



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

## **SURVEVALUVORMIMISE TSÜKLIAJA LÜHENDAMINE**

### **SHORTENING OF THE INJECTION MOULDING CYCLE TIME**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Markkus Merimetsa

Üliõpilaskood 093462KAOB

Juhendaja: Triinu Poltimäe, vanemlektor

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." ..... 202.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 202.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Markkus Merimetsa, 093462KAOB  
Õppekava, peeriala:KAOB02/09, Materjalitehnoloogia  
**Juhendaja(d):** Triinu Poltimäe, vanemlektor, 620 2910  
**Konsultant:** Erkki Päev, pressvormide projektijuht  
Norma AS, +372 6500 188, erkki.paev[at]autoliv.com

### Lõputöö teema:

SURVEVALUVORMIMISE TSÜKLI AJA LÜHENDAMINE  
SHORTENING OF THE INJECTION MOULDING CYCLE TIME

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Tsükliaja vähendamine jahutuskanalite optimeerimisega
2. Kujumoodustavate detailide optimeeritud disain

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetilise tausta kirjanduse uurimine	29.09
2.	Disaini valmistamine	29.10
3.	Moldex analüüs	15.12

**Töö keel:** Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....202....a

**Üliõpilane:** Markkus Merimetsa ..... ".....".....202....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** Triinu Poltimäe ..... ".....".....202....a  
/allkiri/

**Konsultant:** Erkki Päev ..... ".....".....202....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** Tiia Plamus ..... ".....".....202....a  
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
SISSEJUHATUS .....	7
1 SURVEVALUVORMIMINE .....	8
1.1 Survevalu vormimisel kasutatavad plastid .....	10
1.2 Survevalu vormi ehitus.....	10
1.3 Jahutussüsteem.....	12
1.4 Vormi hinna kujunemine .....	13
2 VORMI MATERJALIDE NING TÖÖTLUSE VALIK.....	15
2.1 Plastiga kokkupuutuvate materjalide valik.....	15
2.1.1 Pindkarastatavad terased .....	16
2.1.2 Nitreeritavad terased .....	16
2.1.3 Läbikarastatavad terased .....	17
2.1.4 Korrosioonikindlad terased.....	17
2.1.5 Martensiit-terased.....	18
2.1.6 3D prinditavad terased.....	18
2.2 Plastiga mittekokkupuutuvad vormiosad.....	19
2.3 Pressvormide detailide töötlus .....	21
2.3.1 Freesimine.....	21
2.3.2 Mahterosioon .....	22
2.3.3 Lihvimine ja poleerimine .....	22
3 JAHTUSKANALITE OPTIMEERIMINE .....	23
3.1 Katsete hüpotees.....	23
3.2 Katsete algandmed .....	23
3.3 Analüüs 1 .....	24
3.3.1 Matriits .....	24
3.3.2 Tempel.....	26
3.3.3 Analüüs 1 tulemus.....	27
3.4 Analüüs 2.....	30
3.4.1 Matriits .....	30
3.4.2 Tempel.....	31

3.4.3 Analüüs 2 tulemus.....	32
3.5 Analüüs 3.....	34
3.5.1 Matriits ja tempel .....	34
3.5.2 Analüüs 3 tulemus.....	35
3.6 Tulemuste analüüs ja järeldused .....	37
KOKKUVÕTE .....	38
SUMMARY .....	39
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	40

## **EESSÕNA**

Käesolev bakalaureusetöö valmis Norma AS algatusel ning keskendub peamiselt Norma AS tootmises olevate survealuvormide tehnoloogiale ning valmistamise meetoditele ning nende parendamisele. Valmistatud uued disainid võetakse kasutusele protovormi konstrueerimisel Norma AS Tööriistavabriku tootmises. Töö algandmed koguti Norma AS konstrueerimisbüroo abiga ning TalTech Protolabi toetusega.

Bakalaureusetöö sisaldab survealuvormide kujumoodustavate elementide optimeeritud jahutuskanalite disaine, Moldex3D survealuvormimise simulatsioonide analüüse ning jahutusaegade võrdlust.

Survealuvormimine, jahutuskanalid, tsükliäeg, bakalaureusetöö

## SISSEJUHATUS

Survevaluvormimine on enimkasutatud plastide töötlusprotsess, mis kujutab endast sulatatud plasti valamist vormi, et saavutada vajalik kuju. Seda tehnoloogiat kasutatakse enamasti termoplastidest (polüpropüleen, polüetüleen, polüamiidid) detailide, kuid ka vähesemal määral termoreaktiividest detailide tootmisel. Survevalu tehnoloogiaga on võimalik valmistada väga väikseid detaile nagu Lego klotsid, kuid ka suuri nagu autode kerepaneelid.

Tööstuse jaoks on survevaluvormimisel väga oluline faktor aeg, mille jooksul sulaolekus materjal vormi valatakse ning valmis detail eemaldatakse. Mida kiiremini see protsess toimub, seda rohkem detaile on võimalik toota. Tootmise üldkulud ning vormide valmistamise kulud on suured ning iga sekund, mis on võimalik tootmisprotsessis võita, on suure rahalise väärtusega. Võimalused tsükliaja vähendamiseks on limiteeritud, kuna iga protsessi osa võtab praeguse tehnoloogia juures oma kindla aja ning selle vähendamine on komplitseeritud. Selleks et saavutada eelis turul ning valmistada konkurentsivõimelise hinnaga plastidetaile, on vaja leida moodus, kuidas seda aega vähendada.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on leida võimalus, kuidas vähendada Norma AS survevaluvormimise tootmises tsükliajaga jahutuskanalite optimeerimisega. Selleks on vajalik disainida uued jahutuskanalid kujumoodustavate detailide (tempel ja matriits) sisse ning veenduda, et selle abil on võimalik tsükliajaga vähendada. Disaini muutmise jaoks on töös kasutatud CAD/CAM programmi „Siemens NX“. Tulemuste analüüsiks on kasutatud tarkvara „Moldex3D“, mille abil on võimalik simuleerida survevaluvormide reaalselt tööd etteantud tootmistingimustel, mis on igal simulatsioonil samad, et tulemused oleksid võrreldavad.

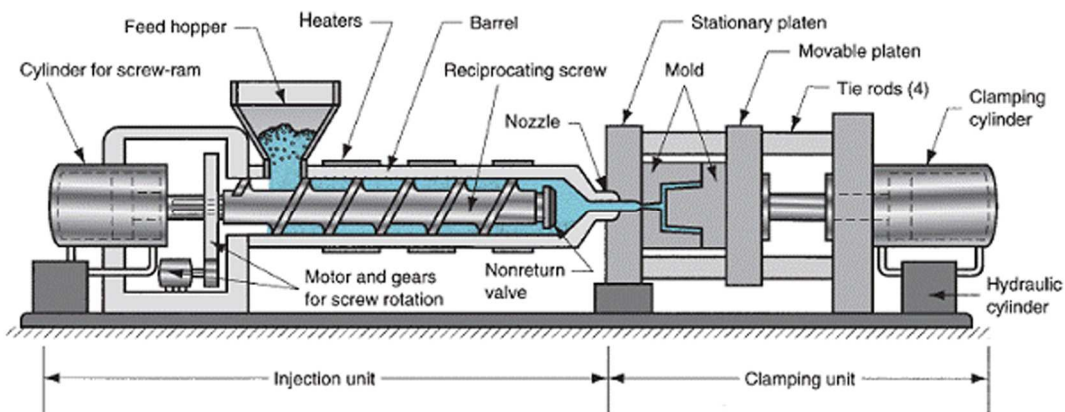
Bakalaureusetöö esimene peatükk koosneb survevaluvormimise ning sisetükiga survevaluvormimise kirjeldusest, kus on räägitud ka Norma AS vormide konstrueerimisest, erinevate plastide kasutusest, vormi hinna kujunemisest ning ka jahutussüsteemist. Teine peatükk koosneb plastiga kokkupuutuvate vormi materjalide ülevaatest, valikust ning nende töötlustest, mis on vormi konstrueerimisel kõige olulisemad detailid. Lühidalt kirjeldatakse ka standardosasid ning vormide baasplaate. Kolmandas peatükis on kolme erineva disaini kirjeldused ning jahutuskanalite optimeerimise tulemused.

# 1 SURVEVALUVORMIMINE

Survealuvormimine sai alguse aastal 1868, kui John Wesley Hyatt leiutas mooduse, kuidas tselluloidi vormivalamise abil, sai teha piljardipalle. Aastaks 1872 patendeeriti survealuvormimise masin, mis oli küll primitiivne, kuid sobis selleks otstarbeks. Aastal 1946 ehitati esimene kruviga survealuvormimise masin, mille silindri sees on kruvi, mis kuumutab ning segab materjali enne vormi valamist. Seda tehnoloogiat kasutatakse tänapäevani. [1]

Survealuvormimine on levinuim termoplastide ning termoreaktiivide töötlemismeetod. Survevalu protsessi kontseptsioon on lihtne – plasti graanulid valatakse toitelehtrisse (*feed hopper*), kust need langevad silindrisse (*barrel*), kus kruvi (*reciprocating screw*) sulatab plasti temperatuuril 100 °C – 270 °C ning tekitab rõhk 50 – 400 MPa, mis teeb plasti voolavaks. Seejärel surutakse plast läbi valukanali suletud vormi kujumoodustavatesse avadesse, kus see endiselt rõhu all olles võtab vormipesa kuju. Materjal jahutatakse maha samal ajal endiselt survet hoides. Vormi jahutamine toimub jahutuskanalite abil, mis on pesade insertide sisse töödeldud. Kui detail on piisavalt tahenenud, vorm avatakse ning valmis detailid eemaldatakse vormi liikuva poole küljest tõukursüsteemiga. [2]

Joonisel 1 on näidatud tüüpiline survealumasin.

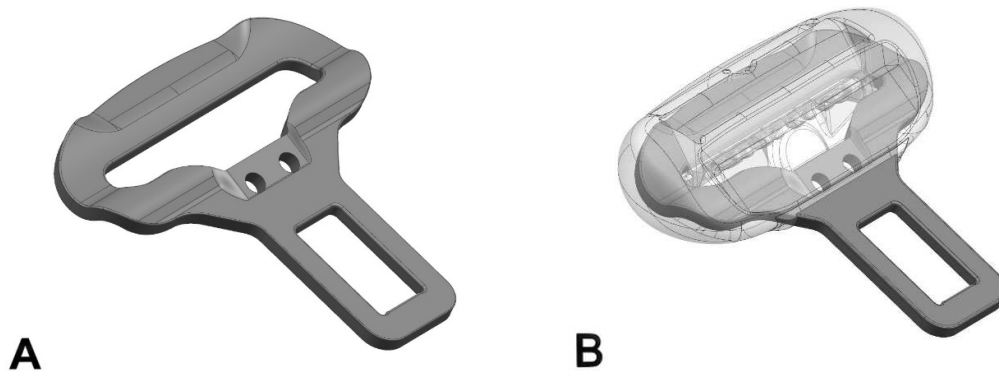


Joonis 1 Survealuseadme skeem [3]

Sisetükiga survealuvormimisel on kogu protsess sama, kuid vormi pesadesse pannakse raam (Norma AS puhul terasest), mille ümber valatakse plast. Selleks on vaja ka vormi disainimisel lisada kiilud, kuhu raam toetub. Selle protsessiga on võimalik teha

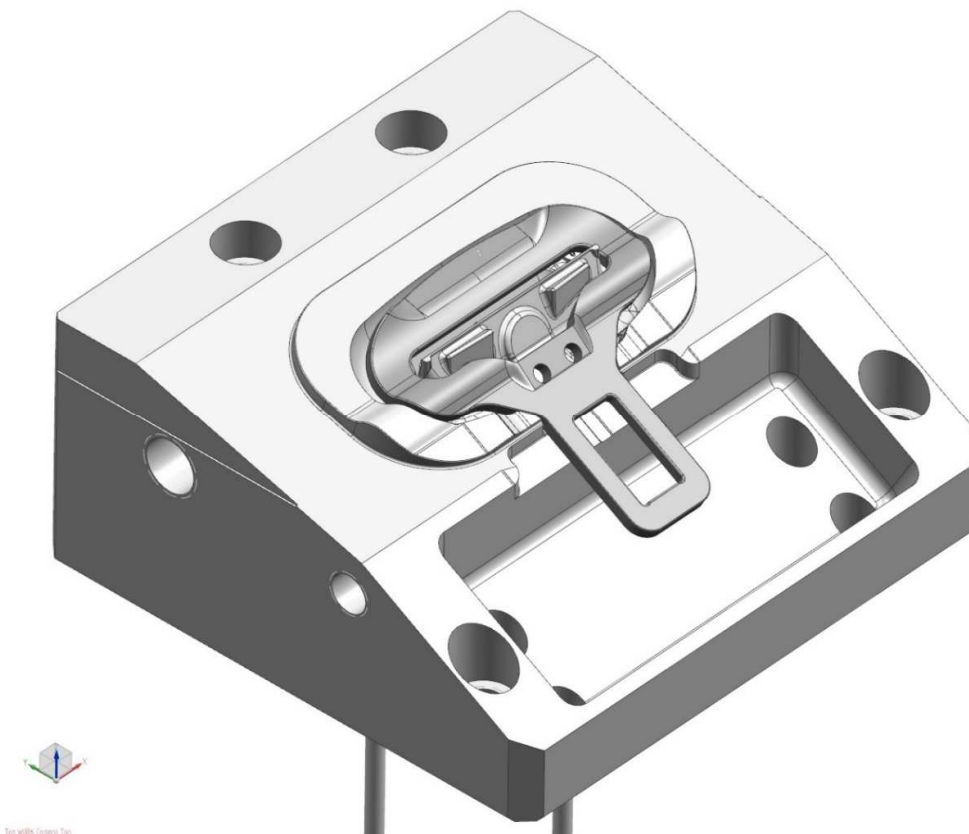


väga täpseid detaile nagu turvavöö keeled kui ka vähemtäpseid nagu kruvikeerajad, näpitsad ja muud tööriistad.



Joonis 2 Detail A armatuuri mudel, detail B lõpp-produkt

Joonisel 2 on näidatud detail A (armatuur), mis asetatakse kujumoodustava inserdi peale nagu näha joonisel 3. Seejärel vorm sulgub, ning sulaplast voolab avasse. Lõpptulemus on näha joonisel 2 detail B, kus on näha, et plast ümbritseb armatuuri ning see on lõpp-produkt.



Joonis 3 Kujumoodustava elemendi (templi) peale asetatud armatuur

## 1.1 Survealuvormimisel kasutatavad plastid

Plaste kasutatakse traditsiooniliste materjalide asendusena suures osas kuna nende töötlemine on odavam ning kergem. Plastid on ka korrosioonikindlad ning väga head elektri ning soojusisolaatorid. Lisaks võrreldes terasega on plast palju kergem ning mõned plastid on sarnase mehaanilise tugevusega. Plastide negatiivsed küljed on vähene temperatuuritaluvus, haprumine ning vananemine.

Plastid liigitatakse termilise käitumise järgi kahte gruppi: termoplastid ning termoreaktiivid. Termoplastid nagu näiteks polüpropüleen ning polükarbonaat pehmenevad kuumutamisel, misjärel muutuvad voolavaks. Jahutamisel tahenevad ning taastuvad endised omadused. Termoplaste kasutatakse enamjaolt tarbekaupades, kus ei ole nõutud suur temperatuuritaluvus. Termoreaktiivid muutuvad kuumutamisel ruumilise struktuuriga võrestikpolümeerideks, mis annab neile kõrge temperatuuritaluvuse ning keemilise vastupidavuse. Seetõttu kasutatakse termoreaktiive situatsioonides, kus on kõrgemad temperatuurid. Termoreaktiive ei saa enam uuesti sulatada ning ümbertöödelda, samuti on neil väiksem löögikindlus kui termoplastidel

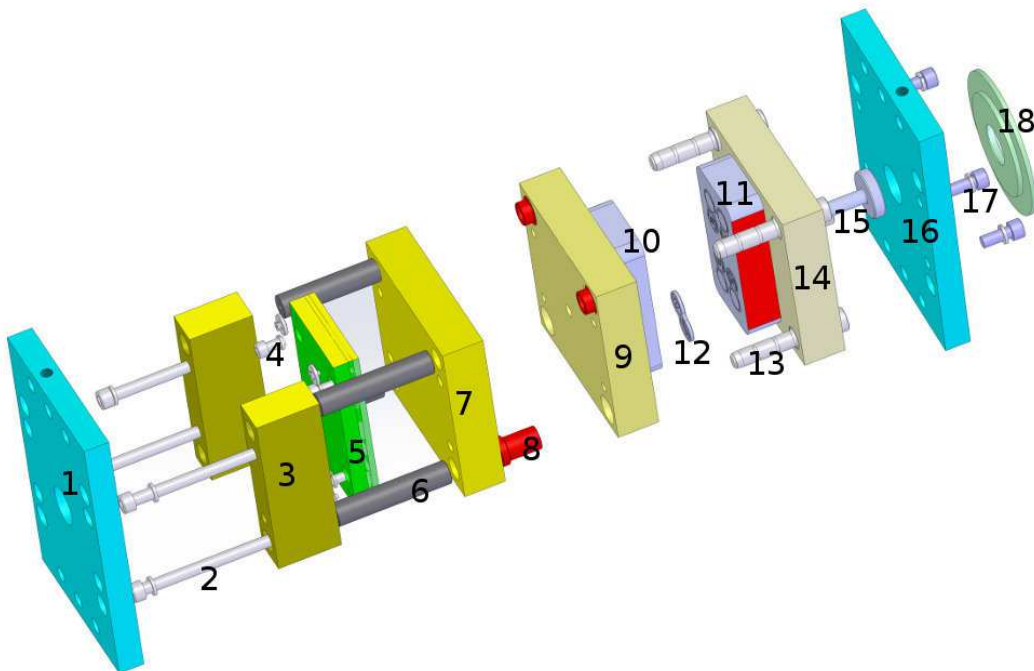
Termoplastide ning termoreaktiivide enimlevinud töötlemismeetod on survealuvormimine. Survealuvormimisega saab töödelda termoplaste nagu näiteks polüetüleen, polüpropüleen, polüamiidid, polüvinüülkloriid, polükarbonaat jpm. Termoreaktiividest töödeldakse survealuvormimise abil näiteks epoksüvaik ning fenoolformaldehüüdvaik. Autotööstuses turvavööde valmistamisel on peamiselt kasutusel polüpropüleen ning polüamiidid nende mehaaniliste tugevuste ning vastupidavuse tõttu.

## 1.2 Survealuvormi ehitus

Standardne survealuvorm koosneb kahest poolest – ülemine ning alumine. Ülemine pool on kinnitatud survealumasina külge ning ei ole liikuv. Ülemisse poolde surutakse plast sisse läbi väga täpse ava (*gate*) ning alumise poole ülesanne on liikuda ülemise poole vastu ning vorm kinni suruda, kuni plastdetail on kuju moodustanud ning piisavalt jahtunud. Seejärel alumise liikuva poolega tõugatakse tõukurisüsteemi abil valmisdetail ning plastijääk alumise pesaplaadi peale, kust see eemaldatakse juba järgmise süsteemi abil. [4]

Joonisel 2 on näidatud pressvormi dekonstrueeritud kujutis ning joonisel nummerdatud olulisemad osad on järgmised:

1. Vormi alumine liikuv pool. Sellele paigutatakse tõukursüsteem (2,3,4,5,6), tugiplaat (7) ning templihoidja koos puksiga (8,9)
10. Tempel – vormiv detail, millel on lõpptoodangu vajalik pool kujust.
11. Matriitsi insert – vormiv detail, millel on lõpptoodangu vajalik teine pool kujust.
12. Lõpptoodang – vormitakse templi ning matriitsi inserdi kokkusurumisel ja sulaplasti sissepritsimisel.
13. Juhtelemendid, mis aitavad alumisel plaadil juhtida end ülemise plaadiga võimalikult täpselt, et lõppdetail saaks korralikult valmida.
14. Matriitsihoidja – plaat, millele kinnitatakse matriitsi insert
15. Valukanal – kanal, mille kaudu siseneb sulatatud plast vormipesadesse
16. Vormi ülemine mitteliikuv pool – selle paigutatakse matriitsi inserdi hoidjaplaat (14)
18. Lokaatorrõngas – paneb paika ava, kuhu suunatakse sulatatud plast



Joonis 4 Pressvormi skeem [5]

## 1.3 Jahutussüsteem

Vormide soojusülekanne plasti ning vormi vahel on määrav faktor ökonoomilise tootmise jaoks. Plastmaterjal on vaja maha jahutada kuni tahke seisund on saavutatud, misjärel detail vormist eemaldatakse. Aega selle saavutamiseks nimetatakse jahtumisaegaks. Plastdetaili jahutamiseks töödeldakse vormimiselementide sisse jahutuskanalid, kuhu suunatakse jahutusvedelik. Sulatatud plast on vaja jahutada nende kanalite abil temperatuurini, kus plast on piisavalt tahke, et saab selle välja tõugata. Polüpropüleenil näitel 240 °C – 270 °C juurest vaja jahutada materjal 150 °C-ni. Vormimise kvaliteet sõltub suuresti konstantsest temperatuuri profiilist igal tsükliil ning ka tootmise produktiivsus on oleneb vormi soojusülekanne efektiivsusest.

Jahutusaeg algab vormi täitumisega, suurim osa soojusülekandest toimub jahtumise ajal, mis lõpeb kui vorm avaneb ning plastdetail tõukurite poolt eemaldatakse. Plastdetail eemaldatakse vormist alles siis, kui detail on tervenisti saavutanud vajaliku temperatuuri piisavaks tahenemiseks. Detaili kõige paksematele seintele peab seetõttu pöörama erilist suurt tähelepanu, kuna need jahtuvad kõige aeglasemalt. [2]

Jahtumisaega vähendades on võimalik hoida kokku nii energia kulu pealt kui ka väärtuslikku tootmisaega, mis suuremate tootmistehaste puhul võib olla väga suur kulu kokkuhoidmise koost. Tootmises energia kokkuhoidmine ning emissiooni vähendamine tootmises on hetkel väga kriitilised teemad, eriti suuremahulistel protsessidel nagu survevaluvormimine. Mõju hindamist keskkonnale plastitööstuses alustati üle 40 aasta tagasi, kui tootmisettevõtted hakkasid implementeerima oma energia tarbimise hindamist, et parandada tootmise ökonoomilist poolt ning ka mõju keskkonnale. Alates sellest on energia probleem olnud väga olulisel kohal plastitööstuses. Suurenev energia hind ning konkurents survevaluvormimise turul on veelgi enam ajendanud tootmisettevõtteid otsima uusi arendussuundi ning võimalusi optimeerida oma tootmist. Selles kontekstis on olemas suur potentsiaal suurendada survevaluvormimise efektiivsust läbi protsessi optimeerimise. Seetõttu püütakse leida võimalusi aidata vormide disaineritel paremini optimeerida ka näiteks jahutuskanaleid. [6] Jahutuskanalite optimeerimine on eriti oluline kui plastdetail, mida valmistatakse, on erilise kujuga. Sellisel juhul jahtuvad erinevad osad sellel detailil erineva kiirusega ning standardselt puuritud jahutuskanalid pole parim lahendus selle detaili jahutamiseks.

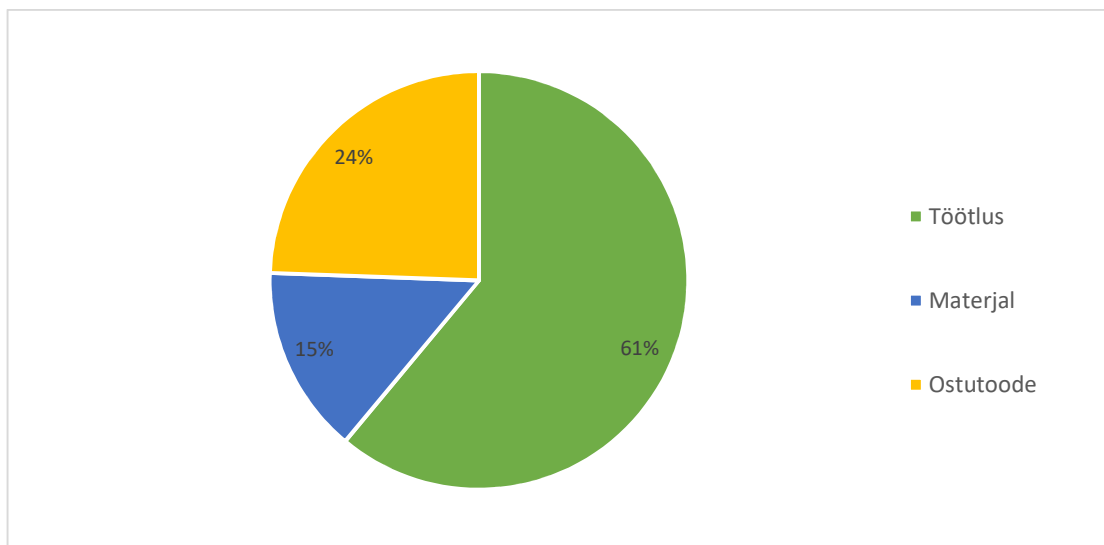
## 1.4 Vormi hinna kujunemine

Survealuvormid valmistatakse väga suure täpsusega kuna nad peavad vastama mitmetele rangetele nõudmistele nagu väga täpsed mõõdud ning ideaalne pinnakvaliteet. Vormid on üldjuhul unikaalsed või valmistatakse mõned üksikud, kuna detailide valmistamise kogus pole nii suur et teha mitmeid duubelvorme. Samuti detailide vajadus ning standardid ja nõudmised tihti muutuvad. Nende valmistamiseks vajalikud töötused on aeganõudvad ning kallid, mis teeb vormi maksumuse suureks osaks valmisdetaili hinna kujunemisel. Uue toote või väikese mahuga tootmise korral on just vormi hind kõige suurema osakaaluga valmistoote hinnast. Seetõttu peab hinnapakumisel olema vormi hinnakalkulatsioon tehtud võimalikult täpselt ning mitte baseeruma ainult kogemustel ning eelmistel sarnastel vormidel. [7]

Vormi hind kujuneb kolmest osast:

1. Materjalikulu (kujumoodustavad elemendid ning vormi baasplaadid)
2. Disain/töötlus (disaineri töö, lukksepa töö, CNC frees, mahterosioon, lihvimine, traaterosioon, termotöötlus)
3. Vormi standardosad (kuumkanalsüsteem, tõukursüsteem, juhtelemendid jne.)

Joonisel 5 on näidatud survevalu vormi hinna jagunemist erinevate kuluartiklite kaupa nagu töötlus, materjali kulu ning standardosade kulu.



Joonis 5. 4-pesalise survevalu vormi kontsrueerimise hinna jagunemine

Materjalikulu jaguneb suhteliselt ühtlaselt kujumoodustavate ning baasplaatide vahel. Kuigi baasplaate on koguseliselt palju rohkem, siis nende hind materjali 1 kg kohta võrreldes kujumoodustavate materjalidega on märgatavalt väiksem. Kujumoodustavate

detailide materjalile on palju suuremad nõudmised ning seetõttu on ka hind materjali kilo kohta suurem.

Töötlus on vormi kõige suurem kulu. CNC freesimine on kõige kallim ning aeganõudvam töö vormi valmistamisel, kõik baasplaadid ning ka kujumoodustavad detailid peavad läbima CNC freesimise. Järgnevad lukksepatööd, mis sisaldavad endas kogu komplekteerimist, poleerimist ning lihtsamaid puurimis- ning lõppviimistluse töid. CNC-freesimine ning lukksepatööd võtavad ligi 50% kogu töötluse ajast ning hinnast. Neile järgnevad traaterosioon, lihvimine, treimine ning mahterosioon.

## **2 VORMI MATERJALIDE NING TÖÖTLUSE VALIK**

Survealuvormi tehnoloogia peab vastama suurenevale nõudmisele kõrge kvaliteediga tootele, kuid samal ajal peavad olema võimaliku väikese kuluga. See on võimalik ainult siis kui tootja saab adekvaatselt kontrollida vormimise protsessi. Toote konfiguratsioon peab sobima toote materjaliga ning tootmisprotsessiga ja vormil peavad olema täidetud vastavad nõudmised kestvusele, täpsusele ning pinnakvaliteedile. Seetõttu survealuvormid peavad olema valmistatud suurima täpsusega ning peavad suutma funktsioneerida väga suurte raskuste all ning karmides tingimustes. Vormi suure maksumuse tõttu on oluline et neil oleks pikk eluiga. Selle kõige tõttu kasutatakse survealuvormidel ainult suure tugevusega materjale, peamiselt terast, kuna materjali omahind on ainult väike osa terve vormi detaili töötamise hinnas. Pesad tehakse tihti väga kvaliteetsest terasest. Inserte on ka võimalik teha muudest materjalidest kui toode on väga keeruline, kuid keskendumine ainult terastele kuna need on enimkasutatavad. [2]

### **2.1 Plastiga kokkupuutuvate materjalide valik**

Templite, matriitside ja insertide materjali valikul on olulised mitu erinevat faktorit – rahaline, detaili kuju, kasutusala ning vormitava materjali erinõudmised. Vormitava detaili spetsifikatsioon määrab ära materjali, mida kasutatakse vormimisel, minimaalsed pesade dimensioonid, vormi kulumise tootmise ajal ning kvaliteedinõuded dimensioonile ning pinnakvaliteedile ja väljanägemisele. Tuginedes nendele nõudmistele ja vormitavate detailide koguse vajadusele määratakse ära vajalik vormi eluiga ning tehakse otsused, mis materjali kasutada, et see finantsiliselt oleks produktiivne.

Survealuvormides olulised materjalide omadused: töödeldavus, termotöötamise kindlus, kõvadus ja sitkus, poleerimise võimalikkus, kuumakindlus, kulumiskindlus, suur soojusjuhtivus, korrosioonikindlus. [2]

Väliskontuur saavutatakse töötlemisega, mis on väga aeganõudev ning nõuab kallist masinaparki. Enamjaolt peale masintöötlust on siiski vaja manuaalselt pinda parandada. Kui kasutada liiga kõva materjali (üle 1500 MPa), siis võtab töötus väga kaua aega ning pole rahaliselt kasulik. Seetõttu töödeldakse pehmemat materjali ning tõstetakse materjali kõvadust hiljem termotöötlemisega. Kuid sellel on omad riskid – peale termotöötlust võivad materjali dimensioonid muutuda ning võivad tekkida praod

materjali. Nende probleemide vältimiseks kasutatakse eelkarastatud materjale. Tänu väävli (kuni 0,1%) sisaldusele, saab neid kergesti töödelda. Kui väävli sisaldus on liiga kõrge, siis poleerimine on raskendatud, samuti ka keevitamine. Kui on oluline dimensioonide stabiilsus ning hea töödeldavus, siis soovitatakse kasutada eelkarastatud teraseid, et vältida termotöötlust peale mehhaanilist töötlemist. Eelkarastatud materjalid ei vaja hilisemat termotöötlust. Nende kõvadus saavutatakse keemilise protsessiga või difusiooniga. See tehakse madalamal kuumusel, mistõttu tekib vähem pingeid materjali ning see omakorda ei mõjuta detaili dimensioone nii palju. [2]

Vormi temperatuuri ning kuumuse juhtimise vormi sees määrab plastmaterjal ja vormimise tehnika. Üldjuhul jääb enamuste termoplastide sulatamise temperatuur alla 300 °C, mis ei pane piiranguid vormi materjalile. Kuid on kasvamas termoplastide hulk, mis vajavad temperatuure kuni 400 °C, mis tähendab et on vajalik pidev kuumus üle 200 °C tootmise ajal. Kui kraadid on üle 200 °C, siis on suurendatud kulumine ning vähenenud kuju hoidmine. Sellisel juhul on vajalik teha õige valik materjalidega. Lisaks võivad mõned plastmaterjalid eraldada keemiliselt agressiivseid aineid nagu formaldehüüd. Need ründavad vormi pinda, kui see pole kaitstud. Sellisel juhul on vaja kasutada korrosioonikindlaid materjale. Vormi disainer peab valima materjali vastavalt olukorrale. [2]

### **2.1.1 Pindkarastatavad terased**

Pindkarastatavad (*case-hardening*) terased sobivad hästi vormide valmistamiseks. Nende hind pole kõrge ning need on enimkasutatud materjalid vormides (80% kogu terase kasutamisest vormides). Nende kõva pind ning sitke sisu annavad materjalile suure kulumiskindluse ning materjal talub lööke ilma pragunemiseta. Materjali on kerge töödelda ning väga hästi poleeritav. [2]

### **2.1.2 Nitreeritavad terased**

Teraseid, milles on kroomi, molübdeeni, vanaadiumi ning alumiiniumi, saab nitreerida. Need terased imavad enda pinnale lämmastikku difusiooni teel ümbritsevast keskkonnast. See protsess saab toimida soolavannis, gaasikambri, pulbris või plasmal temperatuuridel 350 °C – 380 °C. Aeg ning temperatuur oleneb, millist tehnikat kasutatakse. Selle protsessiga tekivad lämmastikust ja vastavast elemendist (kroom, molübdeen jne) nitriidid, mis tekitavad materjali pinnale väga tugeva ning kulumiskindla kihi. Kõige suurem kõvadus pole mitte kohe pinnal, vaid mõni sajandik millimeetrit allpool, mistõttu detail võiks olla varuga ning peale nitreerimist on vajalik



mõõtu lihvimine. Peale seda töötlust on materjal kõva ning pingevaba, suure pinnakõvadusega ja parandatud korrosioonikaitsega. [2]

### **2.1.3 Läbikarastatavad terased**

Läbikarastatavad terased suurendavad oma kõvadust martensiitide ümberpaigutamisega, mida kutsutakse esile kiire terase jahutamisega (*quenching*). Seda tehakse kas vee, õli või õhuga. Vesi toimib kõige kiiremini ning toob esile kõige suuremad ümberpaigutamised. Õli ja õhk on aeglasemad võimalused, kuid neid kasutatakse paljudes termotöötlusega tegelevates firmades. Nendel terastel on hea dimensioonide stabiilsus peale termotöötlust. Läbikarastatavaid teraseid soovitatakse kasutada mitte väga sügavate insertide valmistamisel, kus võib esineda suur surve. Neil on ka väga hea kulumiskindlus. [2]

Termotöötluste protsess koosneb eelkuumustamisest, termilisest töötlustest materjalile vastavalt etteantud kraadide juures, kiirest jahutamisest (*quenching*) ning termotöötlust sisepingete eemaldamisest (*stress relief*) ja noolutamisel (*tempering*). Noolutamine toimub vastavalt materjalile, kuid vähemalt 500 °C juures, mis lagundab martensiidi karbiidiks. See vähendab materjali kõvadust ning suurendab sitkust. Vastavalt vajalikule materjali kõvadusele tuleb leida õiged temperatuurid termotöötlustel ning ka noolutamisel. Peale karastust on kindlasti vajalik pinnatöötlus (lihvimine, poleerimine).

### **2.1.4 Korrosioonikindlad terased**

Korrosioonikindlaid teraseid kasutatakse juhtudel kui plast vabastab keemiliselt agressiivseid aineid tootmise käigus. Need ründavad terase pinda ning põhjustavad roostetamist. Parim viis kaitsta vormi selle vastu, on kasutada korrosioonikindlaid teraseid. Korrosioonikindlad terased sisaldavad endas kroomi vähemalt 12%, mis annab neile selle vajaliku omaduse ning kaitsevad terast roostetamise eest. Süsiniku lisamine terasele vähendab roostekindlust, kuna süsinik reageerib kroomiga ning moodustab kroomkarbiidi. Ainult tahkes olekus ei teki seda reaktsiooni, kuid kuumutades üle 400 °C, pääseb süsinik välja raua ühendist ning tekib kroomkarbiid, mis vähendab drastiliselt korrosioonikindlust. Süsinikku on siiski vaja, et terasel oleksid võimalikult head mehaanilised omadused. Korrosioonikindlust parandab ka pinnakvaliteet, kui pind on poleeritud, siis roostet esineb palju vähem. Kui terasel on alla 13% kroomi lisatud, on korrosioonikindlus tagatud ainult siis, kui on pind poleeritud. Kui kasutatakse terast, millel on üle 17% kroomi, on küll korrosioonikindlus tagatud, kuid mehaanilised

omadused pole nii head. Et kaitsta vormi täielikult rooste eest, on vaja alati puhastada ning katta roostekindla vahendiga, kui vorm ladustatakse [2]

### **2.1.5 Martensiit-terased**

Martensiit-terastel on kombineeritud väga kõrge tugevus ning kõvadus ja neid on lihtne termotöödelda. Neid teraseid tarnitakse legeeritud kujul. Nende struktuur koosneb sitkest nikkel-martensiidist, mille kõvadus on 1100 MPa. Martensiit-teraste töödeldavus on sarnane läbikarastatavate terastega, kuid on 10-20% aeganõudvam. [2]

Peale masintöötlust, peab detaile karastama 480 °C – 500 °C juures, kus neid hoitakse 3 kuni 5 tundi, seejärel jahutatakse aeglaselt õhu käes. Kuna termotöötamise temperatuur on madal, siis mõõtude liikumist pole vaja karta. Pinna kulumiskindlust saab veel parandada nitreerimisega. Martensiit-teraste võimalik kõvadus kuni 60 HRC on imetlusväärne nende madala temperatuuriga termotöötamise juures. [2]

Martensiit-teraseid soovitatakse kasutada väiksemate pesadega insertide valmistamisel, millel on keerulised kontuurid. Kuna dimensioonilisi muutusi ei esine, on see kõige turvalisem materjal, mida kasutada. Lisaks on neid väga kerge keevitada. Paraku on nende hind kordades kõrgem kui tavalistel tööriistaterastel, see tõttu kasutatakse neid ainult väiksemate insertide tegemisel. [2]

### **2.1.6 3D prinditavad terased**

3D printimiseks on võimalik kasutada erinevaid teraseid, nendest survevaluvormidele sobivad kõige paremini materjalid DIN koodiga 1.2709 ning 1.2344. DIN 1.2709 on martensiit-teras, millel on suur legeeritud nikli ja vähene molübdeeni sisaldus. See sobib paljudesse tööriistade valmistamise aplikaatsioonidesse, mis nõuavad suurt tugevust ning sitkust. DIN 1.2344 on kroomi sisaldav martensiit-teras, millel on samad omadused, kuid selle materjali printimine on keerukam. Mõlemad materjalid sobivad vormi insertide valmistamiseks kuna on kuumakindlad ning suure tugevuse ja sitkusega.

Tabelis 1 on välja toodud 3D prinditava terase DIN 1.2709 keemiline koostis ning tabelis 2 on välja toodud DIN 1.2344 keemiline koostis. Erinevus on märgatav, Suurim vahe on nikli ning koobalti kasutus DIN 1.2709 materjalis ning kroomi ning vanaadiumi kasutus DIN 1.2344 materjalis.

Tabel 1 Terase DIN 1.2709 keemiline koostis [8]

<b>Teras</b>	<b>Ni nikkel</b>	<b>Co koobalt</b>	<b>Mo molübdeen</b>	<b>Ti titaan</b>	<b>Al alumiinium</b>	<b>Mn mangaan</b>	<b>Si räni</b>
1.2709	18,0-19,0	8,5-9,5	4,7-5,2	0,5-0,8	0,05-0,15	0,1	0,1

Tabel 2 Terase DIN 1.2344 keemiline koostis [8]

<b>Teras</b>	<b>C süsinik</b>	<b>Cr kroom</b>	<b>Mn mangaan</b>	<b>Mo molübdeen</b>	<b>Ni+Cu nikkel,vask</b>	<b>Si räni</b>	<b>V vanaadium</b>
1.2344	0,3-0,5	4,8- 5,5	0,2-0,6	1,1-1,8	0,8	0,8- 1,3	0,8-1,2

Võimalikud kõvadused ning ka tõmbetugevused erinevad neil kahel materjalil. DIN 1.2709 suurem kõvadus teeb selle materjali just paremini kasutatavaks matriitside ning templite valmistamisel. Liiga väikese kõvadusega detail võib deformeeruda ning inserte on vaja tihedamalt välja vahetada. Tabelis 3 on näha nende materjalide tõmbetugevuse ning kõvaduse võrdlust

Tabel 3 Teraste DIN 1.2709 ja 1.2344 materjalide võrdlus [8]

<b>Terase märgistus</b>	<b>Tõmbetugevus termotöötlust</b>	<b>Kõvadus termotöötlust</b>
1.2709	2020 MPa	54 HRC
1.2344	1775 MPa	52 HRC

## 2.2 Plastiga mittekokkupuutuvad vormiosad

Peale nende osade vormis, mis puutuvad kokku plastiga, on terve vormi valmistamiseks vajalikud ka muud komponendid nagu näiteks vormi baasplaadid, templi- ning matriitsihoidjad ja suur kogus standardosasisid nagu tõukurid, vedrud, lukustid, juhtelemendid jpm. Need kõik tooted on võimalik osta valmisosadena vormi standardplaatide ning standardosade valmistajatelt ning edasimüüjatelt. Need osad on palju odavamad kuna valmistatakse suurtes kogustes.

Vormidele spetsialiseerunud tootjad nagu HASCO Hasenclever GmbH + Co. KG pakuvad eraldi vormiloomise programme, kus on juba soovitatud materjalid paika pandud, jääb üle ainult valida vajalikud mõõdud ja vormi baasplaadid, tõukuriplaadid ning hoidjad on juba valitud.

Joonis 6 demonstrib Hasco programmi võimalusi valida vajalike mõõtmetega plaadid ning nende pakkumises olevaid materjale.

**Mould base Assistant**

1 Mould layout 2 Mould size 3 **Plate configuration** 4 Accessories 5 Shopping cart

**K20/496x596x96/1.2085**  
Cavity plate

S1	1.1730	1.2083	1.2085	1.2099HASC...	1.2182	1.2311	1.2312	1.2343	1.2343ESU	1.2379	1.2436	1.2787	Toolox33
115	■	□	■	□	□	■	■	□	□	□	□	□	■
138	■	□	■	□	□	■	■	□	□	□	□	□	□
156	■	□	■	□	□	■	■	□	□	□	□	□	□
170	■	□	■	□	□	■	■	□	□	□	□	□	□

Layout 1 / Mould size: 496 mm x 596 mm

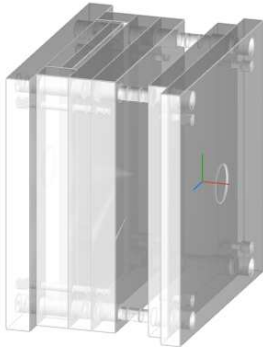
Joonis 6 Hasco vormiehituse assistent plaatide valikuks [9]

Kui plaadid on vormile valitud vajalike mõõtudega, siis jääb ainult valida standardosad, mis on juba programmi poolt soovitatud nende plaatide mõõtudega sobima ja vormi ümbris on valmis ja võimalik otse tootjalt tellida. Võimalik ka ühendada oma firma tarkvara selle programmiga ja kogu nimekiri otse CAD faili alla laadida. Selliseid võimalusi pakuvad mitmed tuntud vormiosade tootjad lisaks Hascole nagu Meusburger Georg GmbH & Co KG, Strack Norma GmbH & Co. KG jpm.





















Joonisel 7 on näidatud vasakul eelnevalt valitud mõõtmetega vormi plaate koos standardosadega. Paremal pool on nimekiri toodetest sobilike mõõtmetega just neile plaatidele, mis on valitud. See teeb vormi standardosade valiku väga lihtsaks ja tavaliselt on ainult mõned asjad vaja juurde lisada või muuta.

**Mould base Assistant**

1 Mould layout 2 Mould size 3 Plate configuration 4 Accessories 5 Shopping cart



**Parts list**

No.	Product	Information	Piece	K / P
1	K20/496x596x46/1.2085	 	1	<input type="checkbox"/>
2	K10/496x596x46/1.2085	 	1	<input type="checkbox"/>
3	K20/496x596x56/1.2085	 	1	<input type="checkbox"/>
4	K30/496x596x56/1.2085	 	1	<input type="checkbox"/>
5	K40/496x596x76/1.2085	 	2	<input type="checkbox"/>
6	K70/496x596x36/1.2085	 	1	<input type="checkbox"/>
7	K60/496x596x27/1.2085	 	1	<input type="checkbox"/>
8	K10/496x596x56/1.2085	 	1	<input type="checkbox"/>
9	Z20/42x160	 	4	<input type="checkbox"/>
10	Z00/46x32x85	 	3	<input type="checkbox"/>

Back CAD export CSV export

Joonis 7 Hasco vormi assistent standardosade valikuks [9]

## 2.3 Pressvormide detailide töötlus

Umbes 90% kõikidest vormidest valmistatakse mehaaniliselt töödeldes. Nende töötluste alla kuuluvad treimine, freesimine, puurimine ning lihvimine. Nende töötluste eesmärk on valmistada detail nii kaugele, et oleks vaja võimalikult vähene manuaalne töötlus peale masintöötlust nagu näiteks poleerimine. Töötlus vabastab materjalist olemasolevat stressi, mistõttu võivad mõõdu detailil muutuda kohe töötlemise ajal või hilisemalt termotöötluste ajal. Seetõttu on soovitatud stressid eemaldada peale suuremaid töötluste. Peale termotöötlust pinnad lihvitakse, eemaldatakse töötlusjäljed ning poleeritakse, et tagada võimalikult hea pinnakvaliteet. Pinnakvaliteet on oluline korrosioonikindlusele ning lõpp-produkti kvaliteedi jaoks. Kui lõppdetailil on väga oluline kosmeetiline väljanägemine, siis on väga oluline et lihvimine ning poleerimine tehakse väga hoolikalt, et saavutada peegelpind. Poleerimist tehakse siiaani üldjuhul manuaalselt, abiks ainult elektrilised, pneumaatilised ning ultraheli tööriistad [2]

### 2.3.1 Freesimine

Freesimist kasutatakse peamiselt suuremate plaatide nagu vormi alumise, ülemise plaadi ning hoidjate valmistamiseks, kuid ka väiksemate detailide esimesed töötlustused

tehakse just freesimisega. Ajaliselt ja rahaliselt on just freesimine vormi valmistamisel kõige mahukam, kuid mitte kõige keerulisem töötlus. Lihtsamad avad ning kujud valmistatakse freesimise abil, kuid suured plaadid nõuavad palju aega, mis omakorda tähendab suurt rahalist kulutust.

### **2.3.2 Mahterosioon**

Mahterosioon (*Electric-Discharge machining*) on väga vajalik töötlus vormimiselementidele. Tänu sellele on võimalik saavutada väga keerulisi kujusid ka karastatud terast kasutades. Mahterosioon on reprodutseeriv vormimise protsess, mis kasutab materjali eemaldamise efekti andes elektrilööke järjestikku elektroodi ning pingis oleva detaili vahele dielektrilises vedelikus. Iga järjestikune impulss kuumutab väikese osa materjali ning elektroodi nende sulamise või aurustumise temperatuurini ning eemaldub töötlemises olevast alast elektrilise või mehaanilise jõu tõttu. See protseduur on väga laialdaselt kasutuses vormitööstuses, kuna sellel on mitu suurt plussi. See töötlus on väga täpne ning ei vaja konstantset järelvalvet. Seda protsessi on võimalik suuresti automatiseerida programmidega ning etteandesüsteemidega kui tehakse mitut samasugust detaili ning operaatori juuresolek on oluline ainult süsteemi tööle panemise ning lõpetamise ajaks. Tänu sellele töötlusele on võimalik suhteliselt igasugune detaili disain. [2]

### **2.3.3 Lihvimine ja poleerimine**

Peale töötlust on vajalik pindade puhastamine, lihvimine ning detaili lõppviimistluse andmine, mida tehakse lihvimismasinate ning manuaalse lihvimise ja poleerimise abil. Suuremad plaadid lihvitakse lihvmasinate, kuid plastiga kokkupuutuvad detailid poleeritakse käsitsi, kuna pinnakvaliteet on ülimalt oluline plasti väljanägemise jaoks. Isegi tänapäeval pole veel piisavalt head lahendust, et poleerida automaatselt, see on endiselt vaja teha käsitsi.

### **3 JAHTUSKANALITE OPTIMEERIMINE**

Antud peatükis võrreldakse olemasolevate jahutuskanalite valmistamise tehnoloogiat ning nende efektiivsust 3D prinditud jahutuspesadega. On ka võrreldud olemasolevate materjalide omadusi uute 3D printimist võimaldavate materjalidega. Katsed on läbiviidud pressvormide simulatsiooniga Moldex3D, millega on võimalik simuleerida survevaluvormimise reaalsel töökäiku ja testida erinevaid disaine ning nende efektiivsust. Antud tarkvara on üks peamistest disainerite tööriistadest vormide valmistamisel. See annab väga täpsed tulemused ilma protovormi ehitamata ning suuri kulutusi tegemata.

#### **3.1 Katsete hüpotees**

Plasti survevaluvormimisel on algab jahutusaeg sellest, kui plast vormi valatakse ning lõpeb, siis kui detail on piisavalt tahenenud, et vorm avada. Mis tähendab et jahutusaeg moodustab enamus kogu tsükliajast. Võime toota detaile kiiremini ning efektiivsemalt on alati üks peamisi ülesandeid tootmisfirmadel. Tavapäraselt puuritud jahutuskanalitel pressvormides on puudused tsükliaja vähendamisel. Et seda probleemi lahendada, leiti võimalus detailid 3D printida koos optimeeritud jahutuskanalitega [10]. Püstitatakse hüpotees: Jahutuskanalite optimeerimisega on võimalik vähendada tootmise tsükliaga.

#### **3.2 Katsete algandmed**

Kõik katsed algavad algandmete sisestamisega, ning igal katsel on need samad. Ainus, mis muutub, on jahutuskanalite paigutus. Vormi detailide materjali muutes Unimaxi pealt DIN 1.2709 peale, muutuvad tulemused marginaalselt. Tabelis 4 on näha Moldexi sisestatavad algandmed. Sulamistemperatuuri vahemik näitab, mis vahemikus kasutusel olev plast sulab ning väljatõukamise temperatuur näitab kuhu kraadini on vaja plast viia, et vorm oleks valmis detaili välja tõukama, ühtlasti märgib see temperatuur jahutusprotsessi lõppu. Selle detaili valmistamiseks kasutatakse polüamiidi, kuid sarnaste detailide jaoks kasutatakse tihti ka materjali polüpropüleen, millel on väga sarnased mehaanilised omadused.

Tabel 4 Moldex3D analüüsi algandmed

Materjali tüüp	Termoplastik
Materjali nimetus	PA6, Ultramid 8253
Sulamistemperatuuri vahemik (°C)	240-270
Vormi temperatuuri vahemik (°C)	80-95
Väljatõukamise temperatuur (°C)	150
Täitumisaeg (s)	2,5
Maksimaalne surve (MPa)	155
Pesa ruumala (cm <sup>3</sup> )	17,9316
Pakkeage (s)	7
Vormi avamisaeg (s)	5

### 3.3 Analüüs 1

Esimene analüüs on tehtud praeguste võimalustega. Jahutuskanalid puuritakse templi ja matriitsi sisse ning jahutusvedelik pumbatakse kanalitesse, mis jahutab plastikut. Seda meetodit kasutatakse hetkel kõikidel Norma AS olemasolevatel pressvormidel. Jahutuskanalid puuritakse 8 mm või 6 mm diameetrised vastavalt vajadusele ning sirged kuna hetkel pole teist head lahendust. Sirgetel kanalitel on eelis puhastamisel, kuid jahutus pole optimeeritud sirge kanaliga, jahutades kogu detaili ühtlaselt. Seetõttu kõige paksemad osad detailist ei saa rohkem jahutust, mistõttu kogu jahtumisprotsess on pikem.

#### 3.3.1 Matriits

Matriitsi insert, mis kinnitatakse mitteliikuva vormi poole külge, lõigatakse välja valitud materjalist, mis on selle vormi jaoks Uddeholmi materjal Unimax, mis on läbikarastatav legeeritud tööriistateras, mis sisaldab kroomi, molübdeeni ning vanaadiumit. Materjalil on head mehaanilised omadused pressvormi ehituseks – kõrge tugevus, hea kulumiskindlus, hea dimensioonide stabiilsus ning kerge poleeritavus. Seda materjali termotöödeldakse, mistõttu on võimalik saavutada kõvadus kuni 58 HRC, võrreldes 3D printitava terasega on suurem tõmbetugevus ning suurem võimalik kõvadus, kuid sama kõvaduse juures on tõmbetugevus peaaegu sama. Tõmbetugevus ning materjali kõvadus on välja toodud tabelis 5.

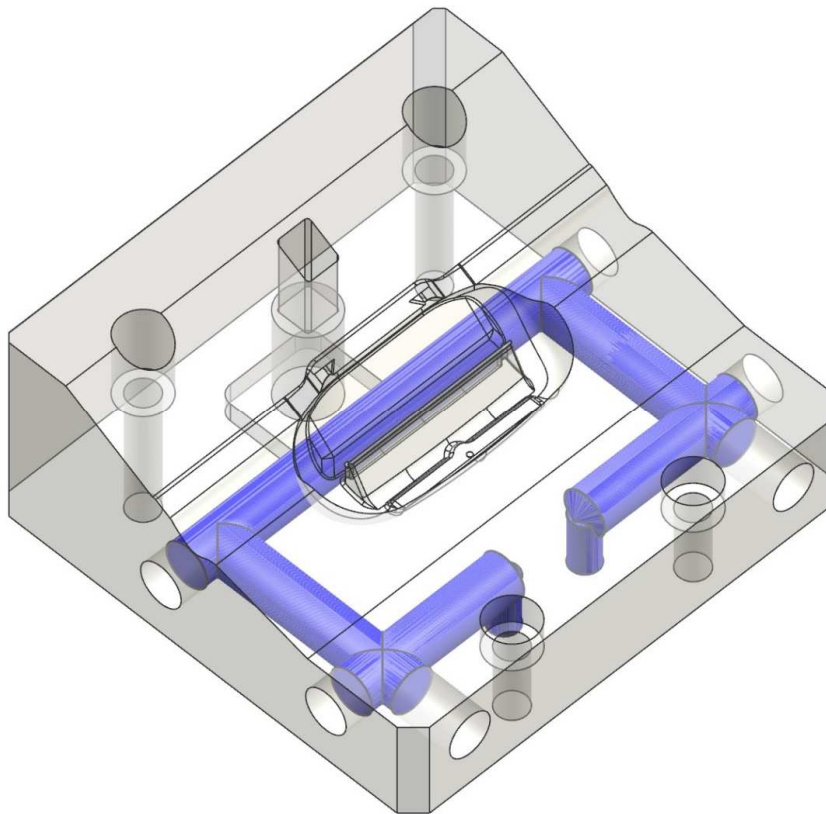


Tabel 5 Unimaxi ja 1.2709 võrdlus [11, 8]

<b>Terase märgistus</b>	<b>Tõmbetugevus peale termotöötlust</b>	<b>Kõvadus peale termotöötlust</b>
Unimax	2280 MPa	58 HRC
1.2709	2020 MPa	54 HRC

Peale tooriku välja lõikamist materjali toorik töödeldakse kas CNC freesimisega või traaterosiooniga, et anda sellele vajalik kuju. Avad ning jahutuskanalid puuritakse ning seejärel detail termotöödeldakse. Peale termotöötlust tehakse veel mõned operatsioonid CNC-freesis. Vormi keerulisemad pesad valmistatakse mahterosiooniga. Seejärel detail poleeritakse ning sobitatakse ja kinnitatakse matriitsihoidjasse.

Tegemist on ühepesalise matriitsi inserdi mudeliga, kus on tumesinisega eraldi välja toodud sissepuuritud jahutuskanalid. Joonisel 8 võib näha, et on kanalid sirged ja jahutavad ühtlaselt kogu plastdetaili ning selle ümbrust, olenemata sellest, kuhu on vaja rohkem jahutust suunata. Analoogsed jahutuskanalid on kõikidel olemasolevatel pressvormidel, kuid see mudel on tehtud ainult selle katsetuse eesmärgiga ning pole hetkel veel kasutuses olev detail.



Joonis 8 Matriits standardse jahutuskanaliga

### 3.3.2 Tempel

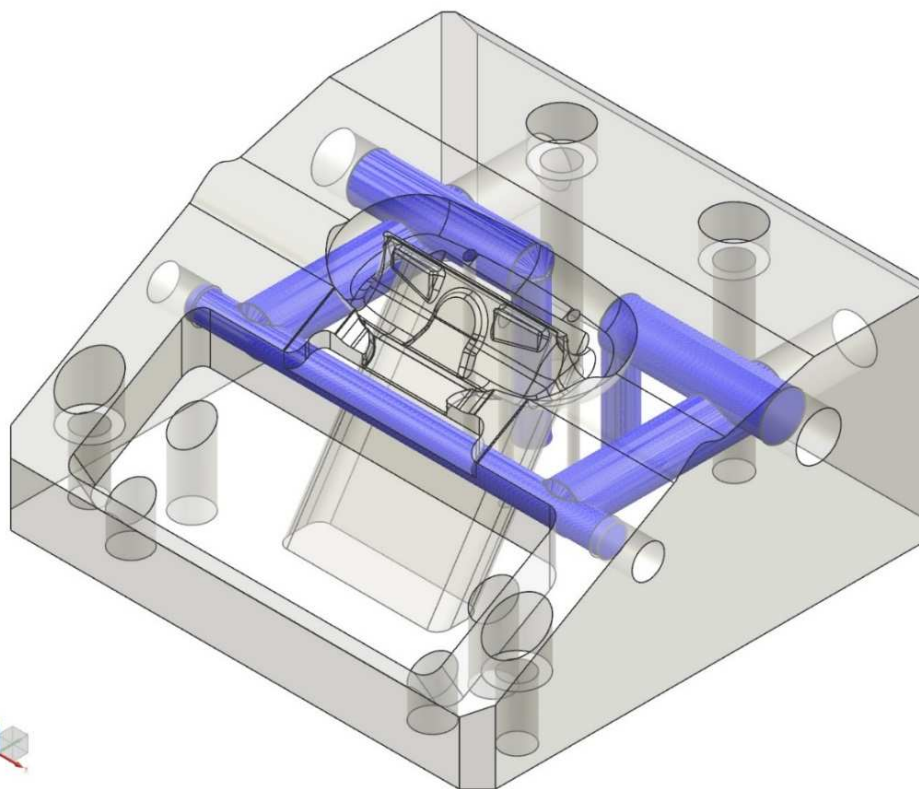
Tempel kinnitatakse templihoidja külge vormi liikuvasse poolde. Materjal on läbikarastatav legeeritud tööriistateras 1.2767, mis on mehaaniliselt sarnane Uddeholmi materjaliga Unimax. Tabelis 6 keemilise koostise võrdlus, mis näitab et peamine erinevus on nikli ning vanaadiumi koostises.

Tabel 6 Unimax ja 1.2767 keermiline võrdlus [11, 12]

<b>Teras</b>	<b>C süsinik</b>	<b>Si räni</b>	<b>Mn mangaan</b>	<b>Cr kroom</b>	<b>Mo molübdeen</b>	<b>Ni nikkel</b>	<b>V vanaadium</b>
Unimax	0,5	0,2	0,5	5,0	2,3	0	0,5
1.2767	0,45	0,25	0,4	1,35	1,25	4,0	0

Templi materjaliks on valitud Unimax'i asemel DIN 1.2767 kuna templil on suurem oht puruneda. Võrreldes matriitsiga, peab templi kõvadus olema madalam (54 HRC) ning DIN 1.2767 materjalil on paremad omadused sellel kõvadusel. Materjalil on väga suur vastupanu võime murdumise vastu ning suur survetugevus ja on lihtsasti poleeritav.

Joonisel 9 on näha disainitud templi mudelit, kus on välja toodud sinisega hetkel kasutusesolevad jahutuskanalid. Jahutuskanalid 8 mm diameetriga ning sirgelt puuritud.



Joonis 9 Tempel standardse jahutuskanaliga

### 3.3.3 Analüüs 1 tulemus

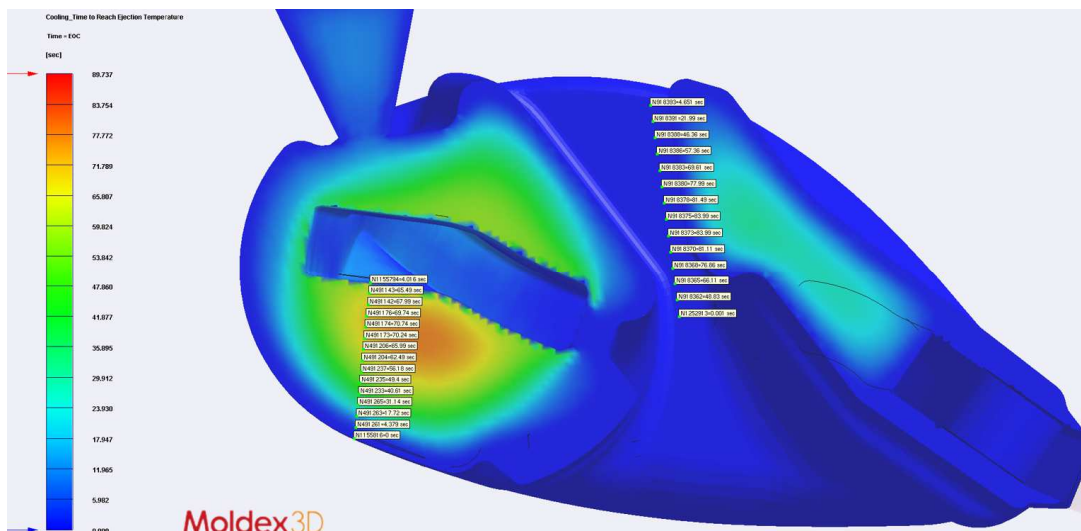
Esimene analüüs sai tehtud Moldexis praegu kasutatavate jahutuskanalitega, mõõdetavad punktid on asetatud kahte positsiooni. Esimene on detaili keskel, kõige paksema seinaga punkti ning teised punktid on detaili küljel. Tabelites on välja toodud aeg, millal see konkreetne punkt on saavutanud minimaalse 150 °C. Oluline on punkt number 3 kuna see tähistab minimaalset sügavust, mis peab olema 150 °C juures, et detail välja tõugata.

Mõõdetud on detaili keskmisi punkte. Tabeli 7 tulemustest on näha, et detaili keskmiste punktide väljatõukamise ajaks alates vormi valamisest, on 31,14 sekundit.

Tabel 7 esimese analüüsi keskmiste punktide jahutusaeg

Mõõdetav punkti nr.	Aeg jahtumiseks (s)
1	4,379
2	17,72
3	31,14
4	40,61
5	49,4
6	56,18
7	62,49
8	65,99
9	70,24

Joonisel 10 on välja toodud ka graafiline kujutis detailist jahutamise ajal, kus on näha millise ajaga saavutab detail 150 °C.



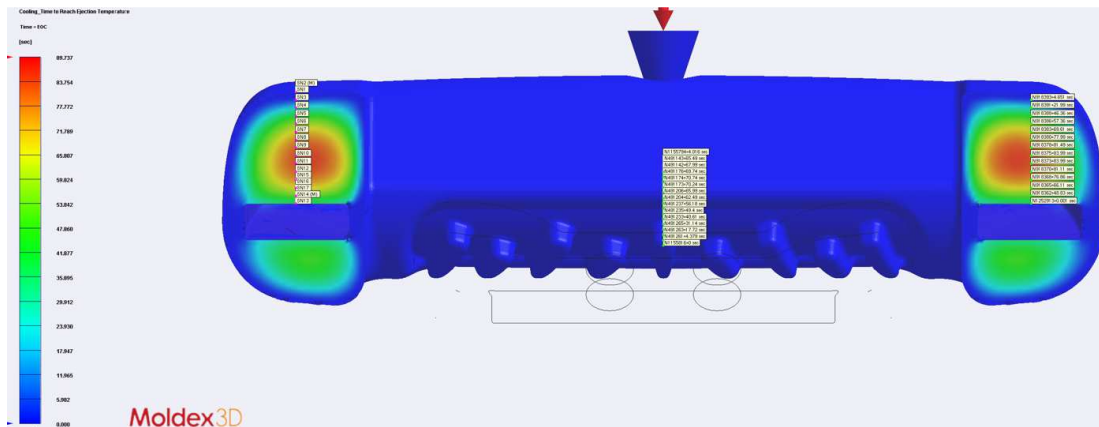
Joonis 10 1. analüüsi keskmiste punktide graafiline kujutis

Detaili äärest mõõdetud punktide tulemused tabelis 8 näitavad, et äärte tahenemine väljatõukamiseni võtab kauem aega kui keskmiste punktide järgi. 3. punkti kuni 150 °C jõudmise aeg on 46,36 sekundit, kuid kuna väljatõukamine toimub keskmiste punktide juures, siis see aeg pole määrav tegur selle detaili jahtumisaeg. Kuid on erinevaid detaile millel on tõukamispunktid rohkem külgede pool. Eesmärk on saavutada võimalik lühike jahtumisaeg igas detaili positsioonis.

Tabel 8 esimese analüüsi äärmiste punktide jahutusaeg

Mõõdetav punkti nr.	Aeg jahtumiseks (s)
1	4,651
2	21,99
3	46,36
4	57,36
5	69,61
6	77,99
7	81,49
8	83,99
9	83,99

Joonisel 11 on välja toodud külgmiste punktide jahtumisaegad kuni väljatõukamis temperatuurini. Skaala on sinisest punaseni, kus punane värvus tähistab kõige pikemat jahtumisaega. Sele demonstereib, et detaili väljatõukamise ajal on keskmine osa detailist ikka veel kõrgel temperatuuril, kuid detail on välispinnal piisavalt tahenenud ning on võimalik detail välja lükata.



Joonis 11 1. analüüsi külgmiste punktide graafiline kujutis

## 3.4 Analüüs 2

Teine analüüs sisaldab endas 3D printimiseks disainitud detaili, millel on jahutuskanalid optimeeritud. Jahutamiskanal, kust vesi läbi käib, on tehtud spetsiaalselt selle detaili vormimispesade ümber, mis peaks võimalikult hästi ja vähese vee kulutamisega jahutama detaili efektiivsemalt. Tänu sellele tehnoloogiale pole vaja puurida inserdi äärtesse jahutuskanaleid, vaid need valmistatakse 3D printimise abil juba detaili sisse. Jahutamise pindala on ligi poole väiksem, mis tähendab väiksemat energია kulu ning ökonoomsemat jahutust.

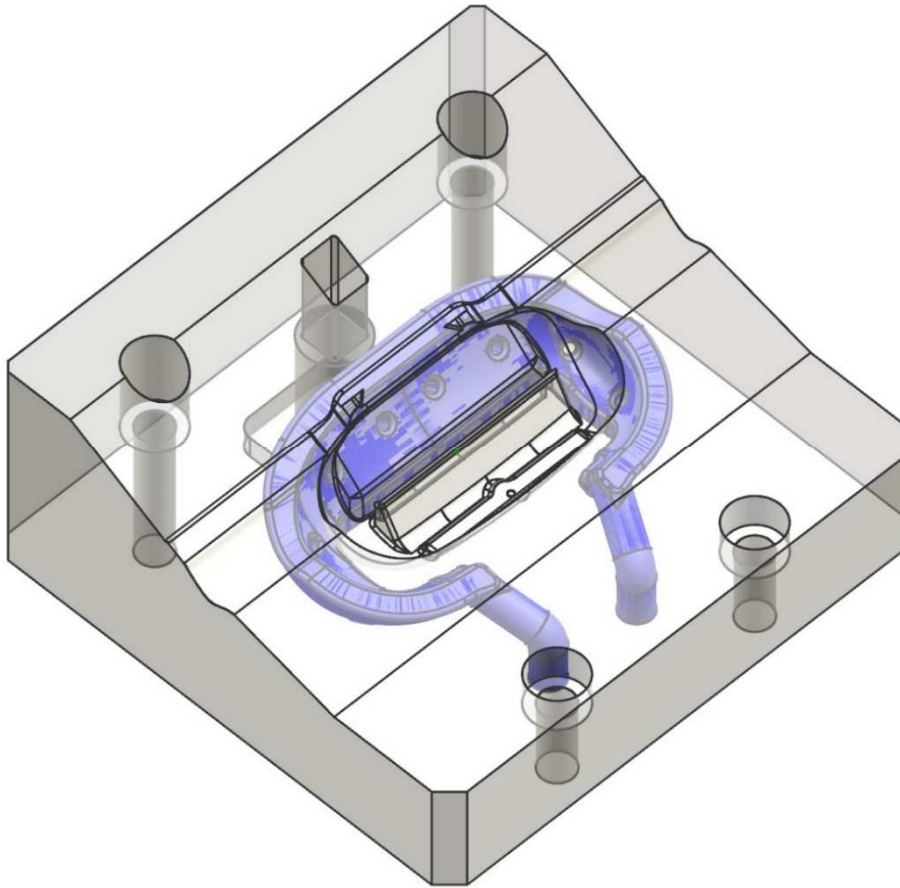
Kui detail prinditakse, siis muu tehnoloogiline marsruut jääb samaks, välja arvatud detaili välja lõikamine ning jahutuskanalite puurimine. Peale printimist, läheb detail freesimise või traaterosiooni ning termotöötlusesse. Termotöötlus oleneb materjalist ning kuna on valitud DIN 1.2709, siis kuumutatakse seda ainult kuni 500 °C juures, mis tagab väga hea dimensioonide stabiilsuse peale töötlust.

### 3.4.1 Matriits

3D prinditud matriits näeb üldjoontes välja samasugune nagu praeguse tehnoloogiaga tehtud matriits, muutunud on jahutuskanalid, mille on asendanud jahutuspesa vormi pesa ümber. Matriitsi valmistamiseks kasutatakse materjali DIN 1.2709, mille omadused sarnanevad suuresti praegu kasutusel olema UNIMAX-iga. Muutub terase kõvadus 58 HRC pealt 54 HRC peale, mis on 3D prinditava materjali maksimaalne kõvadus. Kõvaduse muutmine võib esile tuua mõningal määral matriitsi kulumise suurenemist, kuid DIN 1.2709 materjali kulumiskindlus on suhteliselt kõrge, mistõttu suuri probleeme ei tohiks esineda.

3D printides suureneb materjali maksumus. Kui hetkel kasutusesoleva materjali hind matriitsi jaoks koos eeltöötlemise ning jahutusavade puurimisega on 200 €, siis matriitsi printimisel on hind 800 €. Suuremate koguste valmistamisel on 3D printides hind soodsam, kuid praegusel katsel lähtutakse ühe tüki hinnast. Sama hind kehtib ka templile.

Joonisel 12 on näha valmis disainitud 3D printimiseks valmis mudelit matriitsi inserdist, koos eraldi välja toodud jahutuspesaga.

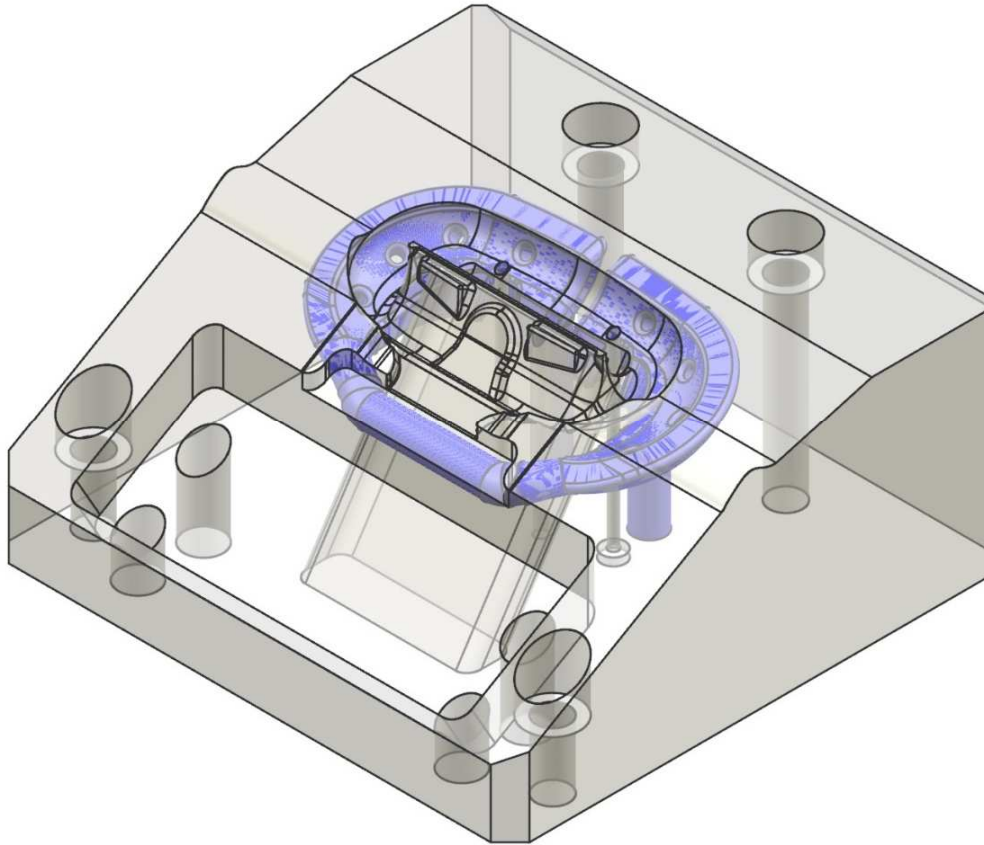


Joonis 12 2. analüüsi optimeeritud jahutuskanaliga matriits

### 3.4.2 Tempel

3D printimiseks valmis templi mudel on näidatud joonisel 13. Sarnaselt 3D printimiseks valmis matriitsiga, on mudel üldjoontes sama, mis hetkel kasutusesoleva tehnoloogiaga valmistatud tempel. Erinevuseks, nagu matriitsil, on puuritud jahutuskanalite puudumine ning jahutuspesa olemasolu. Muu tehnoloogiline marsruut jääb samaks.

Materjal muutub – 1.2767 asemel kasutatakse 1.2709, kõvadusega 54 HRC. Mõlemad materjalid on kuumuskindlad kuni 400 °C ning mehaanilised omadused on väga sarnased. 3D prinditud materjal sobib templi valmistamiseks.



Joonis 13 2. analüüsi optimeeritud jahutuskanaliga tempel

### 3.4.3 Analüüs 2 tulemus

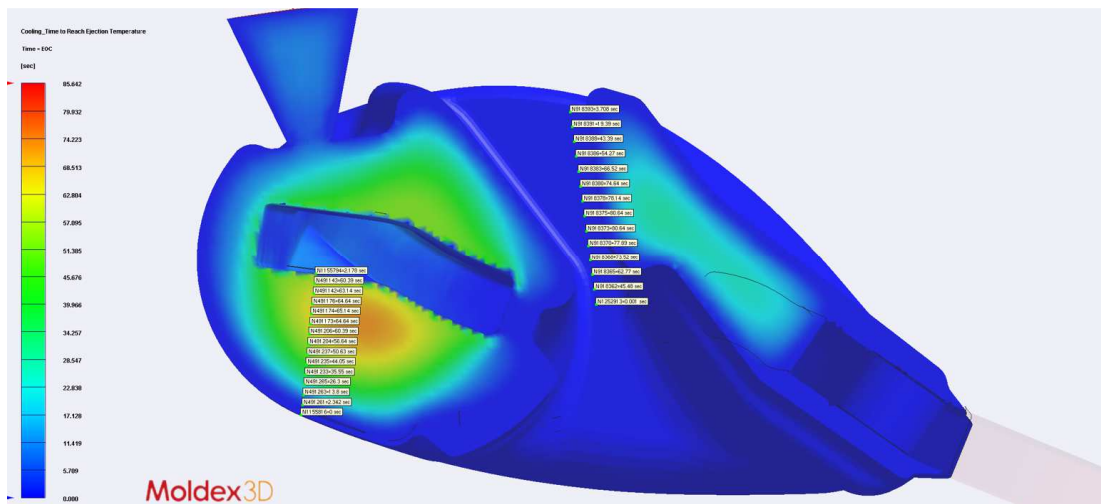
Analüüsi tulemus tabelis 9 näitab 3. punktis 4,8 sekundi suurust vähenemist võrreldes esimese analüüsiga mis kinnitab seda, et optimeerides jahutust, on võimalik säästa nii aega kui ka energiat.

Tabel 9 teise analüüsi keskmiste punktide jahutusaeg

Möödetav punkti nr.	Aeg jahtumiseks (s)
1	2,342
2	13,8
3	26,3
4	35,55
5	44,05
6	50,63
7	56,64
8	60,39
9	64,64



Joonisel 14 on graafiliselt välja toodud keskmises positsioonis detaili jahtumisaeg kuni 150 °C-ni erinevates punktides. Andmed on tabelis 9.



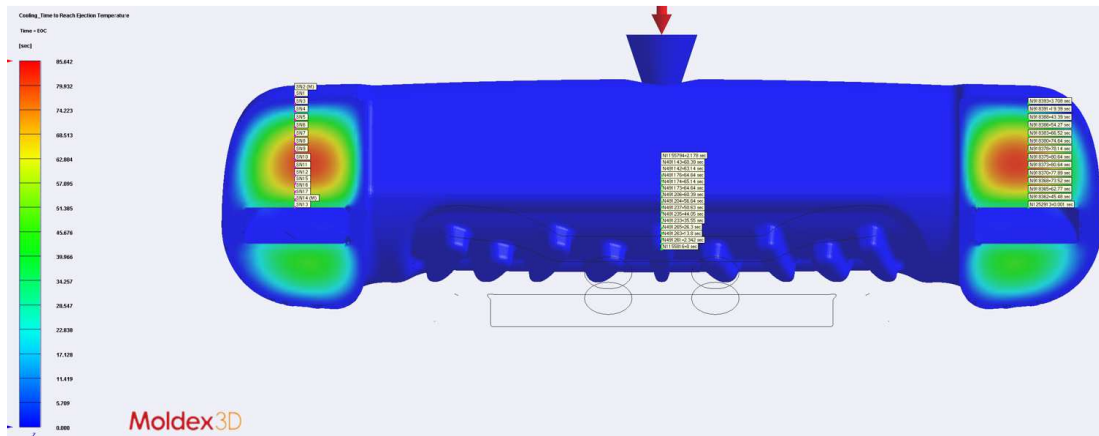
Joonis 14 2. analüüsi keskmiste punktide graafiline kujutis

Tulemus külgmiste punktidega pole nii hea kui keskmiste punktidega. Tabelis 10 näidatud ajavõit on 3 sekundit kolmandas punktis võrreldes standardlahendusega. See tähendab et detaili ääred ei saa samaväärselt parendatud jahutust võrreldes keskmisse positsiooni asetatud mõõtmispunktidega. Probleem võib olla selles, et jahutuspesade pindala pole piisav ning äärtesse ei jagu piisavalt külma jahutusvedelikku. Kuid tulemus on siiski parem kui algsete kanalitega.

Tabel 10 teise analüüsi äärmiste punktide jahutusaeg

Mõõdetav punkti nr.	Aeg jahtumiseks (s)
1	3,708
2	19,39
3	43,39
4	54,27
5	66,52
6	74,64
7	78,14
8	80,64
9	80,64

Joonisel 15 on graafiliselt näidatud külgmiste punktide jahutuskiirust kuni väljatõukamise temperatuurini (150 °C), andmed on tabelis 10.



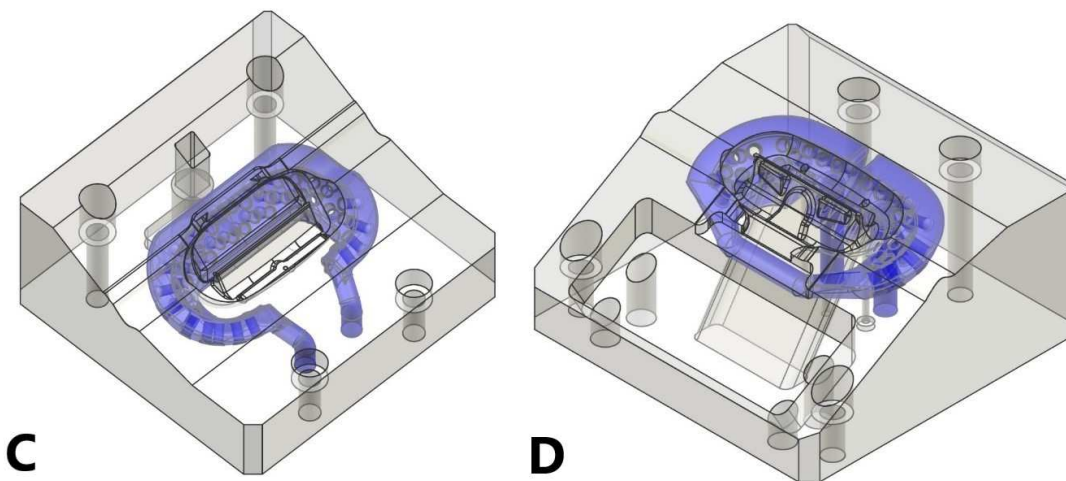
Joonis 15 2. analüüsi külgmiste punktide graafiline kujutis

### 3.5 Analüüs 3

Kolmas katsetus analüüsib tulemusi, kui muuta jahutuspesade pindala kui ka ruumala suuremaks. See peaks tagama kiirema jahutuse detaili olulistes punktides. Erilist tähelepanu saavad detaili keskmine osa ning küljed, millel on kõige aeglasem jahutusaeg. Jahutuskanalite sisse- ning väljalasketorude diameeter jääb samaks, et ühilduda olemasoleva tehnoloogiaga.

#### 3.5.1 Matriits ja tempel

Joonisel 16 on matriitsi mudel C, ning templi mudel D, kus on muudetud detailide jahutuspesasid, kahekordistades ruumala, kuhu pumbatakse jahutusvedelik. See tähendab rohkem külma jahutusvedelikku pesa sisse, mis omakorda peaks vähendama jahutusaega. Detaili dimensioonid on samad nagu eelmistel katsetel.



Joonis 16 3. analüüsi matriitsi (kujutis C) ning templi (kujutis D) optimeeritud jahutuskanalid

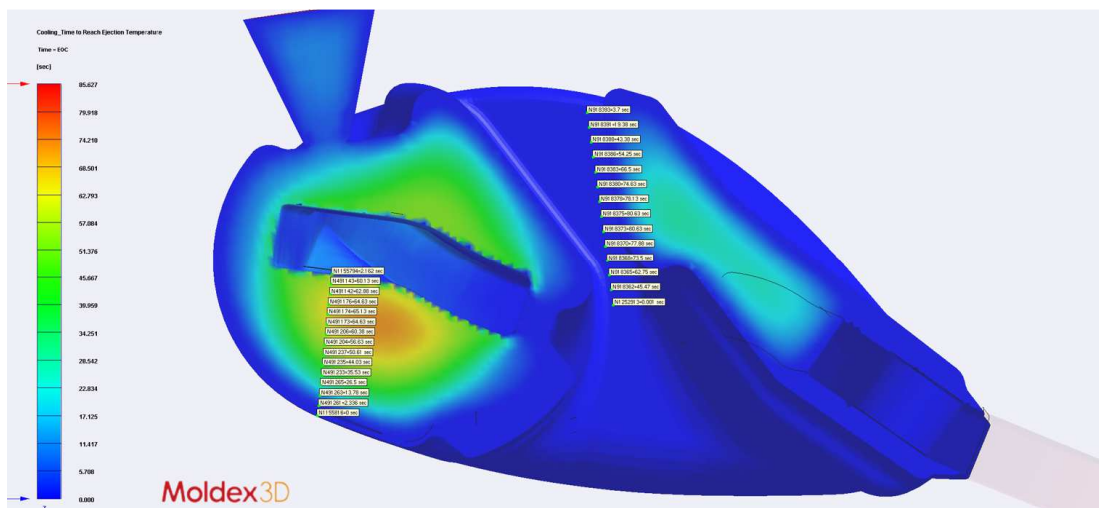
### 3.5.2 Analüüs 3 tulemus

Analüüsi tulemus näitab tabelis 11, et ruumala muutmine ei muuda jahutusaega lühemaks, pigem isegi pikendas mõnel juhul. Võrreldes teise katsega on kolmanda punkti jahtumisaeg 150 °C-ni 0,2 sekundit pikem, kuid esimesega võrreldes siiski 4,6 sekundit lühem. See näitab et teisel katsel on juba saavutatud piisav jahutusvedeliku hulk nii templi kui ka matriitsi jahutuspesades ning ruumala muutmine enam edasisi positiivseid tulemusi ei anna.

Tabel 11 kolmanda analüüsi keskmiste punktide jahutusaeg

Mõõdetav punkti nr.	Aeg jahtumiseks (s)
1	2,336
2	13,78
3	26,5
4	35,53
5	44,03
6	50,61
7	56,63
8	60,38
9	64,63

Joonisel 17 on näidatud detaili jahtumiskiiruse skaalat detaili ristlõikes. Värvide skaala kinnitab tabeli 11 tulemusi keskmisse positsiooni paigutatud mõõtepunktides. Võrreldes teise katsega on pilt väga sarnane, tabelite andmete võrdlus kinnitab seda tulemust.



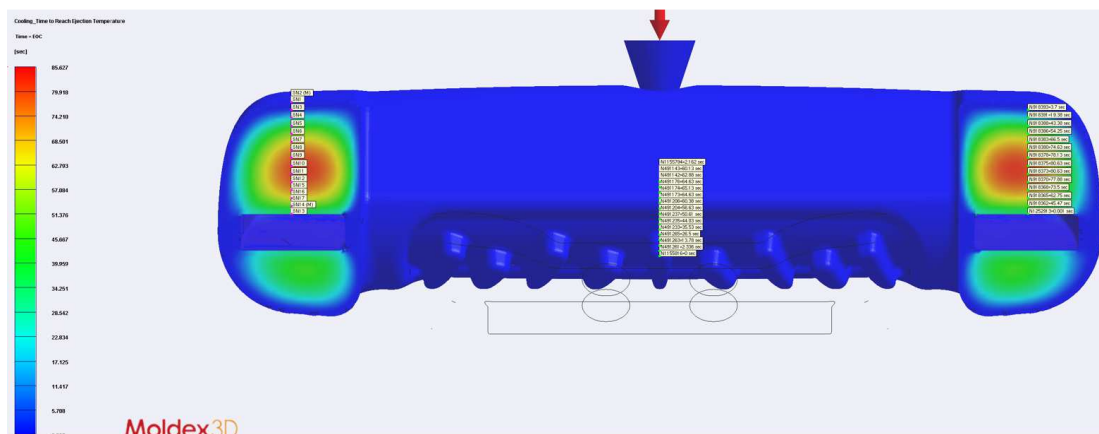
Joonis 17 3. analüüsi keskmiste punktide graafiline kujutis

Tabel 12 kinnitab sarnaseid tulemusi ka äärmistel punktidel, jahtumisaeg ei ole märgatavalt vähenenud. Võrreldes tabeliga 10, on vahe minimaalne – vaid 0,01 sekundit võitu. Võrreldes algse katsetulemusega, tähendab see äärtes 3 sekundit jahutusaja vähenemist.

Tabel 12 kolmanda analüüsi äärmiste punktide jahutusaeg

Mõõdetav punkti nr.	Aeg jahtumiseks (s)
1	3,7
2	19,38
3	43,38
4	54,25
5	66,5
6	74,63
7	78,13
8	80,63
9	80,63

Joonisel 18 on näidatud külgmiste mõõtmispunktide värviskaalat. Jahtumisaeg on endiselt kõrgem kui keskmistel punktidel, mis tähendab et jahutuskanalite pindala ning ruumala suurendamine ei mõjutanud jahutamiskiirust ka külgmistes punktides.



Joonis 18 3. analüüsi külgmiste punktide graafiline kujutis

### 3.6 Tulemuste analüüs ja järeldused

Selleks, et saada võimalikult täpne ning arusaadav tulemus selle konkreetse detaili jahutuse tsükliaja muutumisest uute disainide jahutuskanalite analüüside järgi, on kokku võetud tabelid 7, 9 ja 11. Ülevaatlik detaili jahutusaja muutumine on tabelis 13

Tabel 13 kolme disaini keskmiste punktide jahtumisaegade võrdlus

Mõõdetav punkti nr.	Aeg jahtumiseks (s) disain 1	Aeg jahtumiseks (s) disain 2	Aeg jahtumiseks (s) disain 3
1	4,379	2,342	2,336
2	17,72	13,8	13,78
3	31,14	26,3	26,5
4	40,61	35,55	35,53
5	49,4	44,05	44,03
6	56,18	50,63	50,61
7	62,49	56,64	56,63
8	65,99	60,39	60,38
9	70,24	64,64	64,63

Tabel 13 näitab, et detaili kujumoodustavate detailide jahutuskanalite optimeerimisega Moldex3D simulatsiooni analüüsi abil, on võimalik vähendada detaili jahtumisaega temperatuurilt 255 °C temperatuurini 150 °C, kuni 4,84 sekundit.

Oletusel, et detailide aastane vajadus on 3 miljonit detaili, tootmise üldkulud ühe pressvormi kohta on 100 € ööpäevas ja jahtumisajale lisandub 5 sekundit vormi sulgemiseks ning avanemiseks, siis disain nr. 2-ga on võimalik ainult üldkulude pealt kokku hoida aastas üle 4200 €. See tähendab, et on võimalik 42 ööpäeva aastas kasutada survevalu vormimise masinat teiste detailide valmistamiseks, mis on suurtes tööstustes väga oluline.

Edasiseks katsetamiseks sobivad mõlemad optimeeritud jahutuskanalitega disainid. Katsetuste käigus on võimalik näha tootmises, millise disainiga paremad tulemused tulevad ning vähem probleeme esineb.

## KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli disainida uus optimeeritud jahutuskanalitega disain vormimiselementidele (tempel ja matriits) ning vähendada survealuvormimise tsükliäga Norma AS tootmises. Disaini tegemisel kasutati CAM/CAD tarkvara Siemens NX ning vormimise simuleerimisel tarkvara Moldex3D. Alandmed simulatsiooni ning mudelite tegemiseks saadi firmalt Norma AS. 3D printimise materjali valiku tegemiseks saadi info TalTech Protolabilt.

Erinevaid disaine, mida analüüsi oli kolm. Alandmed igal katsetusel olid samad. Esimene analüüs tehti olemasoleva tehnoloogiaga valmistatud jahutuskanalitega. Sama tehnoloogiaga on valmistatud kõik Norma AS-is olevad kujumoodustavad detailid. Kaks järgmist disaini tehti optimeeritud jahutuspesadega, mida saab valmistada hetkel ainult metalli 3D printimise tehnoloogiaga.

Simulatsioonide analüüside tulemused näitasid, et metalli 3D printimise tehnoloogiaga valmistatud kujumoodustavate elementide jahutuskanalid on efektiivsemad ning jahutavad plastdetaili kiiremini kui standardsete jahutuskanalitega. Tänu uutele jahutuskanalitele on võimalik lühendada survealuvormimise tsükliäga.

Optimeeritud kanalitega vormimisdetailide negatiivne pool on templi ning matriitsi suurenenud valmistamise hind. Lisaks võib probleeme esineda jahutuskanalite puhastamisel.

Kokkuvõtteks võib öelda, et jahutuskanaleid optimeerides on võimalik vähendada tsükliäga, millega on võimalik survealuvormimise tootmist efektiivsemaks teha ning vabastada survevalu masinate töötunde teiste detailide valmistamiseks. See vähendab detaili omahinda ning annab eelise turul konkurentide ees. Kuid arvestada tuleb suurema kuluga kujumoodustavate elementide valmistamisel.

Järgmine samm on valida sobiv materjal ning valmistada kujumoodustavad elemendid uue disaini järgi metalli 3D printimise tehnoloogiaga. Lõpptulemuse saab siis, kui detailid on prinditud ning on valmistatud vormi prototüüp, et katsetada 3D prinditud terase vastupidavust ning jahutuskanalite efektiivsust.

## **SUMMARY**

The goal of this Bachelor's thesis is to design new and with optimized cooling channels models for cavity forming elements and shorten the injection molding cycle times for Norma AS mould production. For designing new models there was used Siemens NX CAD/CAM software and for simulating the production of the new forming element there was used Moldex3D software. Initial data for the simulation and initial models with the standard cooling channels were provided by Norma AS. The material choice for 3D printing was provided by TalTech Protolabs.

There was three different designs that went to Moldex3D simulation. Initial data for each analyze was exactly the same. First analyze was made for the designs with the standard cooling channel technology, what is used in all cavity forming elements for Norma AS injection molds. Analyzes two and three were made for the designs with optimized cooling channels, which can only be made with metal 3D printing technology.

Results of the Moldex3D simulation analyzes showed that the forming elements with the new optimized cooling channel designs performed more effectively and were able to cool down the melted material with a shorter time than the standard cooling channels, which are used today. The cycle time was shortened with the new designs.

The negative side when metal 3D printing the cavity forming elements, is its cost to manufacture. Furthermore, it can be difficult to clean the cooling channels. Drilling through is not a viable option anymore, as it is for the standard technology.

In conclusion it is possible to shorten the cycle time of the injection molding if the cooling channels optimized by the design. The injection molding process can be more effective and cycle times to produce a plastic detail can be made shorter. This gives the production more possibilities to free up injection molding machine times to produce any other products that are needed. This also reduces the total cost of the detail and gives a good edge over the competition in the market. But higher cost of manufacturing the cavity forming elements should be taken into account.

The next step is to choose the best material for both cavity forming elements and to produce the elements with 3D metal printing technology. The end results are possible to see when elements are in the prototype mold and in production. The durability of the 3D printed metal and the quality of the optimized cooling channels are unknown at the moment.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] History of Plastic Injection Moulding. [Online]. <https://www.engineeringexchange.com/profiles/blogs/history-of-plastic-injection-moulding>. Kasutatud: 04.10.2019.
- [2] Georg Menges, Walter Michaeli, Paul Mohren, *How to Make Injection Molds*, Teine trükk, 1993.
- [3] Injection Molding Process. [Online]. <https://www.xcentricmold.com/injection-molding-process>. Kasutatud: 04.10.2019.
- [4] K. Stoeckhert, A. Kurt, *Mold-making handbook for the plastics engineer*, 1983.
- [5] Injection Mould Tools Explained. [Online]. <https://www.toolcraft.co.uk/injection-mould-tools/advice/injection-mould-tool-explained.htm>. Kasutatud: 04.10.2019.
- [6] G. Lucchetta, D. Masato and M. Sorgato, "Optimization of mold thermal control for minimum energy consumption in injection molding of polypropylene parts," *Journal of Cleaner Production*, vol. 182, pp 217-226, 1. Mai 2018.
- [7] A. Brent Strong, *Plastics: Materials and Processing*, Teine trükk, 2000.
- [8] 3D metals: Discover the variety of Metal Powders. [Online]. <https://www.slm-solutions.com/en/resources/>. Kasutatud: 20.10.2019.
- [9] Mould base assistant. [Online]. <https://www.hasco.com/en/formAssistant>. Kasutatud 02.11.2019.
- [10] "Linear AMS Utilizes Moldex3D Conformal Cooling Analysis to Reduce 69% Cooling Time". 10.20.2016. [Online]. [https://www.moldex3d.com/en/blog/customer\\_success/linear-ams-utilizes-moldex3d-conformal-cooling-analysis-to-reduce-69-cooling-time/](https://www.moldex3d.com/en/blog/customer_success/linear-ams-utilizes-moldex3d-conformal-cooling-analysis-to-reduce-69-cooling-time/). Kasutatud 04.09.2019
- [11] Uddeholm Unimax. [Online]. <https://www.uddeholm.com/en/products/uddeholm-unimax-2/>. Kasutatud 20.10.2019.
- [12] 1.2767 Seel for through hardening. [Online]. <https://www.meusburger.com/EN/US/products/mold-making/quality/material-grades/12767-steel-for-through-hardening>. Kasutatud 20.10.2019.