

2013•2014
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Vergelijkende studie tussen variothermisch en hybride variothermisch spuitgietproces

Promotor :
Prof. dr. ir. Jozefien DE KEYZER
dr. ir. Maarten DE MUNCK

Promotor :
ing. R. APPERMONT

Siemen Gorissen , Bea Driessen

Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Gezamenlijke opleiding van de Universiteit Hasselt en de KU Leuven

2013•2014

Faculteit Industriële

ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

Masterproef

Vergelijkende studie tussen variothermisch en hybride
variothermisch spuitgietproces

Promotor :

Prof. dr. ir. Jozefien DE KEYZER

dr. ir. Maarten DE MUNCK

Promotor :

ing. R. APPERMONT

Siemen Gorissen , Bea Driessen

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: elektromechanica*

Woord vooraf

Deze masterproef kende zijn verloop aan de Cel Kunststoffen in het Technologiecentrum te Diepenbeek. Het onderwerp van deze thesis is een vergelijkende studie tussen variotherm en hybride variotherm spuitgieten.

Wij kozen voor dit onderwerp omdat dit de kans bood ons te verdiepen in een gevarieerde set van kennis en vaardigheden uit verschillende technische domeinen. Daarom zien we deze thesis als de ideale afsluiter van onze opleiding aan de gezamenlijke faculteit industriële wetenschappen UHasselt en de KULeuven.

De thesis werd afgerond in het eerste semester van het academiejaar '13-'14. Een onderzoek uitwerken is hoe dan ook geen eenvoudige opgave, laat staan op een half jaar tijd. Wij hadden deze scriptie dan ook nooit tot een goed einde kunnen brengen zonder de begeleiding van onze promotoren. Hierbij zouden wij hen graag bedanken voor hun hulp en steun.

Als eerste zouden we zeer graag onze externe promotor, ing. R. Appermont, van harte danken. Hij heeft ons steeds voorzien van de nodige uitleg en begeleiding, bij elke stap van het proces.

Ten tweede willen we onze dank uiten ten aanzien van onze interne promotor, dr. ir. M. De Munck. Zijn kritisch oog, creatieve inbreng en technisch inzicht bij vergaderingen hebben in grote mate bijgedragen tot het resultaat.

Ten derde – maar zeker niet in het minst – willen we graag onze opdrachtgeefster en tevens tweede externe promotor, dr. ir. J. De Keyzer, bedanken voor haar waardevolle opmerkingen op eender welk moment gedurende het verloop van deze thesis.

Ten laatste vinden we het niet meer dan gepast ook al onze leerkrachten en begeleiders van de afgelopen jaren te danken voor hun adviezen, inzichten en ideeën. Zij hebben niet enkel hun effect gehad op deze thesis, maar ook op onze visie op techniek.

Diepenbeek, 23 januari 2014
Siemen Gorissen en Bea Driessen

Inhoudsopgave

Woord vooraf.....	1
Lijst van tabellen.....	5
Lijst van figuren.....	6
Abstract.....	8
Abstract (English).....	9
1. Inleiding.....	11
1.1 Situering.....	11
1.2 Probleemstelling.....	12
1.3 Onderzoeksvraag.....	12
1.4 Doelstellingen.....	12
1.5 Materiaal en methode.....	13
2. Spuitgieten.....	15
2.1 Het spuitgietproces.....	15
2.2 Matrijsopbouw.....	16
2.3 Voor- en nadelen.....	16
2.4 Conventioneel en variotherm spuitgieten.....	17
2.4.1 Conventioneel spuitgieten.....	17
2.4.2 Variotherm spuitgieten.....	17
2.4.3 VIM versus CIM.....	18
2.5 Levensduur van de matrijs.....	19
3. Variotherm spuitgieten: methodes – theorie - matrijsontwerp.....	21
3.1 Opwarming.....	21
3.1.1 Elektrische verwarming.....	22
3.1.2 Verwarming met water onder druk.....	22
3.1.3 Elektrische verwarming versus verwarming met water onder druk.....	22
3.2 Afkoeling.....	23
3.3 Ontwerp.....	23
3.3.1 Ligging verwarmingselementen.....	24
3.3.2 Ligging van de koelkanalen.....	25
3.3.3 Richting van de waterstroming.....	28
3.4 Materiaal.....	30
3.4.1 Kleine thermische uitzettingscoëfficiënt.....	30
3.4.2 Grote hardheid.....	30
3.4.3 Grote treksterkte.....	30
3.4.4 Kleine thermische massa en grote thermische geleidbaarheid.....	31
3.5 Speciale matrijsontwerpen.....	33
3.5.1 Isolatielaag.....	33

3.5.2	Zwevende inzet.....	36
4.	Ontwerpen van de inzet in Creo en testen in Comsol	39
4.1	Gegeven.....	39
4.1.1	Product.....	39
4.1.2	Matrijsopbouw.....	39
4.1.3	Inzet achter- en voormatrijs.....	40
4.2	Plaatsen van de verwarmingselementen.....	41
4.2.1	Vier verwarmingselementen.....	43
4.2.2	Zeven verwarmingselementen.....	45
4.2.3	Negen verwarmingselementen	47
4.2.4	Eindontwerp: één verwarmingselement met hotrunner-holte.....	49
4.3	Plaatsen van de koelkanalen.....	52
4.3.1	Temperatuurregeling van het water.....	54
4.3.2	Algemene informatie over de ligging van de koelkanalen	54
4.3.3	Eerste tussentijds ontwerp.....	56
4.3.4	Tweede tussentijds ontwerp.....	58
4.3.5	Derde tussentijds ontwerp.....	59
4.3.6	Eindontwerp	61
4.4	Materiaalkeuze	63
4.4.1	Opstelling.....	63
4.4.2	Resultaten	68
4.5	Besluit.....	70
5.	Vergelijking tussen de simulatieresultaten van een variotherme en een hybride variotherme cyclus.....	71
5.1	Hybride variotherm en variotherm spuitgieten	71
5.2	Methode en startcondities	71
5.3	Simulatie en analyse van een variotherme cyclus, hybride variotherme cyclus – Bovenste koelkanalen en hybride variotherme cyclus.....	74
5.3.1	Variotherme opwarming en afkoeling	74
5.3.2	Hybride variotherme opwarming en afkoeling – Bovenste koelkanalen	78
5.3.3	Hybride variotherm	81
5.4	Vergelijking van de drie processen	84
6.	Sturing.....	87
6.1	Componenten	87
6.2	Sturing van het verwarmingselement.....	87
6.2.1	Thermokoppel module	87
6.2.2	Thyristorschakeling.....	88
6.3	PLC-Sturing.....	89
6.3.1	Signalen.....	89

6.3.2	Programma	89
6.3.3	Bestelde componenten	90
7.	Afschrijftijd en energiekost	91
7.1.	Energiekost	91
7.2.	Afschrijftijd van de machine.....	91
7.3.	Bespreking.....	91
8.	Conclusie.....	93
9.	Literatuurlijst.....	95
10.	Bijlagenlijst.....	97

Lijst van tabellen

Tabel 1: Opwarmingsmethodes [13]	21
Tabel 2: Afkoelingsmethodes [13]	23
Tabel 3: Resultaten van de drie optimalisatiestrategieën [15]	24
Tabel 4: Resultaten ligging koelkanalen [18]	26
Tabel 5: Materiaaleigenschappen van roestvast staal, een Al-legering en een Cu-legering [17]	31
Tabel 6: Materiaaleigenschappen van roestvast staal, een Al-legering en een Cu-legering	31
Tabel 7: Testen voor thermische efficiëntie [7]	33
Tabel 8: Materiaaleigenschappen van de matrijsonderdelen [7]	34
Tabel 9: Technische gegevens verwarmingselement 30x21 [28]	43
Tabel 10: Thermische eigenschappen keramisch verwarmingselement	43
Tabel 11: Eigenschappen staal	44
Tabel 12: Temperatuuruniformiteit vormholte	45
Tabel 13: Technische gegevens verwarmingselementen 22x14 en 30x21 [28]	45
Tabel 14: Temperatuuruniformiteit vormholte	46
Tabel 15: Temperatuuruniformiteit vormholte	48
Tabel 16: Eigenschappen verwarmingselement eindontwerp	49
Tabel 17: Temperatuuruniformiteit vormholte	50
Tabel 18: Temperatuuruniformiteit vormholte	52
Tabel 19: Minimum- en maximumtemperaturen van bodemvlak vormholte	57
Tabel 20: Minimum- en maximumtemperaturen van bodemvlak vormholte	59
Tabel 21: Minimum- en maximumtemperaturen van bodemvlak vormholte	60
Tabel 22: Minimum- en maximumtemperaturen van bodemvlak vormholte	63
Tabel 23: Geschikte materialen	64
Tabel 24: Materiaaleigenschappen	66
Tabel 25: Materiaaltesten	67
Tabel 26: Deelprocessen met methode en stopconditie	72
Tabel 27: Overzicht	84

Lijst van figuren

Figuur 1: Matrijstemperatuur VIM (1) t.o.v. CIM (2) [1]	11
Figuur 2: Kaartjeshouder.....	13
Figuur 3: Spuitgietmachine [2].....	15
Figuur 4: Spuitgieten [5]	15
Figuur 5: Spuitgietmatrijs [6]	16
Figuur 6: Temperatuurregeling: a) CIM versus b) VIM [8].....	17
Figuur 7: Vloeinaadvorming: a) stap 1, b) stap 2 [9]	18
Figuur 8: Reproductie vormholte: a) CIM, b) VIM [9].....	18
Figuur 9: Cyclustijd VIM en CIM [9]	19
Figuur 10: Levensduur van een matrijs [12]	20
Figuur 11: Verwarmingselement [7]	22
Figuur 12: Basisplan voor de ligging van de verwarmingselementen [15].....	24
Figuur 13: Richtwaarden voor de ligging van koelkanalen [17]	25
Figuur 14: Ligging van de koelkanalen [18]	26
Figuur 15: Basisontwerp matrijs [17]	27
Figuur 16: Effect van de parameters P en L op de opwarmingstijd [17].....	27
Figuur 17: Effect van de parameters P en L op de temperatuuruniformiteit [17].....	28
Figuur 18: Drie verschillende aansluitingen: a) Volledige aaneensluiting van de koelkanalen, b) aaneensluiting van de koelkanalen per helft (boven/onder) 2 verdelers met 2 aansluitingen, c) volledig parallelle aansluiting, 2 verdelers met 6 aansluitingen [19].....	28
Figuur 19: Temperatuurverloop van de inzet (materialen: RVS, Al-legering, Cu-legering) [17].....	31
Figuur 20: Temperatuurverdeling aan het inzetoppervlak (materialen: RVS, Al-legering, Cu-legering) [17].....	32
Figuur 21: Matrijsontwerp met isolatielaag [17].....	33
Figuur 22: Matrijsontwerpen: a) Stoomverwarming b) Elektrische verwarming [7]	34
Figuur 23: RHCM met stoomverwarming [7].....	35
Figuur 24: RHCM met elektrische verwarming [7]	35
Figuur 25: Temperatuurverdeling aan het inzetoppervlak [7]	36
Figuur 26: Ontwerp van matrijs met zwevende inzet [17].....	36
Figuur 27: Verschil tussen zwevende en vaste inzet [17].....	37
Figuur 28: Kaartjeshouder	39
Figuur 29: Matrijsopbouw.....	39
Figuur 30: Inzet achtermatrijs.....	40
Figuur 31: Inzet voormatrijs	40
Figuur 32: a) Ronde verwarmingselementen, b) Vlakke verwarmingselementen.....	41
Figuur 33: a) Inzet, b) Vereenvoudigde inzet met splitsing.....	42
Figuur 34: Verwarmingselement van Bach rc [27].....	42
Figuur 35: Ligging vier verwarmingselementen: a) bovenaanzicht b) zijaanzicht.....	43
Figuur 36: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden.....	44
Figuur 37: Vormholte	44
Figuur 38: Opwarming met 4 elementen.....	45
Figuur 39: Ligging zeven verwarmingselementen: a) bovenaanzicht, b) zijaanzicht.....	46
Figuur 40: Simulatieresultaten in [K]: a) tien seconden, b) twintig seconden.....	46
Figuur 41: Opwarming met 7 elementen	47
Figuur 42: Ligging negen verwarmingselementen: a) bovenaanzicht, b) zijaanzicht.....	47
Figuur 43: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden.....	48
Figuur 44: Opwarming met 9 elementen	49
Figuur 45: Ontwerp met één verwarmingselement.....	50
Figuur 46: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden.....	50
Figuur 47: Opwarming met 1 element van 1500W met hotrunner-holte.....	51
Figuur 48: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden.....	51
Figuur 49: Opwarming met 1 element van 3000W met hotrunner-holte.....	52
Figuur 50: Ligging koelkanalen.....	53

Figuur 51: Ligging koelkanalen: Selective Laser Melting.....	53
Figuur 52: Raster.....	55
Figuur 53: Stroming eerste ontwerp: a) bovenkant b) onderkant.....	56
Figuur 54: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden.....	56
Figuur 55: Bodenvlak vormholte	57
Figuur 56: Maximum- en minimumtemperatuur van de vormholte van het 1ste tussentijdse ontwerp.....	57
Figuur 57: Stroming tweede ontwerp	58
Figuur 58: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) twintig seconden.....	58
Figuur 59: Maximum- en minimumtemperatuur van de vormholte van het 2 ^{de} tussentijdse ontwerp	59
Figuur 60: Tussentijds ontwerp.....	59
Figuur 61: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden.....	60
Figuur 62: Maximum- en minimumtemperatuur van de vormholte van het 3 ^{de} tussentijdse ontwerp	61
Figuur 63: Koelkanalen bovenste helft	61
Figuur 64: Raster eindontwerp.....	62
Figuur 65: Koelkanalen onderste helft.....	62
Figuur 66: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden.....	62
Figuur 67: Maximum- en minimumtemperatuur van de vormholte van het eindontwerp	63
Figuur 68: Ashby chart van prijs en thermische geleidbaarheid	64
Figuur 69: Ashby chart van prijs en specifieke warmtecapaciteit.....	65
Figuur 70: Ashby chart van Vickers hardheid en dichtheid	65
Figuur 71: Materiaalkeuze ontwerp.....	66
Figuur 72: Koelkanalen	67
Figuur 73: Temperatuurverschil vormholte.....	68
Figuur 74: Temperatuurverschil vormholte.....	68
Figuur 75: Temperatuurverschil vormholte.....	69
Figuur 76: Temperatuurverschil vormholte.....	69
Figuur 77: Temperatuurverschil vormholte.....	70
Figuur 78: a) Bodem vormholte, b) Volledige vormholte	72
Figuur 79: Simulatieresultaat in [K]- Einde eerste opwarming.....	74
Figuur 80: Verloop eerste opwarming.....	74
Figuur 81: Simulatieresultaat in [K]- Einde tweede opwarming	75
Figuur 82: Verloop tweede opwarming.....	76
Figuur 83: Simulatieresultaat in [K]- Einde afkoeling	77
Figuur 84: Verloop afkoeling.....	77
Figuur 85: Simulatieresultaat in [K]- Einde eerste opwarming.....	78
Figuur 86: Verloop eerste opwarming.....	78
Figuur 87: Simulatieresultaat in [K]- Einde tweede opwarming	79
Figuur 88: Verloop tweede opwarming.....	80
Figuur 89: Simulatieresultaat in [K]- Einde afkoeling.....	80
Figuur 90: Verloop afkoeling.....	81
Figuur 91: Simulatieresultaat in [K]- Einde eerste opwarming.....	81
Figuur 92: Verloop eerste opwarming.....	82
Figuur 93: Simulatieresultaat in [K]- Einde tweede opwarming	82
Figuur 94: Verloop tweede opwarming.....	83
Figuur 95: Simulatieresultaat in [K]- Einde afkoeling	83
Figuur 96: Einde afkoeling	84
Figuur 97: Plaatsing sensor: a) In verwarmingselement, b) In inzet	87
Figuur 98: Faseaansnijding [31]	88
Figuur 99: Communicatie	89

Abstract

Cel Kunststoffen, deel van het Technologiecentrum in Diepenbeek, voert onderzoek uit naar variotherm spuitgieten. Het doel van deze masterproef is om twee processen te vergelijken, namelijk een variotherm en hybride variotherm proces. Het hybride principe, dat twee opwarmingsmethodes combineert, is relatief nieuw en de voordelen op vlak van cyclustijd en temperatuuruniformiteit zijn nog niet in kaart gebracht.

De eerste variotherme temperatuurregeling combineert een keramisch verwarmingselement met waterkoeling, de tweede, hybride regeling, benut zowel het keramisch verwarmingselement als de koelkanalen bij de opwarming. Hybride regelingen zijn er van allerlei aard, maar er werd voor deze regeling gekozen omdat deze combinatie toelaat eenzelfde matrijsontwerp zowel het variotherme als het hybride variotherme proces te gebruiken. Deze thesis bespreekt de optimalisatie van dit matrijsontwerp in Creo op basis van simulaties in Comsol en vergelijkt de simulatieresultaten van beide methodes.

Er werd vastgesteld dat het hybride proces de opwarmingstijd met ongeveer 70% verminderd voor eenzelfde temperatuurgradiënt overheen de vormholte. Omdat de vormholte efficiënter werd verwarmd bij het hybride proces is de koeltijd iets kleiner. Beide effecten resulteren dan ook in een afzienbare cyclustijdvermindering.

Abstract (English)

Cel Kunststoffen, located at the Technology centre in Diepenbeek, researches Variothermic Molding. The goal of this master's thesis is to compare two processes, namely Variothermic and Hybrid Variothermic Molding. The Hybrid principle is based on a combination of two heating methods. Because this principle is relatively new, it is interesting to examine the advantages of this process with respect to cycle time and temperature uniformity.

The Variothermic Control combines a ceramic heating element with water cooling. The Hybrid Control utilizes the heating element in combination with the cooling channels to heat the mold. There are multiple combinations possible for the Hybrid Process, but this combination makes it possible to use the same design for the two types of control. This master's thesis discusses the optimisation of the design in Creo using simulations in Comsol and comparing the results of both methods.

It was observed that the Hybrid process reduces the heating time with roughly 70%, when a same thermal gradient in the cavity was achieved. Because the cavity in the Hybrid process is heated more efficiently, the cooling time is slightly reduced. Both of these effects result in a significant reduction of the cycle time.

1. Inleiding

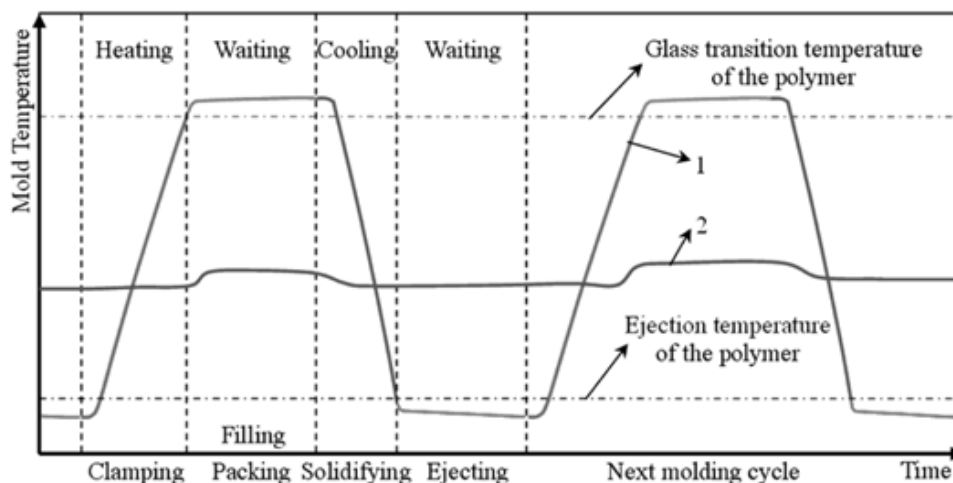
1.1 Situering

Cel Kunststoffen voert onderzoek uit om het spuitgietproces op innovatieve wijze te implementeren en de procesparameters te optimaliseren. Deze optimalisatie doen ze door zich te concentreren op de volgende processen:

- spuitgieten van holle kunststofproducten;
- microsputgieten;
- spuitgieten met lange glasvezels;
- tweecomponentensputgieten;
- variotherm spuitgieten.

In het kader van onze masterproef elektromechanica, kregen we de kans deel uit te maken van het laatst genoemde onderzoeksproject, namelijk variotherm spuitgieten.

Variotherm spuitgieten, in het Engels 'Variotherm Injection Moulding' (VIM), is een proces waarbij de matrijstemperatuur geregeld wordt in functie van de processtap: sluiten van de matrijs, inspuiten van de kunststof, persen van de kunststof, openen van de matrijs, uitwerpen van het product. Dit in tegenstelling tot 'Conventional Injection Moulding' (CIM) waarbij de matrijstemperatuur constant wordt gehouden gedurende het hele spuitgietproces. Figuur 1 toont de verschillen in matrijstemperatuur tussen beide processen.



Figuur 1: Matrijstemperatuur VIM (1) t.o.v. CIM (2) [1]

VIM biedt een aantal voordelen ten opzichte van CIM:

- verlengen van de vloeiweg bij dunwandige producten;
- verbeteren van de oppervlaktekwaliteit van de eindproducten;
- verhogen van de processnelheid bij dikwandige producten.;
- verbeterde reproductie van de vormholte;
- vermindering van zichtbare vloeilijnen
- mogelijk om hoogglanzende oppervlaktes te creëren zonder nood aan nabewerking van het product

Deze thesis bestaat uit een diepgaande vergelijking van variotherm en hybride variotherm spuitgieten. De hybride techniek is een variant van het variotherm spuitgieten waarbij, in dit geval, twee verschillende opwarmingsmethodes worden gecombineerd. In deze masterproef maakt de variotherme techniek gebruik van elektrische opwarming en waterkoeling. De hybride variotherme techniek combineert opwarming met water onder druk samen met elektrische opwarming en maakt eveneens gebruik van waterkoeling.

1.2 Probleemstelling

Ontwerpers blijven ingenieurs uitdagen door uiteenlopende producten te creëren met moeilijk te spuitgieten afmetingen, soms zelfs in combinatie met moeilijk te spuitgieten materialen. Het variotherm spuitgietproces biedt voor een groot aantal van deze producten een oplossing, zo kan bijvoorbeeld de hogere temperatuur de afgelegde vloeiweg van thermoplasten met een hoge glastransitietemperatuur verhogen. Toch is het belangrijk de kwaliteit van deze oplossing na te gaan. Variotherm spuitgieten is immers een heel breed onderwerp omdat het meerdere temperingsmethodes omvat. Onder deze temperingsmethodes vallen onder meer de volgende verwarmingsmethodes: stoomverwarming, elektrische verwarming, IR-straling en inductie. Omdat elk van deze methodes zijn eigen voor- en nadelen heeft kan men zich de volgende vraag stellen: “Is in de gekozen oplossing wel de meest optimale temperingsmethode gehanteerd om de gevraagde kwaliteit te realiseren?” Om deze vraag te kunnen beantwoorden is een diepgaande vergelijking van verschillende temperingsmethodes vereist. Daarom dat in deze masterproef een vergelijkende studie wordt uitgevoerd tussen een variotherm en hybride variotherm spuitgietproces. Dit zal in de toekomst ingenieurs toelaten om een meer doeltreffende beslissing te nemen.

1.3 Onderzoeksvraag

Wat zijn de verschillen in cyclustijd en temperatuuruniformiteit in het geval van ‘zuiver resistief elektrisch opwarmen bij het variotherm spuitgieten’, en ‘gecombineerd resistief elektrisch verwarmen en waterverwarmen bij het hybride variotherm spuitgieten’, indien beide processen gebruik maken van waterkoeling doorheen dezelfde koelkanalen als die van de verwarming?

1.4 Doelstellingen

Het hierboven beschreven probleem vraagt naar de verschillen tussen twee mogelijke opwarmingsmethodes. Namelijk de verschillen tussen enerzijds een methode op basis van elektrische verwarming en anderzijds een methode op basis van elektrische verwarming in combinatie met waterverwarming. Om een antwoord te geven op deze vraag dient eerst en vooral een werkend testsysteem opgebouwd te worden. Dit testsysteem bevat een matrijsontwerp, elektrische verwarmingselementen en een sturing voor zowel de elementen als het water.

Om de vergelijking uit te voeren tussen een hybride variotherm en een variotherm spuitgietproces moeten drie doelstellingen behaald worden.

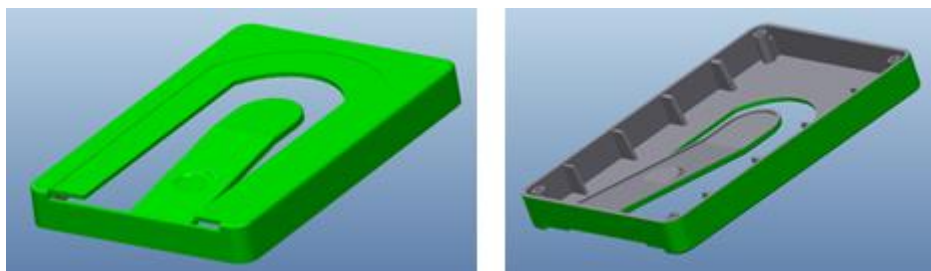
De eerste doelstelling is het ontwerpen van een inzet voor een variotherm spuitgietproces op basis van elektrische verwarming met waterkoeling. Wanneer de koelkanalen naast de koeling ook voor de opwarming gebruikt worden, is er sprake van het hybride variotherm proces. Beide processen kunnen dus gerealiseerd worden met eenzelfde ontwerp.

De tweede doelstelling is het plaatsen en testen van een inzet en verwarmingselementen in een bestaande spuitgietinstallatie op Cel Kunststoffen.

De derde doelstelling is het afleveren van een vergelijkende studie tussen het variotherm en het hybride variotherm spuitgieten op vlak van cyclustijd en temperatuuruniformiteit van de inzet.

1.5 Materiaal en methode

Uit de volgorde van de doelstellingen blijkt dat, om een vergelijkende studie af te leveren, de eerste stap het maken van de matrijsinzet voor een product is. De matrijs werd al grotendeels ontworpen op Cel Kunststoffen, het ontwerp van de inzet moet enkel aangepast te worden met de nodige verwarmingselementen en koelkanalen. Het product dat gemaakt zal worden is een visitekaarhouder (zie figuur 2).



Figuur 2: Kaartjeshouder

De volledige matrijs is al gemaakt, op de temperingsaspecten van de inzet na. Omdat de ligging van de koelkanalen de keuze en ligging van de verwarmingselementen elkaar beïnvloeden, is het noodzakelijk om deze bij het ontwerp simultaan te plaatsen.

Een eerste aspect is het kiezen van verwarmingselementen. Deze keuze wordt het best gemaakt door eerst een vergelijking te maken van de verwarmingselementen die op de markt beschikbaar zijn en daarna te kijken of deze qua afmetingen passen in het matrijsontwerp. Elementen waarvan blijkt dat deze niet geschikt zijn, bijvoorbeeld door een te laag vermogen of te grote dimensies, worden zo uitgesloten. Hierbij moet rekening gehouden worden met de vereiste matrijstemperatuur om zowel PP, PC als PC-ABS te spuitgieten.

Het volgende aspect is het maken van een 3D ontwerp van de inzet met verwarmingselementen en koelkanalen. Een literatuurstudie moet uitwijzen welke parameters de warmteoverdracht positief beïnvloeden. Om de parameters te toetsen is gepaste ontwerp- en simulatiesoftware vereist. Het ontwerp zal worden aangepast totdat er zo uniform mogelijk verwarmd en afgekoeld kan worden. Hierbij wordt gemikt op een maximaal temperatuurverschil aan het inzetoppervlak van 10°C na de opwarming en tijdens het afkoelen om kromtrekking van het product te voorkomen.

Het einde van dit optimalisatieproces zet een nieuwe stap in gang, namelijk het opstellen van de sturing voor de verwarmingselementen. Nadien volgt het bestellen van de inzet en de elektrische componenten zodat het geheel uiteindelijk kan opgebouwd worden in Cel Kunststoffen.

Als laatste stap worden de resultaten vergeleken die uit de simulaties van het hybride variotherme en variotherme proces voortvloeien. Dit levert een vergelijkende studie op waarin de effecten worden nagegaan die de verwarmingsmethodes hebben op de cyclustijd en temperatuuruniformiteit van het inzetoppervlak.

2. Spuitgieten

Spuitgieten is een discontinu fabricageproces waarmee zowel metalen als kunststofproducten kunnen gemaakt worden. Dit proefschrift bespreekt enkel de vormgeving van kunststoffen door middel van dit fabricageproces. In figuur 3 is een spuitgietmachine te zien van Arburg GmbH. In de volgende paragrafen wordt dieper ingegaan op de werking van zo een machine.

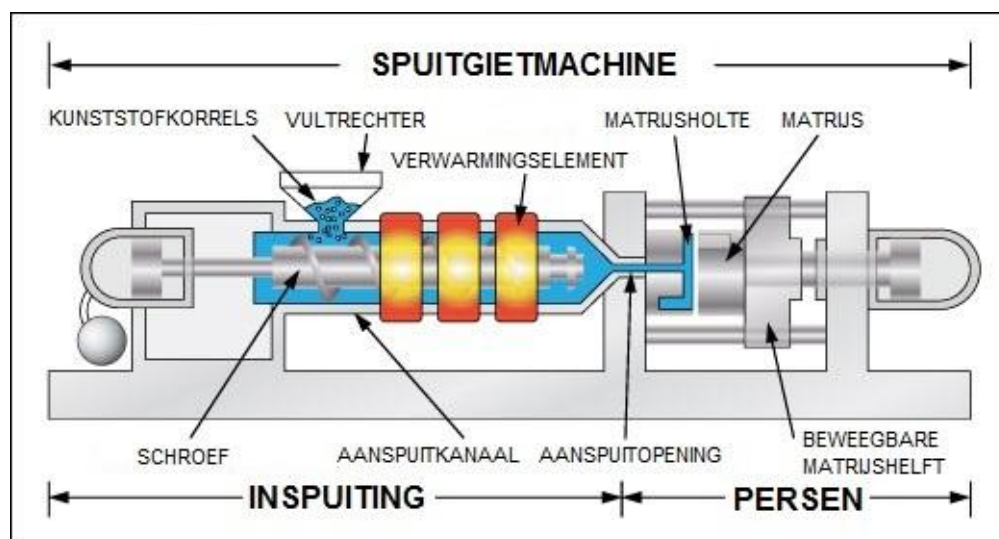


Figuur 3: Spuitgietmachine [2]

2.1 Het spuitgietproces

Bij het spuitgieten wordt het product gevormd door gesmolten kunststofkorrels, ook wel het granulaat genoemd, onder hoge druk in een matrijs te spuiten. [3]

Figuur 4 toont een schets van een spuitgietmachine. Het polymeer wordt in korrelvorm via een vultrechter in het aanspuitkanaal geleid. Daar worden de kunststofkorrels gesmolten door verwarmingselementen rondom het kanaal en frictie dankzij de roterende schroef. [4] Vervolgens wordt de gesmolten kunststof via de aanspuitopening onder hoge druk in de matrijs gestuwd door een axiale beweging van de schroef. Pas als het product gestold en afgekoeld is, wordt de matrijs geopend en het product uit de matrijs geworpen. De matrijs zal nadien terug sluiten, zodat de spuitgietmachine klaar is voor een volgende cyclus.

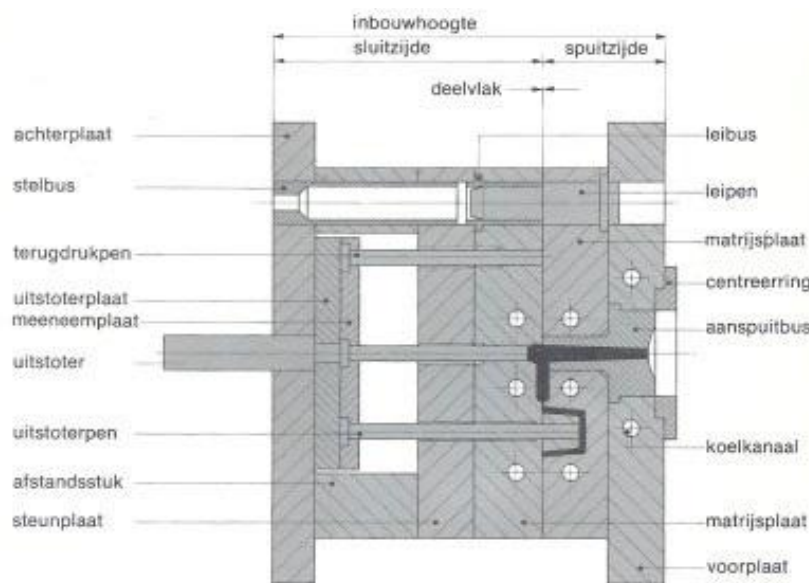


Figuur 4: Spuitgieten [5]

2.2 Matrijsopbouw

De matrijs kan opgedeeld worden in een sluitzijde en een spuitzijde, zie figuur 5. Beide matrijshelften zijn voorzien van koelkanalen waardoorheen een koelvloeistof, meestal water, stroomt om de matrijs van warmteafvoer te voorzien. De spuitzijde bevat ook een aanspuitbus langs waar de gesmolten kunststof in de matrijsholte vloeit. De matrijsholte heeft de vorm van het uiteindelijk product en is een negatief van de matrijsinzet.

De matrijsinzet bestaat uit twee matrijsplaten. De eerste matrijsplaat bevindt zich aan de spuitzijde en is vast opgesteld. De andere matrijsplaat bevindt zich aan de sluitzijde en is een deel van de bewegende matrijshelft. De bewegende matrijshelft bevat verder ook de uitstoterplaat met uitstoterpennen. Bij het openen van de matrijs, na het spuitgieten, duwen deze pennen het product uit de vormholte.



Figuur 5: Spuitgietmatrijs [6]

Er zijn ook een aantal leipennen; deze dienen voor een goede centrering van de matrijshelften. Een laatste belangrijk onderdeel is de centreerring, deze verzorgt een correcte positionering van de matrijs ten opzichte van de spuitgietmachine. [6]

2.3 Voor- en nadelen

De voordelen van spuitgieten zijn als volgt:

- er kan een breed gamma van materialen verwerkt worden;
- het voorziet een constante kwaliteit van het product;
- er is er veel vormvrijheid, ook in de grootte van de eindproducten.

De nadelen zijn:

- de metalen matrijzen zijn erg duur, waardoor dit proces enkel aan te raden is voor grote productieseries;
- dit proces vergt vrij veel energie tijdens productie.

2.4 Conventioneel en variotherm spuitgieten

Wanneer men de verwarming van de inzet bekijkt, kan ruwweg een onderscheid worden gemaakt tussen twee verschillende methodes, namelijk Conventional Injection Molding (CIM) en Variotherm Injection Molding (VIM).

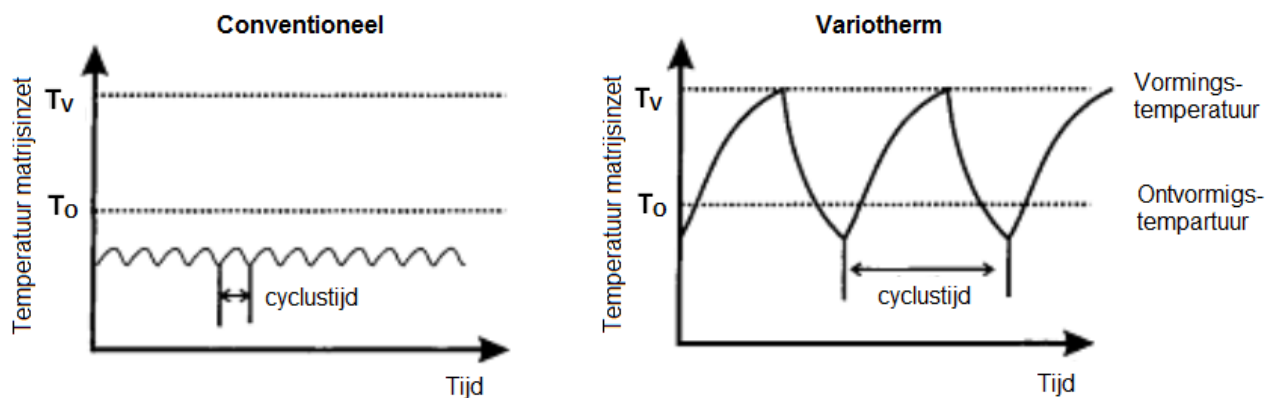
2.4.1 Conventioneel spuitgieten

Bij het conventioneel spuitgieten wordt de temperatuur van de matrijsinzet nagenoeg constant gehouden gedurende het spuitgietproces. Om dit te realiseren stroomt er tijdens het proces continu koelmiddel van constante temperatuur in de koelkanalen. De temperatuur van het koelmiddel is afhankelijk van de te spuiten kunststof en ligt onder zijn glastransitietemperatuur zodat de kunststof naderhand kan stollen. [7]

2.4.2 Variotherm spuitgieten

Bij het variotherm spuitgietproces varieert de temperatuur van de matrijsinzet in functie van de processtap. Er zal een periode van opwarming zijn vlak voor het inspuiten van de kunststof en een periode van afkoeling na de insputing. Omwille van deze dynamische temperatuurregeling wordt het proces in het Engels ook wel benoemd met de termen Rapid Heat Cycle Molding (RHCM) of Rapid Thermal Response (RTR) Molding. [1]

Een vereenvoudigde voorstelling van de verschillen tussen beide temperatuurregelingen van de matrijsinzet is zichtbaar in figuur 6.

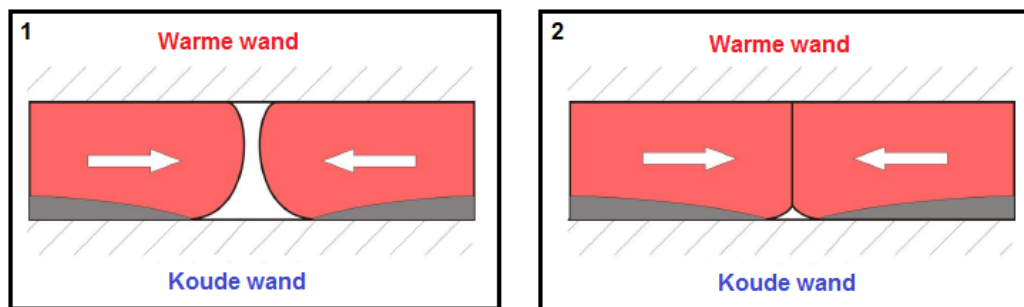


Figuur 6: Temperatuurregeling: a) CIM versus b) VIM [8]

2.4.3 VIM versus CIM

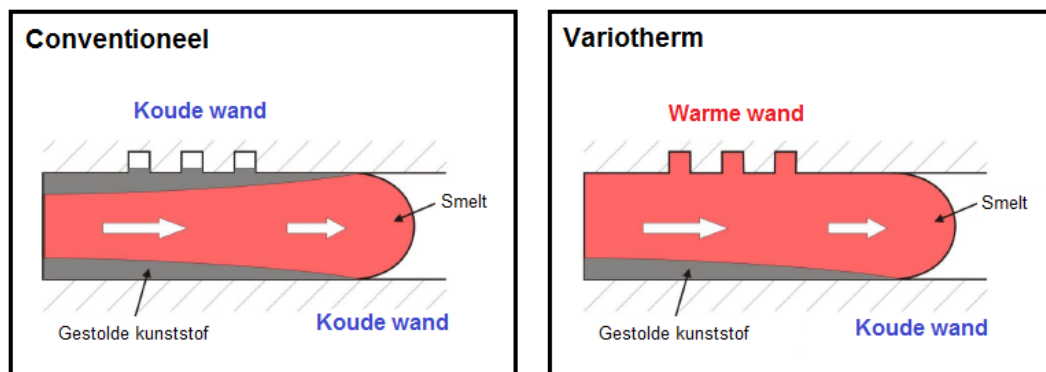
2.4.3.1 Voordelen [9]

- Het conventioneel spuitgietproces geeft nagenoeg altijd zichtbare vloeilijnen. [10] Vloeilijnen zijn lijnen waar twee fronten van gesmolten kunststof elkaar raken. Bij het variotherm spuitgieten zal de hogere matrijstemperatuur ervoor kunnen zorgen dat deze twee fronten goed in elkaar overvloeien. Daardoor zijn de vloeilijnen bij het eindproduct niet zo sterk zichtbaar, zie figuur 7. Deze figuur toont het verschil tussen de effecten van een warme en een koude wand. Zo een warme wand is realiseerbaar bij variotherm spuitgieten, de koude wand komt overeen met een conventioneel spuitgietproces.



Figuur 7: Vloeinaadvorming: a) stap 1, b) stap 2 [9]

- Dankzij de hogere temperatuur van de matrijsinzet blijft de smelttoestand van de kunststof langer behouden, hierdoor is zeer goede reproductie van de vormholte mogelijk, zie figuur 8. Op deze manier kan men ook hoogglanzende oppervlaktes creëren waardoor nabewerking niet meer nodig is.

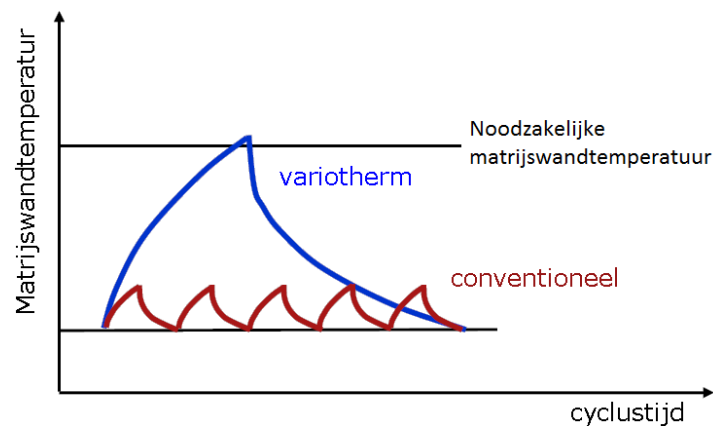


Figuur 8: Reproductie vormholte: a) CIM, b) VIM [9]

- Er is een betere oppervlaktekwaliteit mogelijk bij met vezels versterkte kunststoffen en schuimproducten.
- Kortere cyclustijden realiseerbaar bij dikwandige onderdelen dankzij de snellere afkoeling.
- Vorming van zeer dunne producten mogelijk doordat de temperatuur van de kunststof hoger zal liggen dankzij de warme matrijswand, hierdoor zal de vloeiweglengthe van de kunststof toenemen. [11]

2.4.3.2 Nadelen [9]

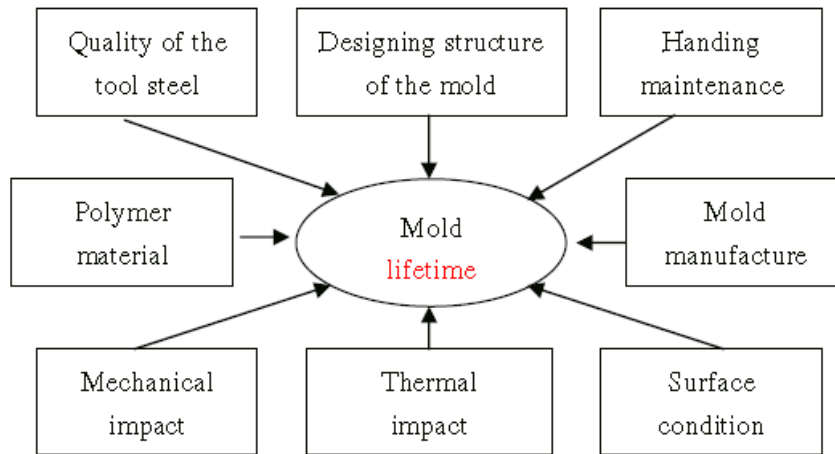
- Het verkorten van de cyclustijd geldt enkel voor dikwandige onderdelen. Bij andere producten zal er een verlenging zijn van de cyclustijd ten gevolge van de hogere matrijstemperatuur. De hogere matrijstemperatuur vertaalt zich namelijk in een langere duur van de opwarm- en afkoelfase. De langere cyclustijd resulteert bijgevolg in een lagere productiviteit. [7] De cyclustijdverlenging van variotherm ten opzichte van conventioneel spuitgieten is zichtbaar in figuur 9.
- Er is een speciaal matrijsontwerp nodig bij variotherm spuitgieten. De kosten bij productie en gebruik van de matrijs zijn afhankelijk van de gekozen opwarmingsmethode en zijn groter bij variotherm dan bij conventioneel spuitgieten.



Figuur 9: Cyclustijd VIM en CIM [9]

2.5 Levensduur van de matrijs

De omstandigheden waarin een matrijs voor variotherme spuitgietprocessen moet werken, zijn veel zwaarder dan die van conventionele spuitgietprocessen ten gevolge van de hoge werktemperaturen en temperatuurwisselingen. De grootte van de werktemperatuur is volledig afhankelijk van het te spuitgieten product. Vandaar dat de levensduur van een matrijs voor variotherme spuitgietproces lager ligt. Daarom dat er bij het ontwerpen, produceren en gebruiken van zo een matrijs extra aandacht geschonken moet worden aan de factoren die de levensduur van de matrijs beïnvloeden, zie figuur 10. Maar goed rekening houden met elk van de factoren heeft ook zijn prijs. Xiping et al. schreven dat de matrijskosten van variotherme spuitgietprocessen twee tot vijf maal groter zijn dan die van de conventionele spuitgietprocessen [12].



Figuur 10: Levensduur van een matrijs [12]

Bij het ontwerpen van de matrijs kan enkel ingespeeld worden op twee factoren, de kwaliteit van het materiaal en het ontwerp van de matrijs. Dit zal gebeuren door het inzetontwerp en het inzetmateriaal zorgvuldig vast te leggen.

3. Variotherm spuitgieten: methodes – theorie - matrijsontwerp

Zoals eerder vermeld, varieert de matrijstemperatuur bij het variotherm spuitgieten in functie van de processtap. Er bestaan een aantal methodes om deze matrijstempering tot stand te brengen. In dit deel vindt u een overzicht van de verschillende opwarmings- en afkoelingsmethodes. [13]

3.1 Opwarming

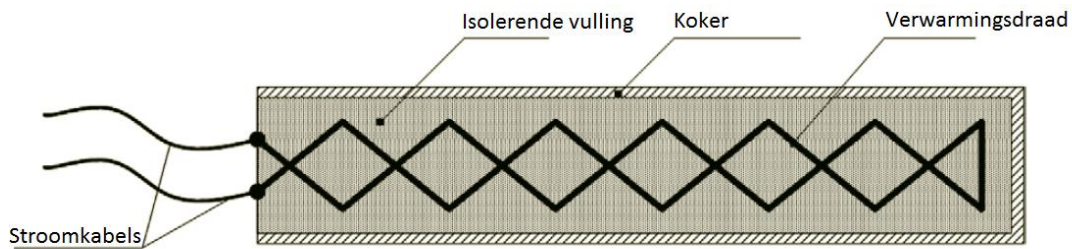
Tabel 1 geeft een bondig overzicht van de verschillende opwarmingsmethodes die kunnen toegepast worden bij het variotherm spuitgieten. Er zal dieper ingegaan worden op twee verschillende technieken namelijk elektrische verwarming met lage frequentie (AC) en convectieverwarming door middel van water onder druk. Deze twee technieken worden nader verklaard, respectievelijk in 0 en 3.1.2.

Elektrisch	<i>Lage frequentie</i>	DC
		AC
	<i>Hoge frequentie</i>	Inductie
		Wederzijdse inductie (proximity effect)
Diëlektrisch (microgolf)		
Thermo-elektrisch effect (Peltier effect)		
Convectie	<i>Interne media</i>	Olie
		Stoom
		Gas
		<i>Water onder druk</i>
	<i>Externe media</i>	Gas
		Condenserende damp
Vlam		
Straling	Infrarood	
	Laser	
Contact	Verwarmd voorwerp	
	Passief, door gesmolten polymeer	
Andere	Ultrasoon	

Tabel 1: Opwarmingsmethodes [13]

3.1.1 Elektrische verwarming

Elektrische verwarming maakt doorgaans gebruik van elektrische verwarmingselementen meestal staven. De staven bestaan uit een koker van roestvast staal, verwarmingsdraden, elektrisch isolerend poeder en stroomkabels. Figuur 11 is een vereenvoudigde weergave van zo een verwarmingselement. [7] Er zijn ook andere vormen mogelijk van dergelijke verwarmingselementen maar ze zijn allen gelijkaardig samengesteld.



Figuur 11: Verwarmingselement [7]

Een nadeel van dergelijke verwarmingselementen is dat ze koude zones hebben overheen een deel van hun lengte. Dit zorgt voor een niet-optimale verwarming van het inzetoppervlak. Ook is de ligging van deze elementen cruciaal om een uniforme temperatuurverdeling aan het inzetoppervlak te verkrijgen. Bovendien beïnvloedt de ligging van dergelijke elementen het ontwerp van de koelkanalen. Een groot voordeel van dergelijke elementen is dat ze in een paar seconden de ingestelde temperatuur kunnen bereiken.

3.1.2 Verwarming met water onder druk

Gebruik van water onder druk heeft als voordeel dat het water vloeibaar blijft tot ver boven 100°C. Net zoals bij de verwarmingselementen is ook hier de ligging van de kanalen belangrijk om een optimale verwarming te realiseren.

3.1.3 Elektrische verwarming versus verwarming met water onder druk

Elk van deze verwarmingsmethodes heeft zijn voor- en nadelen. Deze werden beschreven door Kip Petrykowski en Jim Fischer in een studie waarbij ze elektrische, olie- en waterverwarming vergeleken [14]. De resultaten van olieverwarming worden buiten beschouwing gelaten in dit kort overzicht van hun werk.

Een voordeel van elektrische verwarming is dat het gemakkelijk is om te installeren en te bedienen. Maar elektrische verwarming kan alleen warmte toevoegen aan de inzet en niet wegnemen, wat bij water onder druk wel gaat. Er bestaan immers toestellen die zowel het warme als het koude water kunnen voorzien (zie 0). Voor de elektrische verwarming betekent dit dat er nog koeling voorzien moet worden.

In hun onderzoek hebben de auteurs de variaties van de gemiddelde matrijstemperatuur geanalyseerd door beide systemen gedurende twee uren te laten werken. Hierover noteerden ze dat de temperatuurvariaties groter zijn bij elektrische verwarming dan bij waterverwarming, namelijk 6,7°C ten opzichte van 1,94°C. Overheen deze periode vergde de elektrische verwarming echter minder energie.

Een nadeel van elektrische verwarming is dat ze vaak koude zones hebben wat het moeilijker maakt om temperatuuruniformiteit te verzorgen. Dit verklaart mede de temperatuurverschillen die ze vaststelden overheen de vormholte. Na een aantal spuitgietycli bleek de gemiddelde temperatuurvariatie overheen de vormholte, gemeten op dezelfde tijdstippen in de cyclus, 21,0°C te bedragen bij elektrische verwarming terwijl dit bij waterverwarming slechts 2,7°C was.

De auteurs van dit onderzoek concludeerden dat de voordelen van water onder druk die van elektrische verwarming overstijgen.

3.2 Afkoeling

Tabel 2 geeft een beknopt overzicht van een aantal afkoelingsmethodes. Enkel convectiekoeling wordt in deze thesis benut. Paragraaf 3.1.2 haalde reeds het belang van de ligging van de koelkanalen aan. Net zoals bij de verwarming is dit ook bij de koeling een belangrijke factor om zo snel, zo veel en zo uniform mogelijk warmte uit de matrijs te verwijderen. Hier wordt meer uitleg over gegeven in 3.3.2 en 3.3.3.

Convectie	<i>Interne media</i>	<i>Water</i>
		Gas
Warmtepomp	Peltier effect	
	Vortex tubes	
	Condensors en verdamper	

Tabel 2: Afkoelingsmethodes [13]

3.3 Ontwerp

Het variotherm spuitgieten heeft als doel de spuitgietyclus te optimaliseren door de inzet bij te warmen of af te koelen in functie van de processtap. Om deze warmtebeheersing tot een goed einde te brengen is het van belang de verwarmingselementen en de koelkanalen zodanig te plaatsen dat een efficiënte en uniforme opwarming en afkoeling van de inzet gerealiseerd kan worden. Daarom zullen in de volgende paragrafen de ligging van de verwarmingselementen (zie 0) en koelkanalen (zie 3.3.2) beknopt worden besproken. Het spreekt voor zich dat de materiaaleigenschappen van de matrijs een belangrijk rol spelen in de warmteregeling, hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 3.4.

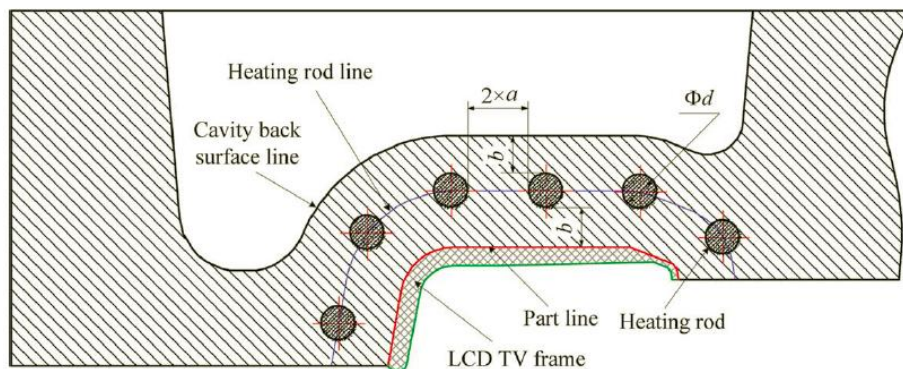
3.3.1 Ligging verwarmingselementen

In 2011 werd door Wang et al. een onderzoek uitgevoerd naar variotherm spuitgieten op basis van elektrische verwarming en waterkoeling toegepast op de productie van een LCD TV-frame [15]. Het matrijsontwerp maakte gebruik van een zwevend inzetsysteem (in het Engels: floating cavity/core, meer uitleg hierover in 3.5). Het doel van de test was om de ligging van de verwarmingselementen te optimaliseren. Dit werd gedaan door bij elke optimalisatietest één van drie mogelijke eisen als prioriteit voorop te stellen, namelijk:

- Maximale thermische efficiëntie
- Maximale temperatuuruniformiteit
- Maximale matrijssterkte

Het spreekt voor zich dat het onmogelijk is om bij eenzelfde opstelling tegelijkertijd aan al deze eisen te voldoen. Dus werden andere waarden verkregen voor de ligging van de verwarmingselementen bij elk van de optimalisatietesten. Het optimalisatieprobleem werd opgelost met behulp van Particle Swarm Optimization (PSO) ontwikkeld door Kennedy en Eberhart [16].

Figuur 12 toont het basisplan van de verwarmingselementen, deze figuur toont de parameters waarmee gewerkt werd om het optimalisatieprobleem op te lossen. De verwarmingselementen werden gemaakt uit MgO-SiO_2 .



Figuur 12: Basisplan voor de ligging van de verwarmingselementen [15]

Tabel 3 toont de resultaten voor a , b en d van de drie optimalisatiestrategieën. De waarden van de parameters b en d werden verkregen door de parameter a vast te leggen op 5mm. De resultaten werden nadien gecontroleerd met behulp van Finite Element Analysis (FEA) en bleken hier maar zeer weinig van af te wijken. Zo werden de verkregen resultaten nogmaals gecontroleerd.

Optimalisatiestrategie	a [mm]	b [mm]	d [mm]
Maximale thermische efficiëntie	5,00	6,49	8,00
Maximale temperatuuruniformiteit	5,00	6,58	4,00
Maximale matrijssterkte	5,00	5,30	4,00

Tabel 3: Resultaten van de drie optimalisatiestrategieën [15]

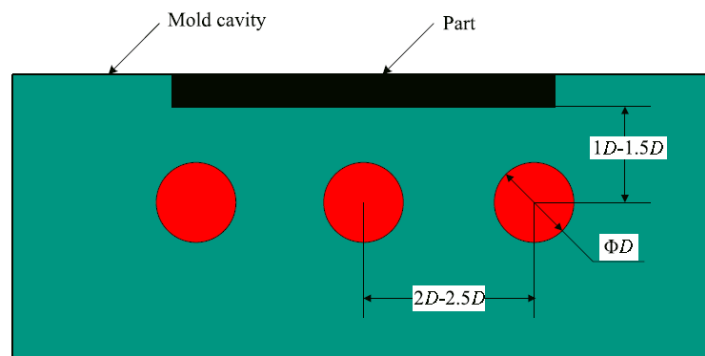
In deze resultaten kan de volgende trend herkend worden:

- 1) De thermische efficiëntie stijgt door:
 - a. verwarmingselementen te gebruiken met een grotere diameter;
 - b. elementen dichter bij het matrijsoppervlak te plaatsen.
- 2) De temperatuuruniformiteit wordt verbeterd door:
 - a. de verwarmingselementen dichter bij elkaar te leggen.
- 3) De matrijssterkte wordt positief beïnvloed door:
 - a. een kleinere diameter voor de verwarmingselementen te nemen;
 - b. een grotere afstand te nemen tussen twee opeenvolgende verwarmingselementen.

Afhankelijk van het voornaamste doel van de ontwerpers, cyclussnelheid, oppervlaktekwaliteit of levensduur, kan met de bovenstaande resultaten rekening gehouden worden bij het ontwerp van de matrijs.

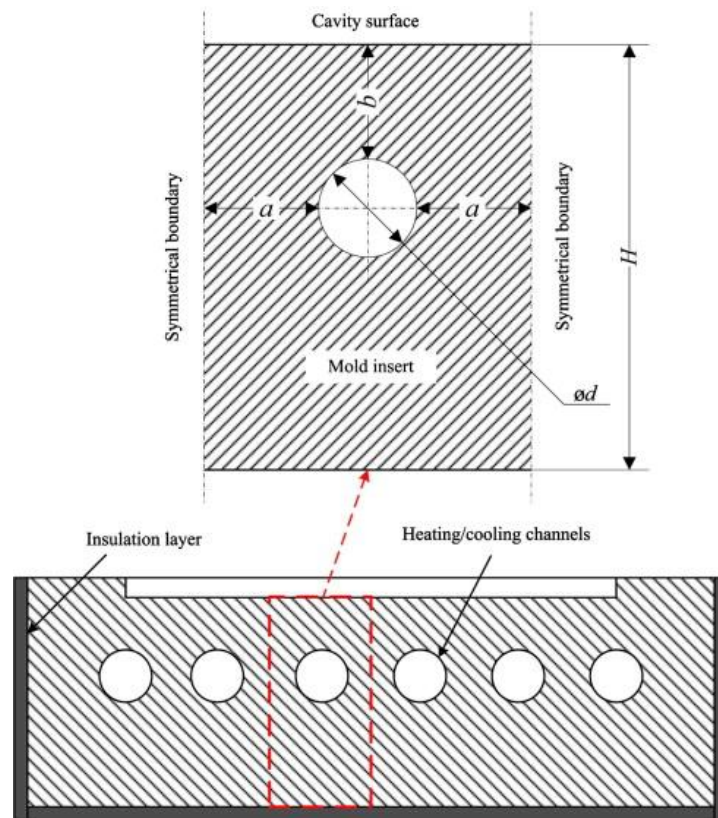
3.3.2 Ligging van de koelkanalen

Een ideale opwarming en een ideale afkoeling met behulp van water zullen dezelfde resultaten opleveren bij het bepalen van de ligging van de verwarmingselementen, aangezien het bij beiden gaat over de warmte-uitwisseling tussen koelmedium en matrijs, en indirect de warmte-uitwisseling tussen koelmedium en product. Op basis van voorgaande onderzoeken blijkt dat de relatieve afstand tussen matrijsoppervlak en het center van de koelkanalen 1-1,5 keer de diameter van een koelkanaal is. En ook dat de relatieve afstand tussen opeenvolgende koelkanalen 2-2,5 keer de diameter van een koelkanaal bedraagt. [17] Dit is zichtbaar in figuur 13.



Figuur 13: Richtwaarden voor de ligging van koelkanalen [17]

In 2011 werd door Wang et al. gezocht naar de optimale ligging van de koelkanalen [18]. Optimaal betekent een compromis tussen een hoge thermische efficiëntie, temperatuuruniformiteit en matrijssterkte. Dit zijn dan ook afhankelijke variabelen in het experiment. De parameters die de ligging bepalen a, b en d zijn de onafhankelijke variabelen, deze zijn zichtbaar in figuur 14.



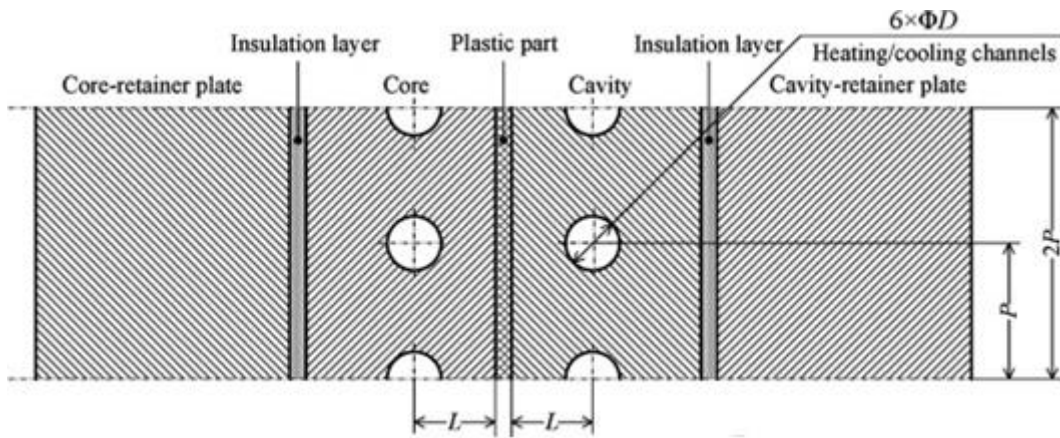
Figuur 14: Ligging van de koelkanalen [18]

De thermische efficiëntie (t_{rh}) werd bekeken door middel van de tijd die nodig was om het volledige matrijsoppervlak op een vooraf ingestelde temperatuur te brengen. De temperatuuruniformiteit (T_d) werd berekend door de standaardafwijking te nemen van een verzameling van temperatuurmetingen op het matrijsoppervlak. De matrijssterkte werd door de maximale Von Mises stress (σ_v) die tijdens het proces optreedt in de matrijs na te gaan. Deze drie afhankelijke variabelen moesten dus geminimaliseerd worden. Tabel 4 toont de resultaten van hun simulaties. De werkelijke resultaten wijken maar zeer weinig af van de optimalisatieresultaten.

Parameters	Onafhankelijke variabelen			Afhankelijke variabelen		
	a [mm]	b [mm]	d [mm]	t_{rh} [s]	T_d [°C]	σ_v [MPa]
Geoptimaliseerde waarden	6,00	7,64	7,00	16,266	1,213	230,00

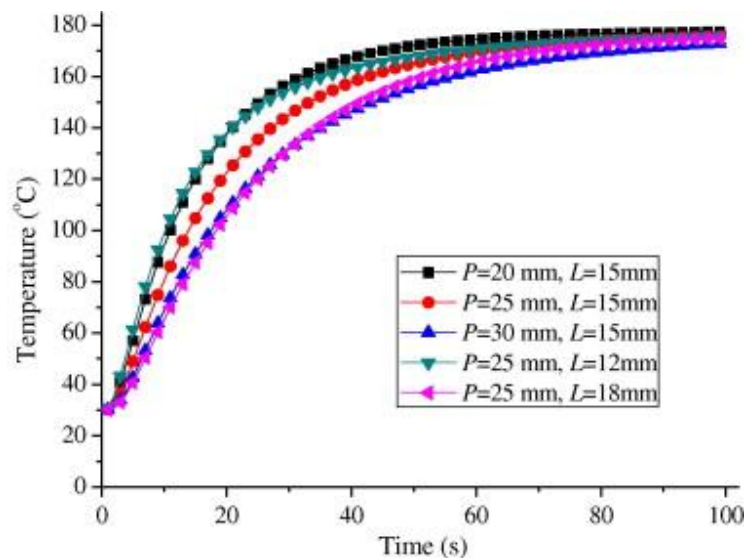
Tabel 4: Resultaten ligging koelkanalen [18]

Een ander onderzoek uit 2010 onderzocht onder meer het effect van de afstand tussen opeenvolgende koelkanalen L en de afstand tot de matrijswand P op de thermische efficiëntie en de temperatuuruniformiteit [17]. Figuur 15 toont de parameters L en P in het basisontwerp van de matrijs.



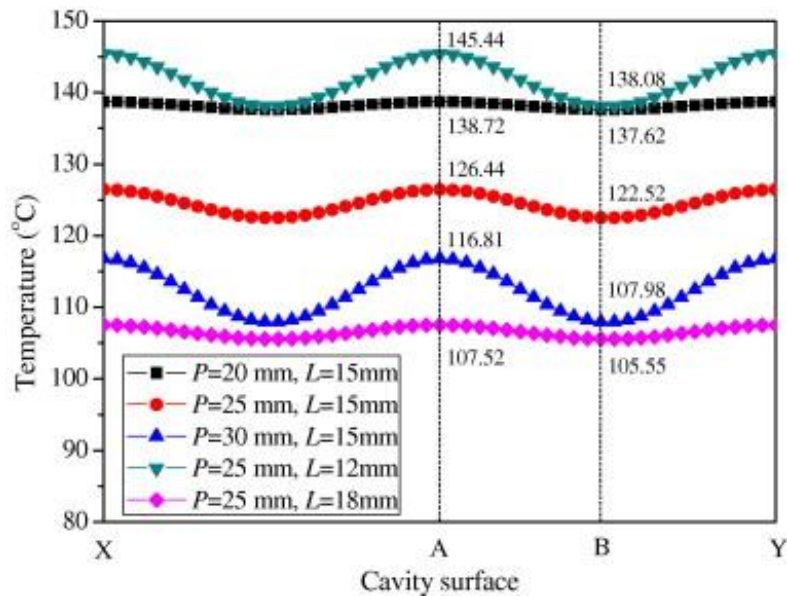
Figuur 15: Basisontwerp matrijs [17]

Figuur 16 toont het effect van de parameters P en L op de opwarmingstijd. Deze parameters zullen logischerwijs hetzelfde effect hebben op de afkoelingstijd. Hieruit blijkt dat een kleine afstand tot het matrijsoppervlak, aangegeven met de parameter L, de opwarming doet versnellen. Terwijl een kleine afstand tussen twee opeenvolgende koelkanalen, aangegeven met de parameter P ervoor zal zorgen dat de gevraagde matrijstemperatuur net iets sneller bereikt zal worden. Kleine waarden van beide parameters hebben dus een positief effect op de opwarmingstijd. Deze effecten konden al afgeleid worden uit de gegevens van paragraaf 0 betreffende de ligging van de verwarmingselementen.



Figuur 16: Effect van de parameters P en L op de opwarmingstijd [17]

Hetzelfde onderzoek rapporteerde ook over het effect van de parameters P en L op de temperatuuruniformiteit aan het inzetoppervlak. De resultaten van dit onderzoek zijn zichtbaar in figuur 17. Onderstaande figuur laat enerzijds zien dat kleine waarden voor P, de afstand tussen twee opeenvolgende koelkanalen, de temperatuuruniformiteit ten goede verandert. Anderzijds toont deze figuur opnieuw aan dat kleine waarden voor L, de afstand tot het matrijsoppervlak, zorgen voor de hoogste temperaturen aan het matrijsoppervlak.

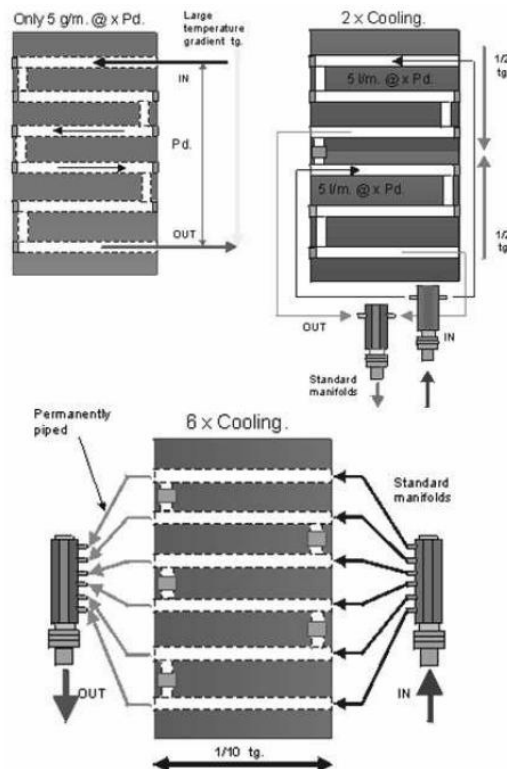


Figuur 17: Effect van de parameters P en L op de temperatuuruniformiteit [17]

Er moet echter rekening mee gehouden worden dat het sterk verkleinen van beide parameterwaarden een nadelige invloed heeft op de matrijssterkte.

3.3.3 Richting van de waterstroming

Figuur 18 toont drie verschillende aansluitingen met elk hun eigen effect op de temperatuurgradiënt (tg) overheen de inzet.



Figuur 18: Drie verschillende aansluitingen: a) Volledige aaneensluiting van de koelkanalen, b) aaneensluiting van de koelkanalen per helft (boven/onder) 2 verdelers met 2 aansluitingen, c) volledig parallelle aansluiting, 2 verdelers met 6 aansluitingen [19]

3.3.3.1 Volledige aaneensluiting van de koelkanalen

Deze opstelling bevat zes parallel gelegen koelkanalen die in serie zijn aangesloten, zie figuur 18a (linksboven). Voor deze opstelling is slechts één aansluiting nodig om het water in de inzet te leiden en één om het water uit de inzet te leiden.

Omdat het koude water dat bovenaan in de inzet stroomt des te meer opwarmt naarmate het zich meer richting de uitgang begeeft, zal er een temperatuurgradiënt (tg) ontstaan met de koudste zone bovenaan de inzet en een warmere zone onderaan de inzet. Door deze temperatuurgradiënt zal de inzet niet uniform afgekoeld worden wat zijn effect zal hebben op het uiteindelijk kunststofproduct. Hierbij kan men alleen al denken aan het kromtrekken van het product en de verschillen in oppervlaktekwaliteit tussen het bovenste en onderste gedeelte van het product.

Verder zorgt de weg die het water moet afleggen voor een drukverlies tussen in- en uitgang, hoe langer het kanaal hoe groter het drukverlies. Dit drukverlies zal ervoor zorgen dat het waterdebiet dat doorheen de inzet stroomt beperkt wordt, wat er op zijn beurt voor zorgt dat er minder warmte van de inzet ontnomen kan worden. Hierdoor zal de afkoeltijd, en bijgevolg ook de cyclustijd van het proces verlengen.

3.3.3.2 Aaneensluiting van de koelkanalen per helft

Deze opstelling bevat zes parallel gelegen koelkanalen, waarvan de bovenste drie zijn aaneengesloten en de onderste drie aaneengesloten zijn. Zie figuur 18b (rechtsboven). Voor deze opstelling zijn twee verdelers nodig met elk twee kanalen.

De temperatuurgradiënt is gehalveerd in vergelijking met de opstelling linksboven. Bij zowel de bovenste als de onderste aaneenschakeling ligt de ingang voor het water in het kanaal linksboven. Dit betekent dat de uitgang van de bovenste drie kanalen vlakbij de ingang van de onderste drie kanalen ligt. Hierdoor kan de temperatuurgradiënt - die van links naar rechts loopt overheen de inzet - verkleind worden.

Een bijkomend voordeel is dat er op twee plaatsen water van lage temperatuur in de inzet zal kunnen stromen. En dat de weg van de koelkanalen ingekort is. Hierdoor kan dus meer warmte afgevoerd worden op een kortere tijd.

3.3.3.3 Volledige parallelle aansluiting

Deze opstelling telt zes instroompunten aan de rechterkant en zes uitstroompunten aan de linkerkant van de inzet, zie figuur 18c (onderaan). Er zijn dus twee verdelers nodig met elk zes aansluitingen.

Het nadeel van deze opstelling is dat er een temperatuurgradiënt ontstaat tussen linker- en rechterkant van de inzet.

Het voordeel is dat deze temperatuurgradiënt kleiner is dan in de vorige twee ontwerpen doordat ten eerste de baan die het water moet afleggen is ingekort. Ten tweede, de afstand tussen in- en uitgang van de kanalen minstens drie keer zo kort is en ten derde, het water dat rechts binnenstroomt zich allemaal op de laagst mogelijke temperatuur bevindt. Hierdoor zal er dus ook meer warmte afgevoerd kunnen worden op kortere tijd.

De meest optimale waterstroming voor deze opstelling staat niet getekend. Deze kan gerealiseerd worden door de kanalen in de matrijs niet met elkaar te verbinden, maar volledig afwisselend in- en uitgangen aan te leggen. De even kanalen hebben dan een stroming van links naar rechts en de oneven kanalen een stroming van rechts naar links. Zo kan de temperatuurgradiënt zowel verticaal als horizontaal geminimaliseerd worden.

3.4 Materiaal

Er zijn een aantal eisen waaraan het matrijsmateriaal moet voldoen om een probleemloze werking te garanderen. De richtwaarden werden gebaseerd op een matrijsmateriaal, namelijk die van roestvaststaal met werkstofnummer 1.2343 [20].

3.4.1 Kleine thermische uitzettingscoëfficiënt

Een eerste eis is een lage thermische uitzettingscoëfficiënt van het matrijsmateriaal, voor het staal ligt deze op $11,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Dit is nodig omwille van de grote temperatuurveranderingen waar de matrijs aan blootgesteld zal worden. Een te grote uitzettingscoëfficiënt heeft namelijk invloed op de afmetingen van de vormholte en veroorzaakt grote spanningen in het matrijsmateriaal.

3.4.2 Grote hardheid

Ten tweede moet er gekeken worden naar de hardheid van de matrijs, deze moet groot zijn aan het oppervlak van de vormholte. Voor het staal ligt deze hardheid tussen de 46 en 52HRC. Dit is noodzakelijk omdat bij het spuitgieten van kunststoffen die bijvoorbeeld glasvezels bevatten de kans op krasvorming bijzonder groot is.

3.4.3 Grote treksterkte

Een derde eis is een voldoende grote treksterkte van het materiaal, voor het staal is deze 1450MPa. De matrijs zal immers grote sluitkrachten moeten doorstaan. Matrijzen met een te lage treksterkte zullen snel tekenen van vermoeiing tonen, wat overeenkomt met een korte levensduur van de matrijs.

3.4.4 Kleine thermische massa en grote thermische geleidbaarheid

Om deze eis aan te tonen wordt verwezen naar een onderzoek dat in 2010 werd uitgevoerd door Wang et al. Zij vergeleken drie verschillende inzetmaterialen met elkaar. [17] De drie materialen zijn roestvast staal, een aluminiumlegering en een koperlegering. De materiaaleigenschappen zijn terug te vinden in tabel 5.

Materiaal	Dichtheid [kg/m ³]	Thermische geleidbaarheid [W/m°C]	Warmtecapaciteit [J/kg°C]
AISI P20	7850	34	460
ISO AlMg1SiPb	2810	130	960
AMPCOLOY 940	8710	208	380

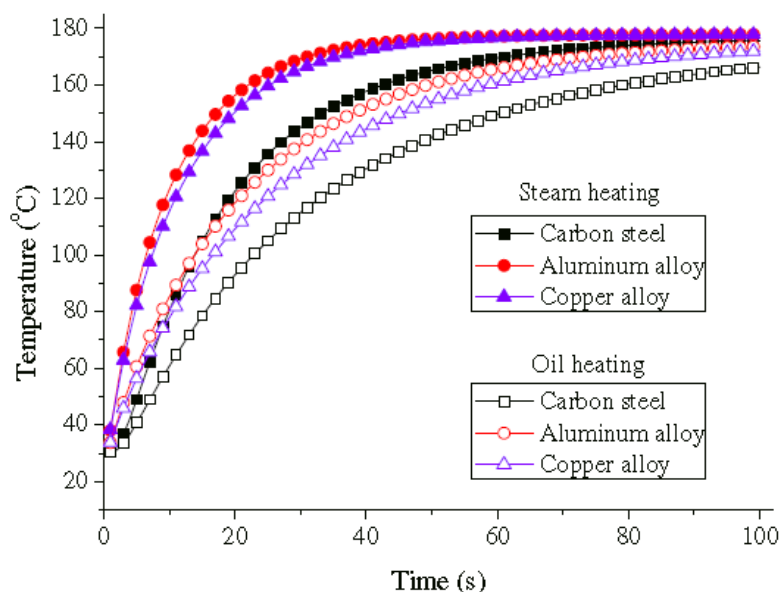
Tabel 5: Materiaaleigenschappen van roestvast staal, een Al-legering en een Cu-legering [17]

Voor de volledigheid worden in onderstaande tabel (zie tabel 6) de eigenschappen uit 3.4.1, 3.4.2 en 3.4.3 vermeld voor de drie verschillende materialen van tabel 5.

Materiaal	Brinell hardheid [HB 30]	Treksterkte [MPa]	Thermische uitzettingscoëfficiënt [10 ⁻⁶ /K]
AISI P20 [21]	300	965-1030	12,8
ISO AlMg1SiPb (-T6)	71 [22]	290 [23]	23,4 [23]
AMPCOLOY 940 [24]	210	544	17.5

Tabel 6: Materiaaleigenschappen van roestvast staal, een Al-legering en een Cu-legering

Figuur 19 toont het effect van de verschillende materialen op de opwarmingstijd. Onderstaande figuur toont duidelijk aan dat de inzetten uit de aluminium- en koperlegering veel sneller opwarmen dan de inzet uit RVS. Dit is te wijten aan een grotere thermische geleidbaarheid en een lagere volumetrische warmtecapaciteit van deze materialen ten opzichte van RVS.



Figuur 19: Temperatuurverloop van de inzet (materialen: RVS, Al-legering, Cu-legering) [17]

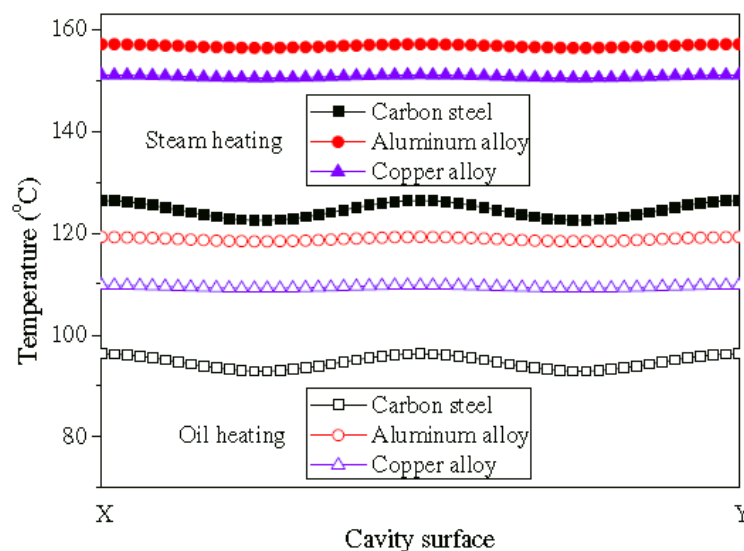
Ook al heeft de koperlegering een grotere thermische geleidbaarheid dan de aluminiumlegering, toch is de thermische efficiëntie van de inzet uit de aluminiumlegering beter. Dit komt doordat de thermische massa van de inzet uit de Al-legering kleiner is. De thermische massa wordt als volgt berekend:

$$C_{th} [J/°C] = c_p [J/kg°C] \cdot m [kg]$$

Hierin is C_{th} de thermische massa, c_p de isobarische warmtecapaciteit en m de massa van het voorwerp. De thermische massa is dus de hoeveelheid energie die nodig is om de gehele massa van een voorwerp met 1°C op te warmen. Omdat een grote thermische massa vertragend werkt bij warmte-uitwisseling tussen verschillende voorwerpen, hebben matrijsontwerpers voor variotherme spuitgietprocessen als doel de thermische massa zo veel mogelijk te verlagen. Bovendien is er bij matrijzen met een hoge thermische massa veel energie nodig om deze op temperatuur te brengen.

Een andere grootte, die bij het vergelijken van verschillende materialen nog iets sneller duidelijkheid schept, is de volumetrische warmtecapaciteit. Dit is een intensieve grootte en wordt berekend door de vermenigvuldiging van de isobarische warmtecapaciteit met de dichtheid van het materiaal. Ontwerpers beogen dus een combinatie van een lage dichtheid met een lage warmtecapaciteit. Bij het maken van deze keuze mag echter de materiaalsterkte niet uit het oog verloren worden, het is immers niet de bedoeling een lage dichtheid met een lage warmtecapaciteit te combineren en dan veel materiaal nodig te hebben om de matrijssterkte terug op peil te brengen. Daarom zal een doordachte materiaalkeuze gemaakt moeten worden die ook met dit laatste aspect rekening houdt.

Een grote thermische geleidbaarheid heeft niet enkel een positieve invloed op de thermische efficiëntie, maar ook op de temperatuuruniformiteit van de vormholte. Dit is duidelijk zichtbaar in figuur 20. Deze afbeelding toont aan hoe klein de temperatuurverschillen zijn aan het oppervlak van de vormholte bij materialen met een hoge thermische geleidbaarheid. Hoe hoger de thermische geleidbaarheid, zoals bij een aluminiumlegering, hoe beter de temperatuuruniformiteit zal zijn.

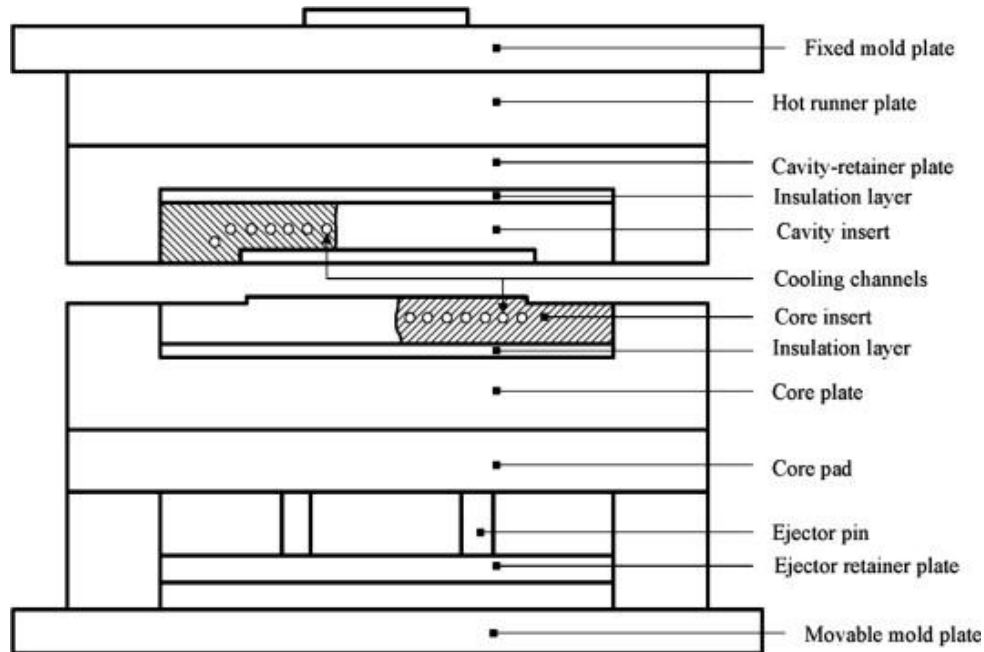


Figuur 20: Temperatuurverdeling aan het inzetoppervlak (materialen: RVS, Al-legering, Cu-legering) [17]

3.5 Speciale matrijsontwerpen

3.5.1 Isolatielaag

Figuur 21 toont een matrijsontwerp dat twee isolatielagen heeft tussenin de inzet en de matrijsplaten [17]. Deze isolatielagen moeten voorkomen dat er warmte verloren gaat naar de matrijsplaten.



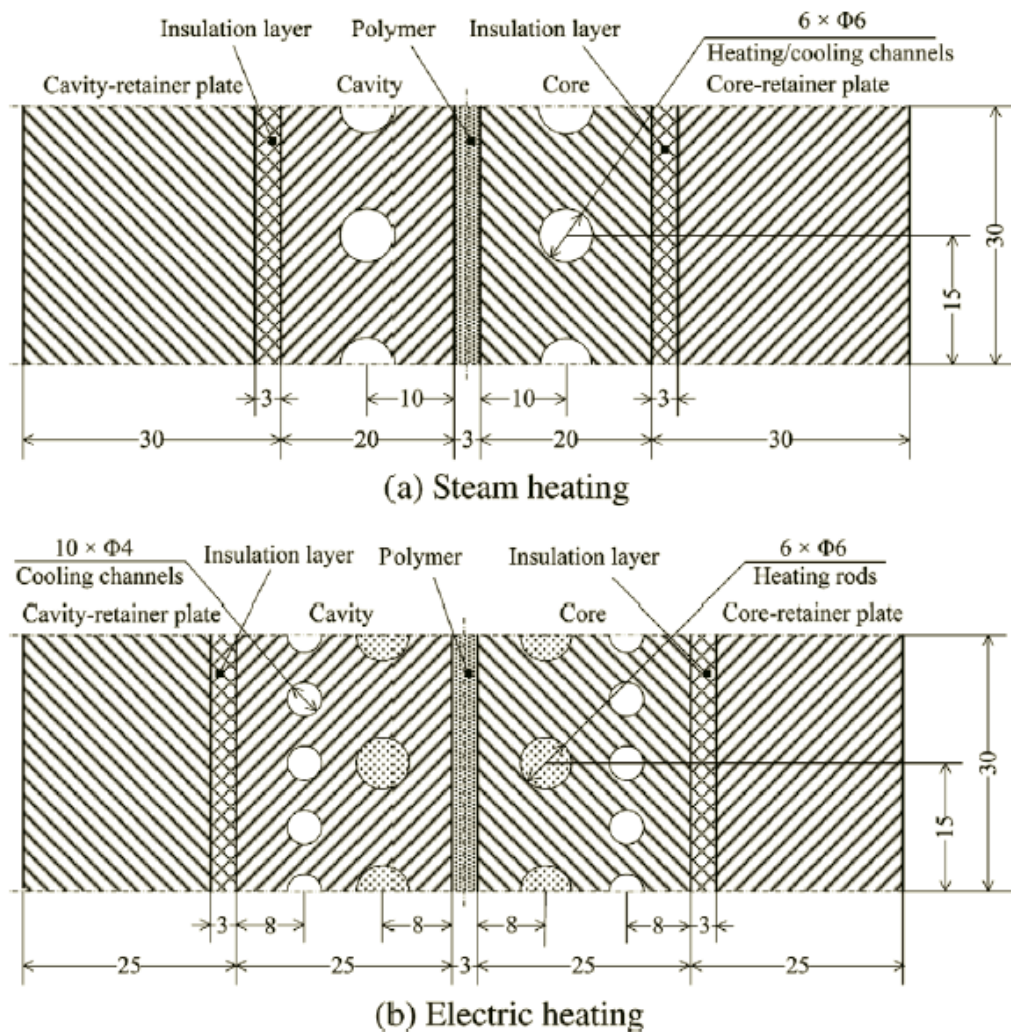
Figuur 21: Matrijsontwerp met isolatielaag [17]

In 2010 hebben Wang et al. het effect getest van deze isolatielaag op de thermische efficiëntie in twee variotherme processen [7]. Eén proces met stoomverwarming tot 180°C en één proces met elektrische verwarming tot 500°C. Bovendien werd het effect geanalyseerd van het kernmateriaal op de thermische efficiëntie van beide spuitgietsprocessen, dit door twee verschillende materialen toe te passen, namelijk roestvast staal, AISI P20, en een koperlegering, AMPCO 940. Dit levert acht verschillende testen op (zie tabel 7).

Nummer test	RHCM-type	Met/zonder isolatielaag	Materiaal inzet
1	Stoomverwarming	Zonder	AISI P20
2	Stoomverwarming	Zonder	AMPCO 940
3	Stoomverwarming	Met	AISI P20
4	Stoomverwarming	Met	AMPCO 940
5	Elektrische verwarming	Zonder	AISI P20
6	Elektrische verwarming	Zonder	AMPCO 940
7	Elektrische verwarming	Met	AISI P20
8	Elektrische verwarming	Met	AMPCO 940

Tabel 7: Testen voor thermische efficiëntie [7]

De matrijsontwerpen van de twee RHCM methodes zijn zichtbaar in figuur 22. Beide ontwerpen hebben een isolatielaag van 3mm dik.



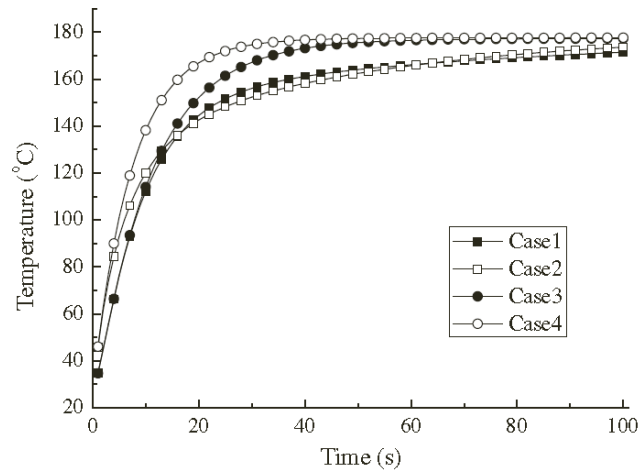
Figuur 22: Matrijsontwerpen: a) Stoomverwarming b) Elektrische verwarming [7]

De materiaaleigenschappen van elk van de verschillende onderdelen zijn terug te vinden in tabel 8.

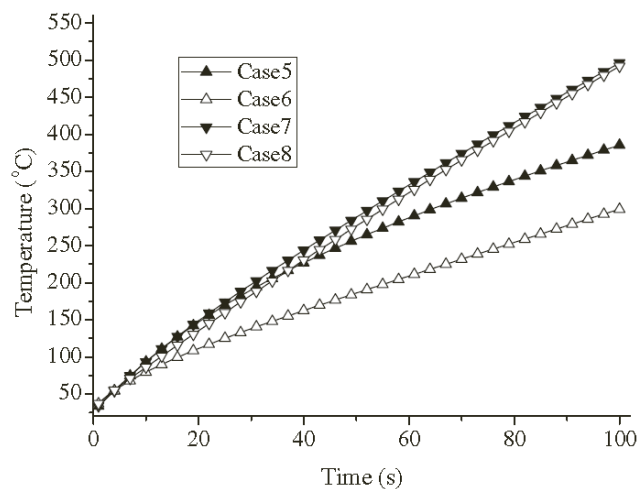
	Materiaal	Dichtheid [kg/m ³]	Warmtecapaciteit [J/kg°C]	Thermische geleidbaarheid [W/m°C]
Matrijsplaat	AISI 1045	7850	486	49,8
Isolatielaag	Bakeliet	1400	1420	0,40
Inzet	AISI 920	7850	460	34
	AMPCO 940	8710	380	208
Verwarmingselementen	MgO SiO ₂	2700	1100	5,5

Tabel 8: Materiaaleigenschappen van de matrijsonderdelen [7]

Figuur 23 en figuur 24 tonen de resultaten van de verschillende testen op de opwarmingstijd, respectievelijk voor het proces met stoomverwarming en het proces met elektrische verwarming.



Figuur 23: RHCM met stoomverwarming [7]

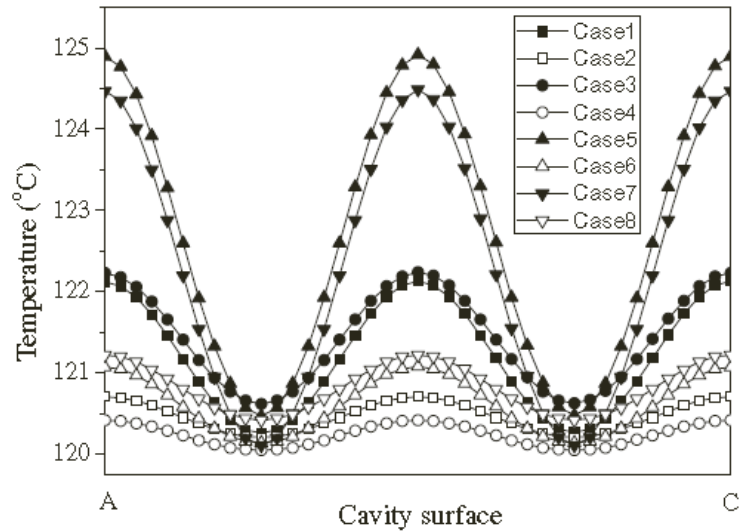


Figuur 24: RHCM met elektrische verwarming [7]

Er is in beide figuren heel duidelijk te zien dat de processen met een isolatielaag, 3&4 en 7&8, veel sneller op temperatuur komen. Dit effect wordt in de vierde test sterk vergroot door de goede thermische eigenschappen van AMPCO 940.

In test 8 echter heeft het gebruik van een sterk geleidend materiaal voor de inzet een slechte – ook al is dit effect zeer beperkt – invloed op de thermische efficiëntie. En zoals in test 6 duidelijk gezien kan worden, heeft het zelfs eerder een nadelige invloed als het gebruikt wordt zonder isolatielaag. Dit komt doordat de warmte dan ook naar de achterplaat kan trekken. Op basis van deze testen kan besloten worden dat het gebruik van AMPCO 940 niet nodig is bij elektrische verwarming. Maar er mag niet vergeten worden dat de betere geleidbaarheid een positieve invloed heeft op de temperatuuruniformiteit aan het inzetoppervlak. Dit wordt echter niet gecontroleerd in deze resultaten. Daarom dat er verdere testen werden uitgevoerd om ook dit na te gaan [7].

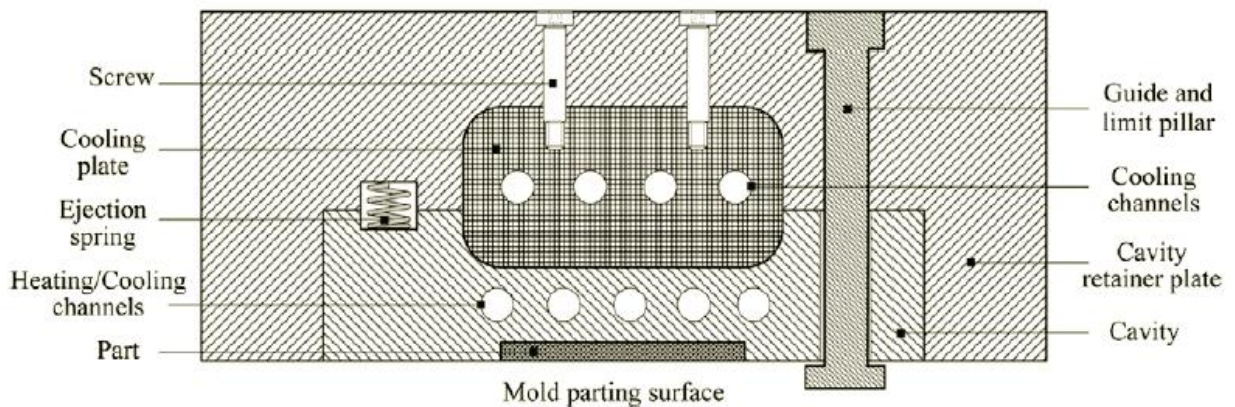
Figuur 25 toont de temperatuurverdeling aan het inzetoppervlak. Let goed op de schaal, deze loopt slechts van 120°C tot 125°C. Zoals verwacht kon worden hebben de testen met AMPCO 940 de beste temperatuuruniformiteit aan het inzetoppervlak (test 2, 4, 6 en 8). Verder moet opgemerkt worden dat van deze testen de 8 bovendien de hoogste gemiddelde temperatuur heeft aan het inzetoppervlak. Deze test maakte gebruik van elektrische verwarming met isolatielaag, en een inzet uit AMPCO 940.



Figuur 25: Temperatuurverdeling aan het inzetoppervlak [7]

3.5.2 Zwevende inzet

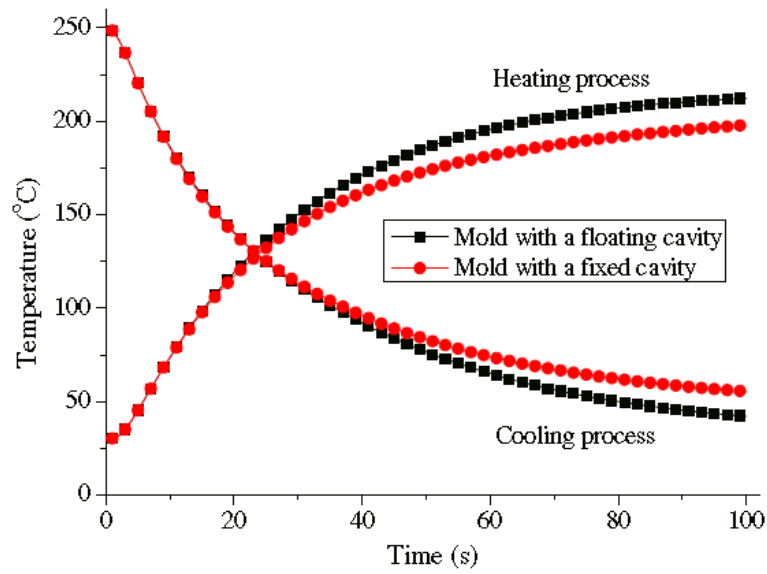
Figuur 26 toont het ontwerp van een matrijs met een zwevende inzet aan de kant van de vormholte [17]. Rekening houdend met de invloed van de thermische massa op de thermische efficiëntie (zie 3.4.4) is het van belang de massa die moet opgewarmd en afgekoeld worden zo veel mogelijk te minimaliseren met als doel een lage cyclustijd te verkrijgen.



Figuur 26: Ontwerp van matrijs met zwevende inzet [17]

Om dit te realiseren wordt de inzet, vóór het opwarmen, afgestoten van de matrijsplaat. Hierdoor ontstaat een luchtbarrière tussen inzet en matrijsplaat die werkt als een isolatielaag. Dankzij deze isolatielaag zal er bij het opwarmen van de inzet minder warmte verloren gaan naar de matrijsplaat. Anders gezegd werd de thermische massa bij het opwarmen verkleind, hierdoor kan de inzet sneller opwarmen. Aan het einde van de opwarmingsfase wordt de inzet terug op zijn plaats geduwd dankzij het sluiten van de matrijs. Bij het koelen wordt er koelwater gestuurd doorheen de koelkanalen van de inzet en de koelkanalen van de koelplaat. Om de koefficiëntie zo goed mogelijk te laten verlopen, kan gekozen worden voor een Al- of Cu-legering voor de koelplaat.

(Zie 3.4.4) Figuur 27 toont het verschil tussen het gebruik van een zwevende of vaste inzet op de opwarmings- en afkoelingstijd.



Figuur 27: Verschil tussen zwevende en vaste inzet [17]

Bovenstaande afbeelding toont aan dat een matrijs met zwevende inzet de opwarmingsefficiëntie verhoogt zowel bij het opwarmen als het afkoelen van de inzet.

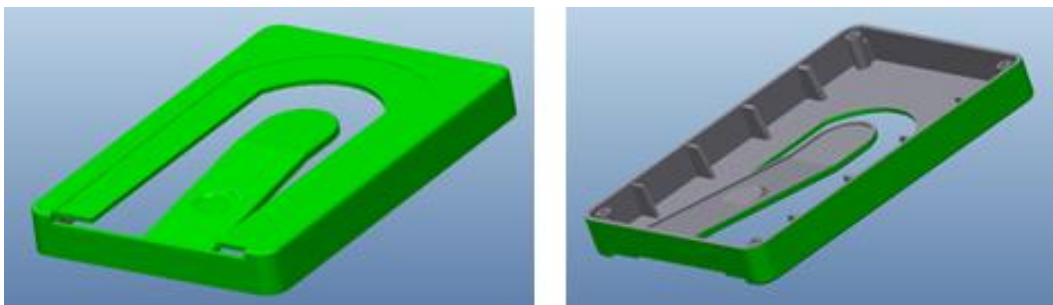
4. Ontwerpen van de inzet in Creo en testen in Comsol

4.1 Gegeven

Vooraleer besproken wordt hoe de inzet tot stand gekomen is, is het nodig om te vermelden dat de vorm van de inzet, de locatie van de caviteit en de gaten van de hotrunners al vastgelegd werden in een vorig ontwerp.

4.1.1 Product

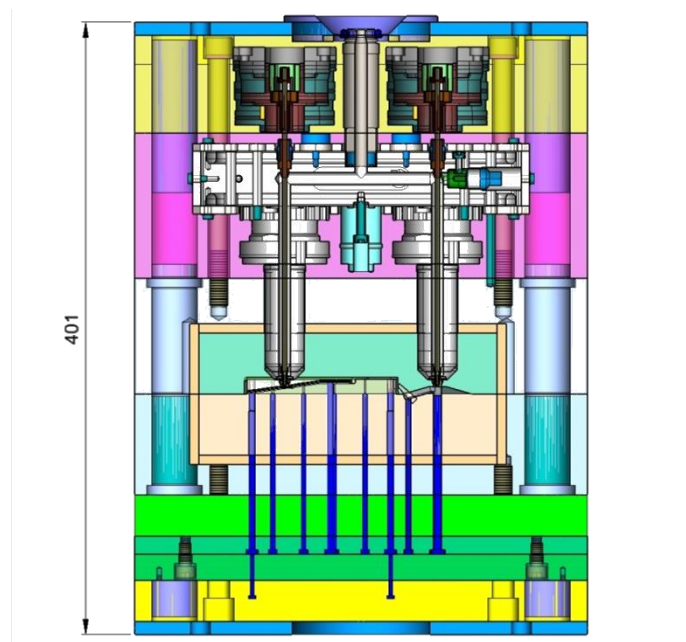
Het product is een kaartjeshouder en zal vervaardigd worden uit drie verschillende materialen, namelijk PP, PC en PC-ABS. (zie figuur 28)



Figuur 28: Kaartjeshouder

4.1.2 Matrijsopbouw

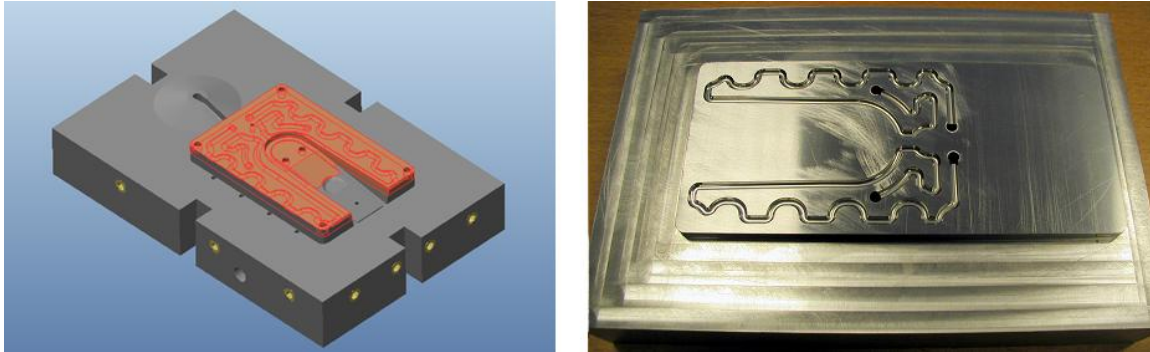
Zoals in het onderzoeksopzet reeds vermeld is, werd de matrijs al opgebouwd, de matrijsopbouw wordt getoond in figuur 29. Deze werd gemaakt in een eerder onderzoek aan Cel Kunststoffen.



Figuur 29: Matrijsopbouw

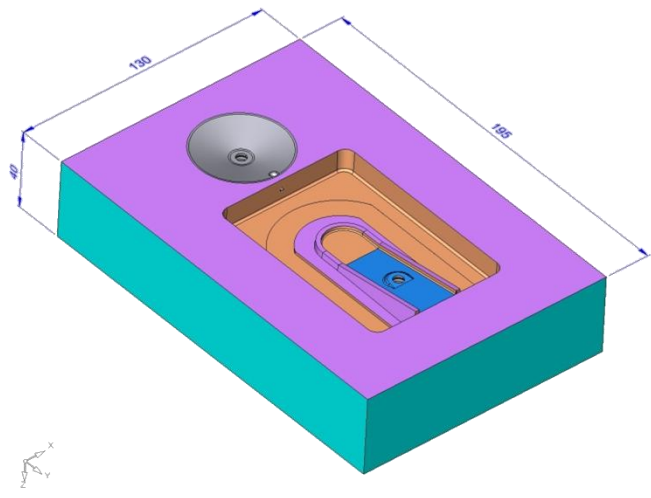
4.1.3 Inzet achter- en voormatrijs

De inzet van de achtermatrijs (zie figuur 30a), ofwel de zijde van de kern, is enkel voorzien van waterkoeling. Figuur 30b toont de productie van de achtermatrijs voordat de rest van de matrijs werd opgebouwd met SLM.



Figuur 30: Inzet achtermatrijs

Onderstaande afbeelding (figuur 31) toont de inzet van de voormatrijs ook wel de zijde van de vormholte, wordt in deze thesis ontworpen. Deze inzet zal voorzien worden van elektrische verwarming en koelkanalen. Deze koelkanalen kunnen zowel ingezet worden bij het opwarmen als bij het afkoelen, het is daarin dat het onderscheid ligt tussen variotherm en hybride variotherm spuitgieten.

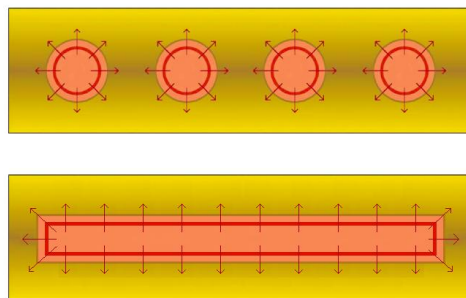


Figuur 31: Inzet voormatrijs

De inzet van de voormatrijs wordt ontworpen in Creo, Creo is 3D CAD software gemaakt door het bedrijf PTC [25]. De opwarming en afkoeling van deze inzet worden nadien gesimuleerd in COMSOL Multiphysics. Comsol is simulatiesoftware geschikt voor mechanische, elektrische, fluïdomechanische en chemische toepassingen, en werd gemaakt door het bedrijf COMSOL Inc. [26]

4.2 Plaatsen van de verwarmingselementen

In 0 [15] werd besproken hoe de verwarmingselementen moeten liggen en hoe groot ze dan moeten zijn om de beste resultaten te krijgen op vlak van thermische efficiëntie, temperatuuruniformiteit of matrijssterkte. In dit onderzoek werd gebruik gemaakt van verwarmingselementen met een cilindrische vorm uit MgO-SiO₂. Na het bekijken van de producten van een aantal fabrikanten van verwarmingselementen, waaronder Watlow, Bach Resistor Ceramics, Türk+Hillinger Elektrowärme en Kyocera, werd gekozen om te werken met vlakke verwarmingselementen, aangezien het product ook voornamelijk recht is. Vlakke elementen zijn dus meer geschikt om onder de vormholte te plaatsen dan ronde verwarmingselementen. De vlakke verwarmingselementen kunnen immers het bodemvlak op elke plaats rechtstreeks opwarmen, zie figuur 32.



Figuur 32: a) Ronde verwarmingselementen, b) Vlakke verwarmingselementen

Uit de literatuurstudie bleek dat om een uniforme opwarming te krijgen er ofwel veel verwarmingselementen met een kleine diameter en dicht bij het inzetoppervlak geplaatst moeten worden, ofwel weinig verwarmingselementen met een grote diameter en verder van het matrijsoppervlak. Ook al wordt gewerkt met vlakke plaatjes toch blijven deze regels van kracht.

Er werd gekozen om de inzet van de voormatrijs in twee delen te splitsen om de verwarmingselementen te kunnen plaatsen. Zo werd een vlak gecreëerd dat parallel ligt met de vormholte. Deze keuze levert meteen een aantal voordelen:

- a. vrij plaatsen van de verwarmingselementen;
- b. eenvoudig om de elektrische aansluitingen te leggen;
- c. goed contact tussen inzet en verwarmingselementen.

Er werd een procedure opgesteld om na te gaan wat de beste opstelling is voor de verwarmingselementen. Deze procedure gaat uit van de eisen voor zowel het variotherm proces als voor de verwarmingselementen.

Eisen (hybride) variotherm proces:

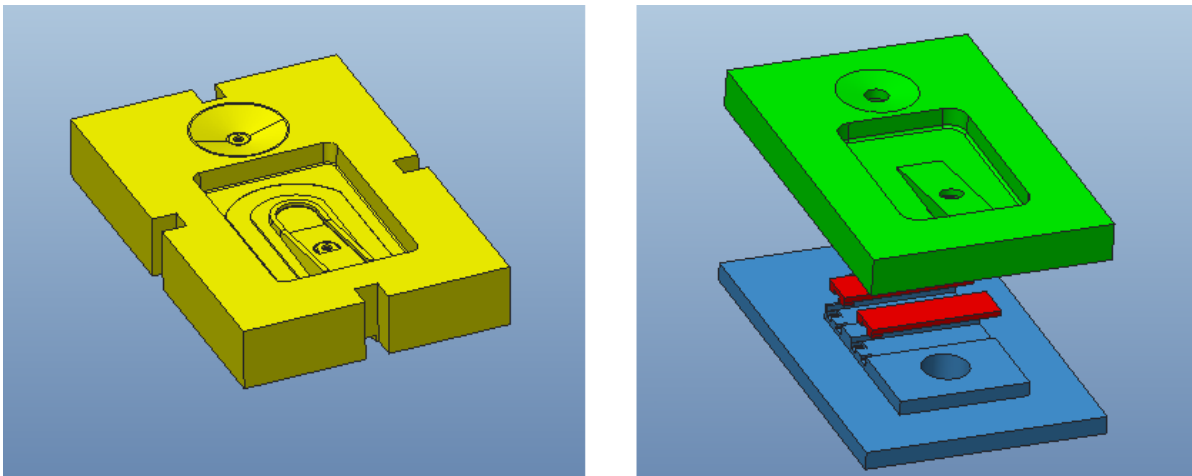
- a. zo kort mogelijke cyclustijd, dus korte opwarmingstijd;
- b. een zo uniform mogelijke oppervlaktetemperatuur, d.w.z. maximum temperatuurverschil van 10°C aan het inzetoppervlak.

De werkwijze voor het plaatsen van de verwarmingselementen verloopt als volgt:

1. kies een opstelling voor de verwarmingselementen, houd er rekening mee dat er nog koelkanalen moeten gelegd worden;
2. zorg voor een aansluitmogelijkheid naar de elementen;
3. simuleer de opwarming op basis van het geleverd vermogen;
4. controleer de uniformiteit;
5. beoordeel de opwarmingstijd.

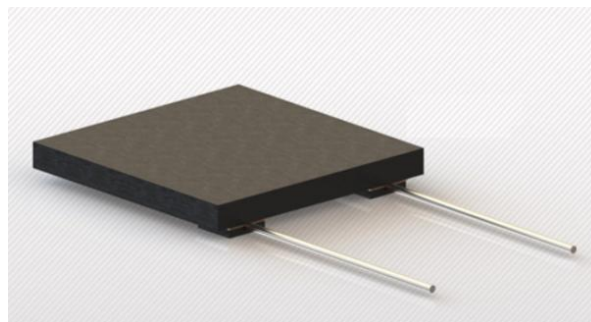
Indien de opstelling na deze procedure niet voldoet, moet gekeken worden of er ruimte is voor verbetering van de ligging, het aantal, de vorm of het vermogen van de verwarmingselementen. Op basis van de eisen en ontwerpregels werden een aantal ontwerpen gemaakt, deze werden nadien gesimuleerd en beoordeeld.

Eerst en vooral moest de inzet vereenvoudigd en gesplitst worden, zodat er verwarmingselementen gelegd konden worden. Onderstaande afbeelding laat links de inzet van de voormatrijs zien en rechts de vereenvoudigde inzet met splitsing en klaargemaakt voor twee verwarmingselementen. De plaats van de splitsing is steeds afhankelijk van de dikte van de verwarmingselementen.



Figuur 33: a) Inzet, b) Vereenvoudigde inzet met splitsing

Alle ontwerpen maken gebruik van verwarmingselementen van Bach rc. De verwarmingselementen zijn gemaakt uit siliciumnitride (Si_3N_4) en hebben een uitzicht gelijkaardig aan het verwarmingselement van figuur 34.



Figuur 34: Verwarmingselement van Bach rc [27]

4.2.1 Vier verwarmingselementen

Verwarmingselementen: Het eerste ontwerp maakt gebruik van vier verwarmingselementen. Tabel 9 toont de technische gegevens van het element en bijlage A bevat de technische tekening van dit verwarmingselement.

Afmetingen [mm]	Spanning [V]	Koud vermogen [W]	Vermogen op max T [W]	Tmax [°C]
30x21x2,3	230	600	400	500

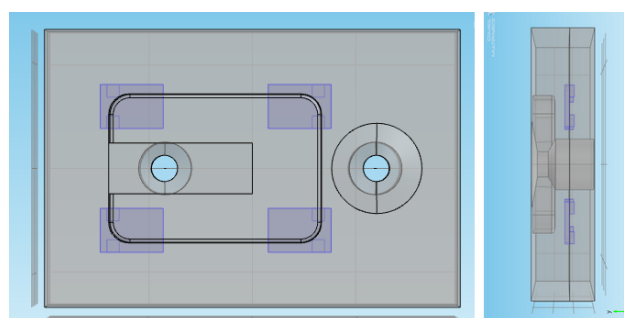
Tabel 9: Technische gegevens verwarmingselement 30x21 [28]

De thermische eigenschappen van de verwarmingselementen zijn even relevant voor de thermische efficiëntie van de matrijs als de eigenschappen van het matrijsmateriaal. Onderstaande tabel toont de eigenschappen van de gebruikte elementen.

	Warmtecapaciteit [J/kgK]	Thermische geleidbaarheid [W/mK]	Thermische uitzettingscoëfficiënt [10 ⁻⁶ /K]	Dichtheid [kg/m ³]
Keramisch verwarmingselement Si₃N₄	750	40	3	3210

Tabel 10: Thermische eigenschappen keramisch verwarmingselement

Opstelling: De vier verwarmingselementen steken een beetje onder de hoeken van de caviteit uit zodat een deel van de warmte gebruikt kan worden om de caviteitswanden te verwarmen, zie figuur 35a. De kortste afstand tussen het oppervlak van de inzet en de verwarmingselementen bedraagt 5,2mm, zie figuur 35b. Deze veiligheidsafstand werd gekozen om de matrijssterkte te garanderen. Verder heeft elk van de verwarmingselementen twee aansluitpennen, deze zijn op kleine blokjes bevestigd op het verwarmingselement. Daarom werden de verwarmingselementen zodanig geplaatst dat deze blokjes weggericht zijn van het matrijsoppervlak.



Figuur 35: Ligging vier verwarmingselementen: a) bovenaanzicht b) zijaanzicht

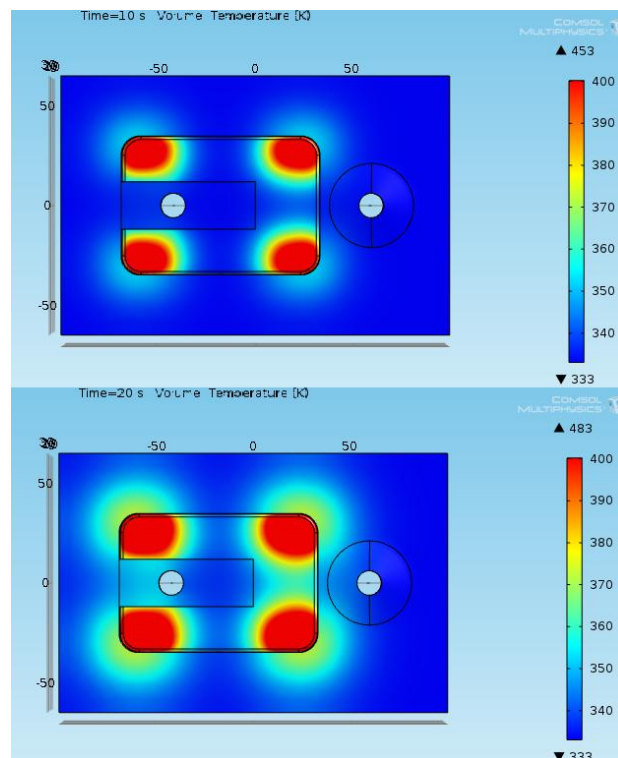
Voor elk van de elementen werd een holte op maat voorzien, waarbij werd rekening gehouden met eventuele uitzetting van het element. Om toch een goed contact te verzekeren tussen verwarmingselement en matrijs zal er een thermische pasta gelegd worden tussen beiden.

Het materiaal dat gebruikt werd voor de inzet is roestvast staal, de eigenschappen van dit materiaal zijn weergegeven in tabel 11.

	Warmtecapaciteit [J/kgK]	Thermische geleidbaarheid [W/mK]	Rockwell hardheid C [HRC]	Dichtheid [kg/m ³]
Staal	460,5	36,5	52-56	7800

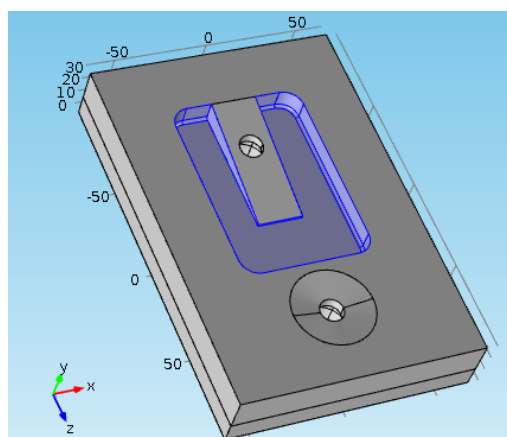
Tabel 11: Eigenschappen staal

Resultaten: Omdat er bij de start van de simulaties nog geen mogelijkheid is om te vertellen welke oplossing de beste resultaten zal opleveren, werd er gekozen om de simulatieresultaten op vaste tijdstippen met elkaar te vergelijken, namelijk op tien en twintig seconden. Er wordt gemikt op een temperatuurverschil van maximum 10°C op een zo kort mogelijke tijdsperiode. Figuur 36 toont de simulatieresultaten van het eerste ontwerp op deze tijdstippen.



Figuur 36: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden

De uniformiteit werd nagegaan door het verschil tussen de minimum- en maximumtemperatuur van de vormholte (zie figuur 37) te controleren, de resultaten werden weergegeven in tabel 12.

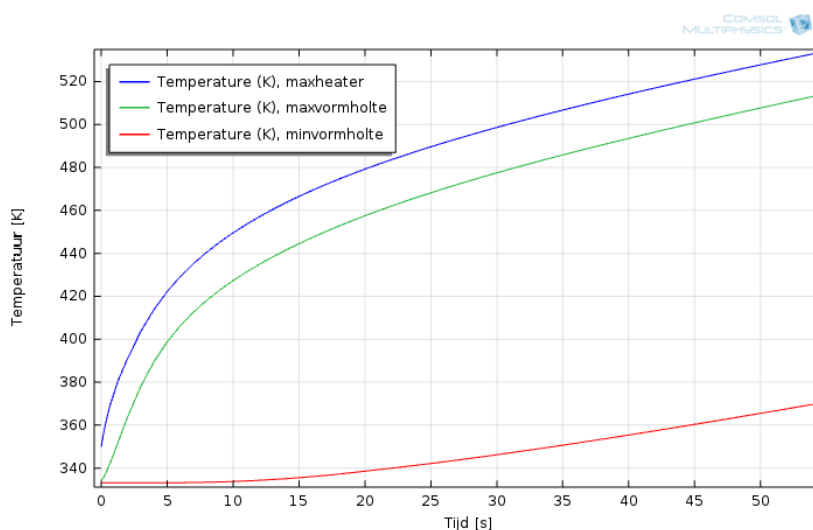


Figuur 37: Vormholte

De resultaten tonen aan dat er aan deze opstelling nog ruimte is voor verbetering op vlak van temperatuuruniformiteit. Tabel 12 bevestigt dit met de grote temperatuurverschillen na 10 en 20 seconden opwarming. Figuur 38 geeft het verloop grafisch weer.

Tijdstip [s]	Tmax [K]	Tmin [K]	ΔT [K]
10	427	333	94
20	457	338	119

Tabel 12: Temperatuuruniformiteit vormholte



Figuur 38: Opwarming met 4 elementen

Op basis van deze resultaten werd besloten een nieuwe opstelling uit te proberen die meer verwarmingselementen gebruikt. Dit zou mogelijk zowel een oplossing bieden voor de temperatuuruniformiteit, aangezien de elementen dan dichterbij elkaar geplaatst worden, als de opwarmingsnelheid, aangezien meer elementen ook meer vermogen betekend.

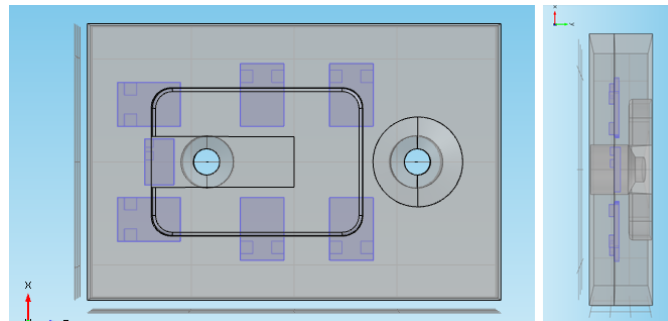
4.2.2 Zeven verwarmingselementen

Verwarmingselementen: Ditmaal werd gekozen voor een opstelling met zeven verwarmingselementen, de eigenschappen van deze elementen zijn terug te vinden in tabel 13. Deze tabel laat ook zien dat het 22x14 verwarmingselement een voedingsspanning heeft van 48V, terwijl het 30x21 verwarmingselement een voedingsspanning heeft van 230V. In bijlage A staat de technische tekening van het verwarmingselement 22x14.

Afmetingen [mm]	Spanning [V]	Koud vermogen [W]	Vermogen op max T [W]	Tmax [°C]	Aantal
22x14x3	48	150	100	500	1
30x21x2,3	230	600	400	500	6

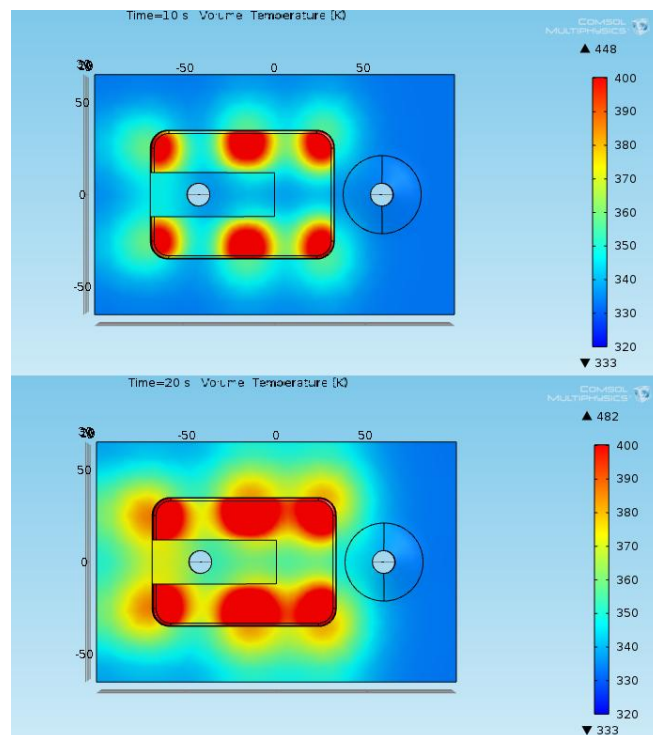
Tabel 13: Technische gegevens verwarmingselementen 22x14 en 30x21 [28]

Opstelling: Ook hierin liggen de verwarmingselementen voor een gedeelte buiten het inzetoppervlak, zodat elk element ook een stukje van de zijwanden opwarmt. Verder is de afstand van de 30x21 elementen tot het inzetoppervlak niet veranderd ten opzichte van het vorig ontwerp. De afstand van de 22x14 elementen bedraagt 4,5 mm. De opstelling van de verwarmingselementen is zichtbaar in figuur 39. Het gebruikte materiaal voor de inzet is nog steeds staal.



Figuur 39: Ligging zeven verwarmingselementen: a) bovenaanzicht, b) zijaanzicht

Resultaten: Figuur 40 toont de simulatieresultaten na tien en twintig seconden.



Figuur 40: Simulatieresultaten in [K]: a) tien seconden, b) twintig seconden

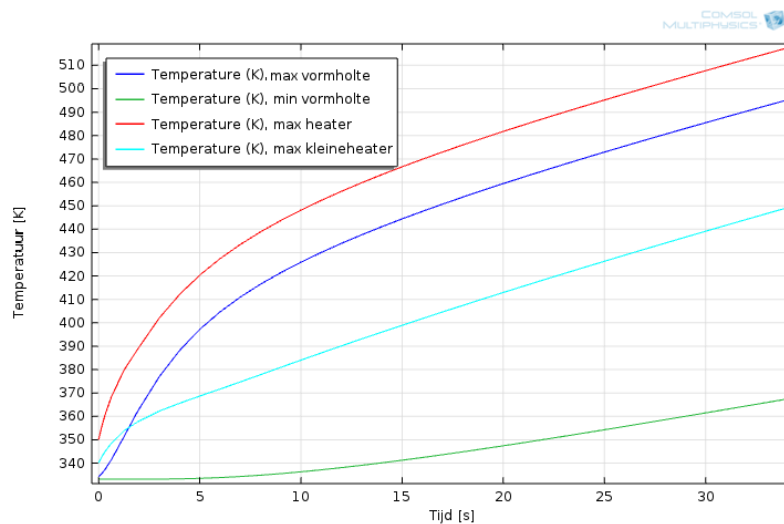
De temperatuuruniformiteit werd ook nu weer nagegaan door de minimum- en maximumtemperatuur van het inzetoppervlak te vergelijken, tabel 14 toont de resultaten.

Tijdstip [s]	Tmax [K]	Tmin [K]	ΔT [K]
10	425	336	89
20	459	347	112

Tabel 14: Temperatuuruniformiteit vormholte

Figuur 41 laat het verloop van deze opwarming grafisch zien.

De resultaten tonen aan dat het uniformiteitsprobleem al verbeterd is door meer elementen te plaatsen die dicht bij elkaar liggen, deze verbetering is echter zeer beperkt aangezien er nog sprake is van grote temperatuurverschillen aan het inzetoppervlak. Daarom worden er meer verwarmingselementen toegevoegd in het volgende ontwerp. Ook zijn de spanningen om de elementen aan te sturen verschillend waardoor er extra sturingselementen nodig zijn om de extra spanning te genereren.

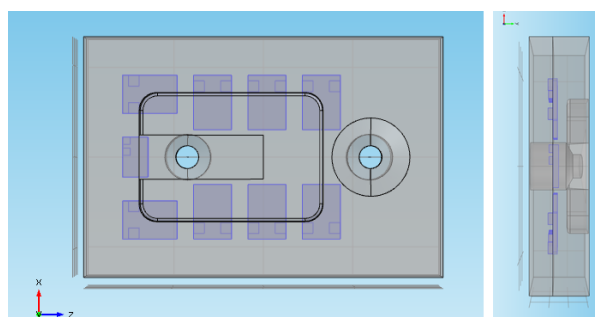


Figuur 41: Opwarming met 7 elementen

4.2.3 Negen verwarmingselementen

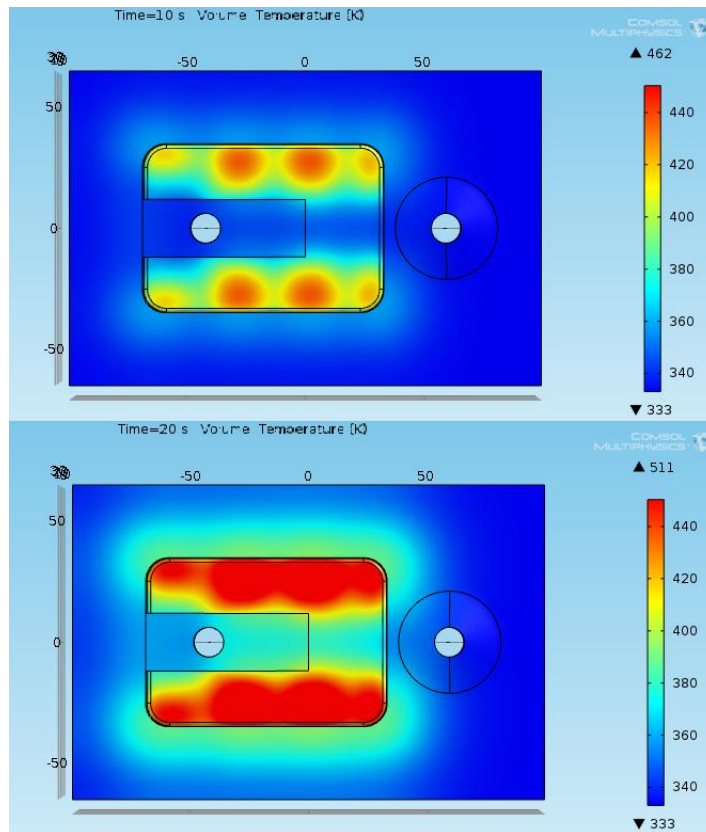
Verwarmingselementen: De gebruikte verwarmingselementen zijn hetzelfde als in het ontwerp van 4.2.2, deze keer werd verwarmingselement 30x21 acht keer gebruikt.

Opstelling: Figuur 42 toont de opstelling voor de negen verwarmingselementen. De afstand van elementen tot inzetoppervlak is hetzelfde als in 4.2.2, het gebruikte materiaal is nog steeds staal.



Figuur 42: Ligging negen verwarmingselementen: a) bovenaanzicht, b) zijaanzicht

Resultaten: Figuur 43 toont de simulatieresultaten na tien en twintig seconden. De opwarming verloopt duidelijk sneller dan bij de opstellingen met vier en zeven verwarmingselementen. De resultaten tonen echter geen verbetering van de temperatuuruniformiteit, dit komt doordat de verwarmingselementen niet dicht genoeg bij elkaar liggen om dit probleem aan te pakken. Dit blijkt eveneens uit de resultaten van tabel 15.

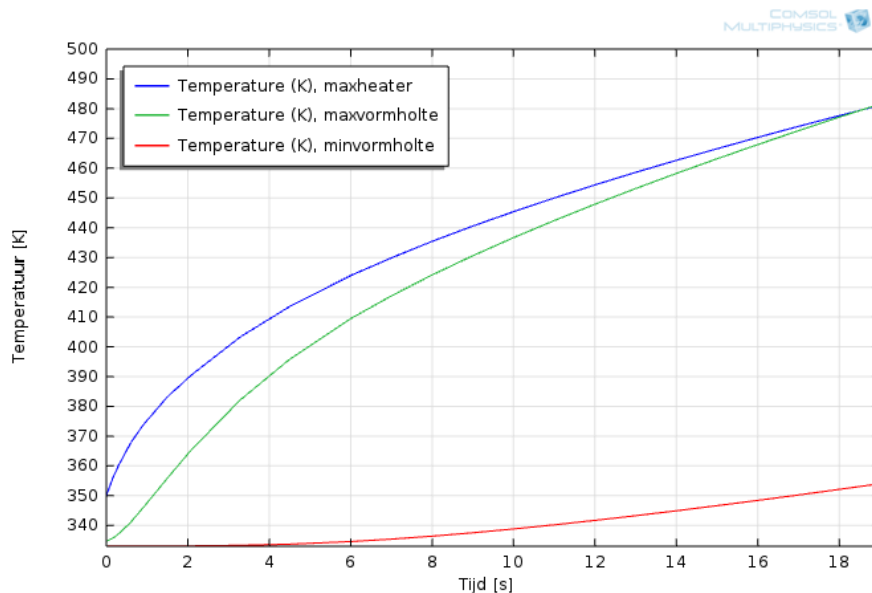


Figuur 43: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden

Tijdstip [s]	Tmax [K]	Tmin [K]	ΔT [K]
10	436	338	98
20	485	355	130

Tabel 15: Temperatuuruniformiteit vormholte

Het temperatuurverschil na 20 seconden bedraagt nu 130K terwijl dat in het vorig ontwerp slechts 112K bedroeg. De opwarming wordt in deze ontwerpen dan ook niet gelimiteerd tot op een bepaalde maximumwaarde. De minimumtemperatuur ligt hier na 20 seconden wel al op 355K terwijl deze in het vorig ontwerp toen op 347K lag. Dit betekent dat de minimumtemperatuur van de bodem gestegen is met 8K door 2 elementen toe te voegen. Figuur 44 laat grafisch het verloop van deze opwarming zien.



Figuur 44: Opwarming met 9 elementen

Deze testen tonen aan dat een uniformer resultaat pas verkregen wordt als er gebruik wordt gemaakt van nog meer verwarmingselementen die dichter bij elkaar geplaatst worden. Het plaatsen van zoveel elementen is echter niet eenvoudig. Daar komt nog bij dat de twee verwarmingselementen (22x14 en 30x21) een verschillende voedingsspanning hebben.

Bovenstaande commentaren op de voorgaande opstellingen heeft geleid tot het plaatsen van één groot verwarmingselement. De mogelijkheid hiervan bleek uit een gesprek met een werknemer van GWK Kuhlmann GmbH op de kunststoffenbeurs in Düsseldorf [29]. Bovendien bleek het mogelijk te zijn om in het keramisch verwarmingselement ruimte te voorzien om de hotrunner door te laten. Het grote nadeel van zo een element op maat te laten maken, is de kostprijs, namelijk 2500€ voor 2 elementen.

4.2.4 Eindontwerp: één verwarmingselement met hotrunner-holte

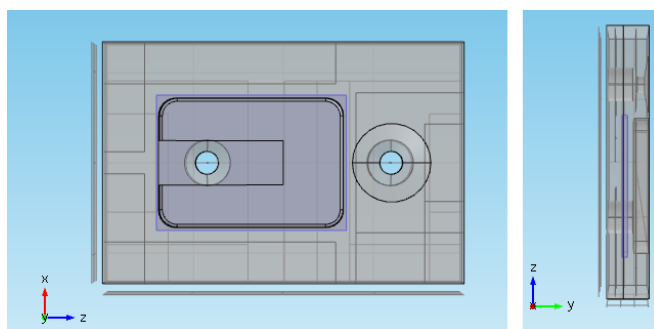
Verwarmingselement: Bach RC bleek in staat te zijn een element te maken met een holte voor de hotrunner. Tabel 16 toont de eigenschappen van het gekozen element.

Afmetingen [mm]	Vermogen [W]	Spanning [V]	Weerstand [Ω]	Max T [°C]	Materiaal
104x74x4	1500	230	17.5 ±25%	550	Siliciumnitride

Tabel 16: Eigenschappen verwarmingselement eindontwerp

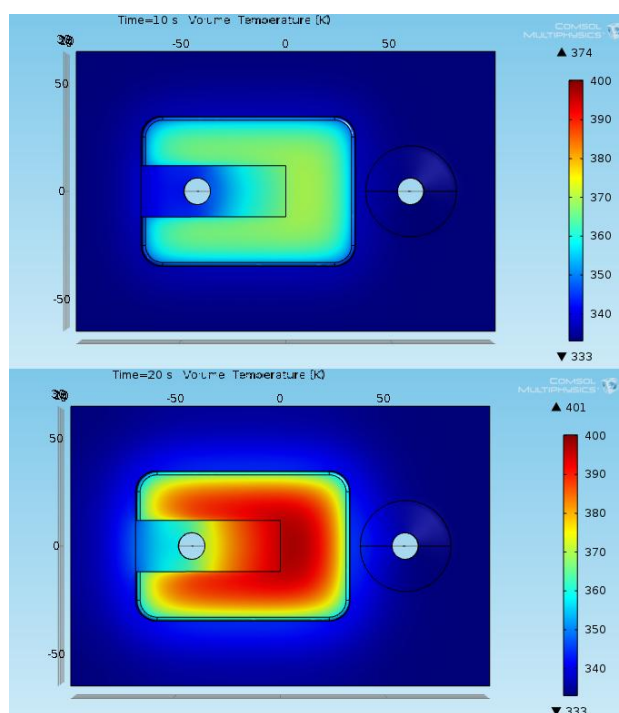
Het element moet net groter zijn dan het oppervlak van de caviteit opdat de wanden van de vormholte mee verwarmd worden. Daarom werd gekozen voor een verwarmingselement met 104x74mm als ruwe afmetingen terwijl het inzetoppervlak 100mm bij 74mm is.

Opstelling: Figuur 45 toont het ontwerp van de inzet. Het gebruikte inzetmateriaal is nog steeds staal maar de afstand tot het inzetoppervlak werd veranderd naar 4,5mm. Dit is nog steeds voldoende om de matrijssterkte te garanderen.



Figuur 45: Ontwerp met één verwarmingselement

Resultaten 1500W: Figuur 46 toont de simulatieresultaten na tien en twintig seconden.

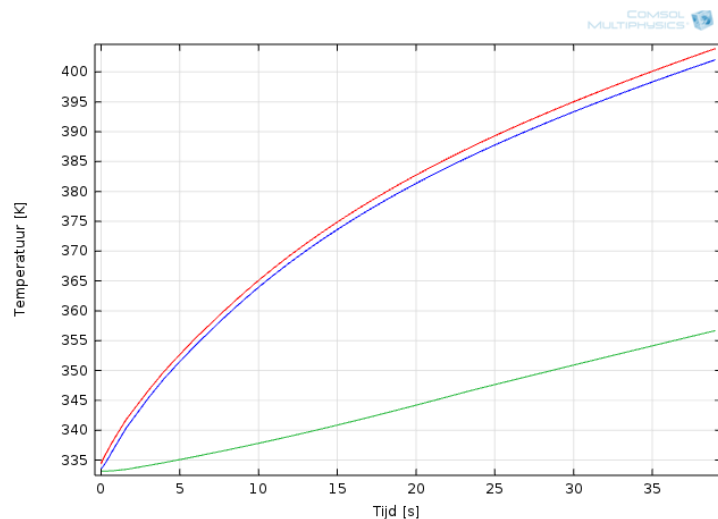


Figuur 46: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden

Tabel 17 toont aan dat de opwarming inderdaad veel uniformer verloopt dan in de vorige opstellingen. De opwarmsnelheid ligt echter lager doordat het verwarmingselement slechts een vermogen heeft van 1500W, in tegenstelling tot het gezamenlijk vermogen van 4950 W bij voorgaande opstelling. Figuur 47 geeft de opwarming ook grafisch weer.

Tijdstip [s]	Tmax [K]	Tmin [K]	ΔT [K]
10	369	336	33
20	396	340	56

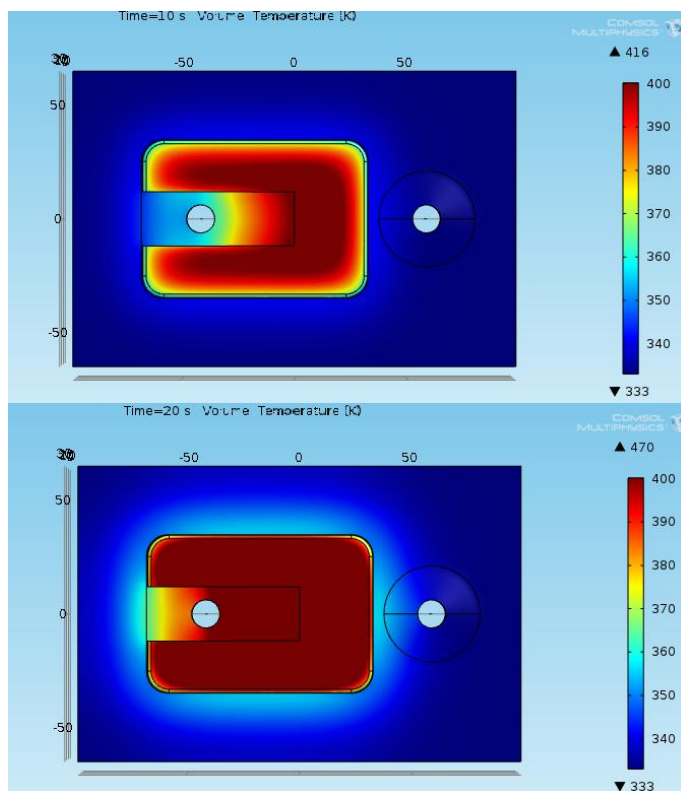
Tabel 17: Temperatuuruniformiteit vormholte



Figuur 47: Opwarming met 1 element van 1500W met hotrunner-holte

Daarom werd gekozen voor een verwarmingselement van 3000W. De technische tekening van het verwarmingselement kan teruggevonden worden in bijlage A.

Resultaten 3000W: Figuur 48 toont de simulatieresultaten van het 3000W verwarmingselement. De opwarming verloopt nu duidelijk veel sneller dan bij het 1500W element.



Figuur 48: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden

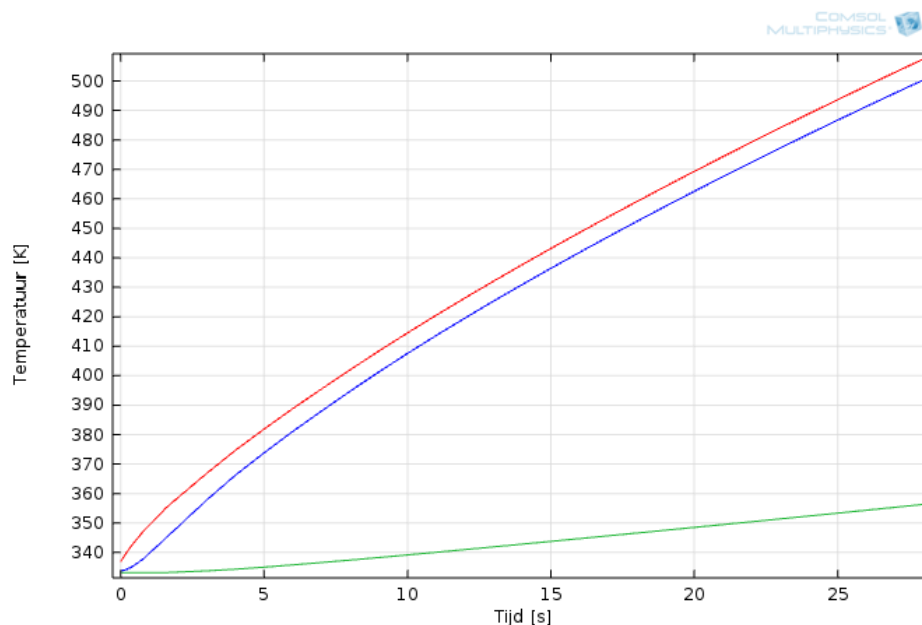
De minimumtemperatuur bevindt zich aan de rand van de vormholte, een plaats die moeilijk op te warmen is. En tabel 18 toont aan dat de temperatuuruniformiteit verslechterd is ten opzichte van het vorig ontwerp. Dit komt doordat er sneller een hogere temperatuur bereikt kan worden met het 3000W element maar de warmte zich niet goed verdeeld heeft overheen de vormholte na twintig seconden.

In 4.4 zal worden nagegaan in welke mate deze temperatuurverschillen verkleind kunnen worden door een andere materiaal te gebruiken voor de inzet. In werkelijkheid zal het verwarmingselement eerst een bepaalde maximumtemperatuur moeten bereiken en deze daarna gedurende een bepaalde tijd vasthouden om de nog aanwezige temperatuurverschillen weg te werken. Omdat het snel bereiken van de temperatuur bepaald wordt door het vermogen van het verwarmingselement, werd bij Bach RC het verwarmingselement van 3000W besteld.

Voor de volledigheid laat Figuur 49 het verloop van de opwarming grafisch zien.

Tijdstip [s]	Tmax [K]	Tmin [K]	ΔT [K]
10	407	339	68
20	462	348	114

Tabel 18: Temperatuuruniformiteit vormholte

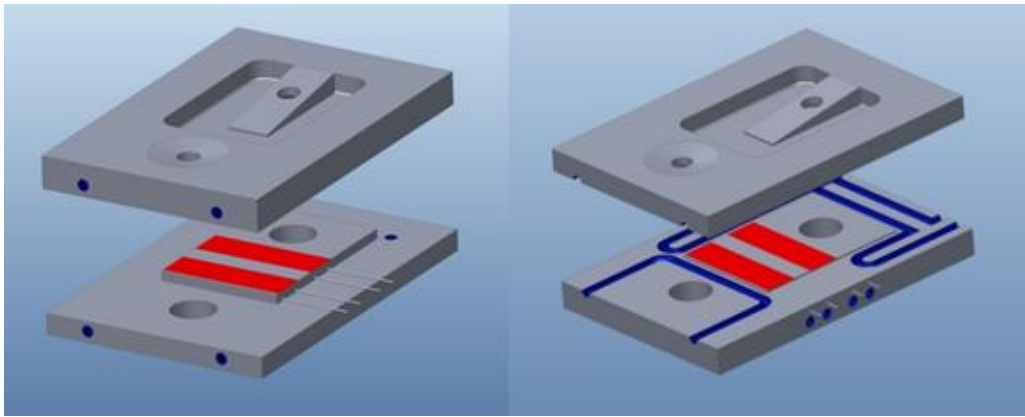


Figuur 49: Opwarming met 1 element van 3000W met hotrunner-holte

4.3 Plaatsen van de koelkanalen

De inzet van de voormatrijs werd gesplitst in twee delen om de verwarmingselementen te plaatsen. Hierdoor ontstonden twee mogelijkheden voor de ligging van de koelkanalen:

1. koelkanalen leggen in elke helft, zie figuur 50a (optie 1);
2. koelkanalen leggen in de splitsing van de matrijshelft, zie figuur 50b (optie 2).



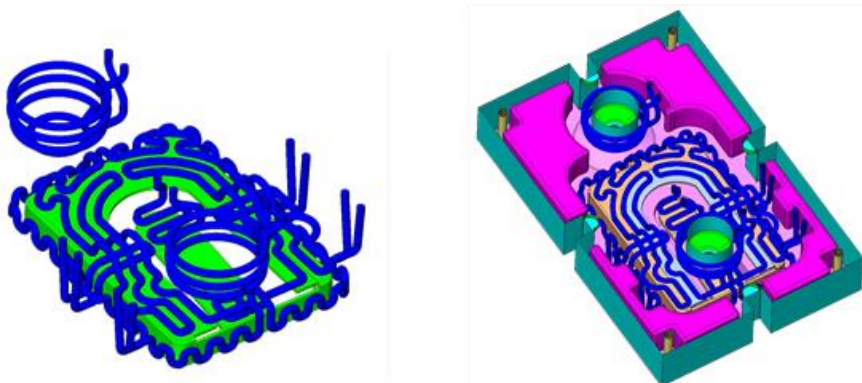
Figuur 50: Ligging koelkanalen

Om de eerste optie te maken worden de koelkanalen geboord. Deze methode geeft veel beperkingen in de vormgeving van de koelkanalen, aangezien er niet op een vrije manier bochten gelegd kunnen worden of de waterstroming niet schuin doorheen de inzet, bijvoorbeeld in spiraalvorm, kan gaan.

Bij de tweede optie wordt de helft van de koelkanalen in beide zijden van de inzet gefreesd, daarna wordt de inzet dichtgesmolten waardoor de kanalen ontstaan. Deze methode geeft meer mogelijkheden voor de vorm en ligging van de koelkanalen omdat zo eender waar, maar opnieuw niet schuin of in spiraalvorm, bochten gelegd kunnen worden. Het gebruiken van deze methode heeft wel als gevolg dat eens de inzet dichtgemaakt wordt, eventuele problemen met de verwarmingselementen niet meer opgelost kunnen worden. Bovendien verhoogt dit ontwerp de kans op lekken.

Een methode die nog meer vrijheid toelaat bij de koelkanalen is Selective Laser Melting. Het model wordt dan gecreëerd door het selectief smelten van verschillende laagjes metaalpoeder met behulp van een laser. Het proces gebruikt een 3D CAD model als bron om de 2D informatie voor elke laag uit te halen. [30]Op deze manier kunnen de banen eender welke vorm en eender welke richting doorheen de inzet hebben. Een voorbeeld van dergelijke complexe koelkanaalbanen is te zien in figuur 51.

Zoals vermeld in 4.1.2 werd de matrijs eerder opgebouwd. Figuur 51a toont de hoe de vormgeving van de koelkanalen aansluit op de vorm van het product en figuur 51b toont hoe de koelkanalen werden geplaatst in de inzet van de voormatrijs dankzij het SLM-proces.



Figuur 51: Ligging koelkanalen: Selective Laser Melting

Omdat het SLM proces in vergelijking met het boren van koelkanalen bijzonder duur is, werd besloten de koelkanalen toch te boren. In de volgende paragrafen zal eerst worden besproken hoe de koelkanalen worden aangestuurd. Nadien worden een aantal tussenontwerpen en het eindontwerp toegelicht.

4.3.1 Temperatuurregeling van het water

Om de koelkanalen van zowel warm als koud water te voorzien, zal gebruik worden gemaakt van een Temperature Control Unit van HB-Therm, een toestel voor de temperatuurregeling van het water in variotherme installaties. Dit toestel is een Thermo 5, de HB-180Z3 (meer bepaald HB 180Z3-32-4M-A2-ZE-ZD-ZK-405, zie bijlage B). Het vermogen van deze Thermo 5 is 32kW, de maximale waterdruk ligt op 25 bar. De HB-180Z3 kan warm water leveren met een maximumtemperatuur 180°C, verder werd gekozen om het koelwater in te stellen op 60°C. Het maximum debiet van het koelwater ligt op 50l/min. Bij de simulaties bouwt het debiet zich binnen enkel seconden op van 0 tot 6l/min in elk van de koelkanalen.

4.3.2 Algemene informatie over de ligging van de koelkanalen

Ligging en grootte van de koelkanalen: Zoals al een aantal keer eerder vermeld werd, bestaat de inzet van de voormatrijs uit twee delen. Er zullen koelkanalen gelegd worden in beide delen van de inzet.

Bovenste koelkanalen: De koelkanalen die zich in het bovenste deel bevinden hebben twee taken. De eerste taak is zo veel mogelijk de wanden van de vormholte afkoelen, de koelkanalen van het onderste deel kunnen hier immers niet veel aan bijdragen. Een tweede taak van deze koelkanalen is mee het verwarmingselement en de bodem van de vormholte afkoelen. Om de eerste taak te vervullen worden deze koelkanalen volledig rondom de vormholte geplaatst. Om de tweede taak te vervullen mogen de koelkanalen niet te ver van het verwarmingselement verwijderd liggen. Verder weten we van het bovenste deel van de inzet dat dit een dikte heeft van 18,5mm en dat het verwarmingselement in deze zijde verzonken ligt met een diepte van 3mm en een afstand tot het inzetoppervlak heeft van 4,5mm.

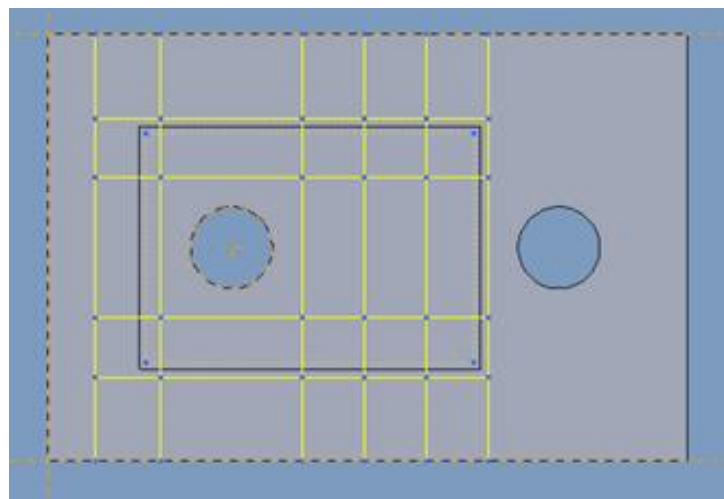
Het kanaal van het bovenste deel van de inzet kreeg een diameter van 4mm omdat het dichterbij de vormholte ligt dan mogelijk is voor de koelkanalen voor het onderste deel van de inzet. Dit werd gedaan om te voorkomen dat de wanden van de vormholte veel sneller zouden afkoelen dan de bodem van de vormholte. Uit de literatuurstudie bleek dat een afstand van 1-1,5 maal de diameter van het koelkanaal aangeraden is tussen het centrum van het koelkanaal en de vormholte. Daarom werd dit kanaal geplaatst op een afstand van 6,25mm tot het verwarmingselement en een afstand van 6mm tot de wanden van de vormholte.

Onderste koelkanalen: De koelkanalen van het onderste deel liggen onder het verwarmingselement. Het verwarmingselement zal eigenlijk werken als blokkade voor een goede werking van deze koelkanalen ten gevolge van de slechte thermische eigenschappen van het verwarmingselement.

Verder weten we dat het onderste deel van de inzet een dikte heeft van 16mm en dat het verwarmingselement hierin verzonken ligt met een diepte van 1mm. Dus kan men stellen dat het onderste deel van de inzet een gecorrigeerde dikte heeft van 15mm. Om de veiligheidsafstand van 1-1,5 maal de diameter te kunnen bewaren is bijgevolg een maximale diameter van 7,5mm mogelijk. Er werd echter gekozen voor een diameter van 6mm om de matrijssterkte te verzekeren.

Bij elk van de simulaties wordt uitgegaan van een uniforme starttemperatuur van de inzet van 403K, ofwel 130°C. Het gebruikte inzetmateriaal is nog steeds staal, bij elk van de simulaties wordt een isolatielaag aan de onderzijde van de inzet toegevoegd. Het waterdebiet bedraagt 0,0001m³/min aan elke inlaat.

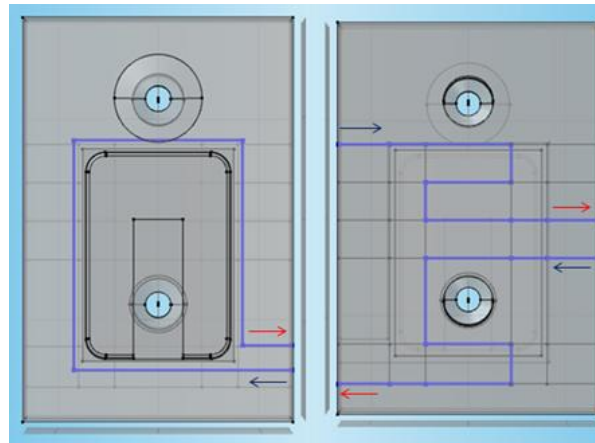
Voor het bovenste deel van de inzet werd gekozen een doorlopend koelkanaal te leggen rondom de vormholte. Voor de onderste koelkanalen werd uitgegaan van een raster, zie figuur 52. De gele lijnen in deze afbeelding stellen steeds de middellijn van de koelkanalen voor. De afstand tussen de gaten voor de hotrunners en de omliggende koelkanalen bedraagt 9mm. De afstand tussen de horizontaal liggende koelkanalen bedraagt 18mm. De afstand tussen verticaal liggende koelkanalen bedraagt 19mm. Uitgaande van dit raster zullen een aantal mogelijke opstellingen voor de bodem van de koelkanalen uitgeprobeerd worden.



Figuur 52: Raster

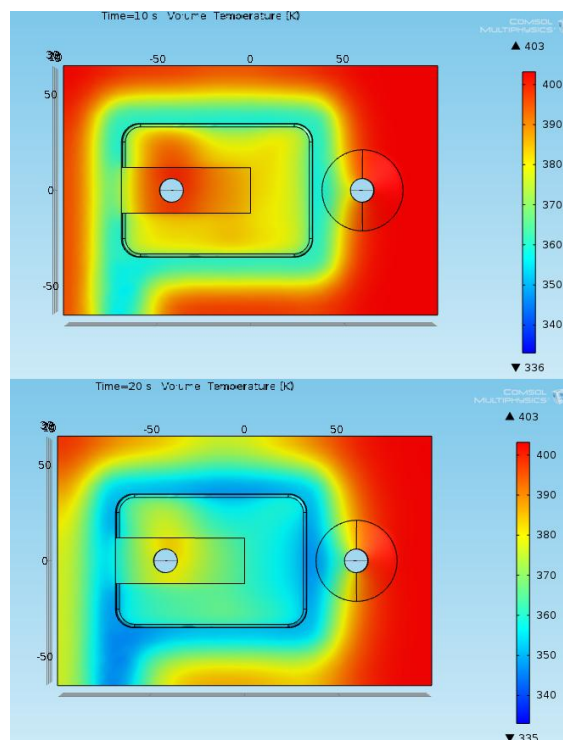
4.3.3 Eerste tussentijds ontwerp

Onderstaande afbeelding laat zien hoe de koelkanalen liggen en hoe het water stroomt in dit eerste ontwerp (zie figuur 53). De blauwe pijlen stellen het instromen van het koelwater voor en de rode pijlen het uitstromen. Figuur 53a toont de koelkanalen van het bovenste deel van de inzet en figuur 53b de koelkanalen van het onderste deel van de inzet. De ingaande stromingen werden steeds naast uitgaande stromingen gelegd om de temperatuurgradiënt overheen de inzet te minimaliseren. Om het middelste deel van de inzet voldoende af te koelen werden in het onderste deel van de inzet twee lussen gelegd die zich nabij het midden van de inzet bevinden.



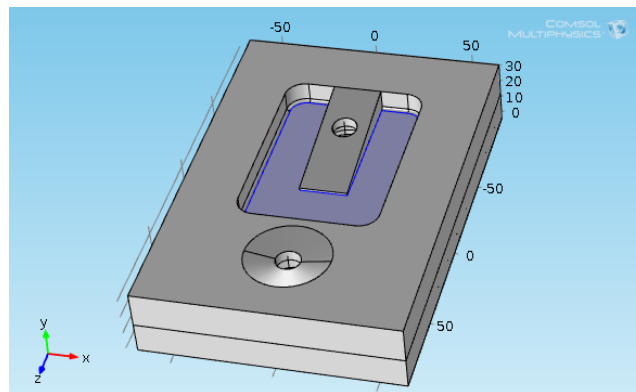
Figuur 53: Stroming eerste ontwerp: a) bovenkant b) onderkant

Figuur 54a en b tonen de simulatieresultaten respectievelijk na tien en twintig seconden koelen. Bij het koelen wordt het buitenste deel van de inzet het snelste gekoeld dankzij de koelkanalen in het bovenste deel van de inzet. Het effect van de onderste koelkanalen is duidelijker merkbaar na een koelperiode van twintig seconden.

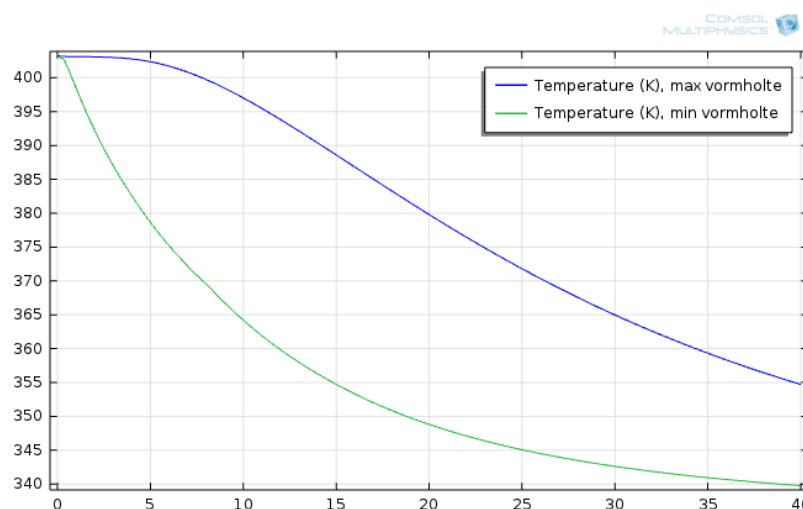


Figuur 54: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden

De grafiek in figuur 56 toont de minimum- en maximumtemperatuur van het bodemvlak van de vormholte zoals aangeduid in figuur 55.



Figuur 55: Bodemvlak vormholte



Figuur 56: Maximum- en minimumtemperatuur van de vormholte van het 1ste tussentijdse ontwerp

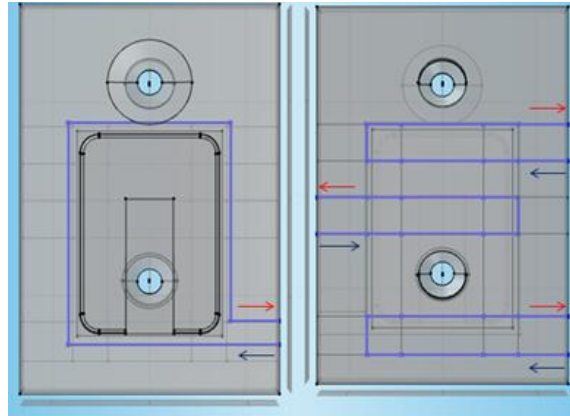
Tabel 19 toont de waarden van de minimum- en maximumtemperatuur op een aantal tijdstippen in het koelproces. Deze tabel toont duidelijk aan dat het temperatuurverschil sterk daalt naarmate meer tijd verstreken is. Er wordt gemikt op een uitwerptemperatuur van ongeveer 333K, ofwel 60°C, de temperatuur van het koelwater. In de volgende ontwerpen wordt getracht deze temperatuur sneller te bereiken en met een kleiner temperatuurverschil aan het inzetoppervlak.

Tijdstip [s]	Tmax [K]	Tmin [K]	ΔT [K]
10	397	364	33
20	379	348	31
30	364	342	22
40	354	339	15

Tabel 19: Minimum- en maximumtemperaturen van bodemvlak vormholte

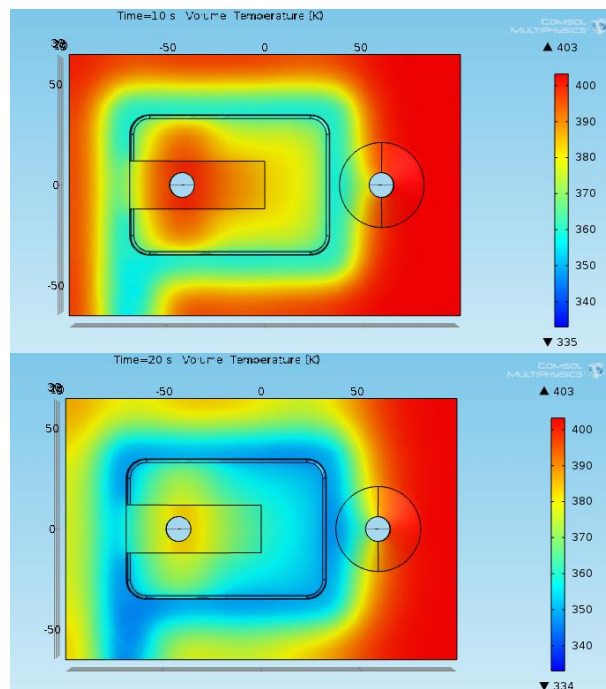
4.3.4 Tweede tussentijds ontwerp

Figuur 57a en b tonen hoe het water stroomt in het tweede ontwerp. De ligging en stroming van de koelkanalen van het bovenste deel zijn niet veranderd. Er werd echter voor het onderste deel gekozen voor drie lussen. Net zoals in het vorig ontwerp liggen in- en uitgaande stromingen steeds naast elkaar om de temperatuurgradiënt te minimaliseren.



Figuur 57: Stroming tweede ontwerp

Onderstaande afbeelding toont de simulatieresultaten na tien en twintig seconden. Wat sterk opvalt, is dat de temperatuurverschillen bij beide opstellingen volledig hetzelfde zijn, zie tabel 20.

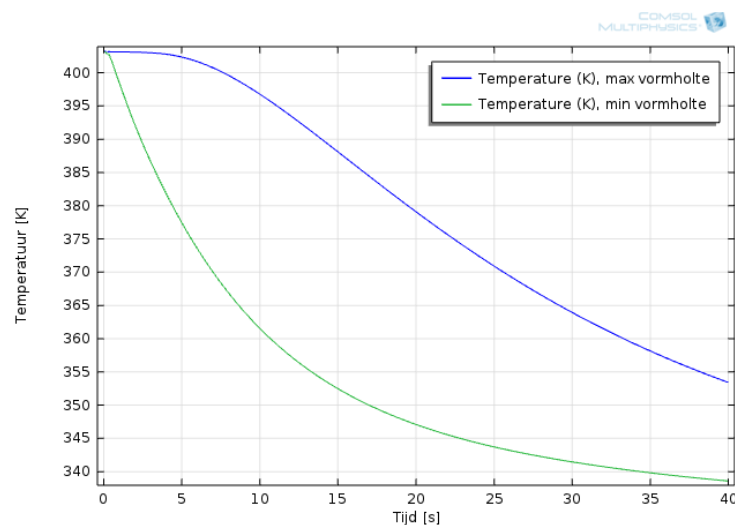


Figuur 58: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) twintig seconden

Tijdstip [s]	Tmax [K]	Tmin [K]	ΔT [K]
10	396	361	35
20	379	347	32
30	363	341	22
40	353	338	15

Tabel 20: Minimum- en maximumtemperaturen van bodemvlak vormholte

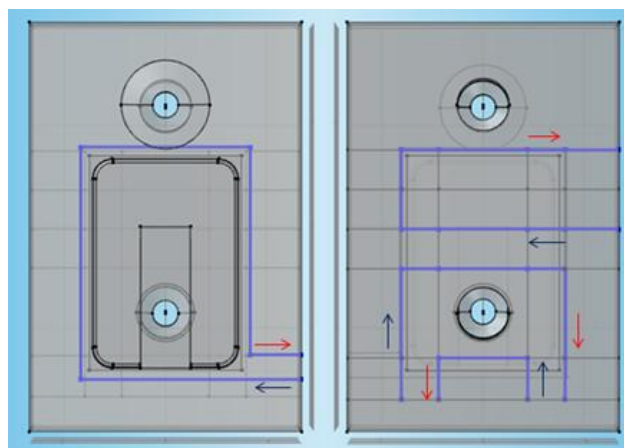
Figuur 59 geeft het verloop grafisch weer. Hierop is te zien dat door gebruik te maken van meer en kortere lussen de vormholte sneller afkoelt. Dit is in overeenstemming met de literatuurstudie. (zie 3.3.3)



Figuur 59: Maximum- en minimumtemperatuur van de vormholte van het 2^{de} tussentijdse ontwerp

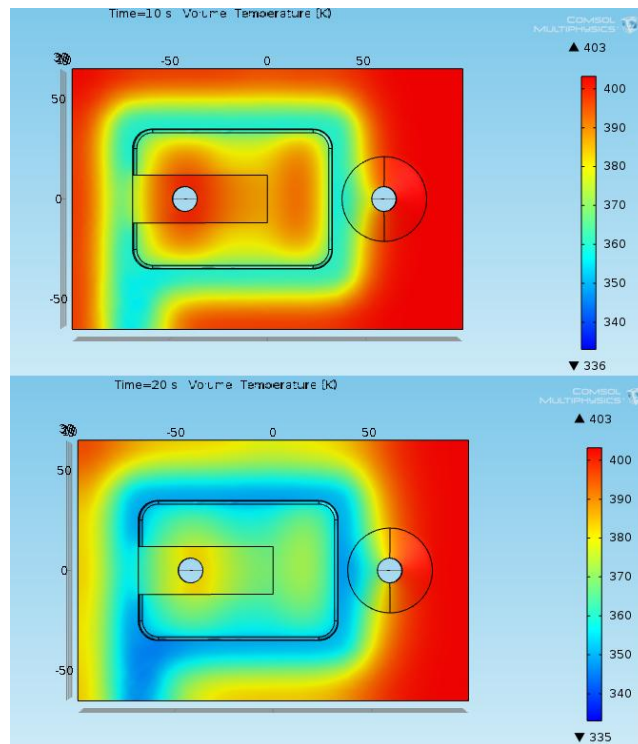
4.3.5 Derde tussentijds ontwerp

Onderstaande afbeelding (figuur 60) stelt een derde mogelijke opstelling van de koelkanalen voor. Het bovenste deel van de inzet blijft onveranderd. Het onderste deel van de inzet heeft nu drie lussen, maar anders opgesteld. De in- en uitgangen van de koelkanalen liggen opnieuw zo veel mogelijk naast elkaar.



Figuur 60: Tussentijds ontwerp

Figuur 61 toont de resultaten van de simulaties na tien en twintig seconden. Deze resultaten wijzen na twintig seconden op een uniformere koeling dan in het eerste en tweede ontwerp. Het middelste deel van de inzet blijft echter een probleem vormen.

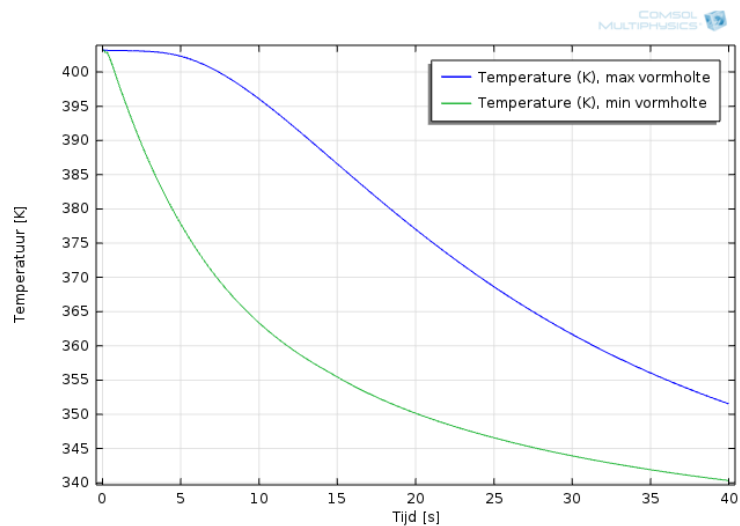


Figuur 61: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden

Tabel 21 toont de minimum- en maximumtemperaturen van de vormholte op een aantal tijdstippen in het koelproces. Het temperatuurverschil is verder gedaald ten opzichte van de vorige ontwerpen. De minimumtemperatuur ligt na twintig seconden echter hoger bij dit ontwerp dan in het vorig ontwerp, 350°C ten opzichte van 347°C. Deze achterstand wordt steeds meer ingehaald na 30 seconden, 343°C ten opzichte van 341°C terwijl het temperatuurverschil hier nog steeds lager ligt na dertig seconden, 18°C in vergelijking met 22°C. Dit komt doordat er hier twee lussen rondom een kritiek punt werden geplaatst, namelijk rondom de holte van de hotrunner. Daar ligt immers het schuine vlak, wat betekent dat daar meer materiaal aanwezig is dat gekoeld moet worden. Figuur 62 geeft de resultaten grafisch weer.

Tijdstip [s]	Tmax [K]	Tmin [K]	ΔT [K]
10	396	363	33
20	377	350	17
30	361	343	18
40	351	340	11

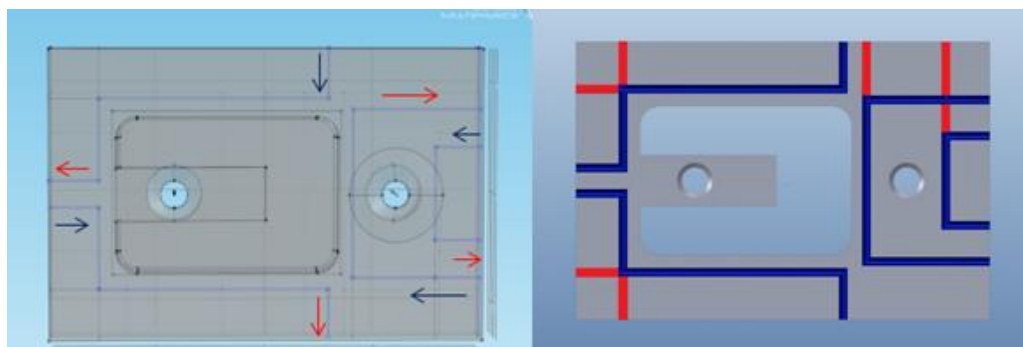
Tabel 21: Minimum- en maximumtemperaturen van bodenvlak vormholte



Figuur 62: Maximum- en minimumtemperatuur van de vormholte van het 3^{de} tussentijdse ontwerp

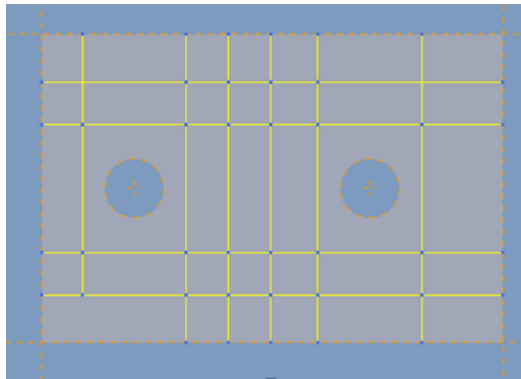
4.3.6 Eindontwerp

Uit de vorige testen bleek dat het beter is om meerdere lussen aan te brengen in elk deel van de inzet, om zodoende sneller een lagere temperatuur van de inzet te bereiken. Daarom zijn er nu drie lussen aangebracht rondom de vormholte. Verder werd er gekozen een extra lus aan te brengen rondom de tweede hotrunner om ook dit gedeelte van de inzet mee af te koelen. Dit zou er voor moeten zorgen dat het temperatuurverschil overheen de hele inzet beperkt blijft. Ook bij dit ontwerp werd naast elke ingang van de koelkanalen opnieuw een uitgang aangebracht om de temperatuurgradiënt zo veel mogelijk te beperken (zie figuur 63a) en hebben de koelkanalen van het bovenste deel nog steeds een diameter van 4mm. Voor dit laatste ontwerp wordt ook getoond waar de afstoppen zich zullen bevinden, deze werden in figuur 63b het rood aangeduid.



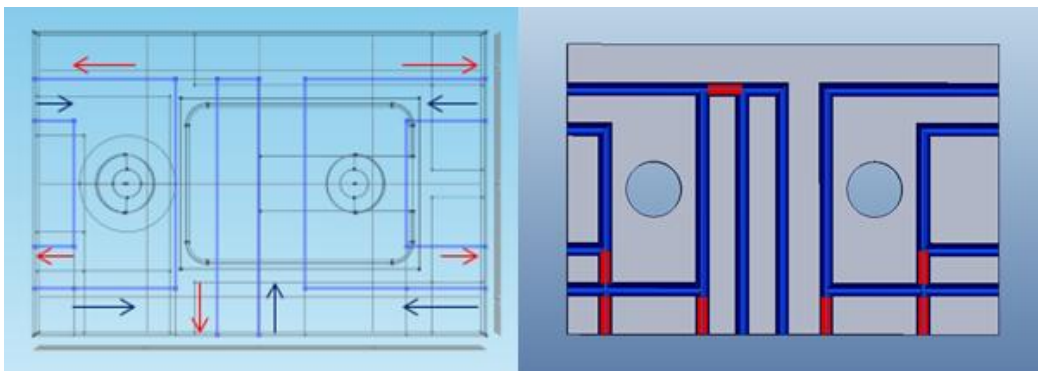
Figuur 63: Koelkanalen bovenste helft

Voor de onderste helft van de inzet werd uitgegaan van een verbeterd raster, zie figuur 64. Ditmaal bedraagt de afstand tussen opeenvolgende horizontale koelkanalen 18mm. De afstand tussen opeenvolgende verticale kanalen werd ook veranderd naar 18mm om de temperatuuruniformiteit te verbeteren. Door deze wijziging, en omdat de afstand tot de holte van de hotrunner verlegd werd naar 9,5mm om zeker te zijn van de matrijssterkte, is er echter eenmaal tussen twee opeenvolgende koelkanalen een afstand van 20mm. Verder werd het raster uitgebreid zodat, net zoals in het bovenste deel van de inzet, de zijde van de tweede hotrunner mee afgekoeld wordt.



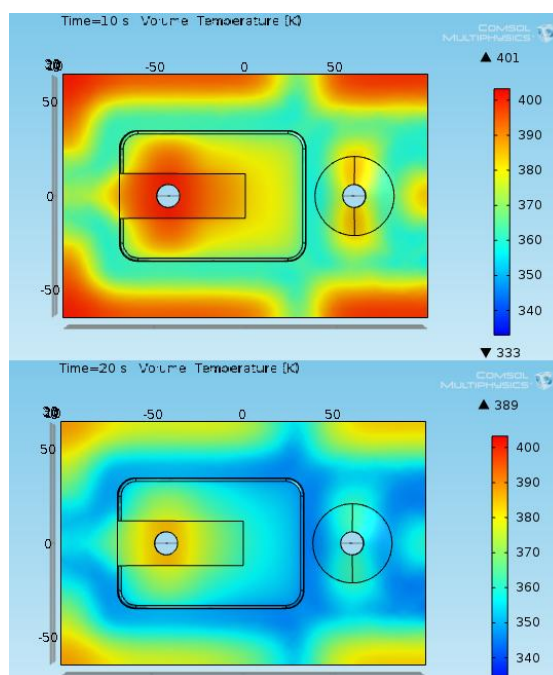
Figuur 64: Raster eindontwerp

Figuur 65a toont de koelkanalen van de onderste matrijshelft. Ook hier zijn de kanalen in tegenstroom aangelegd om een uniforme afkoeling te verkrijgen en de diameter van de koelkanalen is nog steeds 6mm. Ten slotte werden ook voor de onderste helft de afstoppingen in het rood aangeduid, zie figuur 65b.



Figuur 65: Koelkanalen onderste helft

Figuur 66 toont de simulatieresultaten na tien en twintig seconden van het eindontwerp. Er valt meteen op dat, in vergelijking met de tussenresultaten, nu de hele inzet afgekoeld wordt.

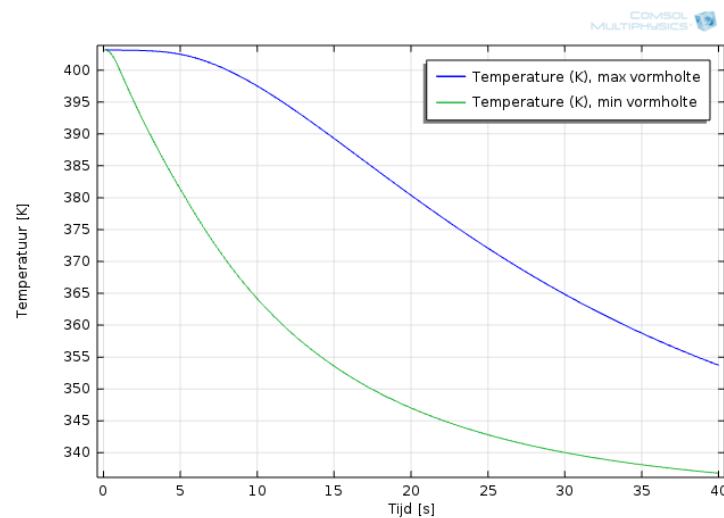


Figuur 66: Simulatieresultaten in [K]: a) 10 seconden, b) 20 seconden

De resultaten van het tweede tussentijdse ontwerp waren beter als men enkel de temperatuurverschillen in de tabellen bekijkt (zie ook tabel 22). Echter als men de simulatieresultaten nader analyseert is het duidelijk dat de volledige inzet nu beter en sneller gekoeld wordt. De minimumtemperatuur ligt na tien seconden lager in het eindontwerp dan in de andere ontwerpen. Dit komt doordat er meer koelkanalen werden gelegd in het onderste deel van de inzet, en meer en kortere koelkanalen in het bovenste deel van de inzet. Figuur 67 geeft ook bij deze opstelling het verloop van de afkoeling grafisch weer.

Tijdstip [s]	Tmax [K]	Tmin [K]	ΔT [K]
10	397	364	33
20	380	347	33
30	364	340	24
40	353	336	17

Tabel 22: Minimum- en maximumtemperaturen van bodenvlak vormholte



Figuur 67: Maximum- en minimumtemperatuur van de vormholte van het eindontwerp

4.4 Materiaalkeuze

4.4.1 Opstelling

Om de opwarming- en afkoeltijden te bevorderen is het mogelijk om een ander materiaal dan staal te gebruiken voor de matrijshelft. Dit materiaal moet een hogere thermische geleidbaarheid k en een lagere warmtecapaciteit c_p hebben dan staal om de opwarm- en afkoeltijden te verminderen, en om de temperatuuruniformiteit te bevorderen (zie 3.4.4). Ook moet de hardheid van het materiaal aan de bovenzijde van de inzet ongeveer even hoog zijn als die van het staal. Om een goede materiaalkeuze te maken gebruiken we het programma CES Edupack 2013. In dit programma kunnen we 3905 verschillende materialen vergelijken met elkaar. De ingestelde waarden zijn zodanig bepaald dat het resultaat altijd een beter materiaal is dan het huidige.

De ingestelde waarden zijn als volgt:

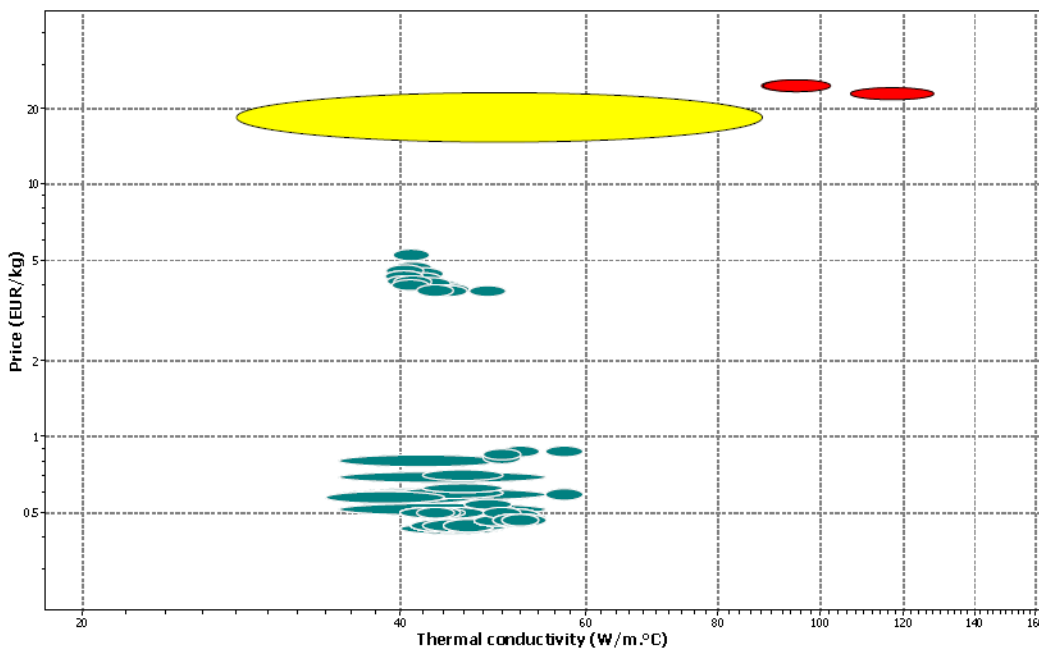
- warmtecapaciteit maximaal 468 J/(kg*K)
- thermische geleidbaarheid minimaal 40.6 W/(m*K)
- hardheid Rockwell C minstens 40
- prijs maximaal 26 €/kg

Wanneer deze waarden ingegeven worden in het programma blijven er nog 126 van de 3905 materialen over. Deze kunnen ingedeeld worden in 3 grote categorieën, zoals tabel 23 weergeeft.

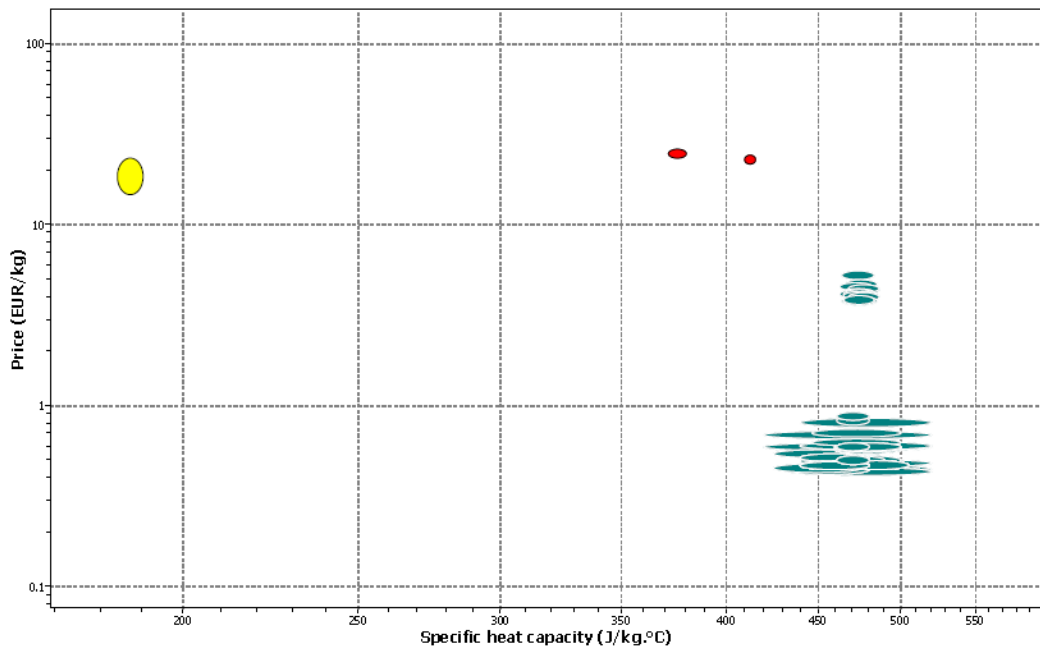
Materiaalsoort	Aantal
Staal	121
Koperlegering	4
Wolfram-carbide	1

Tabel 23: Geschikte materialen

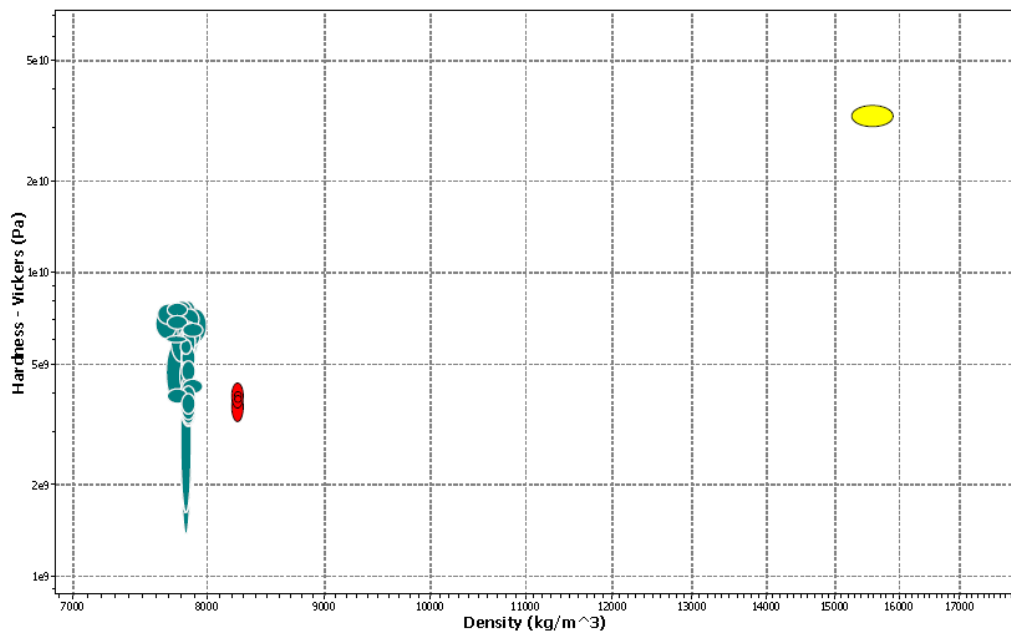
Zoals te zien is in figuur 68 en figuur 69 zijn al de staalsoorten gegroepeerd (groen), wat betekent dat er geen grote verschillen zijn in de warmtecapaciteit en thermische geleidbaarheid waardoor deze materialen al wegvallen. Omdat er gezocht wordt naar een materiaal met een hogere thermische geleidbaarheid en een lagere warmtecapaciteit is het logisch om te kiezen voor wolfram-carbide (geel). Maar figuur 70 laat zien dat de dichtheid van dit materiaal zo hoog is dat de thermische massa van de matrijs veel te groot zou worden. Daarom is het beter om te kiezen voor de koperlegeringen (rood).



Figuur 68: Ashby chart van prijs en thermische geleidbaarheid



Figuur 69: Ashby chart van prijs en specifieke warmtecapaciteit



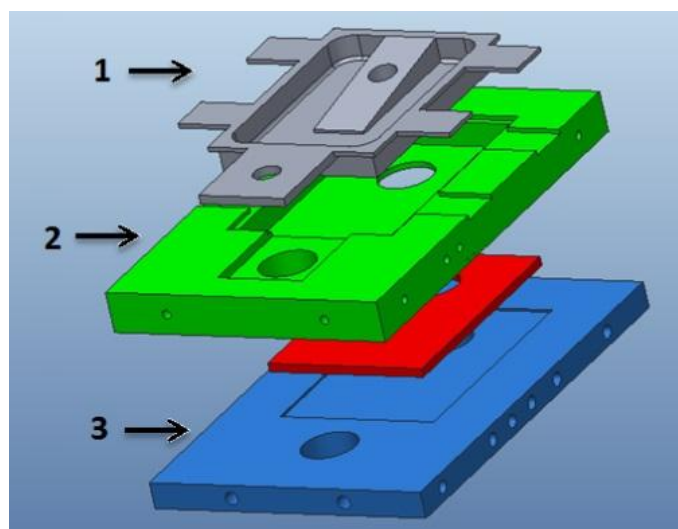
Figuur 70: Ashby chart van Vickers hardheid en dichtheid

AMPCOLOY is een koperlegering die voldoet aan de hierboven vermelde eisen (dit materiaal werd ook vermeld in 3.5.1). Bovendien is deze koperlegering geschikt voor het maken van matrijzen. Er werden simulaties uitgevoerd met staal en drie verschillende soorten van de AMPCOLOY legeringen, namelijk AMPCOLOY 83, 944 en 940 geordend volgens hun thermische geleidbaarheid. De fysische eigenschappen van deze materialen worden getoond in tabel 24.

	Staal	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 944	AMPCOLOY 940
Warmtecapaciteit [J/kgK]	460,5	420	380	380
Thermische geleidbaarheid [W/mK]	36,5	106	156	208
Rockwell hardheid C [HRC]	52-56	40	31	19
Dichtheid [kg/m ³]	7800	8260	8690	8710

Tabel 24: Materiaaleigenschappen

De tabel laat zien dat AMPCOLOY een lagere hardheid heeft dan staal. Om dit op te lossen kunnen we de inzet opsplitsen in drie delen in plaats van twee (zie figuur 71). Het bovenste kleine deel van de inzet, de eerste laag, moet een grote hardheid hebben. Daarom dat enkel staal en AMPCOLOY 83 mogelijk zijn voor deze eerste laag. Verder willen we maximaal twee verschillende materialen gebruiken om de inzet uit te vervaardigen, zodat de kostprijs niet te hoog opgedreven wordt. Bovendien wordt gesteld dat de onderste laag uit een koperlegering gemaakt moet worden om de koude van de koelkanalen in deze laag sneller naar boven te laten trekken tijdens het koelproces. Dit leidt tot 11 simulaties, zie tabel 25.



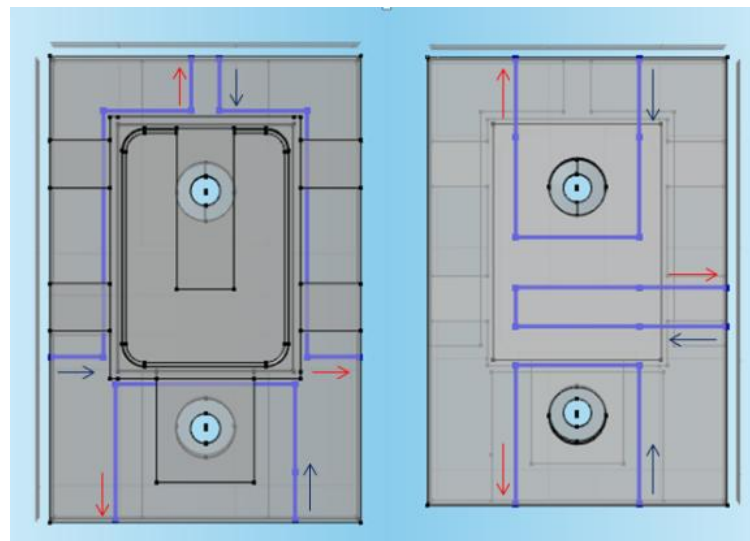
Figuur 71: Materiaalkeuze ontwerp

De simulaties kunnen onderverdeeld worden in twee groepen, namelijk de testen waarvan de eerste laag gemaakt is uit staal (groep A) of uit AMPCOLOY 83 (groep B). Verder kan elk van deze groepen onderverdeeld worden in een groep waarbij de bovenste inzet die volledig uit hetzelfde materiaal werd gemaakt (A.1 en B.1), en een groep waarbij de tweede en derde laag uit hetzelfde materiaal werden gemaakt (A.2 en B.2). Voor meer uitleg over deze materialen wordt verwezen naar bijlage C.

Groep	Testnr.	Bovenste deel van de inzet		Onderste deel van de inzet
		Eerste laag	Tweede laag	Derde laag
A.1	1	Staal	Staal	AMPCOLOY 83
A.1	2	Staal	Staal	AMPCOLOY 944
A.1	3	Staal	Staal	AMPCOLOY 940
A.2	4	Staal	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 83
A.2	5	Staal	AMPCOLOY 944	AMPCOLOY 944
A.2	6	Staal	AMPCOLOY 940	AMPCOLOY 940
B.1	7	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 83
B.1	8	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 944
B.1	9	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 940
B.2	10	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 944	AMPCOLOY 944
B.2	11	AMPCOLOY 83	AMPCOLOY 940	AMPCOLOY 940

Tabel 25: Materiaaltesten

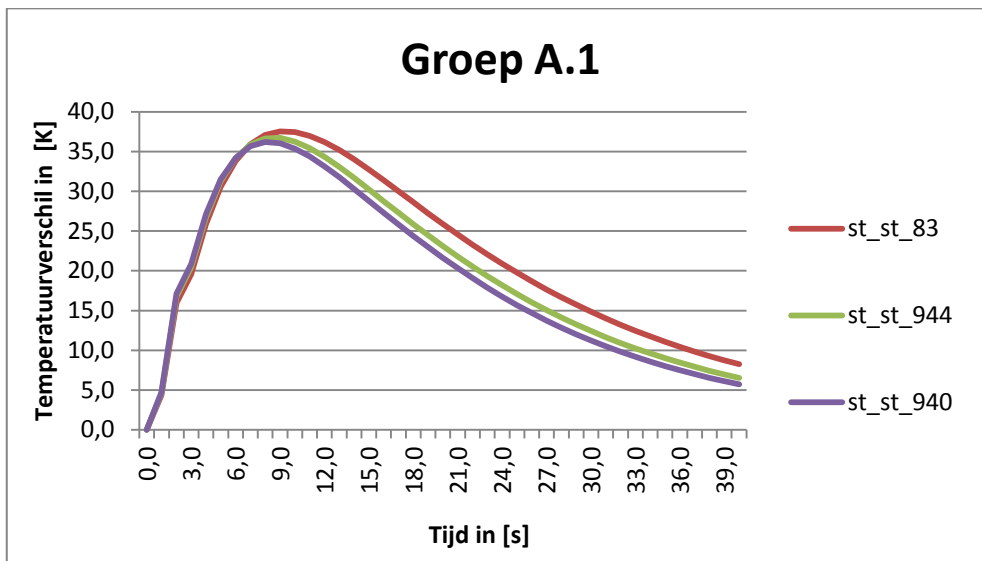
De materiaaltesten zullen enkel uitgevoerd worden op een koelproces, het water stroomt in elke simulatie volledig hetzelfde (zie figuur 72).



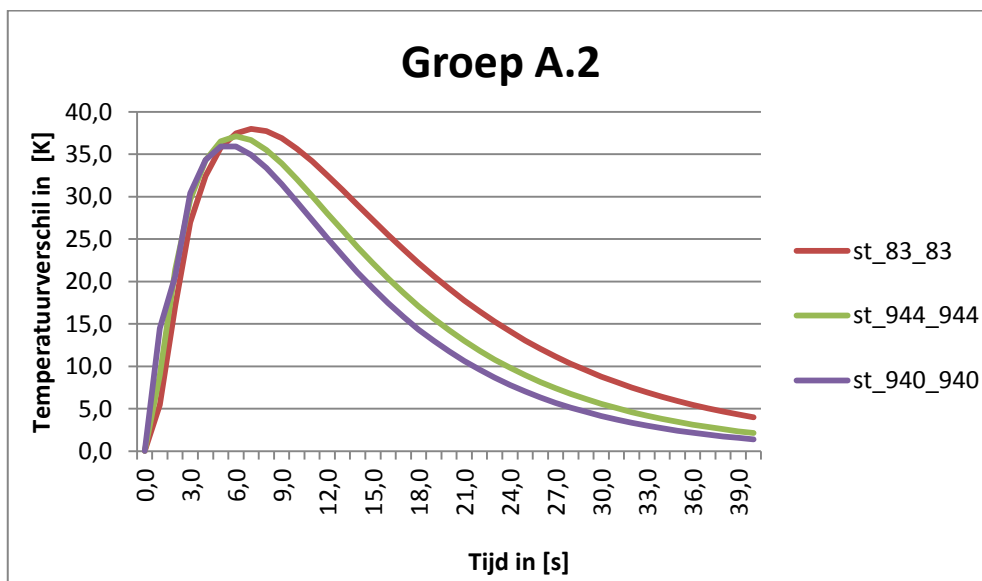
Figuur 72: Koelkanalen

4.4.2 Resultaten

Onderstaande twee grafieken (figuur 73 en figuur 74) tonen het temperatuurverschil overheen de inzet gedurende 40 seconden en vanaf de start van het koelproces.



Figuur 73: Temperatuurverschil vormholte

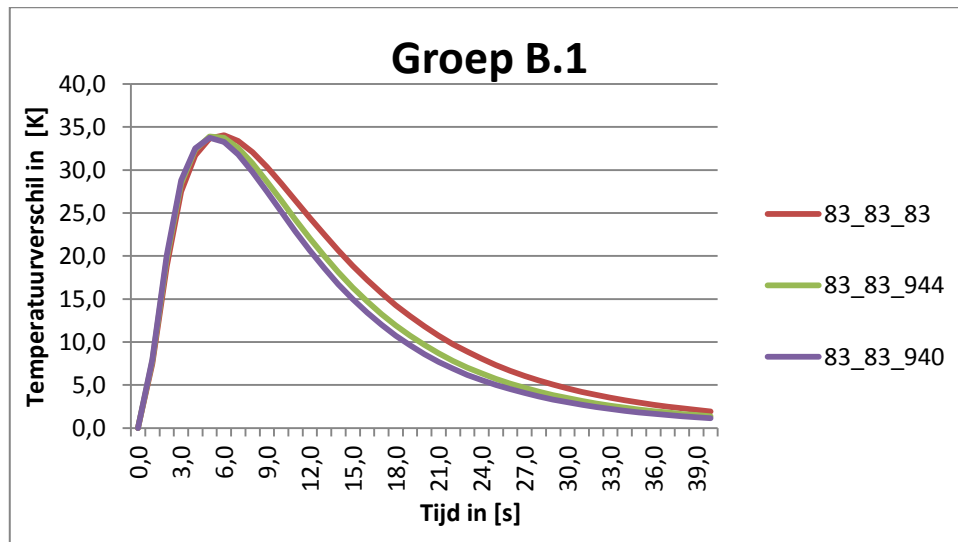


Figuur 74: Temperatuurverschil vormholte

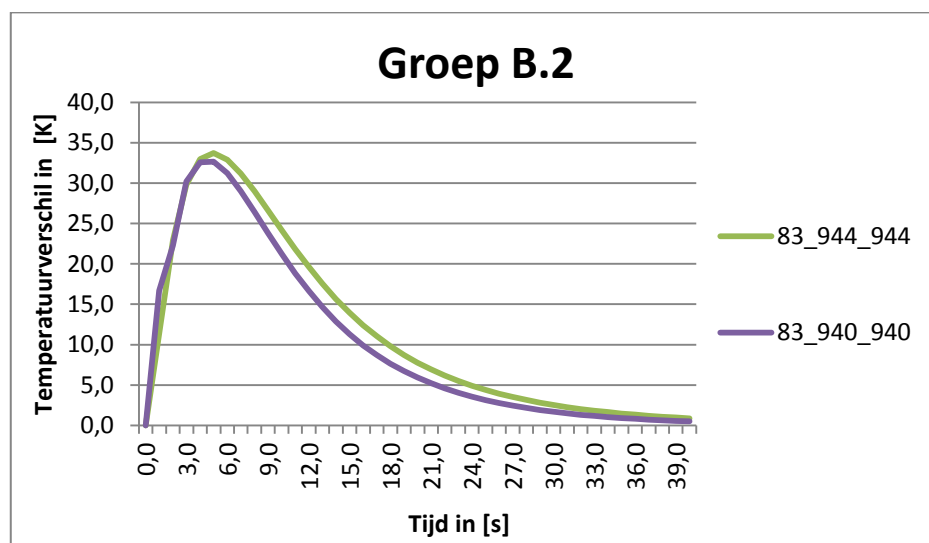
De grafieken tonen aan dat het koelproces sneller verloopt naarmate de warmtecapaciteit van het materiaal daalt. AMPCOLOY 940 en AMPCOLOY 944 hebben dezelfde warmtecapaciteit, maar doordat AMPCOLOY 940 een grotere dichtheid heeft zal zijn thermische massa groter zijn. Hieruit kan verwacht worden dat het koelproces bij AMPCOLOY 940 trager verloopt dan bij AMPCOLOY 944. De resultaten tonen ook aan dat de AMPCOLOY 940 zelfs net iets sneller afkoelt, hieruit kunnen we bevestigen dat de warmtegeleidbaarheid ook zijn invloed heeft op de afkoelsnelheid. Het beste resultaat van groep A.1 was dat van de test met AMPCOLOY 940, dit bleek eveneens zo te zijn bij de resultaten van de groep A.2. Bovendien bleken de koelprocessen van de tweede groep over het algemeen sneller te lopen dan bij de eerste groep. Bij de eerste groep had enkel de laag waarin de koelkanalen zich bevonden sterke thermische eigenschappen. Hierdoor kon de derde

laag snel afkoelen maar liet het staal van de eerste twee lagen slecht zijn warmte onttrekken. Bij de testen van de tweede groep echter bestonden de tweede en derde laag uit AMPCOLOY. Hierdoor kon sneller warmte van de tweede naar de derde laag doorgegeven worden.

Onderstaande grafieken tonen de resultaten van groep B (figuur 75 en figuur 76). Dit zijn de materiaaltesten waarbij AMPCOLOY 83 elke keer als eerste laag zit.

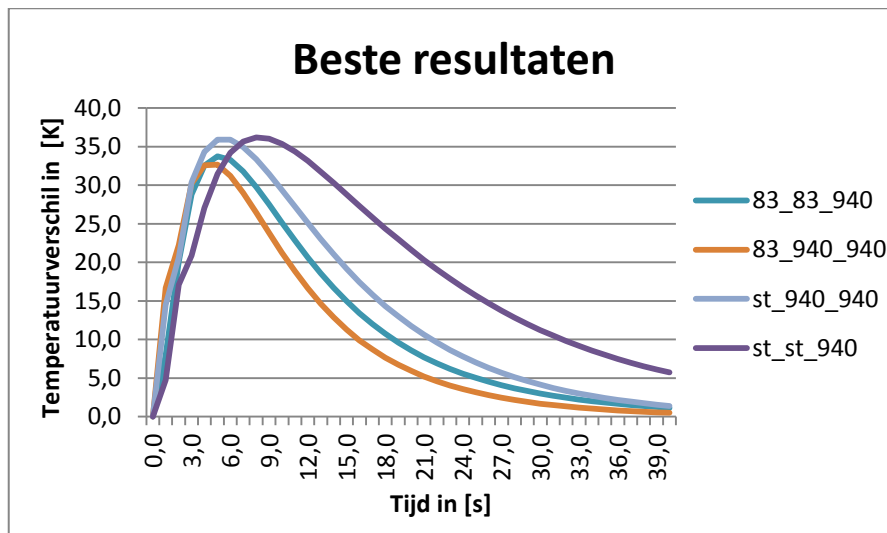


Figuur 75: Temperatuurverschil vormholte



Figuur 76: Temperatuurverschil vormholte

Deze resultaten zijn sterk gelijkend aan die van groep A. Het verschil zit echter in hoe snel de inzet afkoelt, op dat vlak scoort de tweede groep beter. Om even samen te vatten worden de beste resultaten van de groepen A.1, A.2, B.1 en B.2 samen voorgesteld in onderstaande grafiek (figuur 77).



Figuur 77: Temperatuurverschil vormholte

De resultaten wijzen meteen op de invloed van AMPCOLOY 83 als eerste laag. De pieken in de temperatuurverschillen liggen zo een 3K lager dan bij het staal als eerste laag. De grafiek toont aan dat de afkoelsnelheid van deze vier combinaties even groot is, dit is dus afhankelijk van het materiaal van de onderste laag. Uit deze resultaten kan besloten worden dat de combinatie AMPCOLOY 83 met 940 het meest aangewezen is om een hoge afkoelsnelheid en een beter temperatuuruniformiteit te hebben. Bovendien blijkt de combinatie AMPCOLOY 83-940-940 het beste te scoren dankzij de laagste temperatuurverschillen. Omdat uiteindelijk werd besloten om de inzet in twee in plaats van drie delen op te splitsen, werd gekozen voor het alternatief AMPCOLOY 83-940. Het onderste deel van de inzet in drie delen opsplitsen is beter voor het koelproces, maar om tijdens het ontwerpen laag 1 goed in laag 2 te doen passen, terwijl beide materialen uitzetten met een verschillende uitzettingscoëfficiënt, is praktisch niet zo eenvoudig.

4.5 Besluit

Er wordt dus gekozen voor:

- Verwarmingselement:** Eén verwarmingselement van 3000W, ook al is de temperatuuruniformiteit beter bij de opwarming met het 1500W element. Het 3000W element heeft ten eerste een snellere opwarming en er is de mogelijkheid om het vermogen naderhand nog te regelen met een elektrische sturing om de temperatuuruniformiteit te bevorderen. Bovendien blijken beide elementen evenveel te kosten omdat het toch om een op maat gemaakt verwarmingselement gaat.
- Koelkanalen:** Vier lussen koelkanalen in het bovenste deel en vijf in het onderste deel van de inzet zodat de rest van de inzet mee afgekoeld wordt, waardoor het koelproces vlotter kan verlopen.
- Materiaal:** Een tweedelige inzet waarvan het bovenste deel uit AMPCOLOY 83 en het onderste uit AMPCOLOY 940. De AMPCOLOY 83 om de sterkte te bewaren aan het bovenste deel van de inzet en de AMPCOLOY 940 om het koelproces sneller te laten verlopen.
- Isolatielaag:** Een isolatielaag aan de bodem van de inzet om het koelproces sneller te laten verlopen.

Het gehele ontwerp is terug te vinden in bijlage D en werd ook zo besteld.

5. Vergelijking tussen de simulatieresultaten van een variotherme en een hybride variotherme cyclus

In dit hoofdstuk worden de simulatieresultaten vergeleken van een inzet met elektrische verwarming enerzijds en een inzet met een combinatie van elektrische en waterverwarming anderzijds. Nadien worden ook de simulatieresultaten van de koelprocessen met elkaar vergeleken.

5.1 Hybride variotherm en variotherm spuitgieten

Er wordt dus een onderscheid gemaakt tussen twee soorten verwarmingsmethodes; elektrische verwarming enerzijds en een combinatie van elektrische verwarming en waterverwarming anderzijds. De eerste methode behoort tot de variotherme spuitgietsprocessen, de tweede tot de hybride variotherme spuitgietsprocessen aangezien twee verschillende technieken gecombineerd worden bij de verwarming van de inzet.

Er wordt hier nog een extra onderscheid gemaakt bij het hybride proces. Het eerste hybride proces zal enkel gebruik maken van de bovenste koelkanalen bij de opwarming in combinatie met het verwarmingselement, zie 4.2.4. Het tweede hybride proces gebruikt alle koelkanalen bij de opwarming in combinatie met het verwarmingselement. De reden dat dit gedaan wordt, is dat er bij de variotherme cyclus geen verwarmingselementen langs de wanden werden geplaatst en dat dit grote gevolgen kan hebben op de opwarmtijd van de variotherme cyclus.

Nadien zullen de drie processen met elkaar vergeleken worden op vlak van temperatuuruniformiteit en cyclustijd.

5.2 Methode en startcondities

Het verwarmingselement heeft een vermogen van 3000W. Wanneer tijdens de opwarming het element de temperatuur van 403K bereikt heeft, wordt deze temperatuur constant gehouden op 403K.

Als het water niet gebruikt wordt bij de opwarming wordt rekening gehouden met stilstaand water in de koelkanalen, en ook met de thermische eigenschappen van het water. Nadien bij de koeling, zal het debiet dan worden opgebouwd van 0 tot 6l/min met de temperatuur van het water op 333K.

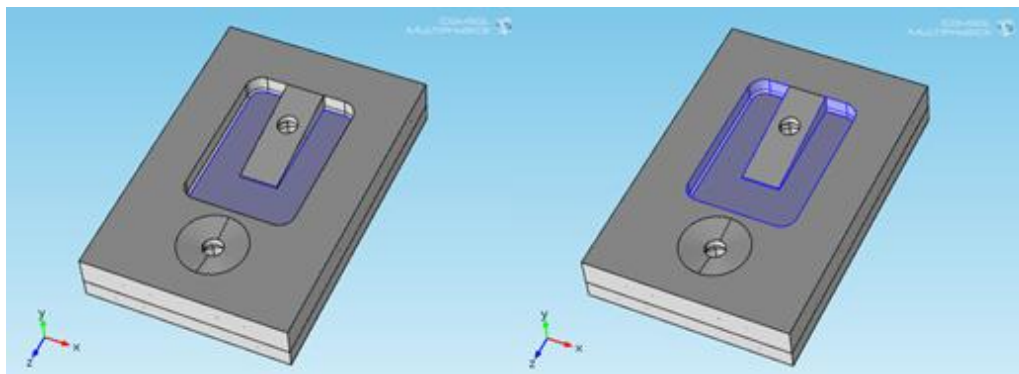
Als het water wel bij de opwarming gebruikt wordt, heeft het een temperatuur van 403K. Het debiet bouwt zich eveneens op van 0 tot 6l/min. Bij de afkoeling die hierop volgt, krijgt het water een temperatuur van 333K en een debiet dat start op 6l/min.

Verder wordt verondersteld dat de temperatuur van de inzet niet zakt onder de 333K. Bijkomend wordt er ook nog een isolatielaag gesimuleerd aan de onderkant van de inzet, dus onder de koelkanalen.

In elk van de volgende simulaties wordt voor zowel de opwarming als de afkoeling een stopconditie ingegeven. Dit betekent dat het deelproces, opwarming of afkoeling, gestopt mag worden wanneer de temperaturen van het keramisch verwarmingselement of van de vormholte voldoen aan een bepaalde voorwaarde.

In de simulaties wordt verder ook een onderscheid gemaakt tussen het bodemvlak van de vormholte en de gehele vormholte wanneer het temperatuurverloop van elk proces bekeken wordt. Dit werd zo gekozen omdat het verwarmingselement in eerste instantie de bodem opwarmt, en de koelkanalen voornamelijk de wanden rondom de bodem opwarmen.

Het onderscheid tussen bodem van de vormholte en de vormholte zelf, is als volgt; niet enkel de opstaande wanden rondom de vormholte, maar ook de opstaande wanden van het schuine vlak in het midden behoren tot het gebied dat aangeduid wordt met 'vormholte'. Onderstaande figuur maakt het verschil duidelijker; de blauwe oppervlakken in figuur 78a tonen wat bedoeld wordt met de bodem van de vormholte, en de blauwe vlakken in figuur 78b tonen wat bedoeld wordt met de vormholte.



Figuur 78: a) Bodem vormholte, b) Volledige vormholte

Tabel 26 toont de drie deelprocessen voor de variotherme cyclus samen met hun gebruikte methode en de stopconditie. Bij opwarming staat enkel het keramisch verwarmingselement van 3000W aangegeven, het is vanzelfsprekend dat voor de hybride methodes ook de werking van de koelkanalen bij hoort.

Deelproces	Methode	Stopconditie
Opwarming 1	Keramisch verwarmingselement 3000W	Maximum verwarmingselement = 403K
Opwarming 2	Keramisch verwarmingselement op 403K houden	Temperatuurverschil vormholte < 10K
Afkoeling	Koeling van 333K	Maximumtemperatuur vormholte = 343K

Tabel 26: Deelprocessen met methode en stopconditie

Bij de eerste opwarming wordt een stopconditie ingegeven die afhankelijk is van de maximumtemperatuur van het keramisch verwarmingselement. Wanneer het keramisch verwarmingselement de gevraagde temperatuur van 403K bereikt heeft, betekent dit niet dat de rest van de inzet ook al voldoende mee is opgewarmd. Eigenlijk biedt het vervullen van deze voorwaarde dus helemaal geen zekerheid over de temperatuuruniformiteit van de vormholte. Daarom dat er een tweede opwarming werd toegevoegd.

Bij deze tweede opwarming wordt het einde bepaald door een temperatuurverschil van minder dan 10K over de volledige vormholte terwijl het verwarmingselement continu een temperatuur heeft van 403K. Dit betekent dat de rest van de vormholte nu de kans krijgt om ook op temperatuur te komen. Dit had ook geïmplementeerd kunnen worden door, niet het temperatuurverschil als stopconditie in te geven, maar een minimumtemperatuur van $403K - 10K = 393K$ als stopconditie in te geven. In werkelijkheid zal dit nog anders gedaan worden, zie 6.2.

De tweede opwarming moet zekerheid bieden over de temperatuuruniformiteit die gezocht wordt. In het werkelijke proces wordt dan ingespoten, maar in deze simulaties wordt met deze passieve opwarming, ten gevolge van de inspuiting van de warme kunststof, geen rekening gehouden. De temperatuur van de kunststof zal immers rond de 403K liggen en het temperatuurverschil overheen de vormholte verkleinen. Na de twee opwarmingsperiodes zal er in de simulaties dus meteen afgekoeld zal worden.

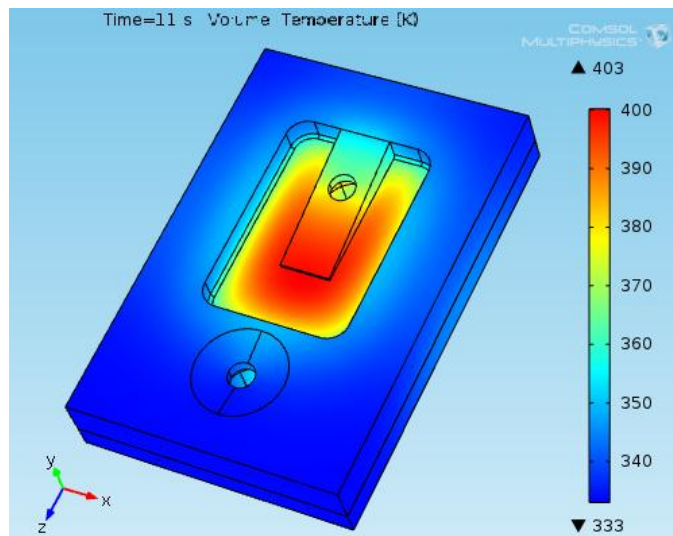
Het einde van de afkoeling is afhankelijk van de maximumtemperatuur van de vormholte, deze moet 343K zijn. Doordat het koelwater een temperatuur heeft van 333K zal het temperatuurverschil ook kleiner zijn dan 10K aan het einde van de afkoeling aangezien de temperatuur van de inzet niet zakt onder de 333K.

5.3 Simulatie en analyse van een variotherme cyclus, hybride variotherme cyclus – Bovenste koelkanalen en hybride variotherme cyclus

5.3.1 Variotherme opwarming en afkoeling

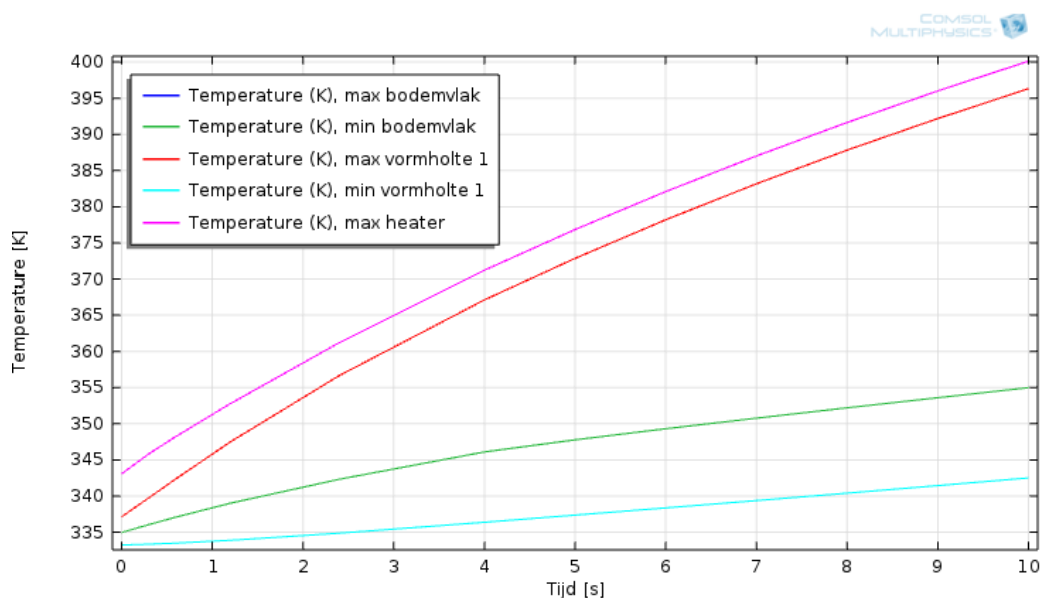
5.3.1.1 Eerste opwarming

Onderstaande afbeelding (figuur 79) toont het resultaat van de eerste opwarming van de variotherme cyclus. De parameters werden reeds genoteerd in hoofdstuk 5.2. De afbeelding laat zien dat de wanden niet voldoende opgewarmd zijn wanneer de bodem de gevraagde temperatuur van 403K bereikt heeft na 11 seconden.



Figuur 79: Simulatieresultaat in [K]- Einde eerste opwarming

De grafiek in figuur 80 toont de minimum- en maximumtemperatuur van het bodemvlak en de vormholte, samen met de maximumtemperatuur van het verwarmingselement.

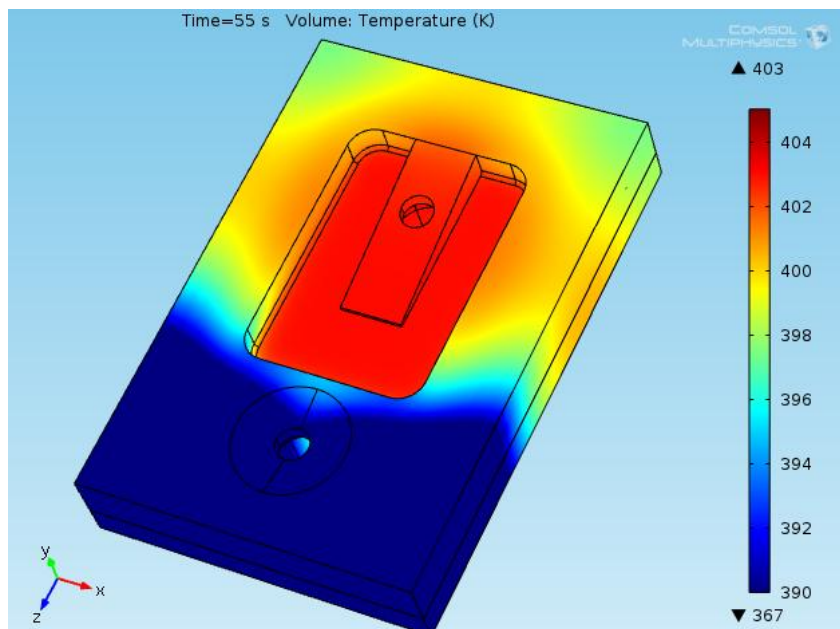


Figuur 80: Verloop eerste opwarming

De maximumtemperatuur van het bodemvlak en de vormholte zijn in elk punt van de opwarming even groot en volgen het temperatuursverloop van het verwarmingselement heel goed. Het temperatuurverschil tussen beide is constant en klein, kleiner dan 10K, gedurende de hele opwarming. Dit is te danken aan de materiaalkeuze van de inzet. De rest van de vormholte heeft echter meer moeite om zo snel op te warmen. De lichtblauwe curve die de minimumtemperatuur van de vormholte aangeeft, bereikt na 10 seconden nog maar 343K. Daarom dat bij de tweede opwarming de temperatuur van het verwarmingselement op 403K gehouden zal worden, zo kunnen de temperatuurverschillen overheen de vormholte verkleinen tot minder dan 10K.

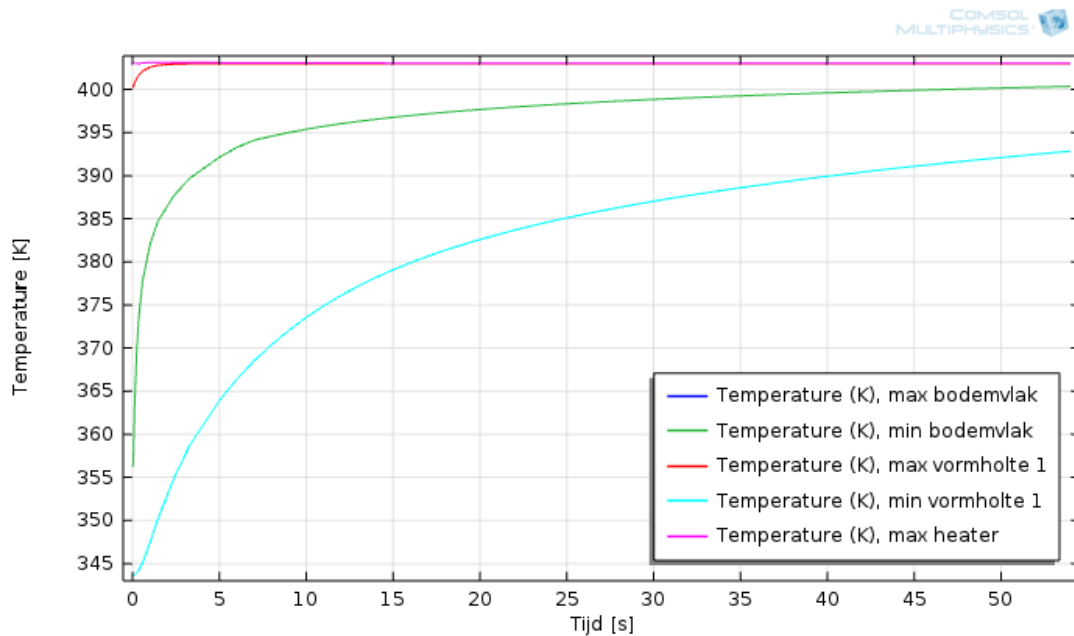
5.3.1.2 Tweede opwarming

Onderstaande afbeelding toont het resultaat van de tweede opwarming, het temperatuurverschil van de vormholte is hier kleiner dan 10K na 55 seconden.



Figuur 81: Simulatieresultaat in [K]- Einde tweede opwarming

De grafiek in figuur 82 toont de minimum- en maximumtemperaturen van vormholte en bodem, samen met de maximumtemperatuur van het verwarmingselement dat constant rond de 403K lag gedurende de tweede opwarming. Het duurde meer dan 50 seconden vooraleer het verwarmingselement het verschil tussen minimum- en maximumtemperatuur kleiner kon maken dan 10K. Gedurende deze hele verwarming vielen de maximumtemperaturen van vormholte, bodem en verwarmingselement samen.

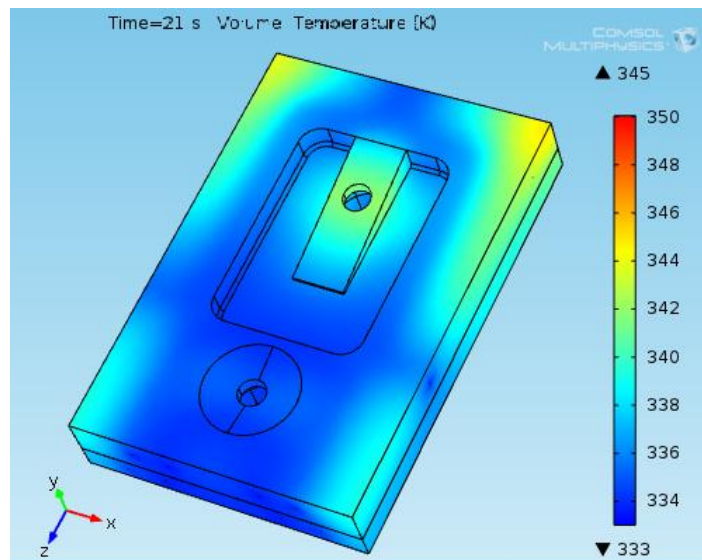


Figuur 82: Verloop tweede opwarming

Deze opwarming zou sneller kunnen verlopen door de temperatuur van het verwarmingselement op bijvoorbeeld 420K te brengen zodat de minimumtemperaturen sneller stijgen omdat het temperatuurverschil tussen beiden dan groter is. Er is immers een grotere warmteoverdracht mogelijk als de temperatuurverschillen groter zijn. Wanneer de minimumtemperatuur van de vormholte dan rond de 380K komt te liggen, zou de maximumtemperatuur van het verwarmingselement verlaagd kunnen worden naar 403K. Zo zullen beide curves aan het einde van de opwarming terug op een afstand van 10K van elkaar af liggen.

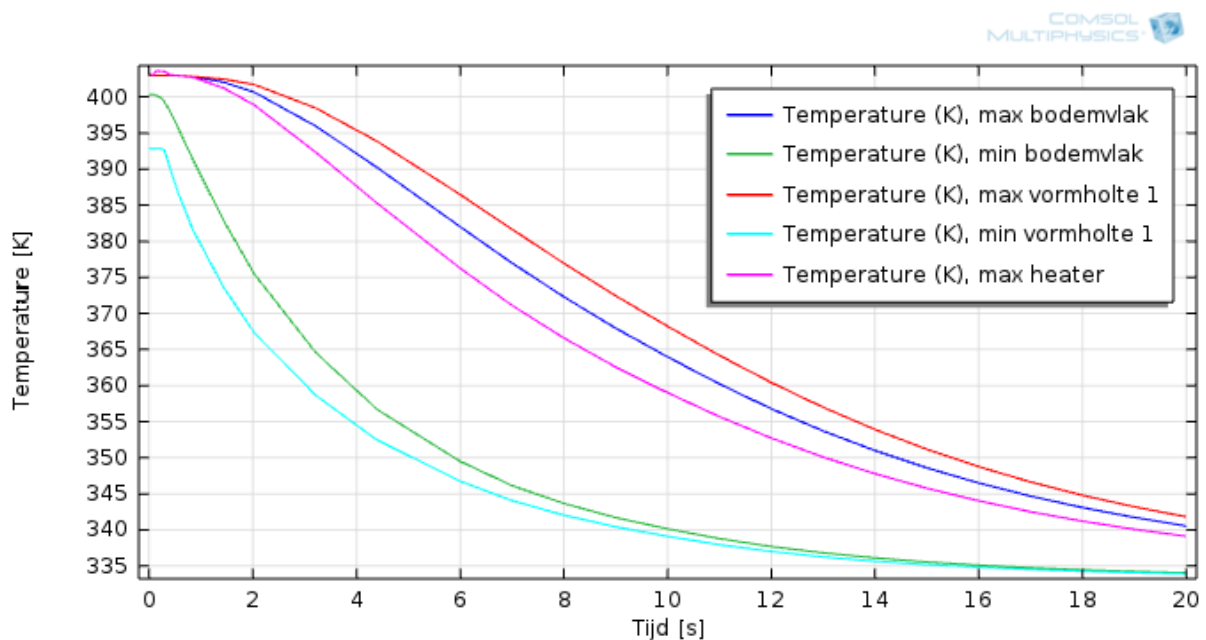
5.3.1.3 Afkoeling

In werkelijkheid zou na deze twee opwarmingsstappen de kunststof ingespoten worden, maar in deze simulaties wordt meteen terug afgekoeld. Onderstaande afbeelding (figuur 83) toont het resultaat van de afkoeling na 21 seconden. Het temperatuurverschil van de vormholte bedraagt nu minder dan 10K en zoals de afbeelding toont, ligt de maximumtemperatuur van de vormholte rondom de doorgang van de hotrunner. Gelukkig heeft de inzet van de achtermatrijs zelf ook koelkanalen, zie 4.1.3, deze zullen in werkelijkheid bijdragen aan de koeling van de gehele inzet en dus ook van dit gebied.



Figuur 83: Simulatieresultaat in [K]- Einde afkoeling

Figuur 84 toont het verloop van de afkoeling, hierbij werd geen rekening gehouden met de in werkelijkheid ingespoten kunststof in de inzet. De maximumtemperatuur van vormholte, bodem en verwarmingselement liggen na één seconde al niet meer op één lijn. Het verwarmingselement koelt het snelste af doordat deze het dichtst bij de onderste koelkanalen ligt. Daarop volgt de temperatuur van de bodem en dan pas de maximumtemperatuur van de vormholte. Dit betekent dat de opstaande wanden van het schuine vlak gedurende de afkoeling de hoogste temperatuur hebben, aangezien er koelkanalen liggen rondom de buitenste wanden van de vormholte. Maar zoals reeds gezegd werd zullen de koelkanalen van de achtermatrijs dit kunnen oplossen.

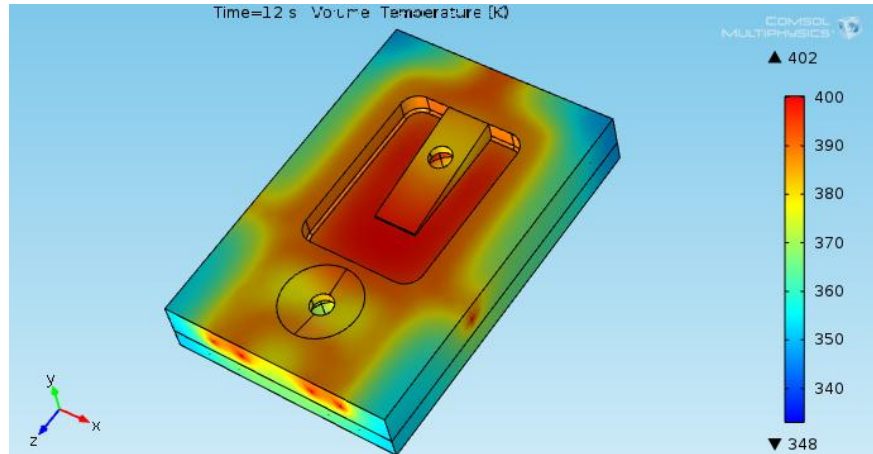


Figuur 84: Verloop afkoeling

5.3.2 Hybride variotherme opwarming en afkoeling – Bovenste koelkanalen

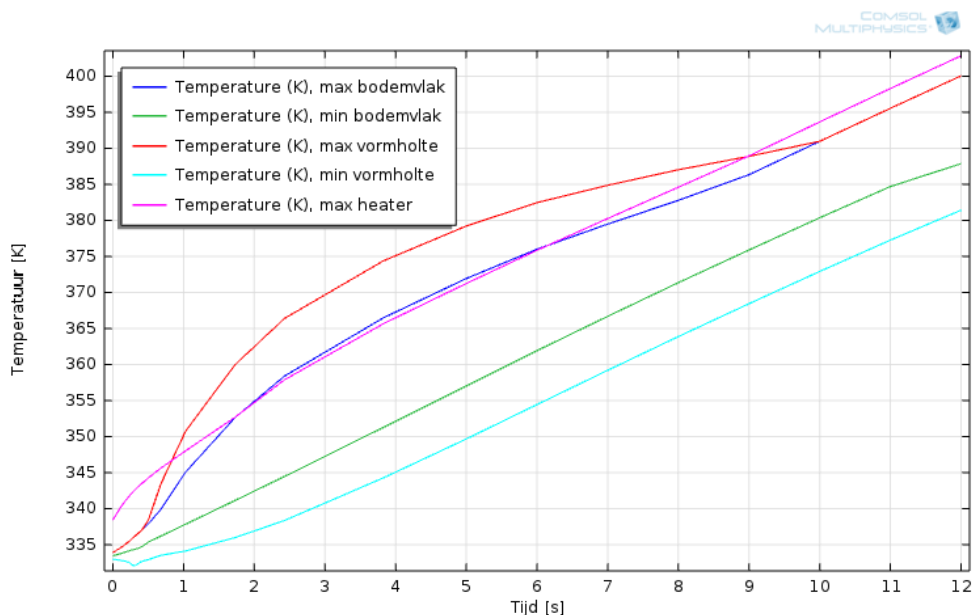
5.3.2.1 Eerste opwarming

Bij deze eerste hybride variotherme opwarming worden zowel het verwarmingselement als de koelkanalen van het bovenste deel van de inzet ingeschakeld. Omdat deze koelkanalen rondom de vormholte liggen zullen nu de matrijswanden beter mee verwarmd worden. Figuur 85 toont het resultaat van de eerste opwarming na 12 seconden, wanneer de bodem van de vormholte een temperatuur van 403K bereikt heeft.



Figuur 85: Simulatieresultaat in [K]- Einde eerste opwarming

Onderstaande grafiek, figuur 86, toont het verloop van de eerste opwarming van het hybride proces (Bovenste koelkanalen). Op een bepaald moment stijgt de maximumtemperatuur van de vormholte boven die van het verwarmingselement. Dit komt doordat het water al aan het begin van de opwarming een temperatuur heeft van 403K terwijl het verwarmingselement nog aan het opwarmen is. Hetzelfde geldt voor de maximumtemperatuur van de bodem, deze stijgt ook even boven die van het verwarmingselement. Dit betekent dat de koelkanalen aan de wanden van de vormholte, niet alleen de wanden maar ook de bodem van de inzet aan het opwarmen zijn.

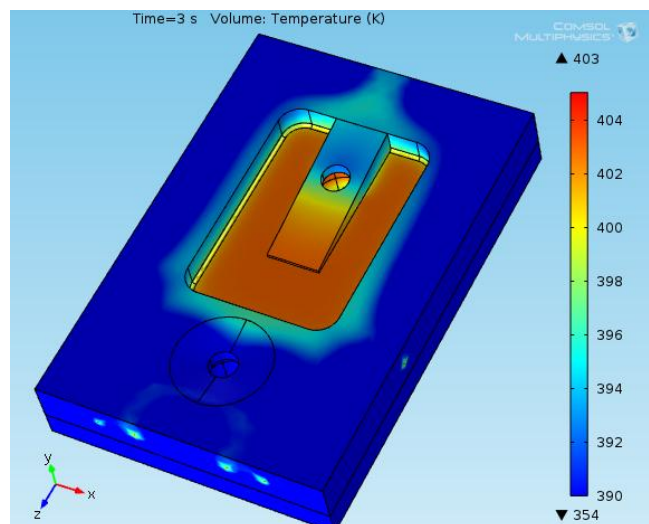


Figuur 86: Verloop eerste opwarming

Verder valt een duidelijk verschil op te merken tussen de eerste opwarming van het variotherme proces en de eerste opwarming van het hybride proces –bovenste koelkanalen. Bovenstaande grafiek toont duidelijk aan dat de minimumtemperatuur van de vormholte nu veel beter stijgt. De lichtblauwe lijn die de minimumtemperatuur van de vormholte aangeeft loopt nu praktisch parallel met de rode lijn die de maximumtemperatuur van de vormholte aangeeft, terwijl de minimumtemperatuur bij de eerste variotherme opwarming amper steeg. Hieruit blijkt ook dat het temperatuurverschil aan het einde van deze eerste opwarming veel kleiner is dan bij de variotherme opwarming. Uit de grafieken kan afgeleid worden dat het temperatuurverschil voorheen ongeveer 50K bedroeg en nu nog 20K bedraagt. Deze sterke verbetering is te danken aan de opwarming van de bovenste koelkanalen in dit hybride proces.

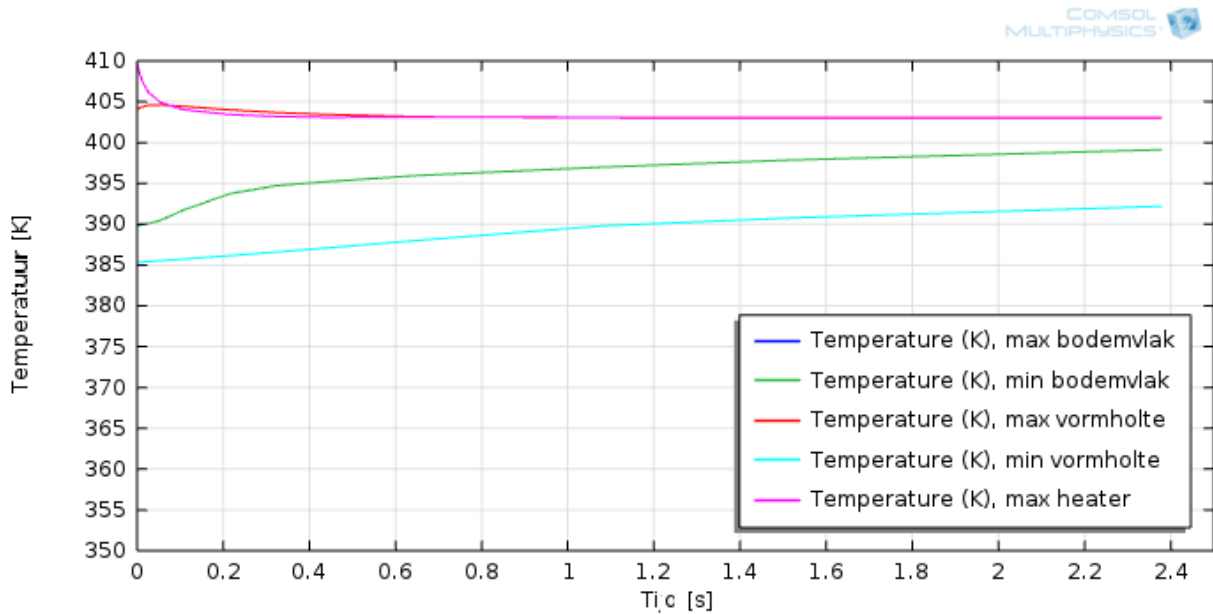
5.3.2.2 Tweede opwarming

De tweede opwarming van de hybride cyclus eindigt al binnen de drie seconden. De temperatuur van het verwarmingselement moest dus amper drie seconden op 403K gehouden om de aanwezige temperatuurverschillen weg te werken. Dit is een immens verschil met de tweede opwarming van het variotherme proces, daar duurde het welgeteld 55 seconden. Dit grote verschil is logischerwijs te danken aan de warmte van de koelkanalen rondom de vormholte.



Figuur 87: Simulatieresultaat in [K]- Einde tweede opwarming

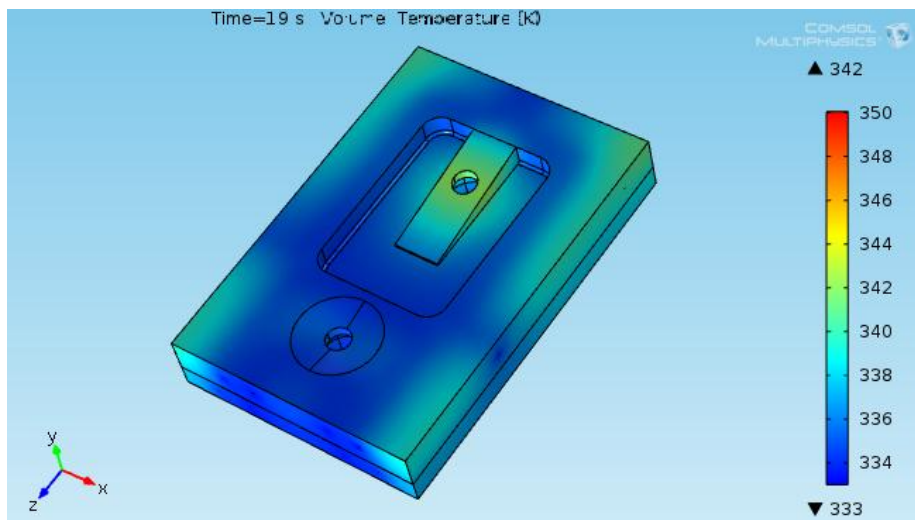
Voor de volledigheid toont onderstaande grafiek, zie figuur 88, het verloop van deze tweede opwarming. In deze twee seconden stijgt de minimumtemperatuur van de vormholte van ongeveer 385K, naar de gevraagde 393K.



Figuur 88: Verloop tweede opwarming

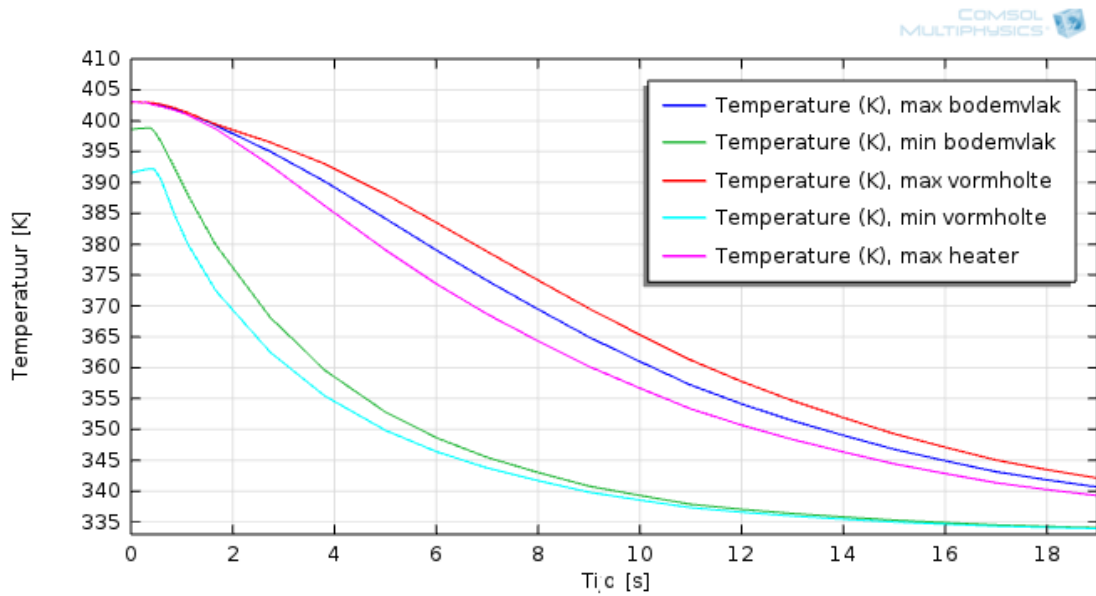
5.3.2.3 Afkoeling

Opnieuw is het eindpunt van de opwarming het beginpunt van de afkoeling. Onderstaande afbeelding (figuur 89) toont het resultaat van de afkoeling op 19 seconden.



Figuur 89: Simulatieresultaat in [K]- Einde afkoeling

Net zoals bij de variotherme opwarming blijkt het middelste schuine deel, rondom de doorgang van de hotrunner, het slechtste af te koelen. Onderstaande grafiek toont het verloop van de afkoeling aan, deze is bijna compleet hetzelfde als die van de variotherme afkoeling. Er wordt immers van hetzelfde systeem gebruik gemaakt om het geheel af te koelen, enkel het startpunt van de afkoeling is verschillend. De verschillen zijn minimaal, toch valt er op te merken dat het begin van de afkoeling sneller verloopt bij deze afkoeling dan bij de hybride. Dit komt doordat bij de hybride opwarming een kleiner gedeelte van de inzet verwarmd moest worden om een temperatuurverschil van minder dan 10K na de tweede opwarming te bereiken. Dit blijkt ook uit de verschillen tussen figuur 81 en figuur 87.

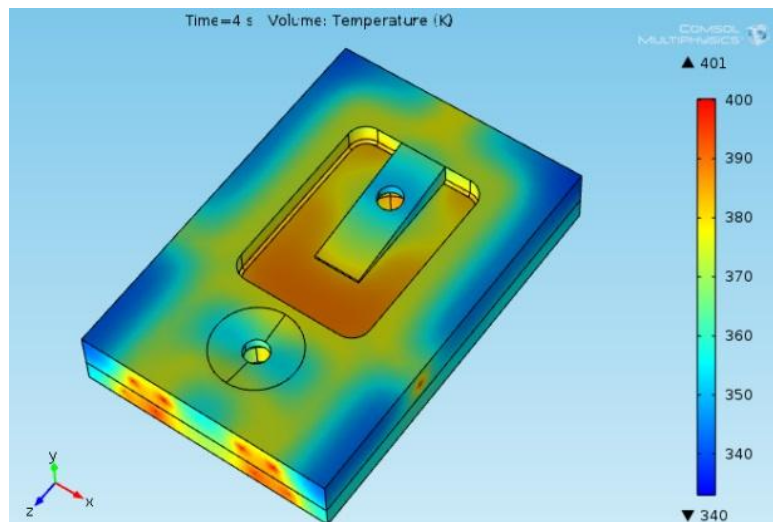


Figuur 90: Verloop afkoeling

5.3.3 Hybride variotherm

5.3.3.1 Eerste opwarming

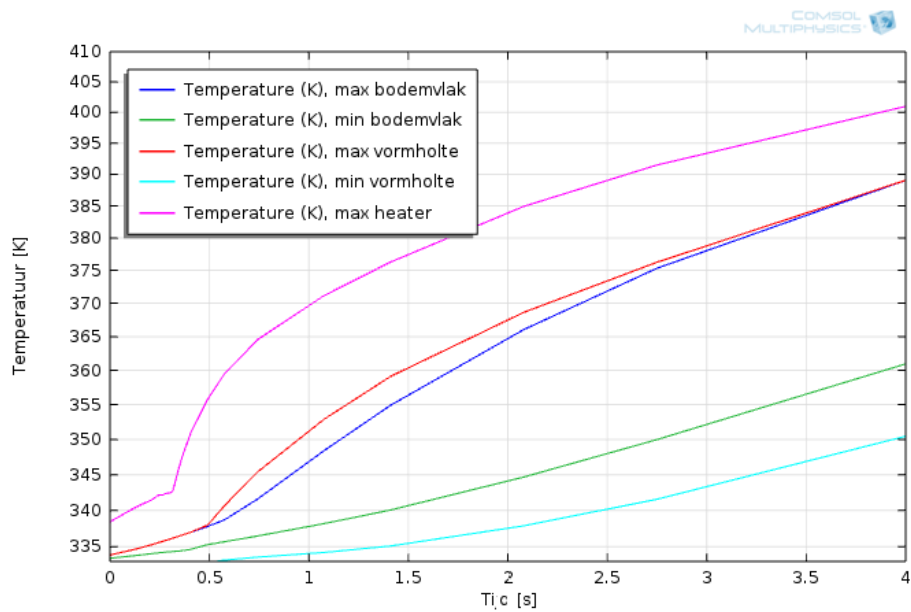
Bij deze versie van de hybride variotherme opwarming worden alle koelkanalen gebruikt voor de opwarming in combinatie met het keramisch verwarmingselement. Figuur 91 toont het einde van de eerste opwarming van het hybride proces na 4 seconden.



Figuur 91: Simulatieresultaat in [K]- Einde eerste opwarming

Het is logisch dat het verwarmingselement nu veel sneller de maximumtemperatuur van 403K bereiken, doordat deze zelf ook mee opgewarmd wordt door de koelkanalen. Dat dit gebeurde is duidelijk aan de knik in de curve van de maximumtemperatuur van het element, deze knik ligt op ongeveer 0,3 seconden. Vanaf daar kent deze curve niet meer zijn normale verloop, zoals bij de variotherme opwarming. Ook hier valt diezelfde knik op in de curves van de maximumtemperatuur van het bodemvlak en van de vormholte. Ook hier komt dit door de opwarming van de koelkanalen

die al een temperatuur van 403K hebben aan het begin van de opwarming. De maximumtemperatuur van de vormholte is gedurende het merendeel van de opwarming groter dan die van de bodem van de vormholte. Dit komt doordat de koelkanalen sneller de wanden van de vormholte opwarmen dan dat het verwarmingselement de bodem kan opwarmen.

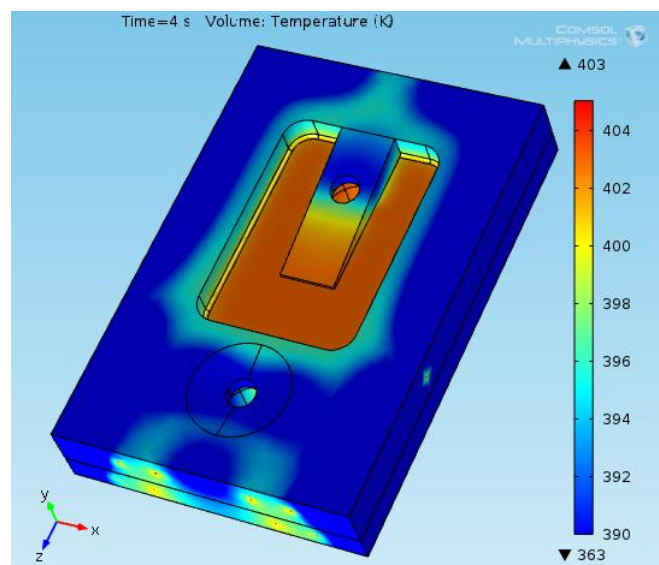


Figuur 92: Verloop eerste opwarming

De curves tonen ook duidelijk aan dat het temperatuurverschil overheen de vormholte nog bijzonder groot is aan het einde van deze eerste opwarming.

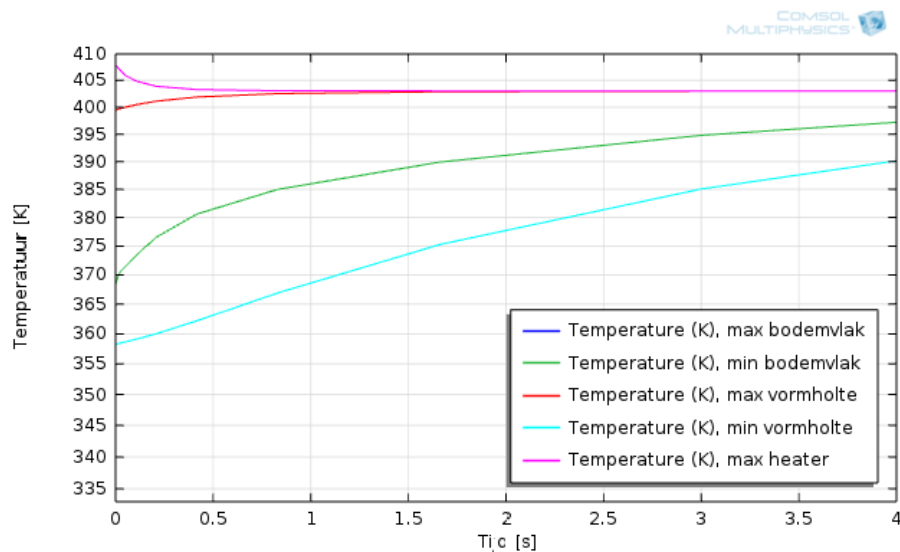
5.3.3.2 Tweede opwarming

Vanwege het nog aanwezige temperatuurverschil aan de vormholte zal ook hier nood zijn aan een tweede opwarming, figuur 93 toont hier het resultaat van.



Figuur 93: Simulatieresultaat in [K]- Einde tweede opwarming

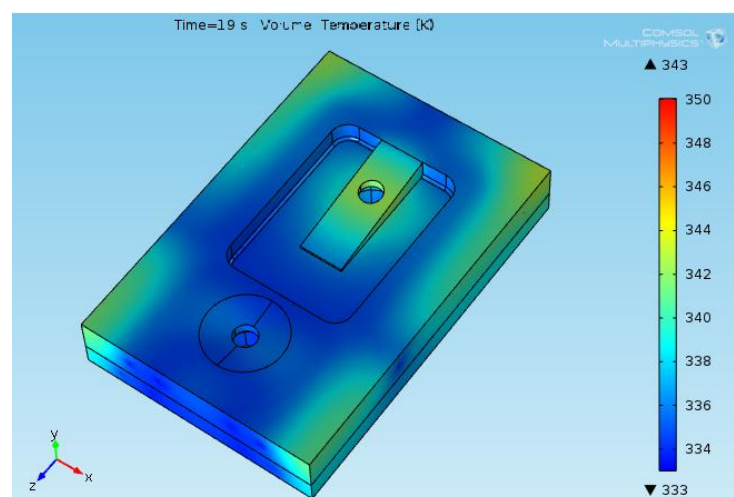
Deze tweede opwarming nam slechts vier seconden in beslag, dit is dankzij de combinatie van het verwarmingselement en de koelkanalen. Voor de volledigheid wordt ook hier het verloop getoond van de tweede opwarming. Het temperatuurverschil dat aan het begin van deze opwarming op ongeveer 40K lag is na ongeveer vier seconden verkleind tot 10K.



Figuur 94: Verloop tweede opwarming

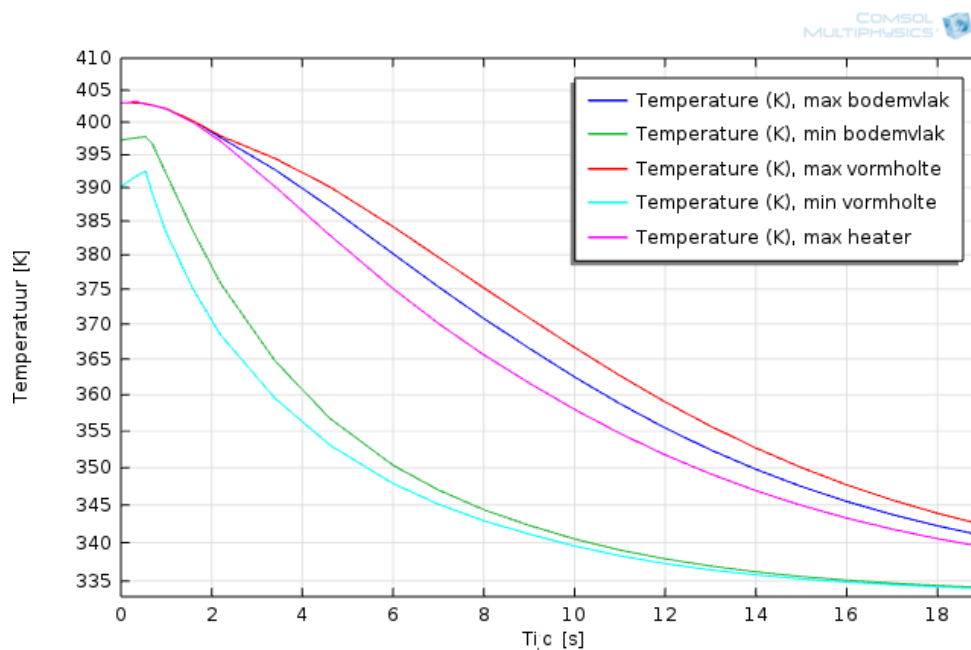
5.3.3.3 Afkoeling

Het einde van de opwarming is de input voor het koelproces in de simulaties. Het einde van het koelproces van de hybride opwarming vindt plaats na 19 seconden. Figuur 95 toont het resultaat van de koeling. Net zoals bij de opwarming in het variotherme en het hybride variotherme proces (bovenste koelkanalen), is ook hier het middelste gedeelte het slechtst afgekoeld. In werkelijkheid zal daar de koeling van de achtermatrijs inspringen.



Figuur 95: Simulatieresultaat in [K]- Einde afkoeling

Voor een laatste maal wordt het verloop van de afkoeling getoond, en ditmaal voor het verloop van de hybride afkoeling. Het verloop van de afkoeling van het hybride proces (bovenste koelkanalen) en deze afkoeling is praktisch compleet hetzelfde.



Figuur 96: Einde afkoeling

5.4 Vergelijking van de drie processen

Om even samen te vatten worden in onderstaande tabel de tijdspannes die nodig waren voor elk van de deelprocessen opgesomd.

	Variotherm	Hybride variotherm <i>Bovenste koelkanalen</i>	Hybride variotherm
Tijd 1^e opwarming [s]	11	12	4
Tijd 2^e opwarming [s]	55	3	4
Tijd afkoeling [s]	21	19	19
Totaal [s]	87	34	27

Tabel 27: Overzicht

Er was welgeteld 87 seconden nodig om het hele variotherme proces af te ronden. Het opwarmen van het verwarmingselement nam slechts 11 seconden in beslag. Deze 87 seconden waren nodig omdat de tweede opwarming bijzonder veel tijd nodig had, het duurde 55 seconden om de aanwezige temperatuurverschillen weg te werken. Deze temperatuurverschillen waren een gevolg van een gebrek aan opwarming aan de wanden van de vormholte. Het gevolg van deze lange opwarming was een afkoeling van 21 seconden. Er werd immers een groot deel van de rest van de inzet mee opgewarmd om te kunnen zorgen voor een uniforme temperatuurverdeling. De tweede lange opwarming kan eventueel in een ander ontwerp opgelost worden door ook daar lange smalle verwarmingselementen te plaatsen.

Het hybride variotherm proces (bovenste koelkanalen) nam in totaal 34 seconden in beslag. De opwarming bleek 12 seconden te duren. Dit is vreemd aangezien voor zowel het variotherm als het hybride variotherm proces het verwarmingselement gebruikt wordt. Deze afwijking is waarschijnlijk te wijten aan een klein verschil tussen beide simulatiemodellen. De tweede hybride

variotherme opwarming nam 3 seconden in beslag, wat betekent dat na de eerste opwarming de vormholte al behoorlijk uniform opgewarmd was. De afkoeling nam in vergelijking met het variotherm proces geen 21 maar 19 seconden tijd in. Doordat bij de variotherme opwarming een groter gedeelte van de inzet moest opgewarmd worden om het temperatuurverschil overheen de vormholte te verkleinen tot 10K duurde die afkoeling ook langer.

Als laatste het hybride variotherme proces waarbij tijdens de opwarming gebruik werd gemaakt van alle koelkanalen. De eerste opwarming duurde maar 4 seconden dankzij de starttemperatuur van de onderste koelkanalen die op 403K lag, deze verwarmden het verwarmingselement zelf heel snel op. Omdat de temperatuurverschillen ook aan het einde van deze opwarming behoorlijk klein waren, maar niet zo klein als die van het eerste hybride proces (bovenste koelkanalen), duurde deze opwarming slechts 4 seconden. En evenals de afkoeling van het eerste hybride proces, duurde ook hier de afkoeling welgeteld 19 seconden.

Dit geeft als eindstand dat het laatste hybride proces het minst lang duurde, en nog geen één derde van de tijd in beslag nam van de tijd die nodig was om het variotherme proces af te ronden. Dit is ten eerste een gevolg van de slechte opwarming aan de randen van de vormholte bij het variotherm proces, en ten tweede dankzij de extra opwarming met behulp van de onderste koelkanalen. Deze verklaren immers het verschil tussen de opwarmingstijd van het hybride proces – bovenste koelkanalen en het hybride proces.

6. Sturing

6.1 Componenten

De sturing wordt gedaan met een PLC-unit van Siemens. Deze unit bestaat uit de volgende componenten:

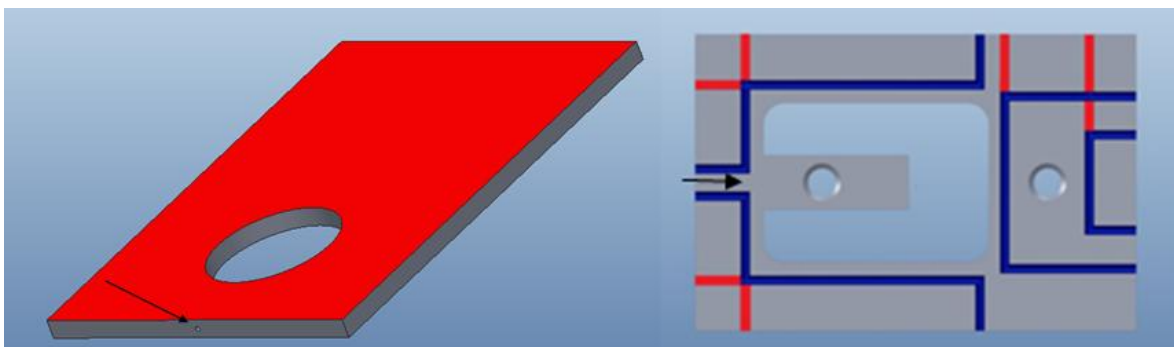
- 4 inch scherm
- power supply unit: voeding van de PLC
- CPU (Central Processing Unit): Centrale processor van de PLC
- digitale ingang- en uitgangskaat
- analoge ingang- en uitgangskaat
- thyristor
- thermokoppel module

6.2 Sturing van het verwarmingselement

Om het verwarmingselement aan te sturen zijn er drie componenten noodzakelijk: de thyristor met de analoge in- en uitgangskaat en de thermokoppel module.

6.2.1 Thermokoppel module

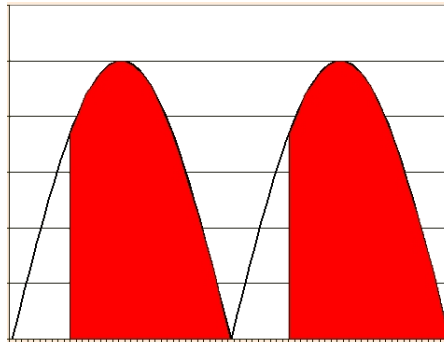
De thermokoppel module (zie bijlage E) wordt gebruikt om de temperatuursensoren van het element en de matrijs te kunnen inlezen. Op basis van deze signalen kunnen dan zowel de thyristor als de koelunits aangestuurd worden. Er zijn twee sensoren nodig om het element aan te sturen; één sensor in het element om de opwarmingstemperatuur te meten, en één sensor in de matrijs, zo dicht mogelijk bij het oppervlak van de vormholte om zeker te zijn dat de hele vormholte dezelfde temperatuur heeft. Figuur 97 toont de plaatsing van de sensoren.



Figuur 97: Plaatsing sensor: a) In verwarmingselement, b) In inzet

6.2.2 Thyristorschakeling

De thyristor (zie bijlage F) wordt gebruikt om rechtstreeks het vermogen van het verwarmingselement te regelen. Dit wordt verwezenlijkt door middel van faseaansnijding, zie figuur 98. De thyristor schakelt op een bepaald moment uit zodat een deel van de spanningsfase niet wordt doorgevoerd naar het verwarmingselement. Het verwarmingselement krijgt dus continu wel en geen spanning, en de verhouding hiertussen bepaalt dan ook hoeveel vermogen het element krijgt. De regeling van de thyristor wordt gedaan door de analoge in- en uitgangskaart (zie bijlage G). Deze uitgang functioneert als een potmeter.



Figuur 98: Faseaansnijding [31]

Via de faseaansnijding kan dus door het vermogen te regelen, het element op een constante temperatuur gehouden worden, om zodanig met een constante temperatuur te verwarmen.

Om het element aan te sturen, wordt met een volledig vermogen verwarmd tot de gevraagde maximumtemperatuur bereikt is, dit komt overeen met de eerste opwarming in de simulaties van hoofdstuk 5. Daarna wordt de faseaansnijding gebruikt om het element op deze temperatuur te houden, wat overeenkomt met de tweede opwarming in de simulaties van hoofdstuk.

Zoals in 6.2.1 vermeld werd, worden maar twee sensoren gebruikt om de temperatuurregeling te verzorgen. Eén in het verwarmingselement; deze zal gecontroleerd worden om na te gaan of de gevraagde temperatuur reeds bereikt is en gehouden wordt tijdens de opwarming. En één in de vormholte om na te gaan wat de temperatuur daar is.

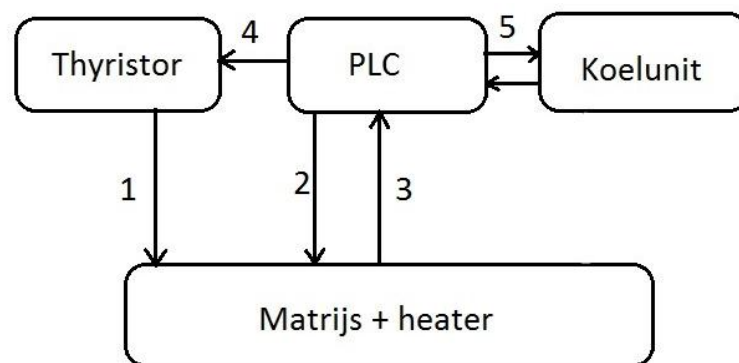
Omdat er geen tweede temperatuursensor in de vormholte werd geplaatst om een temperatuurverschil te kunnen meten, zal de sturing geregeld worden afhankelijk van de temperatuur die deze sensor aangeeft. Dit wordt als volgt gedaan: vooraleer de spuitgietmachine dienst doet, wordt deze een aantal maal in werking gesteld zonder kunststof in te spuiten. De opwarming van de inzet zal op een aantal tijdstippen worden stilgezet, bijvoorbeeld om de seconde. Op elk van deze tijdstippen zal een beeld worden genomen van de vormholte met een thermografische camera, elk van deze beelden kan gekoppeld worden aan de waarde die de temperatuursensor op dat ogenblik aangaf. Aan de hand van de beelden van de thermografische camera is dan op elk van deze tijdstippen in de opwarming het temperatuurverschil overheen de vormholte gekend. Op deze manier zal aan de hand van de waarde die de temperatuursensor aangeeft, ook het bijhorende temperatuurverschil overheen de vormholte gekend zijn. Zo kan dan de opwarming op een bepaald punt stopgezet worden wanneer dit temperatuurverschil klein genoeg is geworden, bijvoorbeeld minder dan 10K.

6.3 PLC-Sturing

6.3.1 Signalen

De volledige sturing staat afgebeeld in figuur 99. De sturing bestaat uit 4 hoofdgroepen: De thyristor, de PLC-unit, de koelunit, en de matrijs met de heater. De getallen slaan op de signalen tussen deze groepen en zijn als volgt:

1. De faseafsnijding
2. De signalen voor de cyclus van de matrijs te kunnen uitvoeren
3. De signalen van de sensors en de matrijs voor terugkoppeling naar het programma
4. Het aanstuursignaal van de thyristor
5. Signalen om te koelprogramma te beginnen en terugkoppeling van de temperaturen



Figuur 99: Communicatie

6.3.2 Programma

De matrijscyclus bestaat uit een aantal stappen die deels overgenomen moeten worden door de PLC. De normale cyclus is dan ook als volgt:

- sluiten van de matrijs
- opwarmen van de inzet
- spuiten van de kunststof
- koelen van de inzet
- uitstoten van het product

Het spreekt dus voor zich dat het opwarmen en het koelen doorgeschakeld worden naar de PLC. Het PLC programma is terug te vinden in bijlage H en bestaat uit 6 netwerken.

Netwerk 1: Verwarmingsvoorwaarde 1

Wanneer de temperatuur van het verwarmingselement kleiner is dan de vooraf ingestelde opwarmingstemperatuur mag er verwarmd worden. Dit is echter nog niet het signaal dat verstuurd wordt naar de thyristor.

Netwerk 2: Verwarmingsvoorwaarde 2

Dit is hetzelfde als bij netwerk 1, alleen wordt er gekeken of de temperatuur van het de matrijs groter is dan de vooraf ingestelde temperatuur.

Netwerk 3: Startsignaal opwarming

Zolang er nog geen kunststofinspuiting geweest is - dit signaal reset bij elke cyclus - en aan de verwarmingsvoorwaarden zijn voldaan (netwerk 1 & 2), dan begint de opwarming. Zodra de temperatuur bereikt is, stopt de thyristor met schakelen. Als de temperatuur dan zakt onder de vooraf ingestelde waarde, begint deze opnieuw te schakelen tot de matrijs de kunststof heeft ingespoten.

Netwerk 4: Kunststof inspuiten (stopsignaal opwarming)

Als de matrijs gesloten is en de temperatuur van de inzet bereikt is, mag de kunststof ingespoten worden. Netwerk 1 tot 3 kunnen immers gebeuren terwijl de uitstoting en de sluiting van de matrijs nog bezig zijn. Er mag immers alleen ingespoten worden als er nog geen inspuiting gebeurd is.

Netwerk 5: Startsignaal koelen

Als de inspuiting gebeurd is en de matrijstemperatuur groter is dan de vooraf ingestelde koeltemperatuur, mag de matrijs beginnen met koelen. De PLC stuurt dan een signaal naar de koelunit.

Netwerk 6: Openen matrijs, uitstoten product (stopsignaal koelen)

Ook hier wordt er eerst gekeken of de inspuiting is gebeurd, waarna gecontroleerd wordt of de matrijs de vooraf ingestelde koeltemperatuur bereikt heeft. Indien dit klopt mag de matrijs open gaan en het product uitstoten. Na het doorlopen van dit netwerk worden alle signalen gereset en kan een nieuwe cyclus van start gaan.

6.3.3 Bestelde componenten

Alle elektrische componenten werden besteld. Ook moest er een nieuwe elektrische kast aangekocht worden om al de aangekochte componenten, samen met de al aanwezige componenten op Cel Kunststoffen, in te plaatsen. Wegens tijdsgebrek is het installeren van deze componenten niet kunnen gebeuren en zodoende is het programma ook niet getest kunnen worden. In de toekomst zullen er nog extra beveiligingen ingebouwd moeten worden, zowel in het programma als in de gewone elektrische installatie.

7. Afschrijftijd en energiekost

Het is belangrijk om ook eens te kijken naar de energiekost van het variothermisch opwarmen ten opzichte van het conventioneel spuitgieten. Met behulp van deze extra kost kan er een theoretisch model opgesteld worden die de afschrijftijd van de machine beschrijft.

7.1. Energiekost

Het is logisch dat het plaatsen van extra verwarmingselementen en een verwarmingsunit voor het water ervoor zorgt dat het totale energieverbruik van de machine stijgt. Ook moet er gekeken worden naar de extra kost die zich meebrengt bij het aanschaffen van de sturingskring en de extra koelunits. Dit is echter meestal een eenmalige kost omdat voor de meeste producten gewoon de inzet in de matrijs verwisseld kan worden, of de volledige matrijs in de machine, en er dus niet voor elk product een sturingskring of extra koelunits aangekocht moeten worden.

7.2. Afschrijftijd van de machine

De afschrijftijd van de machine is de tijd, of het aantal producten, dat op een machine gemaakt kunnen worden, zodanig dat de aankoopkost van de machine terugverdiend is. Omwille van de energiekost is het dus logisch dat er meer producten gemaakt moeten worden om de aankoopkost terug te verdienen.

Wat nadelig is, is dat de cyclustijd voor zowel variotherm als hybride variotherm hoger is dan deze van conventioneel spuitgieten. Dit zorgt dus ook voor dat de tijd om evenveel producten te maken bij conventioneel spuitgieten veel lager gaat zijn dan deze voor variotherm of hybride variotherm spuitgieten.

7.3. Bespreking

In het kort kan gezegd worden dat voor zowel variotherm als hybride variothermisch verwarmen zowel de energiekost als de tijd die nodig is om één product te maken hoger is dan bij conventioneel spuitgieten. Hierdoor lijkt het alsof deze opstelling geen nut heeft en alleen maar een hogere kost met zich meebrengt. Het is al bewezen dat een hogere matrijstemperatuur een betere oppervlaktekwaliteit en inwendige structuur met zich meebrengt. Hierdoor is het dus mogelijk om een algemeen hogere kwaliteit van het product te behalen, waardoor het mogelijk is om het product tegen een hogere prijs te verkopen en zodoende de verhoogde afschrijftijd terug te schroeven.

8. Conclusie

In deze thesis werd een inzet van een voormatrijs ontworpen die zowel dienst kan doen in een variotherme als een hybride variotherme cyclus.

In de eerste stap werd dit deel van de inzet in twee delen gesplitst om één vlak verwarmingselement, met iets grotere afmetingen dan het bodemvlak van de vormholte, parallel met de vormholte te plaatsen. Nadien werden koelkanalen in de inzet gelegd. Deze koelkanalen zullen in het variotherme proces enkel dienst doen tijdens de afkoeling, en bij het hybride variotherme proces zowel bij de opwarming als de afkoeling in werking gesteld worden. Hierop volgde de optimalisatie van de opwarming en afkoeling door het uitvoeren van een reeks simulaties in Comsol. Om zowel de opwarming als de afkoeling vlotter en uniformer te laten verlopen, werd ervoor gekozen gebruik te maken van het materiaal AMPCOLOY 83 voor het bovenste deel van de inzet en van AMPCOLOY 940 voor het onderste deel van de inzet. Op deze manier werd de eerste doelstelling behaald.

De tweede doelstelling was om deze inzet te plaatsen en testen in een bestaande spuitgietinstallatie op Cel Kunststoffen. Door vertragingen bij het bestellen van de inzet, kon deze doelstelling niet behaald worden. In plaats daarvan werden de simulaties in Comsol geoptimaliseerd richting de realiteit.

De derde en laatste doelstelling, dewelke het afleveren was van een vergelijkende studie tussen het variotherm en hybride variotherm spuitgieten, werd ingevuld door deze verbeterde simulaties met elkaar te vergelijken op vlak van cyclustijd en temperatuuruniformiteit.

Als resultaat bleek dat, voor het voorgestelde ontwerp, de tijd die nodig was om een hybride variotherme cyclus te voltooien drie keer lager ligt dan dat van een variotherme cyclus, namelijk 87 ten opzichte van 27 seconden. Dit komt omdat er in het ontwerp geen extra verwarmingselementen langs de opstaande wanden van de vormholte werden geplaatst.

Om toch een idee te krijgen van dit effect werd er ook een hybride variotherme cyclus, waarbij alleen de bovenste koelkanalen bij de opwarming worden ingeschakeld, gesimuleerd. De volledige tijd voor deze cyclus bedraagt 34 seconden. Het tijdsverschil tussen beide hybride variotherme cycli is dus slechts 7 seconden. Hieruit blijkt opnieuw dat een combinatie van beide verwarmingsmethodes in een hybride variotherme spuitgietinstallatie leidt tot een snellere cyclus waarin dezelfde temperatuuruniformiteit behaald wordt.

De energiekost bij variotherm en hybride variotherm is hoger dan bij conventioneel spuitgieten omwille van de extra verwarmingsmethodes. Ook is de cyclustijd van beide processen groter dan bij conventioneel spuitgieten, waardoor de afschrijftijd van de machine vergroot. Nochtans, door de matrijstemperatuur te regelen, is de oppervlaktekwaliteit van het eindproduct hoger dan bij een conventionele spuitgietcyclus. Hierdoor is het mogelijk om de totale kost per geproduceerd product terug te winnen.

In de toekomst moet deze hele opstelling getest worden in een echte spuitgietmachine. Hiermee kan dan de juistheid van de uitgevoerde simulaties gecontroleerd worden met de realiteit. Eventuele afwijkingen kunnen dan bijgestuurd worden. Als de oorzaken van de vastgestelde afwijkingen achterhaald kunnen worden, biedt dit toekomstige ontwerpers de mogelijkheid om hun simulatiemodel bij te sturen.

9. Literatuurlijst

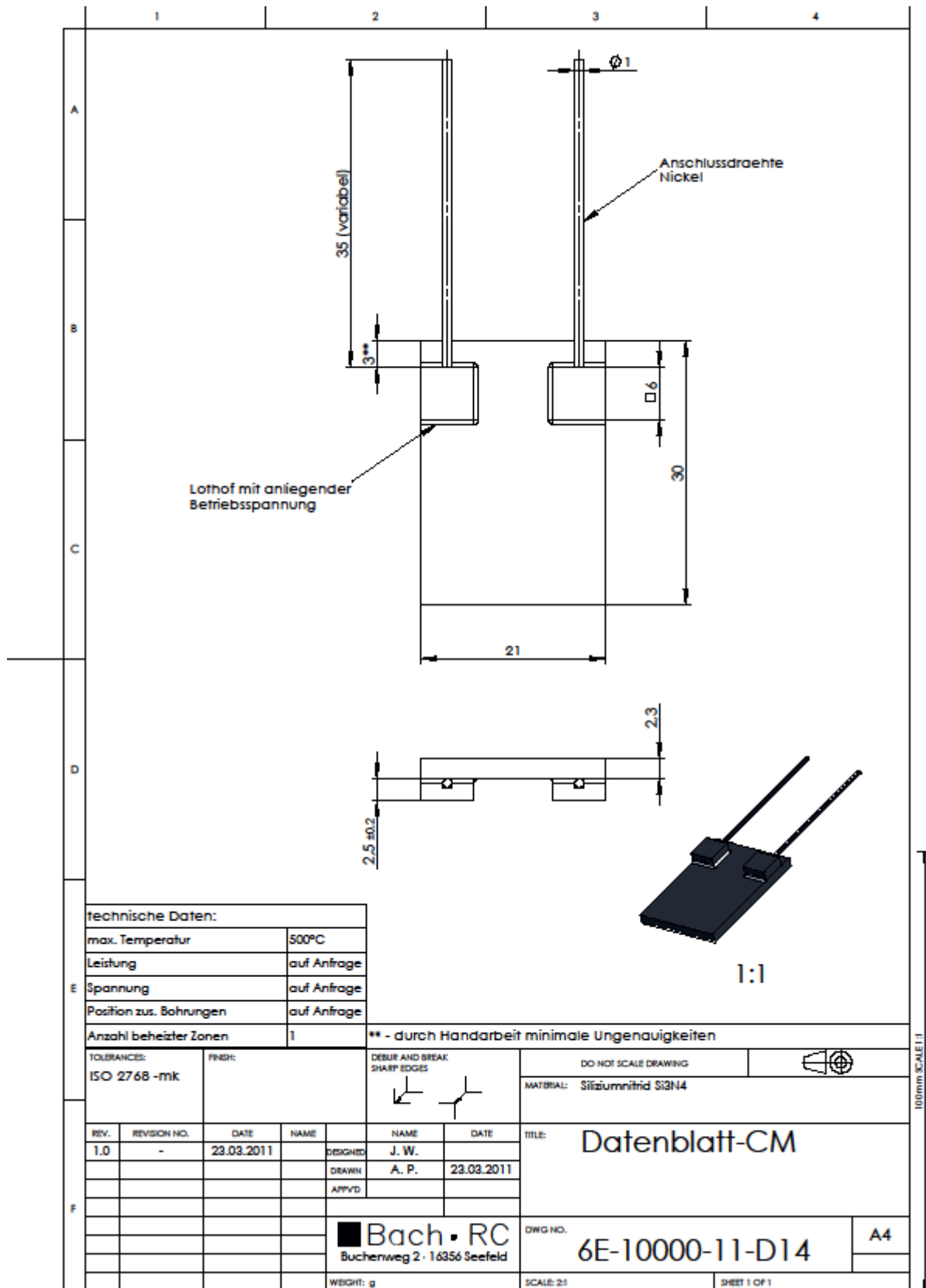
- [1] W. Guilong, Z. Guoqun, L. Huiping en G. Yanjin, „Research on a new variotherm injection molding technology and its application on the molding of a large LCD panel,” *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 48, nr. 7, pp. 671-681, 2009.
- [2] A. G. +. C. KG, „Electric machines - Setting standards: precise, fast and high-end,” Arburg GmbH + Co KG, 28 December 2013. [Online]. Available: <http://www.arburg.com/en/solutions/injection-moulding-machines/electric-machines/>. [Geopend 28 December 2013].
- [3] H. Warnecke, Inleiding in de productietechniek, Den Haag: Academic Service, 2004.
- [4] K. Budinski en M. Budinski, *Materiaalkunde*, Amsterdam: Pearson Education Benelux, 2009.
- [5] B. Linke en S. Unruh, „Injection Molding an IC into a Connector or Consumable Item,” Maxim Integrated, 3 Augustus 2010. [Online]. Available: <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/4717>. [Geopend 28 December 2013].
- [6] S. Efde, „Spuitgieten - Onderdelen,” AWA Molding, 29 December 2013. [Online]. Available: http://www.awamolding.nl/?pag_id=34217&site_id=189. [Geopend 29 December 2013].
- [7] W. Guilong, Z. Guoqun, L. Huiping en G. Yanjin, „Research of thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding processes, respectively, with steam heating and electric heating,” *Materials & Design*, vol. 31, nr. 1, pp. 382-395, 2010.
- [8] M. Worgull, *Hot Embossing: Theory and Technology of Microreplication*, Burlington: Elsevier Inc., 2009.
- [9] H. I. Group, „Variotherm Technologie,” 08 September 2010. [Online]. Available: <https://www.hofmann-innovation.com/technologies/variotherm-technologie.html>. [Geopend 29 December 2013].
- [10] Van de Lande B.V. , „Verklaring visuele vloeilijn,” Van de Lande B.V. , 15 Januari 2014. [Online]. Available: http://www.vdl-fittings.com/vdl/Verklaring_visuele_vloeilijn/274/Verklaring_visuele_vloeilijn.html. [Geopend 15 Januari 2014].
- [11] S. v. d. Steen, „Innovaties variotherme spuitgietsprocessen,” Kunststoff-Institut Lüdenscheid, Veldhoven, 2011.
- [12] L. Xiping, Z. Guoqun, G. Yanjin en L. Huiping, „Research on thermal stress, deformation, and fatigue lifetime of the rapid heating cycle injection mold,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 45, nr. 3-4, pp. 261-275, November 2009.
- [13] D. Yao, S.-C. Chen en B. H. Kim, „Rapid thermal cycling of injection molds: An overview on technical approaches and applications,” *Adv. Polym. Technol.*, vol. 27, nr. 4, p. 233-255, 2008.
- [14] J. F. Kip Petrykowski, „A study comparing electric, oil and pressurized water heating for composite molding,” SINGLE Temperature Controls, Inc., 14201 South Lakes Dr. Suite B Charlotte, NC 28273, 2012.
- [15] G. Wang, G. Zhao en Y. Guan, „Research on optimum heating system design for rapid thermal response mold with electric heating based on response surface methodology and particle swarm optimization,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 119, nr. 2, p. 902-921, 2011.
- [16] J. Kennedy en R. Eberhart, „Particle Swarm Optimization,” in *Neural Networks*, Perth, WA, 1995.
- [17] W. Guilong, Z. Guoqun, L. Huiping en G. Yanjin, „Analysis of thermal cycling efficiency and optimal design of heating/cooling systems for rapid heat cycle injection molding process,” *Materials & Design*, vol. 31, nr. 7, pp. 3426-3411, 2010.
- [18] W. Guilong, Z. Guoqun, L. Huiping en G. Yanjin, „Research on optimization design of the heating/cooling channels for rapid heat cycle molding based on response surface methodology and constrained particle swarm optimization,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, nr. 6, p. 6705-6719, 2011.
- [19] P. Postawa, D. Kwiatkowski en B. E., „Influence of the method of heating/cooling moulds on the properties of injection moulding parts,” *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 31, nr. 2, pp. 121-124, 2008.

- [20] Uddeholm, „Uddeholm gereedschapsstaal,” 18 0 2013. [Online]. Available: www.uddeholm.nl. [Geopend 22 01 2014].
- [21] AZoM, „P20 Tool Steel - Low-Carbon Mold Steel UNS T51620,” AZoM, 12 Januari 2014. [Online]. Available: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6239>. [Geopend 12 Januari 2014].
- [22] MatWeb, „Aluminum 6262-T6,” MatWeb, 12 Januari 2014. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=5437e9998e3d4d4897869f79e9ccfa7d>. [Geopend 12 Januari 2014].
- [23] Aalco Metals, „<http://www.aalco.co.uk/>,” 08 02 2013. [Online]. Available: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6262-T6_156.ashx. [Geopend 12 01 2014].
- [24] AMPCO METAL, „www.ampcometal.com,” 29 02 2012. [Online]. Available: <http://www.ampcometal.com/en/index.php?page=a940sc>. [Geopend 12 01 2014].
- [25] PTC Creo, „New Here?,” PTC, 12 Januari 2014. [Online]. Available: <http://creo.ptc.com/new-here/>. [Geopend 12 Januari 2014].
- [26] COMSOL Inc., „COMSOL Multiphysics The Platform for Physics-Based Modeling and Simulation,” COMSOL Inc., 12 Januari 2014. [Online]. Available: <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics>. [Geopend 12 Januari 2014].
- [27] Bach Resistor Ceramics, „www.bachrc.de,” Bach Resistor Ceramics, 17 12 2012. [Online]. Available: <http://www.bachrc.de/english/products/ceramic-heating-elements/flat-heating-elements/index.html>. [Geopend 12 01 2014].
- [28] Bach Resistor Ceramics, „FLAT HEATING ELEMENTS,” 23 Maart 2011. [Online]. Available: <http://www.bachrc.de/english/products/ceramic-heating-elements/flat-heating-elements/index.html>. [Geopend 12 Januari 2014].
- [29] K 2013, „k-online,” International Trade Fair No.1 for Plastics and Rubber Worldwide, 29 December 2013. [Online]. Available: <http://www.k-online.de>. [Geopend 12 Januari 2014].
- [30] R. plc, „Laser Melting Systems,” Renishaw Benelux BV, 13 Januari 2014. [Online]. Available: <http://www.renishaw.com/en/laser-melting-systems--15240>. [Geopend 13 Januari 2014].
- [31] Wikipedia, „Thyrisor,” Wikimedia Foundation, Inc., 25 11 2013. [Online]. Available: <http://nl.wikipedia.org/wiki>. [Geopend 23 01 2014].
- [32] W. Guilong, Z. Guoqun en G. Yanjin, „Thermal response of an electric heating rapid heat cycle molding mold and its effect on surface appearance and tensile strength of the molded part,” *J. Appl. Polym. Sc.*, vol. 128, nr. 3, p. 1339–1352, 2012.

10. Bijlagenlijst

Bijlage A: Verwarmingselementen	98
Bijlage B: Temperatuurregeling water	103
Bijlage C: Materialen.....	108
1 Matrijsstaal 1.2343.....	108
2 AMPCOLOY 83	110
3 AMPCOLOY 944.....	111
4 AMPCOLOY 940.....	112
Bijlage D: Technische tekeningen	113
1 Samenstellingstekening inzet	113
2 Stuktekening: Inzet deel vormholte	114
3 Stuktekening: Verwarmingselement.....	115
4 Stuktekening: Inzet onderste deel.....	116
Bijlage E: Thermokoppel module.....	117
Bijlage F: Thyristor.....	120
Bijlage G: AI/AO-kaart	123
Bijlage H: PLC-programma	127

Bijlage A: Verwarmingselementen



technische Daten:	
max. Temperatur	500°C
Leistung	auf Anfrage
Spannung	auf Anfrage
Position zus. Bohrungen	auf Anfrage

Anzahl beheizter Zonen 1

** - durch Handarbeit minimale Ungenauigkeiten

TOLERANCES:
ISO 2768 -mk

FINISH:

DEBUR AND BREAK SHARP EDGES

DO NOT SCALE DRAWING



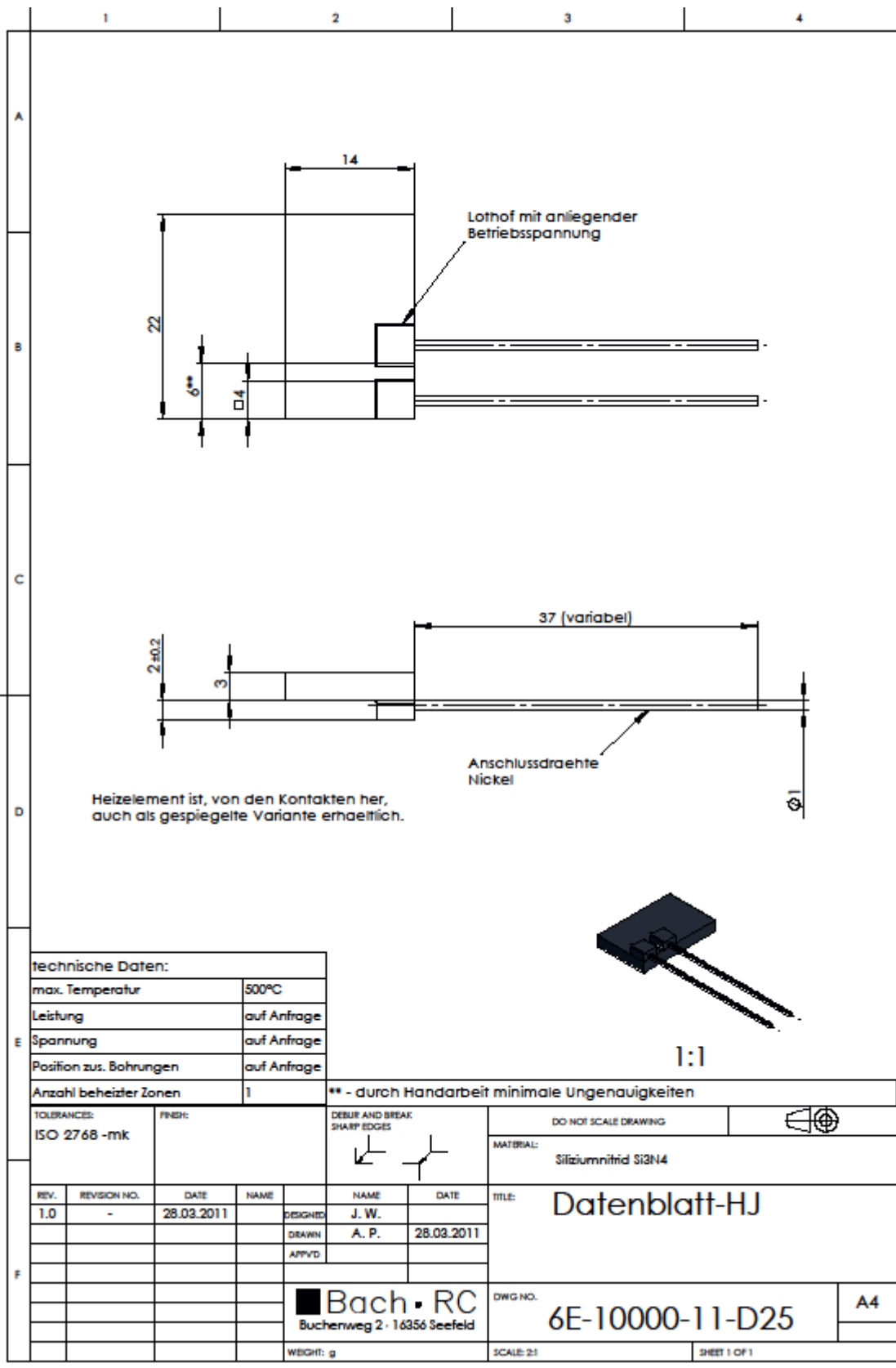
MATERIAL: Siliziumnitrid Si3N4

REV.	REVISION NO.	DATE	NAME	NAME	DATE
1.0	-	23.03.2011		DESIGNED J. W.	23.03.2011
				DRAWN A. P.	
				APP'VD	

TITLE: Datenblatt-CM	
DWG NO. 6E-10000-11-D14	A4
SCALE: 2:1	SHEET 1 OF 1

Bach • RC
Buchenweg 2 · 16356 Seefeld

100mm SCALE 1:1



technische Daten:	
max. Temperatur	500°C
Leistung	auf Anfrage
Spannung	auf Anfrage
Position zus. Bohrungen	auf Anfrage
Anzahl beheizter Zonen	1

TOLERANCES: ISO 2768 -mk	FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	
			MATERIAL: Siliziumnitrid Si3N4	

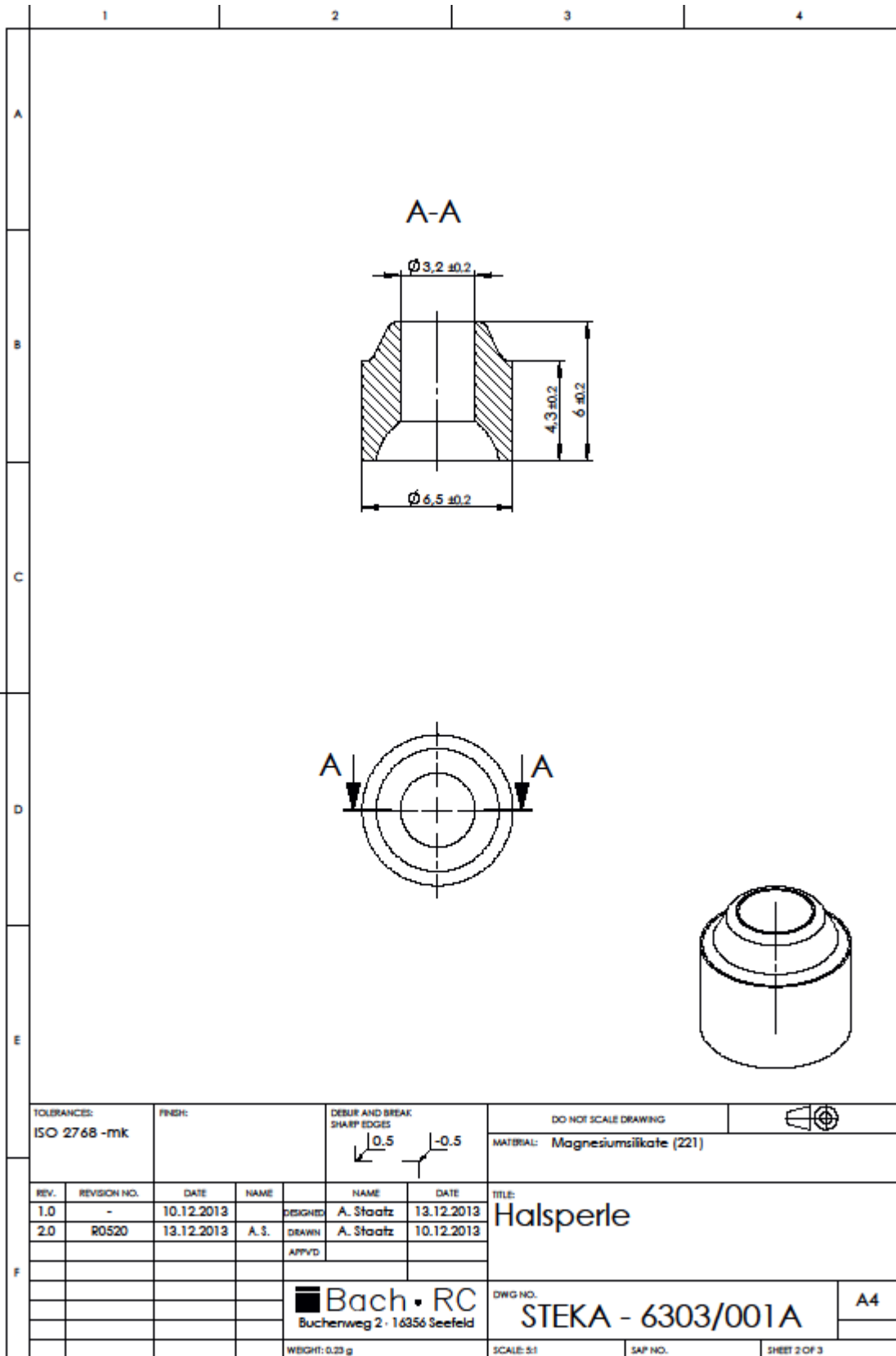
REV.	REVISION NO.	DATE	NAME	NAME	DATE
1.0	-	28.03.2011		DESIGNED J. W.	
				DRAWN A. P.	28.03.2011
				APPROV'D	

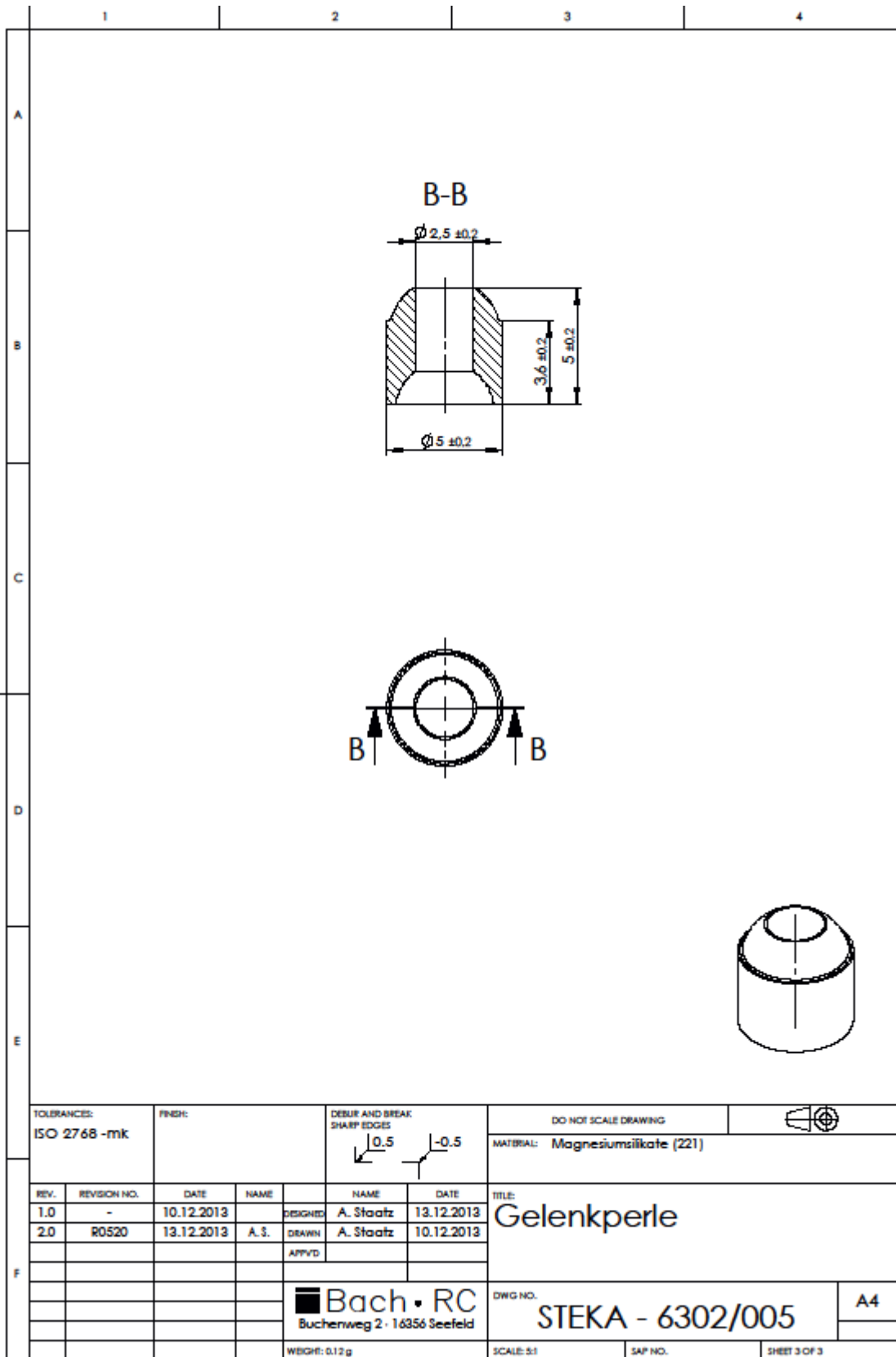
Bach • RC
Buchenweg 2 · 16356 Seefeld

TITLE: Datenblatt-HJ	DWG NO. 6E-10000-11-D25	A4
WEIGHT: g	SCALE: 2:1	SHEET 1 OF 1

100mm SCALE 1:1

	1	2	3	4		
A	Pos.	Menge	Einh.	Zeichnungsnr.	Stand	Benennung/Titel
	1	1	Stck	7E-10000-13-136	2.x	Heizelement-LB
	2	4	n.B.	600 Volts, 450°C, 16 AWG (IBM-Litze)		Litze
	3	4	Stck			Aderendhülse
	4	20	n.B.	Steka - 6302/005		Isolierperlen Innendurchmesser 2,6 mm
	5	16	Stck	STEKA - 6303/001A		Halsperle
	6	8	Stck			Schrumpfschlauch PTFE
B						
C						
D						
E						
F						
TOLERANCES: ISO 2768 -mk		FINISH:		DEBurr AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING
						MATERIAL: siehe Stueckliste
REV.	REVISION NO.	DATE	NAME	NAME	DATE	TITLE: Heizelement-ZSB
1.0	-	10.12.2013		DESIGNED A. Staats	09.12.2013	
2.0	R0520	13.12.2013	A.S.	DRAWN A. Staats	10.12.2013	
				APPROV		
						DWG NO. 7E-10000-13-137
				Buchenweg 2 · 16356 Seefeld		A4
				WEIGHT: 292,89 g		SCALE: 1:2
				SAP NO.		SAP NO.





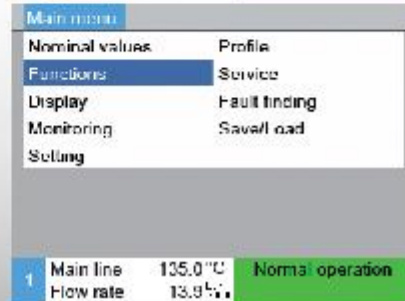
Bijlage B: Temperatuurregeling water

HB-THERM
THERMO-5

Exciting technology!

Temperature Control Units Thermo-5

- Fully-automated process monitoring
- Ultrasonic flow meter
- Non-scaling and pressure shock-free cooling
- Closed hydraulic system without oxygen contact
- Colour display with selectable user language
- USB-connector on front
- Store function for mould specific parameters
- Recording of actual values



3

Technical Data

Standard Equipment

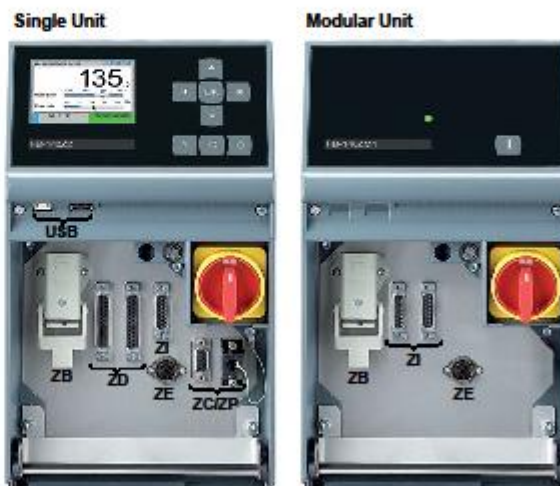
Hydraulics	Closed system with no oxygen contact, with efficient automatic deaeration, automatic filling
	Temperature measurement in main line and return line with sensor Pt 1000
	Continuous maintenance-free ultrasonic flow meter
	Non-scaling and pressure shock-free cooling with cooling water filter and proportional valve
	Proportionally controlled cooler bypass (on units over 100 °C)
	Stainless steel pump; Energy efficiency class IE2
	Hydraulic circuit made of non-corroding materials
	No direct contact between heating elements and heat transfer medium
	Easy to modify for separate supply of system water
	Booster pump for system filling (on water units over 100 °C)
	Controlled superimposed system pressure (on water units)
	Bypass and return line filter
	Heat transfer circuit with superimposed cold oil (on oil units)
	Tank with level measuring for expansion and mould evacuation (on oil units)
	Functions
Even load distribution at all heating stages with solid-state relays	
Auto-tuning cascade control	
Optional control on main line or return line (external sensor, if available)	
Continuous cooling and automatic switch-off programme	
Change-over to second nominal value	
Nominal value ramp and ramp programme	
Cyclical system water exchange selectable	
Monitoring / Safety	Automatic limit value setting
	Monitoring of various process parameters
	Hose rupture and leakage monitor
	Sensor failure monitor
	Pump and heater current monitor
	Dry-running protection
	Triple safety cut-out for heating
	Depressurised at unit OFF
	Safety relief valve and pressure gauge on rear of unit
	Automatic phase direction adaptation and phase monitor
Lockable castors PUR	
Command / Display	TFT-Colour display 3,5" with menu support and online help in selectable user language
	Display of flow rate, pump pressure and process power
	Large choice of display windows and values
	Temperature display in 0,1 °C
	Units of measurement for temperature, flow rate and pressure can be set
	Visual and acoustic alarms; volume adjustable
	USB-connector (Host / Device) for software updates and parameter transfer on front
	Store function for mould specific parameters
	Recording of actual values to USB memory
	Display of date and time
	Switch clock with adjustable switching times depending on day of week
	Hours run counter and service interval display
	Logbook for alarms
Data input password protected	

Modular units: Command / Display via Interface HB-THERM Internal (ZI; →P. 11, Fig. 1)

Additional Equipment

ZL	Leak stopper	With automatic depression optimisation (up to 70 °C)
ZB	Connection for alarm and external control	Alarm using potential-free contact (rating max. 250 VAC, 4 A) Unit ON/OFF and switching nominal value 1 or 2 using potential-free contact Connector Harting Han 7D (male)
ZE	Connection for external sensor	Thermocouple type J, K, T or Pt 100 in 3-wire system, with selectable production detector Connector Audio 5 pin (female)
ZI	Interface HB-THERM internal *	Specific serial data interface CAN to connect modular units and external flow meters Flow-5 Connector Sub-D 15 pin (female) (ZI is fitted as standard on modular units)
ZD	Interface DIGITAL *	Serial data interface 20 mA, RS-232 or RS-422/485 Various protocols selectable: Arburg, Battenfeld, Dr. Boy, Bühler, Demag, Engel, Ferromatik Milacron, KraussMaffei, MODBUS (RTU-Mode), Müller Weingarten, SPI, Stork 2 connectors Sub-D 25 pin (female)
ZC	Interface CAN *	Serial data interface CAN-bus (Demag) and CANopen (EUROMAP 66) 2 connectors Sub-D 9 pin (1 male/1 female)
ZP	Interface PROFIBUS-DP *	Serial data interface PROFIBUS-DP Connector Sub-D 9 pin (female) (not possible with ZC)
ZU	Wear monitor for pump	Additional pressure sensor in main line
ZK	Keyboard-protection	Transparent flap over display and controls
ZR	Clean room package	Clean room capable version: 'At Rest' < ISO class 6 (class 1000) 'In Operation' ISO class 7 (class 10 000) Fibre-free insulation Quality test with report

* Communication (→ P. 11, Fig. 1)



180 °C **Single Units**
Water
Technical Specifications

Temperature control unit		Heat transfer medium	Water	
		Cooling	Indirect	
Type	with maximum main line temperature in °C	Housing size (→P. 13, Fig. 5)	HB-180Z	
Heating (→P. 12, Fig. 2)	kW	8	●	●
		16	○ ¹⁾	●
		32		○
Pump (→P. 12, Fig. 3)	sealless, stainless; 0,5 kW; 30 L/min, 52 m sealless, stainless; 1,0 kW; 50 L/min, 70 m sealless, stainless; 2,8 kW; 110 L/min, 70 m sealless, stainless; 3,5 kW; 160 L/min, 70 m	2M	●	
		4M	○ ¹⁾	●
		6M		○ ¹⁾
		8M		○
Cooling (→P. 12, Fig. 4)	30 kW @ 60 K 50 kW @ 60 K 90 kW @ 60 K	A2	●	●
		B2		○
		C2		○
Additional equipment				
	Connection for alarm and external control	ZB	○	○
	Connection for external sensor	ZE	○	○
	Interface HB-THERM internal	ZI	○	○
	Interface DIGITAL	ZD	○	○
	Interface CAN	ZC	○	○
	Interface PROFIBUS-DP	ZP	○	○
	Wear monitor for pump	ZU	○	○
	Keyboard-protection	ZK	○	○
	Clean room package	ZR	○	○
Mains voltage	400 V (380–415 V), 50 Hz; 3LPE	405	●	●
	400 V (380–415 V), 60 Hz (50/60 Hz); 3LPE	406	○	○
	210 V (200–220 V), 50 Hz; 3LPE	215	○	○
	210 V (200–220 V), 60 Hz (50/60 Hz); 3LPE	216	○	○
	460 V (440–480 V), 60 Hz; 3LPE	466	○	○

Example for ordering: HB-180Z2-16-4M-A2-ZE-ZD, 405, English

Maximum main line temperature		°C	180	180
Dimensions	Height	mm	700	850
	Width	mm	240	300
	Depth	mm	661	662
Weight	approx.	kg	74	158
Circulating volume in unit	approx.	L	2,1	6,5
Connection, main/return line	Thread		G¾	G1 ¼
	Resistance	bar, °C	25, 200	25, 200
Connection, cooling water	Pressure	bar	2–5	2–5
	Thread		G¾	G¾
	Resistance	bar, °C	10, 100	10, 100
Connection, separate system water	Pressure	bar	2–5	2–5
	Thread		G¾	G¾
	Resistance	bar, °C	10, 100	10, 100
Drain	Thread		G¾	G¾

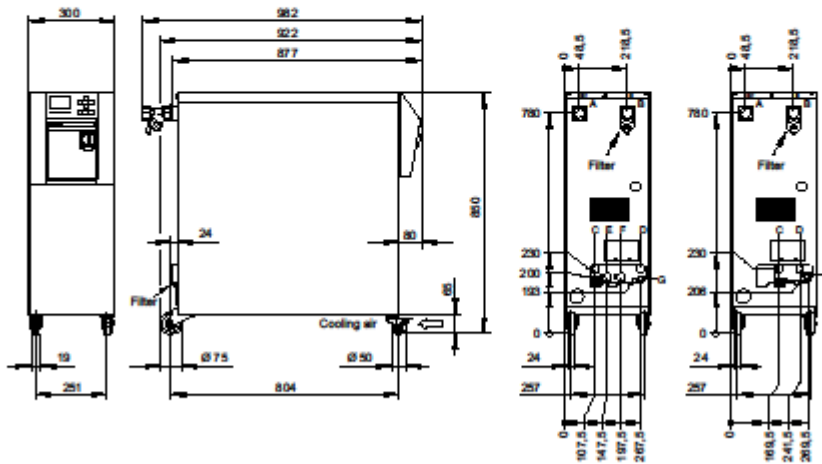
● Standard specification ○ Optional ¹⁾ Typical specification

We reserve the right to modify the specifications without notice

Housing size 3, scale 1:20

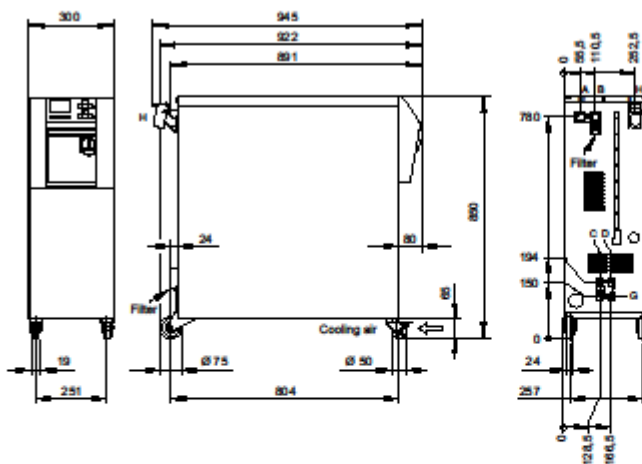
HB-...Z3

HB-100X3



Housing size 3, scale 1:20

HB-250T3



- | | | |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| A Main line | D Cooling water outlet | G Drain |
| B Return line | E System water inlet | H Filling (on oil units) |
| C Cooling water inlet | F System water outlet | |

Bijlage C: Materialen

1 Matrijsstaal 1.2343

General

Uddeholm Vidar Superior is a chromium-molybdenum-vanadium alloyed hot work tool steel which is characterized by:

- High level of resistance to thermal shock and thermal fatigue
- Good high-temperature strength
- Excellent toughness and ductility in all directions
- Excellent through-hardening properties
- Good dimensional stability during hardening

Typical analysis %	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	0.36	0.3	0.3	5.0	1.3	0.5
Standard specification	X36 CrMoV5 (CNOMO) X36 CrMoV5-1, W.-Nr. 1.2340 ~AISI H11, ~B H11, ~W.-Nr. 1.2343, ~AFNOR Z38 CDV 5, ~UNI X37 CrMoV 51 KU, ~UNE X37 CrMoV 5					
Delivery condition	Soft annealed to approx. 180 HB					
Colour code	Red/orange with a white line across					

Improved tooling performance

The name "Superior" implies that by special processing techniques and close process control, the steel attains high purity and a very fine structure. Uddeholm Vidar Superior shows significant improvements in impact toughness compared to material of the H11 (W.-Nr. 1.2343) type.

The improved impact toughness is particularly valuable for tooling subjected to high mechanical and thermal stresses, e.g. die casting dies and forging tools. In practical terms, tools may be used at somewhat higher working hardness (2 HRC) without loss of toughness. Since increased service hardness limits the formation of thermal fatigue cracks, improved tool performance can be expected.

Applications

Tools for die casting

Part	Tin, lead, zinc alloys, HRC	Aluminium-, Magnesium alloys, HRC
Dies	46-50	42-48
Fixed inserts, cores	48-52	46-50
Sprue parts	(ORVAR)	(ORVAR)
Nozzles	(ORVAR)	(ORVAR)
Ejector pins (nitrided)	(ORVAR)	(ORVAR)
Plunger, shot-sleeve (normally nitrided)	(ORVAR)	(ORVAR)
Austenitizing temperature	980-1000°C (1795-1830°F)	

Tools for hot forging

Material	Austenitizing temperature (approx.)	HRC
Aluminium, magnesium	980-1000°C (1795-1830°F)	44-52
Copper alloys	980-1000°C (1795-1830°F)	44-52
Steel	980-1000°C (1795-1830°F)	40-50

Moulds for plastics

Part	Austenitizing temperature (approx.)	HRC
Injection moulds		
Compression/transfer moulds	980-1000°C (1795-1830°F)	46-52

Properties

Physical data

All specimens are taken from the centre of a 1000 x 200 mm (39,4" x 7,88") bar. Unless otherwise is indicated all specimens were hardened from 1000°C (1832°F), quenched in a vacuum furnace and tempered 2 + 2h at 600°C (1110°F) to 45 ±1 HRC.

Temperature	20°C (68°F)	200°C (392°F)	400°C (750°F)	600°C (1010°F)
Density, kg/m ³ lbs/in ³	7 800 0.282	7 750 0.280	7 700 0.278	7 600 0.275
Modulus of elasticity MPa psi	210 000 30.5 x 10 ⁶	200 000 29.1 x 10 ⁶	180 000 26.1 x 10 ⁶	140 000 20.3 x 10 ⁶
Coefficient of thermal expansion per °C from 20°C per °F from 68°F	-	11.6 x 10 ⁻⁴ 6.4 x 10 ⁻⁴	12.4 x 10 ⁻⁴ 6.9 x 10 ⁻⁴	13.2 x 10 ⁻⁴ 7.3 x 10 ⁻⁴
Thermal conductivity W/m °C Btu in/ (ft ² h°F)	-	30 211	30 211	31 218

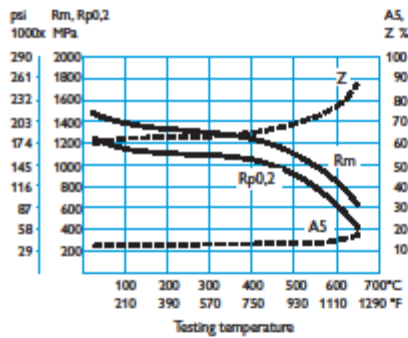
Mechanical properties

Approximate tensile strength at room temperature.

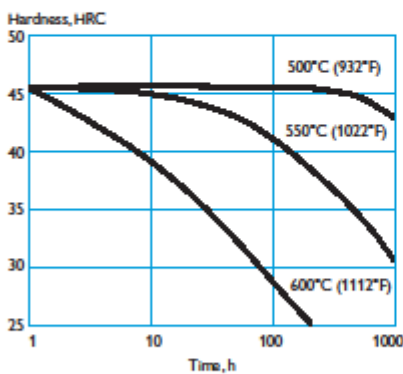
Hardness	45 HRC	46.5 HRC	48.5 HRC
Tensile strength R _m	1450 MPa 210 000 psi	1580 MPa 229 000 psi	1680 MPa 244 000 psi
Yield strength R _{p0.2}	1240 MPa 180 000 psi	1340 MPa 194 000 psi	1410 MPa 204 000 psi
Elongation A ₅	13%	13%	12%
Reduction in area Z	65%	65%	64%

APPROXIMATE STRENGTH AT ELEVATED TEMPERATURES

Longitudinal direction.

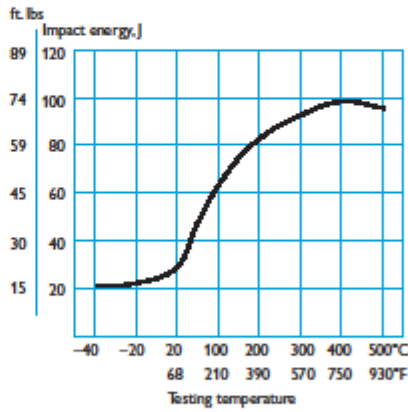


EFFECT OF TIME AT HIGH TEMPERATURES ON HARDNESS



EFFECT OF TESTING TEMPERATURES ON IMPACT ENERGY

Charpy V specimens, short transverse direction.



Heat treatment

Soft annealing

Protect the steel and heat through to 850°C (1562°F). Then cool in furnace at 10°C (20°F) per hour to 650°C (1202°F), then freely in air.

Stress relieving

After rough machining the tool should be heated through to 650°C (1202°F), holding time 2 hours. Cool slowly to 500°C (932°F), then freely in air.

Hardening

Preheating temperature: 600–900°C (1112–1652°F). Minimum two preheating steps at 600–650°C (1112–1202°F) and 820–850°C (1508–1562°F). When three preheats are used the second is carried out at 820°C (1508°F) and the third at 900°C (1652°F).

Austenitizing temperature: 980–1000°C (1796–1832°F).

Soaking time: 30–45 minutes.

Soaking time = time at austenitizing temperature after the tool is fully heated through.

Protect the tool against decarburization and oxidation during austenitizing.

2 AMPCOLOY 83

Technical Data Sheet AMPCOLOY® 83 Forgings



Nominal composition:

Beryllium	(Be)	1.0%
Cobalt + Nickel	(Co + Ni)	0.5%
Others		0.5% max.
Copper	(Cu)	balance

Specifications:

EN	101C	A4/2
D	DIN 17672	W. Nr. 2.1247
F	AFNOR	UBe2
GB	BS	
	CDA	C17200
USA	RWMA	Class 4

Mechanical and physical properties	Units	Nominal Values
Tensile strength Rm	MPa	1140
Yield strength Rp 0.5	MPa	1000
Elongation A5	%	5
Brinell hardness	HB 30	340
Rockwell hardness	HRC	36
Modulus of elasticity E	GPa	128
Density ρ	g / cm ³	8.26
Coefficient of expansion α	10 ⁻⁶ / K	17.5
Thermal conductivity λ	W / m · K	106
Electrical conductivity γ	m / Ω · mm ²	12.8
Electrical conductivity	% I.A.C.S.	22
Specific heat Cp	J / g · K	0.38

Assurances given with respect to properties or uses are subject to written approval from AMPCO METAL.

AMPCOLOY® 83 is a 2 % Beryllium copper alloy which displays very high mechanical properties with a reasonably good electrical and thermal conductivity.

APPLICATIONS:

Wherever good wear resistance or high mechanical properties are desired coupled with a good electrical or thermal conductivity, such as:

Flash butt welding and butt welding

Parts for electrical components

In the plastic mould industry AMPCOLOY® 83 is sometimes used as chill plates and inserts in the moulds, cooling pins and neck rings or bottom plates for blow moulds of plastic bottles.

WARNING

Since the alloy contains 2 % Beryllium, it is recommended that during any operation which is liable to create dust or fumes (for example dry grinding, polishing or welding) precautions should be taken to ensure there is no inhalation or exposure to eyes or skin. Conventional machining (for example milling and turning) is not generally considered hazardous.

AMPCO METAL EXCELLENCE IN ENGINEERED ALLOYS

info@ampcometal.com

www.ampcometal.com



Technical Data Sheet

AMPCOLOY® 944

Forgings

Nominal composition:

Nickel	(Ni)	7.0%
Silicon	(Si)	2.0%
Chromium	(Cr)	1.0%
Others		Max 0.5%
Copper	(Cu)	Balance

Specifications:

D	DIN	
F	AFNOR	
GB	BS	
USA	RWMA	Class 4

Mechanical and physical properties	Units	Nominal Values
Tensile strength Rm	MPa	793
Yield strength Rp0.5	MPa	655
Elongation A5	%	4
Brinell hardness	HB 30	270
Rockwell hardness	HRC	31
Compressive strength, 0.1 % perm. set	MPa	700
Charpy ak	%	8
Modulus of elasticity	GPa	135
Density p	g/cm ³	8.69
Coefficient of expansion a	10 ⁻⁶ /K	15.7
Thermal conductivity λ	W/m- K	158
Electrical conductivity	% I.A.C.S.	35

Assurances given with respect to properties or uses are subject to written approval from AMPCO METAL. AMPCOLOY® 944 has been developed by AMPCO METAL to obtain an alloy with ultimate thermal conductivity, good tensile strength and very good hardness, in order to provide an alternative to Beryllium copper, where stricter health and safety instructions on the use of noxious elements are required

APPLICATIONS:

AMPCOLOY® 944 is used wherever a good electrical or thermal conductivity is required together with high mechanical properties and wherever Beryllium copper is used :

Electrode holders and seam welding shafts

Spot welding electrodes, seam welding discs, projection and butt welding dies, principally for stainless steel and Monel

Plunger tips for cold chamber aluminium high pressure die casting machines and molds for low pressure die casting machines

Chill moulds for casting brass and certain bronzes

Parts of moulds for injection moulding of plastics, injection-nozzles and cooling pins

4 AMPCOLOY 940

Technical Data Sheet AMPCOLOY® 940 Sand Castings



Nominal composition:

Nickel	(Ni)	2.5%
Silicium	(Si)	0.7%
Chromium	(Cr)	max. 0.4%
Copper	(Cu)	balance

Specifications:

D	DIN	
F	AFNOR	
GB	BS	
USA	RWMA	Class 3

Mechanical and physical properties	Units	Nominal Values
Tensile strength Rm	MPa	544
Yield strength Rp 0.5	MPa	475
Elongation A5	%	8
Brinell hardness	HB 30	210
Rockwell hardness	HRB	95
Reduction of area ψ	%	18
Modulus of elasticity E	GPa	131
Density ρ	g / cm ³	8.71
Coefficient of expansion α	10 ⁻⁶ / K	17.5
Thermal conductivity λ	W / m · K	208
Electrical conductivity γ	m / Ω · mm ²	28
Electrical conductivity	% I.A.C.S.	48
Specific heat Cp	J / g · K	0.38

Assurances given with respect to properties or uses are subject to written approval from AMPCO METAL.

AMPCOLOY® 940 is a patented alloy which meets the demands of users of the RWMA class 3 alloys without Beryllium. In the industrialized countries, stricter health and safety instructions on the use of noxious elements have forced AMPCO METAL to develop this new alloy. It replaces the AMPCOLOY® 95 in practically all applications.

APPLICATIONS:

AMPCOLOY® 940 is used wherever a good electrical or thermal conductivity is required together with high mechanical properties:

Electrode holders

Parts for energy engineering

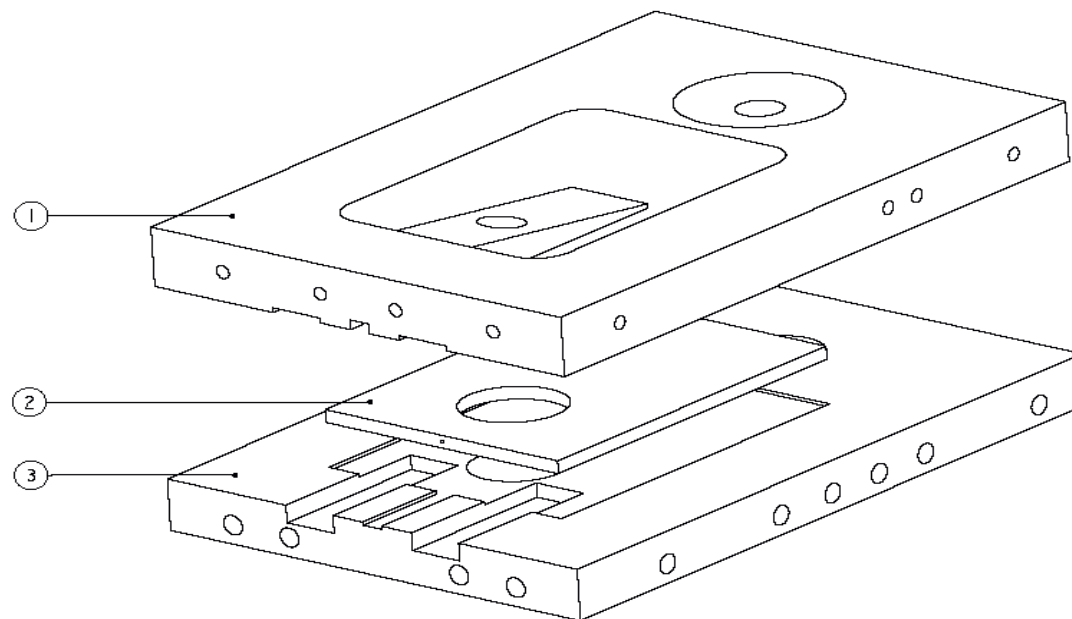
AMPCO METAL EXCELLENCE IN ENGINEERED ALLOYS

info@ampcometal.com

www.ampcometal.com

Bijlage D: Technische tekeningen

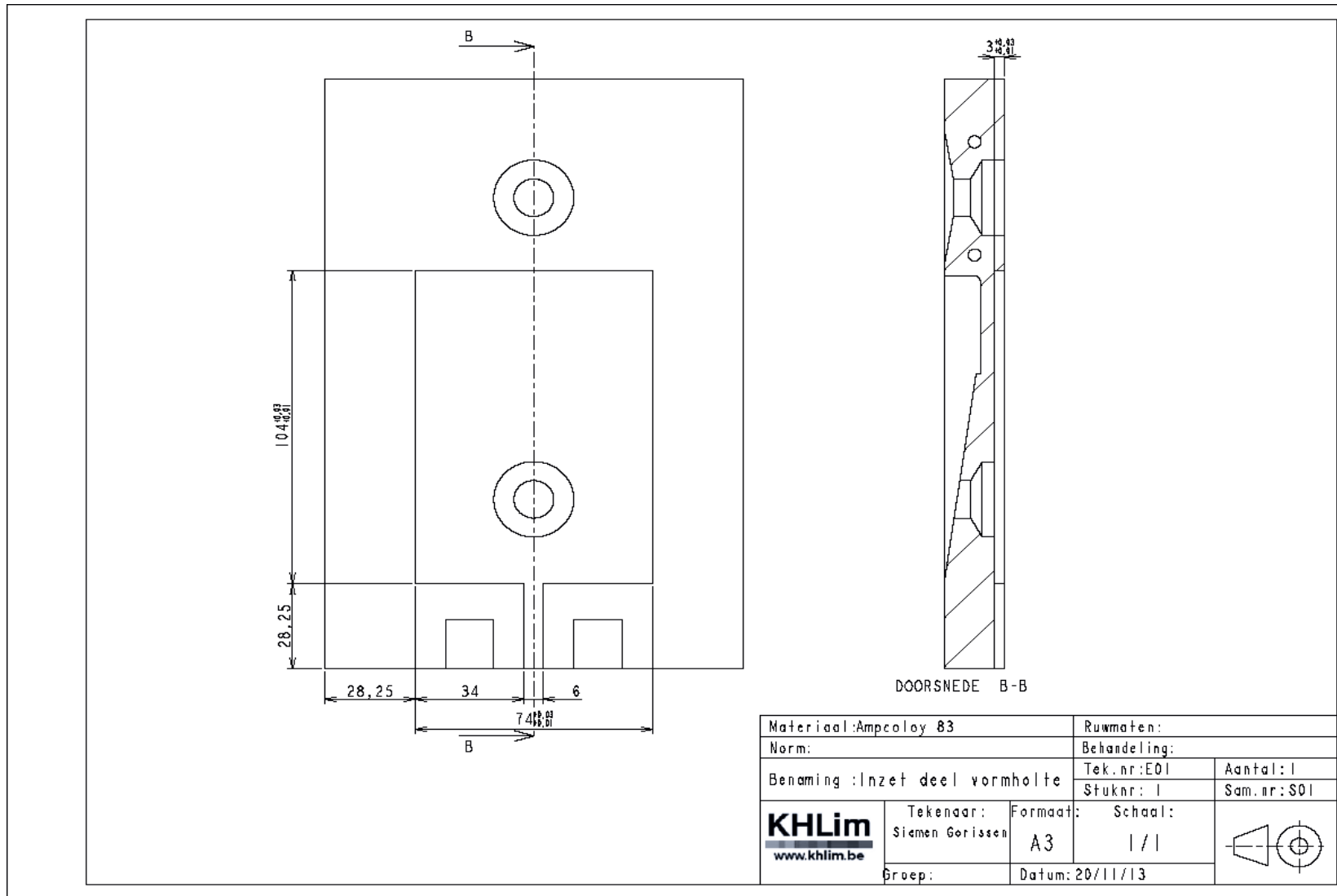
1 Samenstellingstekening inzet



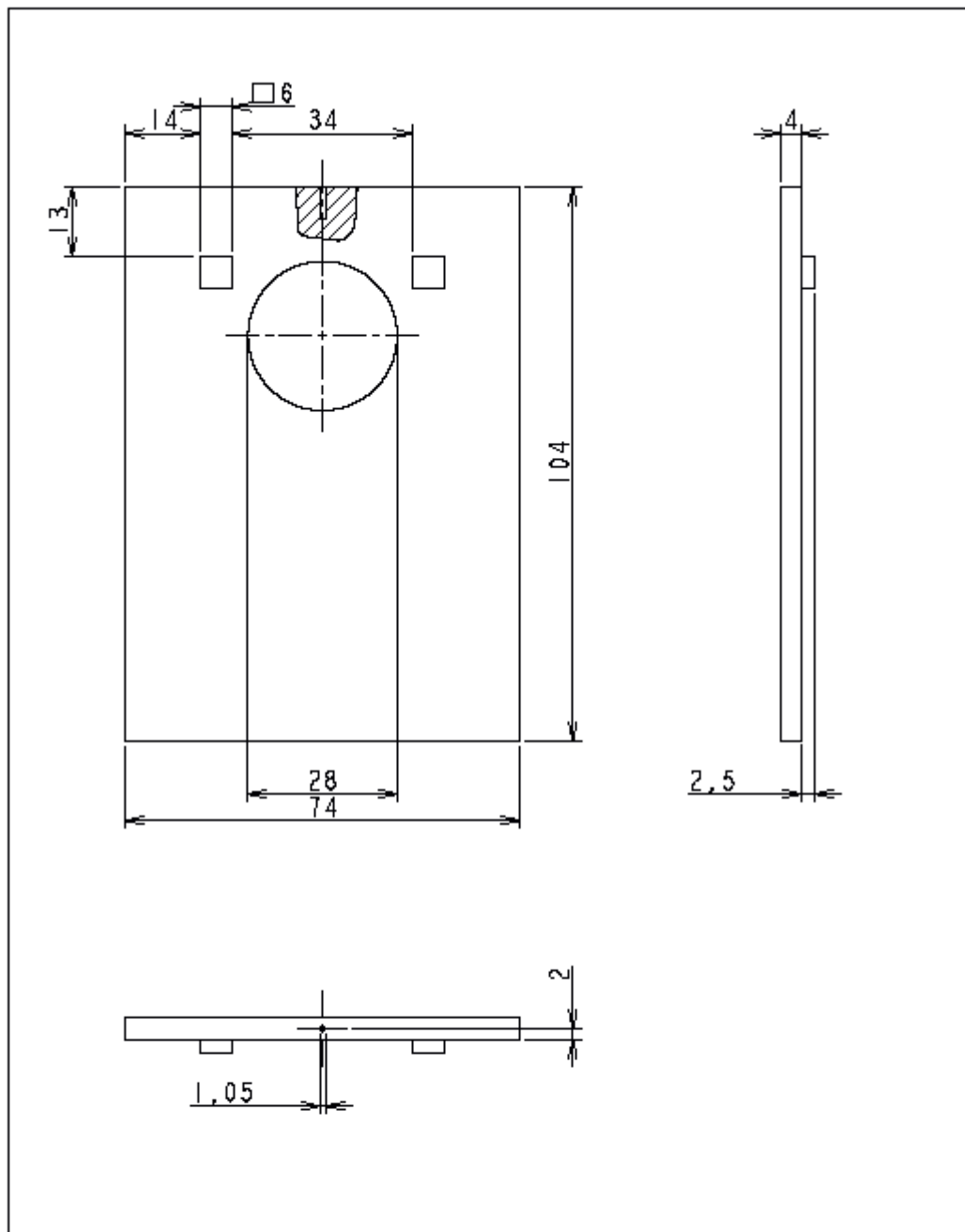
Stuknr.	Naam	Materiaal	Aantal
1	Inzet vormholte	AMPCOLOY 83	1
2	Verwarmingselement	Siliciumnitride	1
3	Inzet onderkant	AMPCOLOY 940	1


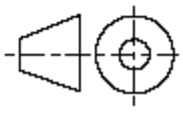
Materiaal:		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : Inzet		Tek.nr: S01	Aantal: 1
		Stuknr:	Sam.nr:
KHLim www.khlim.be	Tekenaar:	Formaat:	Schaal:
	Siemen Gorissen Bea Driessen	A3	1/1
Groep: Master EW	Datum: 11/12/13		

2 Stuktekening: Inzet deel vormholte

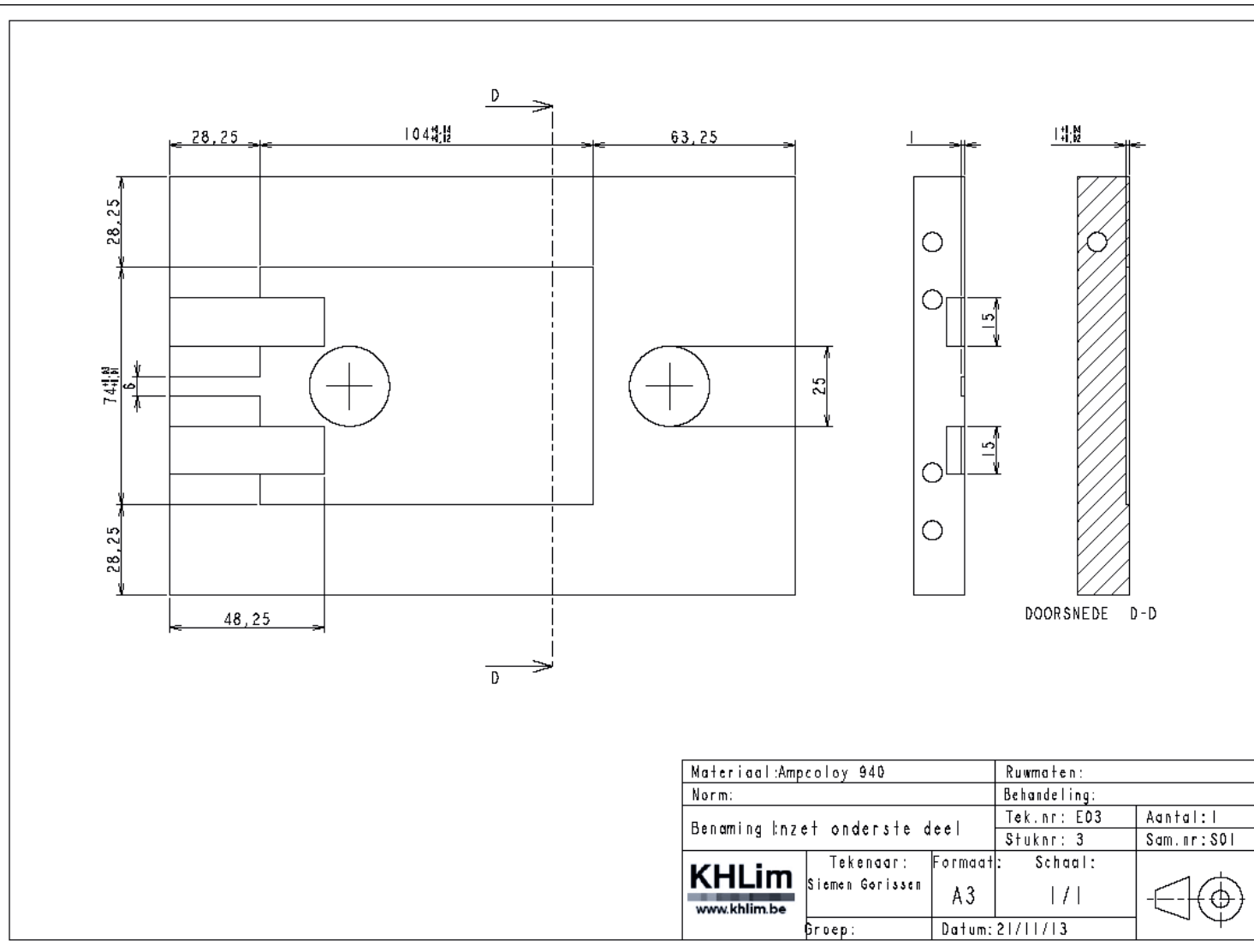


3 Stuktekening: Verwarmingselement



Materiaal: Siliciumnitride		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : Verwarmingselement		Tek.nr: E01	Aantal: 1
		Stuknr: 2	Sam.nr: S01
 www.khlim.be	Tekenaar: Siemen Gorissen	Formaat: A4	Schaal: 1/1
	Groep: MA-EM	Datum: 11/12/13	
			

4 Stuktekening: Inzet onderste deel



Bijlage E: Thermokoppel module

SIEMENS

Product data sheet

6ES7231-5QD32-0XB0

SIMATIC S7-1200, ANALOG INPUT,
SM 1231 TC, 4 AI THERMOCOUPLE

Supply voltage	
24 V DC	Yes
Input current	
Current consumption, typ.	40 mA
from backplane bus 5 V DC, typ.	80 mA
Power losses	
Power loss, typ.	1.5 W
Analog inputs	
Number of analog inputs	4 ; Thermocouples
permissible input frequency for current input (destruction limit), max.	± 35 V
Technical unit for temperature measurement adjustable	Degrees Celsius/degrees Fahrenheit
Input ranges	
Thermocouple	Yes ; J, K, T, E, R, S, N, C, TXX/XX(L); voltage range: ±80 mV
Input ranges (rated values), voltages	
-80 mV to +80 mV	Yes
Input resistance (-80 mV to +80 mV)	>= 1 MOhm
Input ranges (rated values), thermoelements	
Type B	Yes
Type C	Yes
Type E	Yes
Type J	Yes
Type K	Yes
Type N	Yes
Type R	Yes
Type S	Yes
Type T	Yes
Type TXX/TXX(L) to GOST	Yes
Thermocouple (TC)	
permissible input voltage for voltage input (destruction limit), max.	+35V
Temperature compensation	
Parameterizable	No

6ES7231-5QD32-0XB0
Page 1/3

01/11/2014

subject to modifications
© Copyright Siemens AG 2014

Analog value creation	
Measurement principle	Integrating
Integrations and conversion time/ resolution per channel	
Resolution with overrange (bit including sign), max.	15 bit ; + sign
Integration time, parameterizable	No
Interference voltage suppression for interference frequency f1 in Hz	85 dB at 50 / 60 / 400 Hz
Analog value generation (in isochronous mode)	
Smoothing of measured values	
Parameterizable	Yes
Errors/accuracies	
Temperature error (relative to input area)	25 °C ±0.1 % to 55 °C ±0.2 % total measurement range
Interference voltage suppression for $f = n \times (f1 \pm 1 \%)$, f1 = interference frequency	
Common mode interference, min.	120 dB
Interrupts/diagnostics/status information	
Alarms	
Alarms	Yes
Diagnostic alarm	Yes
Diagnostic messages	
Diagnostic functions	Yes ; Can be read out
Monitoring the supply voltage	Yes
Wire break	Yes
Diagnostics indication LED	
for status of the inputs	Yes
for maintenance	Yes
Degree and class of protection	
IP20	Yes
Standards, approvals, certificates	
CE mark	Yes
C-TICK	Yes
FM approval	Yes
Highest safety class achievable in safety mode	
acc. to IEC 61508	none
Climatic and mechanical conditions for storage and transport	
Climatic conditions for storage and transport	
Free fall	
Drop height, max. (in packaging)	0.3 m ; five times, in dispatch package
Temperature	

Permissible temperature range	-40 °C to +70 °C
Air pressure acc. to IEC 60068-2-13	
Permissible air pressure	1080 to 660 hPa
Relative humidity	
Permissible range (without condensation) at 25 °C	95 %
Mechanical and climatic conditions during operation	
Climatic conditions in operation	
Temperature	
Permissible temperature range	-20 °C to +60 °C horizontal mounting -20 °C to 50 °C vertical mounting 95% humidity, non-condensing
Air pressure acc. to IEC 60068-2-13	
Permissible air pressure	1080 to 795 hPa
Pollutant concentrations	
SO2 at RH < 60% without condensation	SO2: < 0.5 ppm; H2S: < 0.1 ppm; RH < 60% condensation-free
Connection method	
required front connector	Yes
Mechanics/material	
Type of housing (front)	
Plastic	Yes
Dimensions	
Width	45 mm
Height	100 mm
Depth	75 mm
Weights	
Weight, approx.	180 g
Status	Dec 30, 2013

TE10A Single phase thyristor

Multiple applications

Car Industry (paint drying), Food sector (cooking, browning), Air conditioning, Metallurgy (heat treatment), Plastics (extrusion, thermoforming), Textiles (drying, coating, printing).

Ergonomic design

Compact : reduction in cabinet size. Internal EMC filter.

High performance

Operating mode for short-wave infrared elements.
Compensation for supply fluctuations.

Flexibility - The TE10A is controlled by an analogue signal which is selectable for DC current or voltage. A '5V user' voltage allows local control by a potentiometer. A plug-in connector avoids any risk of wiring error if the unit has to be replaced.

The TE10A can be used with non-standard mains (option).

Standard 45mm DIN window format allows mounting in a housing with a panel cut-out or DIN rail mounting in a cabinet.

Toughness / Reliability - TE10A thyristors can withstand momentary overcurrents up to 15 times the nominal rating. This is important when controlling short-wave infrared elements.

The thyristor breakdown voltage is three times greater than the nominal operating voltage.

Current derating curves as a function of ambient temperature enable TE10A units to be used up to +60°C.

CE Marking / Safety - TE10A units meet the essential requirements of the European Low Voltage Directive. No exposed parts are at a dangerous voltage.

Eurotherm certifies that TE10A units have successfully passed Electromagnetic Compatibility (EMC) tests and enable the system which incorporates them to comply with the EMC Directive, as far as the TE10A products are concerned.

An EMC Installation guide is available on request (part No. HA025464).

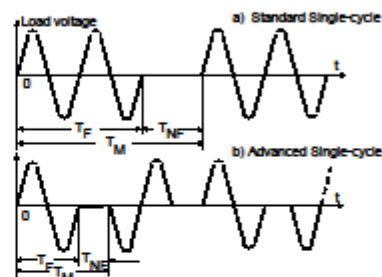
Firing modes - The TE10A is available in three basic forms:

Phase Angle Firing with optional current limit for use with inductive and temperature dependent loads.

Burst Firing which includes single cycle for use with infrared heaters as well as conventional resistive loads.

Advanced Single Cycle for use with infrared heaters (low flicker)

The use of half-cycle for non-firing gives a reduction in flicker and brightness of infrared elements compared with single-cycle. For a setpoint less than 50%, non-firing is effected on mains half-cycles. The firing time is fixed at one cycle (20ms at 50Hz). For a setpoint greater than 50%, non-firing is reduced to one half cycle. Firing is effected over whole cycles.



Examples of firing in Single-cycle (a) and in advanced Single-cycle (b) modes at 66.6% of nominal power.

TECHNICAL SPECIFICATION

Power

Nominal current at 45°C	16, 25, 40 or 50A (see current derating curve)
Nominal line-to-line voltage	100Vac to 500Vac +10%, -15% (for operating voltage, see product code)
Supply frequency	50 and 60Hz (±2Hz)
Load	Resistive or short-wave infrared elements - use TE10A Burst Firing Inductive or temperature dependent loads - use TE10A Phase Angle Firing
Power terminal block	Cage terminals for 1.5 to 16 mm ² cables. Tightening torque 1.2Nm
Safety earth	Screw terminal, same cable gauge as power. Tightening torque 2Nm

Control Performance

Control type	The power controlled in the load is proportional to the setpoint
Linearity	Better than ±2% of the full range
Stability	Automatic compensation for supply variations from ±10% of the nominal voltage. Stability better than ±2% of the full range with constant resistance
Firing mode: Burst Firing Model	'Burst firing', 'Single cycle' or 'advanced Single cycle' (which uses a different firing board) At 50% power the thyristors are: On for 300ms and Off for 300ms (typical time) in 'Burst firing' On for one cycle and Off for one cycle in 'Single cycle' and 'advanced Single cycle' At 66.7% power the thyristors are: On for 400ms and Off for 200ms in 'Burst firing' On for two cycles and Off for one cycle in 'Single cycle' On for one cycle Off for half a cycle in 'advanced Single cycle' Thyristor firing at zero voltage Firing indicated by a green LED
Phase Angle Model	Phase Angle firing varies the thyristors firing angle. Current limit is available as an option on this model

Control

Input signal	Analogue, DC voltage or current: 0 - 5V, 0 - 10V or 4 - 20mA Voltage input impedance: 100kΩ, current input impedance: 250Ω
Local control	10kΩ external potentiometer, a '5V user' voltage is available
Contacts	Contacts for On/Off logic operation
Control terminals	Plug-in connector (0.5 to 1.5mm ² cables) Tightening torque 0.4Nm

Option

Auxiliary power supply	Option for separate electronics power supply fed from 115Vac or 230Vac (when using non-standard three phase supply)
------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

European Directives

Electromagnetic compatibility	
Immunity	Test standards : EN 61000-4-2, EN 61000-4-4, EN 61000-4-5, EN 50140, EN 50141, EN 50204
Emission	Test standard : EN 55011 (with external filter for Phase Angle firing model, internal EMC filter fitted on Burst Firing mode)
Electrical safety	Complies with the Low Voltage Directive 73/23/EEC amended by the Directive 93/68/EEC (product installed and used in compliance with its user manual)
CE marking	TE10A products carry the CE mark in compliance with the European Low Voltage Directive. A CE declaration of conformity is available on request

Environment

Temperature	Operating: 0 to 45°C (up to 60°C with derating).
Storage	-10 to +70°C
Pollution:	Overvoltage category 2 Degree of pollution 2 (IEC 664). Electrically conductive pollution must be excluded from the cabinet in which this controller is mounted. This product is not suitable for use above 2000m or in corrosive or explosive atmospheres without further protection.
Humidity	Relative humidity: 5 to 95%, non-condensing and non-streaming
Thyristor protection	High-speed external fuse (order separately), internal MOV (varistor) and RC snubber
Protection degree	IP20 (in accordance with IEC 529: 11.4, table 5) Isolation distances comply with IEC 664
Isolation (1 minute test)	Between power and earth: 2000Vac. Between power and control inputs: 3600Vac
Cooling	Natural convection
Dimensions	Height : 115mm. Depth : 92.5mm. Width : TE10A/16A : 52.5mm TE10A/25A : 70mm TE10A/40A : 105mm TE10A/50A : 122.5mm
Weight	TE10A/16A : 550g TE10A/25A : 700g TE10A/40A : 900g TE10A/50A : 1200g
Mounting	Vertical on DIN rail (reference EN50022-35x7.5 or 35x15). Allow at least 10mm between units

In order to maintain its 'leading edge' Eurotherm may have to make changes to its specifications without advance notice. For any further information, or if in doubt, please contact your nearest Eurotherm office.

INSTALLATION AND DIMENSIONAL DETAILS

Units must be installed in fan-cooled electrical cabinets and filtered to pollution degree 2.

The cabinet must be closed and bonded to the safety earth to comply with NFC 15-100, IEC 364 standards or current national standards.

Distance between two TE10A units installed side by side :

10mm up to 45°C,

17.5mm above 45°C

Terminal functions:

1,3	: Controlled phase
2,4	: Direct phase
5,6	: Input
7	: '5 volt user' output
8,10	: Auxiliary power supply (option)

ORDERING CODE

Basic product	Nominal current	Nominal voltage	Input	Firing	Language	Option	End
TE10A							00

Basic product	Code	Nominal voltage
TE10A	TE10A	100V
Nominal current		
16 amps	16A	200V
25 amps	25A	230V
40 amps	40A	240V
50 amps	50A	277V

Notes:

For control by local potentiometer or by contacts, use the input product code 0V5.
For non-standard mains voltage, use the product code for the voltage immediately above and choose auxiliary power supply as an option.

Example of product coding

TE10A - 25A - 230V - 0V10 - FC - 0020

A load used at 230Vac, firing in Burst mode, output of temperature controller 0 to 10V

EXTERNAL HIGH SPEED FUSES

Nominal current of TE10A	Fuse rating	Code for fuse and fuse holder	Dimensions H x W x D (mm)
16A	20A	FU1038 16A 00	81 x 17.5 x 68
25A	32A	FU1038 25A 00	81 x 17.5 x 68
40A	50A	FU1451 40A 00	95 x 26 x 86
50A	63A	FU2258/50A/00	140 x 35 x 90

EUROTHERM LIMITED UK
Faraday Close Durrington
Worthing BN13 3PL
United Kingdom
Tel: +44 (0)1903 205277
Fax: +44 (0)1903 236465
Email: info@eurotherm.co.uk
www.eurotherm.co.uk

EUROTHERM US
741-F Miller Drive Leesburg VA 20175-8993
Tel: 1-703-443-0000 Fax: 1-703-669-1300
Email: info@eurotherm.com
www.eurotherm.com

EUROTHERM WORLDWIDE
For contact details in other countries please visit
www.eurotherm.co.uk



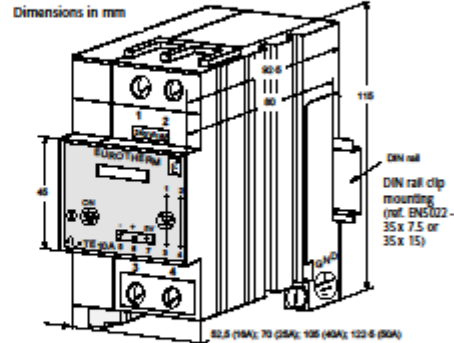
© Copyright Eurotherm Limited 2005

All rights are strictly reserved. No part of this document may be reproduced, modified, or transmitted in any form by any means, nor may it be stored in a retrieval system other than for the purpose to act as an aid in operating the equipment to which the document relates, without the prior written permission of Eurotherm Limited.

Eurotherm Limited pursues a policy of continuous development and product improvement. The specifications in this document may therefore be changed without notice. The information in this document is given in good faith, but is intended for guidance only. Eurotherm Limited will accept no responsibility for any losses arising from errors in this document.

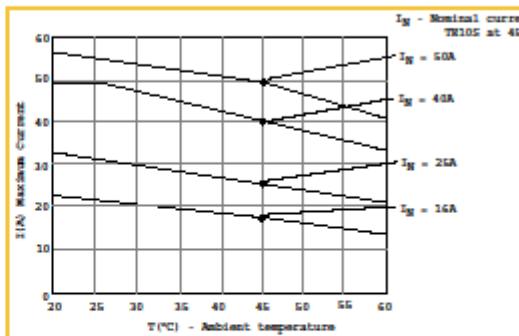
Part No. HA026155 Issue 2

Printed In England 04.05



Input	Option
0-5Vdc	0V5
0-10Vdc	0V10
4-20mA dc	4mA20
Firing	
Burst firing	FC
Single cycle	FC1
Advanced single cycle	SCA
Phase angle	PA
Language	
English	ENG
French	FRA
German	GER
Swedish	SWE
Italian	ITA
Dutch	NED
Option	
Aux power supply 115 volts	115V
230 volts	230V
Current limit (phase angle only)	CL

CURRENT DERATING



Bijlage G: AI/AO-kaart

SIEMENS

Product data sheet

6AG1234-4HE32-2XB0

SIPLUS S7-1200 SM1234 4AI/2AQ -25 ... +70 DEGREES C
WITH CONFORMAL COATING BASED ON 6ES7234-
4HE32-0XB0 . ANALOG I/O +/-10V: 14 BIT RESOLUTION 0
-20 MA: 13 BIT RESOLUTION

Supply voltage	
24 V DC	Yes
Input current	
Current consumption, <i>typ.</i>	60 mA
from backplane bus 5 V DC, <i>typ.</i>	80 mA
Power losses	
Power loss, <i>typ.</i>	2 W
Analog inputs	
Number of analog inputs	4 ; Current or voltage differential inputs
permissible input frequency for current input (destruction limit), max.	± 36 V
permissible input voltage for voltage input (destruction limit), max.	36 V
permissible input current for voltage input (destruction limit), max.	40 mA
permissible input current for current input (destruction limit), max.	40 mA
Cycle time (all channels) max.	625 μs
Input ranges	
Voltage	Yes ; ±10 V, ±6 V, ±2.5 V
Current	Yes ; 4 to 20 mA, 0 to 20 mA
Input ranges (rated values), voltages	
-10 V to +10 V	Yes
Input resistance (-10 V to +10 V)	≥9 MΩ
-2.5 V to +2.5 V	Yes
Input resistance (-2.5 V to +2.5 V)	≥9 MΩ
-5 V to +5 V	Yes
Input resistance (-5 V to +5 V)	≥9 MΩ
Input ranges (rated values), currents	
0 to 20 mA	Yes
Input resistance (0 to 20 mA)	280 Ω
4 to 20 mA	Yes
Analog outputs	
Number of analog outputs	2 ; Current or voltage

Output ranges, voltage	
-10 to +10 V	Yes
Output ranges, current	
0 to 20 mA	Yes
4 to 20 mA	Yes
Load impedance (in rated range of output)	
with voltage outputs, min.	1000 Ω
with current outputs, max.	600 Ω
Analog value creation	
Measurement principle	Differential
Integrations and conversion time/ resolution per channel	
Resolution (incl. overrange)	Voltage: 14 bits; Current : 13 bits
Integration time, parameterizable	Yes
Interference voltage suppression for interference frequency f_1 in Hz	40 dB, DC to 60 V for interference frequency 50 / 60 Hz
Smoothing of measured values	
Parameterizable	Yes
Step: None	Yes
Step: low	Yes
Step: Medium	Yes
Step: High	Yes
Errors/accuracies	
Basic error limit (operational limit at 25 °C)	
Voltage, relative to input area	+/- 0.1 %
Current, relative to input area	+/- 0.1 %
Voltage, relative to output area	+/- 0.3 %
Current, relative to output area	+/- 0.3 %
Interference voltage suppression for $f = n \times (f_1 \pm 1 \%)$, f_1 = interference frequency	
common mode voltage, max.	12 V
Interrupts/diagnostics/status information	
Alarms	
Alarms	Yes
Diagnostic alarm	Yes
Diagnostic messages	
Diagnostic functions	Yes
Monitoring the supply voltage	Yes
Wire break	Yes
Short circuit	Yes

Diagnostics indication LED	
for status of the inputs	Yes
For status of the outputs	Yes
for maintenance	Yes
Galvanic isolation	
Galvanic isolation analog outputs	
between the channels and the power supply of the electronics	No
Degree and class of protection	
IP20	Yes
Standards, approvals, certificates	
CE mark	Yes
Ambient conditions	
Extended ambient conditions	
Relative to ambient temperature-atmospheric pressure-installation altitude	Tmin ... Tmax at 1080 hPa ... 796 hPa (-1000 m ... +2000 m) // Tmin ... (Tmax - 10K) at 796 hPa ... 668 hPa (+2000 m ... +3500 m) // Tmin ... (Tmax - 20K) at 668 hPa ... 640 hPa (+3500 m ... +6000 m)
Relative humidity	
With condensation/maximum/tested in accordance with IEC 60068-2-38	100 % ; RH incl. condensation/frost (no commissioning under condensation conditions)
Resistance	
to biologically active substances / conformity with EN 60721-3-3	Yes ; Class 3B2 mold, fungus and dry rot spores (with the exception of fauna). The supplied connector covers must remain on the unused interfaces during operation!
to chemically active substances / conformity with EN 60721-3-3	Yes ; Class 3C4 (RH < 75%) incl. salt spray according to EN 60068-2-62 (degree of severity 3). The supplied connector covers must remain on the unused interfaces during operation!
to mechanically active substances / conformity with EN 60721-3-3	Yes ; Class 3S4 incl. sand, dust. The supplied connector covers must remain on the unused interfaces during operation!
Climatic and mechanical conditions for storage and transport	
Climatic conditions for storage and transport	
Free fall	
Drop height, max. (in packaging)	0.3 m ; five times, in dispatch package
Temperature	
Permissible temperature range	-40 °C to +70 °C
Mechanical and climatic conditions during operation	
Climatic conditions in operation	
Temperature	
Min.	-40 °C ; = Tmin; startup @ -25 °C
max.	70 °C
Connection method	
required front connector	Yes

Mechanics/material	
Type of housing (front)	
Plastic	Yes
Dimensions	
Width	45 mm
Height	100 mm
Depth	76 mm
Weights	
Weight, approx.	220 g
Status	Dec 30, 2013

Bijlage H: PLC-programma

1	2	3	4																																																												
A	<h2>Programma 5 Variotherm</h2> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4">Programma 5 Variotherm Properties</th> </tr> <tr> <th colspan="4">General</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Name</td> <td>Programma 5 Variotherm</td> <td>Number</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>Type</td> <td>FC</td> <td>Language</td> <td>LAD</td> </tr> <tr> <th colspan="4">Information</th> </tr> <tr> <td>Title</td> <td></td> <td>Author</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Comment</td> <td></td> <td>Family</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Version</td> <td>0.1</td> <td>User-defined ID</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Data type</th> <th>Offset</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Input</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Output</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>InOut</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Temp</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Return</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Ret_Val</td><td>Void</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>			Programma 5 Variotherm Properties				General				Name	Programma 5 Variotherm	Number	7	Type	FC	Language	LAD	Information				Title		Author		Comment		Family		Version	0.1	User-defined ID		Name	Data type	Offset	Comment	Input				Output				InOut				Temp				Return				Ret_Val	Void		
Programma 5 Variotherm Properties																																																															
General																																																															
Name	Programma 5 Variotherm	Number	7																																																												
Type	FC	Language	LAD																																																												
Information																																																															
Title		Author																																																													
Comment		Family																																																													
Version	0.1	User-defined ID																																																													
Name	Data type	Offset	Comment																																																												
Input																																																															
Output																																																															
InOut																																																															
Temp																																																															
Return																																																															
Ret_Val	Void																																																														
B	<p>Network 1: Opwarmen</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Address</th> <th>Type</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"opwarmtemperatuur"</td> <td>%IW3</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"begin opwarmen"</td> <td>%M14.0</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"sensor heater"</td> <td>%IW2</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Symbol	Address	Type	Comment	"opwarmtemperatuur"	%IW3	Int		"begin opwarmen"	%M14.0	Bool		"sensor heater"	%IW2	Int																																													
Symbol	Address	Type	Comment																																																												
"opwarmtemperatuur"	%IW3	Int																																																													
"begin opwarmen"	%M14.0	Bool																																																													
"sensor heater"	%IW2	Int																																																													
C	<p>Network 2:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> </div>																																																														
D	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Address</th> <th>Type</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"opwarmtemperatuur"</td> <td>%IW3</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"begin opwarmen"</td> <td>%M14.0</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"sensor heater"</td> <td>%IW2</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Symbol	Address	Type	Comment	"opwarmtemperatuur"	%IW3	Int		"begin opwarmen"	%M14.0	Bool		"sensor heater"	%IW2	Int																																													
Symbol	Address	Type	Comment																																																												
"opwarmtemperatuur"	%IW3	Int																																																													
"begin opwarmen"	%M14.0	Bool																																																													
"sensor heater"	%IW2	Int																																																													
E	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px 0;"> </div>																																																														
F	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Owner</td> <td style="width: 40%;">Project name cascade</td> <td style="width: 30%;">Date 1/7/2014</td> </tr> <tr> <td>Operator</td> <td colspan="2">Project Path D:\Test\casade</td> </tr> <tr> <td>Designed By</td> <td colspan="2">Location</td> </tr> <tr> <td>Checked By</td> <td>Description 1st</td> <td>Language en-US</td> </tr> <tr> <td>Approved By</td> <td>Description 2nd</td> <td>Version</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1st View</td> <td>Sheet 1 - 1</td> </tr> </table>			Owner	Project name cascade	Date 1/7/2014	Operator	Project Path D:\Test\casade		Designed By	Location		Checked By	Description 1st	Language en-US	Approved By	Description 2nd	Version		1st View	Sheet 1 - 1																																										
Owner	Project name cascade	Date 1/7/2014																																																													
Operator	Project Path D:\Test\casade																																																														
Designed By	Location																																																														
Checked By	Description 1st	Language en-US																																																													
Approved By	Description 2nd	Version																																																													
	1st View	Sheet 1 - 1																																																													

1	2	3	4																																																										
A	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Address</th> <th>Type</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"opwarmtemperatuur"</td> <td>%IW3</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"sensor matrijs"</td> <td>%IW1</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"stop opwarmen"</td> <td>%M14.1</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Network 3:</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Address</th> <th>Type</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"begin opwarmen"</td> <td>%M14.0</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"stop opwarmen"</td> <td>%M14.1</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"klaar met inspuiten"</td> <td>%I4.0</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"heater"</td> <td>%Q0.5</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Network 4: inspuiten</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Address</th> <th>Type</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"signaal matrijs gesloten"</td> <td>%I0.2</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"stop opwarmen"</td> <td>%M14.1</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"klaar met inspuiten"</td> <td>%I4.0</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"inspuiten"</td> <td>%Q0.6</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Symbol	Address	Type	Comment	"opwarmtemperatuur"	%IW3	Int		"sensor matrijs"	%IW1	Int		"stop opwarmen"	%M14.1	Bool		Symbol	Address	Type	Comment	"begin opwarmen"	%M14.0	Bool		"stop opwarmen"	%M14.1	Bool		"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool		"heater"	%Q0.5	Bool		Symbol	Address	Type	Comment	"signaal matrijs gesloten"	%I0.2	Bool		"stop opwarmen"	%M14.1	Bool		"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool		"inspuiten"	%Q0.6	Bool			
Symbol	Address	Type	Comment																																																										
"opwarmtemperatuur"	%IW3	Int																																																											
"sensor matrijs"	%IW1	Int																																																											
"stop opwarmen"	%M14.1	Bool																																																											
Symbol	Address	Type	Comment																																																										
"begin opwarmen"	%M14.0	Bool																																																											
"stop opwarmen"	%M14.1	Bool																																																											
"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool																																																											
"heater"	%Q0.5	Bool																																																											
Symbol	Address	Type	Comment																																																										
"signaal matrijs gesloten"	%I0.2	Bool																																																											
"stop opwarmen"	%M14.1	Bool																																																											
"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool																																																											
"inspuiten"	%Q0.6	Bool																																																											
D	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Address</th> <th>Type</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"signaal matrijs gesloten"</td> <td>%I0.2</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"stop opwarmen"</td> <td>%M14.1</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"klaar met inspuiten"</td> <td>%I4.0</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"inspuiten"</td> <td>%Q0.6</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Network 5:</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Address</th> <th>Type</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"sensor matrijs"</td> <td>%IW1</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Symbol	Address	Type	Comment	"signaal matrijs gesloten"	%I0.2	Bool		"stop opwarmen"	%M14.1	Bool		"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool		"inspuiten"	%Q0.6	Bool		Symbol	Address	Type	Comment	"sensor matrijs"	%IW1	Int																															
Symbol	Address	Type	Comment																																																										
"signaal matrijs gesloten"	%I0.2	Bool																																																											
"stop opwarmen"	%M14.1	Bool																																																											
"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool																																																											
"inspuiten"	%Q0.6	Bool																																																											
Symbol	Address	Type	Comment																																																										
"sensor matrijs"	%IW1	Int																																																											
F	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td rowspan="2" style="width:30%;">Owner</td> <td style="width:40%;">Project name</td> <td style="width:30%;">cascade</td> <td style="width:10%;">Date</td> <td>1/7/2014</td> </tr> <tr> <td>Operator</td> <td>Project Path</td> <td colspan="2">D:\Testcascade</td> </tr> <tr> <td>Designed By</td> <td colspan="4">Location</td> </tr> <tr> <td>Checked By</td> <td colspan="2">Description 1st</td> <td colspan="2">Language</td> </tr> <tr> <td>Approved By</td> <td colspan="2">Description 2nd</td> <td>en-US</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>1st View</td> <td>Version</td> <td colspan="2">Sheet 1 - 2</td> </tr> </table>			Owner	Project name	cascade	Date	1/7/2014	Operator	Project Path	D:\Testcascade		Designed By	Location				Checked By	Description 1st		Language		Approved By	Description 2nd		en-US			1st View	Version	Sheet 1 - 2																														
Owner	Project name	cascade	Date		1/7/2014																																																								
	Operator	Project Path	D:\Testcascade																																																										
Designed By	Location																																																												
Checked By	Description 1st		Language																																																										
Approved By	Description 2nd		en-US																																																										
	1st View	Version	Sheet 1 - 2																																																										

1	2	3	4																																				
A	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Address</th> <th>Type</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"klaar met inspuiten"</td> <td>%I4.0</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"koelen"</td> <td>%Q0.7</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"koeltemperatuur"</td> <td>%IW5</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Network 6:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Symbol</th> <th>Address</th> <th>Type</th> <th>Comment</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>"sensor matrijs"</td> <td>%IW1</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"klaar met inspuiten"</td> <td>%I4.0</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"openen"</td> <td>%Q1.0</td> <td>Bool</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"koeltemperatuur"</td> <td>%IW5</td> <td>Int</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Symbol	Address	Type	Comment	"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool		"koelen"	%Q0.7	Bool		"koeltemperatuur"	%IW5	Int		Symbol	Address	Type	Comment	"sensor matrijs"	%IW1	Int		"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool		"openen"	%Q1.0	Bool		"koeltemperatuur"	%IW5	Int	
Symbol	Address	Type	Comment																																				
"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool																																					
"koelen"	%Q0.7	Bool																																					
"koeltemperatuur"	%IW5	Int																																					
Symbol	Address	Type	Comment																																				
"sensor matrijs"	%IW1	Int																																					
"klaar met inspuiten"	%I4.0	Bool																																					
"openen"	%Q1.0	Bool																																					
"koeltemperatuur"	%IW5	Int																																					
B																																							
C																																							
D																																							
E																																							
F	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Owner</td> <td style="width: 40%;">Project name cascade</td> <td style="width: 30%;">Date 1/7/2014</td> </tr> <tr> <td>Operator</td> <td colspan="2">Project Path D:\Test\cascade</td> </tr> <tr> <td>Designed By</td> <td colspan="2">Location</td> </tr> <tr> <td>Checked By</td> <td>Description 1st</td> <td>Language en-US</td> </tr> <tr> <td>Approved By</td> <td>Description 2nd</td> <td>Version</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1st View</td> <td>Sheet 1 - 3</td> </tr> </table>			Owner	Project name cascade	Date 1/7/2014	Operator	Project Path D:\Test\cascade		Designed By	Location		Checked By	Description 1st	Language en-US	Approved By	Description 2nd	Version		1st View	Sheet 1 - 3																		
Owner	Project name cascade	Date 1/7/2014																																					
Operator	Project Path D:\Test\cascade																																						
Designed By	Location																																						
Checked By	Description 1st	Language en-US																																					
Approved By	Description 2nd	Version																																					
	1st View	Sheet 1 - 3																																					

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Vergelijkende studie tussen variothermisch en hybride variothermisch spuitgietsproces

Richting: **master in de industriële wetenschappen: elektromechanica**

Jaar: **2014**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Gorissen, Siemen

Driessen, Bea

Datum: **23/01/2014**