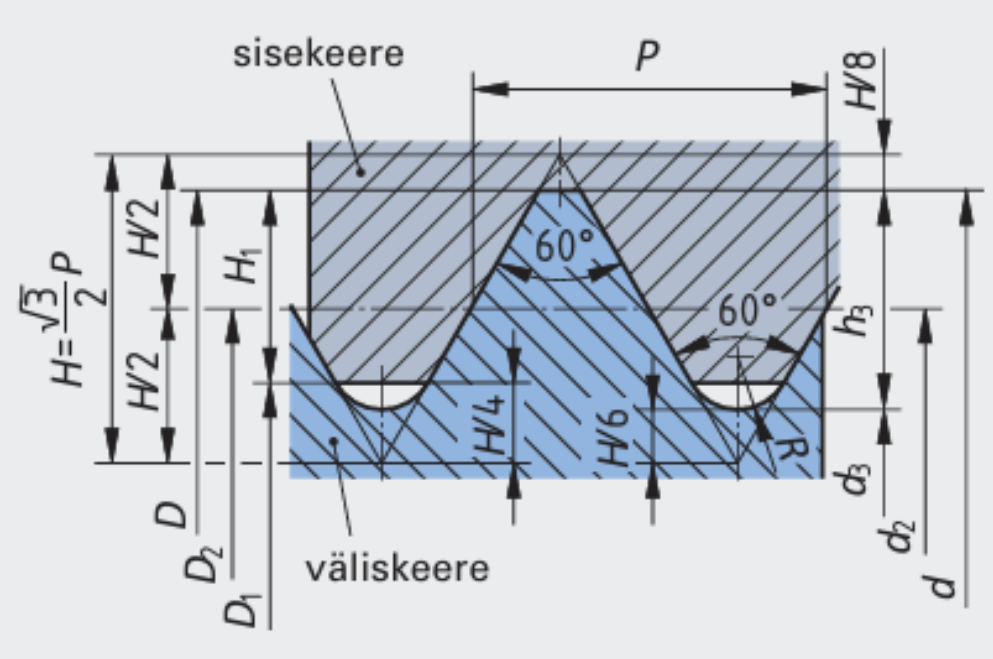
- ISO 68-1, mis määratleb meetriliste kruvikeermete põhiprofiili [8].
- ISO 261, mis täpsustab üldotstarbeliste meetriliste keermete eelistatud läbimõõdu ja sammu kombinatsioone [9].
- ISO 262, mis pakub lühemat loetelu kruvide, poltide ja mutrite valitud suurustest [10].
- ISO 724, mis kirjeldab ISO üldotstarbeliste meetriliste kruvikeermete põhimõõtmeid [11].
- ISO 965-1, mis käsitleb ISO üldotstarbeliste meetriliste kruvikeermete tolerantside põhimõtteid ja põhiandmeid [12].

ISO keermete parameetrite hulka kuuluvad:

- Nominaalläbimõõt: 'M' järel olev number näitab keerme välisläbimõõtu millimeetrites.
- Samm: Kaugus kahe kõrvuti asuva keerme vahel, mõõdetuna millimeetrites.
- Standardne samm on jäme, peensammut kasutatakse spetsiifilistes rakendustes.
- Keerme nurk: 60 kraadi ISO meetriliste keermete puhul.
- Välisläbimõõt: Keerme suurim läbimõõt.
- Siseläbimõõt: Keerme vähim läbimõõt.
- Sammu läbimõõt: Teoreetiline läbimõõt välis- ja sisekeerme vahel, mis on oluline keerme õigeks haardumiseks [7].

2.2. ISO keerme profiil

Standartidest tulenevalt on võimalik defineerida ISO keermed süstemaatiliselt ja üheselt mõistetavalt. Joonisel 3 on kujutatud ISO meeterkeerme profiil. Joonisel on 4 tähised ja seletused joonis 3 kohta.



Joonis 3. ISO keerme profiil [7].

Keerme nimiläbimõõt	$d = D$
Keerme samm	P
Väliskeerme sügavus	$h_3 = 0.6134 \cdot P$
Sisekeerme sügavus	$H_1 = 0.5413 \cdot P$
Põhja raadius	$R = 0.1443 \cdot P$
Keskläbimõõt	$d_2 = D_2 = d - 0.6495 \cdot P$
Väliskeerme vähim läbimõõt	$d_3 = d - 1.2269 \cdot P$
Sisekeerme vähim läbimõõt	$D_1 = d - 1.0825 \cdot P$
Keermeava puuri läbimõõt	$= d - P$
Profiilinurk	$60°$
Arvutuslik ristlõikepindala	$S = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_2 + d_3}{2}\right)^2$

Joonis 4. Keerme profiili tähised [7].

ISO meetrilisi keermeid iseloomustab 60° küljenurk ning need määratakse välisläbimõõdu ja sammu järgi. Standardiseeritud geomeetria ja mõõtmed tagavad keermestatud komponentide vahetatavuse ja ühilduvuse erinevate tootjate ning piirkondade vahel. Jämeda ja peene sammuga keermeseeriate olemasolu võimaldab valida sobiva keerme vastavalt konkreetsetele tugevus-, vibratsioonikindlus- ja tihendusnõuetele. ISO 965 standard määratleb meetriliste keermete tolerantsisüsteemi. See süsteem võimaldab kontrollitud mõõtmete varieerumist tootmise ajal, säilitades samal ajal keermete korrektse sobivuse ja funktsionaalsuse. Sobivate tolerantsiklasside määramine on oluline, et tagada ühendatavate keermete täpne monteerimine ja töökindlus vastavalt rakenduse nõuetele [12].

3. KEERMEFREESID

Keermefreese on erinevaid tüüpe, vastavalt toodetava keerme olemusele ja isepärasusele on võimalik valida sobiv. Toodetava keerme olemuse võib määrata töödeldav materjal, keerme sügavus ja keerme mõõtmed. Käesolevas peatükis on ülevaade erinevatest keermefreesi tüüpidest ja nende olemusest.

3.1. Ühepunktiline keermefrees

Ühepunktilisel keermefreesil on üks lõikehammas. Keermete tootmisel on vajalik selle ühe lõikehambaga lõigata keermeprofiil terves pikkuses. Pilt ühepunktilisest keermefreesist on joonisel 5 [13].

Joonis 5. Ühepunktiline keermefrees [14].

Võrreldes mitme lõikehambaga keermefreesidega on ühepunktilisel keermefreesil väiksem lõikejõud, mis annab võimekuse freesida keeret õhukese seinaga pindadele Õhukese seinaga keermeks loetakse keere, mille kaugus keerme välisläbimõõdust detaili välispinnani on väiksem või ligikaudu võrdne keerme sammuga. Lõikehambaga on võimalik toota keermestatud ava servale faas, läbiva ava puhul on võimalik faasida mõlemad servad [13].

3.2. Mitmehambalised keermefreesid

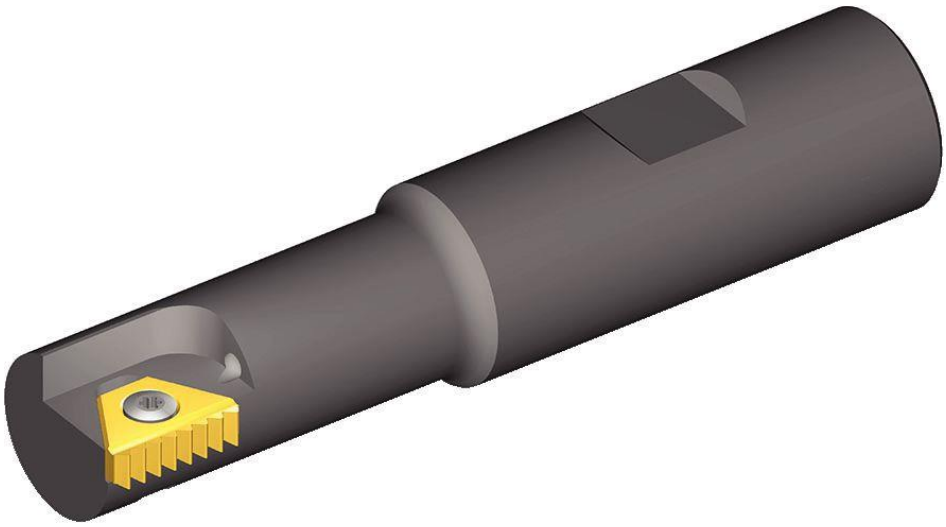
Mitmehambalistel keermefreesidel on mitu lõikehammast, millega on võimalik keere freesida täispikkuses ühe ringjoon liikumisega. Pilt mitmehambalisest keermefreesist on joonisel 6.

Joonis 6. Mitmehambaline keermefrees [15].

Mitmehambaline keermefreesiga on võimalik toota nii sügav keere kui on lõigehamba pikkus. Sisekeermestamisel on vaja keermeava.

3.3. Vahetatava lõikeplaadiga keermefreesid

Vahetatava lõikeplaadiga keermefreesid koosnevad ühest või mitmest lõikeplaadist ja lõikeriistakehast. Pilt vahetatava lõikeplaadiga keermefreesist on joonisel 7 [16].



Joonis 7. Vahetatava lõikeplaadiga keermefrees [17].

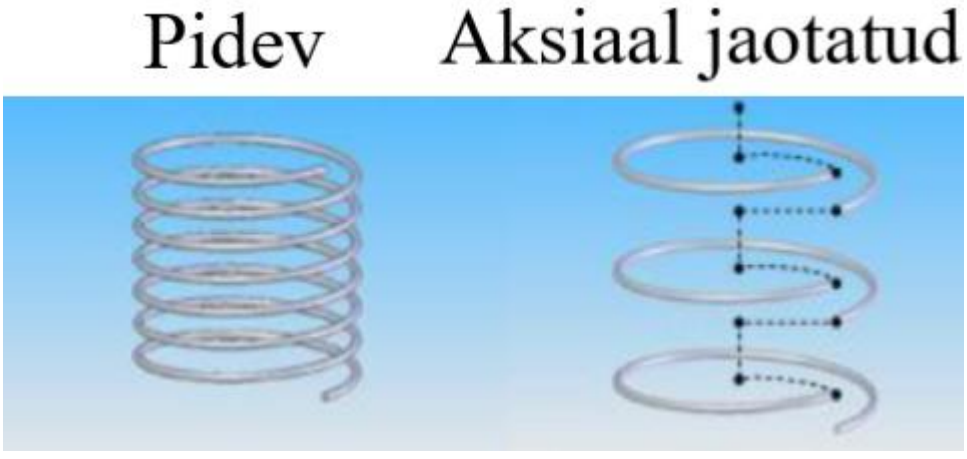
Vahetatavad lõikplaadid annavad võimekuse kinnitada lõikeriistakehale erineva sammu ja profiiliga lõikeplaate ja kulumise korral neid välja vahetada. Sisekeermestamisel on vaja keermeava [16].

3.4. Lühikese lõikeosaga keermefreesid

Lühikese lõikeosaga keermefreesidel on kaks kuni neli lõikehammast ja leevendusega kael, mis võimaldab freesida sügavamalt kui on lõikeserva pikkus. Sisekeermestamisel on vaja keermeava Pilt Lühikese lõikeosaga keermefreesist on joonisel 8 [16].

Joonis 8. Lühikese lõikeosaga keermefrees [18].

Peale esimese täisringi täitumist on lõikes ainult üks lõikeserv. Ainult ühe lõikserva kasutamine rakendab lõikeriistale ebaühtlast survet ja kulumist. Lõikeriista efektiivsemaks kasutamiseks saab keerme freesimise tööraja jagada mitmeks astmeliseks lõikeks piki aksiaalsuunda See tähendab, et keere ei freesita ühe pideva spiraalina kogu sügavuses, vaid mitme eraldi lõikega. Joonisel 9 on näide pideva ja aksiaal jaotatud tööraja kohta .



Joonis 9. Pidev ja aksiaal jaotatud töörajad [22].

3.5. Mitmerealine keermefrees

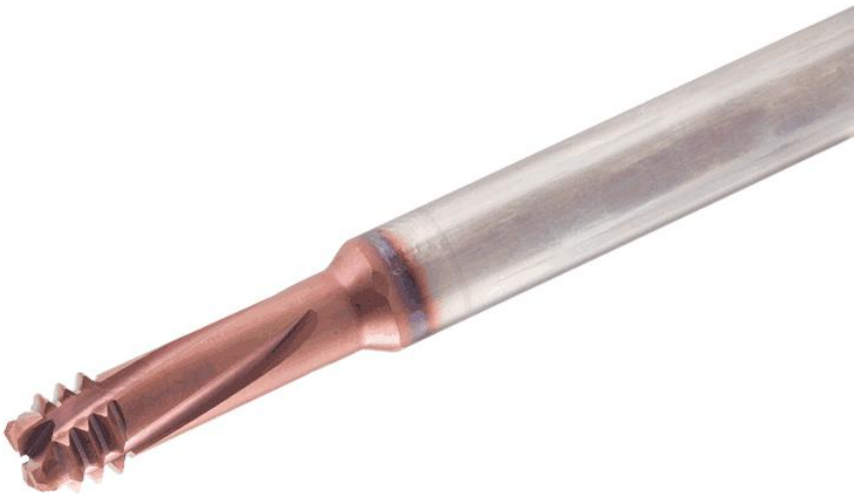
Mitmerealisel keermefreesil on lõikehambad üle ühe, mille eesmärk on vähendada freesimisel tekkivaid jõude ja spindlikoormust. Pilt vahetatava mitmerealisest keermefreesist on joonisel 10 [16].

Joonis 10. Mitmerealine keermefrees [19].

Mitmerealisel keermefreesil on lõikehambad üle ühe keerme sammu tagant. Vähemate lõikehammaste tõttu on lõikejõud väiksem, aga keerme tootmiseks on tarvis kahte ringjoon liikumist, et toota täielik keere [16].

3.6. Kombineeritud keermefrees

Kombineeritud keermefreesil on võimekus teha mitu erinevat keerme osa ühe lõikeriistaga. Pilt vahetatava kombineeritud keermefreesist on joonisel 11.



Joonis 11. Kombineeritud keermefrees [20].

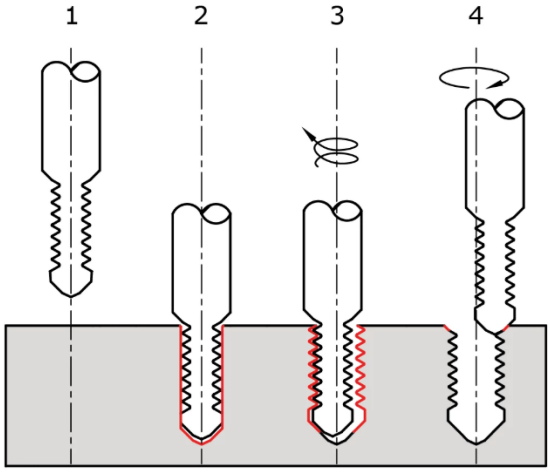
Kombineeritud keermefreesiga ei ole vaja keermeava, sellega on võimalik ava freesida ja samal ajal luua keere ning peale keermestamist on võimalik luua ava servale faas. Kombineeritud keermefreesi kasutamisel oleneb lõikeriista ehitusest, kas freesimisel saab kasutada. Paremkeerme freesimisel tuleb arvestada, et spindli pöörlemine peab toimuma vastupäeva ehk M04 käsuga. See on vajalik, et keermeava ja keere freesitakse päri suunas [20].

3.7. Kombineeritud puur- ja keermefrees

Kombineeritud puur- ja keermefrees on mitmefunktsionaalne lõikeriist, kus on ühendatud puurimise ja keermefreesimise funktsioonid ühte lõikeriista. Sellega on võimalik ühe lõikeriistaga luua keermeava ja keermestada ühes töötlustsüklis. Pilt kombineeritud puur- ja keermefreesist on joonisel 12 [21].

Joonis 12. Kombineeritud puur- ja keermefrees [21].

Lõikeriista tipp on kujundatud nagu spiraalpuur, mis võimaldab toota keermeava. Lõikeriista külgedel on lõikeservad, millega on võimalik spiraalse liikumisega freesida keermed. Lõikeriista tipuga on võimalik luua ava servale faas. Kombineeritud puur- ja keermefreesi töö on kujutatud joonisel 13 [21].



Joonis 13. Kombineeritud puur- ja keermefreesi töö [21].

Tootes umbava keermeid tuleb arvestada lõikeriista spiraalpuuri tipust tulenevast leevendusest, mis jääb ava põhja.

4. KEERMEFREESIMISE NC-KOOD

4.1. NC-kood

Keermete freesimise jaoks kasutades CNC töötlemiskeskust on tarvis kasutada NC-koodi. NC-kood on programmeerimiskeel, mida kasutatakse CNC ehk arvjuhtimisega tööpinkide juhtimiseks. NC-kood defineerib täpsed juhised selle kohta, mis liikumisi töötlemiskeskus peab täitma. NC-kood sisaldab G ja M käske. G-käsud määravad liikumise tüübi või töötlusrežiimi. Need defineerivad, kuidas telgede liikumised töötlemiskeskuses toimuma peaksid. Näited erinevatest G käskudest:

- G00 Kiirliikumine
- G01– Sirgjooneline liikumine
- G02– Ringjoon päripäeva
- G03– Ringjoon vastupäeva
- G84– Keermelõikuse tsükkel

M-käsud juhivad masina funktsioone, peamiselt funktsioonide sisse ja välja lülitamist. Näited erinevatest M käskudest:

- M03– Spindel pöörleb päripäeva
- M04– Spindel pöörleb vastupäeva
- M05– Spindli seiskamine
- M08– Jahutusvedeliku sisselülitamine
- M09– Jahutusvedeliku väljalülitamine
- M30– Programmi lõpp ja taaskäivitamine

4.2. Keermefreesimise NC-koodi kirjutamine

NC-koodi loomisel on vaja defineerida parameetrid nagu kasutatav tööriist, detaili nullpunk, spindlikiirus, ettenihe, keerme läbimõõt ja keerme samm. Näide M10x1.5 keermefreesimise NC-koodist:

G00 G90 G54 X0 Y0 S400 M03;Liigu keskpunkti, spindel sisse

G43 H01 Z5.0 M08;Tööriista pikkuse kompensatsioon, jahutus sisse

Z-6.; Kiire liikumine lõike alguspunkti

G01 G41 D01 X4.25 F25; Lõikamine, tööriista kompensatsioon, sisenemine (raadius 5 mm)

G03 X5.25 R1.0 F7 ; Sisenemiskaar (valikuline)

G03 I-5.25 Z-20.0 ; Spiraalne liikumine alla 20 mm sügavusele

G03 X4.25 R1.0; Väljumiskaar

G01 G40 X0 Y0 ; Kompensatsiooni väljalülitus, tagasi keskpunkti

G00 Z5.0 M09 ; Tööriist üles, jahutus välja

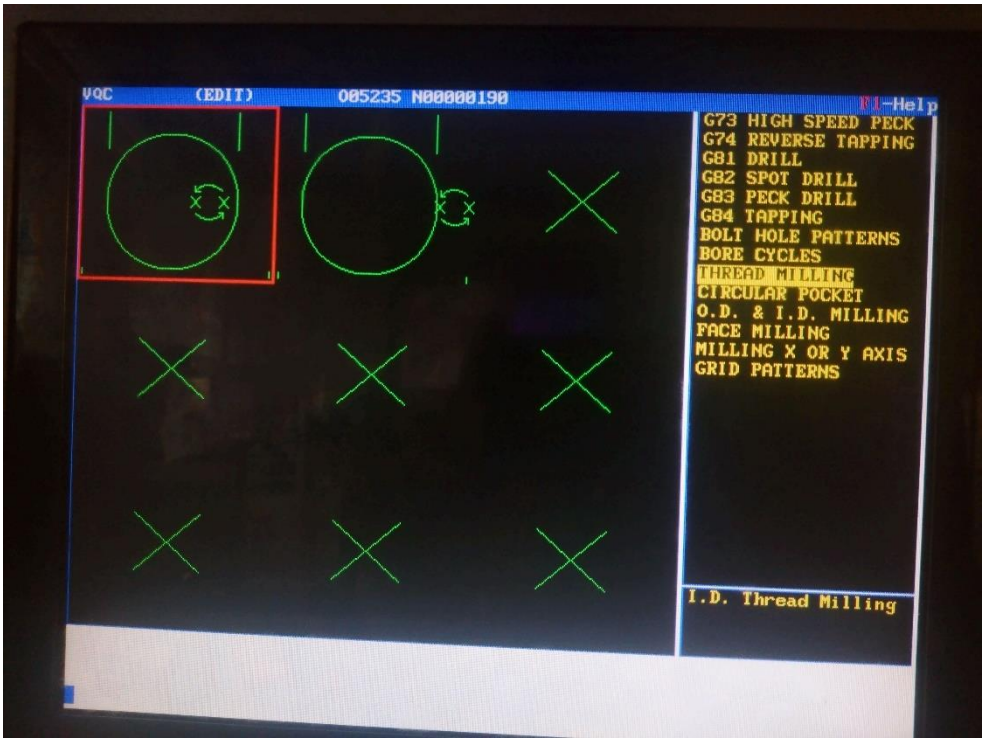
G28 G91 Y0 Z0; Masina nullpunkti

M30 ; Programmi lõpp

4.3. Keermefreesimise makro

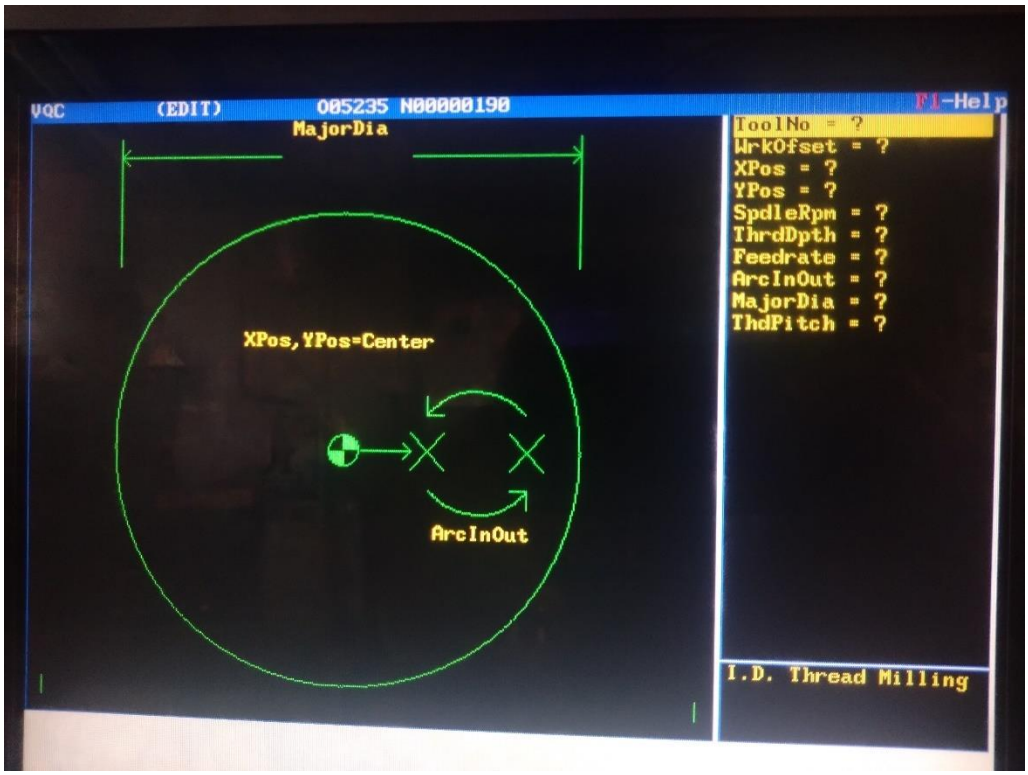
CNC töötlemiskeskuse kontrolleris võib olla olemas makrod, mis võimaldavad luua korduvkasutatavaid ja tingimuslike CNC-programme. Makros on vaja defineerida nõutud parameetrid, mille põhjal luuakse kasutatav NC-kood. HAAS pre-NGC kontrolleril on võimekus lisada, luua ja kasutada makrosid. Keermete freesimiseks on olemas makro, kus

on vaja defineerida järgnevad parameetrid: tööriista number, nullpunkt, keerme X ja Y koordinaadid, spindlikiirus, keerme sügavus, ettenihe sisenemis- ja väljumiskaare suurus, keerme suurus ja keerme samm. Joonisel 14 on valik sise ja välikeerme makrode valikust.



Joonis 14. HAAS super mini mill makrod.

Makrot kasutamiseks tuleb täita järgmised parameetrid: kasutatav tööriist, detaili nullpunk, spindlikiirus, ettenihe, keerme läbimõõt ja keerme samm. Joonisel 15 on pilt keermefreesimis makro täitmisest.



Joonis 15. Keermefreesimise makro.

Sisestades vajalikud parameetrid on võimalik luua NC-kood. Näide makroga loodud keermefreesimise NC-koodist:

T1 M06

G00 G90 G54 X3. Y0.;

S100 M03;

G43 H01 Z25. M08;

G01 Z-20. F254.;

G41 Y0. D01;

G03 X5. Y0. R2. F100.;

G03 I-5. J0 Z-19.333;

G03 X3. Y2. R2.;

G01 G40 X3. Y0.;

G00 G80 Z25. M09;

G28 G91 Z0 M05;

M30;

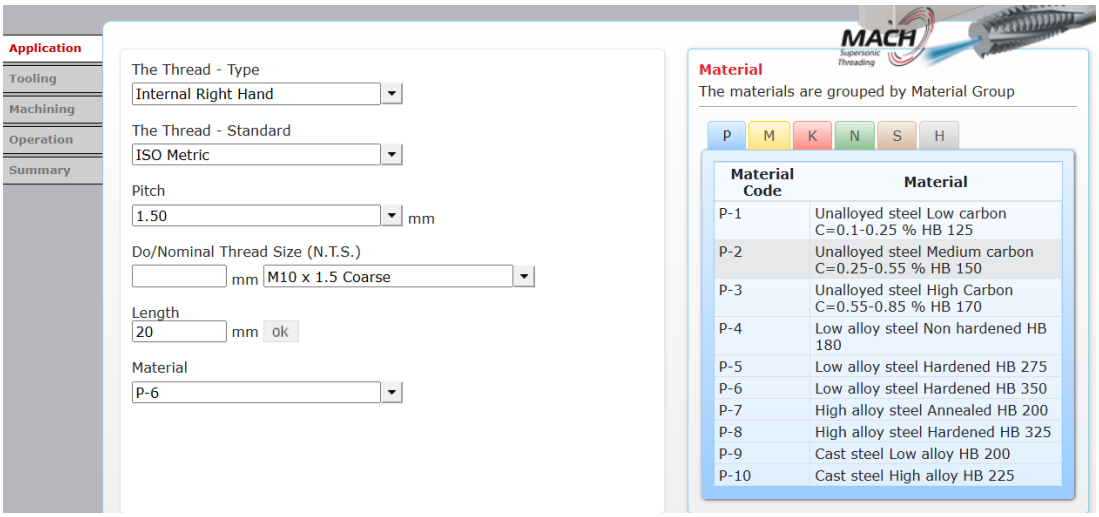
4.4. NC-koodi generaatorid.

NC-koodi generaatorid on tarkvaralahendused, mis võimaldavad kasutajal määrata töötlusprotsessi jaoks vajalikud parameetrid ning genereerida nende põhjal automaatselt vastav NC-kood. Need tööriistad pakuvad visuaalset ja parameetritepõhist kasutajaliidest, kus saab sisestada vajalikud parameetrid näiteks tööriista mõõtmed, keerme tüüp, keerme samm, lõikesügavuse ja muud tehnilised andmed. Selle tulemusel loob tarkvara optimeeritud ja konkreetsele kontrollerile sobiva koodi. NC-koodi generaatorid aitavad suurendada produktiivsust, vähendades programmeerimisele kuluvat aega ja vältida programmeerimisvigu, kiirendada töö ettevalmistust ning suurendada tootlikkust.

Üks näide NC-koodi generaatorist on VARGUS GENius Software, mis võimaldab luua keerme tootmis protsesside jaoks ja kohandatud NC-koode. Võimalik on luua NC-koode keermete treimiseks, freesimiseks, puurimiseks ja pöördlõikuseks. GENius tarkvara on parameetrite põhise sisestusega, kus defineeritakse kõik vajalikud parameetrid, millele vastavalt genereeritakse NC-kood [22].

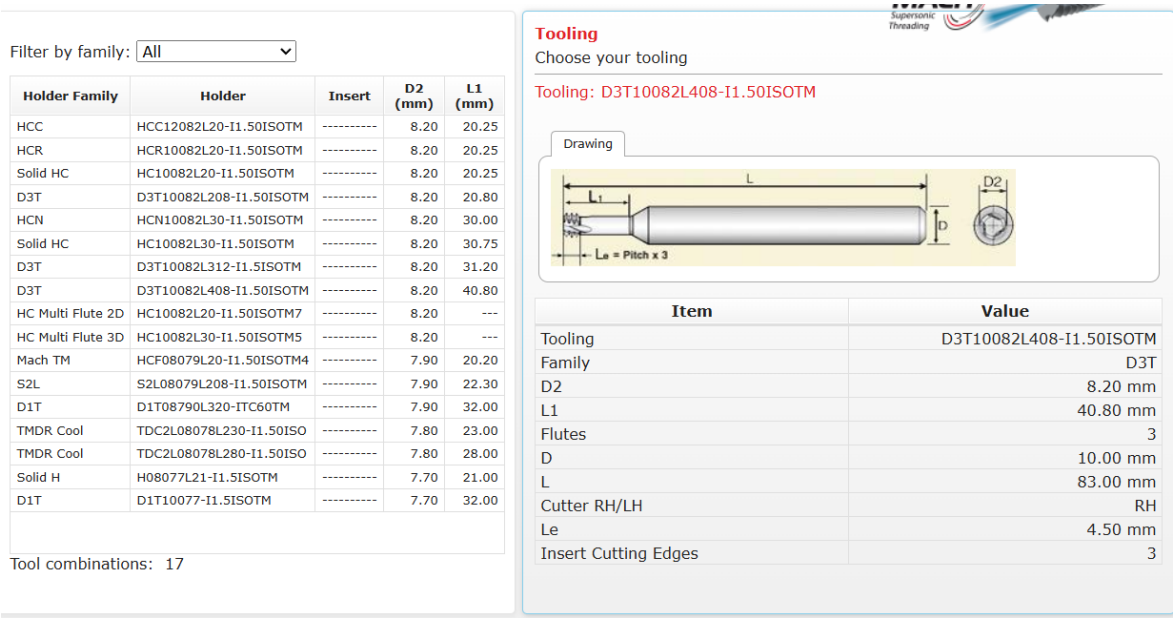
Parameetrite sisestusel on tarkavaras parameetrite kohta abistavad seletused ja visuaalsed joonised. Need aitavad mõista mida milline parameeter teeb ja millist valima peaks. Peale parameetrite sisestust genereerib tarkvara NC-koodi ja koostab ülevaate valitud parameetritest ja annab hinnatava tsükliaja.

Keermefreesimisel alustatakse parameetrite valimisega aplikatsiooni aknas, kus on vaja defineerida järgmised parameetrid: keerme tüüp, keerme standard, samm, keerme suurus, keerme pikkus ja materjal. Joonisel 16 on näide aplikatsiooni parameetrite valikust.



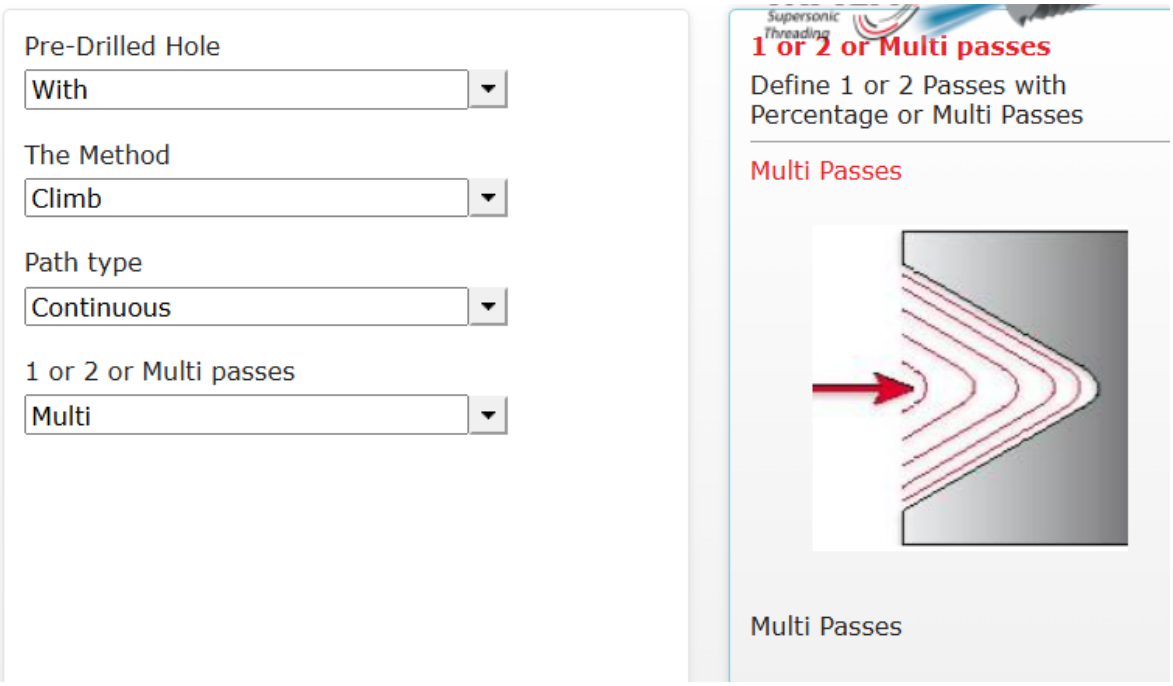
Joonis 16. Aplikatsiooni parameetrid [22].

Tööriista aknas on vaja valida sobiv lõikeriist. GENius tarkvara sisaldab VARDEXi lõikeriistade profiile. Joonisel 17 on näide lõikeriista profiili valikust.



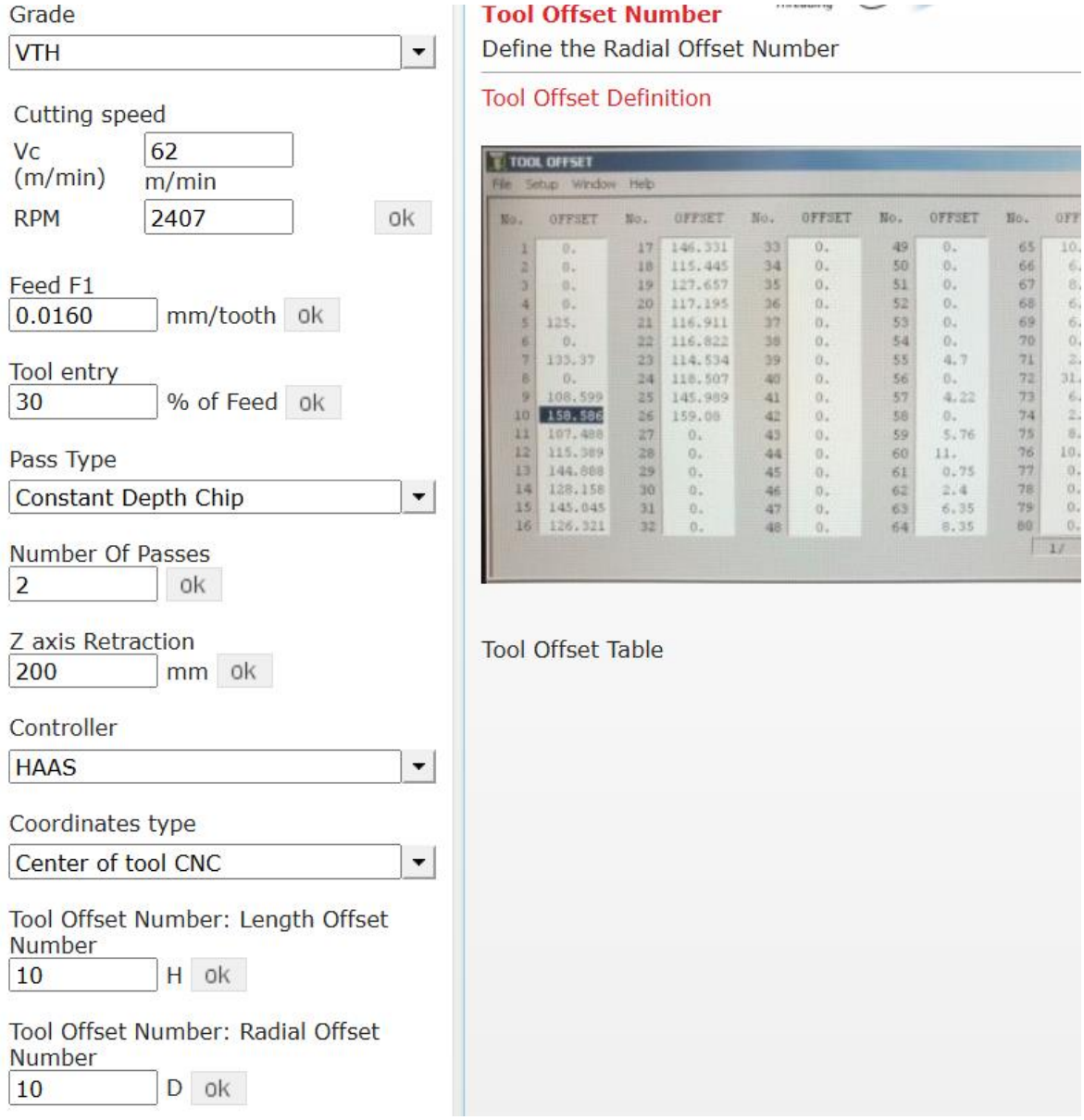
Joonis 17. Lõikeriista profiili valik [22].

Masintöötluse aknas defineeritavad valikud sõltuvad valitud lõikeriista järgi kuna erinevad lõikeriistad võimaldavad erinevaid kasutus viise. Valitud lõikeriist vajab järgmisi parameetreid: keermeava olemasolu, lõikesuund, tööraja tüüp ja lõikesügavuse parameetrid. Joonisel 18 on näide masintöötluse parameetrite valikust.



Joonis 18. Masintöötluse parameetrid [22].

Operatsiooni aknas defineeritakse lõikekiirus, ettenihke kiirus, lõikriista sisenemise määr, lõikesügavuse valik, Z-teljes tagasitõmbumine, kontrolleri valik, lõikeriista koordinaatide tüüp ja nihkeregistris lõikeriista pikkuse ja läbimõõdu number. Joonisel 19 on näide operatsiooni parameetrite valikust.



Joonis 19. Operatsiooni parameetrid [22].

Tulemusena valmis hinnanguline tsüklipikkus, ülevaade valitud parameetritest ja NC-kood. Valminud NC-kood, mis sobib HAAS kontrollerile ja millega freesitakse 20mm sügavune M10x1.5 keere on leitav lisas 1.

4.5. NC-koodi loomine CAM tarkvaraga

CAM (Computer Aided Manufacturing) on arvutipõhine raaltootmis haru, millega on võimalik luua tootmisprotsesside jaoks vajalikke tööradasi. CAM-tarkvaras kasutatakse sisendiks 3D-mudelit, millele põhjal on võimalik luua töötlusstrateegiad. Parameetrite põhjal genereeritakse automaatselt sobiv NC-kood.

CAM-tarkvaras keermefreesi teekonna loomine toimub järgmiste sammude kaudu:

1. Keerme valik

3D-mudelil valitakse keerme asukoht, mis on tavaliselt projekteeritud mudelisse ja defineeritakse keerme tüüp, näiteks M10x1.5 sise- või väliskeere ning sügavus.

2. Lõikeriista määramine

Valitakse sobiv keermefrees tööriistakogust või sisestatakse käsitsi tööriista mõõtmed ja parameetrid.

3. Lõikeparameetrite seadistamine

Määratakse lõikesügavus, pöörlemiskiirus, ettenihke kiirus ja sisenemisviis

4. Simulatsioon ja kontroll

Tarkvara võimaldab tööriista liikumist visuaalselt simuleerida, et kontrollida võimalikke kokkupõrkeid ja tagada korrektne keerme kuju.

5. NC-koodi genereerimine

Parameetrite põhjal luuakse masinaspetsiifiline NC-kood, mida saab edastada CNC-masinasse.

Võimalik on kasutada Autodesk Fusion-it, mis on CAD/CAM/CAE tarkvaraplatvorm. Sellese on ühendatud 3D-modelleerimise, simulatsiooni, tootmise ja dokumentatsiooni tööriistad. Kasutades selle sisseehitatud CAM-mooduli on võimalik luua CNC-

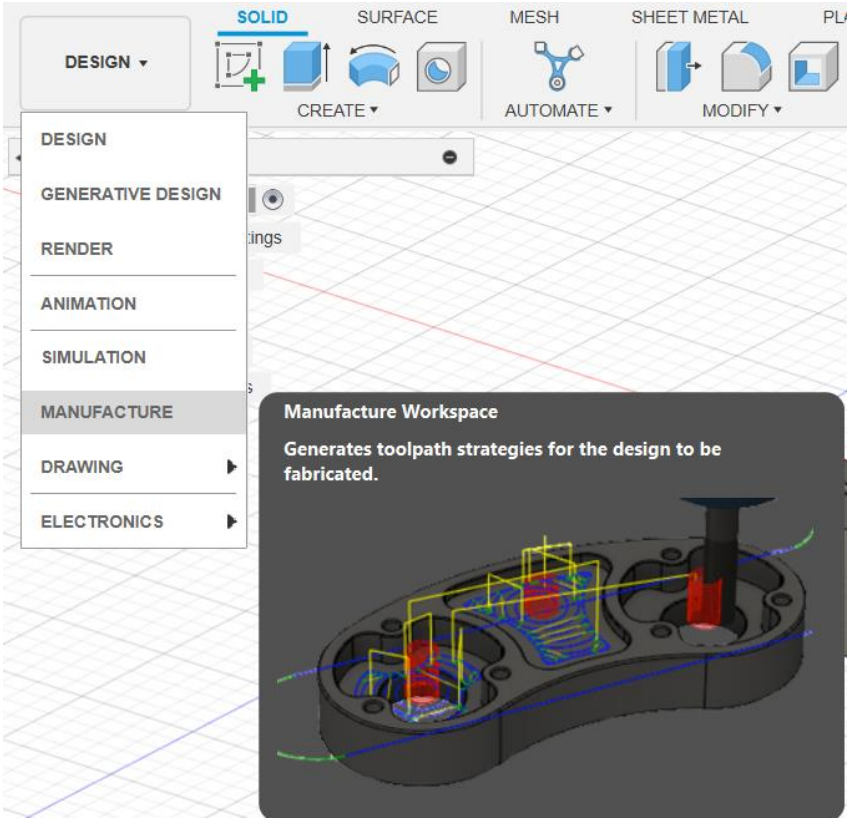
töötlusstrateegiaid otse 3D-mudeli põhjal. Fusion-is on CAM *manufacturing* ehk tootmis keskkonnas. Fusion-i CAM-moodul toetab keermefreesimist, millega on võimalik luua parem- ja vasak sise- või väliskeeret. Protsess toimub järgmiste sammude kaudu:

1. 3D-mudeli ettevalmistus

Vaja luua või lisada detaili mudel, millele on vaja keere lisada, näiteks silindriline või kooniline ava või võll.

2. CAM-keskkonda lülitumine

Avada tootmiskeskkond (*manufacture*), kus on võimalik valida töötlusstrateegiad. Pilt tootmiskeskkonna avamisest on joonisel 20.

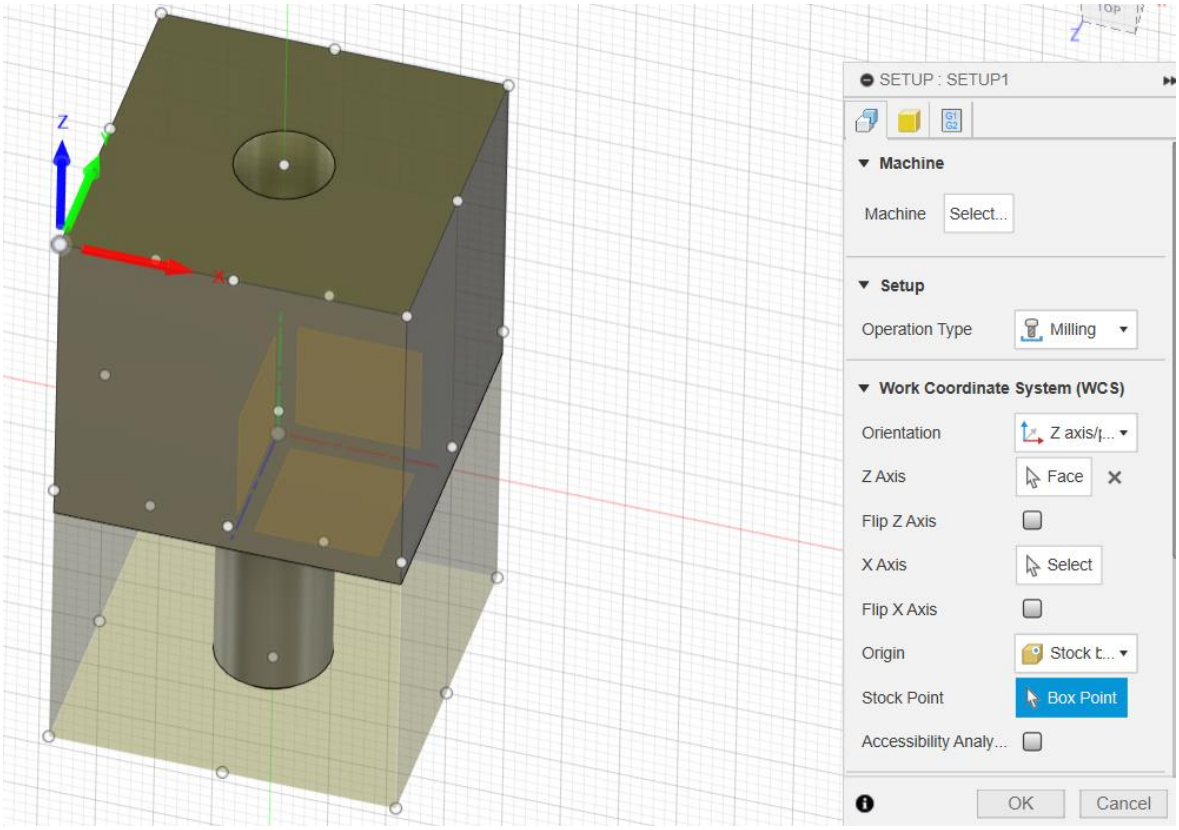


Joonis 20. Tootmiskeskkonna avamine.

3. Seadistuse seadistamine

Fusion-i tootmis keskkonnas (*Manufacture*) on seadistus (*Setup*) esimene samm CNC-töötluse strateegia loomisel. Sellega defineeritakse, mis asendis ja suunas detail asub masina

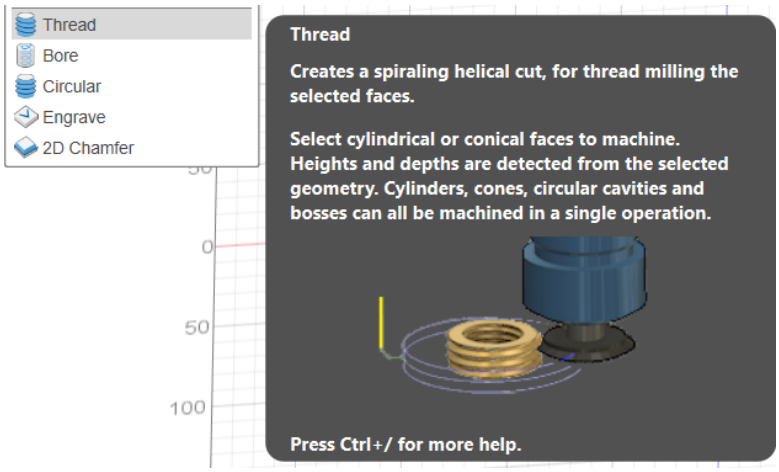
koordinaatsüsteemis, ning luuakse alus kõikidele järgneva(te)le töötlusoperatsioonidele. Pilt seadistamisest on joonisel 21.



Joonis 21. Tootmiskeskkonnaas seadmistamine.

4. Keermefreesimise funktsioon

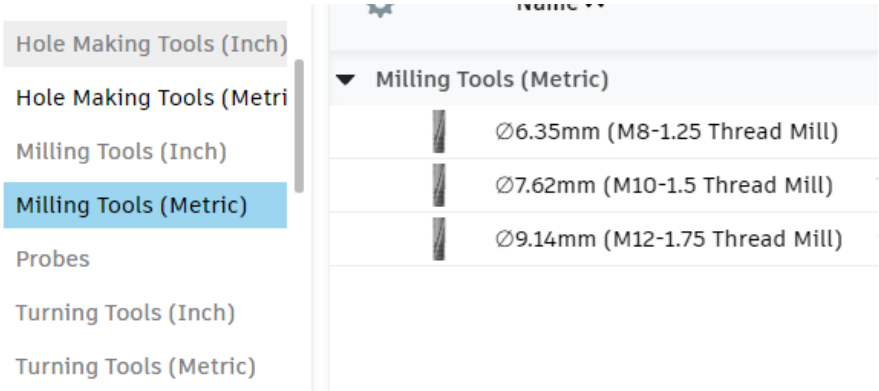
Valida 2D funktsioonide valikust keermefreesimise (*Thread*) töötlusstrateegia, mida on kujutatud joonisel 22. Keermefreesimis käsuga luuakse spiraalne töörada, millega on võimalik silindrilistele või koonilistele pindadele luua keere.



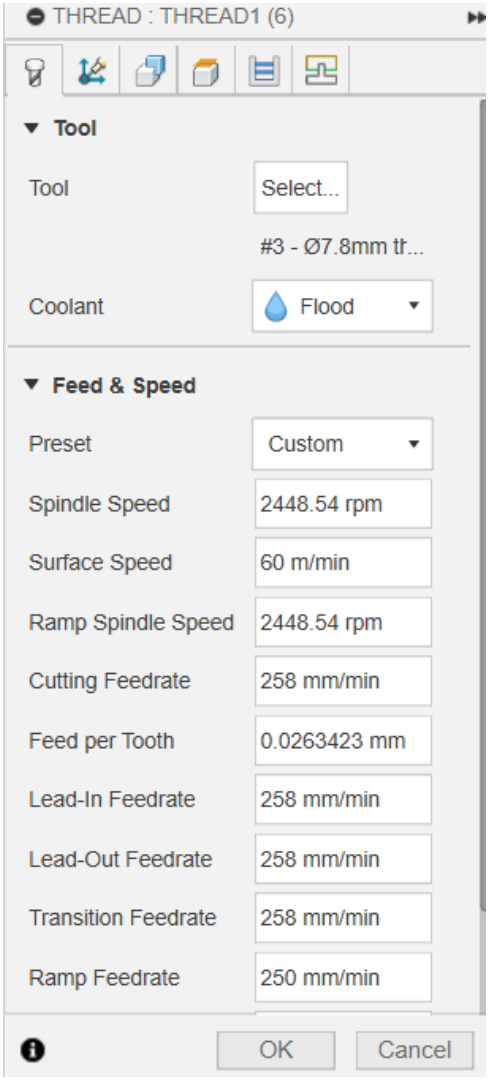
Joonis 22. Keermefreesimis funktsioon.

5. Keermefreesimise lõikeriist ja lõikekiirused

Funktsiooni esimeses aknas on võimalik valida tööriistakogust sobiv keermefrees, millega keermed toodetakse. Sobiva lõikeriista puudumisel on võimalik luua sobiv lõikeriista profiil. Joonisel 23 on kujutatud tööriistakogu. Samas aknas on võimalik määrata, milliste lõikekiirustega protsess läbi viiakse. Lõikekiiruste valik on kujutatud joonisel 24.



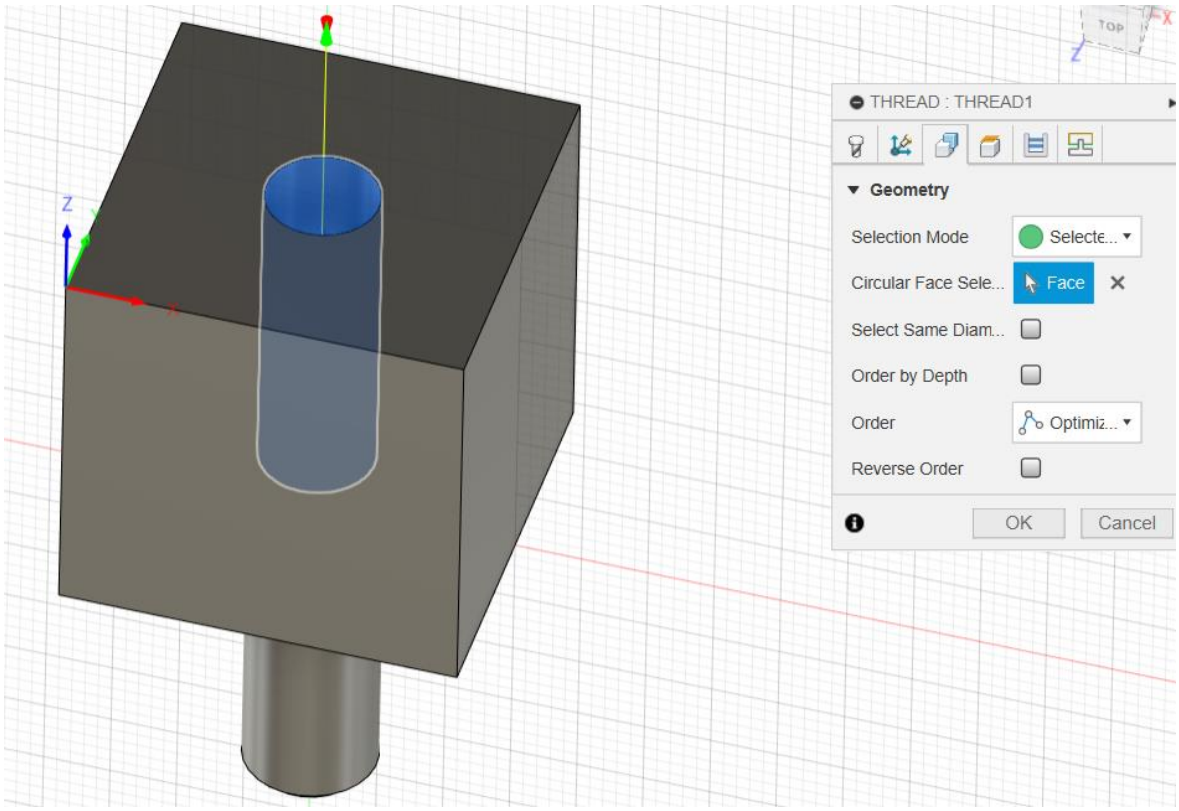
Joonis 23. Tööriistakogu keermefreesid.



Joonis 24. Lõikekiiruste valik

6. Geomeetria valik

Geomeetria aknas tuleb defineerida millisele pinnale keere luuakse. Sobilikud on silindrilised või koonilised pinnad, mõlemad võivad olla avad või võllid. Joonisel 25 on geomeetria valimine



Joonis 25. Geomeetria valik.

7. Kõrguste valik

Kõrguste (*Heights*) aknas saab defineerid, millistes kõrgustes tööriist liigub enne, pärast ja töötluse ajal. Korrektselt seadistatud kõrgused aitavad vältida kokkupõrkeid. Joonisel 26 on näidatud kõrguste akend. Kõrguste akna peamised valikud:

- Kliirens kõrgus (*Clearance Height*)

Kõrgus, millest kõrgemal tööriist liigub kiiresti (rapid move), et vältida kokkupõrkeid teiste objektidega.

Tavaliselt määratakse see kõige kõrgema punkti järgi, millest tööriist peab üle liikuma.

- Tagasitõmbamise kõrgus (*Retract Height*)

Kõrgus, kuhu tööriist tõuseb pärast lõike lõpetamist, enne järgmist liikumist.

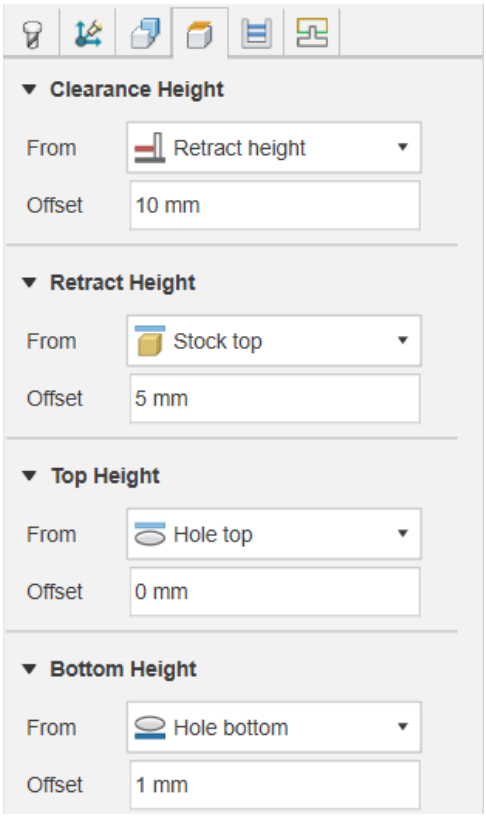
See on tavaliselt madalam kui kliirens kõrgus, kuid piisav, et vältida kokkupõrkeid toorikuga.

- Ülemine kõrgus (*Top Height*)

Loodava keerme ülemine pind.

- Alumine kõrgus (*Bottom Height*)

Lõike alumine piir, kui sügavale keere ulatub. Saab määrata absoluutse väärtusena või näiteks mudeli põhja, tooriku põhja või valitud geomeetria järgi.



Joonis 26. Kõrguste aken

8. Läbimid (*Passes*)

Läbimiste aknas saab määrata, kuidas tööriist lõikab materjali. Valida saab, kui sügavalt, kui palju kordi, millise trajektooriga ja millise suunaga. Läbimite aken on joonisel 27.Läbimiste akna peamised valikud:

- Algnurk (*Starting Angle*)

Laseb määrata, kus keere algab.

- Keerme suund

Võimalik valida parem- ja vasakkeerme vahel.

- Keerme samm (*Thread Pitch*)

Keerme sammuga määratakse keerme samm ja sellega sammu spiraali tõusu.

- Sammu läbimõõdu nihe (*Pitch Diameter Offset*)

Sammu läbimõõdu nihe defineerib, kui suure läbimõõduga keere toodetakse. Valikus on vaja sisestada läbimõõt. DIN 13-19 ehk üldotstarbe ISO meeterkeerme profiili standardis on antud sisekeerme sügavus, tähisega H_1, mis on võimalik leida sisekeerme sügavuse valemiga.

Sisekeerme sügavuse valem

$$H_1 = 0{,}5413P, \text{ [7]} \quad (1)$$

kus H_1– sisekeerme sügavus;
P – keereme samm.

Sammu läbimõõdu nihe ei ole DIN 13-19 ehk üldotstarbe ISO meeterkeerme profiili standardis märgitud, see tuleb arvutada kasutades sammu läbimõõdu nihke valemit.

Sammu läbimõõdu nihke valem

$$D_{samm} = 2H_1 \quad (2)$$

kus D_{samm}– sammu läbimõõdu nihe;
H_1– sisekeerme sügavus.

- Mitme keerme loomine (*Do Multiple Threads*)

Võimalik on luua mitmekäigulist keeret. Sisestada tuleb, mitme käiguline keere tehakse.

- Kompensatsiooni tüüp (*Compensatsion Type*)

Võimalik määrata, kas tööriista kompensatsioon toimub arvutis või kontrolleris. Kompenseerida on võimalik tööriista pikkust ja läbimõõtu. Valides kompensatsioon arvutis jäävad tööriista profiilis olevad väärtused. Valides kompensatsioon kontrolleris kasutatakse tööriista nihkureistki olevaid väärtusi.

- Mitu lõikesügavust (*Multiple Passes*)

Kui see on lubatud, jagatakse keerme lõikamine mitmeks lõikesügavuseks. Määrata tuleb mitme katteastmega keere luuakse ja mis on iga lõike sügavus.

- Korduvad läbimised (*Repeat Passes*)

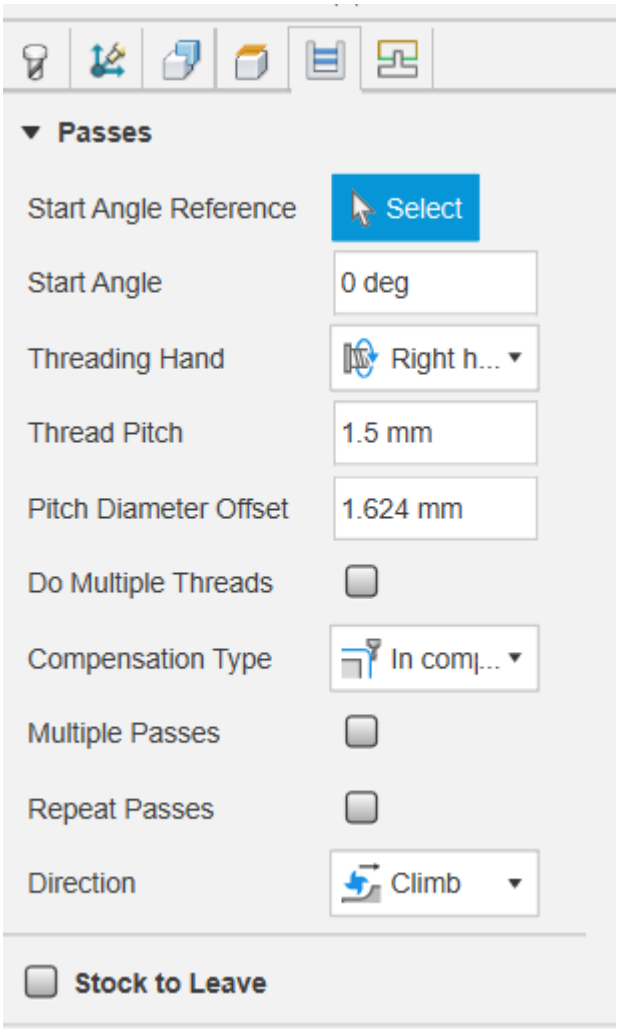
Lisab täiendava viimistluskäigu, mis eemaldab tööriista läbipainde tagajärjel jäänud tooriku.

- Lõikesuund (*Direction*)

Laseb valida, kas lõikamine toimub päri- või vastassuunas toorikule.

- Jäetav materjal **(***Stock to Leave*)

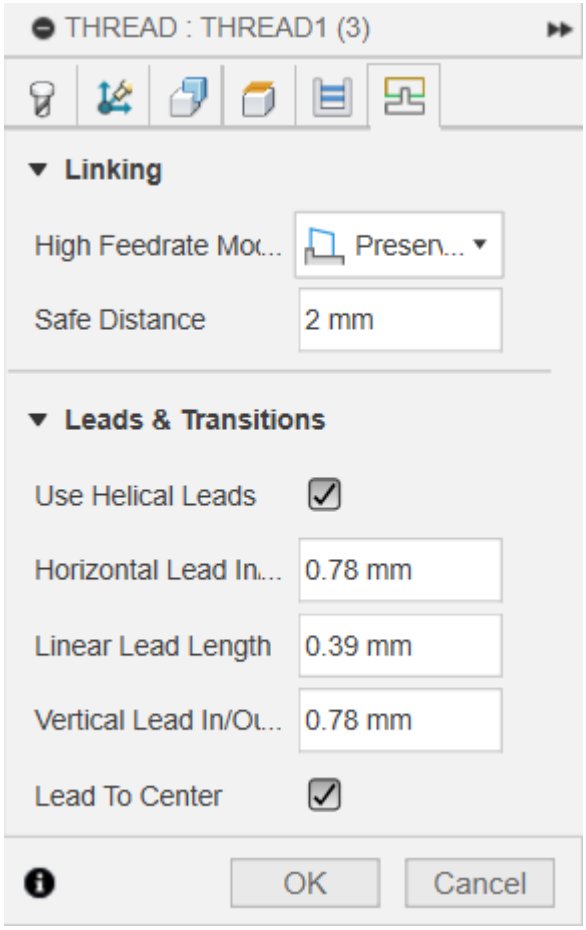
Laseb defineerida palju materjali jäetakse radiaalsuunas alles.



Joonis 27. Läbimite aken.

9. Sidumine (*Linking*)

Sidumise aken seotud tööriista liikumisteekondadega enne ja pärast lõikamist. Seal saab määrata, kuidas tööriist siseneb lõikealale ja väljub sealt, ning aitab tagada sujuva ja ohutu liikumise, vältides järske liigutusi ja kokkupõrkeid. Joonisel 28 on sidumise aken.



Joonis 28. Sidumise aken.

10. Simuleerimine

Defineeritud parameetrite põhjal on võimalik simuleerida, kuidas töörajad töötavad. Simuleerida on võimalik tervet seadistust või funktsioone eraldi. Simuleerimiseks saab valida parema hiireklõpsuga seade või funktsioon ja valida simuleerimine.

11. Postprotsessor (*Post Process*)

Postprotessor käsuga on võimalik luua masinale sobiv G-kood. CAM-keskkonnas loodud töötlusstrateegiad, töörajad ja parameetrid teisendatakse reaalseks koodiks, mida CNC-masin suudab täita. NC-koodi loomine on CNC kontrolleri põhine, iga kontrollel võib nõuda erisusi koodis. Kui konkreetse kontrolleri jaoks sobivat postprotsessorit ei ole, saab selle alla laadida või kohandada. Postprotsessori aknas saab valida millisele kontrollerile kood luuakse, kontrolleri põhised valikud, failinime ja kuhu fail salvestatakse. Pealse seda on olemas NC-kood, mida saab kasutada CNC-töötlemiskeskuses.

5. KEERME KVALITEET

Keermed tuleb toota vastavalt nõuetele või standarditele, kus on määratud tolerantsid, mis määravad, kui palju võib keerme mõõtmed tegelikust ideaalmõõdust erineda, tagades samas sobivuse ja töökindluse. ISO meetermõõdustikus keermete tolerantsid on määratletud standardis ISO 965, mis käsitleb keermete sobivust ja mõõtmete lubatud hälbeid. Keermete kvaliteedis veendumiseks tuleb teha nendele kvaliteedikontroll, kus mõõdetakse keermeprofiili erinevaid osi nagu: nimiläbimõõt, keermesamm ja sammu läbimõõt.

Keermete tolerantsisüsteem koosneb kahest osast: tolerantsiklass (number), mis määrab mõõtmete hälbe suuruse ja tolerantsiasend (täht), mis määrab hälbe asukoha ideaalmõõdu suhtes. Suurte tähtedega (H, G, F...) tähistatakse sisekeermeid ja väikeste tähtedega (h, g, f...) tähistatakse väliskeermeid. Näited tolerantsidest:

- M10x1.5 - 6H → sisekeere, klass 6, asend H (tavaline standardne sobivus)
- M10x1.5 - 6g → väliskeere, klass 6, asend g (tavaline standardne sobivus)
- M10x1.5 - 4h → väliskeere, täpsem sobivus (väiksem lõtk)
- M10x1.5 - 7H → sisekeere, suurem lõtk (nt kui vaja kergemat kokkupanekut)

Tolerantside valik sõltub: keermestatud ühenduse funktsioonist, koormusest ja vibratsioonist, tihendamisvajadusest ning tootmistäpsusest ja -kulust.

Keerme nimiläbimõõdu mõõtmiseks saab kasutada mõõteriistu nagu nihik või mikromeeter. Keerme nimiläbimõõt (nominaalläbimõõt) on keerme välisläbimõõt väliskeermel või ava läbimõõt sisekeermel, mida kasutatakse keerme suuruse tähistamiseks (nt M10 tähendab nimiläbimõõtu 10 mm).

Väliskeere mõõtmisel tuleb mõõta keerme harjade tippude vaheline kaugus. Mõõtmine toimub keerme aktsiaalteljega risti.

Sisekeere mõõtmisel saab mõõtasisekeerme vähimat läbimõõtu (tähis D1). Mõõtmisel tuleb kasutada sisemõõtmiseks mõeldud nihikut või sisemikromeetrit. Mõõtmisel mõõta keerme harja tippude vahelist kaudust.

Alternatiiv mõõtmisele on kasutada keermekaliibreid, mida ei kasutata keermete mõõtmiseks vaid pakuvad võrdlust tolerantsis ja tolerantsist väljas keerme vahel. Kaliibrid on käsitsi kasutamiseks. Olemas on välis- ja sisekeermekaliibrid, mida on näha joonisel 29 ja joonisel 30 vastavalt. Keermekaliibritel on olemas GO ja NO-GO osa. GO osa on korrektses tolerantsis ja see peab minema sujuvalt ilma liigse jõuta keerme peale. NO-GO on tähistatud punase tähistusega ja tolerantsist väljas pool ning see ei tohi keermele minna.

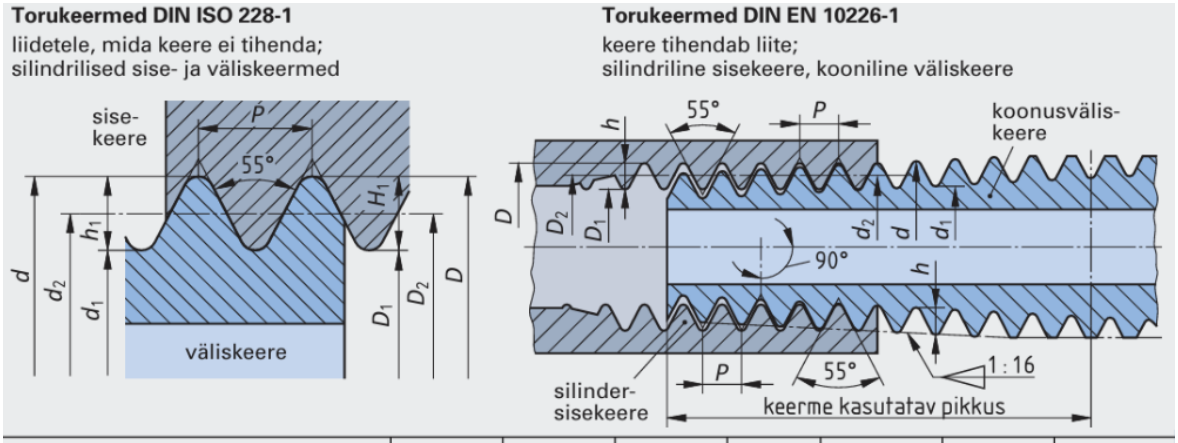
Joonis 29. Väliskeerme kaliiber [27].

Joonis 30. Sisekeerme kaliiber [28].

6. KATSED

6.1. Keermestamine keermepuuriga

Esiteks teostati katse, kus kasutati keermete tootmiseks keermepuuri. Katse viidi läbi Eesti Maaülikooli CNC õppelaboris olemasoleva HAAS Super Mini Mill töötlemiskeskusega. Keermestati 12mm sügavusele G3/8 torukeeret Mirrax 40 materjali, mis on roostevaba tööriistateras. G3/8 torukeerme mõõdud on joonisel 31. Katse parameetrid on tabelis 1.



Keerme tähis			Suurim läbimõõt	Keskläbi-mõõt	Vähim läbimõõt	Samm	Keerdude arv tollile	Keerme sügavus	Väliskeerme kasutatav pikkus
DIN ISO 228-1	DIN EN 10226-1								
Välis- ja sisekeere	Välis-keere	Sise-keere	$d = D$	$d_2 = D_2$	$d_1 = D_1$	P	Z	$h = h_1 = H_1$	≥
$G^3/_8$	$R^3/_8$	$Rp^3/_8$	16.662	15.806	14.950	1.337	19	0.856	10.1

Joonis 31. G3/8 torukeerme mõõtmed [7].

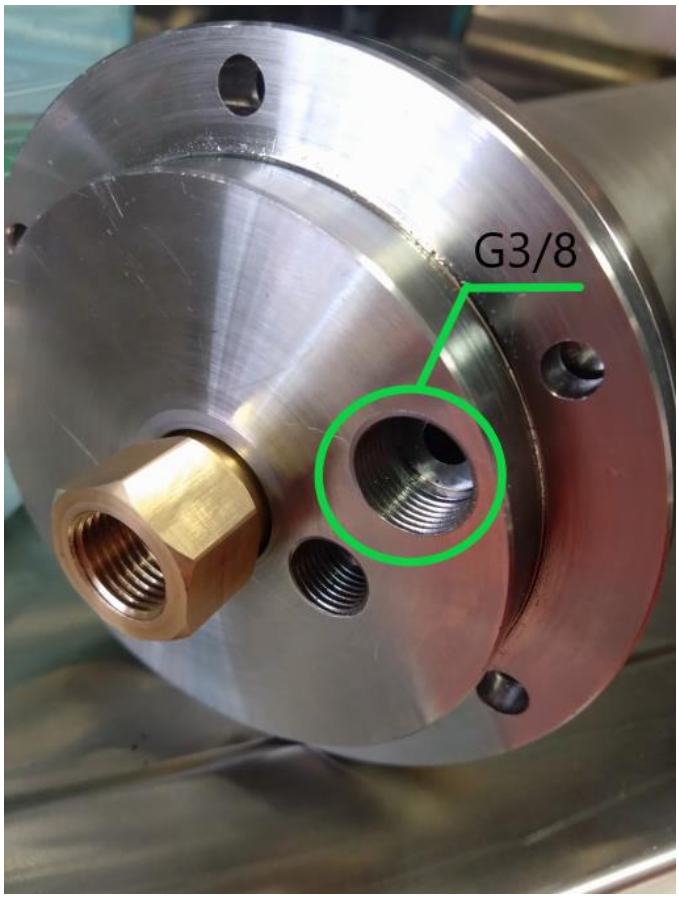
Tabel 1. G3/8 lõikekiirused.

Lõikekiirus	9 m/min
Spindlikiirus	572.958 p/min^{-1}

Katse käigus veenduti empiiriliselt vaatluse teel spindli koormust. Katse käigus ületas spindli koormuse seier selle 180% koormuse mõõte piirkonda, kuniks seier füüsiliselt ei saanud näidiku korpuse sees edasi liikuda. Pilt spindli koormuse näidikust on joonisel 32.

Joonis 32. Spindlikoormuse näidik

Vaatamata lubatud spindli koormuse ületamise oli võimalik keere toota vastavalt nõuetele. Valminud keere on joonisel 33.



Joonis 33. Valminud G3/8 keere.

Vaatamata sobivalt valitud lõikeparameetritele ei arvestatud spindli võimsusega. Eesti Maaülikooli CNC õppelaboris olemasoleva HAAS Super Mini Mill-i spindli tehnilised andmed on tabelis 2.

Tabel 2. HAAS Super Mini Mill-i spindli tehnilised andmed [23].

Spindli pöörlemiskiirus	10000 p/min^{-1}
Spindli võimsus	11 kW
Spindli pöördemoment	23 Nm (@ 4600 p/min^{-1})

Kasutades KENNEMETAL keermestus jõu kalkulaatorit on võimalik arvutada keermestamiseks vajaliku jõudu. Kalkulaatoris on hoiatus, et arvutused põhinevad teoreetilistel väärtustel ja on mõeldud ainult planeerimise eesmärgil. Tegelikud tulemused

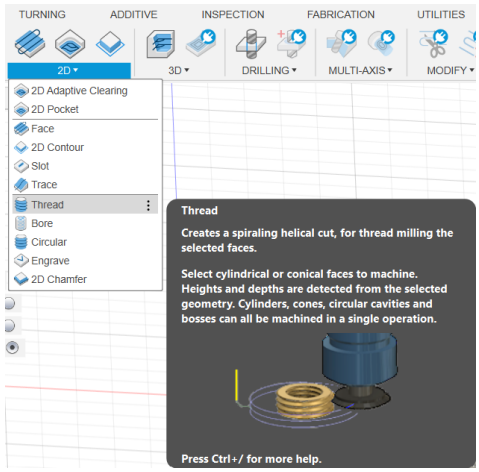
võivad erineda. Materjaliks valiti terassulam 390 BHN kõvadusega, kuna Mirrax 40 kõvadus võib olla 360-400 HB. Kuna kalkulaatoris ei ole G3/8 keerme profiili kasutati 3/8 – 18 NTP ja M16x1,5 profiile kuna need on kõige sarnasemad sellele keermele. Tulemuseks leiti, et 3/8 – 18 NTP keermestamiseks on vaja 58,6 Nm ja M16x1,5 keermestamiseks 31,1 Nm. Mõlemad arvutuslikud keermestamiseks vajalikud jõud on suuremad, kui töötlemiskeskus võimeline on [24] [25].

Pikaajaline ülekoormus spindlile võib kahjustada spindlimootorit. Olukorras, kus spindli mootor peaks ülekoormuse tõttu seisma jääma võivad tekkida kahjustused töötlemiskeskuse kinemaatilistele komponentidele, nagu telgede lineaarlaagritele, kuulkruvidele ja mootoritele.

6.2. Keermestamine keermefreesiga

Katse eesmärk on katsetada keermefreesimise tehnoloogia kasutamist ja erinevate lõikeparameetrite mõju keermete tootmisel. Katsete läbiviimine toetab õppematerjali loomist.

Keermestus programmi loomiseks kasutati Autodesk Fusion tarkvara, millel on olemas CAM (Computer Aided Manufacturing) võimekus. Tarkvaral on keermestamiseks Thread käsk, mida on näha joonisel 34.



Joonis 34. Keermestus käsu valik.

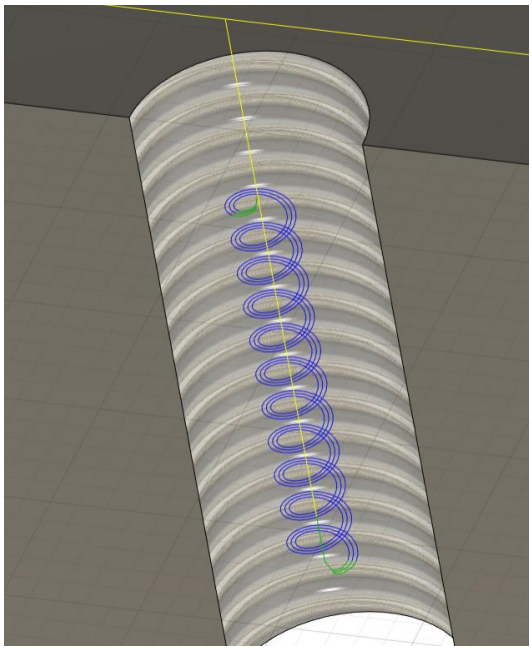
Programmi loomiseks tuleb valida sobilikud lõikeparameetrid, et lõikeriist töötaks piisava võimekusega. Vajalikud parameetrid leiti soovituslike lõikeparameetrite tabelist, mis on joonisel 35.

ISO Standard	Materials	Cutting Speed m/min	Feed mm/tooth Cutting Diameter = D													
			Ø1	Ø1.5	Ø2	Ø3	Ø4	Ø5	Ø6	Ø7	Ø8	Ø9	Ø10	Ø12	Ø14	Ø16
P	Low and Medium Carbon Steels < 0.55%C	60-120	0.04	0.05	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18
	High Carbon Steels ≥ 0.55%C	60- 90	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.14	0.16	0.17	0.18
	Alloy Steels, Treated Steels	50- 80	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14

Joonis 35. Tootjapoolsed soovituslikud lõikeparameetrid [26].

Tabelist lähtudes valiti lõikekiiruseks 60 m/min ja ettenihe hambale 0,15 mm. Lisaks tuleb täpsustada keerme samm ja sisekeerme sügavuse sammu läbimõõdu nihe. Valitud keermefreesiga on võimalik lõigata 1,5 mm sammu. Sisekeerme sügavus on M10 keermel 0,81 mm. Kuna programmis on nõutud diameetri nihe peab selle väärtuse korrutama kahega. Sisekeerme sügavuse sammu läbimõõdu nihe on 1,62 mm .

Esimese katsekeha töötlemisel kasutati kolme katteastet, iga aste 0,15 mm laiune. Katteaste eesmärk on vähendada korraga lõigatava materjali kogust ja tööriista survet. Pilt kolme katteastmega töörajast on joonisel 36. Teise katsekeha töötlemisel kasutati kahte katteastet, iga aste 0,3 mm laiune. Kolmandal katsekehal ei kasutatud katteastet ja keere freesiti ühe lõikesügavusega. Erinevate katteastete kasutamisest tulenevalt tuleb muuta katsete vahel parameetreid, et saavutada võrdne tsükliaeg katsete vahel. Katsete lõikeparameetrid on tabelis .



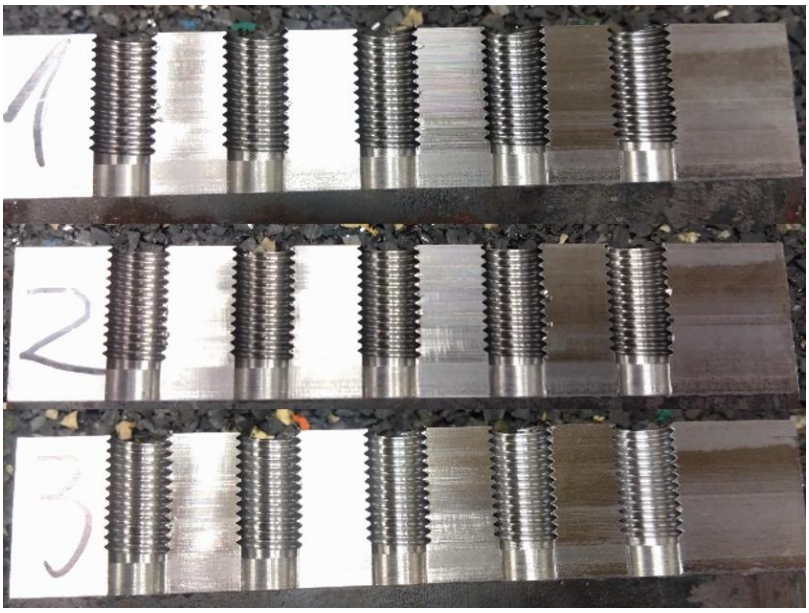
Joonis 36. Kolme kattesammuga töörada.

Tabel . Esimese katsekeha töötlemis parameetrid

Parameeter	Katse 1	Katse 2	Katse 3
Pöörlemissagedus	2448 1/min	2448 1/min	2448 1/min
Pindkiirus	60 m/min	60 m/min	60 m/min
Lõikekiirus	1469 mm/min	910 mm/min	516 mm/min
Ettenihe hambale	0,15 mm	0,09 mm	0,05 mm

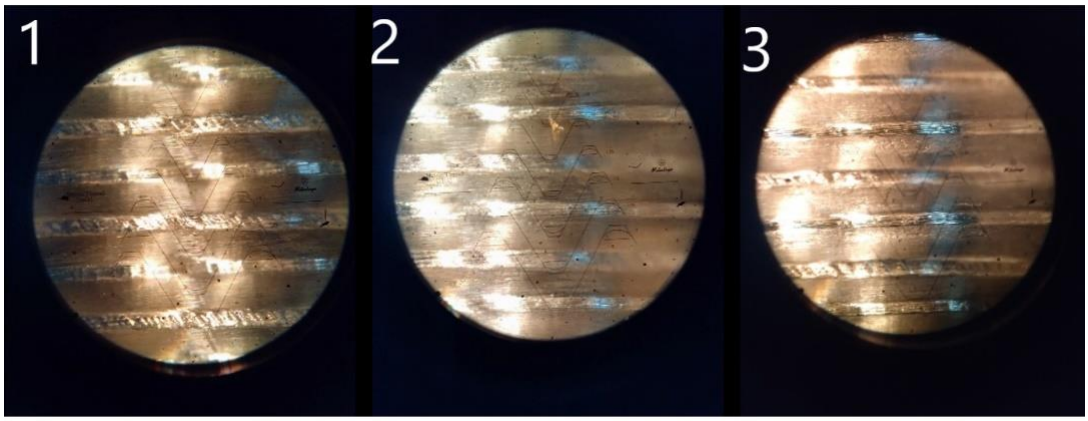
Igal katsel oli erinev lõikekiirus, lõikesügavus ja ettenihe hamba kohta, aga iga katsete tsükliaeg oli 50 sekundit.

Katsete tulemusena valmis kolm katsekeha, igal viis freesitud M10 keeret. Valminud katsekehad on kujutatud joonisel 37.



Joonis 37. Valminud katsekehad.

Keerme pindasi võrreldi visuaalselt mikroskoobiga. Joonisel 38 on 20 kordne suurendus freesitud keermetest, igalt katsekehalt üks pilt.



Joonis 38. Mikroskoobiga tehtud pildid.

Visuaalselt on näha kuidas esimese katsekeha keermetel on ühtlase vahega ebaühtlane pind. See viitab olukorrale, kus liiga madal koormus tööriistale tekitab vibratsiooni, mis omakorda tekitab ebaühtlast lõiget. Teise katsekeha keermed on ühtlasema ja läikivama pinnaga. Suurem koormus lõikeriistale on tulemuse üks osa. Kolmanda katsekeha keermed on ühtlase kuid mitteläikiva pinnaga. Liiga suur koormus lõikeriistale on tulemuse üks põhjuseid.

7. ÕPPEMATERJALI LOOMINE

7.1. Õppematerjal

Keermete freesimine on töötlemistehnika valdkonda kuuluv tehnoloogiline protsess, mille mõistmine ja korrektne rakendamine on võimalik nii kutseõppes kui ka tööstuspraktikas. Käesoleva õppematerjali eesmärk on pakkuda õppijale süsteemset ja praktilist ülevaadet keermete freesimise põhimõtetest, töövõtetest, lõikeriistadest ning seadistustest. Materjal on suunatud arvjutimisega tööpinkide õppeainetes kasutamiseks. Õppematerjal on koostatud põhinedes Eesti Maaülikoolis õpetavate arvjutimisega tööpinkide õppeainetes õppestiilile, vajadustele ja masinapargi võimekusele. Sisendi on andnud arvjutimisega tööpinkide õppeaine vastutav õppejõud.

Õppematerjali sisu on koostatud tuginedes käesolevas magistritöös uuritud tehnilisele kirjandusele, CNC-töötlemise juhenditele ning õppepraktikast kogutud kogemustele. Materjali koostamisel on arvesse võetud ka õpetajate ja praktikute tagasisidet, et tagada selle praktilisus ja rakendatavus reaalses õppe- ja töökeskkonnas. Lisaks teoreetilisele osale sisaldab õppematerjal visuaalseid skeeme, tööprotsessi kirjeldusi, näidisülesandeid ning CNC-programmeerimise näiteid, mis toetavad õppija arusaamist ja oskuste kujunemist.

Õppematerjal on loodud selleks, et anda õppijale terviklik arusaam keermete freesimise protsessist, alates tehnoloogilistest põhimõtetest kuni praktilise rakendamiseni kaasaegsete digitaaltööriistade abil. Eesmärk ei ole ainult tutvustada keermete freesimise teooriat, vaid ka arendada oskusi ja teadmisi erinevatest tootmis tehnoloogiatest. Tulenevalt vajadusest õpetada kuidas kasutada NC-koodi generaatoreid ja CAM-tarkvara, et automatiseerida keermefreesimise protsessi, keskendub õppematerjal nendele tehnoloogiatele.

7.2. NC-koodi generaatori õppematerjal

Õppematerjal on jagatud kaheks osaks. Esimene osa on sissejuhatus, kus keskendutakse keermete freesimise tehnoloogia ja NC-koodi generaatorite tutvustusele. Teises osa on praktiline ülesanne, kus vastavalt lähteülesandele luuakse NC-generaatorit kasutades NC-kood.

Sissejuhatuses on ülevaade keermefreesimis tehnoloogia kohta. Seletatud on selle teooria ja tööpõhimõte. Keermete freesimiseks on vaja mõista, millist keeret toodetakse. Juhendis on seletus, milliseid parameetreid tuleb jälgida keermete tootmisel ja kuidas neid kasutada.

Praktilises osas on juhend praktilise ülesande sooritamiseks. Praktiliseks ülesandeks on toota sise- ja väliskeere M10x1.5 suuruses kasutades NC-koodi generaatorit ja CNC-töötlemiskeskust. Praktilises ülesandes kasutatakse VARGUS GENius NC-koodi generaatorit, millega on vaja luua sobilik NC-kood, et toota lisas 2 olevale joonisele vastav detail. Lisas 2 on joonis, millel on defineeritud detail, millel on olemas sise- ja väliskeere.

Valminud detailile on vaja teostada kvaliteedikontroll, kus kontrollitakse, kas valminud keermed vastavad joonisel defineeritud nõuetele. Vajadusel saab seadistust muuta ja detaili töödelda, kuniks on jõutud vastuvõetava tulemuseni.

7.3. CAM õppematerjal

Sarnaselt NC-koodi generaatori juhendile on CAM õppematerjal jagatud kaheks osaks. Esimene osa on sissejuhatus, kus keskendutakse keermete freesimise tehnoloogia ja CAM süsteemi tutvustusele. Teises osa on praktiline ülesanne, kus vastavalt lähteülesandele luuakse Fusion- i CAM moodulti kasutades NC-kood.

Sissejuhatuses on ülevaade keermefreesimis tehnoloogia kohta. Seletatud on selle teooria ja tööpõhimõte. Keermete freesimiseks on vaja mõista, millist keeret toodetakse. Juhendis on seletus, milliseid parameetreid tuleb jälgida keermete tootmisel ja kuidas neid kasutada.

Praktilises osas on juhend praktilise ülesande sooritamiseks. Praktiliseks ülesandeks on toota sise- ja väliskeere M10x1.5 suuruses kasutades Fusion-i CAM paketti ja CNC-töötlemiskeskust. CAM paketiga on vaja luua sobilik NC-kood, et toota Lisas 1 ja lisas 2 olevatele joonistele vastavad detailid. Joonistel on detailid, millel on defineeritud detailid, millel on olemas sise- ja väliskeere vastavalt.

Valminud detailidele on vaja teostada kvaliteedikontroll, kus kontrollitakse, kas valminud keermed vastavad joonistel defineeritud nõuetele. Vajadusel saab seadistust muuta ja detaili töödelda, kuniks on jõutud vastuvõetava detailini.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärk oli luua õppematerjal keermefreesimise tehnoloogia õpetamiseks Eesti Maaülikooli lõiketöötlemisega seotud õppeainetes. Töö keskendus keermefreesimise tehnoloogia teoreetilisele käsitlusele, praktilistele katsetele ning NC-koodi ja CAM-tarkvara kasutamisele keerme tootmise protsessis.

Töö käigus koostati ülevaade keermefreesimise tehnoloogiast ja selle tööpõhimõttest: kuidas toimuvad töörajade liikumised ja materjali töötlemine. Analüüsiti keermeprofiili rolli keermefreesimise protsessis. Tutvustati erinevaid keermefreesi tüüpe ja nende kasutusvõimalusi. Kirjeldati NC-koodi loomise põhimõtteid käsitsi, makrode ning generaatorite ja CAM süsteemide abil. Viidi läbi praktilised katsed keermefreesimisega, et hinnata erinevate lõikeparameetrite mõju keerme kvaliteedile. Koostati õppematerjal, mis sisaldab teoreetilist osa, praktilisi juhendeid ja ülesandeid.

Töö tulemused näitasid, et keermefreesimine on sobiv tehnoloogia ka piiratud spindlivõimsusega seadmetel, kui kasutada sobivaid tööriistu ja lõikeparameetreid. Katsete käigus selgus, et lõikeparameetrite valik mõjutab oluliselt keerme pinna kvaliteeti. Katsete tulemusel selgus, et liiga madal või liiga kõrge koormus võib põhjustada vibratsiooni või tööriista ülekoormust.

Õppematerjal, mis loodi töö tulemusena, on rakendatav nii kutseõppes kui ka tööstuspraktikas. See toetab õppijate arusaamist keermefreesimise protsessist ning arendab tedamisi materjali töötlemis tehnoloogiatest ja oskusi NC-koodi loomisel.

Töös seatud eesmärgid said täidetud. Tulemuseks valmis ülevaade keermefreesimis tehnoloogiast ja selle põhjal õppematerjal, mida saab kasutada praktilises õppes.

Töö tulemusi saab rakendada õppetöös, CNC-õppelabori arendamisel ning täiendusõppes. Edasised uurimisvõimalused hõlmavad keermefreesimise optimeerimist erinevates materjalides, tööriistade kulumiskindluse analüüsi ning erinevate keermeprofiilide automatiseeritud tootmist.

ALLIKALOEND

[1] AB Sandvik Coromant. (2010) Metal Cutting Technology Training Handbook.

[2] **W. A. Atley** (1943) Thread grinding. [veebileht]

[3] **Y.Li, S. Zhao** (2011) Research on Thread Forming Process of Extrusion Tapping of Internal Thread

[4] **G. Fromentin. G. Poulachon** (2009) Geometrical analysis of thread milling—part 1: evaluation of tool angles

[5] Threading (manufacturing) [veebileht] https://en.wikipedia.org/wiki/Threading_(manufacturing) (02.05.2025)

[6] **V. S. Sharma, G. Fromentin, G. Poulachon, R. Brendlen** (2014) Investigation of tool geometry effect and penetration strategies on cutting forces during thread milling

[7] Mehaanikainseneri käsiraamat (2021) Tallinn: TTÜ kirjastus.

[8] ISO general purpose screw threads — Basic and design profiles — Part 1: Metric screw threads [veebileht] https://www.evs.ee/et/iso-68-1-2023 (02.05.2025)

[9] ISO general purpose metric screw threads [veebileht] https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:261:ed-2:v1:en (02.05.2025)

[10] ISO general purpose metric screw threads — Selected sizes for bolts, screws, studs and nuts [veebileht] https://www.evs.ee/et/iso-262-2023 (02.05.2025)

[11] ISO general purpose metric screw threads — Basic dimensions [veebileht] https://www.evs.ee/et/iso-724-2023 (02.05.2025)

[12] ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 1: Principles and basic data [veebileht] ISO/DIS 965-1(en), ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 1: Principles and basic data (02.05.2025)

[13] Threading Application guide [veebileht] https://cdn2.sandvik.coromant.com/publications/da120b31-2751-453d-951f-470817af080f.pdf?sv=2025-01-05&st=2025-05-25T17%3A17%3A33Z&se=2025-05-25T18%3A22%3A33Z&sr=b&sp=r&rscd=inline%3B+filename%3DC-2920-031.pdf&rsct=application%2Fpdf&sig=5qiYHmxz9RHnMZMDSthAh9AkCAntHs5mRrLSl5RyV6A%3D (02.05.2025)

[14] 326R06-B1502006-CH 1025 [veebileht] https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/milling-tools/solid-carbide-end-mills/coromill-326/assortment-coromill-326?taxonomy=TL%2FMIL (02.05.2025)

[15] Thread Milling Cutters – Multi – Form – Long Flute- Metric [veebileht] https://www.harveytool.com/products/thread-milling-cutters---multi-form---long-flute---metric (02.05.2025)

[16] Selecting a Thread Mill That Matches Your Needs [veebileht] https://www.mmsonline.com/articles/selecting-a-thread-mill-that-matches-your-needs (02.05.2025)

[17] TMS • Thread Milling System • Thread Mills • Normal • STN27 [veebileht] https://www.kennametal.com/us/en/products/p.tms-thread-milling-system-thread-mills-normal-stn27.1280548.html (02.05.2025)

[18] 1.5mm Pitch 3 Teeth - M10 x 1.5 Solid Carbide Thread Mill - TiXco Coated [veebileht] https://www.ewequipment.co.uk/products/0-7mm-pitch-3-teeth-m4-x-0-7-solid-carbide-thread-mill-tixco-coated (02.05.2025)

[19] TC620-M10-A1E-WB10TJ [veebileht] https://www.walter-tools.com/en-us/search/product/tc620-m10-a1e-wb10tj?t=Technical%20information (02.05.2025)

[20] MTECD-ISO [veebileht] https://catalog.tungaloy.com/item.aspx?cat=5667198&fnum=2014&mapp=TH&app=462&Lang=EN&GFSTYP=M&isoD=1 (02.05.2025)

[21] Combination Drill/Thread Mills [veebileht] https://www.harveytool.com/products/combination-drillthread-mills (02.05.2025)

[22] VARGUS GENius Software – Thread Milling Calculator [veebileht] https://www.vargus.com/en/vargus-genius/ (02.05.2025)

[23] Haas Super Mini Mill [veebileht] https://microfluidics.cnsi.ucsb.edu/wiki/doku.php?id=haas_mini_mill (02.05.2025)

[24] Uddeholm Mirrax® 40 [veebileht] https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/216/productdb/api/tech_uddeholm-mirrax-40_en.pdf (02.05.2025)

[25] Calculate Machining Power and Torque for Cutting Tap Applications. [veebileht] Tapping Torque Calculator – Kennametal (02.05.2025)

[26] Mill-Thread Technical Section B12 [veebileht] https://www.carmexusa.com/contentonly.aspx?file=pdf/2021Metric/363-384_Mill_Thread_Technical_Section_M.pdf (02.05.2025)

[27] Precision GO Thread Ring Gauge (Tol. 6g) - M 10 x 1.5 [veebileht] https://voelkel.com/en/precision-go-thread-ring-gauge-tol.-6g-m-10-x-1.5/16196 (02.05.2025)

[28] Precision Thread Plug Gauge (Tol. 6H) - M 10 x 1.5 [veebileht] https://voelkel.com/en/precision-thread-plug-gauge-tol.-6h-m-10-x-1.5/16023 (02.05.2025)

LISAD

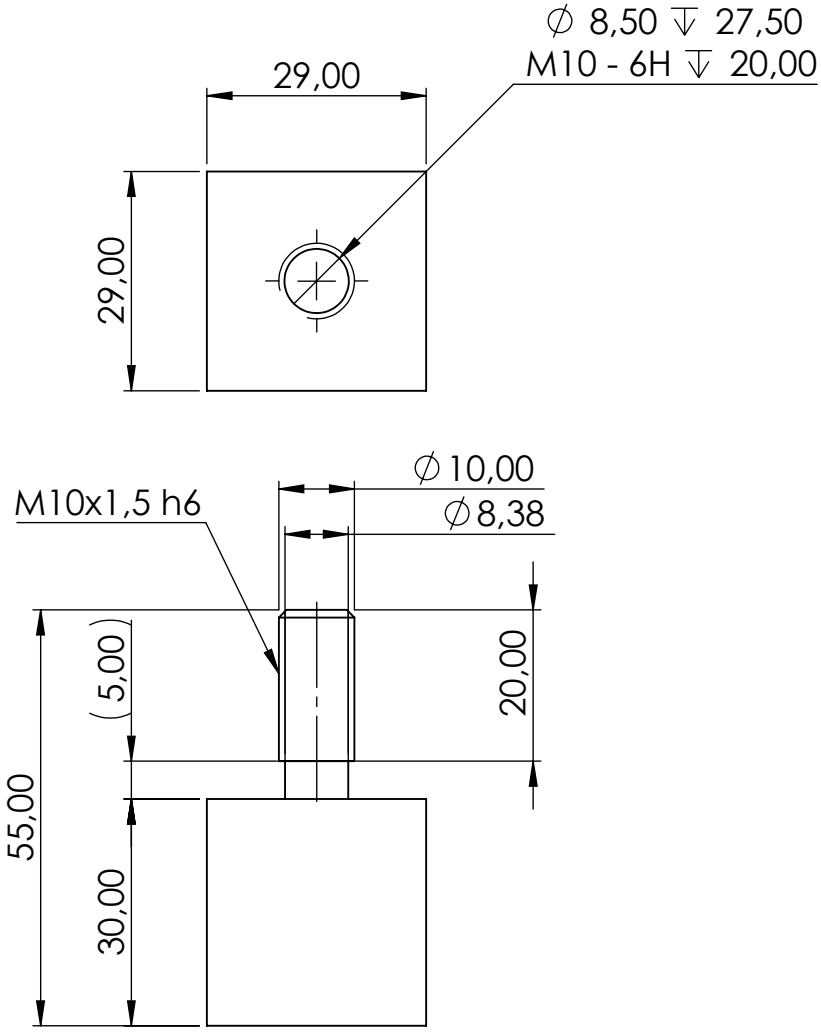
Lisa 1. Genereeritud NC-kood

```
G90 G00 G57 X0 Y0
G43 H10 Z0 M3 S2406
G91 G00 X0 Y0 Z-20.092
G01 G41 D10 X0.371 Y-0.150 Z0 F7.
G91 G03 X0.150 Y0.150 Z0.092 R0.150 F7.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.521 J0 F23.
G91 G03 X-0.150 Y0.150 Z0.092 R0.150
G00 G40 X-0.371 Y-0.150 Z0
G91 G00 Z-21.215
G01 G41 D10 X0.609 Y-0.345 Z0 F9.
G91 G03 X0.345 Y0.345 Z0.123 R0.345 F9.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
```

Lisa 1 järg

G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X0 Y0 Z1.500 I-0.954 J0 F28.
G91 G03 X-0.345 Y0.345 Z0.123 R0.345
G00 G40 X-0.609 Y-0.345 Z0
G90 G00 Z200.000
M5
M30

Lisa 2. Tehniline joonis



	Materjal: 1.0545 (S355N)	*Näitamata piirhälbed:* *ISO 2768 fK*	*Mass:* 198 g	*Mõõt:* 1:1
Teostas	üliõp. Märt Nõmme	*Nimetus:* Katsekeha		
Kontrollis	lektor Tõnu Leemet			
Kinnitas	lektor Tõnu Leemet			
Eesti Maaülikool		*Leht:* 1 / 1	*Tähis:* TA 25/190726 01 D	

Lisa 3. Õppematerjalid

EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

KEERMETE FREESIMINE NC-KOODI GENERAATORIGA

THREAD MILLING USING NC-CODE GENERATOR

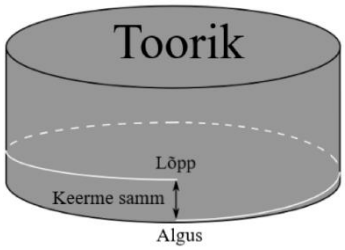
Õppematerjal

Tartu 2025

KEERMETE FREESIMINE

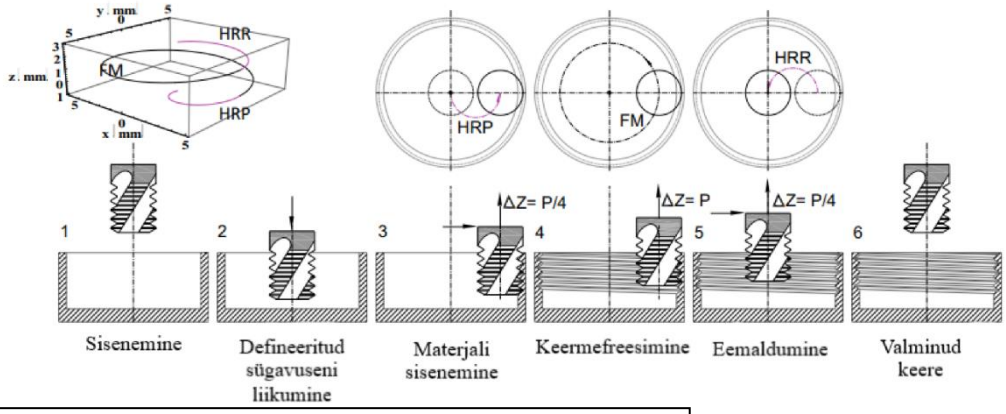
NC-koodi generaatori kasutamine

Keermefreesimine on tehnoloogiline freesimis protsess, kus pöörlev keermefrees freesib keeret kasutades spiraalset töörada, et luua keere. Keermefreesiga on võimalik toota parema- ja vasakukäe sise- ja väliskeermeid. Keerme freesimise spiraalne töörada on kujutatud joonisel 1.



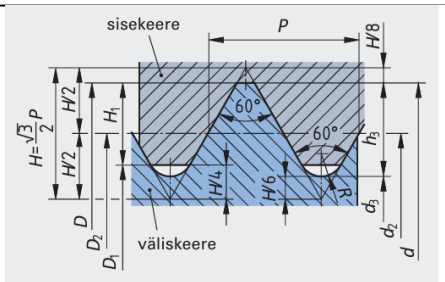
Joonis 1. Spiraalne trajektoor

Keermefreesimise protsess koosneb kuuest etapist. Esmalt joondatakse keermefrees keermeava teljega. Seejärel liigub frees töötlusavasse kuni defineeritud sügavuseni, määrates keerme sügavuse. Kolmandas etapis liigub keermefrees radiaalsuunas tooriku sisse ja hakkab materjali eelmadamine. Neljandas etapis toimub keerme freesimine, mille käigus liigub lõikeriist spiraalses trajektooris, iga täisringiga on liigutud mööda aksiaaltelge keerme sammu võrra edasi. Lõpuks eemaldatakse frees täielikult toorikust. Joonisel 2 on kujutatud keermefreesimis protsesse.



Joonis 2. Keermefreesimise protsess.

Korrektse mõõduga keerme freesimiseks tuleb kasutada sobivat keermefreesi ja vastavalt keermele korrektseid mõõtmeid. Joonisel 3 on ISO-keerme profiil koos tähistega.



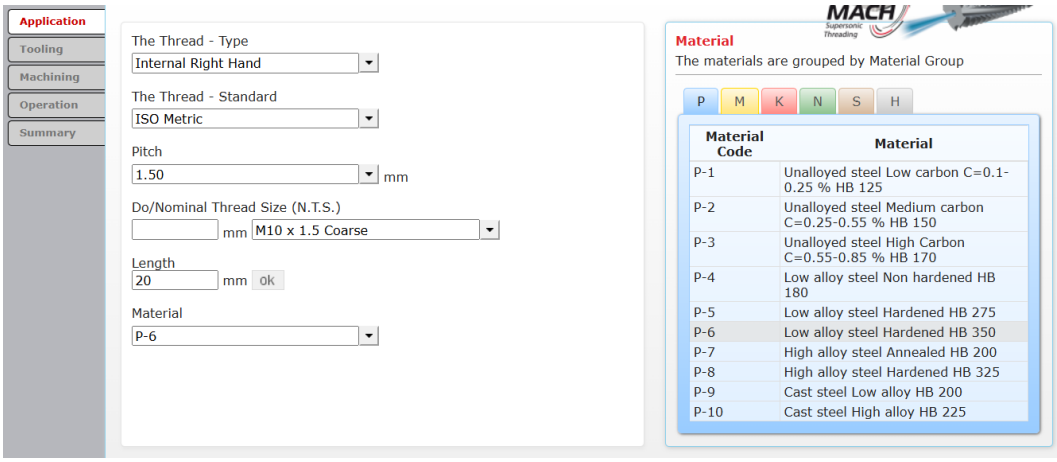
Keerme nimiläbimõõt	$d = D$
Keerme samm	P
Väliskeerme sügavus	$h_3 = 0.6134 \cdot P$
Sisekeerme sügavus	$H_1 = 0.5413 \cdot P$
Põhja raadius	$R = 0.1443 \cdot P$
Keskläbimõõt	$d_2 = D_2 = d - 0.6495 \cdot P$
Väliskeerme vähim läbimõõt	$d_3 = d - 1.2269 \cdot P$
Sisekeerme vähim läbimõõt	$D_1 = d - 1.0825 \cdot P$
Keermeava puuri läbimõõt	$= d - P$
Profiilinurk	60°
Arvutuslik ristlõikepindala	$S = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_2 + d_3}{2}\right)^2$

Joonis 3. ISO keerme profiil.

Praktilise osa eesmärk on arendada õppija oskusi lõiketöötluse tehnoloogia valdkonnas ning õpetada NC-koodi generaatori kasutamist. Praktiliseks ülesandeks on toota sise- ja väliskeere M10x1.5 suuruses kasutades NC-koodi generaatorit ja CNC-töötlemiskeskust. Praktilises ülesandes kasutatakse VARGUS GENius NC-koodi generaatorit, millega on vaja luua sobilik NC-kood, et toota Lisas 1 ja lisas 2 olevatele joonistele vastavad detailid.

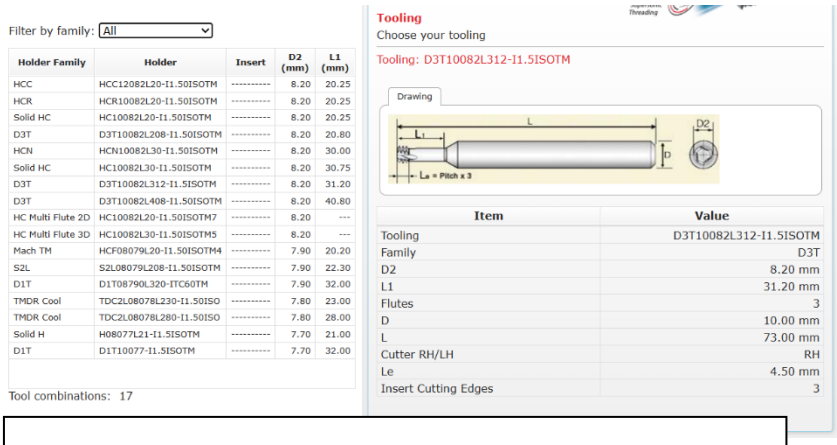
NC-koodi generaatorid on tarkvaralahendused, mis võimaldavad kasutajal määrata töötlusprotsessi jaoks vajalikud parameetrid ning genereerida nende põhjal automaatselt vastav NC-kood. VARGUS GENius tarkvara on saadaval https://www.vargus.com/en/vargus-genius/ lehelt. GENius tarkvara on võimalik kasutada netipõhiselt, alla laadida arvutisse ning IOS või Android seadmes.

NC-koodi generaatoris alustatakse parameetrite valimisega aplikatsiooni aknas, kus on vaja defineerida järgmised parameetrid: keerme tüüp, keerme standard, samm, keerme suurus, keerme pikkus ja töödeldav materjal. Joonisel on näide aplikatsiooni parameetrite valikust. Sisekeerme tootmisel valida sise paremkeere (Internal Right Hand) ja väliskeerme tootmisel välis paremkeere (External Right Hand).



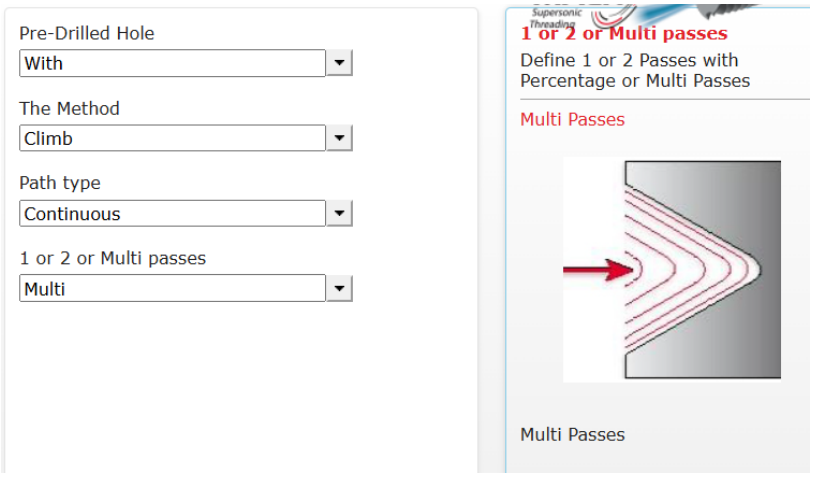
Joonis 4. Lõikeriista profiili valik.

Tööriista aknas on vaja valida sobiv lõikeriist. GENius tarkvara sisaldab VARDEXi lõikeriistade profiile. Joonisel on näide lõikeriista profiili valikust.



Joonis 5. Masintöötluse parameetrid.

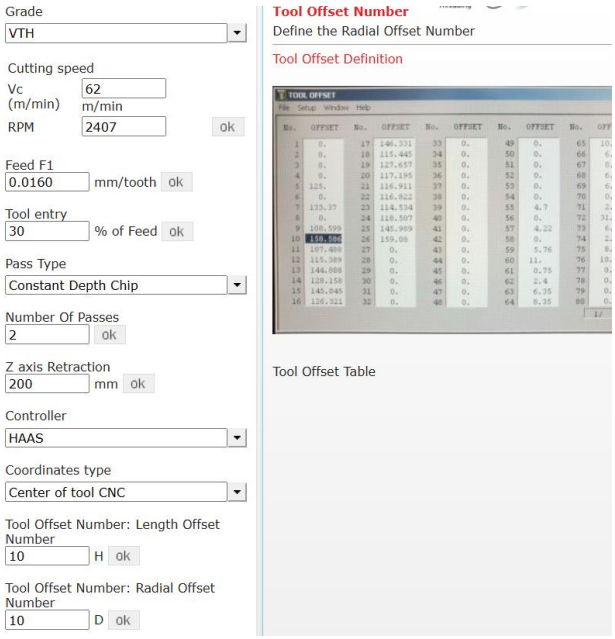
Masintöötluse aknas defineeritavad valikud sõltuvad valitud lõikeriista järgi kuna erinevad lõikeriistad võimaldavad erinevaid kasutus viise. Valitud lõikeriist vajab järgmisi parameetreid: keermeava olemasolu, lõikesuund, tööraja tüüp ja lõikesügavuse parameetrid. Joonisel on näide masintöötluse parameetrite valikust.



Joonis 6. Masintöötluse parameetrid.

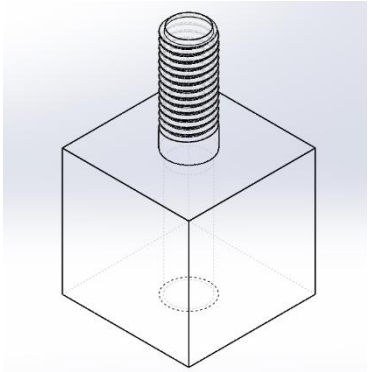
Operatsiooni aknas defineeritakse lõikekiirus, ettenihke kiirus, lõikriista sisenemise määr, lõikesügavuse valik, Z-teljes tagasitõmbumine, kontrolleri valik, lõikeriista koordinaatide tüüp ja nihkeregistris lõikeriista pikkuse ja läbimõõdu number. Joonisel on näide operatsiooni parameetrite valikust.

Lõikekiirused on loodud automaatsed vastavalt valitud materjalile ja lõikeriistale. Lõikekiirused on võimalik muuta vastavalt vajadusele. Soovituslik on parameetrid välja arvutada vastavalt materjalile ja lõikeriista tootja poolsete lõikeparameetrite järgi.



Joonis 7. Operatsiooni parameetrid.

Veenduda, et oleks valitud õige kontroller ja genereerida kood. Kood laadida CNC-töötlemiskeskusesse ja luua TA 25/190726 01 D detail vastavalt joonisele. Joonisel 8 on kujutatud TA 25/190726 01 D detaili. Valminud keermele teostada kvaliteedi kontroll.



Joonis 8. Detail TA 25/190726 01 D.

EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

KEERMETE FREESIMINE CAM TARKVARAGA

THREAD MILLING USING CAM SOFTWARE

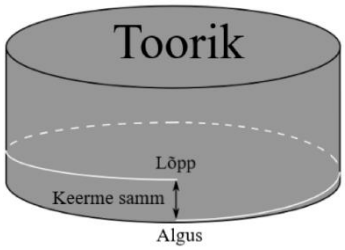
Õppematerjal

Tartu 2025

KEERMETE FREESIMINE

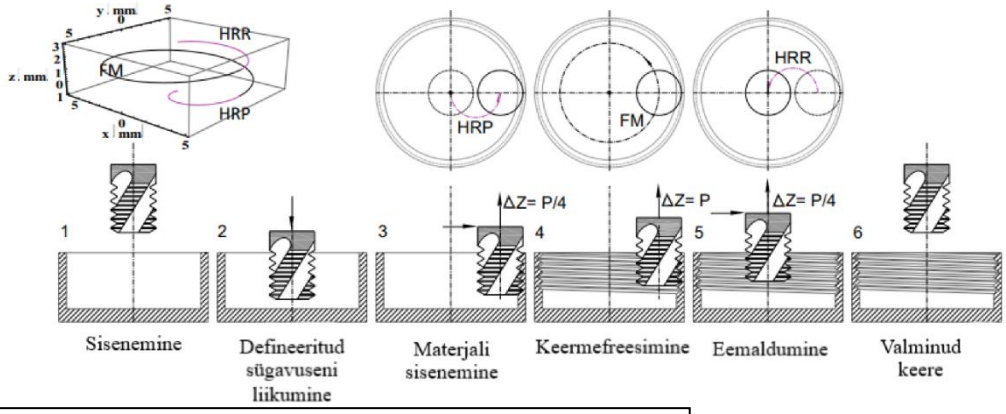
NC-koodi generaatori kasutamine

Keermefreesimine on tehnoloogiline freesimis protsess, kus pöörlev keermefrees freesib keeret kasutades spiraalset töörada, et luua keere. Keermefreesiga on võimalik toota parema- ja vasakukäe sise- ja väliskeermeid. Keerme freesimise spiraalne töörada on kujutatud joonisel 1.



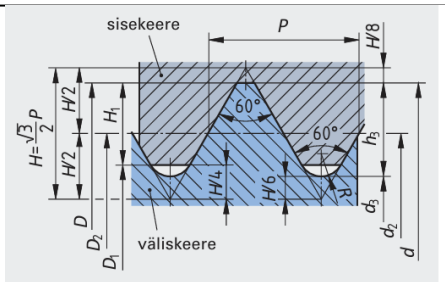
Joonis 1. Spiraalne trajektoor

Keermefreesimise protsess koosneb kuuest etapist. Esmalt joondatakse keermefrees keermeava teljega. Seejärel liigub frees töötlusavasse kuni defineeritud sügavuseni, määrates keerme sügavuse. Kolmandas etapis liigub keermefrees radiaalsuunas tooriku sisse ja hakkab materjali eelmadamine. Neljandas etapis toimub keerme freesimine, mille käigus liigub lõikeriist spiraalses trajektooris, iga täisringiga on liigutud mööda aksiaaltelge keerme sammu võrra edasi. Lõpuks eemaldatakse frees täielikult toorikust. Joonisel 2 on kujutatud keermefreesimis protsesse.



Joonis 2. Keermefreesimise protsess.

Korrektse mõõduga keerme freesimiseks tuleb kasutada sobivat keermefreesi ja vastavalt keermele korrektseid mõõtmeid. Joonisel 3 on ISO-keerme profiil koos tähistega.



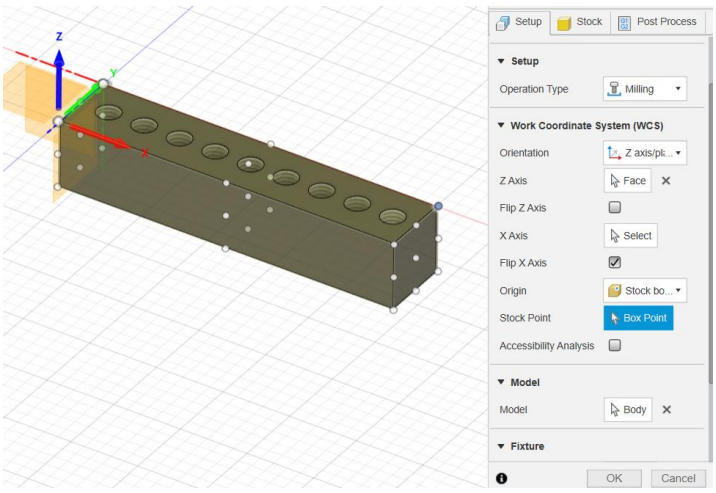
Keerme nimiläbimõõt	$d = D$
Keerme samm	P
Väliskeerme sügavus	$h_3 = 0.6134 \cdot P$
Sisekeerme sügavus	$H_1 = 0.5413 \cdot P$
Põhja raadius	$R = 0.1443 \cdot P$
Keskläbimõõt	$d_2 = D_2 = d - 0.6495 \cdot P$
Väliskeerme vähim läbimõõt	$d_3 = d - 1.2269 \cdot P$
Sisekeerme vähim läbimõõt	$D_1 = d - 1.0825 \cdot P$
Keermeava puuri läbimõõt	$= d - P$
Profiilinurk	60°
Arvutuslik ristlõikepindala	$S = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_2 + d_3}{2}\right)^2$

Joonis 3. ISO keerme profiil.

Praktilise osa eesmärk on arendada õppija oskusi lõiketöötluse tehnoloogia valdkonnas ning õpetada NC-koodi generaatori kasutamist. Praktiliseks ülesandeks on toota M10x1.5 suuruses sise- ja väliskeere kasutades CAM tarkvara ja CNC-töötlemiskeskust. Praktilises ülesandes kasutatakse Autodesk Fusion-it, millega on vaja luua sobilik NC-kood, et toota vastavalt joonisele TA 25/190726 01 D detail.

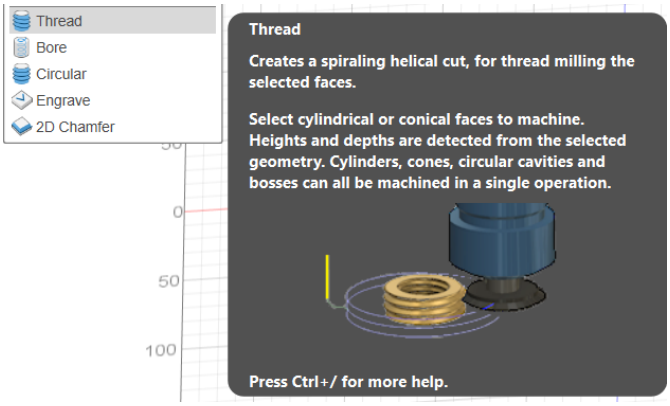
Autodesk Fusion-it, mis on CAD/CAM/CAE tarkvaraplatvorm. Sellese on ühendatud 3D-modelleerimise, simulatsiooni, tootmise ja dokumentatsiooni tööriistad. Kasutades selle sisseehitatud CAM-mooduli on võimalik luua CNC-töötlusstrateegiaid otse 3D-mudeli põhjal. Fusion-is on CAM manufacturing ehk tootmis keskkonnas. Fusion-i CAM-moodul toetab keermefreesimist, millega on võimalik luua parem- ja vasak sise- või väliskeeret.

CAM tarkvaras algab protsess seadistuse loomisega. Seadistus (*Setup*) esimene samm CNC-töötluse strateegia loomisel. Sellega defineeritakse, mis asendis ja suunas detail asub masina koordinaatsüsteemis, ning luuakse alus kõikidele järgneva(te)le töötlusoperatsioonidele



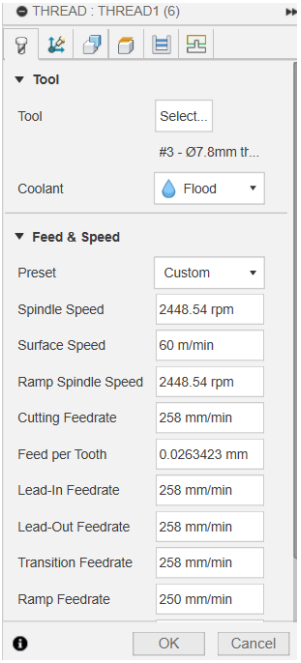
Joonis 4. Seadistamine.

Keermefreesimiseks valida 2D funktsioonide valikust keermefreesimise (*Thread*) töötlusstrateegia. Keermefreesimis käsuga luuakse spiraalne töörada, millega on võimalik silindrilistele või koonilistele pindadele luua keere.



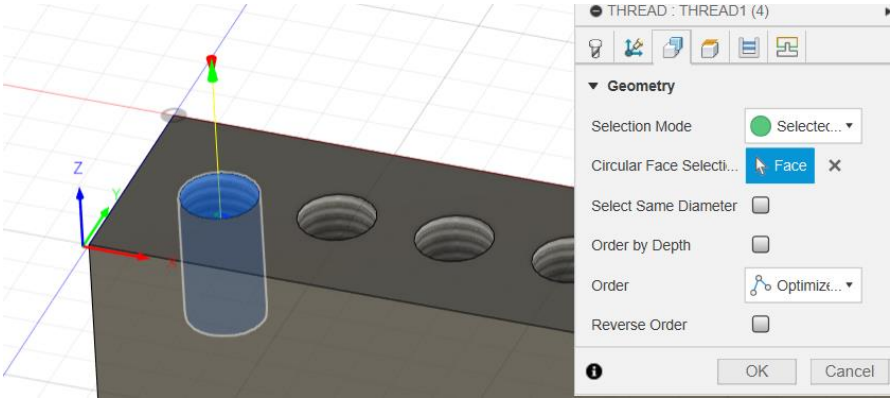
Joonis 5. Keermefreesimise funktsioon.

Funktsiooni esimeses aknas on võimalik valida tööriistakogust sobiv keermefrees, millega keermed toodetakse. Sobiva lõikeriista puudumisel on võimalik luua sobiv lõikeriista profiil. Samas aknas on võimalik määrata, milliste lõikekiirustega protsess läbi viiakse. Lõikeriista profiilile on võimalik lisada eelseadistatud parameetrid erinevate materjalide töötlemise jaoks Nende puudumisel või optimeerimise eesmärgil võib arvutada ja üle kirjutada uute väärtustega.



Joonis 6. Funktsiooni aken.

Geomeetria aknas tuleb defineerida millisele pinnale keere luuakse. Sobilikud on silindrilised või koonilised pinnad, mõlemad võivad olla avad või võllid.



Joonis 7. Geomeetria aken.

Läbimiste aknas saab määrata, kuidas tööriist lõikab materjali. Valida saab, kui sügavalt, kui palju kordi, millise trajektooriga ja millise suunaga. Läbimiste akna peamised valikud:

- Keerme suund (*Threading Hand*)

Võimalik valida parem- ja vasakkeerme vahel.

- Keerme samm (*Thread Pitch*)

Keerme sammuga määratakse keerme samm ja sellega sammu spiraali tõusu.

- Sammu läbimõõdu nihe (Pitch Diameter Offset)

Sammu läbimõõdu nihe defineerib, kui suure läbimõõduga keere toodetakse. Valikus on vaja sisestada läbimõõt. DIN 13-19 ehk üldotstarbe ISO meeterkeerme profiili standardis on antud sisekeerme sügavus, tähisega H1, mis on võimalik leida sisekeerme sügavuse valemiga.

Sisekeerme sügavuse valem

$$H_1 = 0{,}5413P, \quad (1)$$

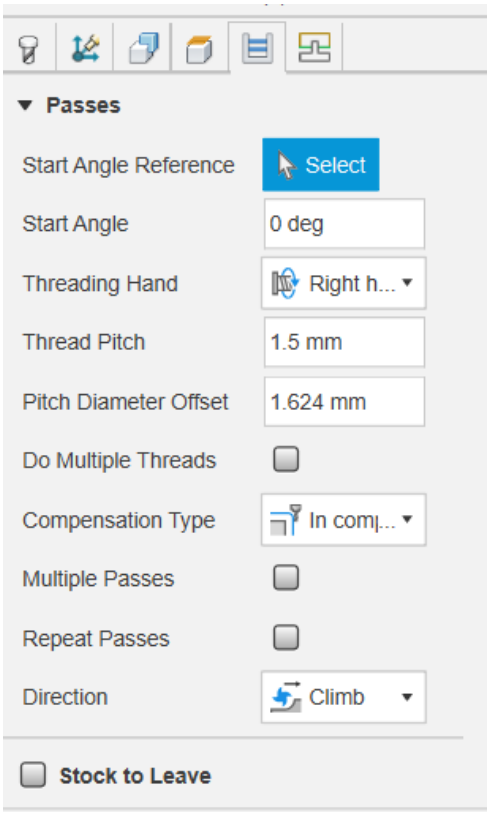
kus H_1 – sisekeerme sügavus;
P – keereme samm.

Sammu läbimõõdu nihe ei ole DIN 13-19 ehk üldotstarbe ISO meeterkeerme profiili standardis märgitud, see tuleb arvutada kasutades sammu läbimõõdu nihke valemit.

Sammu läbimõõdu nihke valem

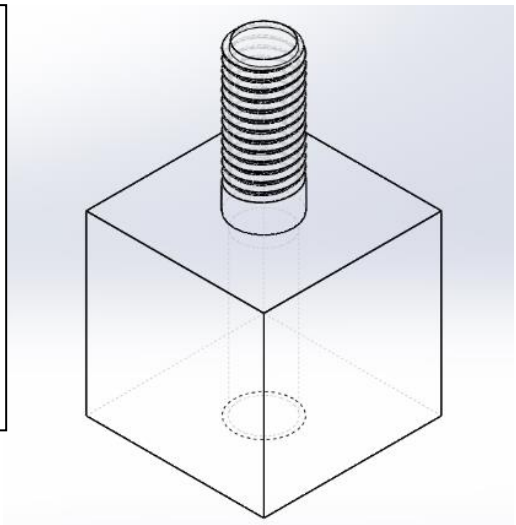
$$D_{samm} = 2H_1 \quad (2)$$

kus D_{samm} – sammu läbimõõdu nihe;
H_1 – sisekeerme sügavus.



Joonis 8. Läbimite aken.

Veenduda, et kõik parameetrid sobivad ja genereerida kood. Kood laadida CNC-töötlemiskeskusesse ja toota TA 25/190726 01 D detail vastavalt joonisele. Joonisel 8 on kujutatud TA 25/190726 01 D detaili. Valminud keermele teostada kvaliteedi kontroll.



Joonis 9. Detail TA 25/190726 01 D.

Mina, Märt Nõmme,

sünniaeg 02.09.1999,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

   Keermete freesimine,

   mille juhendajad on Tõnu Leemet ja Marten Madissoo,

   salvestamiseks säilitamise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi EMU DSpace lisamiseks ja Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates lõputööd reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. olen teadlik, et lihtlitsentsiga antavad õigused jäävad alles ka mulle;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Juhendaja(d) (allkirjastatud digitaalselt, kuupäev digitaalallkirjas