

Woord vooraf

Het laatste proefwerk dat studenten moeten maken om te kunnen afstuderen als industrieel ingenieur elektromechanica is de masterproef. In het vierde jaar van de opleiding is dit de kans om de verworven kennis, inzichten en capaciteiten te tonen in dit 'onderzoek'. In deze opleiding is er geen verplichte stage maar wij hebben het voorrecht gehad om onze thesis te doen in ZF Wind Power gelegen te Lommel. Zo hebben we van de bedrijfswereld kunnen proeven en wat van het bedrijfsleven kunnen ervaren. Hiervoor willen we graag ing. Kristof Schraepen bedanken om dit mogelijk te maken.

Verder willen we onze externe promotoren bedanken voor het mede mogelijk maken van deze masterproef. Met name onze promotor ing. Jan Claes die ons begeleidde, ons kennis liet maken met de processen in de harderij van het bedrijf, ons de nodige informatie verschafte, voor ons bij te sturen en ons constructieve feedback te bezorgen. Onze copromotor ing. Kristof Schraepen willen we ook bedanken voor het toezicht op de verwerking van de componenten doorheen de fabriek.

We willen onze interne promotor prof. dr. ir. Albert Van Bael ook graag bedanken voor de inhoudelijk opbouwende terugkoppeling.

Tot slot willen we nog de andere werknemers in ZF bedanken die ons uitleg gaven, die ons geholpen hebben met de opbouw van de verschillende testen en voor de fijne werksfeer zorgden.

Gedurende het verloop van dit eindwerk hebben we veel bijgeleerd wat ons ongetwijfeld zal helpen in onze verdere carrière als industrieel ingenieur.

Tot slot wensen we u evenveel plezier toe met het lezen van deze scriptie als wij hadden met deze unieke en leerrijke ervaring.

Sebastiaan Oversteyns & Wim Gubbelmans

Diepenbeek, Lommel, juni 2018

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	7
Lijst van figuren	9
Abstract	13
Abstract in English	15
1 Inleiding	17
1.1 Situering	17
1.2 Probleemstelling.....	19
1.3 Doelstellingen.....	20
1.4 Materiaal en methode.....	21
1.5 Vooruitblik.....	23
2 Procesinformatie	25
2.1 Workflow component.....	25
2.1.1 Standaard manier stapelen.....	25
2.1.2 Hardingsproces.....	25
2.1.3 Hardheidsmetingen.....	27
2.1.4 Tolerantieklassen.....	28
2.2 Hardingsproces vervormingen	29
2.3 Gestellen informatie	31
2.4 Tandwiel informatie.....	33
3 Experimentele test 1	35
3.1 Opbouw.....	35
3.1.1 Totale massa	36
3.1.2 Positionering componenten	36
3.1.3 Veiligheid.....	39
3.2 Meetresultaten.....	39
3.2.1 Conen	39
3.2.2 Kopcirkels	47
3.2.3 Resultaten	53
3.3 Conclusie	54

4	Technische verdieping	55
4.1	Bepaling van de precompensatie	55
4.1.1	Compensatie conen	55
4.1.2	Compensatie kopcirkels	55
4.1.3	Hardingsdiepte	56
4.2	Invloed op vervorming	57
4.2.1	Microstructuren	57
4.2.2	Staaltype van het gestel	60
4.2.3	Staaltype van component 027-F1245E021	61
4.2.4	Probleem verschil in thermische uitzettingscoëfficiënten	63
4.3	Ondersteuning voor grotere bewegingsvrijheid	69
4.3.1	Concept 1: combinatie vaste en kantelende ondersteuning	69
4.3.2	Concept 2: onderliggende dummy ring	71
4.4	Procesopbouw	72
4.4.1	Procestekening kantelende ondersteuning	73
4.4.2	Procestekening dummy ringen	73
4.4.3	Tooling voor de positionering van de kantelende ondersteuning	75
4.4.4	Tooling voor de ondersteuning tussen de componenten	76
4.4.5	Borging van de componenten op de boom	77
5	Experimentele test 2	79
5.1	Opbouw	79
5.1.1	Totale massa	81
5.1.1	Positionering componenten	81
5.1.2	Veiligheid	84
5.2	Meetresultaten	86
5.2.1	Conen	86
5.2.2	Kopcirkels	92
5.2.3	Resultaten	97
5.3	Conclusie	98
6	Kosten-batenanalyse	99
6.1	Berekening om de kost per component te bepalen	99
6.1.1	Alternatieve plaat voor de bevestiging van de draadstangen	105
6.2	Conclusie	105

7 Conclusie	107
Bronnen.....	109
Bijlagen.....	109
Bijlage A : Voorstellen opbouwconfiguraties	111
Bijlage B: Voorbeeld metingen coon (LM1167)	124
Bijlage C: Voorbeeld metingen kopcirkel (LM1167)	132
Bijlage D: 2D tekeningen ondersteuning.....	134
Bijlage E: 2D tekeningen tooling en borging draadstang.....	139
Bijlage F: Materiaalgegevens	145

Lijst van tabellen

Tabel 1: Gegevens component 027-F1245E021	20
Tabel 2: Freesdieptes en kwaliteitseisen koolstofgehalte	28
Tabel 3: Tolerantieklassen tandwijdte met Wk de theoretische maat met modulus één.....	29
Tabel 4: Samenstelling Cronite HR32.....	31
Tabel 5: Informatie gestellen, bussen en palen	32
Tabel 6: Samenstelling 18CrNiMo 7-6	33
Tabel 7: Functionele maten voor stapeling planeetwiel.....	33
Tabel 8: Totale massa opbouw test 1	36
Tabel 9: Gemeten overmaat conen voorbeeld bovenste en onderste coon.....	40
Tabel 10: Overmaat, krimp, overblijvende hardingsdiepte voor maximum waarden.....	41
Tabel 11: Hardingsdiepte conen test 1	44
Tabel 12: Verdeelde overmaat conen.....	44
Tabel 13: Kopcirkels minimale en maximale diameter referentiebatch.....	47
Tabel 14: Kopcirkels minimale en maximale diameter eerste stapeling test.....	48
Tabel 15: Spreiding kopcirkels.....	50
Tabel 16: Overzicht resultaat componenten 027-F1245E021.....	53
Tabel 17: Vooropgestelde min- en max-waarde voor de kopcirkels na het harden	56
Tabel 18: Legeringselementen van 1.4849 in wt% (Bijlage F: Cronite HR32).....	60
Tabel 19: Thermische uitzetting van 1.4849	61
Tabel 20: Legeringselementen van 1.6587 in wt%	61
Tabel 21: Thermische uitzettingscoëfficiënten van 1.6587	62
Tabel 22: Grootste carbonisatie staalsoorten voor medium- en grote tandwielen in verschillende geografische markten	62
Tabel 23: Legeringssamenstelling van 1.4845 in %, het overblijvende is Fe	70
Tabel 24: Totale massa opbouw test 2.....	81
Tabel 25: Hardingsdiepte conen test 2	86
Tabel 26: Verdeelde overmaat conen test 2	86
Tabel 27: Kopcirkels minimale en maximale diameter tweede test in mm	92
Tabel 28: Spreiding van de kopcirkeldiameters van de tweede testbatch	94
Tabel 29: Gemiddelde spreiding vergeleken tussen zelfde niveaus en verschillende testen	96
Tabel 30: eindresultaten voor de componenten van de tweede testbatch (027-F1245E021)	97
Tabel 31: Vergelijking kosten per component voor batchgrootte 18, 24 en 26 met hardingsdiepte 2,77mm	101

Tabel 32: Verschil in kosten voor de spinnen	101
Tabel 33: De kosten van de spinnen in rekening gebracht en omgezet naar de kost per component	101
Tabel 34: Kostentabel van de verschillende ondersteuning, omgerekend naar de kost per component voor een batch van 24.....	102
Tabel 35: Kosten ondersteuning per component.....	102
Tabel 36: Totale kosten per component vergeleken tussen de twee type van ondersteuning	103
Tabel 37: Kost per component in euro en de besparing per component in procent indien gebruik gemaakt wordt van een alternatieve plaat voor de bevestiging van de draadstangen.....	103
Tabel 38: Samenvattende tabel kostenbesparing component 027-F1245E021	104

Lijst van figuren

Figuur 1: Opstelling van een boom met aanduiding van onderdelen	18
Figuur 2: 1000-gestel met voet en zes segmenten.....	18
Figuur 3: 1450-gestel met voet en zes segmenten.....	18
Figuur 4: 1700-gestel met voet en een spin, beide met segmenten.....	18
Figuur 5: Huidige opbouw boom 1450 met component 027-F1245E021	19
Figuur 6: Automatische 3D coördinaatmeetmachine in een meetafdeling van ZF.....	21
Figuur 7: Ovencyclus voorbeeld test 1.....	26
Figuur 8: Hardingsdiepte berekening voorbeeld test 1	27
Figuur 9: Backlash tandwiel	28
Figuur 10: Close-up bovenkant paal en kal.....	31
Figuur 11: Nummering segmenten voet en spin.....	32
Figuur 12: Planeetwiel 027-F1245-E021 op 3D-coördinaatmeetmachine.....	33
Figuur 13: Voorstel 28 componenten.....	35
Figuur 14: Opbouw 24 componenten (excl. draadstangen).....	35
Figuur 15: Volledig opgebouwde boom.....	35
Figuur 16: Tandprofiel.....	36
Figuur 17: Tandwiel oplegrand.....	36
Figuur 18: Positie tandwielen voet (LM1167-LM1778).....	37
Figuur 19: Overzicht positie componenten.....	38
Figuur 20: Draadstang door componenten.....	39
Figuur 21: Draadstangbevestiging.....	39
Figuur 22: Metingen conen fout	41
Figuur 23: Hardingsdiepte, overmaat coon	42
Figuur 24: Hardheidsmeting coon LM1168 (destructieve test).....	43
Figuur 25: Minimum, maximum overmaat en spreiding.....	46
Figuur 26: Maxima kopcirkels top, middle en under per niveau	49
Figuur 27: Minima kopcirkels top, middle en under per niveau.....	49
Figuur 28: Spreiding diameter kopcirkels referentiebatch en testbatch (per niveau).....	51
Figuur 29: Maxima kopcirkels referentiebatch.....	51
Figuur 30: Minima kopcirkels referentiebatch.....	52
Figuur 31: Ijzer-koolstof fasetoestandsdiagram	57
Figuur 32: KRG-kristalrooster links en KVG-kristalrooster rechts.....	58

Figuur 33: Kristal- en microstructuur voor een 0,6% koolstofstaal voor en na afschrikken vanuit het austenietgebied	58
Figuur 34: Voorbeeld van een CCT-diagram (werkstofnummer 1.6587)	59
Figuur 35: Voorbeeld van koolstofatomen die zijn opgelost in een KRG-structuur die bestaat uit Fe-atomen	60
Figuur 36: Ijzer-koolstofdiagram waarop een blauwe lijn staat op 0,2% koolstof	63
Figuur 37: Fasediagram van de cronite-legering gemaakt in 'Thermo-Calc'-software	64
Figuur 38: Fasetoestandsdiagrammen van cronite-legering, links de temperatuur i.f.v. Nikkel, rechts de temperatuur i.f.v. Chroom	65
Figuur 39: Dichtheidsverschil bij faseovergang van ijzer	66
Figuur 40: Vaste ondersteuning.....	69
Figuur 41: Doorsnede kantelend mechanisme.....	69
Figuur 42: Kantelende ondersteuning gekanteld (tandwiel opgeschoven naar links).....	69
Figuur 43: Kantelende ondersteuning gekanteld (tandwiel opgeschoven naar rechts).....	69
Figuur 44: Kantelende ondersteuning in 'rust'-positie.....	69
Figuur 45: Onderliggende ring, sectiedoorsnede	71
Figuur 46: LM-nummer op de bovenzijde van een component.....	72
Figuur 47: Verschil in randbreedte van de verhoging.....	72
Figuur 48: Bovenaanzicht voet met ondersteuning	73
Figuur 49: Bovenaanzicht voet met dummy ringen	73
Figuur 50: Procestekening kantelende ondersteuning	74
Figuur 51: Tooling voor de positionering van de ondersteuning van het kantelende concept.....	75
Figuur 52: Tooling om ondersteuningsblokjes te plaatsen op component 027-F1245E021.....	76
Figuur 53: Tooling om component 027-F1245E021 correct en snel te positioneren.....	76
Figuur 54: Doorsnede toolings bij plaatsing twee componenten op elkaar	77
Figuur 55: Borging doormiddel van draadstang (M20) onderste stapeling	78
Figuur 56: Borging van de bovenste stapeling d.m.v. een M20 draadstang	78
Figuur 57: Kantelende ondersteuningstype, viermaal gepositioneerd op de voet.....	79
Figuur 58: Twee dummy ringen en kantelende ondersteuning gepositioneerd op de spin.....	79
Figuur 59: Ondersteunings- blokjes tussen de verschillende componenten	80
Figuur 60: Totale opbouw van de tweede testbatch voor het hardingsproces.....	80
Figuur 61: Component 027-F1245E021 gepositioneerd op een kantelende ondersteuning	82
Figuur 62: Borglip van het vaste gedeelte van de kantelende ondersteuning	82
Figuur 63: Component 027-F1245E021 gepositioneerd op de vaste ondersteuning van het kantelende type	82

Figuur 64: Dummy ring met drie ondersteuningsblokjes.....	82
Figuur 65: Component 027-F1245E021 gepositioneerd bovenop de dummy ring.....	82
Figuur 66: Posities van de stapelingen	82
Figuur 67: Verduidelijking type ondersteuning onder de verschillende stapelingen.....	83
Figuur 68: Overzicht positionering van alle componenten op de boom, duidelijk gemaakt met hun LM-nummers	83
Figuur 69: Bevestiging draadstang 1 aan de bovenzijde van de spin	84
Figuur 70: bevestiging draadstang 2 aan de onderzijde van de spin	84
Figuur 71: Bevestiging draadstang 1 aan de onderzijde van de voet.....	84
Figuur 72: Draadstang 1 tussen de voet en de spin.....	84
Figuur 73: Draadstang tussen voet en spin, speling t.o.v. de conen.....	84
Figuur 74: Draadstang tussen spin en spin.....	84
Figuur 75: Het 'vast' gedeelte van de kantelende ondersteuning.....	85
Figuur 76: Ondersteuningsblokje dat tussen de componenten wordt geplaatst.....	85
Figuur 77: Dummy schijf.....	85
Figuur 78: Onderzijde van het stuk op de afbeelding links ervan	85
Figuur 79: Plaat van de kantelende ondersteuning waarin het kantelende onderdeel geplaatst wordt.....	85
Figuur 80: Kantelende 'rol' met zicht op de bovenzijde	85
Figuur 81: Zijaanzicht van het kantelende gedeelte.....	85
Figuur 82: Onderzijde van het kantelende gedeelte.....	85
Figuur 83: Minimale en Maximale overmaat van de conen van testbatch 2	88
Figuur 84: Spreiding op de overmaat van de conen van testbatch 2	88
Figuur 85: Vergelijking van de minimale en maximale overmaat van het onderste niveau tussen de eerste testbatch en de tweede met als referentie een standaardbatch.....	89
Figuur 86: Vergelijking van de minimale en maximale overmaat van het middelste niveau tussen de eerste testbatch en de tweede met als referentie een standaardbatch.....	89
Figuur 87: Vergelijking van de minimale en maximale overmaat van het bovenste niveau tussen de eerste testbatch en de tweede met als referentie een standaardbatch.....	89
Figuur 88: Spreiding op de overmaat van de conen, testbatch 2 vergeleken met testbatch 1 en een referentiebatch	90
Figuur 89: De gemiddelde overmaat max en min per niveau, vergeleken tussen de twee testbatches en de referentiebatch.....	91
Figuur 90: Maximum kopcirkels 'up', 'middle' en 'under' per niveau.....	93
Figuur 91: Minimum kopcirkels 'up', 'middle' en 'under' per niveau	94

Figuur 92: Spreiding van de kopcirkels vergeleken tussen de testbatches en de referentiebatch duidelijk per niveau	96
Figuur 93: Alternatieve plaat voor bevestiging van draadstangen.....	105

Abstract

ZF Wind Power in Lommel ontwikkelt en bouwt transmissiekasten voor windmolens. In de harderij van het bedrijf worden assen en tandwielen gehard. De meest kritische factor die de afdeling dient te waarborgen is de vervorming van componenten, die moet zo beperkt en constant mogelijk gehouden worden. De toenemende vraag naar componenten zorgt ervoor dat de batchgrootte per ovenlading omhoog moet. Het doel is de batchgrootte verhogen voor planeetwielen van het type 027-F1245E021 zonder de vervormingen te vergroten. Hierop wordt uiteindelijk een kosten-batenanalyse uitgevoerd.

Verschillende mogelijkheden om een grotere batchgrootte te bekomen, worden geschetst in een CAD-omgeving (PTC Creo). Hieruit blijkt dat het op elkaar stapelen van componenten leidt tot de grootste batchgrootte verhoging maar door de hogere belasting op de onderste componenten neemt de vervorming tijdens het hardingsproces toe. De vervormingen van de kopcirkels, conen en tandprofielen worden geanalyseerd en door middel van specifiek ontworpen ondersteuning worden deze beperkt.

De onderste componenten in de stapeling vertonen de grootste vervormingen. Bij de eerste testbatch overschrijden de kopcirkels van de onderste componenten de vooropgestelde toleranties. De tweede testbatch die voorzien was van de specifieke ondersteuning die meer bewegingsvrijheid toelaten, is geanalyseerd en had positieve resultaten betreffende de vervorming. De batchgrootte is succesvol verhoogd met 33%. Dit leidt tot een daling van de proceskosten per component in de harderij van 30%.

Abstract in English

ZF Wind Power in Lommel develops and constructs transmission systems for wind turbines. In the heat treatment department, different axles and gears are hardened. The most critical factor in this department is to limit the distortions of the components. These must be kept to a minimum and must be as consistent throughout the batch as possible. The rising demand of components requires an increase of batch size per furnace load. The goal of this master's thesis is to increase the batch size of the planetary gear 027-F1245E021 without increasing the deformations and to perform a cost-benefit analysis on the results.

The different possibilities to achieve an increase in batch size are sketched in a CAD-environment (PTC Creo). This shows that stacking components has the biggest improvements but the higher load on the bottom components increases the deformation during the heat treatment. The deformation of the addendum circle, cones and tooth profile is analysed and limited with the help of specifically designed three-point supports.

The components on the bottom layer of a stack show the largest distortions. Components on the bottom layer of the first testbatch had addendum circle values exceeding the tolerances. In the second test the specific support system was used to increase the freedom of movement. The results indicate an improvement of the distortions compared to the first test. The batch size has been successfully increased by 33% and the process costs per component are lowered by 30%.

1 Inleiding

1.1 Situering

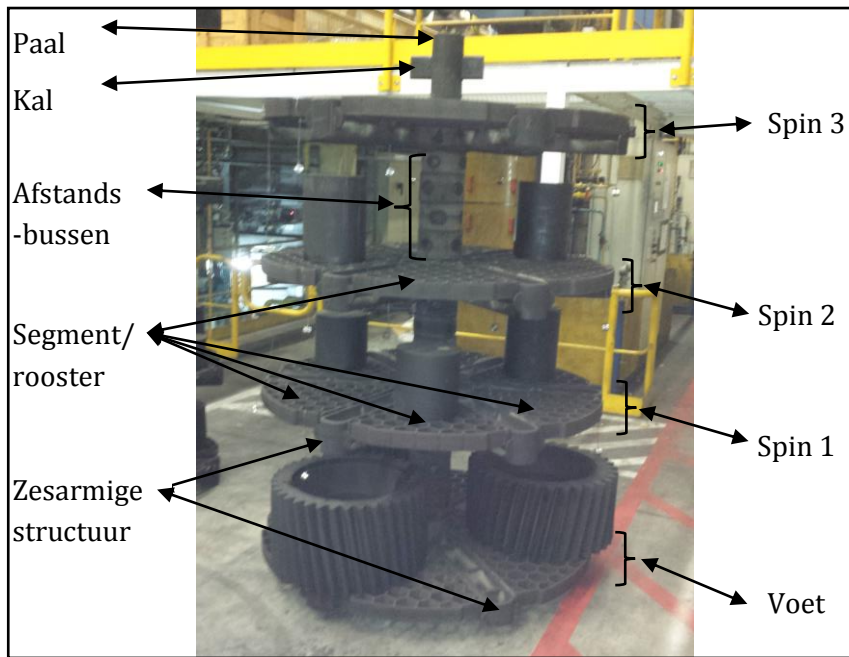
ZF is een Duits bedrijf dat opgericht werd in 1915. ZF is een wereldleider op het gebied van aandrijflijn- en chassistechologie en actieve en passieve veiligheidstechnologie. Wereldwijd heeft het bedrijf ongeveer 146 000 personeelsleden verdeeld over een 230 tal locaties in ongeveer 40 landen. Hun hoofdkantoor is gelegen in Friedrichshafen, Duitsland. Ongeveer 100 jaar na de oprichting, in 2017 behaalde het bedrijf een omzet van 36,4 miljard euro.

Het bedrijf produceert aandrijflijnen en chassis voor de auto-industrie. Ook voor industriële toepassingen produceert het bedrijf aandrijflijnen onder andere voor constructie- en graafmachines en landbouwvoertuigen. Aandrijfsystemen voor schepen, transmissiekasten voor windmolens, ontwikkeling van testsystemen voor onder andere transmissiekasten voor windmolens worden eveneens ontwikkeld.

ZF Wind Power Antwerpen gelegen in Lommel, ontwikkelt en bouwt transmissiekasten voor windturbines. In één afdeling van het bedrijf, de harderij, worden (relatief) zachte assen en tandwielen uit laagkoolstofstaal voorzien van extra koolstof aan het oppervlak. Dat gebeurt via gascarbonisatie, een proces waarbij allerlei componenten op hoge temperatuur worden behandeld om het koolstofgehalte in het oppervlak te doen stijgen. De ovens worden op een temperatuur van 925°C, 940°C of 970°C gebracht. Als deze temperatuur bereikt is, wordt er koolstof in gasvorm in de oven gelaten. Dit gas wordt dan in de oven rond geblazen d.m.v. een ventilator. Na gascarbonatie op een temperatuur van 950°C (tijd is afhankelijk van de grootte van de component, de module en de gewenste opkolingsdiepte, $24u < t < 100u$), worden de componenten afgeschrikt in een oliebad op 80°C. Na harden door afschrikken vanuit de austenietfase en temperen wordt een hogere oppervlaktehardheid en slijtvastheid van het oppervlak (met voldoende schokbestendigheid) verkregen. Deze verbeteringen zijn noodzakelijk voor de duurzaamheid van het materiaal. Tijdens het hardingsproces vervormen de assen en tandwielen door kruip en door grote temperatuurverschillen op zeer korte tijd. Nadien worden de componenten (in cel hard) verspaand en geslepen tot de uiteindelijke afmetingen die vereist zijn volgens de R&D-tekening.

Alvorens de componenten kunnen behandeld worden in een oven dienen deze opgebouwd te worden op specifieke gestellen (bomen). De opbouw van deze componenten op de bomen is cruciaal om de vervorming minimaal te houden en de vorm en afmetingen zo constant mogelijk te houden. De opbouw gebeurt met behulp van ondersteuning op de roosters en spinnen. Wegens vroegere praktijktesten wordt er gestreefd naar een driepuntsondersteuning omdat deze de beste testresultaten had. De drie punten zijn 120° t.o.v. elkaar gepositioneerd. Een driepuntsondersteuning is nodig om de componenten stabiel te kunnen plaatsen met hun vlakke kant op de voet of spinnen.

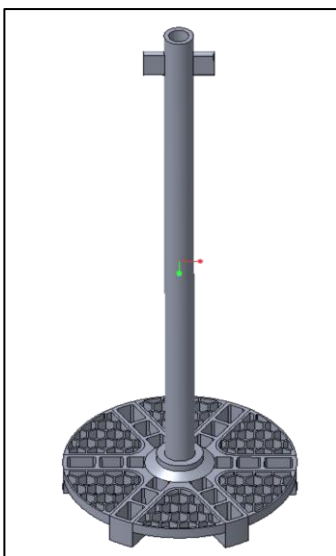
Binnen ZF Wind Power worden tandwielen, gestellen en zesarmige draagstructuren ook wel respectievelijk componenten, bomen, voeten en spinnen genoemd (zie Figuur 1).



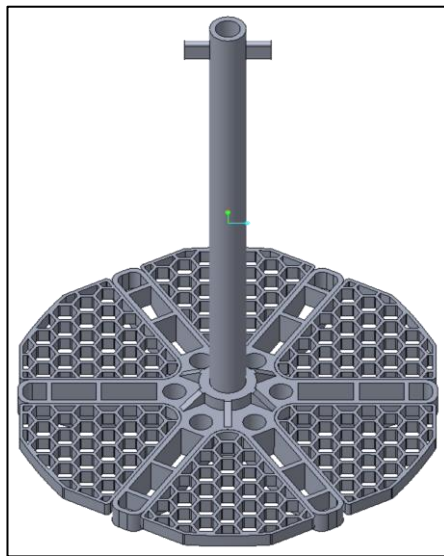
Figuur 1: Opstelling van een boom met aanduiding van onderdelen

Een gestel wordt opgebouwd door de voet over een paal te schuiven zodat de voet onderaan het gestel zit. De spinnen worden gebruikt om meerdere niveaus te creëren in een boom. De voet en de spinnen worden door middel van afstandsbussen t.o.v. elkaar gepositioneerd, evenals de spinnen onderling. Op deze zesarmige structuren worden segmenten gelegd. De segmenten hebben een honingraatstructuur. Dankzij deze structuur wordt er gewicht en materiaal bespaard en wordt de olieflow gegarandeerd. Op elke voet en spin worden zes segmenten gelegd zodat deze een cirkelvormige vorm krijgen. Hiermee kunnen verschillende bomen opgebouwd worden met meer of minder niveaus, afhankelijk van de componenten die gehard moeten worden.

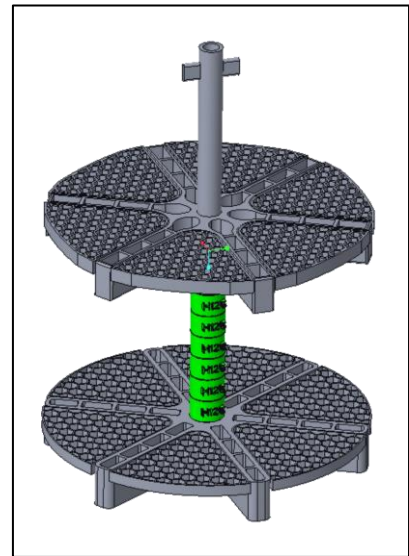
Er zijn drie types van gestellen. Gestellen van het eerste type zijn smal en hoog. Dat gestel heeft een diameter van één meter en een hoogte van drie meter (zie Figuur 2). Het tweede type gestel is breder en minder hoog. Dat gestel heeft een diameter van 1,45m en een hoogte van 2,4m (zie



Figuur 2: 1000-gestel met voet en zes segmenten



Figuur 3: 1450-gestel met voet en zes segmenten



Figuur 4: 1700-gestel met voet en een spin, beide met segmenten

Figuur 3). Het laatste type heeft dezelfde hoogte van het vorige gestel maar heeft nog een grotere diameter, nl. 1,7m (zie Figuur 4).

Deze gestellen worden respectievelijk de 1000, de 1450 en de 1700mm genoemd. In de harderij wordt gebruik gemaakt van putovens ('pit type furnaces'). Deze worden opgedeeld in twee types gebaseerd op hun afmetingen. De 1450- en de 1700-gestellen worden in eenzelfde type oven (IVA GROOT) gebruikt terwijl voor de 1000-gestellen een kleiner type oven (IVA KLEIN en CIEFFE) gebruikt wordt.

De kostprijs van de spinnen is zeer hoog. De prijs voor één spin met segmenten voor een 1000-gestel bedraagt ongeveer 5 100 euro en voor de twee andere type gestellen is dit ongeveer 13 500 euro. De reden van de hoge prijs wordt bepaald door het soort materiaal waaruit het vervaardigd wordt. Dat materiaal is Cronite (37Ni18Cr/Nb HR32 of werkstofnummer 1.4849) met de eigenschap van een relatief lage kruip bij een temperatuur van 900 °C. Elke spin kan gemiddeld 100 keer een cyclus (oven, afschrikken en temperen) ondergaan, voordat deze aan vervanging toe is.

Momenteel worden er geen componenten rechtstreeks op elkaar gelegd. Dit betekent dat men op de voet en elke spin daarboven telkens maar één component hoog legt (zie Figuur 5).



Figuur 5: Huidige opbouw boom 1450 met component 027-F1245E021

1.2 Probleemstelling

De mogelijkheid is er om meerdere componenten in de hoogte op elkaar te stapelen op de spinnen en voeten omdat de gestelonderdelen een hogere belasting toelaten dan deze die momenteel gebruikt worden. Dit zou de hoeveelheid componenten op één boom verhogen. Daardoor verlaagt ook het aantal gebruikte spinnen op één boom. Het stapelen van de componenten zou dus de kost aan spinnen doen dalen terwijl de batchgrootte per cyclus stijgt.

Het stapelen van deze componenten is echter niet zo eenvoudig. Er moet rekening gehouden worden met de extra vervorming van de componenten omdat deze zwaarder belast worden door de stapel erbovenop. Ook de indrukking op de steunpunten van de component kan te groot worden door de zware belasting en hoge temperaturen. De manier van stapelen is van belang om de stabiliteit van de constructie te garanderen en de maximale belasting van de voeten en spinnen niet te overschrijden. Indien er te weinig ruimte tussen de componenten gelaten wordt, zal er tijdens het afschrikken een slechte doorstroming van olie zijn. Dit zorgt voor een ongelijkmatige afschrikking met vervorming tot gevolg.

Indien de componenten zodanig vervormen dat de geometrie buiten de toleranties valt na het hardingsproces, dan zullen de componenten een langere nabewerking moeten ondergaan of eventueel uit productie moeten gehaald worden. Dat zal de productiehoeveelheid doen dalen en de productiekost laten oplopen.

1.3 Doelstellingen

Om het productieaantal te vergroten wordt er gezocht naar de mogelijkheid om componenten te stapelen. De eerste doelstelling bestaat erin om mogelijkheden te zoeken om de hoeveelheid componenten per ovenlading te vergroten. Het slim stapelen van componenten kan voor een grote toename in productiehoeveelheid zorgen. Dit zal resulteren in een verhoging van de productie in de harderij en een verlaging aan kost per component. Deze verhoging van batchgrootte is niet mogelijk voor elke component en daarom worden de eerste voorstellen voor een alternatieve stapeling gemaakt rond de component 027-F1245E021 (zie Figuur 5). Component 027-F1245E021 (Tabel 1) is een tandwiel met een grootte die gemiddeld is ten opzichte van alle andere componenten die in de harderij bewerkt worden. Per transmissiekast van het type 'EH922' zitten er drie van deze planeetwielen in, deze transmissiekast heeft een vermogen van 3,45MW. Het is een evidente keuze om met deze component te beginnen omdat deze veel gevraagd is in 2018 en 2019. Indien de stapelingen succesvol zijn, kan er gekeken worden om bij andere componenten ook aanpassingen te doen.

Tabel 1: Gegevens component 027-F1245E021

Component	Kleinste binnen-diameter (mm)	Buitendiameter (mm)	Hoogte (mm)	Massa (kg)	Materiaal
027-F1245-E021	350	600	211	252	18CrNiMo7-6

Door het stapelen kan de vervorming toenemen. Deze vervorming moet gemeten en geanalyseerd worden en moet steeds binnen de toegelaten toleranties blijven. Verdere aanpassingen aan de stapelingen, ondersteuning en opbouwmethoden gebeuren aan de hand van deze analyse.

Een bijkomende doelstelling bestaat erin om een betere ondersteuning te ontwerpen of een bestaande te verbeteren. Een betere ondersteuning kan leiden tot minder vervorming van de componenten. De huidige ondersteuning verschillen sterk van vorm naargelang welk tandwiel het precies ondersteunt. Deze ondersteuning zijn platen die vervaardigd zijn uit standaard

staal, nl. St37, St52 en 42CrMo4. Dit materiaal is niet geschikt om herhaaldelijk te verhitten tot 950°C en om dan weer af te schrikken. Het gaat namelijk kromtrekken indien het oppervlak niet gelijkmatig belast is. Door het verder gebruiken van kromgetrokken ondersteuning zal er een nadelig effect zijn op het positioneren van tandwielen en hun vervormingen nadien.

Het is dus de bedoeling om de capaciteit van de huidige bomen voor component 027-F1245E021 te vergroten zonder in te boeten op de kwaliteitseisen. Voor component 027-F1245E021 bedraagt de batchgrootte momenteel 18 componenten. De vervorming wordt opgevolgd door de meetresultaten (kopcirkels en conen) die bekomen worden in de meetafdeling (meetcel). Indien de vervormingen binnen de toleranties vallen voor de stapeling met component 027-F1245E021, dan zullen ook andere types van componenten onderzocht worden om ook daar de capaciteit van te vergroten. Er zal ook een kosten-batenanalyse worden uitgevoerd om aan te geven hoeveel kosten er met deze nieuwe methode bespaard worden. Indien er vervormingen optreden die buiten de toleranties vallen, dan moet gezocht worden naar de precieze oorzaken en eventuele oplossingen.

1.4 Materiaal en methode

Om te beginnen werden de gestellen en component 027-F1245-E021 in een CAD-omgeving geschetst. Hiervoor werden de datafiches gebruikt om de correcte dimensies te hebben. Indien nodig werden enkele onderdelen opgemeten. Eens de onderdelen in een CAD-omgeving getekend waren, konden er verschillende stapelingen geassembleerd worden om te bekijken wat de mogelijkheden waren, zonder dit in werkelijkheid te moeten opbouwen. Zo werden er voorstellen uitgewerkt om een grotere hoeveelheid tandwielen op één boom te stapelen. Hier moest uiteraard rekening gehouden worden met de batchgrootte van de tandwielen, de draagkrachten van verschillende elementen waaruit de boom is opgebouwd en voldoende ruimte (10cm) onder de kal zodat de boom veilig ingehaakt kan worden.

Ten tweede werd na goedkeuring van de externe promotor het voorstel opgebouwd op de werkvloer. De precieze posities van alle componenten t.o.v. de boom en t.o.v. elkaar werden gedocumenteerd. Er werd navraag gedaan of er tijdens het hardingsproces fouten zijn opgetreden zoals bijvoorbeeld branders die zijn uitgevallen. Nadat de boom met componenten was



Figuur 6: Automatische 3D coördinaatmeetmachine in een meetafdeling van ZF

opgebouwd zou deze het carbonisatie- en het afschrikproces ondergaan. Eens de componenten gehard waren, werden deze in de meetcel nagemeten op vervormingen (kopcirkels en conen) met behulp van een automatische 3D-coördinaatmeetmachine (zie Figuur 6) [1].

Ook de hardheid werd nagemeten door te bepalen in welke mate het koolstofgehalte is toegenomen op verschillende dieptes in het oppervlak. De hardheid werd nagemeten met een 'equotipmeter'. Een equotipmeter is een draagbare hardheidsmeter voor metalen [2], [3]. De hardheid wordt enkel op de component gemeten. Er zijn twee soorten testsamples die aan het gestel worden gehangen, enerzijds 'pastilles' en anderzijds 'perlieten'. Perlieten zijn testsamples die gedurende de cyclus nagemeten worden om zo eventuele correcties van het proces uit te voeren. Pastilles zijn teststukken die na het hardingsproces worden gemeten, via een spectrometer wordt het percentage aan koolstof bepaald.

Ten derde, werden de oorzaken van optredende vervormingen onderzocht en werden er oplossingen voorgesteld. Een nieuwe testbatch werd opgebouwd met aanpassingen. De meetresultaten na het harden vielen binnen de toleranties zodat er een kosten-batenanalyse kon worden opgesteld. Hieruit werd een duidelijk beeld verkregen van de verschillen in kosten ten opzichte van de huidige manier van opbouw.

Bij het positioneren moesten de componenten met behulp van drie ondersteuning geplaatst worden. Na veel cycli vervormen de roosters, om de componenten steeds stabiel te kunnen positioneren werd er gebruik gemaakt van een driepuntsondersteuning. Indien geen ondersteuning gebruikt worden is er een grotere kans op indrukking door de ribben van de roostersegmenten. De ondersteuning zijn bedoeld om de componenten minimum 25mm boven het segmentoppervlak te leggen of een speling van 25mm te creëren tussen verschillende tandwielen bij het stapelen. Dit is om een zo efficiënt mogelijke doorstroming van olie te garanderen gedurende het afschrikproces. Dit heeft als doel de vervormingen zo klein mogelijk te houden.

1.5 Vooruitblik

In het volgende hoofdstuk, hoofdstuk 2 'Procesinformatie', wordt er meer achtergrondinformatie gegeven over het de huidige opbouw van de bomen voor componenttype 027-F1245E021, het ovenproces, de hardheidsmetingen alsook over gascarbonisatie en het planeetwiel.

In hoofdstuk 3, 'Experimentele test 1', wordt de opbouw van de eerste test toegelicht net als hoe de metingen gebeuren van de conen en de kopcirkels. De meetresultaten van de conen en de kopcirkels worden besproken en vergeleken met een standaardbatch ter referentie.

Na hoofdstuk 3 wordt er in hoofdstuk 4 'Technische verdieping' de oorzaak van de vervormingen, die door de opbouw van de test optreden, gezocht en uitgelegd. Evenals wordt er dieper ingegaan op de bepaling van precompensaties. Een precompensatie is een aanpassing van de overmaat in cel zacht. De ontwerpen van nieuwe ondersteuning worden getoond en besproken, deze ondersteuning zullen voor een vermindering van de vervorming moeten zorgen. Als laatste wordt er dieper op de procesopbouw ingegaan zoals eventuele gereedschappen die de opbouw van de bomen moet kunnen vergemakkelijken.

Als de technische verdieping is besproken dan volgt er in hoofdstuk 5 'Experimentele test 2' de resultaten van de conen en de kopcirkels van de tweede testbatch, de opbouw van de tweede testbatch en een vergelijking tussen een referentiebatch en de eerste testbatch met stapeling.

In hoofdstuk 6 'Kosten-batenanalyse' wordt er naar het financiële aspect bekeken wat een belangrijke factor is in de industrie. De kosten-batenanalyse handelt enkel over de harderij.

Om de scriptie af te ronden wordt er een allesomvattende conclusie gegeven met enkele bemerkingsen en aanbevelingen naar de toekomst toe.

2 Procesinformatie

Dit hoofdstuk beschrijft algemene informatie rondom het hele hardingsproces van een tandwiel in ZF Wind Power. Het standaardproces van een tandwiel (027-F1245-E021) is belangrijk om te kennen zodat een duidelijk algemeen beeld kan gevormd worden. Daarom wordt eerst de workflow van het tandwiel besproken. Daarna worden kort de invloeden van het hardingsproces op de vervorming van een component besproken. Tot slot wordt er nog wat informatie in verband met de gestellen en het tandwiel zelf gegeven.

2.1 Workflow component

Het tandwiel komt als ruw materiaal binnen in cel zacht. Hier wordt het gedraaid, gefreesd en ontbraamd volgens de afmetingen op de stuktekening in cel zacht. Deze afmetingen zijn groter dan de uiteindelijk gewenste afmetingen omdat de component nog gaat krimpen tijdens het hardingsproces en de component moet daarna nog worden nabewerkt in cel hard tot de uiteindelijk gewenste afmetingen op de R&D-tekening.

Nadat de tandwielen in cel zacht de juiste afmetingen hebben meegekregen, gaan deze naar de harderij. De component wordt op een bepaald manier gestapeld op een boom waarna deze in de oven gaat voor het gascarbonisatieproces. Het doel is om een grotere hoeveelheid componenten in een oven te krijgen omdat deze gascarbonisatieprocessen lang duren en de output capaciteit aan tandwielen beperkt is door de hoeveelheid componenten die kunnen verwerkt worden in de harderij.

2.1.1 Standaard manier stapelen

De huidige manier van stapelen op een boom is zichtbaar in Figuur 5 in de situering. Momenteel worden er geen componenten op elkaar gestapeld. Er wordt telkens opnieuw een spin geplaatst met daarop het volgende niveau componenten. Dit heeft als nadeel dat er een groot aantal spinnen nodig zijn om één batch van 18 componenten te harden. Al deze spinnen zijn verloren ruimte in de ovens, die beter benut zou kunnen worden door componenten. Tevens zijn deze spinnen duur in aankoop en beperkt in het aantal cycli dat deze meegaan.

Bij een standaardbatch wordt een boom met diameter 1450mm gebruikt voor het stapelen van de componenten 027-F1245-E021. Aangezien er enkel ovens zijn voor bomen van 1700mm en 1000mm gaat de 1450mm boom in dezelfde oven in als een 1700mm boom. In deze oven gaat dus ook ruimte verloren.

2.1.2 Hardingsproces [1]

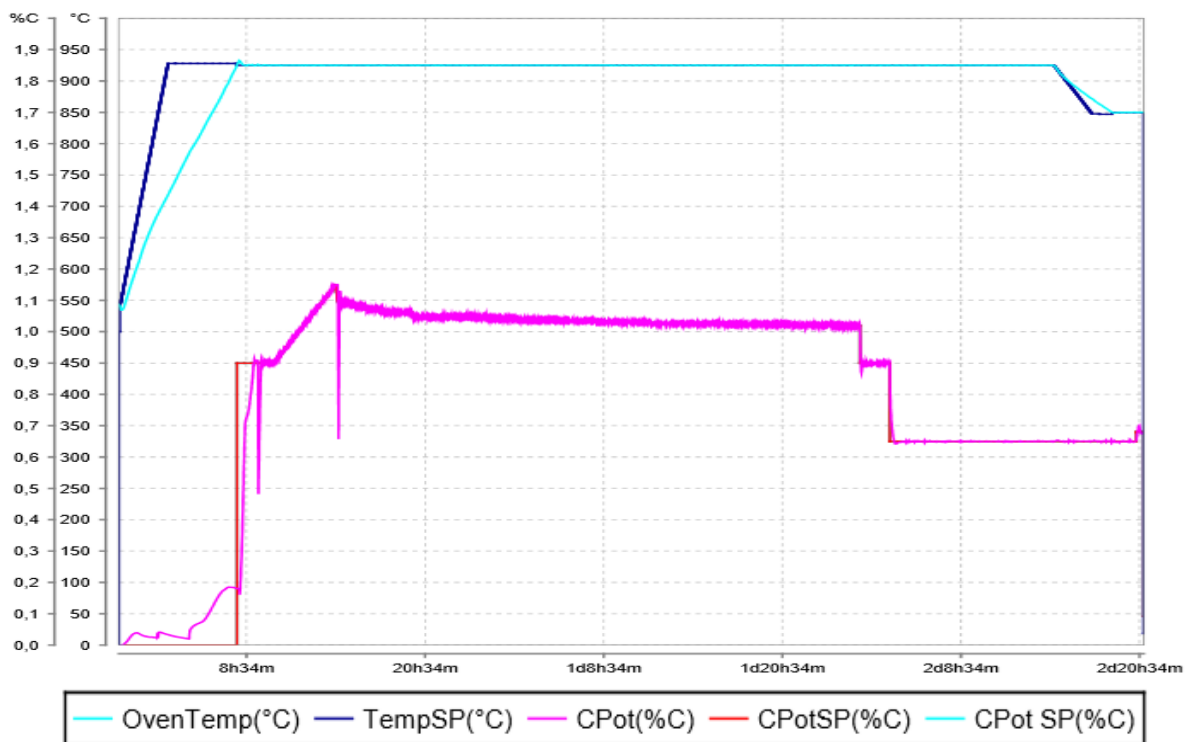
Het hardingsproces gebeurt in drie achtereenvolgende processtappen. Eerst zal de ovenlading met opgebouwde componenten de oven ingaan om te gasharden. Daarna wordt de lading afgeschrikt in een oliebad. Tot slot zal het een ontlaatscyclus ondergaan om een hogere oppervlaktehardheid te bekomen en om de spanningen die zijn ontstaan door het afschrikken te verminderen.

Het gasharden gebeurt in een putoven die men eerst spoelt met stikstof (N_2) op een temperatuur van $750^{\circ}C$ nadat de lading in de oven is geplaatst. Met behulp van stikstof wordt de zuurstof uit de oven verwijderd. Zo wordt oxidatie van de oven tegengegaan.

Daarna wordt de oven opgewarmd tot 925°C, tot in het austenietgebied van de tandwielen. De ijzeratomen in staal gaan naar kubisch vlakgecentreerd (KVG) vorm. Bij deze kristalstructuur zijn grotere holtes dan bij de kubisch gecentreerde structuur bij kamertemperatuur. Hierdoor kan koolstof opgenomen worden via het oppervlak van het tandwiel. De koolstof komt in de oven door middel van een draaggas en opkolingsgas.

De draaggasinstallatie produceert een endogas dat ontstaat door het thermisch kraken van aardgas en lucht. Het geproduceerde gas bestaat uit 20% CO , 40% 2H₂ en 40% 2N₂. Methaan (CH₄) wordt toegevoegd voor de effectieve koolstoftoevoer in de oven. Het aardgas splitst zich op in C₂ en H₂. Het endogas heeft de functie om met de waterstof te binden. Waterstofopbouw wordt vermeden om een zo goed mogelijk CO percentage te behouden in de oven. Wanneer het staal een temperatuur van 925°C bereikt, dan begint het gascarboneren door gedurende bepaalde tijd door koolstof toe te voegen.

Onderstaande grafiek geeft het overproces weer. Het is duidelijk zichtbaar dat de koolstoftoevoer begint wanneer de oventemperatuur (OvenTemp) 925°C bereikt. Daarna wordt het koolstofgehalte geregeld tot het gewenste niveau. Het hele ovenproces duurt iets minder dan drie dagen voor component 027-F1245E021.



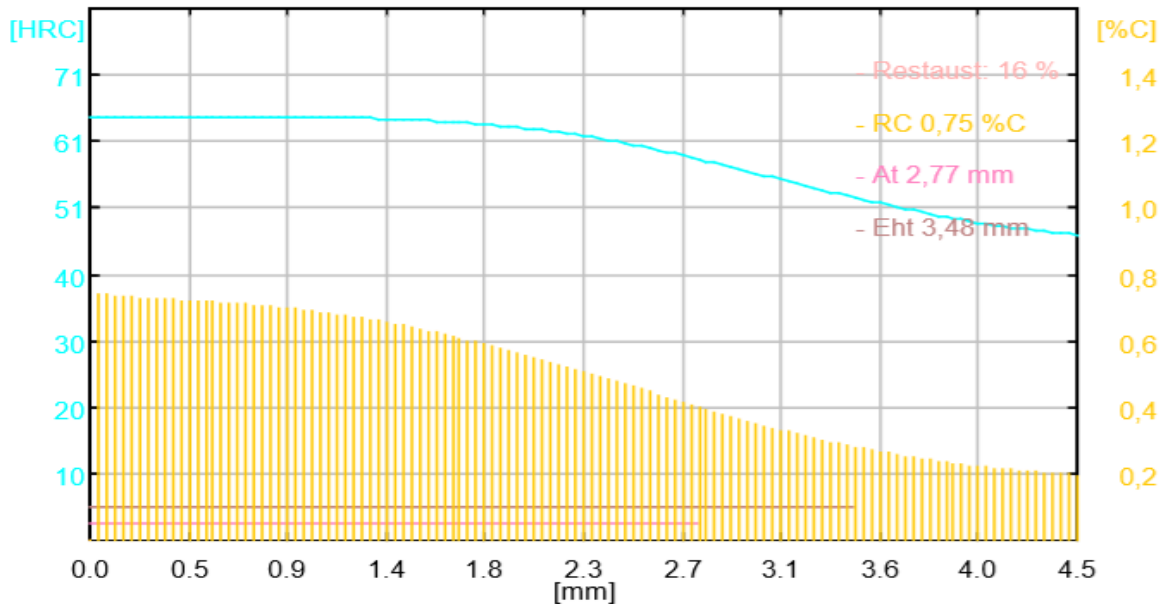
Figuur 7: Ovencyclus voorbeeld test 1

Met behulp van het gemeten koolstofgehalte gedurende het hele proces, berekent de computer door middel van een diffusieprogramma de opname van het koolstof in het staal. De temperatuur, staalsoort, gassamenstelling en procestijd worden in dit programma in rekening gebracht. Deze berekening is zichtbaar in onderstaande grafiek.

Als de gewenste carboneerdiepte is bereikt, dan koelt de oven af naar 850°C en wordt de carboneercyclus afgesloten. De lading wordt uit de oven genomen en ondergedompeld in een

oliebad om zo de meest geschikte afschrikking te krijgen. Dit gebeurt op een temperatuur van ongeveer 80°C gedurende één uur.

Procesdata	
Legeringsfactor 1,12	Opkolingsdiepte At 2,80 mm
Carbidegrens 86,0 %Ac	bei 0,40 % C



Figuur 8: Hardingsdiepte berekening voorbeeld test 1

De laatste processtep is de ontlaatcyclus om een hogere oppervlaktehardheid te bekomen en de spanningen gecreëerd tijdens het afschrikken te verminderen. De lading wordt opgewarmd tot 155°C – 165°C. Het koolstof gaat op deze temperatuur zich homogeen verdelen in de hardingslaag. Dit reduceert de piekspanningen in de spiebanen, tandvoeten etc. .

2.1.3 Hardheidsmetingen

Tijdens het hardingsproces worden test samples (perlieten) die bij aan de lading hangen, uit de oven gehaald. Vervolgens worden de perlieten op verschillende dieptes gefreesd en op elke diepte wordt het koolstofgehalte gemeten met behulp van een spectrometer. Hieruit wordt bepaald of er een correctie nodig is op de cyclus om de gewenste hardingsdiepte van de tandwielen te verkrijgen. Nadat de lading de volledige hardingscyclus heeft doorlopen (inclusief afschrikharden en ontlaten) worden er opnieuw metingen uitgevoerd met de spectrometer. Deze gebeuren op de pastilles die aan de lading bevestigd waren. De metingen worden vergeleken met de gewenste waarden die vermeld staan op de kwaliteitstekening. Onderstaande tabel (Tabel 2) geeft de freesdieptes en de gewenste kwaliteitswaarden. De HL waarde staat voor Hardness Leeb en is een waarde voor de hardheid.

Tabel 2: Freesdieptes en kwaliteitseisen koolstofgehalte

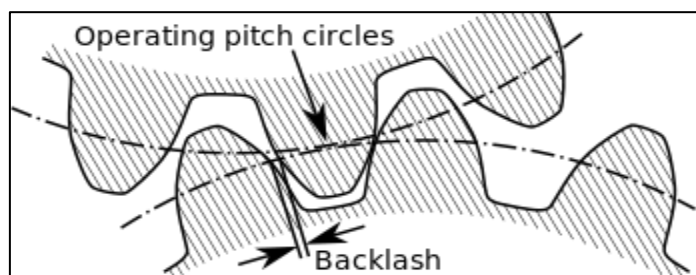
Freesdieptes		Kwaliteit	
Pastilles	%C	At min bij 0,40%C	2,60
0,1		At max bij 0,40%C	3,70
0,3		%C min op 0,1mm of 0,3mm	0,60
1,4		%C max op 0,1mm of 0,3mm	0,75
2,2		HL min	769
2,7		HL max	817
2,9			

Na het stralen van de componenten worden er ecotip metingen uitgevoerd op de componenten. Deze gebeurd op het Leeb principe en geeft de HL waarde van het oppervlak van de component. Het Leeb principe is gebaseerd op het meten van spanningen om energieverlies aan te duiden van een impactlichaam nadat het in contact komt met het te meten oppervlak. Het energieverlies dat opgemeten wordt komt overeen met het verschil in weerkaatsingshoogte. [2]

2.1.4 Tolerantieklassen

Nadat de componenten gestraald zijn, worden ze tot slot bewerkt in cel hard. Hier worden de componenten gefreesd en geslepen tot de gespecificeerde eindmaten. Tijdens het slijpen moeten alle tanden “zuiver vallen”. Dit betekent dat overal materiaal moet afgenomen zijn voor een goed en glad oppervlak en geen enkel functioneel oppervlak mag ongeslepen blijven. Er mag echter niet teveel materiaal afgenomen worden om de gewenste hardheid te behouden aan het oppervlak en te voldoen aan de toleranties.

Indien een component na het slijpen op de gewenste toleranties niet zuiver valt dan betekent dit niet meteen dat de component afgekeurd („scrap“) wordt. Het „niet zuiver vallen“ betekent dat de component niet volgens specificatie gemaakt kan worden zonder een oppervlak onbewerkt te laten. Er zijn namelijk extra toleranties (grotere tolerantieklassen) voorzien om te bepalen of de component toch nog gebruikt kan worden in een tandwielkast. Deze extra tolerantieklassen voor de tandwijdte, namelijk WB en WC, zijn zichtbaar in Tabel 3. Deze bredere tolerantieklassen zijn natuurlijk niet gewenst om te gebruiken in plaats van de tolerantie op de R&D tekening. De bredere tolerantieklassen zijn opgesteld aan de hand van de maximaal toelaatbare speling („backlash“) van een totale tandwielkast. De backlash is een maat voor de speling op de gehele tandwielkast. Deze moet binnen bepaalde limieten blijven. Er worden componenten met een grotere tolerantie WB of WC gecombineerd met andere componenten die wel voldoen aan de initiële toleranties. Deze combinatie dient er voor te zorgen dat de totale backlash van de tandwielkast aanvaardbaar blijft.



Figuur 9: Backlash tandwiel [3]

Tabel 3: Tolerantieklassen tandwijdte met W_k de theoretische maat met modulus één

Tooth width classification acc. WFM 82.9.14 for quality control				
Class	Component Code	$W_{k_{max}}$	$W_{k_{min}}$	Unit
A	Part n°	246.667	246.628	mm
B	.WB	246.627	246.588	mm
C	.WC	246.587	246.548	mm

2.2 Hardingsproces vervormingen

Het harden van de componenten gebeurt door middel van het gascarbonisatie proces waarna de componenten worden afgeschrikt in olie van ongeveer 80°C en vervolgens worden ze ontlaten op een temperatuur van 155-165°C voor vijf uren . Al deze processtappen introduceren vervorming van de componenten. Het doel is om de vervormingen te beperken zodat er zo weinig mogelijk nabewerkingen op het harde materiaal noodzakelijk zijn om de component aan de gewenste toleranties te laten voldoen. Indien de vervormingen te groot zijn dan wordt de component gescrept omdat het niet meer mogelijk is om deze aan de toleranties te laten voldoen. De factoren die de grootste invloed hebben op de vervorming van de componenten worden hier kort besproken.

Het is vanzelfsprekend dat de materiaalsamenstelling een grote invloed heeft op de vervorming tijdens het hardingsproces. Afhankelijk van de uiteindelijke toepassing varieert de toegelaten vervorming sterk. Indien er zeer weinig vervorming is toegelaten, dan moet er gebruik gemaakt worden van speciaal gereedschapsstalen die andere metalurgische eigenschappen bezitten zodat de vervorming geminimaliseerd wordt.

Vervormingen kunnen opgedeeld worden in twee categorieën. Vervorming kan optreden door een verandering van volume indien het materiaal van fase gaat veranderen. De component zal dus krimpen of uitzetten. Hierbij blijft de initiële vorm van de component ongewijzigd. Vervorming kan ook betekenen dat de vorm van de componenten verandert. Hierbij zullen de rondheid, vlakheid, ... van de component wijzigen terwijl het totale volume eventueel constant blijft. Beide types van vervormingen treden op tijdens het hardingsproces. De vervorming van de rondheid, vlakheid, ... is typisch groter en minder voorspelbaar dan de vervorming veroorzaakt door de volumeverandering. [4]

De vervorming van de component wordt veroorzaakt door een groot aantal factoren.

- Het snel opwarmen en eventueel oververhitten, het ongecontroleerd afschrikken of het niet-uniforme opwarmen of afschrikken kan leiden tot grote vervormingen van de component. Traag opwarmen of eventueel voorverwarmen voordat er wordt opgewarmd tot de austiniet temperatuur, levert de beste resultaten op gebied van vervorming. De

snelheid van afschrikken of afkoeling van de componenten heeft ook een invloed op de vervorming afhankelijk van de hardbaarheid van het materiaal zelf.

- De aanwezigheid van resterende spanningen in de component die veroorzaakt worden door het draaien, frezen, slijpen, ... zorgen voor vervorming wanneer de component wordt opgewarmd. [5]
- Een belasting op de componenten kan resulteren in het inzakken, kruipen van de component tijdens het hardingsproces. Het correct, zo goed mogelijk ondersteunen van de componenten kan de vervorming van de component significant verminderen.
- Het niet uniform afschrikken of een niet uniforme flow van het afschrikmiddel leidt tot verschillende afkoelingsnelheden doorheen de component. Hierdoor zal de component vervormen. [6]
- Lange componenten (lengte groter dan 8 keer de diameter) vervormen gemakkelijk. Ook smalle componenten (oppervlak groter dan 50 keer de dikte) zullen sneller vervormen tijdens het hardingsproces.

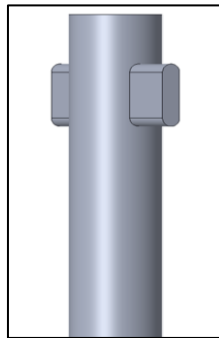
De oplossingen voor te grote vervormingen zijn af te leiden uit bovenstaande oorzaken.

- Als de belasting op de componenten groot is, dan gaat de component gemakkelijk kruipen en vervormen. Het verbeteren van de ondersteuning en het correct laden van de componenten zal het kruipen en vervormen beperken. Een correcte ondersteuning zorgt ook voor een goede warmte- en olieflow die noodzakelijk is tijdens het hardingsproces om vervorming tegen te gaan. [7]
- Het aanpassen van de dimensies van een component kan ook voor een significante reductie in vervorming resulteren. Dit is echter vaak moeilijk omdat de meeste dimensies van een component een vereiste zijn voor een goede werking van de component.
- De keuze van het materiaal alsook de kwaliteit ervan hebben een zeer grote invloeden op de vervorming en de controleerbaarheid van de vervorming.
- Het verminderen van inwendige spanningen voordat de component het hardingsproces doorloopt. Een genormaliseerd materiaal met een ferritische of perlietische microstructuur zal minder inwendige spanningen hebben nadat het bewerkt is ten opzichte van een materiaal met een martensitische structuur.
- Afschrikmiddelen en het afschrikproces optimaliseren voor het gewenste gebruik, kunnen drastische verbeteringen opleveren. Het afschrikproces heeft allerlei parameters die geoptimaliseerd kunnen worden voor een zo goed mogelijk resultaat. [8]
 - Koelsnelheid
 - Eigenschappen van het afschrikmiddel
 - Temperatuur van het afschrikmiddel
 - Homogene afkoelsnelheid (overall dezelfde afkoelsnelheid rondom de component)
 - Afschrik tank design (circulatie afschrikmiddel)
 - Fysische eigenschappen afschrikmiddel (viscositeit, ...)
 - Conditie van het afschrikmiddel (kwaliteit na langdurig gebruik)

Het doel van deze masterproef is het optimaliseren van de ondersteuning. Het is moeilijk of onmogelijk om de andere parameters aan te passen en hierop testen uit te voeren.

2.3 Gestellen informatie

In de harderij zijn verschillende types gestellen of bomen beschikbaar namelijk de 1000mm, 1450mm en 1700mm zoals in de inleiding al is aangehaald (zie Figuur 2, Figuur 3, Figuur 4). Het gestel van 1000mm heeft een paal die 3 meter hoog is en de gestellen 1450 en 1700 hebben een paal van 2.4 meter hoog. De kal waarmee het gestel wordt opgenomen, steekt door de paal op ongeveer 20cm van de bovenkant. De afhardhaak moet nog onder de kal door kunnen om het gestel op te nemen. Hierdoor is 30cm vanaf de bovenkant van de paal niet bruikbaar omdat hier de bewegingsvrijheid van de afhardhaak moet gegarandeerd zijn. (Zie Figuur 10 voor close-up kal en paal)



Figuur 10: Close-up bovenkant paal en kal

Afhankelijk van het component type en de toelaatbare belasting wordt het meest geschikte gestel gekozen. Alle gestellen zijn gemaakt van Cronite HR32. De samenstelling van dit materiaal is zichtbaar in Tabel 4.

Tabel 4: Samenstelling Cronite HR32

Element	wt%	Element	wt%
Carbon, C	0,40	Nickel, Ni	37
Chromium, Cr	18	Niobium, Nb	1,5
Iron, Fe	40,6	Silicon, Si	1,5
Manganese, Mn	1,0		

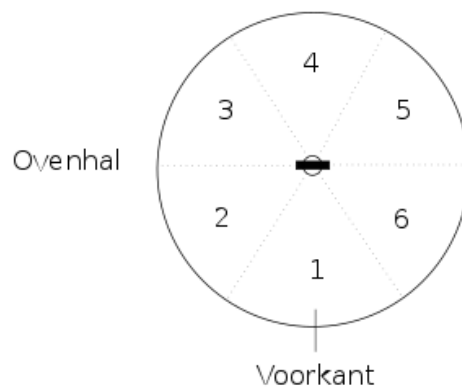
Deze samenstelling wordt specifiek gebruikt voor gestellen tijdens het gascarboneren. Door deze samenstelling zijn de gestellen geschikt voor ongeveer 100 hardingscycli voordat deze aan vervanging toe zijn.

De massa's van alle gestellen zijn verschillend en zijn van groot belang aangezien de maximaal toegelate massa die de afhardhaak kan hijsen 9 ton is. Ook de maximaal toelaatbare belasting op de voeten, spinnen en palen is van groot belang om te bepalen wat er maximaal op een voet op spin kan gestapeld worden. In Tabel 5 staan alle massa's van de verschillende gestellen, bussen en palen.

Tabel 5: Informatie gestellen, bussen en palen

Gestel 1000	Nummer	Massa (kg)	Max Belasting (kg)
Voet	CKX393	191	2560
Spin	CKX394	162	2240
Segment	CKXK83	11	500
Gestel 1450			
Voet	CKU409	257	2500
Spin	CKU410	206	1020
Segment	CKU616	25	500
Gestel 1700			
Voet	CKX495	500	6100
Spin	CKXM80	315	4250
Spin	CKXK81	315	4250
Spin	CKX685	/	2000
Segment/rooster	CKL310	32	1900
Bussen			
H50	CKX317	4,2	/
H100	CKX318	8,1	/
H125	CKX319	9,9	/
Palen			
H3000	CKY031	197	9000
H2400	CKY031	165	9000

Om tijdens het stapelen en analyseren van de resultaten de positionering van de componenten op de voet en spin te kennen, zijn de roosters of segmenten op de voet en spin genummerd volgens onderstaande tekening. De ovenhal is ook aangeduid op de figuur omdat dit een veelgebruikte referentie is in de harderij op gebied van positionering.



Figuur 11: Nummering segmenten voet en spin

2.4 Tandwiel informatie

De component die hoofdzakelijk wordt besproken is het tandwiel / planeetwiel 027-F1245-E021. Het planeetwiel is gemaakt van het materiaal 18CrNiMo 7-6. De samenstelling van deze legering is zichtbaar in Tabel 6.

Tabel 6: Samenstelling 18CrNiMo 7-6 [9]

Element	wt%	Element	wt%
Carbon, C	0,15-0,21	Sulfur, S	<0,035
Silicon, Si	max 0,4	Chromium, Cr	1,50-1,80
Manganese, Mn	0,50-0,90	Molybdeen, Mo	0,25-0,35
Phosphor, P	<0,025	Nickel, Ni	1,40-1,70

Voor de stapeling en positionering van de componenten op een gestel zijn een aantal functionele maten belangrijk. Wegens geheimhouding is de stuktekening van het planeetwiel niet opgenomen in de tekst of bijlage. Daarom zijn de belangrijkste maten en het gewicht in Tabel 7 opgesomd. Het tandwiel is in Figuur 12 zichtbaar. Indien de componenten worden ondersteund dan moet het ondersteunend blokje tussen de oplegranden en de tandvoetdiameter liggen. Zo wordt de oplegrand niet beschadigd en blijft het tandprofiel goed bereikbaar door de olie zodat een goede harding van het tandprofiel behouden wordt.

Tabel 7: Functionele maten voor stapeling planeetwiel

Functionele maten planeetwiel

Binnendiameter	600mm
Buitendiameter	330mm
Oplegrand onderkant dia.	452mm
Oplegrand bovenkant dia.	435mm
Tandvoet diameter	±540mm
Hoogte	211mm
Gewicht	252kg

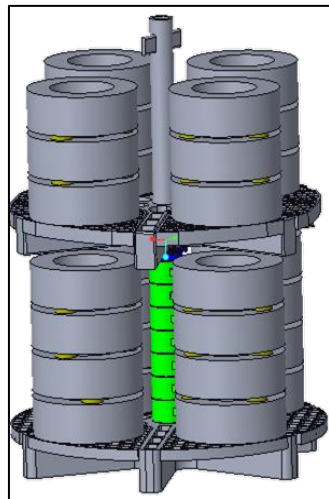


Figuur 12: Planeetwiel 027-F1245-E021 op 3D-coördinaatmeetmachine

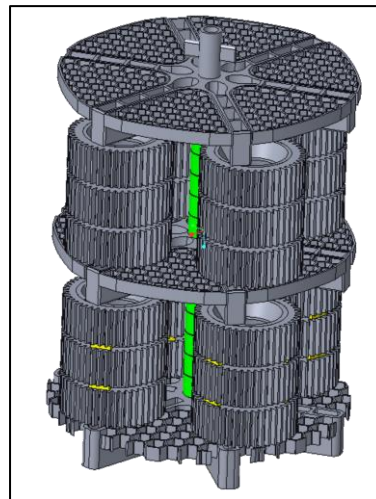
3 Experimentele test 1

3.1 Opbouw

De keuze voor de opbouw van de eerste experimentele test was hoofdzakelijk afhankelijk van de toelaatbare massa, maximaal toegelaten dimensies en de veiligheid. Het hoofddoel bij de eerste test was informatie verzamelen over hoe de componenten vervormen indien deze gestapeld worden. Alle mogelijke opbouwconfiguraties zijn voorgesteld en hieruit werd de onderstaande opbouw gekozen als meest haalbaar (Figuur 13) (zie bijlage A: Voorstellen opbouwconfiguraties). Initieel werd dit voorstel gedaan met een stapeling van vier componenten op de voet van de boom. Dit is echter moeilijk haalbaar in verband met veiligheid en ook de belasting op de onderste component zou dusdanig groot zijn, dat de vervorming en indrukking ook te groot zouden zijn. Daarom is er voor een stapeling van 24 componenten gekozen zodat er vanboven op het gestel nog een extra spin gemonteerd kan worden om draadstangen door te bevestigen om de componenten te borgen (Figuur 14). Deze draadstangen zullen immers eventuele kleine fouten of haperingen in kwestie van brugbewegingen kunnen opvangen. De blokjes tussen de componenten zijn gemaakt van standaardstaal St37 en hebben een afmeting van 120x30x25mm.



Figuur 13: Voorstel 28 componenten



Figuur 14: Opbouw 24 componenten (excl. draadstangen)



Figuur 15: Volledig opgebouwde boom

3.1.1 Totale massa

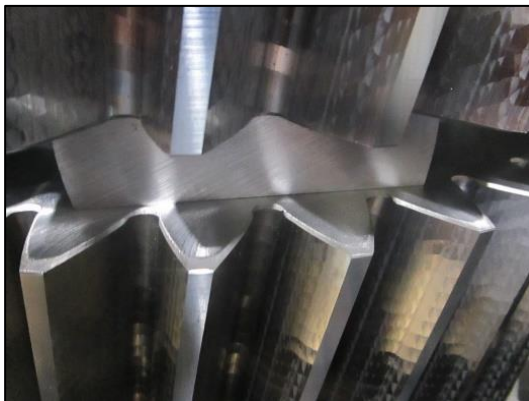
Een grote beperking van het geheel is de maximaal toelaatbare massa die op de voet of spin mag gestapeld worden, alsook de maximale totale massa die door de brug en afhardhaak moet gedragen worden. De maximaal toegelaten massa op de voet is 6250kg en op de spin is 4250kg indien de sterkste spin (CKXM80) wordt gebruikt. De massa van één tandwiel is 252kg. Onderstaande tabel geeft de berekening van de totale massa van de opgebouwde boom (Tabel 8). De maximaal toegelaten belasting voor zowel de paal als de afhardhaak is 9000kg. De massa moet ook zo gelijk mogelijk verdeeld zijn.

Tabel 8: Totale massa opbouw test 1

Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)
Paal	SAFE	1	164,5	164,5
Voet	SAFE NIEUW	1	500	500,0
Spin	SAFE NIEUW	2	315	630,0
Segment	SAFE NIEUW	18	32	576,0
Bus H50	/	0	4,22	0,0
Bus H100	/	12	8,05	96,6
Bus H125	/	2	9,85	19,7
Component	/	24	252	6048,0
Ondersteuning	/	72	1	72,0
Totale massa				8106,8

3.1.2 Positionering componenten

Het positioneren van de componenten was niet eenvoudig omdat aan beide zijde van het tandwiel een oplegrand is. De blokjes tussen de tandwielen moeten hierdoor zeer nauwkeurig gelegd worden zodat deze niet op deze oplegrand liggen. De tandvoet mag ook niet bedekt worden omdat een goede afharding van de tandvoet zeer belangrijk is (zie Figuur 16 en Figuur 17). De afstand gerealiseerd door de blokjes tussen de tandwielen is noodzakelijk voor een goede olieflow zodat het gehele tandwiel goed gehard wordt. Ook de tanden van de tandwielen worden zo goed mogelijk uitgelijnd voor een optimale harding van het tandprofiel.

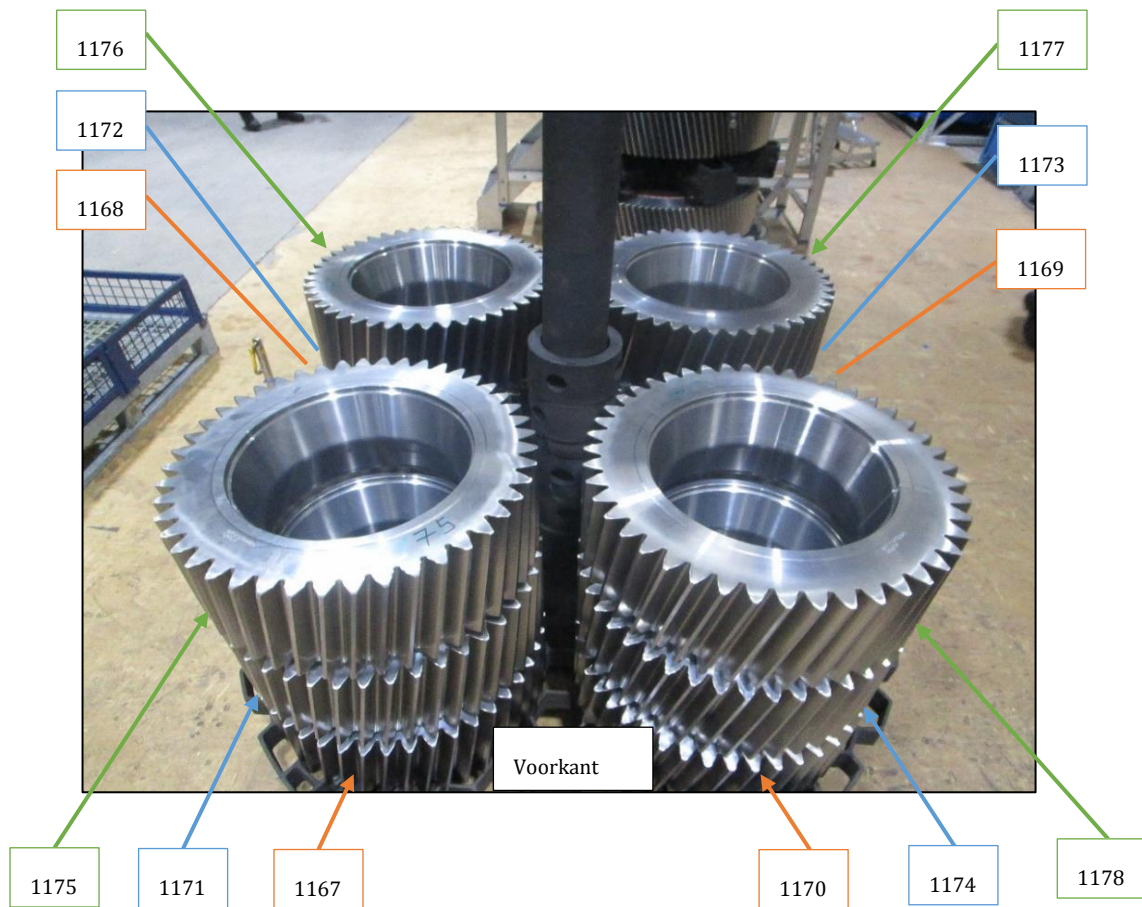


Figuur 16: Tandprofiel



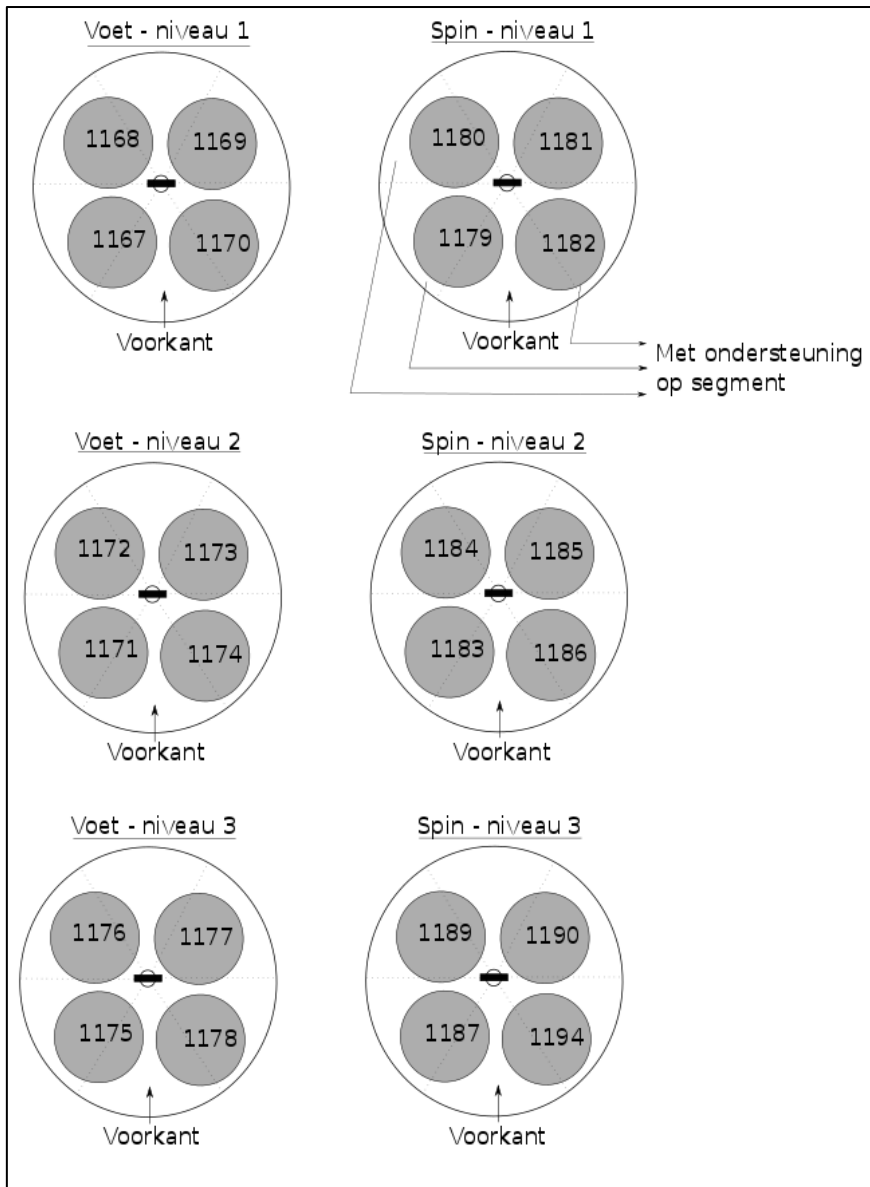
Figuur 17: Tandwiel oplegrand

Om eventuele ovenfouten (branders die uitvallen) te kunnen relateren aan afwijkingen in de resultaten, zijn ook alle posities van de verschillende tandwielen vastgelegd. Ter verduidelijking zie onderstaande foto van de tandwielen op de voet van de boom (Figuur 18).



Figuur 18: Positie tandwielen voet (LM1167-LM1778)

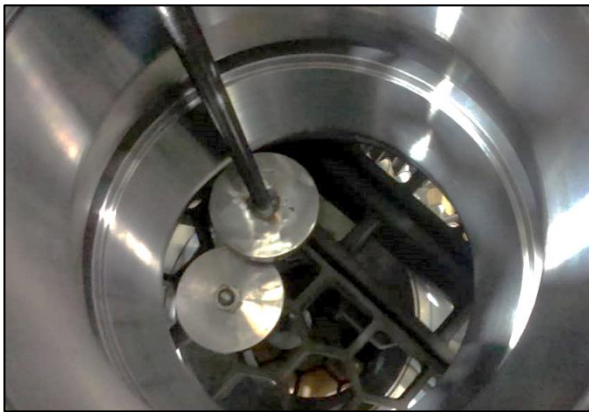
Figuur 19 geeft een overzicht met de positie van alle componenten. Componenten LM1179, 80 en 82 waren ondersteund op het onderste niveau met behulp van een eenvoudige driepuntsondersteuning met dezelfde blokjes dan die tussen de tandwielen. Componenten LM1167, 68, 69, 70, 81 lagen rechtstreeks op de rooster. De voorkant aangeduid op het overzicht is telkens de kant van de straalcabine. De ovenhal ligt dus links in het overzicht. (Dit is een veel gebruikte referentie binnen het bedrijf.)



Figuur 19: Overzicht positie componenten

3.1.3 Veiligheid

De veiligheid van de werknemer is in veel bedrijven prioritair. Daarom was de stapeling met vier componenten op elkaar ook voor de eerste test niet geschikt. De tandwielen moeten namelijk geborgd worden zodat deze er niet kunnen afvallen bij een foutieve of plotse beweging van de brug tijdens de verplaatsing van de boom. Daarom was een spin boven de bovenste componenten noodzakelijk zodat er draadstangen geplaatst konden worden door alle componenten (zie Figuur 20 en Figuur 21). Deze draadstangen zorgen ervoor dat de componenten niet van de boom af kunnen vallen en eventueel een onveilige situatie veroorzaken. Het is niet meteen de meest elegante methode om te beveiligen maar door de korte beschikbare tijd voor het opstellen van deze eerste test, was dit de meest efficiënte oplossing.



Figuur 20: Draadstang door componenten



Figuur 21: Draadstangbevestiging

3.2 Meetresultaten

Alle 24 tandwielen (027-F1245E021) worden na het gascarboneerproces gemeten met behulp van een 3D-coördinaatmeetmachine. Deze 3D-coördinaatmeetmachine meet de belangrijke afmetingen van het tandwiel. De beide conen worden gemeten op vijf verschillende hoogtes en met telkens twaalf meetpunten op elke hoogte. De kopcirkels worden gemeten op drie verschillende hoogtes. De conen en kopcirkels zijn de twee functioneel belangrijke eigenschappen op gebied van vormgeving om een goede kwaliteit van het tandwiel te garanderen. De conen zorgen voor de behuizing van de lagers en de kopcirkels zijn belangrijk voor een goede werking van het tandwiel. De metingen worden opgesplitst in conometingen en kopcirkelmetingen.

Bij het meten van de tandwielen bleek dat drie componenten (LM1185, 86, 87) andere beginmaten hadden voor het hardingsproces. Deze drie componenten waren de drie eerste componenten van een nieuwe lading tandwielen. Deze gaven andere uitwijkingen (meestal kleinere) dan alle andere componenten en zullen ook af en toe buiten beschouwing worden gelaten indien dit relevant is voor de meting die besproken wordt.

3.2.1 Conen

3.2.1.1 Uitleg metingen

De meetpunten moeten eerst verwerkt worden vooraleer er nuttige informatie kan worden uitgehaald. Alle meetpunten op één niveau van de con worden vergeleken met de gewenste waarde van het afgewerkte tandwiel. Daarna wordt het minimum en maximum genomen uit het

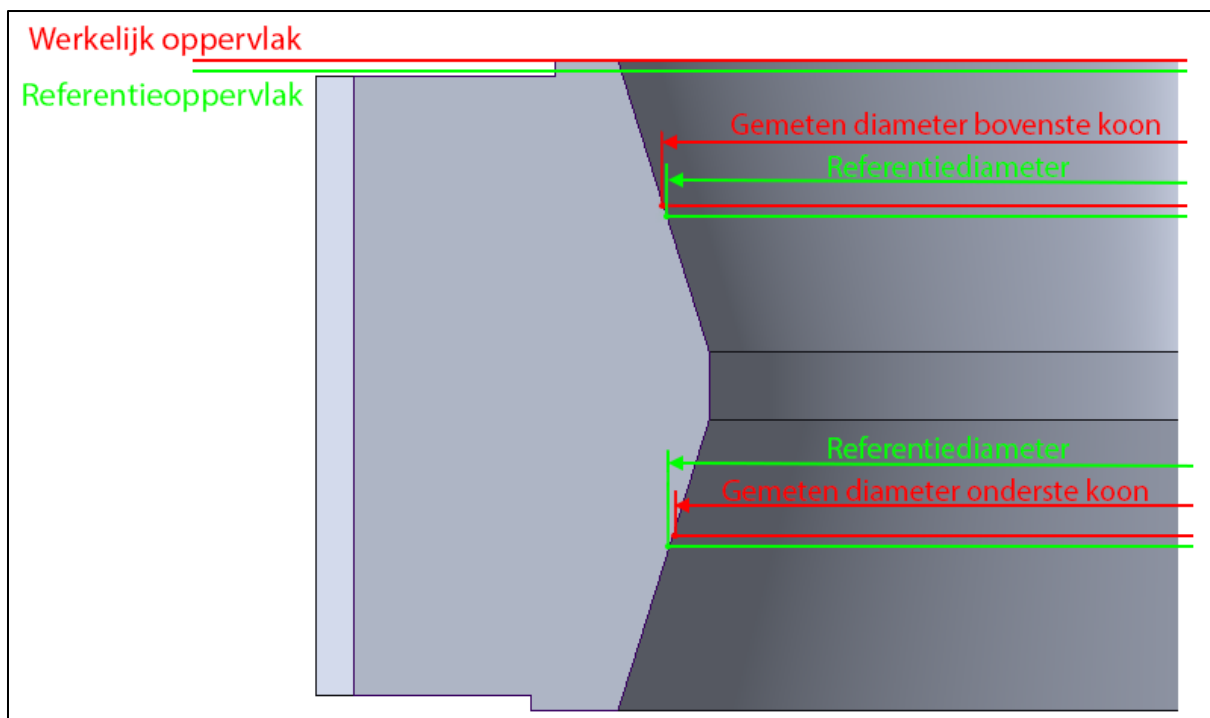
verschil van elk punt met de gewenste waarde (meetwaarden component LM1167 in bijlage B). Uit de minima en maxima wordt de minimum en maximum overmaat bepaald op elke gemeten hoogte (Zie Tabel 9 voor component LM1167).

Tabel 9: Gemeten overmaat conen voorbeeld bovenste en onderste coon

Meethoogte	Overmaat min			Overmaat max		
	ZC-Ref	zacht	hard min	verschil	zacht	hard max
-24,93	-0,163	-0,793	-0,629	-0,163	-0,994	-0,830
-38,67	-0,255	-0,866	-0,611	-0,255	-1,049	-0,794
-52,40	-0,347	-0,935	-0,588	-0,347	-1,102	-0,754
-66,13	-0,439	-0,964	-0,525	-0,439	-1,145	-0,706
-79,88	-0,531	-0,928	-0,397	-0,531	-1,113	-0,582

ZC-Ref	Overmaat min			Overmaat max		
	zacht	hard min	verschil	zacht	hard max	verschil
-135,12	-0,504	-1,296	-0,792	-0,504	-1,892	-1,387
-148,86	-0,412	-1,224	-0,812	-0,412	-1,906	-1,493
-162,59	-0,320	-1,112	-0,792	-0,320	-1,875	-1,555
-176,32	-0,228	-0,995	-0,766	-0,228	-1,835	-1,606
-190,05	-0,136	-0,890	-0,754	-0,136	-1,822	-1,686

De “hard min” en “hard max” worden gebruikt om de verdeelde overmaat te bepalen. De waarden in “hard min” en “hard max” hierboven zijn de gemeten overmaten van de diameter. De verdeelde overmaat is een gemiddelde tussen de twee metingen op de hoogte waarop de tolerantie op de componenttekening staat aangeduid. Dit is het gemiddelde uit de waarde op hoogte -52.40 en -162.59. Dit wordt gedaan omdat het meetprogramma van de 3D-coördinaatmeetmachine uitgevoerd wordt ten opzichte van een referentievlak. Dit referentievlak wordt echter nabewerkt in cel hard (ongeveer 0.15mm afname). Deze afname in cel hard gebeurt pas nadat de metingen voor onze stukken zijn gebeurd. Voor onze stukken wordt het meetprogramma uitgevoerd vanaf het werkelijke oppervlak. Van daaruit zal de 3D-coördinaatmeetmachine een welbepaalde afstand (volgens de referentiewaarden) zakken en de coon op verschillende punten op die hoogte meten. Deze gemeten waarden worden vergeleken met de waarden op de productietekening. De waarden op de productietekening zijn dus gedefinieerd ten opzichte van het referentievlak (en niet ons werkelijk oppervlak). Hierdoor zijn alle metingen te hoog gemeten ten opzichte van hun referentiewaarde waarmee ze vergeleken worden. De bovenste coon zal dus altijd te grote waarden geven (minder overmaat), terwijl de onderste coon te kleine waarden geeft (meer overmaat) (Zie Figuur 22).



Figuur 22: Metingen conen fout

Door de verdeelde overmaat na het hardingsproces te vergelijken met de overmaat die er in cel zacht wordt voorzien, kan de krimp op elk niveau worden bepaald. Ook wordt de overblijvende hardingsdiepte van de coon bepaald na het nabewerken van de component in cel hard, vanuitgaande van een minimale hardingsdiepte (min EHT) van 2.60mm (0.40% C) die in de harderij wordt vooropgesteld voor component 027-F1245E021 (Tabel 10 voor component LM1167). In de tabel staat dat de overblijvende hardingsdiepte kleiner is dan de gevraagde hardingsdiepte op de lagerloopbaan. Dit zou enkel het geval zijn indien de hardingsdiepte minimaal is (2.60mm). De vereiste hardingsdiepte na het hardingsproces ligt tussen de 2.60mm en de 3.70mm. De hardingsdiepte wordt gecontroleerd met behulp van een pastille die bij de componenten in de oven zit. De meting op deze pastille gaf een hardingsdiepte van 2.66mm (0.40% C). Omdat dit een testbatch was en er twijfel was over de effectieve hardingsdiepte op de componenten zelf, is er één tandwiel destructief getest. Hieruit werd een effectieve hardingsdiepte van 2.90mm bepaald op de coon en er werden hardheidsmetingen onder het oppervlak uitgevoerd (zie Figuur 24). De hardingsdiepte is dus voldoende groot op de conen om ervoor te zorgen dat de hardingsdiepte op de lagerloopbaan na het nabewerken in cel hard, nog voldoet aan de kwaliteitseis van 1.95mm hardingsdiepte.

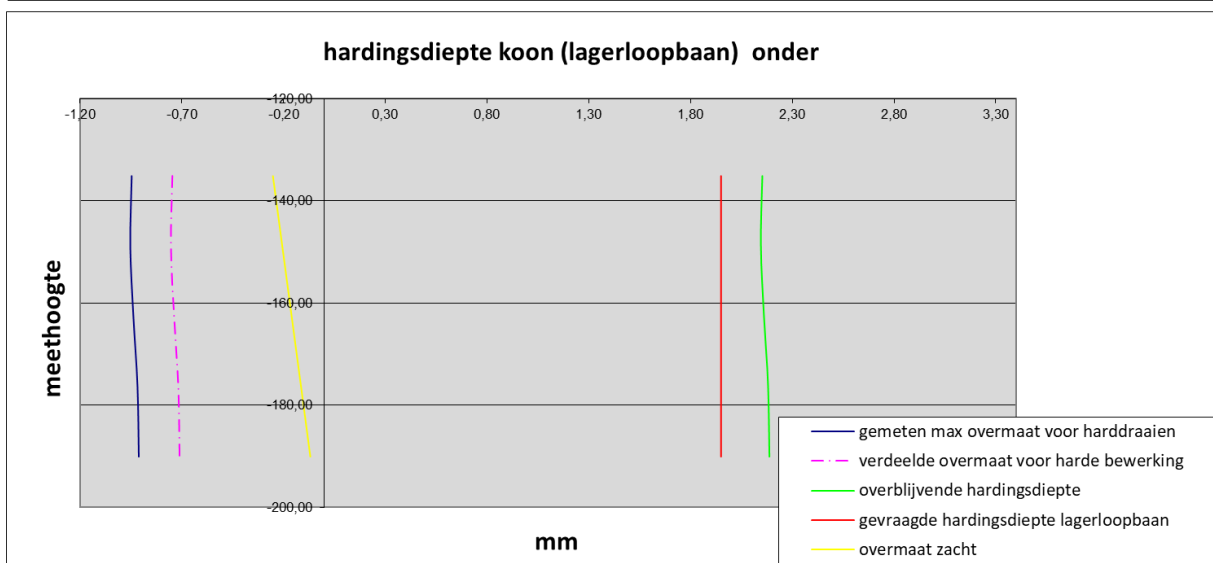
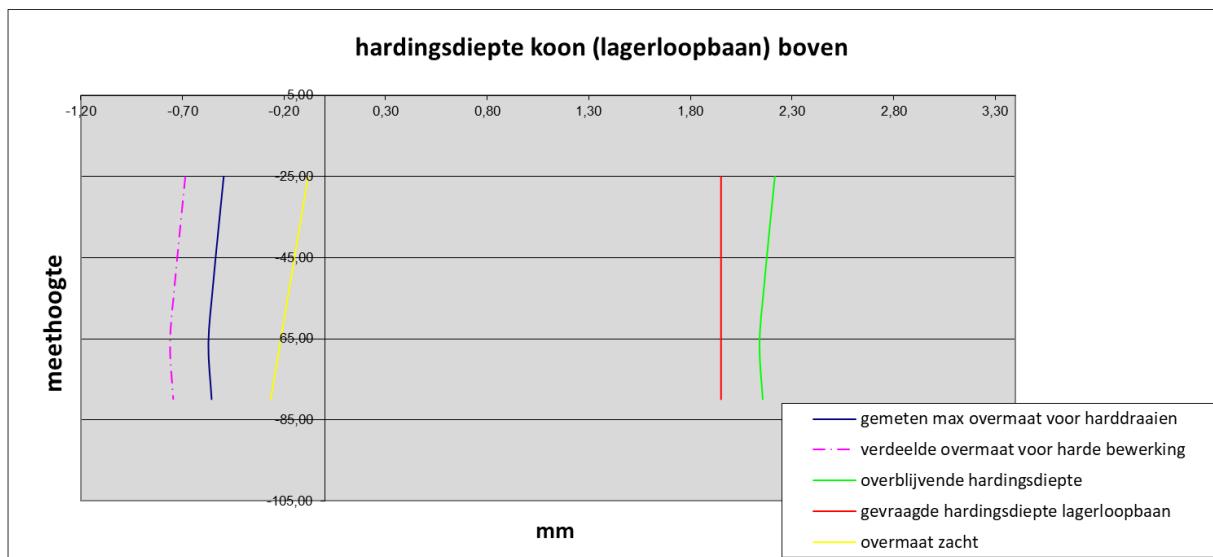
Tabel 10: Overmaat, krimp, overblijvende hardingsdiepte voor maximum waarden

boven	overmaat zacht	gemeten max overmaat voor harddraaien	verdeelde overmaat voor harde bewerking	krimp	min EHT	overblijvende hardingsdiepte	gevraagde hardingsdiepte lagerloopbaan
-24,93	-0,08	-0,50	-0,69	0,60	2,6	1,91	1,95
-38,67	-0,13	-0,52	-0,71	0,59	2,6	1,89	1,95
-52,40	-0,17	-0,55	-0,74	0,57	2,6	1,86	1,95
-66,13	-0,22	-0,57	-0,76	0,54	2,6	1,84	1,95

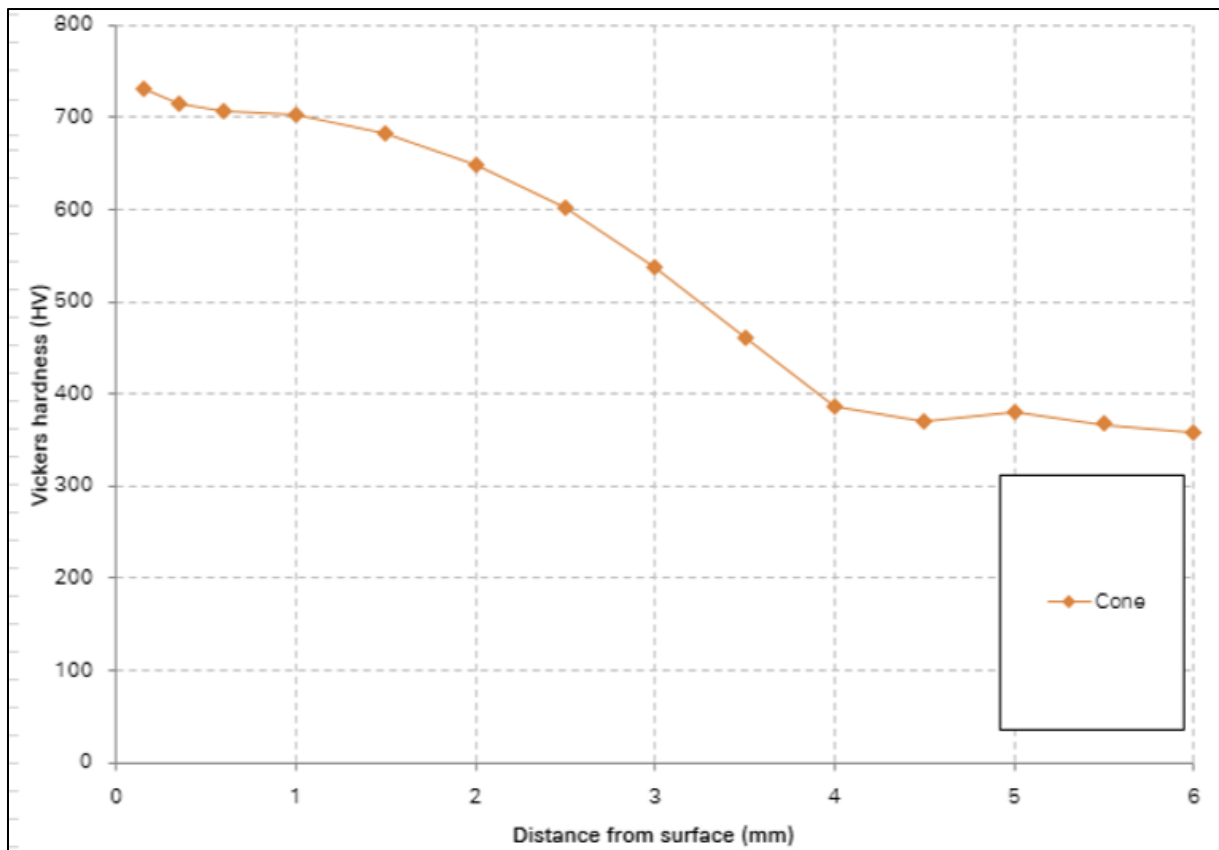
-79,88	-0,27	-0,56	-0,75	0,48	2,6	1,85	1,95
--------	-------	-------	-------	------	-----	------	------

onder							
-135,12	-0,25	-0,95	-0,75	0,50	2,6	1,85	1,95
-148,86	-0,21	-0,95	-0,75	0,55	2,6	1,85	1,95
-162,59	-0,16	-0,94	-0,74	0,58	2,6	1,86	1,95
-176,32	-0,11	-0,92	-0,72	0,60	2,6	1,88	1,95
-190,05	-0,07	-0,91	-0,71	0,64	2,6	1,89	1,95

Deze gegevens worden gebruikt om onderstaande grafieken te maken (met hardingsdiepte 2.90mm)(Figuur 23 voor component LM1167). Deze gegevens en grafieken worden geanalyseerd om te bepalen hoeveel er van de coon moet afgenomen worden om binnen de gewenste tolerantie te vallen. Uit deze gegevens kan ook de kwaliteit van de conen van het tandwiel na het hardingsproces bepaald worden. Dit komt in het volgende deelhoofdstuk aan bod bij de bespreking van alle meetresultaten voor de conen.



Figuur 23: Hardingsdiepte, overmaat coon



Figuur 24: Hardheidsmeting coon LM1168 (destructieve test)

3.2.1.2 Overmaat conen

De vervorming van de conen van het planeetwiel moet binnen bepaalde grenzen liggen zodat er tijdens het nabewerken in cel hard genoeg materiaal kan worden afgenomen zonder de minimale benodigde hardingsdiepte te overschrijden. Deze bedraagt voor de conen 1,95mm. Zoals eerder vermeld is uit de destructieve test van component LM1167 gebleken dat de effectieve hardingsdiepte op de coon 2,90mm bedraagt.

Tabel 11: Hardingsdiepte conen test 1

Hardingsdiepte pastille (initieel)	Minimale hardingsdiepte coon
2,66mm	1,95mm
Hardingsdiepte conen (destructief, effectief)	Maximale afname straal
2,90mm	0,95mm
	Maximale afname diameter
	1,90mm

Omdat de hardingsdiepte 2,90mm is, kan er maximaal 0,95mm in straal afgenomen worden van de conen zodat de minimale hardingsdiepte voldoende blijft. Indien het verschil tussen de maat van de coon na het hardingsproces en de maat van de coon van het afgewerkt planeetwiel groter is dan 1,90mm(maximale afname diameter), dan voldoet de component niet meer aan de minimaal vereiste hardingsdiepte van 1,95mm.

De verdeelde overmaat die uit de meetgegevens wordt berekend en die eerder al is besproken, wordt gebruikt om te bepalen hoeveel dat er moet afgenomen worden van de conen. Onderstaande tabel (Tabel 12) geeft de maximale en minimale verdeelde overmaat die moet worden afgenomen. De maximale overmaat bepaalt of er genoeg materiaal kan worden afgenomen. De minimale overmaat geeft weer hoe goed het gehele proces op punt staat. Er wordt namelijk gestreeft naar een zo klein mogelijke minimale overmaat zodat er bij het nabewerken in cel hard zo weinig mogelijk materiaal moet worden afgenomen.

Tabel 12: Verdeelde overmaat conen

	Niveau	Positie	Max	Min	Extra
LM1167	Voet 1	1	-0,76	-0,39	Zonder ondersteuning
LM1168	1	2	-0,77	-0,36	Zonder ondersteuning
LM1169	1	3	-0,72	-0,40	Zonder ondersteuning
LM1170	1	4	-0,70	-0,34	Zonder ondersteuning
LM1171	2	1	-0,66	-0,50	
LM1172	2	2	-0,72	-0,49	
LM1173	2	3	-0,70	-0,49	
LM1174	2	4	-0,70	-0,47	
LM1175	3	1	-0,67	-0,52	

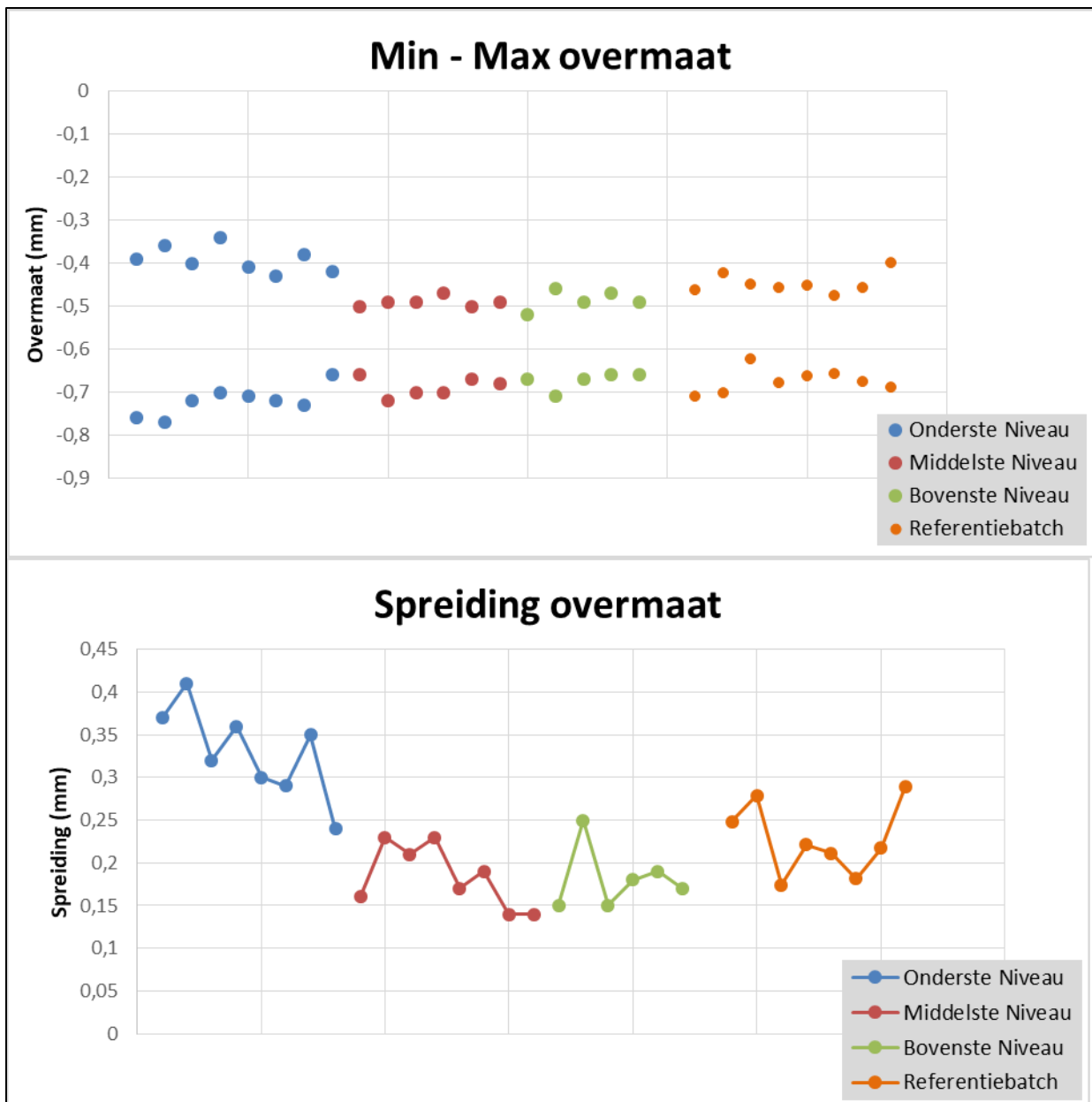
LM1176	3	2	/	/	Geen meetwaarden
LM1177	3	3	-0,71	-0,46	
LM1178	3	4	/	/	Geen meetwaarden
LM1179	Spin 1	1	-0,71	-0,41	
LM1180	1	2	-0,72	-0,43	
LM1181	1	3	-0,73	-0,38	Zonder ondersteuning
LM1182	1	4	-0,66	-0,42	
LM1183	2	1	-0,67	-0,50	
LM1184	2	2	-0,68	-0,49	
LM1185	2	3	-0,57	-0,43	
LM1186	2	4	-0,54	-0,40	
LM1187	3	1	-0,56	-0,41	
LM1189	3	2	-0,67	-0,49	
LM1190	3	3	-0,66	-0,47	
LM1194	3	4	-0,66	-0,49	

3.2.1.3 Vergelijking niveaus en referentiebatch

Door de componenten te gaan stapelen, is de vervorming van elk niveau van de componenten anders. Daarnaast is er ook een verschil tussen de componenten die een extra ondersteuning hadden en degene die dit niet hadden.

Uit *Tabel 12* en *Figuur 25* is duidelijk te zien dat er een grotere spreiding is tussen de maximale en minimale verdeelde overmaat bij de componenten die vanonder aan de stapeling liggen (Voet niveau 1: LM1167, 68, 69, 70 en spin niveau 1: LM1179, 80, 81, 82). Ook valt op dat voor de componenten zonder ondersteuning (LM1167, 68, 69, 70, 81) de spreiding nog groter is dan deze met ondersteuning. De grotere spreiding tussen de maximale en minimale verdeelde overmaat is rechtstreeks gerelateerd aan de hoeveelheid in vervorming. Een grotere algemene vervorming van het planeetwiel zal voor een grotere spreiding zorgen. Hieruit is duidelijk dat de onderste componenten meer gaan vervormen door de hogere belasting van de bovenliggende componenten en dat componenten met ondersteuning minder gaan vervormen. Dit kan te wijten zijn aan het verschil in uitzetting door temperatuur van de componenten en de boom en rooster. De componenten met ondersteuning zullen dus minder invloed ondervinden van de uitzetten van de rooster en boom.

Componenten LM1185, 86, 87 hebben een kleinere minimum en maximum overmaat in vergelijking met de andere tandwielen. Zoals eerder besproken is dit te wijten aan andere beginmaten voor het hardingsproces. Deze zijn verwijderd uit *Figuur 25* bij de minimum en maximum overmaat, maar niet bij de spreiding overmaat (spreiding wordt niet beïnvloed door de beginmaten). In onderstaande figuren zijn ook meetwaarden van een referentiebatch toegevoegd om de testbatch met een batch van het huidige proces te kunnen vergelijken.



Figuur 25: Minimum, maximum overmaat en spreiding

Het is duidelijk zichtbaar dat het probleem van de grotere vervorming zich hoofdzakelijk bevindt op het onderste niveau. De spreiding van het onderste niveau is groter dan deze van de referentiebatch. Het middelste en bovenste niveau hebben gemiddeld gezien een kleinere spreiding dan deze van de referentiebatch. Dit komt omdat momenteel de componenten van de referentiebatch (van het huidige proces) ook rechtstreeks op de roosters worden gelegd.

3.2.2 Kopcirkels

3.2.2.1 Uitleg metingen

De kopcirkels worden gemeten op 3 verschillende hoogtes. Voor al deze hoogtes worden de maximale en minimale diameters bepaald. Ook worden de rondheid, spreiding, maximale en minimale afwijkingen bepaald. Een voorbeeld hiervan is te zien in bijlage C (voorbeeld metingen kopcirkels LM1167).

De meest relevante gegevens uit de meting zijn de minimale en maximale diameter op elke hoogte. Onderstaande Tabel 13 geeft een voorbeeld hiervan voor een referentiebatch uit het standaardproces (geen stapeling van componenten). Hier zijn de drie verschillende hoogtes waarop gemeten wordt, aangegeven door TOP, MIDDLE en UNDER.

Tabel 13: Kopcirkels minimale en maximale diameter referentiebatch

	Component	TOP		MIDDLE		UNDER	
		min tip dia top	max tip dia top	min tip dia middle	max tip dia middle	min tip dia under	max tip dia under
Voet	LM1077	598,719	599,002	598,906	599,064	598,709	598,851
	LM1078	598,622	598,944	598,922	599,000	598,606	598,887
	LM1079	598,548	598,827	598,900	599,011	598,645	598,956
Spin 1	LM1080	598,726	598,840	598,934	599,003	598,636	598,871
	LM1081	598,652	598,829	598,873	599,025	598,523	598,966
	LM1082	598,673	598,823	598,842	599,004	598,425	598,906
	LM1083	598,626	598,813	598,945	599,026	598,616	598,916
Spin 2	LM1084	598,735	598,990	598,946	599,042	598,598	598,978
	LM1085	598,642	598,894	598,896	599,052	598,636	599,039
	LM1086	598,722	598,951	598,940	599,036	598,597	598,986
	LM1087	598,631	598,887	598,919	599,079	598,528	599,046
Spin 3	LM1088	598,732	598,839	598,923	599,024	598,595	599,038
	LM1089	598,756	598,989	598,940	599,099	598,598	599,041
	LM1090	598,687	598,864	598,872	599,088	598,527	598,966
	LM1091	598,728	598,957	598,956	599,005	598,585	598,856
Spin 4	LM1092	598,764	598,894	598,943	598,971	598,688	598,840
	LM1093	598,772	598,921	599,012	599,103	598,752	598,922
	LM1094	598,799	598,917	599,001	599,110	598,761	598,987

3.2.2.2 Resultaat metingen kopcirkels

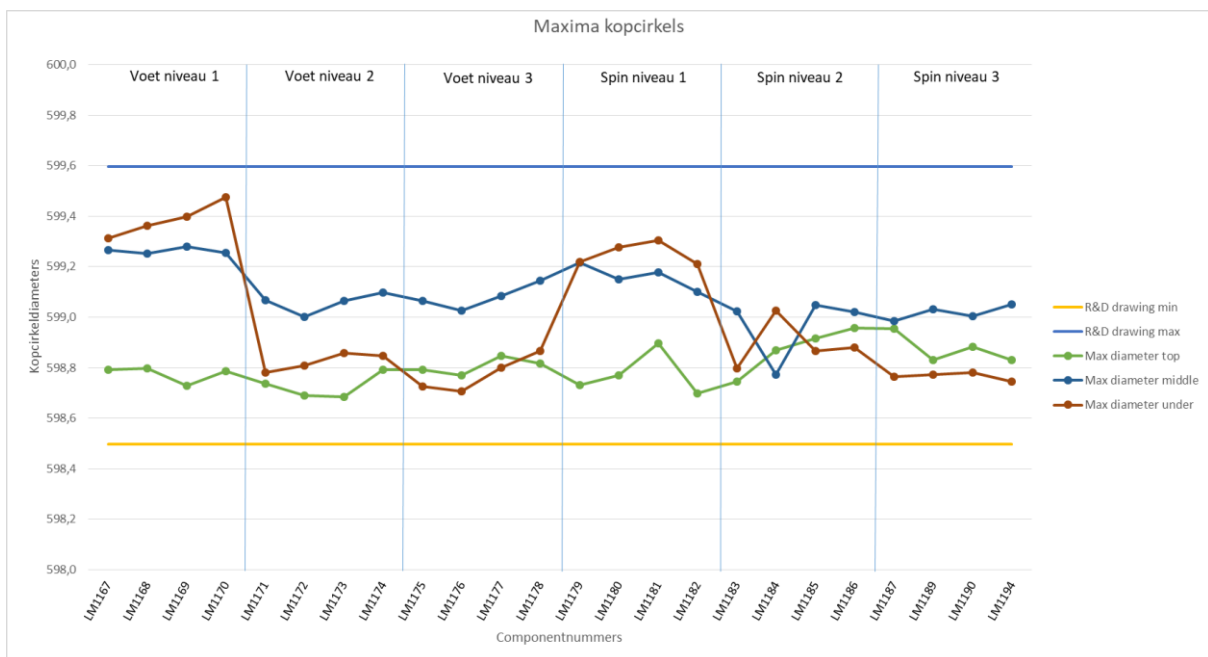
De maximale en minimale diameter van de kopcirkel moeten binnen een bepaalde tolerantie liggen zodat alle tanden na het slijpen in cel hard zuiver vallen (alle delen van het oppervlak zijn geslepen en er zijn geen ongeslepen stukken). De tolerantiegrenzen van de kopcirkel diameter bedragen volgens de R&D-tekening minimum 598,496mm en maximum 599,596mm. Alle maten en componenten die buiten deze tolerantie vallen, zijn aangeduid in het rood in onderstaande Tabel 14.

Tabel 14: Kopcirkels minimale en maximale diameter eerste stapeling test

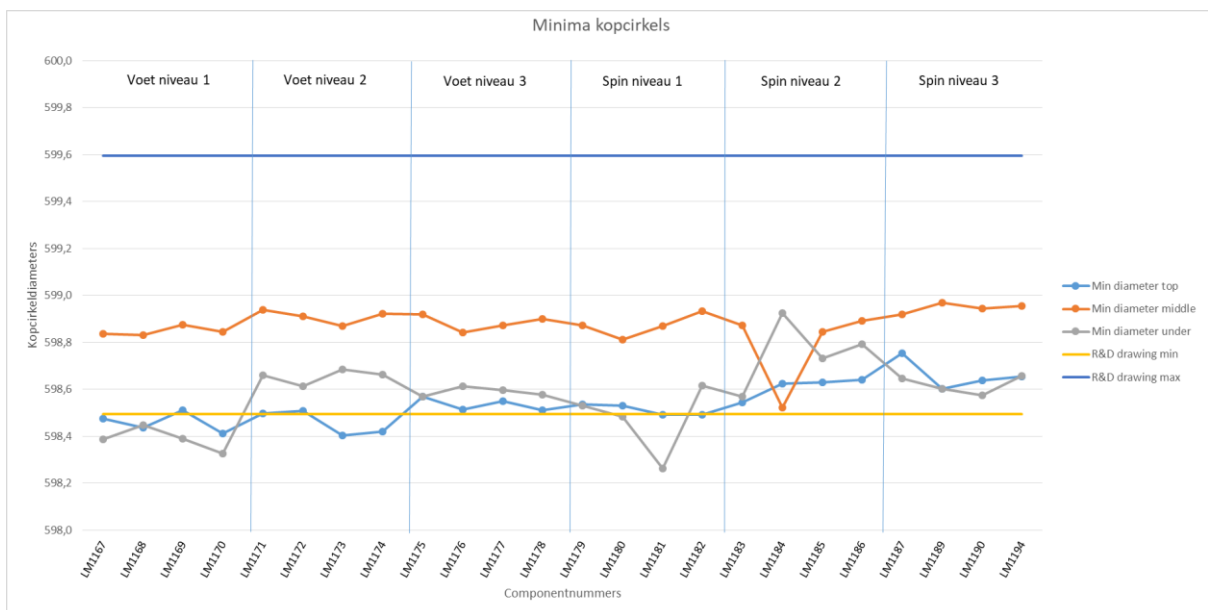
	Component	TOP		MIDDLE		UNDER	
		min tip dia top	max tip dia top	min tip dia middle	max tip dia middle	min tip dia under	max tip dia under
Voet Niveau 1	LM1167	598,475	598,791	598,835	599,265	598,388	599,314
	LM1168	598,436	598,799	598,830	599,253	598,449	599,363
	LM1169	598,512	598,727	598,876	599,279	598,390	599,397
	LM1170	598,412	598,787	598,845	599,255	598,327	599,474
Voet Niveau 2	LM1171	598,496	598,736	598,938	599,068	598,661	598,780
	LM1172	598,509	598,691	598,911	599,002	598,613	598,808
	LM1173	598,404	598,683	598,870	599,065	598,684	598,858
	LM1174	598,419	598,792	598,921	599,097	598,663	598,847
Voet Niveau 3	LM1175	598,569	598,793	598,919	599,063	598,569	598,726
	LM1176	598,514	598,771	598,842	599,025	598,613	598,707
	LM1177	598,549	598,848	598,872	599,085	598,596	598,799
	LM1178	598,511	598,817	598,901	599,145	598,578	598,865
Spin Niveau 1	LM1179	598,535	598,731	598,873	599,216	598,532	599,219
	LM1180	598,531	598,770	598,811	599,151	598,484	599,277
	LM1181	598,492	598,895	598,869	599,178	598,262	599,305
	LM1182	598,492	598,698	598,933	599,101	598,617	599,210
Spin Niveau 2	LM1183	598,544	598,744	598,873	599,023	598,570	598,796
	LM1184	598,624	598,870	598,522	598,774	598,926	599,025
	LM1185	598,631	598,915	598,845	599,049	598,731	598,865
	LM1186	598,641	598,956	598,892	599,021	598,793	598,879
Spin Niveau 3	LM1187	598,754	598,954	598,919	598,985	598,646	598,764
	LM1189	598,602	598,830	598,969	599,031	598,602	598,771
	LM1190	598,637	598,882	598,945	599,005	598,574	598,780
	LM1194	598,654	598,830	598,955	599,051	598,658	598,746

Net zoals bij de conen is duidelijk dat de componenten op de onderste niveaus, de grootste uitwijkingen hebben. Ook de componenten op het onderste niveau zonder ondersteuning hebben een grotere spreiding dan die componenten op de onderste niveaus met ondersteuning. Uit de tabel is zichtbaar dat hoofdzakelijk de minimale diameter kritisch is om aan de tolerantie te

voldoen. Onderstaande Figuur 26 en Figuur 27 geven de maxima en minima van elke component voor de top, middle en onder meting van de kopcirkel weer. De tolerantiegrenzen van de R&D-tekening worden ook weergegeven op beide grafieken.



Figuur 26: Maxima kopcirkels top, middle en onder per niveau



Figuur 27: Minima kopcirkels top, middle en onder per niveau

Uit bovenstaande grafieken is de grotere maximale diameter voor de top en de middle meting op de componenten op het onderste niveau duidelijk te zien. Alle metingen op de maximale diameter liggen binnen de tolerantie maar de onderste niveaus komen dicht bij de maximaal toegelaten diameter. Alle andere niveaus liggen zeer goed binnen de tolerantie. Bij de minimale diameter is de grotere uitwijking op de componenten op het onderste niveau ook zichtbaar maar het verschil

met de andere niveaus is niet zo groot als bij de maximale diameters. Veel metingen van de minimale diameters vallen echter buiten de tolerantie. Dit was ook vast te stellen uit Tabel 14.

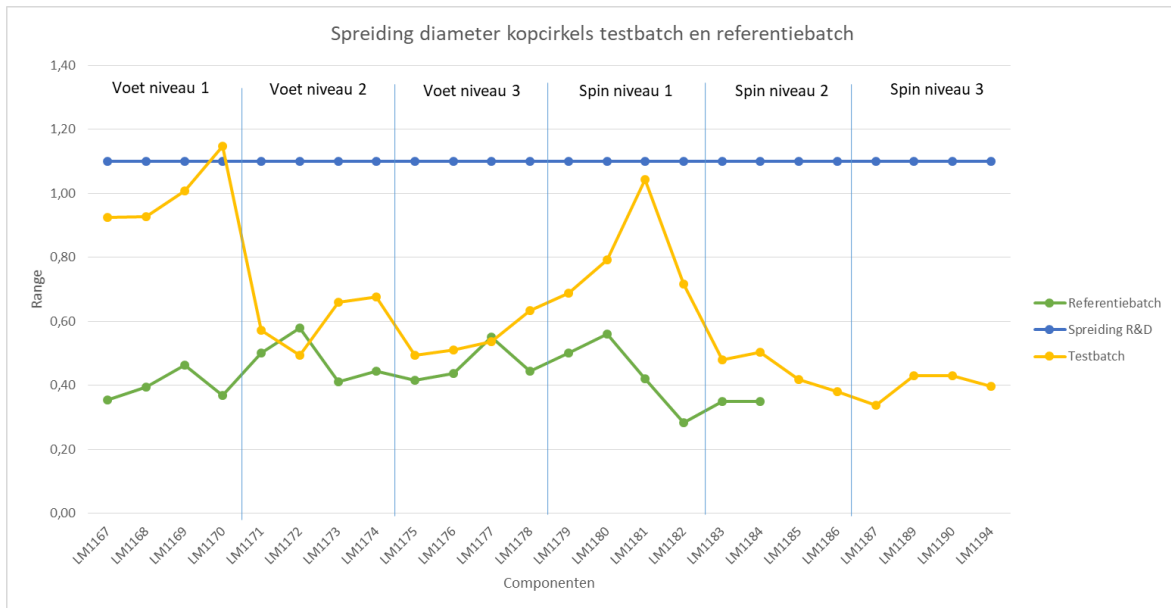
De spreiding op de diameter van alle componenten is redelijk positief. Bijna alle componenten hebben een spreiding die kleiner is dan de maximale spreiding. Enkel component LM1170 heeft een te grote spreiding (Tabel 15). Uit onderstaande tabel is weer te zien dat de componenten op het onderste niveau en zonder ondersteuning, de grootste spreiding hebben. Alle componenten op voet niveau 1 en component LM1181 (op spin niveau 1) hadden geen ondersteuning.

Tabel 15: Spreiding kopcirkels

		Spreiding R&D	Spreiding	
Testbatch	LM1167	1,1	0,93	Voet niv 1
	LM1168	1,1	0,93	Voet niv 1
	LM1169	1,1	1,01	Voet niv 1
	LM1170	1,1	1,15	Voet niv 1
	LM1171	1,1	0,57	Voet niv 2
	LM1172	1,1	0,49	Voet niv 2
	LM1173	1,1	0,66	Voet niv 2
	LM1174	1,1	0,68	Voet niv 2
	LM1175	1,1	0,49	Voet niv 3
	LM1176	1,1	0,51	Voet niv 3
	LM1177	1,1	0,54	Voet niv 3
	LM1178	1,1	0,63	Voet niv 3
	LM1179	1,1	0,69	Spin niv 1
	LM1180	1,1	0,79	Spin niv 1
	LM1181	1,1	1,04	Spin niv 1
	LM1182	1,1	0,72	Spin niv 1
	LM1183	1,1	0,48	Spin niv 2
	LM1184	1,1	0,50	Spin niv 2
	LM1185	1,1	0,42	Spin niv 2
	LM1186	1,1	0,38	Spin niv 2
LM1187	1,1	0,34	Spin niv 3	
LM1189	1,1	0,43	Spin niv 3	
LM1190	1,1	0,43	Spin niv 3	
LM1194	1,1	0,40	Spin niv 3	

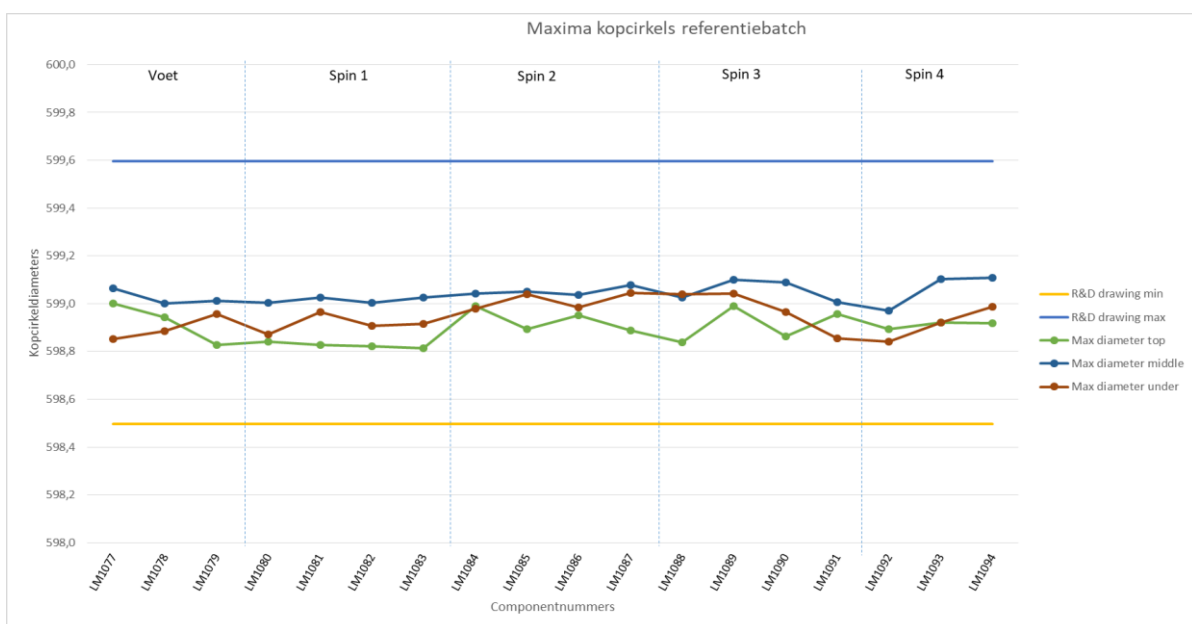
3.2.2.3 Vergelijking referentiebatch

Deze resultaten worden vergeleken met de metingen van een referentiebatch die op de originele manier werd opgebouwd (geen componenten op elkaar gestapeld). In onderstaande Figuur 28 wordt de spreiding van de kopcirkels van de referentiebatch en de testbatch voorgesteld. De spreiding van de referentiebatch is duidelijk kleiner dan deze van de testbatch. De gemiddelde spreiding van de referentiebatch is namelijk 0.43 en de gemiddelde spreiding van de testbatch is 0.63. Dit verschil komt hoofdzakelijk door de grote spreiding op de onderste niveaus van de stapeling en ook voor de onderste componenten die niet ondersteund waren.

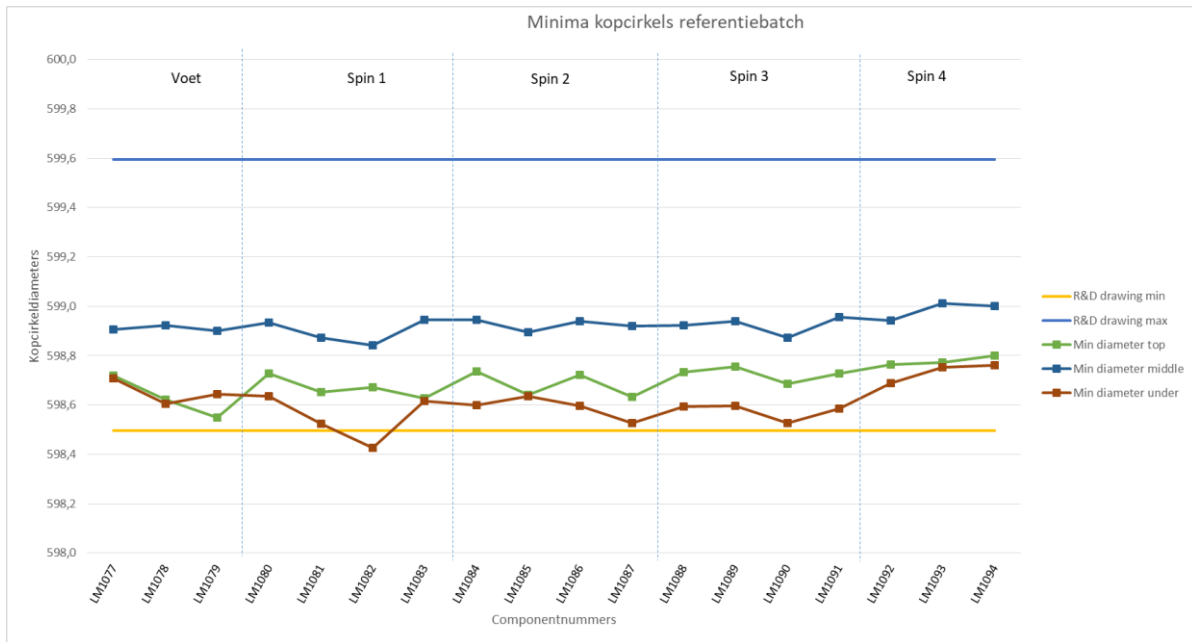


Figuur 28: Spreiding diameter kopcircels referentiebatch en testbatch (per niveau)

Figuur 29 en Figuur 30 geven de maxima en minima van de kopcircels voor de referentiebatch weer. Deze moeten vergeleken worden met Figuur 26 en Figuur 27 van de testbatch. De referentiebatch kopcirkelmetingen liggen minder verspreid dan deze van de testbatch. Net zoals bij de testbatch is duidelijk dat de grootste problemen om aan de tolerantie te voldoen zich situeren bij de minimale diameters. Bij de maximale kopcirkeldiameters van de referentiebatch valt op dat de metingen zeer ver van maximaal toegelaten diameter van de R&D drawing liggen. Door een aanpassing van de beginmaten voor het hardingsproces, kunnen alle minimale en maximale diameters van referentiebatch binnen de tolerantie liggen. Bij de testbatch zou dit niet mogelijk zijn door de te grote spreiding. Er moet getracht worden de spreiding bij de testbatch te verkleinen.



Figuur 29: Maxima kopcircels referentiebatch



Figuur 30: Minima kopcirkels referentiebatch

3.2.3 Resultaten

Het effectief bepalen of de componenten goed zijn of niet, gebeurt tijdens het nabewerken van de componenten. De resultaten daarvan staan in het onderstaande overzicht. In totaal zijn er vier componenten scrap waarvan de LM1170 en LM1181 randgevallen waren maar uiteindelijk toch zijn gescrept omwille van kwaliteitseisen. Vier andere componenten hebben een beperking (zie 2.1.4 Tolerantieclassen).

Tabel 16: Overzicht resultaat componenten 027-F1245E021

Component	Niveau	Positie	Conen	Kopcircels	Eindbeoordeling
LM1167	Voet Niv. 1	2	OK	Beperking WB	Eindproduct
LM1168	Voet Niv. 1	3	OK	Destructieve test	Scrap
LM1169	Voet Niv. 1	5	OK	Scrap	Scrap
LM1170	Voet Niv. 1	6	OK	Scrap	Scrap
LM1171	Voet Niv. 2	2	OK	OK	Eindproduct
LM1172	Voet Niv. 2	3	OK	Beperking WB	Eindproduct
LM1173	Voet Niv. 2	5	OK	Beperking WB	Eindproduct
LM1174	Voet Niv. 2	6	OK	Beperking WC	Eindproduct
LM1175	Voet Niv. 3	2	OK	OK	Eindproduct
LM1176	Voet Niv. 3	3	OK	OK	Eindproduct
LM1177	Voet Niv. 3	5	OK	OK	Eindproduct
LM1178	Voet Niv. 3	6	OK	OK	Eindproduct
LM1179	Spin Niv. 1	2	OK	OK	Eindproduct
LM1180	Spin Niv. 1	3	OK	OK	Eindproduct
LM1181	Spin Niv. 1	5	OK	Scrap	Scrap
LM1182	Spin Niv. 1	6	OK	OK	Eindproduct
LM1183	Spin Niv. 2	2	OK	OK	Eindproduct
LM1184	Spin Niv. 2	3	OK	OK	Eindproduct
LM1185	Spin Niv. 2	5	OK	OK	Eindproduct
LM1186	Spin Niv. 2	6	OK	OK	Eindproduct
LM1187	Spin Niv. 3	2	OK	OK	Eindproduct
LM1189	Spin Niv. 3	3	OK	OK	Eindproduct
LM1190	Spin Niv. 3	5	OK	OK	Eindproduct
LM1194	Spin Niv. 3	6	OK	OK	Eindproduct

3.3 Conclusie

Uit deze eerste test blijkt dat het stapelen van componenten realistisch en haalbaar is. Voorlopig zijn drie componenten op elkaar de maximum haalbare hoeveelheid voordat de vervormingen te groot gaan worden door de hoge belasting. Het stapelen van vier componenten op elkaar zou eventueel mogelijk zijn indien er goede ondersteuning voor het onderste niveau en tussen de componenten ontworpen worden, maar omdat er geen testen voor mogelijk waren met vier componenten op elkaar is het resultaat van de vervormingen en indrukking moeilijk in te schatten. Het totale gewicht zal kritisch zijn indien er een totaal van 28 componenten worden gestapeld in plaats van de huidige 24 componenten tijdens de eerste test.

Het resultaat van de eerste test is hoofdzakelijk positief. Er moet een verbetering komen om de onderste niveaus op de spin en de voet. De grotere vervorming van de onderste componenten wordt deels veroorzaakt door het anders vervormen van de boom en de componenten. Er moeten andere ondersteuning ontwikkeld worden zodat deze vervorming kleiner wordt. Hier wordt verder op in gegaan bij de technische verdieping.

Uit het analyseren van de resultaten van zowel de testbatch als de referentiebatch is er vastgesteld dat de afmetingen van het tandwiel na het harden niet centraal in de tolerantie liggen. De afmetingen van de minimale kopcirkeldiameters liggen te dicht bij de R&D-minima. Er kan dus een compensatie in cel zacht gebeuren om er zo voor te zorgen dat de afmetingen na het harden beter binnen de tolerantie vallen. Dit wordt ook in het hoofdstuk 'Technische verdieping' verder besproken.

4 Technische verdieping

In de technische verdieping worden de precompensaties die toegepast worden uitgelgd en de invloed op de vervormingen wordt onderzocht. Aan de hand van deze analyse wordt een nieuwe ondersteuning ontworpen die een grotere bewegingsvrijheid zal geven aan de componenten en de procesopbouw wordt besproken met enkele toolings die de opbouw moeten vergemakkelijken.

4.1 Bepaling van de precompensatie

Om de meetresultaten van de testbatch te kunnen vergelijken met de standaardbatches die gebruikt worden is er een volledige standaardbatch opgemeten (zie Tabel 13). Het analyseren van de meetgegevens van de testbatch en standaardbatch bepaalt de mogelijke precompensatie (extra overmaat) zodat deze compensatie voor zowel de testbatch als de standaardbatch gunstig is.

4.1.1 Compensatie conen

De maximale overmaat bepaalt hoeveel materiaal er van de coon moet worden afgenomen. Hierbij mag de hardingsdiepte niet lager dan de minimaal vereiste hardingsdiepte van 1,95mm liggen vanwege een te grote maximale verdeelde overmaat. Daarom wordt een precompensatie toegepast zodat de maximale verdeelde overmaat rond de -0,60 zit en zo de vereiste hardingsdiepte van 1,95mm (van de lagerloopbaan) steeds behaald zal worden als er met de minimale hardingsdiepte gewerkt wordt in de oven (Atmin 2,6 - Atmax 3,7). Bij het bekijken van de minimale en maximale verdeelde overmaat op de conen van een standaard referentiebatch is gebleken dat ook daar net zoals bij de eerste testbatch de maximaal verdeelde overmaat rond de -0,7mm ligt waardoor de vereiste hardingsdiepte van de lagerloopbaan van 1,95 mm niet behaald wordt na het harddraaien indien de oven zou werken met 'Atmin' 2,6mm.

Leverancier van het staal voor deze componenten is Siderforgerossi. De minimum en maximum verdeelde overmaat in straal van de conen na het harden zijn:

- Standaard: min.: -0,39mm en max.: -0,71mm
- Testbatch één: min.: -0,34mm en max.: -0,77mm

Uit bovenstaande informatie kan besloten worden dat er een precompensatie nodig is van +0,15mm in straal. De referentie diameter van de conen wordt dan na cel zacht 354.43mm in plaats van 354.13mm.

4.1.2 Compensatie kopcirkels

Uit de meetresultaten van de referentiebatch bleek dat er echter één component (LM1082) een te lage 'min. kopcirkeldiameter' had en dat er enkele componenten waren die dicht bij de vooropgestelde R&D-minimumwaarde lagen. Bij de eerste testbatch waren er ook negen componenten waarbij de minimale kopcirkeldiameter onder de vooropgestelde R&D-minima lagen. Dit waren voornamelijk de componenten die op het onderste niveau lagen.

Tabel 17: Vooropgestelde min- en max-waarde voor de kopcirkels na het harden

R&D drawing min	R&D drawing max
598,496 mm	599,596 mm

De kopcirkels na harden zijn:

- Standaard: min.: 598.35mm en max.: 599.45mm
- Testbatch één: min.: 598.26mm en max.: 599.47mm

Dus ook op de andere standaardbatches is gezocht naar de minimale en maximale kopcirkels na het harden. Ook hier is de minimumwaarde lager dan de R&D-minima. Vanwege deze bemerkingen is er besloten om een correctie uit te voeren op de kopcirkels in cel zacht.

Het voorstel voor deze correctie op de kopcirkel in cel zacht is een overmaat van 0,15mm in diameter. Met andere woorden wordt de kopcirkeldiameter van component 027-F1245E021 599,450mm in plaats van 599,300mm na de bewerking in cel zacht.

4.1.3 Hardingsdiepte

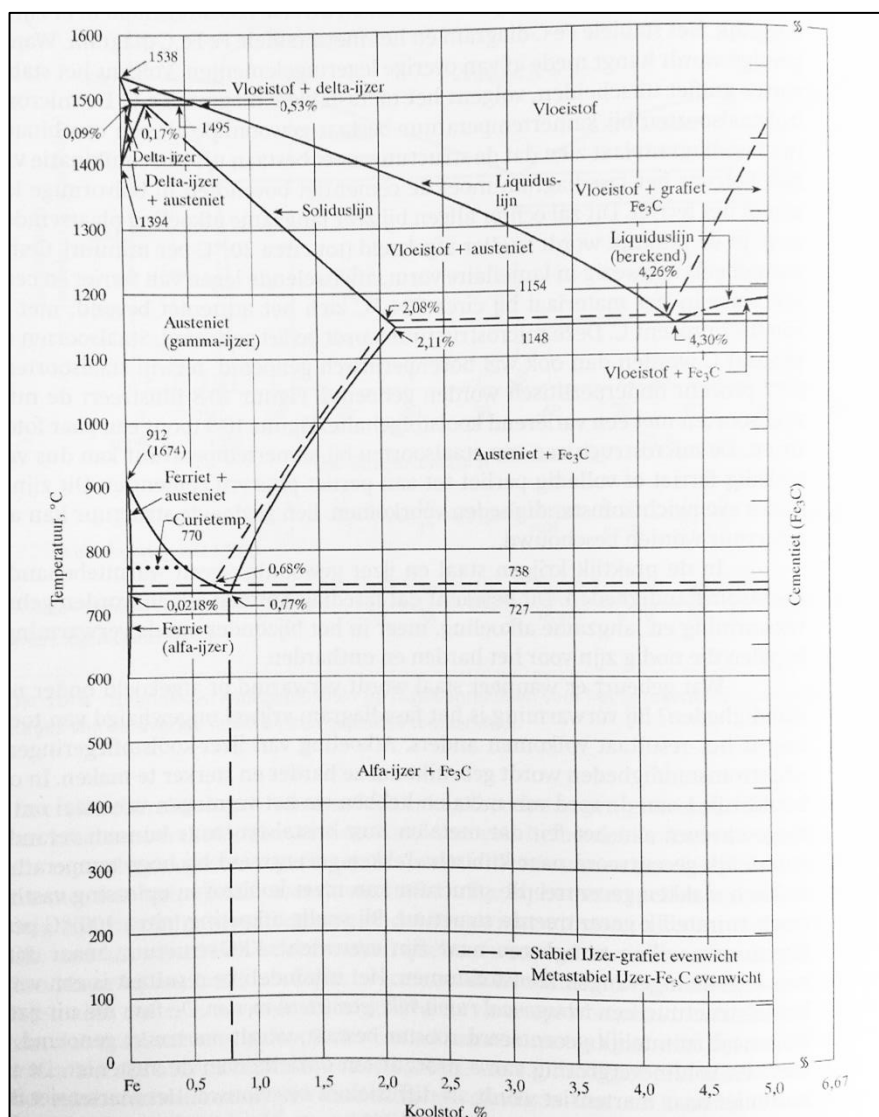
De hardingsdiepte die vereist is op de conen is zoals reeds vermeld 1,95mm, de vereiste hardingsdiepte van de vertanding is 1,7mm. De ovens in de harderij worden ingesteld op een hardingsdiepte tussen 'Atmin' 2,6mm en 'Atmax' 3,7mm. Bij de eerste testbatch was de hardingsdiepte 2,69mm en de effectieve hardingsdiepte op de conen bleek na een destructieve test 2,90mm te zijn. Bij een testbatch is het beter om de vereiste hardingsdiepte iets hoger in te stellen om ervoor te zorgen dat in cel hard meer materiaal kan worden afgenomen indien de componenten meer vervormd zijn. Bij een tweede test zal de hardingsdiepte ingesteld worden op minimum 2,8mm.

4.2 Invloed op vervorming

De staalsoort van het gestel en die van de component zijn verschillend, de verscheidenheid in legeringselementen heeft een grote impact op de eigenschappen van het staal en zijn gedrag. In de volgende subhoofdstukken worden de verschillen tussen de twee materialen onderzocht. Vooraleer de verschillen duidelijk gemaakt worden, worden enkele benamingen en structuren toegelicht.

4.2.1 Microstructuren

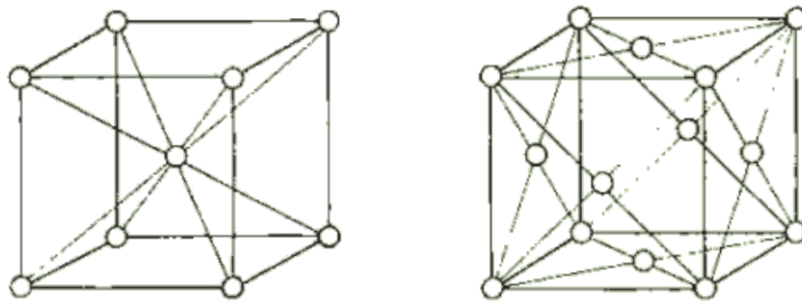
Afhankelijk van de legeringselementen en in welke hoeveelheid deze aanwezig zijn in het type staal zullen de eigenschappen anders zijn. Het ijzer-koolstof fasetoestandsdiagram (zie Figuur 31) bestaat uit verschillende fases. Naargelang het koolstofpercentage en de temperatuur verschillen, zal de fasetoestand waarin het staal zich bevindt alsook de interne atoomstapelings verschillen.



Figuur 31: Ijzer-koolstof fasetoestandsdiagram [10]

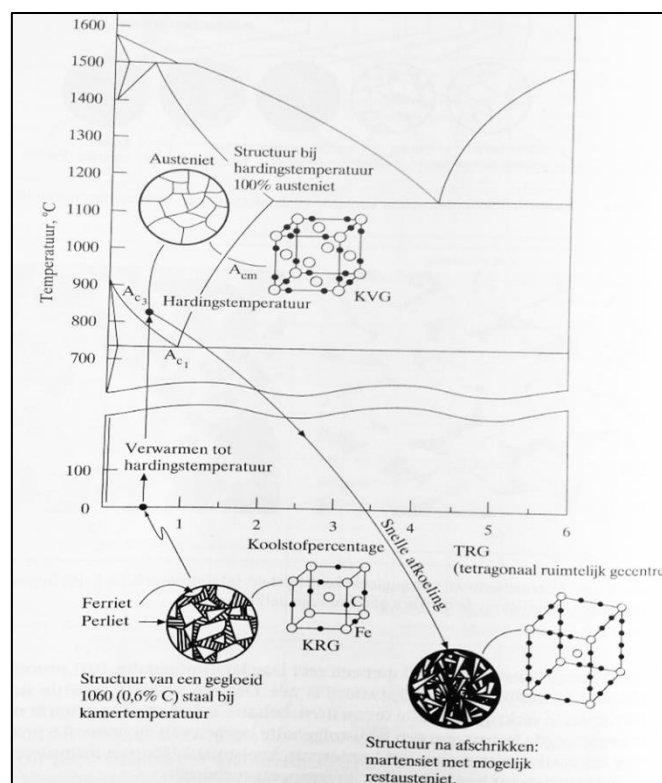
De eigenschappen van het staal veranderen vanwege de bindingen op atoomniveau. Bepaalde fasegebieden kunnen beïnvloed worden door andere elementen aan toe te voegen zoals bijvoorbeeld nikkel dat het austenietgebied vergroot.

De atoomstapelings kunnen afhankelijk van het fasegebied verschillen zoals eerder vermeld werd. De atoomstapelings kunnen voorgesteld worden als éénheidscellen van een kristalrooster. Enkele voorbeelden zijn kubisch ruimtelijk gecentreerd kristalrooster (α -ijzer of ferriet of KRG), kubisch vlakken gecentreerd kristalrooster (γ -ijzer of austeniet of KVG). Beide zijn hieronder afgebeeld (zie Figuur 32 [11]).



Figuur 32: KRG-kristalrooster links en KVG-kristalrooster rechts

Het kubisch ruimtelijk gecentreerd kristalrooster is opgebouwd uit twee verschillende ijzeratomen per eenheidscel. De kenmerken van een ferrietische kristalstructuur zijn zacht, ductiel en magnetisch. Een kubisch vlakgecentreerd kristalrooster is gevormd uit vier verschillende ijzeratomen per eenheidscel. De kenmerken van een austenitische kristalstructuur zijn zacht, matig sterk en niet magnetisch.[12] Op onderstaande afbeelding (Figuur 33) is een voorbeeld gegeven voor een 0,6% koolstofstaal waarbij dit staal vanop kamertemperatuur verwarmd wordt tot in het austenietgebied en dan snel afgeschrikt wordt zodat er martensiet gevormd wordt.



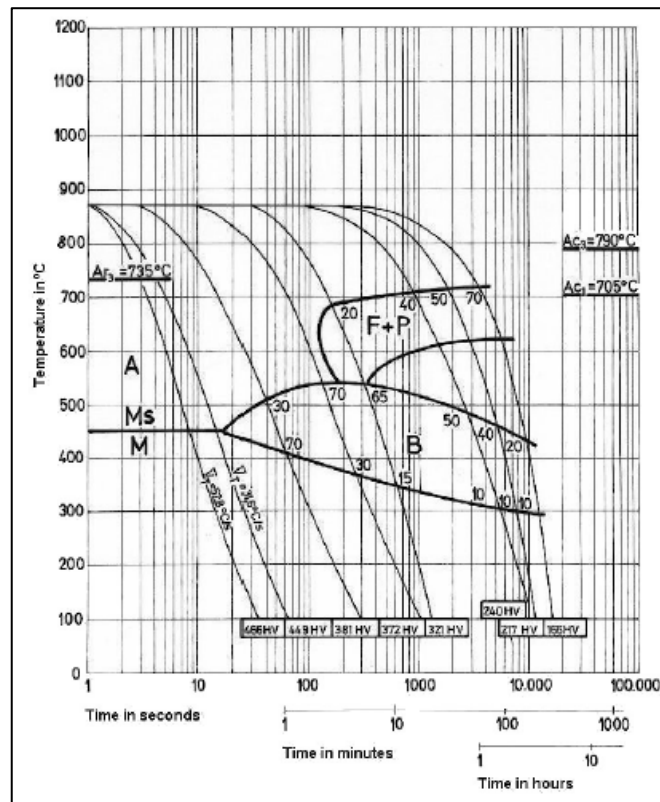
Figuur 33: Kristal- en microstructuur voor een 0,6% koolstofstaal voor en na afschrikken vanuit het austenietgebied [12]

Het is algemeen geweten dat

De kubisch vlakken gecentreerde structuur meer koolstof in oplossing kan vasthouden dan de kubisch ruimtelijk gecentreerde structuur. Bij snelle afkoeling (circa 100°C per seconde) zou de ijzermatrix willen terugkeren naar zijn evenwichts-KRG-structuur, maar dit is niet mogelijk vanwege de ingevangen koolstofatomen. Het uiteindelijke resultaat is een vervormde austeniet kristalstructuur, een *tetragonaal ruimtelijk gecentreerd rooster*. De fase die uit ijzer-koolstof met tetragonaal ruimtelijk gecentreerd rooster bestaat, wordt *martensiet* genoemd. Dit gaat gepaard met een volume vergroting van vier procent ten opzichte van de austeniet.

Het martensiet is zeer hard, zodat het nauwelijks kan vervormen. Wordt hierbij austeniet ingesloten, dan kan dit geen vier procent uitzetten, zodat het onder druk blijft bestaan bij kamertemperatuur: restausteniet. [12]

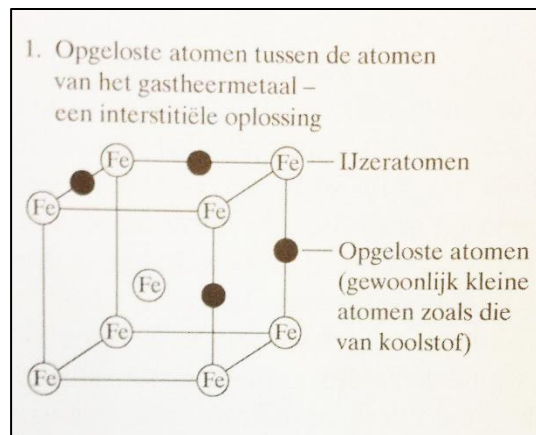
Afhankelijk van het type staal zal de afkoelsnelheid een belangrijke rol spelen in het uiteindelijk verkregen kristalrooster. Hieronder een voorbeeld van een grafiek waaruit de afschriksnelheid kan bepaalt worden om een martensietische structuur te bekomen (zie Figuur 34).



Figuur 34: Voorbeeld van een CCT-diagram (werkstofnummer 1.6587) [13]

Dit voorbeeld is van werkstofnummer 1.6587 ofwel het staal waaruit het tandwiel vervaardigd wordt (type 027-F1245E021).

Op onderstaande afbeelding (Figuur 35) is een voorbeeld te zien van koolstofatomen die opgelost zijn in een KRG-rooster waarbij ze plaats nemen op de ribben van de kubus.



Figuur 35: Voorbeeld van koolstofatomen die zijn opgelost in een KRG-structuur die bestaat uit Fe-atomen [12]

Een andere vorm van atomen die oplossen een structuur is substitutionele diffusie, hierbij worden de Fe-atomen van de matrix ingenomen door vreemde legeringselementen.

4.2.2 Staaltje van het gestel

De bouwmaterialen waaruit een gestel wordt opgebouwd worden vervaardigd uit 'Cronite 37Ni/18Cr/Nb No. HR32' (andere benamingen: werkstofnummer 1.4849 of GX40 NiCrSiNb38-19, zie bijlage F: Cronite HR32). Dit materiaal heeft een speciale samenstelling van legeringselementen om nog steeds een hoge treksterkte te behouden bij hoge temperaturen (boven 600°C). Andere voordelen van deze legering zijn weerstand tegen grote temperatuurschokken en gascarbonisatie. Op onderstaande tabel (Tabel 18) zijn de legeringselementen weergegeven.

Tabel 18: Legeringselementen van 1.4849 in wt% (Bijlage F: Cronite HR32)

C	Si	Cr	Ni	Mn	Nb/Co
0,4	1,5	18	38	1	1,5

Dit materiaal is austenitisch hittebestendig gietstaal met een maximale gebruikstemperatuur van 1020°C en wordt speciaal voor toepassingen in hardere gebruikt. De hoge hoeveelheid nikkel verhoogt de taaiheid, hardbaarheid en bevordert de austenietische structuur van het staal. Chroom aan de andere kant verhoogt de weerstand tegen corrosie en oxidatie bij hoge temperaturen, verhoogt de sterkte bij hoge temperaturen, eveneens de hardbaarheid en de hardheid van het staal.

Specifieke legeringselementen zoals magnaan en nikkel stabiliseren de austenitische structuur en bevorderen het hardingsproces van laaggelegeerd staal. In het extreme geval van austenitisch roestvast staal is er een grote hoeveelheid legeringselementen aanwezig. Hierdoor is de austenitische structuur stabiel op kamertemperatuur. Anderzijds destabiliseren

legeringselementen zoals silicium, molybdeen en chroom het austeniet en dit verhoogt de eutectische temperatuur.[14]

Austenitisch staal heeft een hoog percentage aan nikkel, dit bevordert de austenitische structuur. Dit wil zeggen dat het kristalrooster op kamertemperatuur voornamelijk austenitisch is. In onderstaande tabel staat de thermische uitzettingcoëfficiënt van 1.4849.

Tabel 19: Thermische uitzetting van 1.4849 [15]

T(°C)	$\alpha(10^{-6}m/K)$
400	15,3
800	17,0
1000	17,6

4.2.3 Staaltypen van component 027-F1245E021

Component 027-F1245E021 is vervaardigd uit een laagkoolstofstaal, nl 18CrNiMo7-6 (1.6587). Het doel van de legering van de component is om een zacht staal te hebben wat makkelijk bewerkt kan worden in 'zachte' toestand. Hierna wordt het koolstofpercentage verhoogd aan het oppervlak door carbonisatie. Na afschrikken en ontlaten is het staal hard geworden. De legeringselementen zijn hieronder in de tabel weergegeven.

Tabel 20: Legeringselementen van 1.6587 in wt% [13]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,15-0,21	0,40	0,50-0,90	0,025	0,035	1,50-1,80	0,25-0,35	1,40-1,70

Hieronder de verschillende legeringselementen met hun functie [12]:

- Zwavel en fosfor verhogen de machinale bewerkbaarheid.
- Chroom verhoogt de weerstand tegen corrosie en oxidatie, verhoogt de hardbaarheid, verhoogt de sterkte bij hoge temperaturen en kan met koolstof combineren tot harde, slijtvaste microbestanddelen (carbiden).
- Nikkel verhoogt de hardbaarheid, verhoogt de taaierheid.
- Mangaan verhoogt de hardbaarheid, verlaagt de hardingstemperatuur, bevordert de austenitische structuur.
- Silicium verwijdert zuurstof bij staalbereiding, verhoogt de hardbaarheid en verbetert de taaierheid.
- Molybdeen bevordert korrelverfijning, verhoogt de hardbaarheid en verbetert de sterkte bij hoge temperaturen.

In onderstaande tabel staat de uitzettingscoëfficiënt bij verschillende temperaturen van 1.6587.

Tabel 21: Thermische uitzettingscoëfficiënten van 1.6587 [13]

T(°C)	$\alpha(10^{-6}m/K)$
100	11,1
200	12,1
300	12,9
400	13,5
500	13,9

Tabel 22: Grootste carbonisatie staalsoorten voor medium- en grote tandwielen in verschillende geografische markten [16]

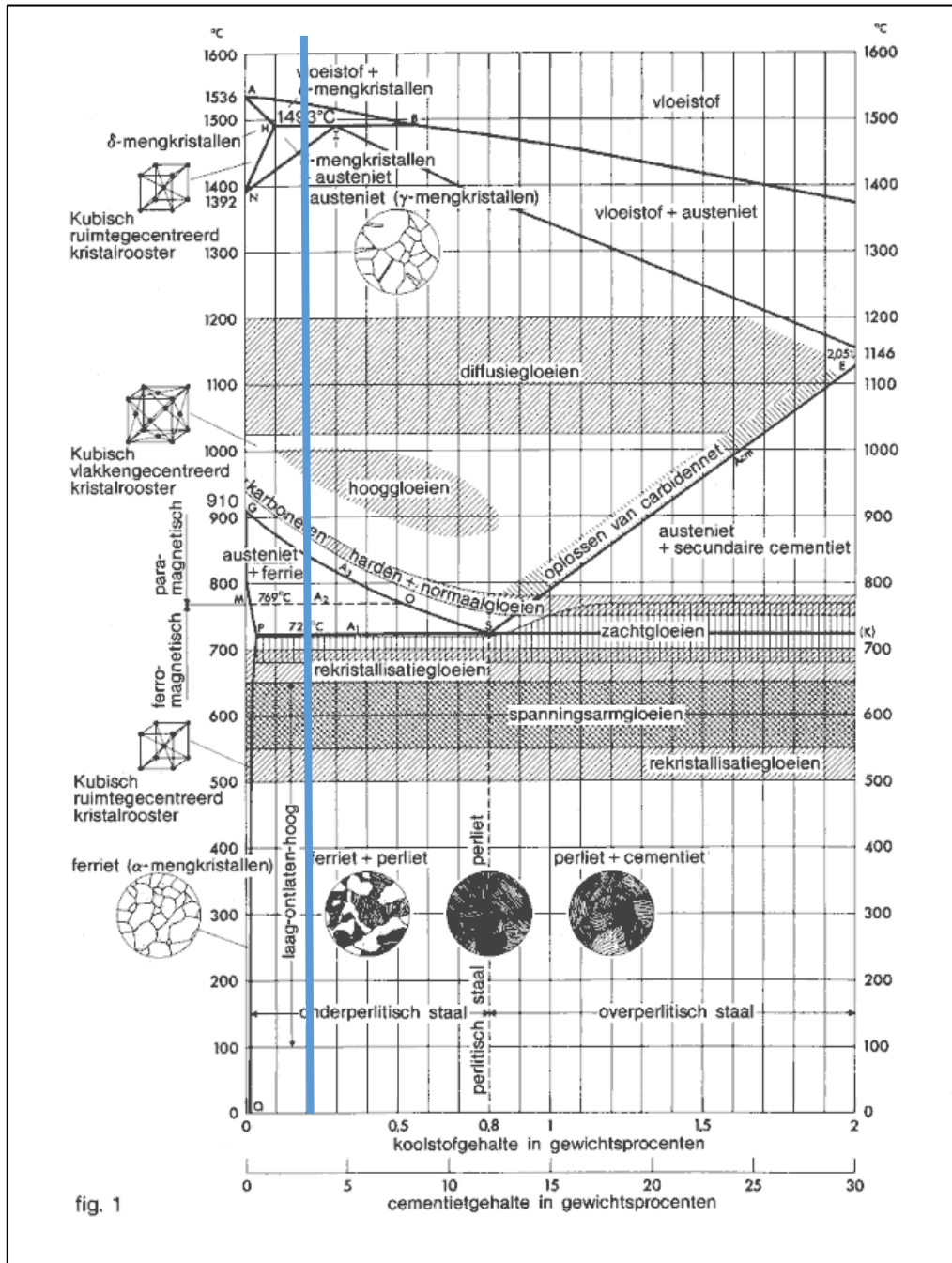
Steel Grade	Standard	Alloy Addition in wt %									Region
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	
20MnCr5	EN 10084 (1.7147)	min.	0.17	-	1.10	-	-	1.00	-	-	Western Europe
		max.	0.22	0.40	1.40	0.035	0.035	1.30	-	-	
18CrNiMo7-6	EN 10084 (1.6587)	min.	0.15	-	0.50	-	-	1.50	0.25	1.40	France, Germany
		max.	0.21	0.40	0.90	0.025	0.035	1.80	0.35	1.70	
15CrNi6	EN 10084 (1.5919)	min.	0.14	-	0.40	-	-	1.40	-	1.40	Italy, France
		max.	0.19	0.40	0.60	0.035	0.035	1.70	-	1.70	
17NiCrMo6-5	EN 10084 (1.6566)	min.	0.14	-	0.60	-	-	0.80	0.15	1.20	North America
		max.	0.20	0.40	0.90	0.025	0.035	1.10	0.25	1.50	
SAE 8620	SAE J1249	min.	0.18	0.15	0.70	-	-	0.40	0.15	0.40	China
		max.	0.23	0.35	0.90	0.030	0.040	0.60	0.25	0.70	
SAE 9310	SAE J1249	min.	0.08	0.15	0.45	-	-	1.00	0.08	3.00	Japan
		max.	0.13	0.35	0.65	0.025	0.040	1.40	0.15	3.50	
20CrMnTi	GB T 3077-1999	min.	0.17	0.17	0.80	-	-	1.00	0.00	-	Japan
		max.	0.23	0.37	1.10	0.035	0.035	1.30	0.15	0.30	
20CrMnMo	GB T 3077-1999	min.	0.17	0.17	0.90	-	-	1.10	0.20	-	Japan
		max.	0.23	0.37	1.20	0.025	0.035	1.40	0.30	0.30	
SCM420	JIS	min.	0.18	0.15	0.60	-	-	0.90	0.15	-	Japan
		max.	0.23	0.35	0.85	0.030	0.030	1.20	0.30	-	

Bovenstaande tabel laat de meest gebruikte types staal zien voor medium tot grote tandwielen per regio.

Het belangrijkste wat te concluderen is, is het verschil in thermische uitzettingscoëfficiënt van de twee verschillende stalen. Dit zorgt voor vervormingen van de componenten die op de roostersegmenten liggen. Omdat het gestel sneller uitzet dan de component zal het gestel aan de component trekken wat resulteert in vervormingen.

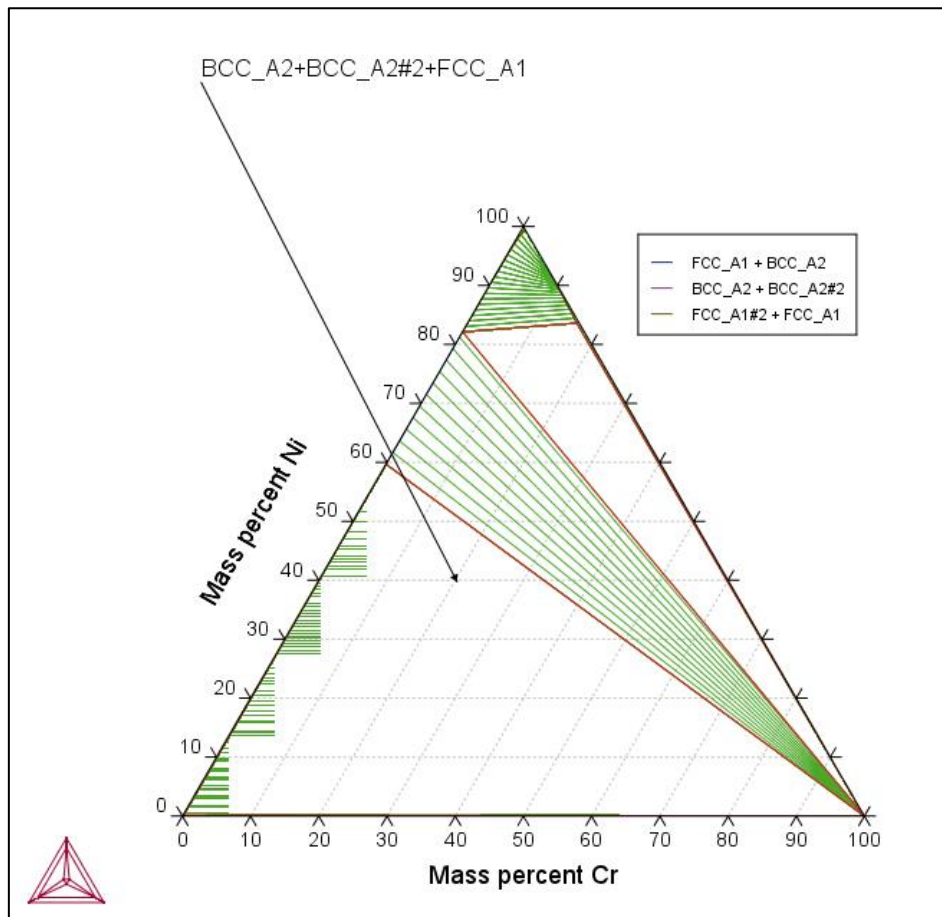
4.2.4 Probleem verschil in thermische uitzettingscoëfficiënten

Eén van de problemen is de thermische uitzettingscoëfficiënt die verschillend is voor de twee soorten stalen. Niet enkel de verschillende uitzettingscoëfficiënten spelen een rol. Het staal van de component gaat bij de temperatuur (723°C), waarbij ferriet (α) wordt omgezet naar austeniet (γ), over naar een kristalstructuur met een hogere dichtheid nl. van een kubisch ruimtelijk gecentreerd kristalrooster (α -ijzer) naar een kubisch vlakken gecentreerd kristalrooster (γ -ijzer). (Figuur 36 geeft het ijzer-koolstofdiagram bij 0.2% koolstof)



Figuur 36: Ijzer-koolstofdiagram waarop een blauwe lijn staat op 0,2% koolstof [17]

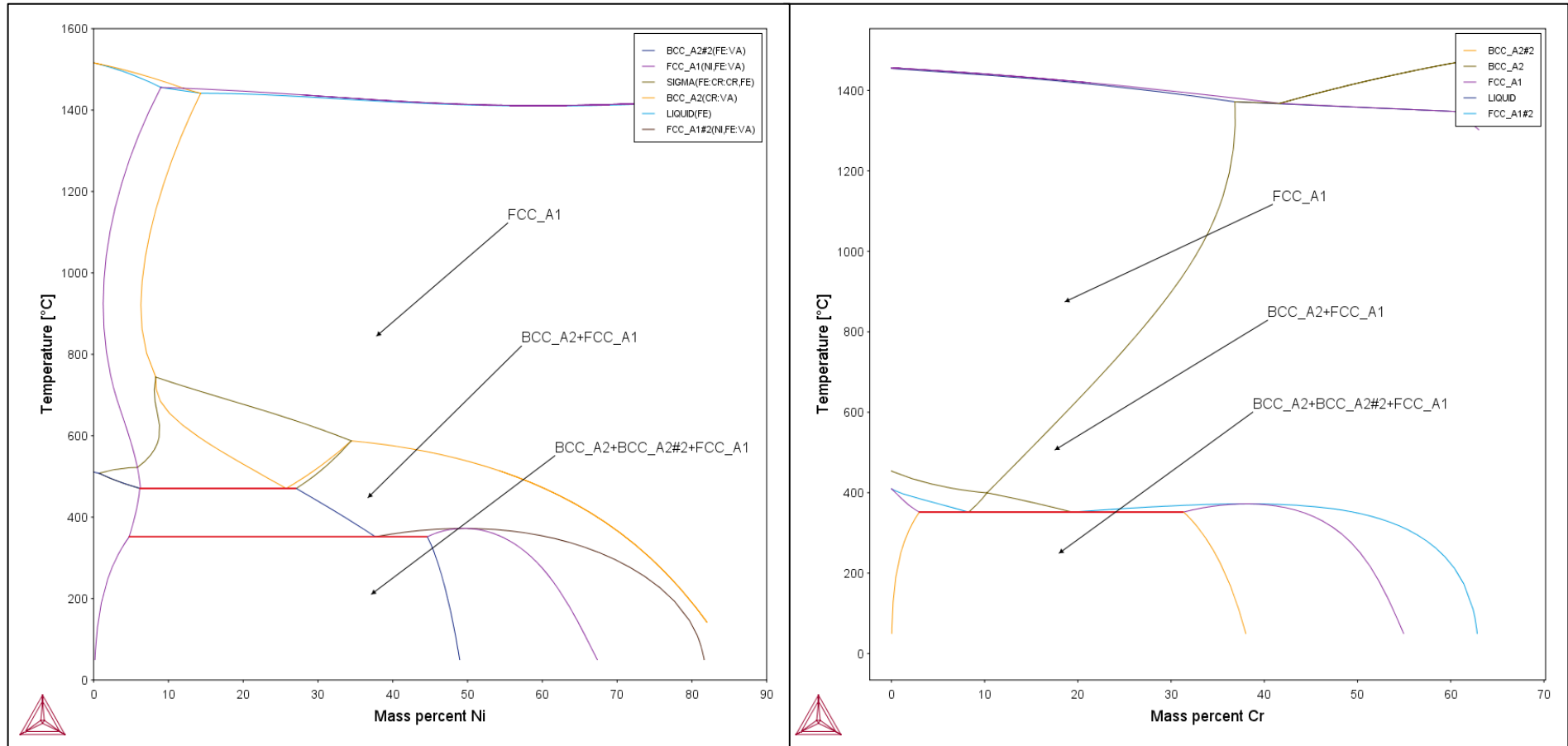
Nikkel heeft bij kamertemperatuur een kubisch vlakken gecentreerde structuur. Maar om te weten of 'Cronite' ook KVG-structuur heeft op kamertemperatuur is er gezocht naar fase-diagrammen. De gevonden fase-diagrammen gingen echter niet tot op kamertemperatuur. Daarom is er gebruik gemaakt van de 'Thermo-Calc'-software waarmee fase-diagrammen gemaakt kunnen worden. Via het programma hebben we de legeringselementen van 'Cronite' ingevoerd en kregen we enkele diagrammen (zie Figuur 37 en Figuur 38).



Figuur 37: Fase-diagram van de cronite-legering gemaakt in 'Thermo-Calc'-software

Hierop is te zien dat er wel degelijk een hoeveelheid van de legering op kamertemperatuur een KVG-structuur (=FCC) heeft.

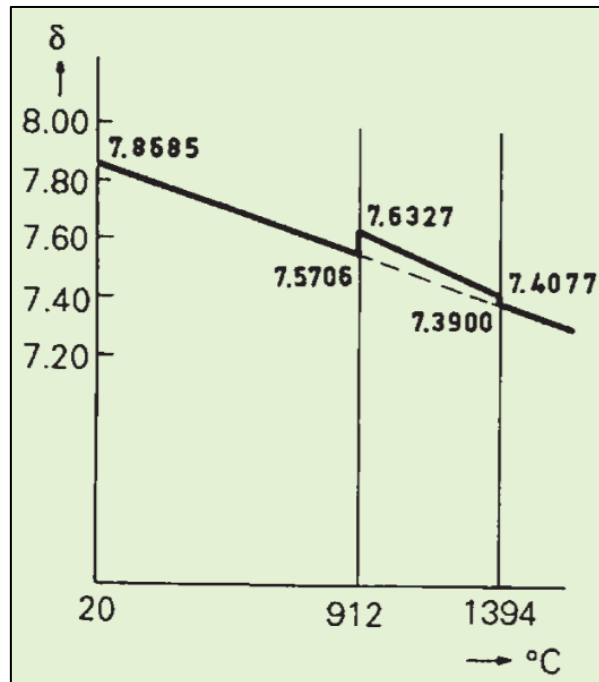
Op onderstaande diagrammen is te zien dat er op kamertemperatuur een kubisch vlakken gecentreerde structuur (=FCC) aanwezig is. Deze diagrammen werden gemaakt met 'Thermo-Calc'-software.



Figuur 38: Fasetoestandsdiagrammen van cronite-legering, links de temperatuur i.f.v. Nikkel, rechts de temperatuur i.f.v. Chroom

4.2.4.1 Berekening thermische uitzetting van de component

Bij overgang van ferriet naar austeniet zal er krimp optreden maar deze overgang gebeurt niet direct noch volledig. Tussen een temperatuur van 723°C tot ongeveer 860°C zal er geleidelijk aan de overgang plaatsvinden naar de austeniet structuur (afgeleid uit ijzer-koolstofdiagram bij 0.2%C). Op onderstaande afbeelding (Figuur 39) is de dichtheid in functie van de temperatuur uitgezet.



Figuur 39: Dichtheidsverschil bij faseovergang van ijzer [11]

Aan de hand van bovenstaande figuur zal de thermische uitzetting in het overgangsgedebied van ferriet naar austeniet benaderd worden. De berekeningen hiervan volgen hieronder. (faseovergang van ijzer)

Dichtheid bij 20°C:

$$\rho_{20^{\circ}\text{C}} \rightarrow 7,86 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

Dan is de massa van één kubieke meter:

$$1\text{m}^3 = 7860 \text{ kg}$$

Dichtheid bij 912°C:

$$\rho_{912^{\circ}\text{C}} = 7,57 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

Lineaire uitzettingscoëfficiënt van ferriet gaande van 20°C tot 600°C [11]:

$$\alpha - \text{ijzer}(20 - 600^{\circ}\text{C}) \rightarrow \alpha = 16 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{°C}}$$

De uitzettingscoëfficiënt van ferriet tussen 600°C en 912°C bepalen.

Uitzetting bij 912°C is:

$$Uitzetting\ volumetrisch = \left(1\text{meter} + (912 - 20)^\circ\text{C} \cdot 16 \cdot 10^{-6} \frac{\text{meter}}{^\circ\text{C}}\right)^3$$

$$V_{912^\circ\text{C}} = 1,04\text{ m}^3 \rightarrow \rho_{912^\circ\text{C}} = 7,53 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

Uit de bovenstaande figuur blijkt dat de effectieve dichtheid 7.5706 ton/m³ bedraagt bij 912°C. In plaatse van de berekende 7.5314 ton/m³. Dus de uitzettingscoëfficiënt van 20-600°C is niet correct tot 912°C.

$$\rho_{\text{effectief } 912^\circ\text{C}} = 7,57 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$V_{600^\circ\text{C}} = 1,03\text{ m}^3 \rightarrow \rho_{600^\circ\text{C}} = 7,64 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

De dichtheid tussen de $\rho_{600^\circ\text{C}}$ en $\rho_{\text{effectief } 912^\circ\text{C}}$ bepalen op 750°C. Dit is ongeveer het begin van de verandering in kristalstructuur van ferrietische naar austenitisch. Door de dichtheden van 750°C en van austeniet te vergelijken kan bepaald worden hoe het materiaal gaat reageren in dit gebied (verdere uitzetting of krimpen).

$$\rho_{600^\circ\text{C}} = 7,64 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \rightarrow \rho_{\text{effectief } 912^\circ\text{C}} = 7,58 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

Interpoleren naar 750°C geeft:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{750^\circ\text{C}} = 7,605 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \\ V_{750^\circ\text{C}} = 1,033\text{ m}^3 \\ l_{750^\circ\text{C}} = 1,011\text{ m}^3 \end{array} \right.$$

De dichtheid van austeniet:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{\text{austeniet}} = 7,632 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \\ V_{\text{austeniet}} = 1,030\text{ m}^3 \\ l_{\text{austeniet}} = 1,010\text{ m}^3 \end{array} \right.$$

Conclusie:

$$V_{750^\circ\text{C}} > V_{\text{austeniet}}$$

Bij overgang van de ferritische structuur naar de austeniet structuur zal het volume van het tandwiel krimpen ondanks de thermische uitzetting.

Wat het verschil is ten opzichte van de uitzetting van het gestel wordt berekend in de volgende subhoofdstukken.

4.2.4.2 Berekening thermische uitzetting van het gestel

Hieronder wordt de thermische uitzetting berekend over de diameter van de component en over eenzelfde lengte voor het gestel.

4.2.4.2.1 Uitzetting gestel over de lengte van de diameter

$$\Delta L = \alpha * L * \Delta T$$

Met: ΔL = lineaire uitzetting [m];
 α = uitzettingscoëfficiënt [m/K];
 L = lengte [m];
 ΔT = temperatuurverschil begin/eind [K].

$$\Delta L = 17,6 * 10^{-6} \text{m/K} * 1,7\text{m} * 1000\text{K}$$

$$\Delta L = 0,0299\text{m}$$

$$\Delta L = \mathbf{29,9\text{mm}}$$

4.2.4.2.2 Uitzetting roostersegment over dezelfde lengte als de diameter van het tandwiel

$$\Delta L = \alpha * L * \Delta T$$

Met: ΔL = lineaire uitzetting [m];
 α = uitzettingscoëfficiënt [m/K];
 L = lengte [m];
 ΔT = temperatuurverschil begin/eind [K].

$$\Delta L = 17,6 * 10^{-6} \text{m/K} * 0,6\text{m} * 1000\text{K}$$

$$\Delta L = 0,0106\text{m}$$

$$\Delta L = \mathbf{10,6\text{mm}}$$

4.2.4.2.3 Uitzetting roostersegment over eenzelfde lengte als het tandwiel, 723°C tot 860°C

$$\Delta L = \alpha * L * \Delta T$$

Met: ΔL = lineaire uitzetting [m];
 α = uitzettingscoëfficiënt [m/K];
 L = lengte [m];
 ΔT = temperatuurverschil begin/eind [K].

$$\Delta L = 17,6 * 10^{-6} \text{m/K} * 0,6\text{m} * 137\text{K}$$

$$\Delta L = 0,0015\text{m}$$

$$\Delta L = \mathbf{1,5\text{mm}}$$

4.2.4.3 Conclusie impact van uitzetting

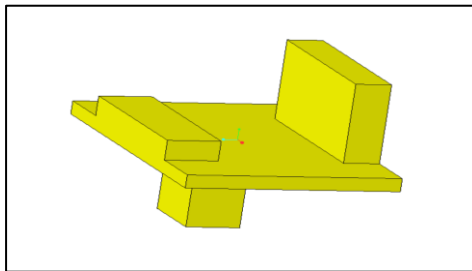
Vanaf 723°C gaat de component in de oven beginnen te krimpen vanwege de overgang naar een dichtere kristalstructuur terwijl dit niet zo is voor het gestel, deze zet 1,5mm uit. Dit is een probleem wat vervormingen veroorzaakt aan de onderste componenten in een stapeling. Het doel is om de onderste component meer vrijheid te geven ten opzicht van het gestel waarop het gestapeld is zodat de invloed van het verschil in uitzetting minder is.

4.3 Ondersteuning voor grotere bewegingsvrijheid

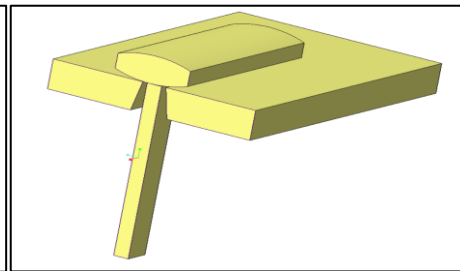
Om een grotere bewegingsvrijheid te creëren tussen de roosters van het gestel en de componenten zijn er twee concepten ontworpen. Een concept met een kantelend mechanisme en een concept waarbij de ondersteuning als 'dummy ring' dient. Op deze manier wordt het effect van de verschillende uitzettingscoëfficiënten verminderd of zelfs vermeden. De twee concepten worden hieronder uitgelegd met enkele afbeeldingen.

4.3.1 Concept 1: combinatie vaste en kantelende ondersteuning

Het doel van dit concept is om het volledige verschil in thermische uitzetting op te vangen door middel van het kantelende mechanisme. Bij dit concept voorzien de twee kantelende mechanismen een grotere bewegingsvrijheid voor de component zodat deze kan uitzetten of krimpen aan een andere snelheid dan de voet of de spin. De kantelende ondersteuning is hieronder zichtbaar aan de rechterzijde (zie Figuur 41). De vaste ondersteuning (zie Figuur 40) dient om de component op één plaats te borgen zodat deze niet zomaar van de roosters zou schuiven.



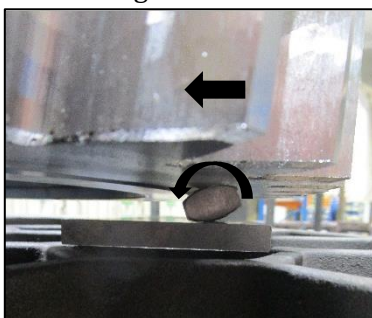
Figuur 40: Vaste ondersteuning



Figuur 41: Doorsnede kantelend mechanisme

De niet-kantelende ondersteuning of ook wel de 'vaste' ondersteuning genoemd is een plaat met drie uitstekende 'blokken'. Het uitsteeksel aan de onderzijde dient ervoor om de ondersteuning te borgen in één zeshoek van de honingraatstructuur van het roostersegment. De lage uitstulping (aan de linker bovenzijde te zien) dient om de component op de positioneren. De rechter uitstulping aan de bovenzijde moet de component borgen, deze uitstulping zit in de conische uitsparing van de component. De kantelende ondersteuning beschikt over een interne afschuining zodat de steel die aan de wig zit verder kan uitwijken aan de onderzijde van de plaat waarin hij steekt. Voor de specifieke afmetingen wordt verwezen naar bijlage D waar de 2D-tekeningen te vinden zijn.

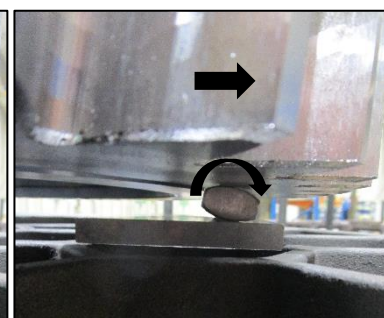
Op onderstaande afbeeldingen (Figuur 43) is de werking weergegeven van de kantelende ondersteuning.



Figuur 44: Kantelende ondersteuning gekanteld (tandwiel opgeschoven naar links)



Figuur 43: Kantelende ondersteuning in 'rust'-positie



Figuur 42: Kantelende ondersteuning gekanteld (tandwiel opgeschoven naar rechts)

Op de middelste afbeelding staat de kantelende ondersteuning in zijn rust positie. Als het tandwiel gaat krimpen en het gestel gaat uitzetten dan gaat het kantelende element van de ondersteuning kantelen, dit is weergegeven in de linkse afbeelding. De kantelende ondersteuning kan in twee richtingen kantelen, voorbeeld hiervan op de rechtse afbeelding.

De kantelende ondersteuning wordt het best uit een materiaal vervaardigd zoals cronite dat typisch vele cycli van het hardingsproces kan doorstaan. Om een test uit te voeren kunnen de ondersteuningen uit standaard staal vervaardigd worden omdat deze slechts één cyclus moeten doorlopen.

Een ander alternatief materiaal is het austenitische staal SS310 (werkstofnummer 1.4845). Dit type staal wordt typisch gebruikt voor oven onderdelen, stellingen/manden voor in de harderij enz.

Tabel 23: Legeringssamenstelling van 1.4845 in %, het overblijvende is Fe[18]

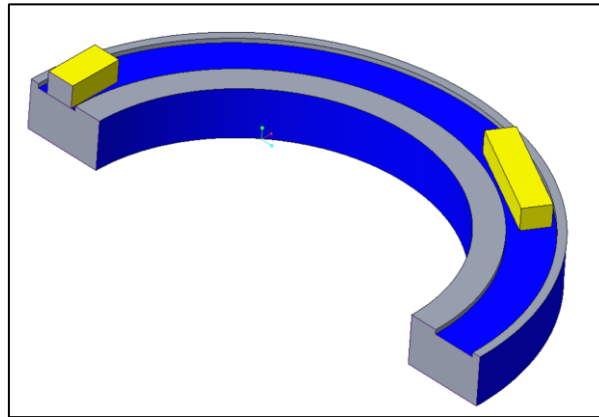
C	Si	Cr	Ni	Mn	Nb/Co	P	S
0,25	1,5	24,0-26,0	19,0-22,0	2,00	1,5	0,045	0,030

4.3.1.1 Conclusie

Concept 1 kan ook uit een configuratie bestaan van drie kantelende ondersteuning, zonder een 'vaste' ondersteuning. Maar om de uitzettingsverschillen op te vangen zijn drie kantelende ondersteuning eigenlijk overbodig. Met twee kantelende ondersteuning kunnen de uitzettingsverschillen opgevangen worden maar bij de twee kantelende ondersteuning zullen de 'rollen' iets verder kantelen omdat het vaste punt nu aan de rand van het planeetwiel ligt nl de vaste ondersteuning. Bij drie kantelende ondersteuning zou het vaste punt in de aslijn van het tandwiel liggen. Beide mogelijkheden kunnen toegepast worden en zouden in theorie even goed de bewegingsvrijheid van de component moeten verhogen. De vaste ondersteuning zorgt voor een borging van de onderste component. Vanwege veiligheid wordt er gekozen voor de configuratie met twee kantelende ondersteuning en één vaste ondersteuning. Vanwege de te lange levertijd van de alternatieve materialen om de ondersteuning uit te laten maken is ervoor gekozen om de kantelende ondersteuningstype uit standaard staal te vervaardigen zodat er nog een tweede test opgebouwd en opgemeten kon worden binnen het resterende tijdsbestek.

4.3.2 Concept 2: onderliggende dummy ring

Het doel bij dit concept is dat de oplegring als een 'dummy ring' (Figuur 45) gaat fungeren die de vervormingen gaat opnemen i.p.v. het onderste tandwiel. Omdat de beweegbaarheid belangrijk is, wordt de component niet rechtstreeks op de ring gelegd maar worden er drie ondersteuningsblokjes gebruikt zodat er ook een betere oliedoorstroming is.



Figuur 45: Onderliggende ring, sectiedoorsnede

Bovenstaande afbeelding is een sectie doorsnede in de helft van de dummy ring. De dummy ring is 45mm hoog, de buiten diameter is 560mm, de binnen diameter is 390mm. Aan de bovenzijde van de dummy ring is een circulaire sleuf als uitsparing, met een diepte van 5mm. De binnendiameter en de buitendiameter van de sleuf zijn respectievelijk 450mm en 542mm. De afmetingen zijn terug te vinden in bijlage D op de 2D-tekeningen. De sleuf is speciaal gedimensioneerd zodat bij de opbouw, de drie ondersteuningsblokjes de oplegranden nooit zullen raken van de component die erop komt te liggen, mits deze recht boven de dummy ring geplaatst wordt. Eén belangrijke opmerking is dat er drie getapte gaten voorzien moeten worden in de sleuf van de dummy ring. Vanwege arbeidsveiligheid mogen voorwerpen zwaarder dan 23kg niet geheven worden. Deze dummy ring heeft een massa groter dan 23kg, ongeveer 40kg. Door middel van getapte gaten kunnen enkele oogbouten gemonteerd worden waardoor de schijf getild kan worden met de rolbrug.

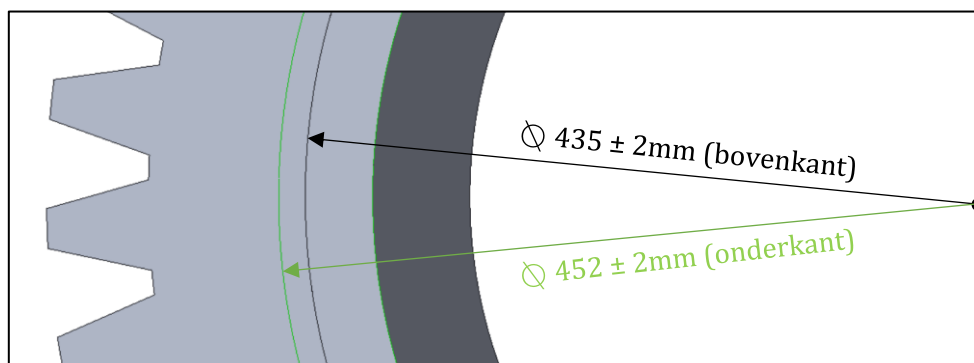
4.4 Procesopbouw

Bij de opbouw van de eerste teststapeling is gebleken dat het correct positioneren van de ondersteuningsblokjes niet evident was. Ook de positionering van de tandwielen op de ondersteuningen was niet makkelijk vanwege het feit dat er een verhoogd randje zit op de zijvlakken van de tandwielen namelijk de oplegranden. Elk tandwiel heeft een LM-nummer en bij de positionering wordt ervoor gezorgd dat deze naar boven gericht zijn en dat deze aan de buitenkant liggen zodat dit nummer zichtbaar is als de boom is opgebouwd (zie Figuur 46).



Figuur 46: LM-nummer op de bovenzijde van een component

De verhoogde rand op het zijvlak, waarop het LM-nummer staat, heeft een kleinere diameter dan het randje dat op het andere zijvlak staat, aan de onderkant. Respectievelijk zijn de diameters 435mm en 452mm \pm 2mm. Dit is te zien op onderstaande afbeelding (Figuur 47).



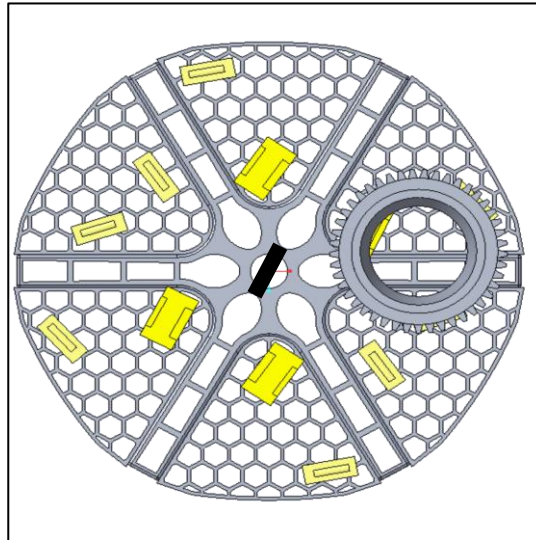
Figuur 47: Verschil in randbreedte van de verhoging

Aan de andere kant moet erop gelet worden dat de tandvoet vrij blijft als de ondersteuningen worden geplaatst. Dit is essentieel om een goede oliedoorstroming te hebben voor de afharding (zie Figuur 16 en Figuur 17).

Om deze stapelmethode te implementeren en vlot te laten verlopen, moet het stapelen van de componenten eenvoudiger worden. Dit kan door een extra tooling te ontwerpen die de componenten en ondersteuningsblokjes telkens op de juiste manier positioneert.

4.4.1 Procestekening kantelende ondersteuningen

Het LM-nummer moet naar bovenzijde en buitenkant gericht zijn zodat deze altijd leesbaar is op de boom. De procestekening moet duidelijkheid geven over hoe de boom opgebouwd moet worden. Eén onderdeel van de procestekening is de positie van de ondersteuningen op de roostersegmenten (zie Figuur 48). Om de ondersteuningen makkelijker ten opzichte van elkaar te plaatsen is een tooling ontworpen die in het verdere verloop van dit hoofdstuk zal worden getoond.

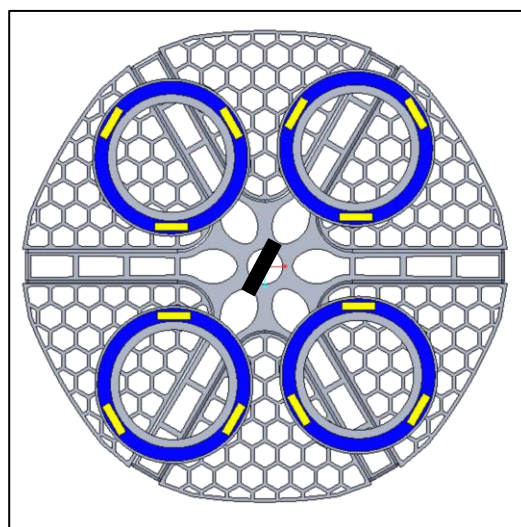


Figuur 48: Bovenaanzicht voet met ondersteuning

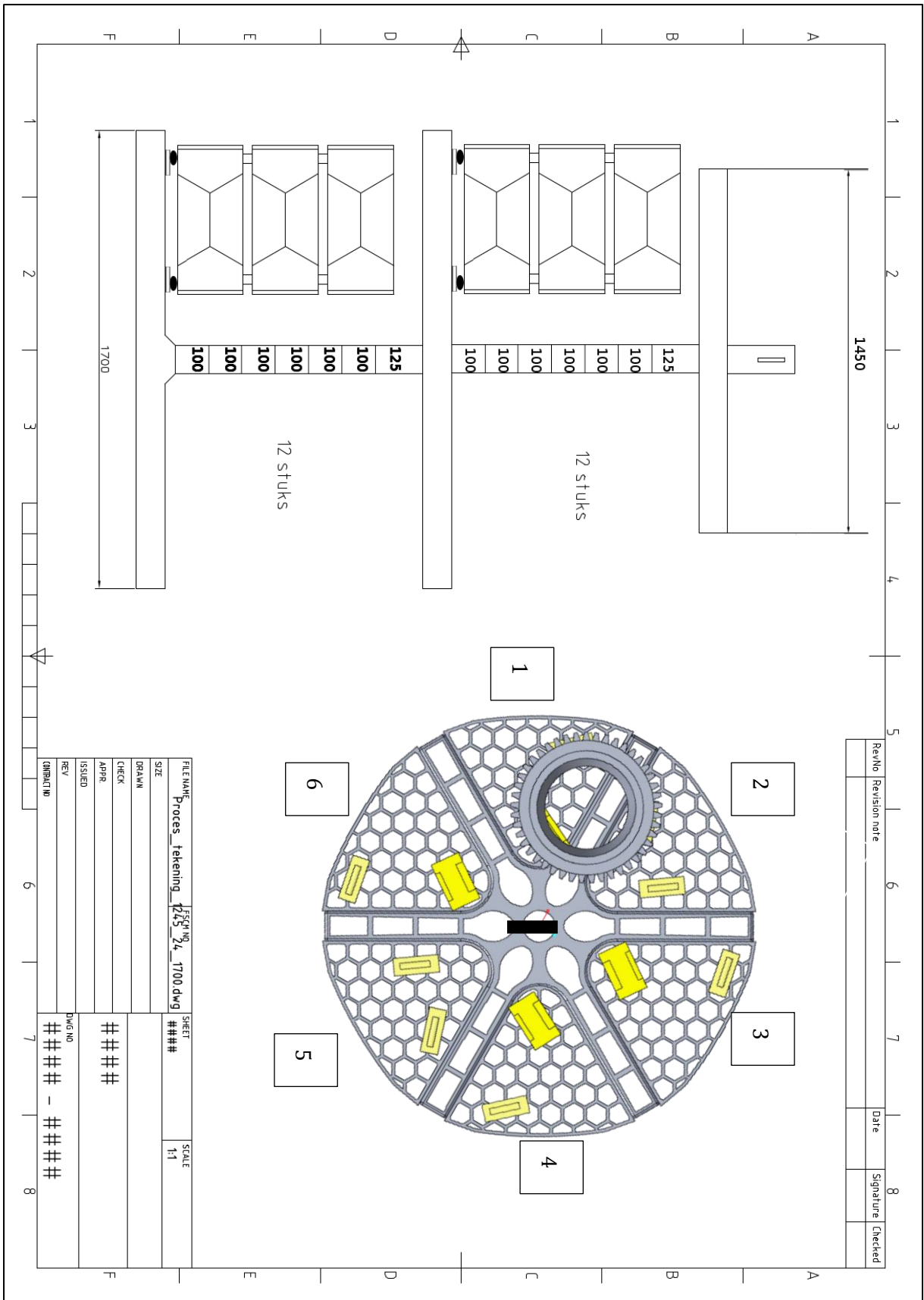
Een voorbeeld van een volledige procestekening is te zien op de volgende pagina (zie Figuur 50). Op zo een procestekening staat ook het aantal afstandsbussen die nodig zijn en de grootte van de voet en spinnen.

4.4.2 Procestekening dummy ringen

Op onderstaande afbeelding (zie Figuur 49) is de configuratie en de positie van de dummy ringen zichtbaar.



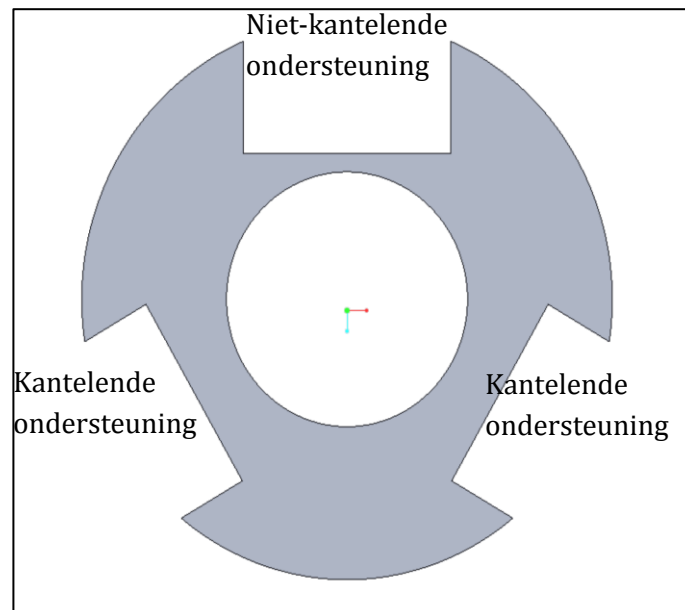
Figuur 49: Bovenaanzicht voet met dummy ringen



Figuur 50: Procestekening kantelende ondersteuning

4.4.3 Tooling voor de positionering van de kantelende ondersteuning

Zoals hiervoor vermeld is, is het belangrijk dat de ondersteuning de oplegranden en de tandvoet niet raken. Om dit bij de opbouw van de boom te garanderen is er een tooling ontworpen op het kantelende concept van ondersteuning makkelijk en correct te kunnen plaatsen. Deze is op de afbeelding hieronder weergegeven (zie Figuur 51).



Figuur 51: Tooling voor de positionering van de ondersteuning van het kantelende concept

Deze tooling is gemaakt uit een kunststof plaat van enkele millimeters dik, voor de 2D-tekeningen en exacte afmetingen wordt verwezen naar bijlage E. In de zijkant van deze plaat zitten drie uitsparingen, namelijk één uitsparing waarin de niet-kantelende ondersteuning pas en twee uitsparingen waarin de kantelende ondersteuning in passen.

Bij de plaatsing van de kantelende ondersteuning moet er rekening gehouden worden dat de pennen van het kantelende gedeelte dat door een zeshoek van de honingraatstructuur gestoken wordt niet de opstaande ribben ervan raakt of er te dicht tegen wordt geplaatst. Als dit gebeurt, dan kan het element niet meer kantelen, het is dus cruciaal dat de plaatsing goed gebeurt.

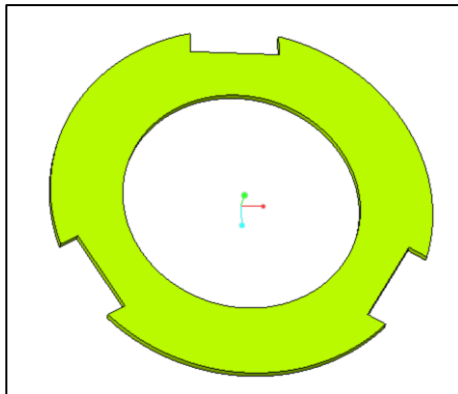
Waar de tooling precies op de spin of de voet komt te liggen wordt duidelijk gemaakt aan de hand van een procestekening zoals reeds werd getoond.

De dummy ring heeft geen tooling nodig, om de exacte positie op de voet of de spin te kennen wordt gekeken naar de procestekening.

4.4.4 Tooling voor de ondersteuningen tussen de componenten

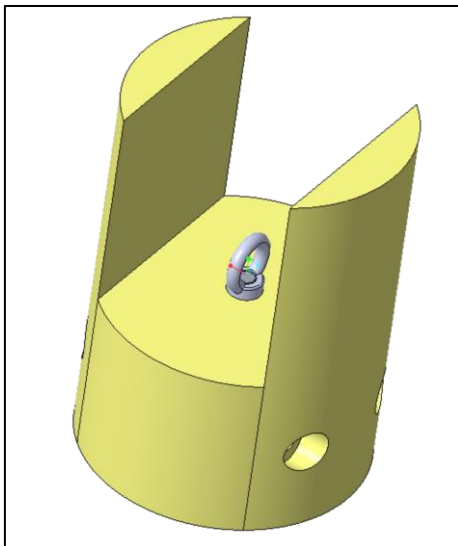
Het proces om de tandwielen en de blokjes te plaatsen kan dus geoptimaliseerd worden. Dit is gebeurd door een tooling te ontwerpen die de plaatsing vergemakkelijkt. De tooling bestaat uit twee delen, enerzijds een ringvormige plaat waarin drie sleuven zijn gemaakt om de 120° en anderzijds een cilinder met een grote sleuf.

De ringvormige plaat dient om de ondersteuningsblokjes makkelijker te plaatsen op het tandwiel zodat er nog voldoende afstand zit tussen het ondersteuningsblokje en de verhoogde rand (Figuur 52). Voor de dimensies wordt verwezen naar bijlage E.



Figuur 52: Tooling om ondersteuningsblokjes te plaatsen op component 027-F1245E021

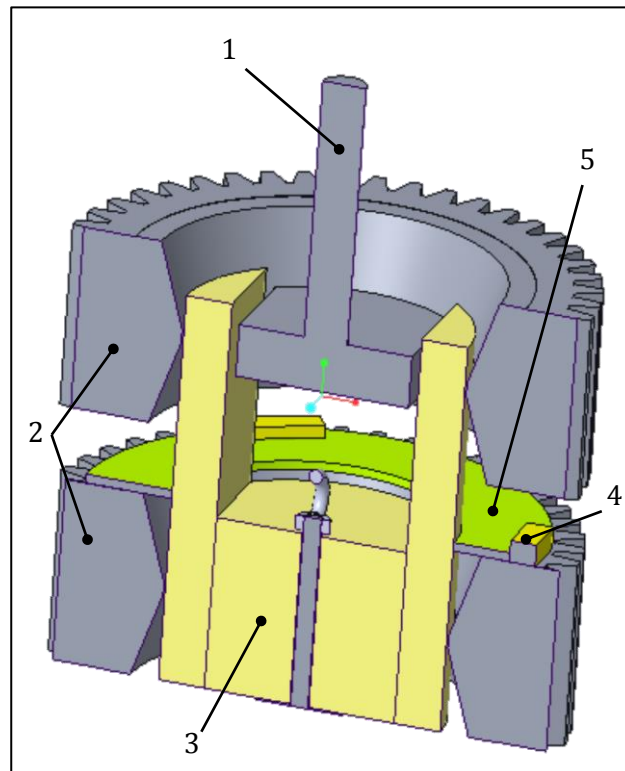
Om het tandwiel makkelijk en correct op de drie ondersteuningsblokjes te positioneren zonder dat deze de verhoogde rand aan de onderzijde raken, is er een cilinder ontworpen met een brede en diepe sleuf (Figuur 53). Voor de 2D-tekeningen en dimensies wordt verwezen naar bijlage E.



Figuur 53: Tooling om component 027-F1245E021 correct en snel te positioneren

De sleuf is er omdat de tandwielen met een specifiek hijsgereedschap worden gehesen. Op deze manier is er nog ruimte over om de tandwielen te laten zakken op de onderliggende ondersteuning en om het hijsgereedschap te ontkoppelen van het tandwiel. De ringvormige plaat kan ook over de cilinder geschoven worden zodat deze automatisch correct komt te liggen op het zijvlak van het tandwiel. De cilinder is voorzien van een oogbout zodat het hijsen eveneens met de rolbrug kan gebeuren.

Op de volgende afbeelding (Figuur 54) is een situatie getekend, waarbij de verschillende gereedschappen gebruikt worden bij de plaatsing van een tandwiel op eenzelfde type tandwiel, in doorsnede.



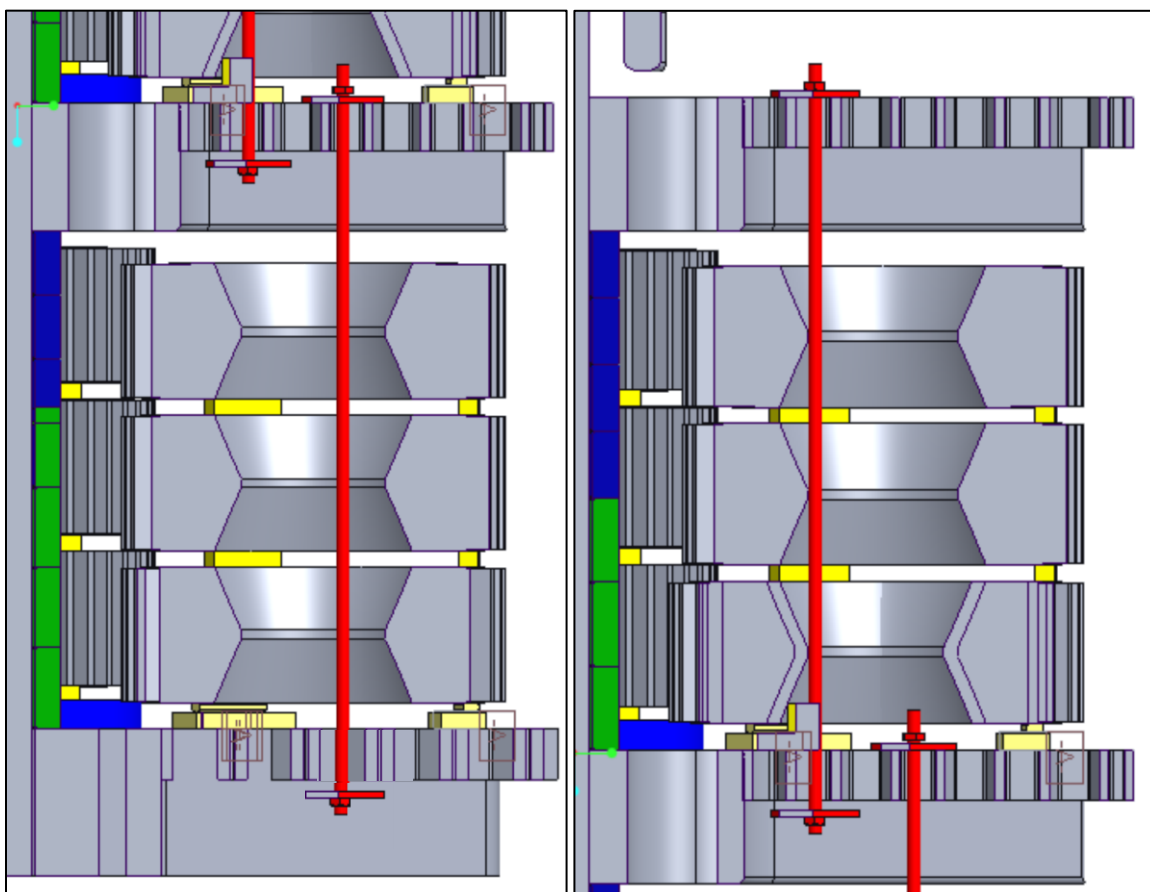
Figuur 54: Doorsnede toolings bij plaatsing twee componenten op elkaar

Hierop zijn twee tandwielen (027-F1245E021) te zien (nummer 2). In het onderste tandwiel is de tooling, de cilinder met sleuf (nummer 3), aangebracht. Dan kan de ringvormige plaat over de andere tooling geschoven worden. Nu kunnen de ondersteuningsblokjes (nummer 4) snel en goed gepositioneerd worden. Eens dit gedaan is kan de ringvormige tooling (nummer 5) weggenomen worden. De plaatsing van het tweede tandwiel kan nu makkelijker en correct verlopen door deze met het hijsgereedschap (nummer 1) in de sleuf van de cilindrische tooling te laten zakken. Als het tandwiel geplaatst is kan het hijsgereedschap ontkoppeld worden en kan de cilindrische tooling weg gehesen worden. Indien men meerdere tandwielen op elkaar kan stapelen kan dit proces herhaald worden. Het materiaal waaruit de tooling gemaakt kan worden is HDPE ofwel hetzelfde type kunststof waaruit de huidige toolings in de harderij vervaardigd worden.

4.4.5 Borging van de componenten op de boom

4.4.5.1 Alternatieve bevestiging van draadstangen

Bij de eerste test werd voor de borging van de componenten in de stapeling gebruik gemaakt van een draadstang waaraan de onderzijde een metalen schijf aangelast was. Deze methode was voldoende om de toenmalige testbatch mee te borgen. Omdat deze methode niet optimaal is en de draadstangen nog redelijk veel speling hadden is er een alternatieve manier gevonden om de draadstangen te bevestigen. Op onderstaande afbeeldingen is de opbouw met de nieuwe manier van draadstangbevestiging te zien op een doorsnede van de voet (zie Figuur 55) en een doorsnede van de spin (zie Figuur 56).



Figuur 55: Borging doormiddel van draadstang (M20) onderste stapeling

Figuur 56: Borging van de bovenste stapeling d.m.v. een M20 draadstang

De draadstangen (M20) worden bevestigd als de stapelingen op de voet volledig zijn opgebouwd en als de spin erboven is geplaatst. De draadstangen zijn 1200mm lang en worden telkens met een plaat en een bout bevestigd zowel aan de onderzijde (voet of spin) als aan de bovenzijde (spin). Bij de bevestiging van de draadstangen wordt er een geringe speling voorzien zoals zichtbaar is op bovenstaande figuur, waar de onderste plaat niet vast tegen de onderzijde van het roostersegment wordt gedraaid. De draadstangen worden steeds zo dicht mogelijk aan de kant van de paal van de boom geplaatst maar mogen de conen niet kunnen raken om beschadiging aan de component te voorkomen. De platen zijn zo gedimensioneerd dat deze op de twee verschillende types van roostersegment gebruikt kunnen worden, deze hebben een verschillende grootte in honingraatstructuur. Voor de afmetingen van de plaat wordt verwezen naar bijlage E.

In het volgende hoofdstuk, 'Experimentele test 2', zullen enkele foto's van de opbouw en de bevestiging van de draadstangen getoond worden.

5 Experimentele test 2

5.1 Opbouw

De tweede test heeft dezelfde opbouw als de eerste test namelijk 24 planeetwielen (027-F1245E021) die verdeeld zijn over twee niveaus (voet en spin), telkens vier stapels van drie componenten hoog. Bij de tweede test is er enkel een aanpassing van ondersteuning en borging van de componenten. Zoals besproken in het vorige hoofdstuk is het de bedoeling om de onderste component een grotere bewegingsvrijheid te geven ten opzichte van het gestel. Daarom is de tweede testbatch opgebouwd met de twee verschillende types van ondersteuning die in het vorige hoofdstuk werden besproken. Zowel de dummy ring als de kantelende ondersteuning worden gebruikt om de onderste componenten te ondersteunen. De kantelende ondersteuning worden best uit hetzelfde materiaal gemaakt waaruit het gestel vervaardigd is. Dit is 'Cronite', een materiaal dat speciaal voor heat treatment ontworpen is. In dit geval zijn deze ondersteuning geconstrueerd uit standaard staal St37 wegens de te lange leveringstijd voor een ander materiaal. De dummy ringen worden gemaakt uit hetzelfde staal als component 027-F1245E021 (18CrNiMo7-6). Voor de ondersteuningsblokjes tussen de verschillende componenten wordt opnieuw standaard staal St37 gebruikt, deze zouden best uit hetzelfde materiaal als het planeetwiel gemaakt worden zodat deze hetzelfde gaan vervormen als de componenten zelf. 'Cronite' gaat meer cycli mee dan standaard staal. Voor het gebruik bij één enkele test is de impact echter beperkt indien men toch standaard staal gebruikt.

In de uiteindelijke opbouw werd op de voet viermaal (zie Figuur 57) het type van de kantelende ondersteuning gebruikt en tweemaal op de spin samen met twee dummy ringen (zie Figuur 58).



Figuur 57: Kantelende ondersteuningstype, viermaal gepositioneerd op de voet



Figuur 58: Twee dummy ringen en kantelende ondersteuning gepositioneerd op de spin

Als ondersteuning tussen de verschillende planeetwielen is opnieuw hetzelfde type van blokje gebruikt zoals bij de eerste test (zie Figuur 59). Materiaal St37, afmetingen 120x30x25mm.



Figuur 59: Ondersteunings- blokjes tussen de verschillende componenten

De ondersteuningen worden zoals altijd ongeveer 120° ten opzichte van elkaar gepositioneerd. De totale opbouw is te zien op onderstaande afbeelding, voor het harden (zie Figuur 60).



Figuur 60: Totale opbouw van de tweede testbatch voor het hardingsproces

5.1.1 Totale massa

Analoog aan de opbouw van de eerste testbatch is er de beperking van de maximaal toelaatbare massa die op de voet of spin gestapeld mag worden. Eveneens de maximale totale massa, 9000kg, die door afhardhaak gedragen moet worden. Tabel 24 geeft de berekening voor de totale massa van de tweede test, deze ligt onder de maximale toelaatbare massa.

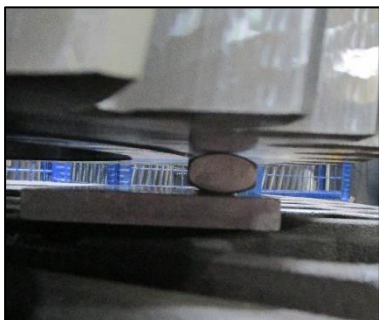
Tabel 24: Totale massa opbouw test 2

Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)
Paal	SAFE	1	164,5	164,5
Voet 1700	SAFE NIEUW	1	500	500,0
Spin 1700	SAFE NIEUW	1	315	315,0
Spin 1450	SAFE NIEUW	1	205,5	205,5
Segment 1700	SAFE NIEUW	12	32	384,0
Segment 1450	SAFE NIEUW	6	25	150,0
Bus H50	/	0	4,22	0,0
Bus H100	/	12	8,05	96,6
Bus H125	/	2	9,85	19,7
Component	/	24	252	6048,0
Kantelende ond.	/	6	20	120,0
Dummy ring	/	2	40	80,0
Ondersteuning	/	56	1	56,0
Totale massa				8131,3

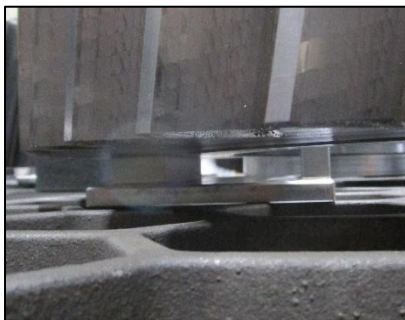
Ook bij deze testbatch wordt gebruik gemaakt van de spin met het grootste draagvermogen (CKXM81) voor het stapelen van de componenten. Een verschil met de eerste testbatch is het gebruik van de tweede spin helemaal bovenaan de opbouw. De spin is namelijk 1450mm in plaats van de 1700mm bij de eerste testbatch omdat deze een lagere massa heeft. De spin draagt geen componenten en dient enkel voor het borgen van de draadstangen ter beveiliging.

5.1.1 Positionering componenten

Bij de opbouw moet er opnieuw rekening gehouden worden met de oplegrand zodat de ondersteuning niet op de randen gelegd worden. De rand aan de onderzijde van de component is breder dan deze aan de bovenzijde. Een voorbeeld van de opgehoogde rand en een gepositioneerde ondersteuning is te zien op Figuur 61 voor de kantelende ondersteuning, op Figuur 62 voor het vaste gedeelte van het kantelende type ondersteuning en op Figuur 65 voor de dummy ring.



Figuur 61: Component 027-F1245E021 gepositioneerd op een kantelende ondersteuning



Figuur 62: Component 027-F1245E021 gepositioneerd op de vaste ondersteuning van het kantelende type

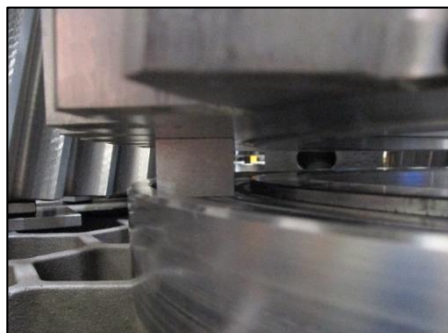


Figuur 63: Borglip van het vaste gedeelte van de kantelende ondersteuning

Op Figuur 63 is de borglip te zien van de vaste ondersteuning van het kantelende type ondersteuning. Deze moet voorkomen dat de component bij een verkeerde of abrupte beweging van de rolbrug gaat verschuiven.

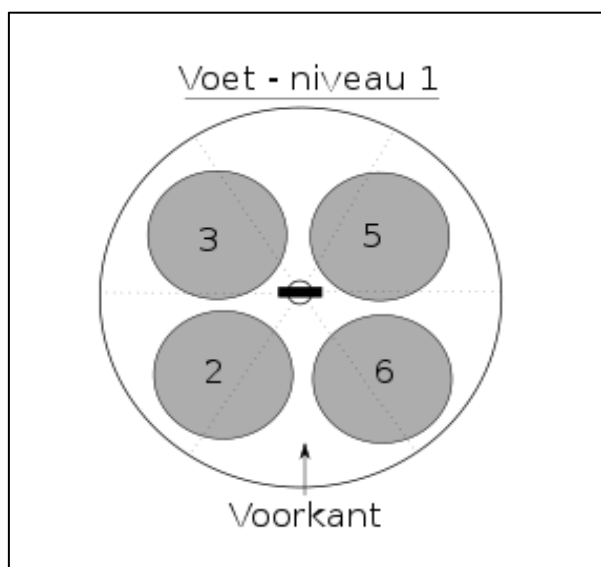


Figuur 64: Dummy ring met drie ondersteuningsblokjes



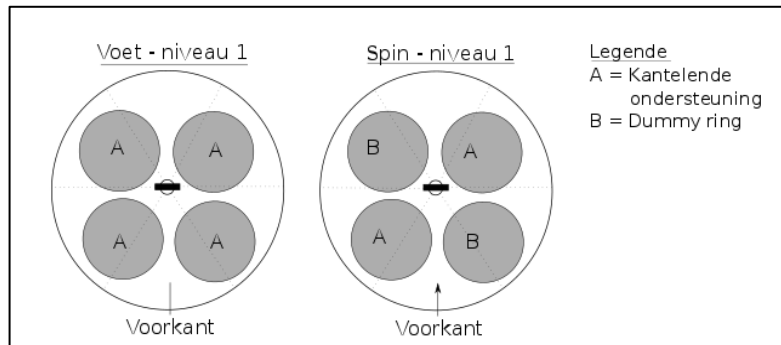
Figuur 65: Component 027-F1245E021 gepositioneerd bovenop de dummy ring

De stapelingen zijn geplaatst op de posities twee, drie, vijf en zes zoals te zien is op Figuur 66, zowel voor de voet als voor de spin. Met 'voorkant' wordt de zijde van de straalcabine in de opbouwhal bedoeld.



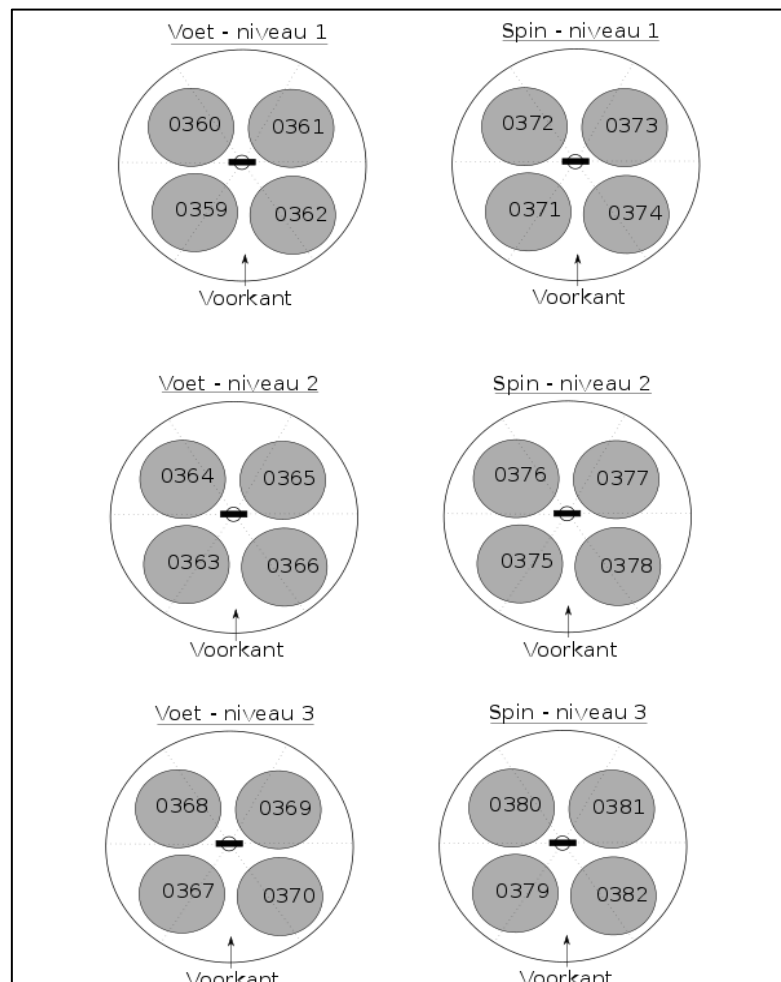
Figuur 66: Posities van de stapelingen

Onderstaande afbeelding (zie Figuur 67) is ter verduidelijking van welk type ondersteuning precies gebruikt is voor elke stapeling. Er is een onderverdeling gemaakt, links de voet en aan de rechterkant de spin.



Figuur 67: Verduidelijking type ondersteuning onder de verschillende stapelingen

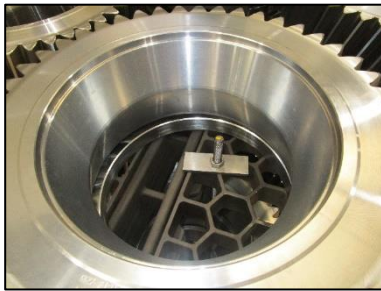
Op Figuur 68 staat de opbouw van de tweede testbatch. Er is een onderscheid gemaakt tussen de voet links en de spin rechts. Anderzijds is er een opdeling gemaakt per niveau van de stapeling. Elke component is aangeduid met zijn specifieke LM-nummer voor de duidelijkheid. Dit om later bij eventuele afwijkingen van bepaalde componenten terug te kunnen kijken naar de positie van deze componenten in de oven in geval van uitval of problemen met een brander.



Figuur 68: Overzicht positionering van alle componenten op de boom, duidelijk gemaakt met hun LM-nummers

5.1.2 Veiligheid

Indien er een plotse brugbeweging plaatsvindt mogen de componenten niet van het gestel glijden om fysieke en materiele schade te voorkomen aan de ovens en nog belangrijker om de operatoren te beschermen tegen vallende voorwerpen. Vanwege veiligheidsoverwegingen worden de stapelingen beveiligd met draadstangen. Ze worden zowel bovenaan als onderaan met een moer en borgplaat vast gemaakt, mits enige speling vanwege het verschil in uitzettingscoëfficiënten met het gestel. Op onderstaande afbeeldingen zijn de draadstangen te zien vanuit verscheidene perspectieven.



Figuur 69: Bevestiging draadstang 1 aan de bovenzijde van de spin



Figuur 70: bevestiging draadstang 2 aan de onderzijde van de spin



Figuur 71: Bevestiging draadstang 1 aan de onderzijde van de voet



Figuur 72: Draadstang 1 tussen de voet en de spin



Figuur 73: Draadstang tussen voet en spin, speling t.o.v. de conen



Figuur 74: Draadstang tussen spin en voet

De draadstangen zijn 1200mm lang en worden per stapeling bevestigd tussen de voet (of spin) waar ze op liggen en de spin juist boven de stapeling. Zo krijgt elke stapeling apart een eigen draadstang ter beveiliging. De draadstangen worden door de conen van de componenten geplaatst en zo dicht mogelijk aan de zijde van de paal van het gestel zodat ze er praktisch geen ruimte is voor de componenten om naar 'buiten' te schuiven.

Zoals reeds duidelijk gemaakt werd kunnen de ondersteuning (exclusief de dummy schijf) uit 'cronite' vervaardigd worden. Op deze manier kunnen de ondersteuning een groter aantal cycli in de harderij ondergaan. Een nadeel is dat dit materiaal duurder is. Vanwege de leveringstijd en de deadlines werd ervoor gekozen om de ondersteuning uit standaard staal (st37) te maken (dummy schijf uit 18CrNiMo7-6). De levensduur van de st37-ondersteuning zijn korter maar het is goedkoper om te maken. De impact op de ondersteuning is echter beperkt na één test. Op de volgende afbeeldingen zijn de gebruikte ondersteuning te zien na het hardingsproces.



Figuur 75: Het 'vast' gedeelte van de kantelende ondersteuning



Figuur 76: Ondersteuningsblokje dat tussen de componenten wordt geplaatst



Figuur 77: Dummy schijf



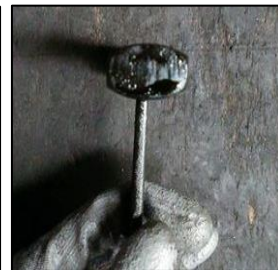
Figuur 79: Plaat van de kantelende ondersteuning waarin het kantelende onderdeel geplaatst wordt



Figuur 78: Onderzijde van het stuk op de afbeelding links ervan



Figuur 80: Kantelende 'rol' met zicht op de bovenzijde



Figuur 81: Zijaanzicht van het kantelende gedeelte



Figuur 82: Onderzijde van het kantelende gedeelte

Op de ondersteuning zijn lichtere zones te zien. Deze lichtere zones duiden op gebieden die niet in contact zijn gekomen met de koolstofrijke omgeving en afschrikmiddel tijdens het hardingsproces. Ondanks dat er vervorming optreedt is de indrukking niet visueel zichtbaar op de ondersteuning. De vervorming van de ondersteuning na één test is praktisch verwaarloosbaar. De functie van het kantelende mechanisme is nog steeds van toepassing.

5.2 Meetresultaten

De 24 tandwielen (027-F1245E021) worden opgemeten in de meetcel, hier worden de conen en de kopcirkels nagemeten op verschillende hoogtes zoals vermeld in het hoofdstuk 'Experimentele test 1'.

5.2.1 Conen

5.2.1.1 Uitleg metingen

Hoe de metingen precies gebeuren wordt niet opnieuw uitgelegd. Hiervoor wordt verwezen naar '3.2.1.1 Uitleg metingen' onder het hoofdstuk 'experimentele test1'.

5.2.1.2 Overmaat conen

De vervorming van de conen van het planeetwiel moet binnen bepaalde grenzen liggen zodat er tijdens het nabewerken in cel hard genoeg materiaal kan worden afgenomen zonder de minimale benodigde hardingsdiepte te overschrijden.

Tabel 25: Hardingsdiepte conen test 2

Hardingsdiepte pastille (initieel)	Minimale hardingsdiepte coon
2,87mm	1,95mm
Hardingsdiepte conen (destructief, effectief)	Maximale afname straal
Niet van toepassing	0,92mm
	Maximale afname diameter
	1,84mm

De hardingsdiepte op de pastille is 2,87mm. De maximaal toegelaten afname van de conen is dan 0,92mm in straal zodat de minimale hardingsdiepte voldoende blijft. De effectieve hardingsdiepte zal groter zijn. Dit kunnen we afleiden uit het feit dat bij de eerste experimentele test een planeetwiel destructief getest werd om de effectieve hardingsdiepte te bepalen. Deze lag met een factor 1,08 hoger dan de hardingsdiepte op de pastilles. Indien we deze factor hier zouden toepassen komt de effectieve hardingsdiepte op 3,09mm. De maximale afname in straal wordt dan 1,14mm. Om het meest negatieve geval te beschouwen zullen we verder gaan met de hardingsdiepte gemeten op de pastille. De overblijvende hardingsdiepte moet dus groter of gelijk zijn aan 1,95mm. In onderstaande tabel (Tabel 24) zijn alle componenten van de tweede test opgelijst met hun verdeelde overmaat, positie op de boom en de overblijvende hardingsdiepte.

Tabel 26: Verdeelde overmaat conen test 2

LM-NR	MIN verdeelde overmaat (mm)	MAX verdeelde overmaat (mm)	Type ondersteuning	Level	Niveau	Positie op level	Overblijvende hardingsdiepte (tov min 2,60) (mm)	Overblijvende hardingsdiepte (tov effectief 2,87) (mm)
LM0359	-0,23	-0,60	kantelend	1	1	1	2,00	2,27
LM0360	-0,27	-0,57	kantelend	1	1	3	2,03	2,30
LM0361	-0,23	-0,59	kantelend	1	1	4	2,01	2,28
LM0362	-0,25	-0,51	kantelend	1	1	6	2,09	2,36
LM0363	-0,33	-0,50	blokje	1	2	1	2,10	2,37

LM0364	-0,30	-0,43	blokje	1	2	3	2,17	2,44
LM0365	-0,36	-0,54	blokje	1	2	4	2,06	2,33
LM0366	-0,36	-0,53	blokje	1	2	6	2,07	2,34
LM0367	-0,31	-0,49	blokje	1	3	1	2,11	2,38
LM0368	-0,33	-0,48	blokje	1	3	3	2,12	2,39
LM0369	-0,34	-0,56	blokje	1	3	4	2,04	2,31
LM0370	-0,34	-0,51	blokje	1	3	6	2,09	2,36
LM0371	-0,17	-0,51	kantelend	2	1	1	2,09	2,36
LM0372	-0,15	-0,50	Dummy ring	2	1	3	2,10	2,37
LM0373	-0,22	-0,46	kantelend	2	1	4	2,14	2,41
LM0374	-0,27	-0,53	Dummy ring	2	1	6	2,07	2,34
LM0375	-0,32	-0,49	blokje	2	2	1	2,11	2,38
LM0376	-0,31	-0,47	blokje	2	2	3	2,13	2,40
LM0377	-0,36	-0,54	blokje	2	2	4	2,06	2,33
LM0378	-0,35	-0,52	blokje	2	2	6	2,08	2,35
LM0379	-0,33	-0,51	blokje	2	3	1	2,09	2,36
LM0380	-0,32	-0,48	blokje	2	3	3	2,12	2,39
LM0381	-0,33	-0,52	blokje	2	3	4	2,08	2,35
LM0382	-0,29	-0,44	blokje	2	3	6	2,16	2,43

Met level één wordt de voet bedoeld en met level twee de spin. Het niveau duidt op de positie in de stack of stapeling, hierbij is één de onderste component en drie de bovenste. De positie op de levels is reeds duidelijk gemaakt en is terug te vinden op Figuur 66.

De minimum en maximum verdeelde overmaten zijn in het algemeen minder negatief bij test 2 dan bij test 1. Dit is dankzij de aanpassing die is doorgevoerd in cel zacht bij het zacht draaien van de componenten. De diameter van de conen is nu 0,30mm groter na cel zacht.

De onderste componenten op de voet en op de spin hebben ongeveer dezelfde verdeelde overmaat. Op de voet steekt component LM0362 er een beetje uit met -0,51mm. Op de spin verschilt de maximale overmaat van component LM0373 met gemiddeld 0,05mm ten opzichte van de andere onderste componenten op de spin. Anderzijds verschillen de minimale overmaten wel redelijk met een maximaal verschil van 0,1mm tussen de twee uitersten van de onderste componenten op de spin.

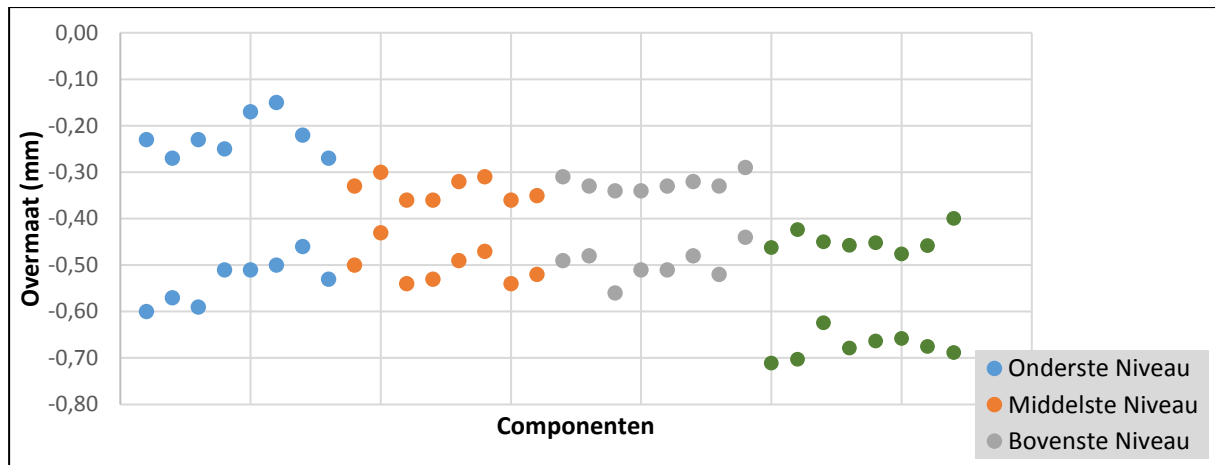
Enkel de minimale overmaat van de componenten LM0371 en LM0372 zijn groter dan -0.2. Deze liggen respectievelijk op een kantelende ondersteuning en op een dummy ring. Deze afwijking is niet terug te vinden bij de andere componenten met gelijkaardige ondersteuning waarbij het type ondersteuning dus niet als oorzaak beschouwd kan worden voor het grote verschil in minimale overmaat.

Er is ook een verschil tussen de overmaat van de onderste componenten op de voet en deze op de spin. Dit is typisch aan de putovens dat de onderste componenten in een ovenlading altijd een iets grotere afwijking hebben in vervorming ten opzichte van hoger gelegen componenten. Als we enkel naar de spin kijken om de vergelijking van het effect van de twee types van ondersteuning met elkaar te vergelijken kan besloten worden dat de kantelende ondersteuning gemiddeld genomen een kleinere vervorming veroorzaakt of beter gezegd, dat de kantelende ondersteuning

een betere bewegingsvrijheid geeft aan de component. Om correct te zijn zouden nog testen moeten gebeuren waarbij een boom opgebouwd wordt met dummy ringen en met kantelende ondersteuning. Op deze manier kan er een accuratere vergelijking gemaakt worden tussen de twee types van ondersteuning.

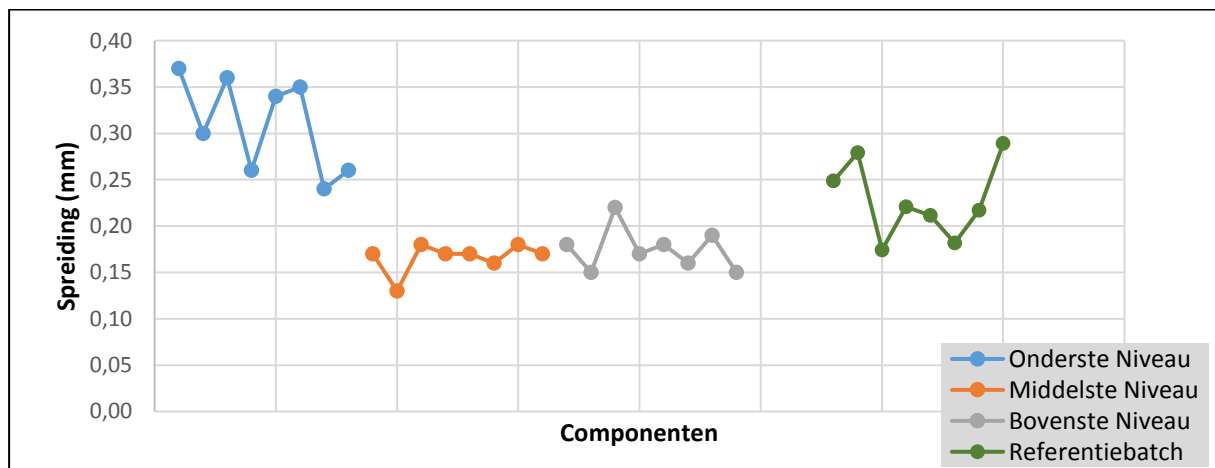
5.2.1.3 Vergelijking tussen niveaus, referentiebatch en eerste testbatch

Op onderstaande afbeelding (Figuur 83) is de minimale en de maximale overmaat van de componenten uitgezet in functie van het niveau in de stapeling. De bovenste reeks punten zijn de minimale overmaat en de onderste zijn de maximale overmaat van de conen.



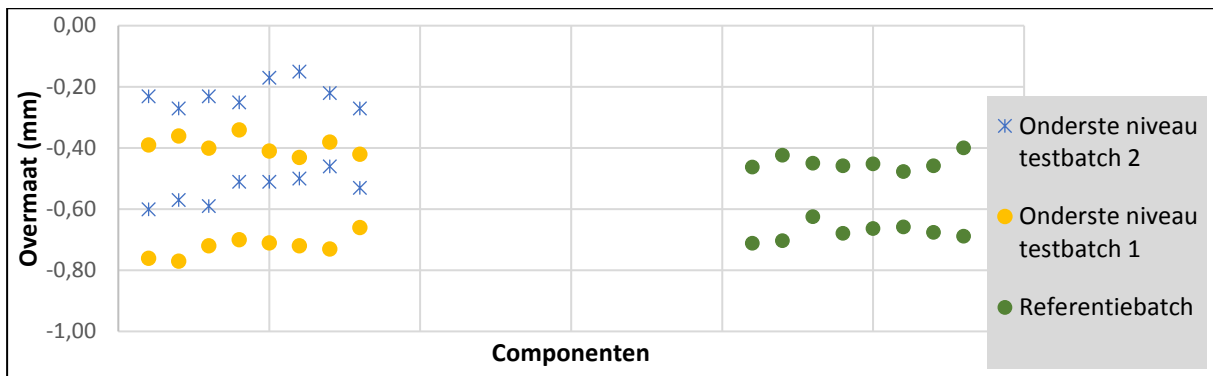
Figuur 83: Minimale en Maximale overmaat van de conen van testbatch 2

Hierbij zijn de eerste drie componenten van het onderste niveau opvallend slechter dan de andere componenten van dezelfde batch. In het algemeen is de overmaat beter op de componenten van de tweede testbatch dan deze van de referentiebatch. Ondanks een aanpassing in cel zacht van 0,15mm is de gemiddelde overmaat ongeveer met 0,20mm beter dan de referentiebatch. De eerste vier punten zijn steeds de componenten die op de voet liggen. De andere vier componenten zijn deze die op de spin liggen. Dit is ook het geval voor Figuur 84 waarop de spreiding te zien is.



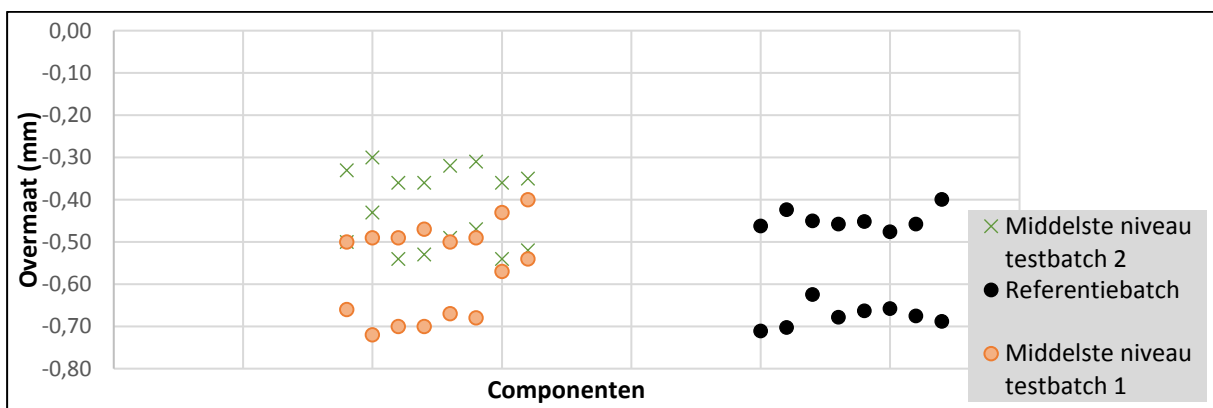
Figuur 84: Spreiding op de overmaat van de conen van testbatch 2

De grootste vervormingen vinden nog steeds plaats op het onderste niveau maar zijn qua overmaat beter dan het onderste niveau van de eerste test (zie Figuur 85).



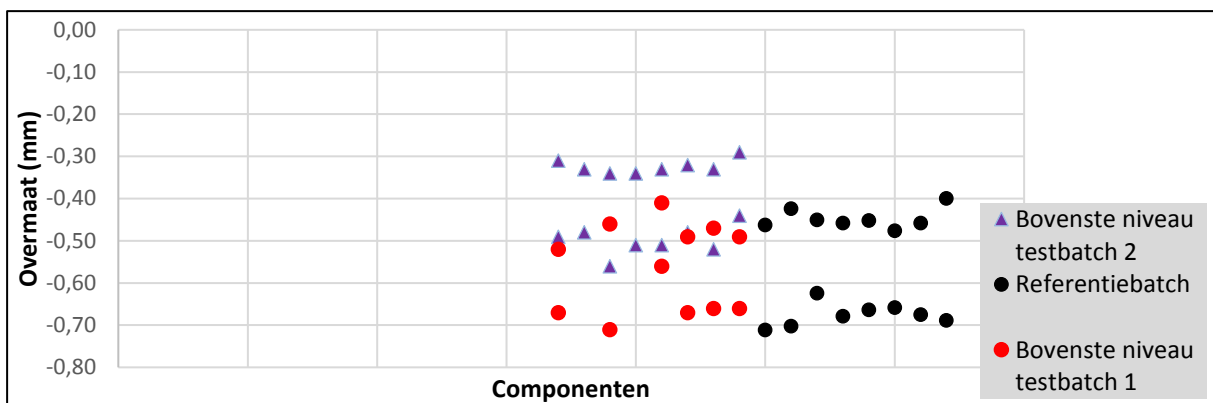
Figuur 85: Vergelijking van de minimale en maximale overmaat van het onderste niveau tussen de eerste testbatch en de tweede met als referentie een standaardbatch

Ook voor het middelste niveau is er een verbetering zichtbaar ten opzichte van de eerste testbatch alsook van de referentiebatch (zie Figuur 86).



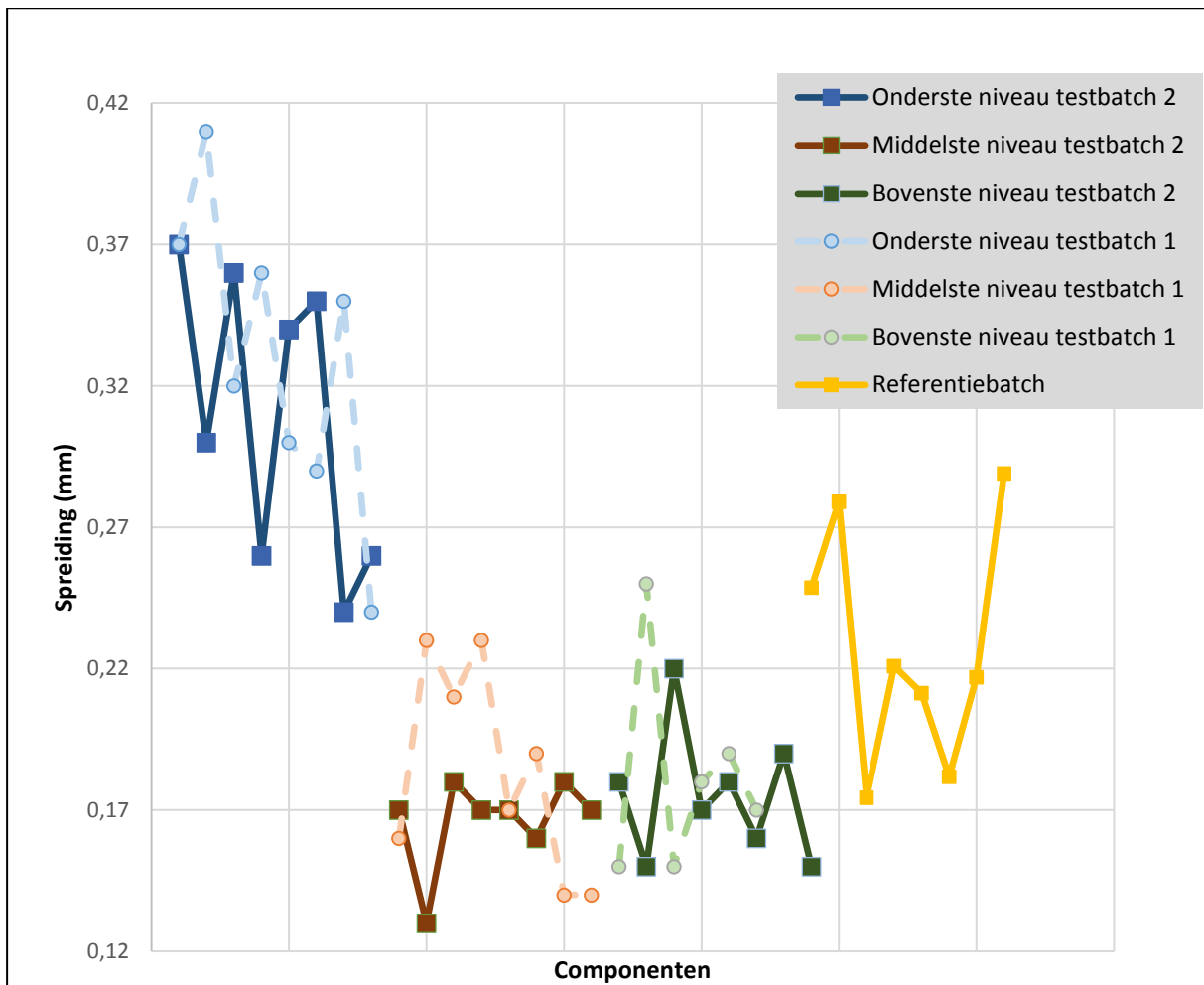
Figuur 86: Vergelijking van de minimale en maximale overmaat van het middelste niveau tussen de eerste testbatch en de tweede met als referentie een standaardbatch

Voor het bovenste niveau kan hetzelfde geconcludeerd worden (zie Figuur 87).



Figuur 87: Vergelijking van de minimale en maximale overmaat van het bovenste niveau tussen de eerste testbatch en de tweede met als referentie een standaardbatch

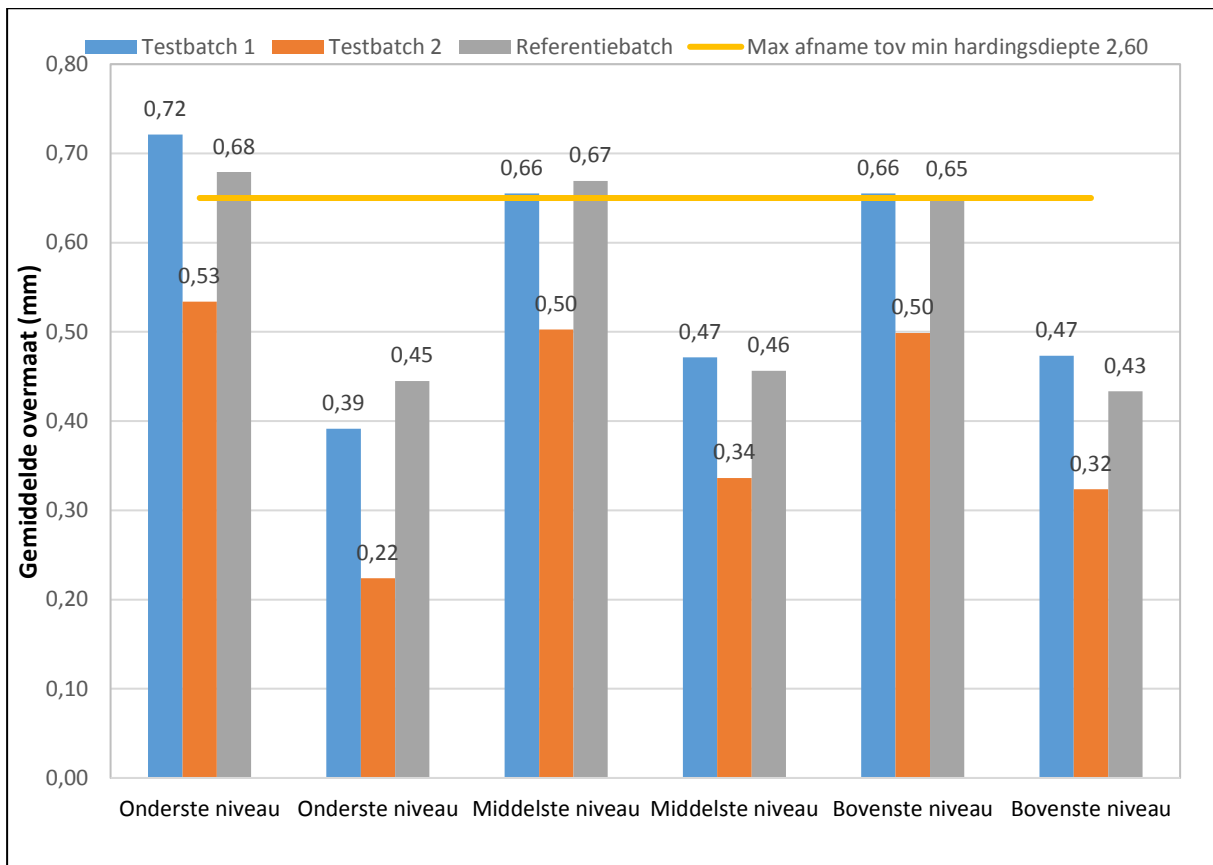
De vergelijking van de spreidingen tussen de verschillende testbatches en een referentiebatch zijn uitgezet in een grafiek (zie Figuur 88).



Figuur 88: Spreiding op de overmaat van de conen, testbatch 2 vergeleken met testbatch 1 en een referentiebatch

De spreiding op de componenten van het onderste niveau, is iets beter (lager in waarde) voor de tweede test, ten opzichte van de eerste test. Anderzijds is de spreiding van het middelste en het bovenste niveau in een stapeling steeds beter (lager in waarde en per niveau constanter) dan de referentiebatch. De blauwe curve is de voorstelling van het onderste niveau. De laatste en het derde laatste punt in de blauwe curve of 'puntenwolk' hebben als ondersteuning de dummy ring. Ook hier zien we geen duidelijk verband tussen de verschillende types van ondersteuning die werden gebruikt.

Voor een duidelijkere vergelijking zijn ook de gemiddelde waarden van maximale overmaat en minimale overmaat per niveau ten opzichte van elkaar uitgezet in een staafdiagram. Deze is hieronder zichtbaar (zie Figuur 89).



Figuur 89: De gemiddelde overmaat max en min per niveau, vergeleken tussen de twee testbatches en de referentiebatch

Als opmerking is er het feit dat de referentiebatch niet dezelfde opbouw heeft als de testbatches, in deze vergelijking hebben we de drie componenten die op de voet liggen bij de referentiebatch vergeleken met de onderste componenten op de testbatches, alsook de drie componenten die op de bovenste spin liggen van de referentiebatch vergeleken met de bovenste componenten van de testbatches. Alle andere componenten van de referentiebatch zijn dan vergeleken met het middelste niveau van testbatch één en testbatch twee. Deze vergelijkingen met de referentiebatch gaan niet helemaal op aangezien de belasting op de componenten verschillen ten opzichte van die in de eerste en tweede testbatch. Ondanks een lagere belasting op de componenten zijn de resultaten van de tweede testbatch toch beter aangezien de gemiddelde overmaat op elk niveau lager ligt.

De hardingsdiepte die ingesteld wordt in de ovens kan verlaagd worden naar het minimum (2,60mm) vanwege het feit dat alle maximale overmaten kleiner of gelijk zijn aan -0,60mm waardoor de overblijvende hardingsdiepte groter of gelijk is aan 1,95mm.

5.2.2 Kopcirkels

5.2.2.1 Uitleg metingen

Voor de uitleg van de kopcirkelmetingen wordt verwezen naar het hoofdstuk 'Experimentele test 1'. De meest relevante gegevens van de metingen zijn de minimale en maximale kopcirkeldiameter die wordt gemeten op drie verschillende hoogtes namelijk 'top', 'middle' en 'under'.

5.2.2.2 Meetresultaten kopcirkels

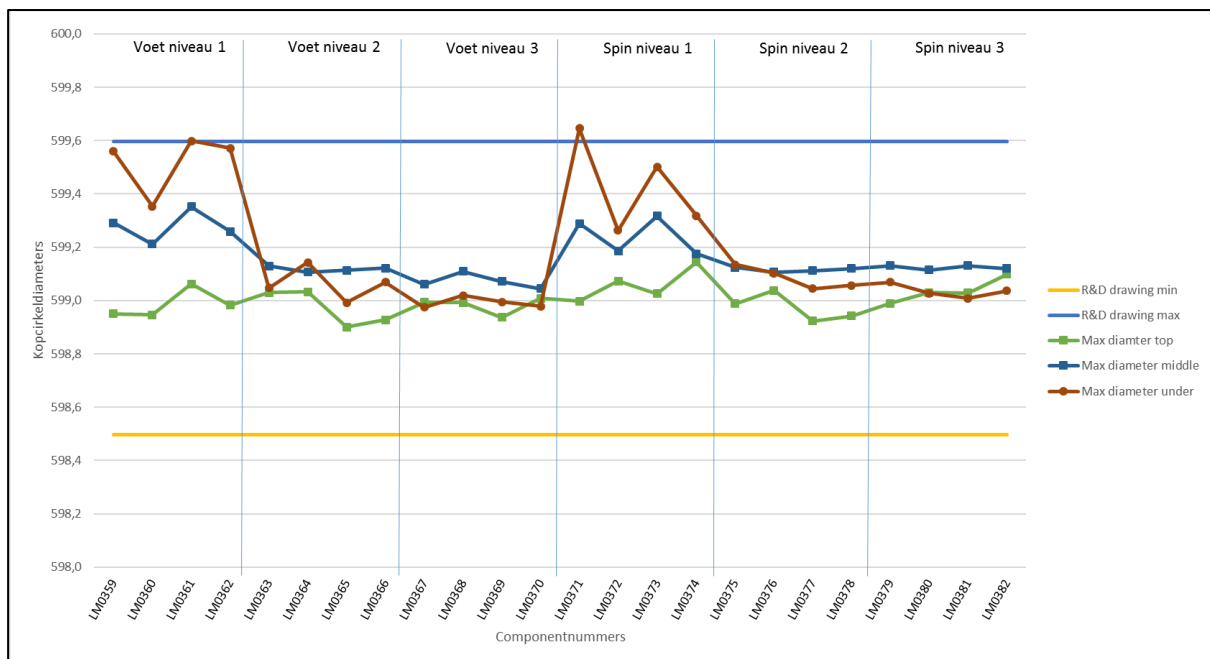
De tolerantiegrenzen van de kopcirkel diameter bedragen volgens de R&D drawing minimum 598,496mm en maximum 599,596mm. Na de bespreking van de resultaten van de eerste testbatch is de kopcirkeldiameter aangepast in cel zacht naar 599,450mm in plaats van 599,300mm. De meetresultaten, minimum en maximum, zijn weergegeven in onderstaande tabel (Tabel 27) voor de drie hoogtes waarop de metingen zijn uitgevoerd.

Tabel 27: Kopcirkels minimale en maximale diameter tweede test in mm

	Component	TOP		MIDDLE		UNDER	
		Min tip dia top	Max tip dia top	Min tip dia middle	Max tip dia middle	Min tip dia under	Max tip dia under
Voet Niveau 1	LM0359	598,779	598,951	598,907	599,292	598,641	599,559
	LM0360	598,754	598,946	598,913	599,212	598,634	599,353
	LM0361	598,798	599,062	599,004	599,352	598,748	599,599
	LM0362	598,766	598,982	598,996	599,260	598,822	599,572
Voet Niveau 2	LM0363	598,835	599,031	599,009	599,129	598,842	599,047
	LM0364	598,896	599,033	599,051	599,106	598,955	599,143
	LM0365	598,806	598,900	599,033	599,114	598,852	598,992
	LM0366	598,787	598,928	599,049	599,122	598,932	599,069
Voet Niveau 3	LM0367	598,881	598,994	599,035	599,061	598,823	598,975
	LM0368	598,872	598,992	599,028	599,109	598,853	599,020
	LM0369	598,792	598,937	599,021	599,071	598,843	598,995
	LM0370	598,825	599,009	598,968	599,045	598,833	598,978
Spin Niveau 1	LM0371	598,835	598,998	598,903	599,289	598,664	599,646
	LM0372	598,830	599,073	599,018	599,187	598,828	599,264
	LM0373	598,829	599,026	598,991	599,317	598,874	599,502
	LM0374	598,706	599,144	599,046	599,176	598,761	599,318
Spin Niveau 2	LM0375	598,758	598,988	598,991	599,125	598,912	599,136
	LM0376	598,799	599,038	599,009	599,107	598,890	599,103
	LM0377	598,794	598,924	599,028	599,112	598,840	599,045
	LM0378	598,807	598,943	599,050	599,120	598,880	599,057
Spin Niveau 3	LM0379	598,833	598,989	599,065	599,131	598,873	599,069
	LM0380	598,817	599,029	598,985	599,115	598,848	599,027
	LM0381	598,905	599,028	599,004	599,132	598,752	599,009
	LM0382	598,886	599,098	599,078	599,121	598,889	599,037

Aan de hand van deze gegevens wordt het duidelijk dat de onderste componenten grotere maximale kopcirkels hebben gekregen, dit is uiteraard vanwege het feit dat deze componenten de grootste belasting dragen. Er zijn twee componenten waarbij een meting buiten de toegelaten toleranties viel. Dit zijn component LM0361 gelegen op het onderste niveau op de voet en LM0371 eveneens gelegen op het onderste niveau maar van de spin. Beide componenten hebben een hogere maximale kopcirkeldiameter op hoogte 'under'. Beide componenten zijn aan de onderkant uitgezet in diameter met $4\mu\text{m}$ en $54\mu\text{m}$ boven de toegelaten limiet. Dit betekent niet dat de stukken niet gaan voldoen aan de uiteindelijke specificaties. Dat wordt pas bepaald in cel hard tijdens het nabewerken.

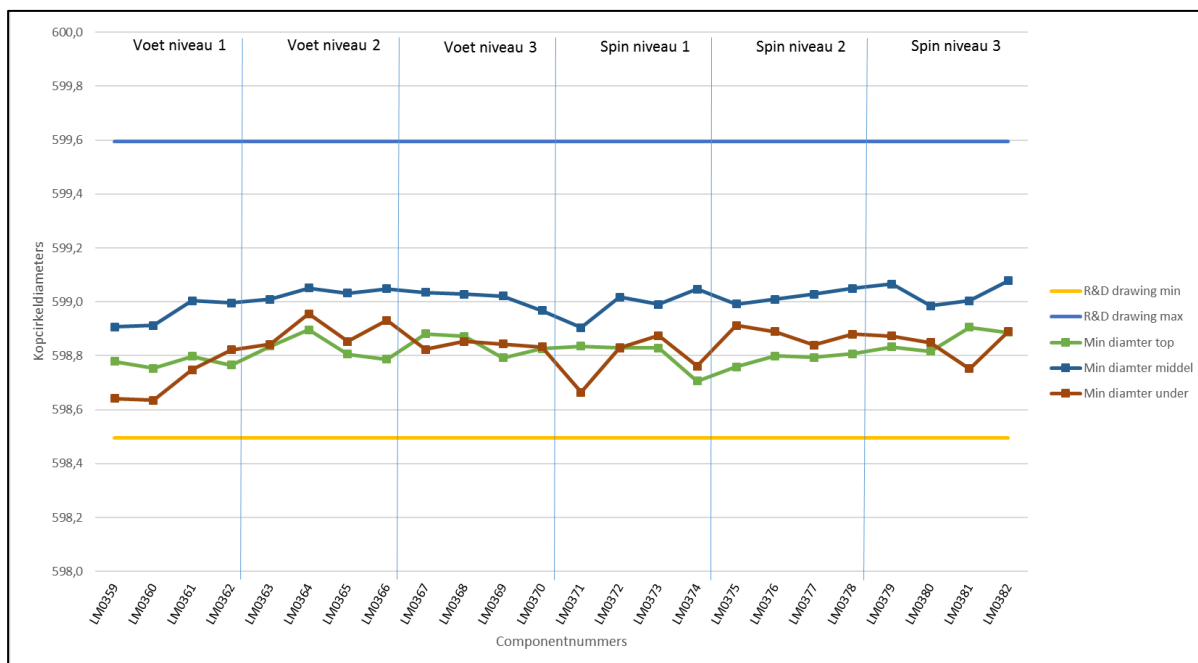
De maximale kopcirkeldiameters zijn per niveau uitgezet in een grafiek voor alle componenten van de tweede testbatch, zichtbaar op onderstaande grafiek (Figuur 90).



Figuur 90: Maximum kopcirkels 'up', 'middle' en 'under' per niveau

Hierop is zijn de twee componenten (LM0361 en LM0371) te zien die net buiten de maximumlimiet vallen. Alle andere waarden liggen binnen de limieten die opgelegd zijn door de R&D-afdeling. Verder is erop te merken dat wederom op het onderste niveau de afwijkingen het grootst zijn en dit zeker het geval is voor de 'under'-kopcirkels. De reden is enerzijds dat de onderste component de grootste last moet dragen en anderzijds dat de ondersteuningen nog aan de componenten blijven trekken gedurende de uitzetting van het gestel en er nog meer bewegingsvrijheid aan de component op het onderste niveau gegeven moet worden. De vervorming op de 'middle' en 'top' kopcirkeldiameters zijn minder als deze van de 'under' kopcirkeldiameter maar zijn nog steeds hoger dan de waardes van de andere niveaus.

Dezelfde grafiek is ook gemaakt voor de minimale waarden van de kopcirkels (zie Figuur 91).



Figuur 91: Minimum kopcirkels 'up', 'middle' en 'under' per niveau

Alle waarden liggen binnen de limieten. Uit bovenstaande grafiek blijkt dat voor het onderste niveau voor de voet als de spin de afwijkingen kleiner zijn ten opzichte van de afwijkingen van de maximale kopcirkeldiameters. Over het algemeen zijn de waarden veel constanter.

De spreiding op de kopcirkeldiameters zijn weergegeven in onderstaande tabel (Tabel 28). Per component is de spreiding weergegeven samen met het type van ondersteuning en zijn positie op de boom. De R&D-afdeling heeft bepaald dat de spreiding niet boven de 1,10 mag komen.

Tabel 28: Spreiding van de kopcirkeldiameters van de tweede testbatch

Component	Spreiding R&D	Spreiding	Type ondersteuning	Positie in boom	Positie per niveau
LM0359	1,10	0,92	Kantelend	Voet niveau 1	2
LM0360	1,10	0,72	Kantelend	Voet niveau 1	3
LM0361	1,10	0,85	Kantelend	Voet niveau 1	5
LM0362	1,10	0,81	Kantelend	Voet niveau 1	6
LM0363	1,10	0,29	Blokje	Voet niveau 2	2
LM0364	1,10	0,25	Blokje	Voet niveau 2	3
LM0365	1,10	0,31	Blokje	Voet niveau 2	5
LM0366	1,10	0,33	Blokje	Voet niveau 2	6
LM0367	1,10	0,24	Blokje	Voet niveau 3	2
LM0368	1,10	0,26	Blokje	Voet niveau 3	3
LM0369	1,10	0,28	Blokje	Voet niveau 3	5
LM0370	1,10	0,22	Blokje	Voet niveau 3	6
LM0371	1,10	0,98	Kantelend	Spin niveau 1	2

LM0372	1,10	0,44	Dummy ring	Spin niveau 1	3
LM0373	1,10	0,67	Kantelend	Spin niveau 1	5
LM0374	1,10	0,61	Dummy ring	Spin niveau 1	6
LM0375	1,10	0,38	Blokje	Spin niveau 2	2
LM0376	1,10	0,31	Blokje	Spin niveau 2	3
LM0377	1,10	0,32	Blokje	Spin niveau 2	5
LM0378	1,10	0,31	Blokje	Spin niveau 2	6
LM0379	1,10	0,30	Blokje	Spin niveau 3	2
LM0380	1,10	0,30	Blokje	Spin niveau 3	3
LM0381	1,10	0,38	Blokje	Spin niveau 3	5
LM0382	1,10	0,23	Blokje	Spin niveau 3	6

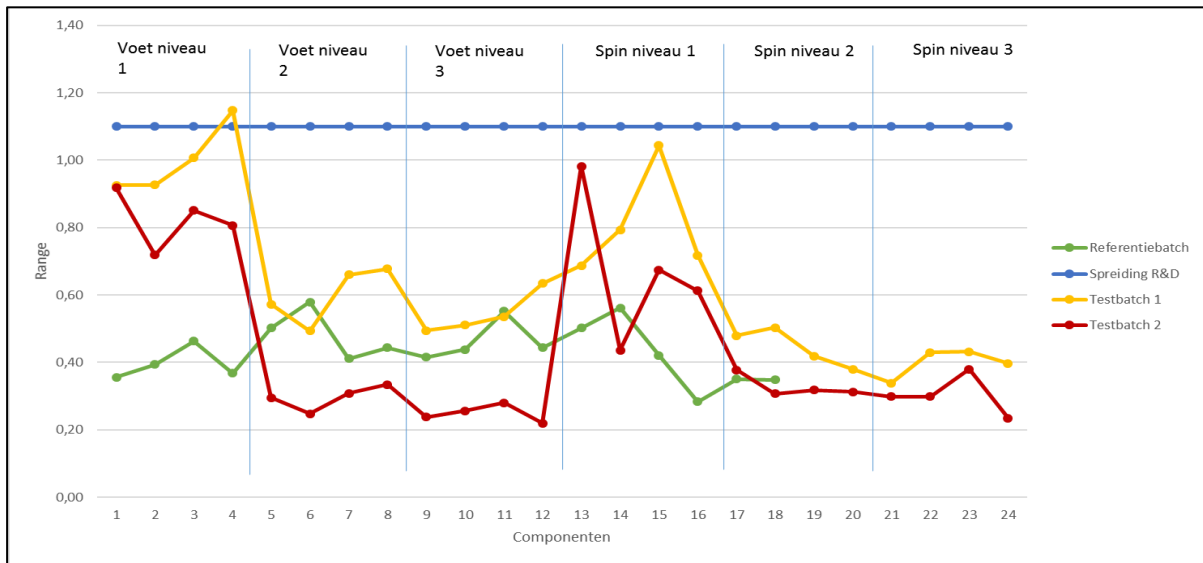
Er zijn twee opvallende waarden voor de spreiding, namelijk LM0359 en LM0371 met respectievelijk 0,92 en 0,98. LM0359 bevindt zich op het onderste niveau van de voet en LM0371 bevindt zich op het onderste niveau van de spin. Hun spreiding is groter dan de andere componenten van hun niveau. Beide componenten hadden ook dezelfde positie op de boom namelijk positie twee. Gedurende het hardingsproces is er één brander uitgevallen maar er is geen éénduidig verband tussen de uitval van de brander en de hogere spreiding van deze twee componenten. Als het aan de brander zou liggen, dan zouden alle spreidingen op positie twee aanzienlijk verschillen in vergelijking met de componenten op gelijkaardige niveaus.

De spreidingen van de componenten op het onderste niveau van de voet zijn aanzienlijk hoger dan de andere spreidingen. De spreiding van de onderste componenten op de spin zijn eveneens hoger dan de andere maar deze zijn wel lager dan deze van hetzelfde niveau van de voet. De spreiding op niveau twee en drie zijn ongeveer hetzelfde al zijn deze van niveau drie iets beter.

De spreidingen vergelijken per type ondersteuning zou een vals beeld geven aangezien de componenten op het onderste niveau altijd grotere afwijkingen vertonen dan op andere hoogtes in de oven, dit is typerend aan de ovens. Anderzijds zou het vergelijken van de twee types ondersteuning op de spin geen correcte vergelijking weergeven vanwege het feit dat er een uitschieter aanwezig is, herinner LM0371. Om een accurate vergelijking tussen de twee types van ondersteuning te bekomen moeten er nieuwe testen komen zoals reeds vermeld onder hoofding '5.2.1.2 Overmaat conen'.

5.2.2.3 Vergelijking tussen niveaus, referentiebatch en eerste testbatch

In onderstaande grafiek is de spreiding van de componenten uitgezet ter vergelijking tussen de eerste testbatch, de tweede testbatch en de referentie batch (Figuur 92).



Figuur 92: Spreiding van de kopcirkels vergeleken tussen de testbatches en de referentiebatch duidelijk per niveau

De vergelijking tussen de spreiding van de twee testen en de referentiebatch is in de tabel hieronder weergegeven (zie Tabel 29). Hierin worden de niveaus tussen de verschillende testen en de referentiebatch vergeleken aan de hand van gemiddeldes.

Tabel 29: Gemiddelde spreiding vergeleken tussen zelfde niveaus en verschillende testen

	Testbatch 1	Testbatch 2	Referentie
Onderste niveau voet	1,00	0,82	0,40
Onderste niveau spin	0,81	0,68	0,46
Onderste niveau voet en spin	0,91	0,75	0,43
Niveau 2 en 3 voet	0,57	0,27	/
Niveau 2 en 3 spin	0,42	0,32	/
Niveau 2 en 3 voet en spin	0,50	0,29	0,44
Gemiddelde hele batch	0,63	0,45	0,43

Vanwege het niet op elkaar stapelen van componenten bij de referentiebatch zijn daar de spreidingen over heel de batch constanter dan bij de testbatches. De tweede test heeft betere spreidingen dan de eerste test voor alle niveaus. Niveaus twee en drie hebben gemiddeld een betere spreiding dan de gemiddelde van de hele referentiebatch ondanks een hogere belasting op de componenten op het tweede niveau. De onderste niveaus van testbatch twee hebben een grotere spreiding dan deze van de referentiebatch wat normaal is omdat de onderste componenten bij het stapelen zwaarder belast worden. Als het gemiddelde van de hele batch van de tweede test vergeleken wordt met deze van de referentiebatch, dan zien we dat deze elkaar zeer goed benaderen met slechts een verschil van 0,02.

5.2.3 Resultaten

Tabel 30: eindresultaten voor de componenten van de tweede testbatch (027-F1245E021)

Component	Niveau	Positie	Conen	Kopcircels	Eindbeoordeling
LM0359	Voet Niv. 1	2	OK	OK	Eindproduct
LM0360	Voet Niv. 1	3	OK	OK	Eindproduct
LM0361	Voet Niv. 1	5	OK	OK	Eindproduct
LM0362	Voet Niv. 1	6	OK	OK	Eindproduct
LM0363	Voet Niv. 2	2	OK	OK	Eindproduct
LM0364	Voet Niv. 2	3	OK	OK	Eindproduct
LM0365	Voet Niv. 2	5	OK	OK	Eindproduct
LM0366	Voet Niv. 2	6	OK	OK	Eindproduct
LM0367	Voet Niv. 3	2	OK	OK	Eindproduct
LM0368	Voet Niv. 3	3	OK	OK	Eindproduct
LM0369	Voet Niv. 3	5	OK	OK	Eindproduct
LM0370	Voet Niv. 3	6	OK	OK	Eindproduct
LM0371	Spin Niv. 1	2	Beperking B-lager	OK	Eindproduct
LM0372	Spin Niv. 1	3	OK	OK	Eindproduct
LM0373	Spin Niv. 1	5	OK	OK	Eindproduct
LM0374	Spin Niv. 1	6	OK	OK	Eindproduct
LM0375	Spin Niv. 2	2	OK	OK	Eindproduct
LM0376	Spin Niv. 2	3	OK	OK	Eindproduct
LM0377	Spin Niv. 2	5	OK	OK	Eindproduct
LM0378	Spin Niv. 2	6	OK	OK	Eindproduct
LM0379	Spin Niv. 3	2	OK	OK	Eindproduct
LM0380	Spin Niv. 3	3	OK	OK	Eindproduct
LM0381	Spin Niv. 3	5	OK	OK	Eindproduct
LM0382	Spin Niv. 3	6	OK	OK	Eindproduct

5.3 Conclusie

Het besluit is dat de ontworpen ondersteuning zoals gepland een grotere bewegingsvrijheid geven aan de componenten die erop liggen vanwege de lagere vervormingen van de conen en kopcirkels van de componenten ten opzichte van de eerste testbatch. De ondersteuning werken en zorgen voor verbetering. De resultaten (zie Tabel 30) zijn beter dan bij de eerste testbatch want er zijn geen afgekeurde componenten en is er maar één component met een beperking. Er zijn echter meerdere testen nodig om accuraat verschil aan te tonen tussen de twee types van ondersteuning. De vervormingen op de onderste niveaus zijn beter dan bij de eerste test maar kunnen nog beter. Er is ruimte voor eventuele verbeteringen, zo kan een ander type materiaal gekozen worden voor de ondersteuning zoals cronite. De wig van de kantelende ondersteuning kan cirkelvormiger gemaakt worden zodat deze beter kan rollen.

Anderzijds is een kantelende ondersteuning universeel in gebruik vanwege de gelijkaardige geometrie van andere types van componenten in de harderij (1145, 1140, ...) terwijl een dummy ring per type van component andere diameters heeft, groter is, moeilijker hanteerbaar is en meer plaats inneemt in stockage. Een andere kritische factor bij de opbouw met dummy ringen is de hoogte. Indien de volledige boom opgebouwd wordt met als ondersteuning de dummy ring voor de stapelingen dan wordt de afstand van 90mm, die behouden moet worden tussen de bovenkant van de bovenste spin en de onderkant van de kal, maar net behaald.

De extra spin (1450) die voor de borging dient, kan vervangen worden door een speciaal ontworpen plaat met enkele gaten in voor de draadstangen. Dit is nuttig omdat dit goedkoper zou zijn dan een 1450-spin. Anderzijds is het mogelijk om nog componenten op de bovenste spin te plaatsen. De kritische factor is hier het maximale draagvermogen van de paal, kal en afhardhaak die maximaal 9 ton kunnen dragen. Het is mogelijk om twee extra componenten toe te voegen op de bovenste spin. Dit levert een batchgrootte van 26 componenten op. Een batchgrootte van 26 componenten is misschien niet handig omdat het veelvoud van een batchgrootte gelijk moet zijn aan een veelvoud van drie omdat er telkens drie planeetwielen van hetzelfde type in één tandwielkast zitten. Indien er echter drie ladingen per week opgebouwd zouden worden, dan is dit wel mogelijk omdat de totale hoeveelheid afgeleverde planeetwielen per week terug een veelvoud is van drie. In de kosten-batenanalyse worden beide situaties van batchgrootte 24 componenten met borgingsplaat in plaats van spin en batchgrootte van 26 componenten vergeleken.

De kosten van de ondersteuning spelen natuurlijk ook een rol, hiervoor wordt verwezen naar het hoofdstuk 'Kosten- batenanalyse'. De kost van de ondersteuning is echter klein ten opzichte van de totale kost van een gestel.

6 Kosten-batenanalyse

In dit hoofdstuk worden de kosten in de harderij vergeleken voor een standaardbatch van 18 componenten, een batch van 24 componenten en een batch van 26 componenten. De kostenschattning voor component 027-F1245E021 in de harderij wordt bepaald door de machine uren zoals het stralen van de componenten nadat deze gehard zijn, de arbeidsuren die nodig zijn, de overheadkosten, de hardingsdiepte die in de harderij wordt vooropgesteld en de uren dat de componenten in de oven zitten.

6.1 Berekening om de kost per component te bepalen

De formules waarmee de kost per component berekend worden zijn verkregen via de designafdeling. De verschillende stappen om de kost te bepalen zijn hieronder weergegeven:

- Stap 1, de formule om de theoretische hardingsdiepte (CHD) te bepalen is:

$$\text{CHD} = (0,1602 \times \text{modulus}) + 0,5445$$

Als de hardingsdiepte gekend is dan kan deze ook rechtstreeks ingevuld in stap 2;

- Stap 2, de theoretische oventijd (UO in uren) wordt aan de hand van de volgende formule berekend:

$$\text{UO} = (1,6203 \times \text{HD} - 1,6293) \times 24$$

Indien de oventijd gekend is, kan de kostprijs direct berekend worden d.m.v. stap 3;

- Stap 3, de kostprijs per component berekenen bepalen:

a) $\text{MU (Machine uren)} = \text{UO} + 18$

b) $\text{LU (Labor uren)} = \text{MU} * 20\%$

c) $\text{OH (Overheads)} = \text{LU} * 4,39$

d) $\text{LC (Lading cost)} = (\text{MU} * 30,45) + (\text{LU} * 49,63) + \text{OH}$

e) $\text{Component kost} = \text{LC} / \text{batchgrootte}$

Op deze manier wordt het verschil uitgerekend tussen de componentkost voor een batchgrootte van 18 componenten en van 24 componenten in de harderij. Hieronder volgt een voorbeeldberekeningen voor een standaardbatch van 18 componenten.

Aangezien de hardingsdiepte voor elk componenttype bepaald is gedurende de optimalisatie van het proces slaan we stap 1 over en gaan we verder naar stap 2. Er wordt gerekend met de theoretische oventijd en niet met de effectieve oventijd. De effectieve oventijd kan verschillen omdat er correcties moeten worden uitgevoerd of omdat er geen afschrikbad vrij is.

De hardingsdiepte van de standaardbatch is 2,77mm, aan de hand van de formule worden de ovenuren (UO) berekend:

$$\text{UO} = (1,6203 * 2,77 - 1,6293) * 24$$

$$\text{UO} = 68,61 \text{ uren}$$

Om de kost per component dan te bepalen worden de machine uren berekend. De machine uren (MU) worden berekend door een factor op te tellen bij de ovenuren, voor het tandwieltype 027-F1245E021 is deze factor 18. De machine uren worden dan:

$$\text{MU} = 68,61 + 18$$

$$\text{MU} = 86,61 \text{ uren}$$

De arbeidsuren die nodig zijn voor onder andere de opbouw en afbraak van de boom wordt berekend als 20% van de machine uren. De arbeidsuren (LU) zijn dan:

$$\text{LU} = 86,61 * 0,20$$

$$\text{LU} = 17,32 \text{ uren}$$

De overheadkosten zoals administratie is gelijk aan de arbeidsuren die nodig zijn vermenigvuldigd maal een bepaalde factor die gekenmerkt is aan het type tandwiel, de overheadkost wordt dan:

$$\text{OH} = 17,32 * 4,39$$

$$\text{OH} = 76,04 \text{ €}$$

De totale kost voor een ovenlading wordt gevonden door de som te nemen van de machine uren, arbeidsuren en de overheadkosten waarbij de machine uren vermenigvuldigd worden met de kosten per uur en de arbeidsuren vermenigvuldigd wordt met het loon van een arbeider. De totale kost voor een ovenlading wordt dan:

$$\text{LC} = (86,61 * 30,45) + (17,32 * 49,63) + (76,04)$$

$$\text{LC} = 3573,19 \text{ €}$$

De kost per component gaat verschillen naargelang hoeveel componenten in een ovenlading zitten. Voor de standaardbatch bedraagt het aantal componenten 18, de kost per component in de harderij wordt dan:

$$\text{Component kost} = 3573,19 / 18$$

$$\text{Component kost} = 198,51 \text{ €}$$

Op analoge manier wordt de kost per component gevonden voor een batch van 24 componenten en voor een batchgrootte van 26 omdat er nog de mogelijkheid is om twee componenten op de bovenste spin te plaatsen. In onderstaande tabel staan alle uren en kosten van beide batchgroottes.

Tabel 31: Vergelijking kosten per component voor batchgrootte 18, 24 en 26 met hardingsdiepte 2,77mm

Batch size 18		Batch size 24		Batch size 26	
UO	68,61 Uren	UO	68,61 Uren	UO	68,61 Uren
MU	86,61 Uren	MU	86,61 Uren	MU	86,61 Uren
LU	17,32 Uren	LU	17,32 Uren	LU	17,32 Uren
OH	76,04 €	OH	76,04 €	OH	76,04 €
LC	3573,19 €	LC	3573,19 €	LC	3573,19 €
# comp.	18	# comp.	24	# comp.	26
Comp.kost	198,51 €	Comp.kost	148,88 €	Comp.kost	137,43 €

Hier zitten de kosten van de ondersteuning nog niet in. De standaardbatch werd altijd opgebouwd zonder ondersteuning, de batch van 24 en 26 componenten hebben wel ondersteuning. De standaardbatch van 18 componenten maakt gebruik van vier spinnen (1450) in zijn opbouw terwijl er slechts twee spinnen gebruikt worden in een boom van een batch met grootte 24 of 26. De boom van 24 en 26 componenten wordt opgebouwd met één 1700-spin en één 1450-spin. Deze verschillen in kosten worden in rekening gebracht.

Tabel 32: Verschil in kosten voor de spinnen

Type	Spin (€)	1 rooster (€)	6 roosters (€)	Totaal (€)
1450	6201,32	600,00	3600,00	9801,32
1700	9301,98	684,86	4109,16	13411,14

De levensduur van de spinnen wordt uitgedrukt in het aantal cycli dat deze meegaan. Beide types van spinnen gaan ongeveer 100 cycli mee. In onderstaande tabel wordt de kost van de spinnen uitgedrukt in kost per component, rekening houdend met de levensduur van de spinnen.

Tabel 33: De kosten van de spinnen in rekening gebracht en omgezet naar de kost per component

Levensduur (cycli)	Batch size	# spinnen	Kost spinnen (€)	# comp. Tov levensduur gestel	Kost/comp (€)
100	18	4	39205,28	1800	21,78
100	24	2	23212,46	2400	9,67
100	26	2	23212,46	2600	8,93

In onderstaande tabel staan de kosten van de verschillende ondersteuning en onderdelen voor de opbouw van de tweede testbatch. Alle componenten in onderstaande tabel werden gemaakt

om de tweede testbatch op te bouwen. De prijzen per stuk komen dan ook van de facturen die zijn opgemaakt door de fabrikant.

Tabel 34: Kostentabel van de verschillende ondersteuning, omgerekend naar de kost per component voor een batch van 24

Opbouw met de kantelende ondersteuning

Type	Materiaal	Kost/stuk(€)	Aantal/boom	Totaalkost
Blokje	st37	4,22	48	202,56
Kantelende ond.	st37	181,00	8	1448,00
Draadstang	st37	10,02	8	80,19
M20 moer	st37	0,09	16	1,47
Borgingsplaat	st37	9,00	16	144,00
Totaalkost per boom				1876,22 €

Opbouw met de dummy ring

Type	Materiaal	Kost/stuk(€)	Aantal/boom	Totaalkost
Blokje	st37	4,22	72	303,84
Dummy ring	18CrNiMo7-6	720,00	8	5760,00
Draadstang	st37	10,02	8	80,19
M20 moer	st37	0,09	16	1,47
Borgingsplaat	st37	9,00	16	144,00
Totaalkost per boom				6289,50 €

Voor een batch van 26 componenten moeten de twee extra componenten niet ondersteund worden net zoals bij een standaard opbouw. Aangezien de kantelende ondersteuning uit standaard staal vervaardigd is zal deze geen levensduur hebben van 100 cycli. Dit is eventueel wel mogelijk indien deze uit cronite gemaakt wordt maar dan zal de kostprijs stijgen. In de verdere berekeningen is de levensduur van de kantelende ondersteuning geschat op 20 cycli en deze van de dummy ring op 50 cycli. In onderstaande tabel wordt de kost van de ondersteuning en draadstangen weergegeven per 100 cycli en per component.

Tabel 35: Kosten ondersteuning per component

	€/100cycli	€/comp.
Kantelend type batch size 24 en 26	7668,22	3,20
Dummy ring batch size 24 en 26	12049,50	5,02

Dit is echter een schatting vanwege de levensduur. De effectieve levensduur is onbekend. De kosten van de ondersteuning is echter zeer klein ten opzichte van de totale kosten. Indien de levensduur zou verschillen heeft dit echter geen grote impact op de totale kost per component.

De uiteindelijke kostprijs per component wordt weergegeven in de volgende tabel. Ook de kost per jaar is weergegeven uitgaande van een productieaantal van 1380 planeetwielen (voor 2018) van het type 027-F1245E021.

Tabel 36: Totale kosten per component vergeleken tussen de twee type van ondersteuning

	Standaardbatch	Batch size 24	Vershil t.o.v. standaardbatch	Batch size 26	Vershil t.o.v. standaardbatch
<u>Opbouw van de boom met kantelende ondersteuning</u>					
Kost/comp.:	220,29 €	161,75 €	58,54 €	149,55 €	70,74 €
Kost/jaar:	304075,00 €	223268,62 €	80806,61 €	206433,00 €	97641,87 €
			26,57 %		32,11 €
<u>Opbouw van de boom met dummy ring ondersteuning</u>					
		163,58 €	56,72 €	151,38 €	68,91 €
		225788,47 €	25,75 %	208953,00 €	31,28 %

Uit bovenstaande gegevens wordt duidelijk dat een batch met 26 componenten het voordeligste is waarbij tussen de 31,28 en 32,11% aan kosten bespaart kan worden t.o.v. de standaardbatch. Indien de batch met 24 componenten wordt gebruikt dan is de kostbesparing tussen de 25,75 en de 26,57% afhankelijk van het type ondersteuning dat wordt gebruikt.

Als er voor de batchgrootte van 24 wordt gekozen dan kan er nog meer bespaard worden want de bovenste spin (1450) draagt geen last. Indien deze vervangen wordt door plaat die ontworpen is om enkel de draadstangen te borgen, kunnen nog meer kosten bespaard worden. De kost van de borgingsplaat is zeer klein ten opzichte van de kost van een spin, zeker als deze in de fabriek zelf wordt gemaakt.

Voor de berekening met het gebruik van de plaat benaderen we de totale kost van de spin en de borgingsplaat aan de kost van één 1700-spin. Hieronder zijn de resultaten weergegeven indien de bovenste spin vervangen zou worden door een alternatieve plaat.

Tabel 37: Kost per component in euro en de besparing per component in procent indien gebruik gemaakt wordt van een alternatieve plaat voor de bevestiging van de draadstangen

Type ondersteuning	Levensduur (cycli)	Kost/comp plaat en spin (€)	Kost/comp (€)	Vershil t.o.v. een standaardbatch (€)	Vershil t.o.v. een standaardbatch (%)
Kantelend.	100	5,59	157,67	62,63	31,55
Dummy	100	5,59	159,49	60,80	30,63

Aangezien de plaat geen extra last moet dragen wordt deze uit standaard staal geproduceerd en wordt ervan uitgegaan dat deze een levensduur heeft van 100 cycli. Hieruit blijkt dat nog eens 5% extra bespaard kan worden ten opzichte van de batchgrootte van 24 met twee spinnen.

De tijd die nodig is om de boom op te bouwen met 24 componenten is iets langer (enkele uren) dan deze met 18 componenten vanwege de goede plaatsing van de ondersteuning. Aangezien dat de tijd die de componenten in de harderij doorbrengen ongeveer één week is, zijn de enkele uren die extra nodig zijn voor de opbouw te verwaarlozen.

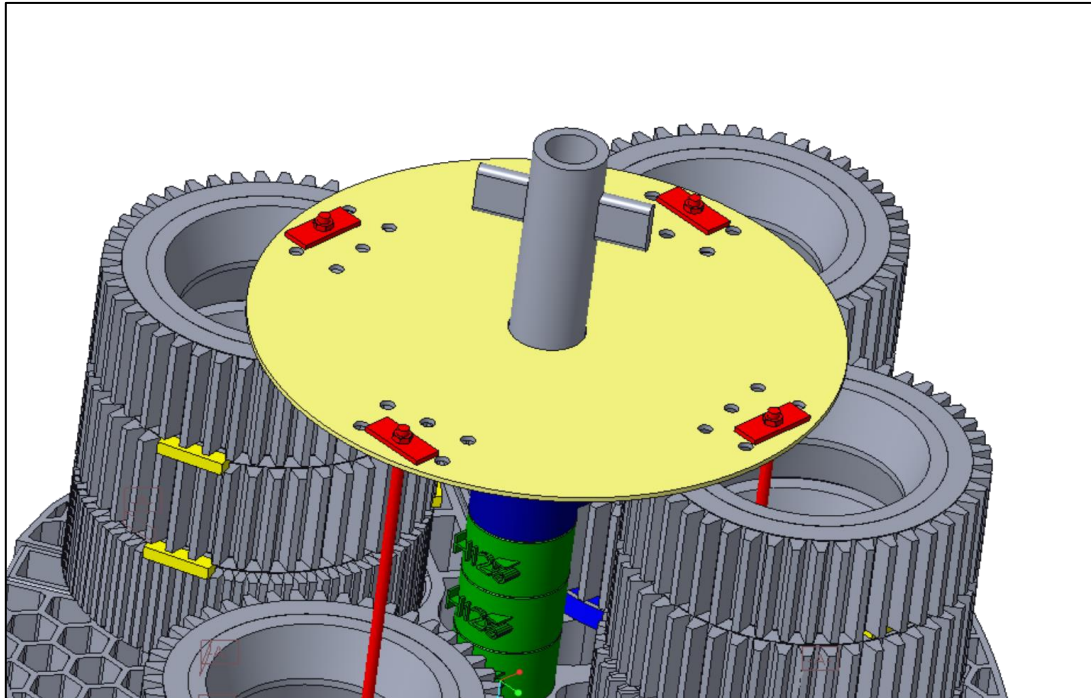
In onderstaande tabel staan de verschillen in kost samengevat in percent en in euro van een batchgrootte van 24 en 26 ten opzichte van de standaardbatch.

Tabel 38: Samenvattende tabel kostenbesparing component 027-F1245E021

	Standaardbatch	Batch size 24	Vershil t.o.v. standaardbatch	Batch size 24 met alternatieve plaat ipv bovenste spin	Vershil t.o.v. standaardbatch	Batch size 26	Vershil t.o.v. standaardbatch
		<u>Opbouw van de boom met kantelende ondersteuning</u>					
Kost/comp.:	220,29 €	161,75 €	58,54 €	157,67 €	62,63 €	149,55 €	70,74 €
Kost/jaar uitgaande van 1380 componenten voor 2018:	304 075,00 €	223 268,62 €	80 806,61 €	217 584,60 €	86 490,40 €	206 433,00 €	97 641,87 €
			26,57 %		31,55%		32,11 €
		<u>Opbouw van de boom met dummy ring ondersteuning</u>					
		163,58 €	56,72 €	159,49 €	60,80 €	151,38 €	68,91 €
		225 788,47 €	78 286,53 €	220 096,20 €	83 978,80 €	208 953,00 €	95 122,00 €
			25,75 %		30,63%		31,28%

6.1.1 Alternatieve plaat voor de bevestiging van de draadstangen

De afmetingen van de borgingsplaat voor de draadstangen zijn terug te vinden op de 2D-tekeningen in bijlage E. Op onderstaande afbeelding is een screenshot te zien van deze plaat in Creo bij een gelijkaardige opbouw zoals die van de tweede testbatch.



Figuur 93: Alternatieve plaat voor bevestiging van draadstangen

6.2 Conclusie

In 2018 worden er 1380 planeetwielen van het type 027-F1245E021 gemaakt, op de standaard manier met batchgrootte 18 zijn dit 77 cycli per jaar. Voor de opbouw met een batchgrootte van 24 betekent dit 58 cycli per jaar en voor een batchgrootte van 26 zelfs 53 cycli per jaar. Dit wil zeggen dat er naast de kosten die bespaard worden er nog eens 19 en respectievelijk 24 ovens per jaar minder gebruikt worden om hetzelfde aantal planeetwielen te harden. Indien deze ovens gebruikt worden voor hetzelfde type planeetwiel dan is er een stijging van 456 en respectievelijk 624 componenten mogelijk wat neer komt op een stijging van 33,04% en voor de batchgrootte van 26 componenten, 45,21% op jaar basis.

Bij beide batchgroottes (24 en 26) zijn de kantelende ondersteuning het voordeligst met een verschil ten opzichte van de dummy ringen van ongeveer 1%. Zoals eerder aangehaald kan dit nog licht verschillen afhankelijk van de levensduur van de ondersteuning.

De grootste kostenbesparing wordt gerealiseerd bij de batchgrootte van 26 componenten namelijk 32,11% (= 97 600€) met gebruik van kantelende ondersteuning.

Het tweede voordeligste is de batchgrootte van 24 componenten waarbij de bovenste spin wordt vervangen door een plaat die speciaal vervaardigd wordt voor de bevestiging van de draadstangen. Dan wordt er 31,55% (= 86 500€) aan kosten bespaard maar dan zijn er weer 5 ovens op jaar basis meer in gebruik dan bij de batchgrootte van 26 componenten.

Conclusie

Uit alle mogelijke opbouwconfiguraties die voorgesteld zijn, blijkt degene met 24 componenten het beste te zijn. Hierbij zijn er maximaal drie componenten op elkaar gestapeld met telkens vier stapels op de voet en vier stapels op de spin. De totale massa is ongeveer 8100kg en de toegelaten massa is maximaal 9000kg maar wegens plaatsbeperking waren meer componenten initieel niet mogelijk voor de eerste test.

De eerste test had positieve resultaten en verifieerde ook meteen het idee dat vier componenten op elkaar teveel vervorming zou veroorzaken door de hoge belasting. De onderste componenten van een stapeling vervormen duidelijk meer dan de andere componenten. Ondanks deze grotere vervorming liggen ze net op de rand van wat toegelaten is. Enkele waarden van de kopcirkels lagen net buiten de tolerantie. Uiteindelijk zijn er vier componenten gescrapt, waarvan één destructief getest is geweest om de effectieve hardingsdiepte te bepalen en vier andere componenten hadden een beperking. Hieruit bleek dat er een duidelijke verbetering moest gemaakt worden op gebied van ondersteuning en uit de meetgegevens van de test en een referentiebatch bleek ook een aanpassing van de dimensies in cel zacht mogelijk te zijn.

De tweede test met de nieuwe ondersteuning (kantelende en dummy ring) en met een precompensatie op de componenten in cel zacht leverde betere resultaten op. Enkel twee planeetwielen hebben een te grote kopcirkeldiameter ($4\mu\text{m}$ en $54\mu\text{m}$ te groot). Alle andere metingen lagen binnen de vooropgestelde toleranties. Bij de tweede testbatch zijn er geen componenten afgekeurd (scrap) en is er slechts één component met een beperking.

De batchgrootte is dus succesvol verhoogd met 33% (van 18 naar 24 componenten). Momenteel zijn er nog geen testen uitgevoerd met nog twee extra componenten op de bovenste spin, maar indien een batchgrootte van 26 componenten gewenst is dan is dit zeker mogelijk aangezien het totale gewicht van de boom nog kleiner is dan negen ton.

De kosten-batenanalyse geeft een verlaging van de proceskost met 26,57% voor 24 componenten met kantelende ondersteuning ten opzicht van de initiële opbouw met 18 componenten. Indien de 24 componenten ondersteund worden met een dummy ring dan verlaagt de proceskost met 25,75%. De bovenste spin kan vervangen worden door een plaat met gaten in. Hierdoor valt de grote kost van een spin ook weg en daalt de proceskost voor 24 componenten met kantelende ondersteuning en dummy ring met 31,55% en 30,63% respectievelijk. De opbouw met 26 componenten zou een daling van de proceskost met 32,11% voor de kantelende ondersteuning en 31,28% voor de dummy ring ondersteuning opleveren. Een verlaging van proceskost met 31,55% en een productie van 1380 componenten per jaar voor component 027-F1245E021 levert op jaarbasis ongeveer 95 000 euro op.

Naast de verlaging in proceskost zullen er ook minder ovens nodig zijn voor de 1380 componenten te maken. Er gaan dus 33% minder ovens nodig zijn om dezelfde productie te halen. Hierdoor kan de productie in de harderij omhoog en kunnen er meer componenten per jaar verwerkt worden in de harderij.

Het toepassen van hetzelfde principe op meerdere types componenten is mogelijk. Er zijn namelijk veel gelijkaardige componenten die het hardingsproces doorlopen. Indien dit voor meer

componenten gedaan kan worden dan zou dit substantiële winsten opleveren en een grote verhoging van de productiecapaciteit in de harderij opleveren.

Indien deze nieuwe manier van stapelen met 24 of 26 componenten wordt geïmplementeerd dan is een nauwlettende opvolging van de componenten noodzakelijk om het proces verder op punt te stellen en om eventueel een duidelijk onderscheid te kunnen maken tussen de kantelende ondersteuning en de dummy ring. Een materiaalonderzoek om het beste materiaal voor de ondersteuning te bepalen kan ook gunstig zijn al is dit vrij complex en vereist het veel proceskennis en ervaring. Verder kunnen er winsten gezocht worden in de kostprijs optimalisatie van de ondersteuning en is het analyseren en optimaliseren van andere procesparameters zeker interessant voor een beter gecontroleerd proces. Ook dit is echter vrij complex en vereist veel proceskennis en ervaring.

Bronnen

- [1] ZF Wind Power, "Proces informatie harderij ZF Wind Power," 2018.
- [2] S. Frank, F. Christoph, and A. Akhlaghi, "Portable Hardness Testing Methods," 2017.
- [3] Gearheads, "Diagram illustrating the phenomenon of backlash in gear systems," 2010. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Backlash_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Backlash_(engineering)).
- [4] A. K. Sinha, "Defects and Distortion in Heat-Treated Parts," *Metallography*, vol. 4, pp. 601–619, 1991.
- [5] B.R. Wilding, *Heat Treatment of Engineering Components*. Iron and Steel Institute, 1970.
- [6] R. . Kern, "Heat Treatment," *Heat Treat.*, vol. 17, no. 3, pp. p41-45, 1985.
- [7] K. W. Chambers, *Heat Treatment of Metals*. Iron and Steel Institute, 1966.
- [8] D. H. Herring and G. D. Lindell, "Reducing Distortion in Heat-Treated Gears," no. June, pp. 26–35, 2004.
- [9] Steel&Tube, "Case Hardening Steel – Aisi 8620," pp. 1–2, 2016.
- [10] F. C. Campbell, *Phase Diagrams - Understanding the basics*. 2012.
- [11] M. Hermans, "Opbouw van metalen," no. 1, pp. 7–10, 2007.
- [12] K. G. Budinski and M. K. Budinski, *Materiaalkunde*, 8e editie. Pearson Education Benelux, 2009.
- [13] G. Gruppo Lucefin Technical Card, "18CrNiMo7-6," 2013.
- [14] Y. Prawoto, *Solid Mechanics for materials Engineers - principles and applications of mesomechanics*. Lulu Enterprises Inc., 2014.
- [15] R. Tliouant, "Werkstoffdatenblatt Hitzebeständiger Stahlguss," vol. 19, no. 1, p. 10295, 2007.
- [16] T. Tobie, F. Hippenstiel, and H. Mohrbacher, "Optimizing Gear Performance by Alloy Modification of Carburizing Steels," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 10, p. 415, 2017.
- [17] N. V. V. Bierens and N. V. V. Defawens, "Thermische behandeling." [Online]. Available: <http://www.tandwiel.info/materialen/thermische-behandelingen/>.
- [18] Sandmeyer, "Stainless Steel Plate Alloy 310 datasheet." [Online]. Available: <https://www.sandmeyersteel.com/310-310S.html>.
- [19] AFE Technologies, "AFE Technologies Cronite HR32."
- [20] AFE Technologies, "AFE Technologies Cronite HR5."

Bijlagen

Bijlage A : Voorstellen opbouwconfiguraties

Alle mogelijke opbouwconfiguraties met component 027-F1245-E021 worden hier voorgesteld. De meeste configuraties zijn niet mogelijk door het hoge gewicht of dimensioneringsproblemen.

Configuraties 1700

40 componenten

Hoogte: Totaal te hoog (2329 mm)

Nota's: Te hoog, te zwaar voor brug (max 10ton), te zwaar voor paal, te zwaar voor afhardhaak en te zwaar voor spin.

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1700	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	500	500	/	
Spin	SAFE NIEUW	1	315	315	/	
Segment	SAFE NIEUW	12	32	384	/	
Bus H50	/	0	4,22	0	/	
Bus H100	/	0	8,05	0	/	
Bus H125	/	0	9,85	0	/	
Component	/	40	252	10080	/	
Onderst.	/	120	4	480	/	
Totale massa				11923,5	9000	ONWAAR

	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componente n	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	5472	5	4	20	6100	WAAR
Spin 1	5472	5	4	20	4250	ONWAAR
Spin 2	0	0	0	0	4250	WAAR
Spin 3	0	0	0	0	4250	WAAR
				40		WAAR

35 componenten

Hoogte: 2128mm

Nota's: Te zwaar.



Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1700	

Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	500	500	/	
Spin	SAFE NIEUW	1	315	315	/	
Segment	SAFE NIEUW	12	32	384	/	
Bus H50	/	0	4,22	0	/	
Bus H100	/	0	8,05	0	/	
Bus H125	/	0	9,85	0	/	
Component	/	35	252	8820	/	
Onderst.	/	105	4	420	/	
Totale massa				10603,5	9000	ONWAAR

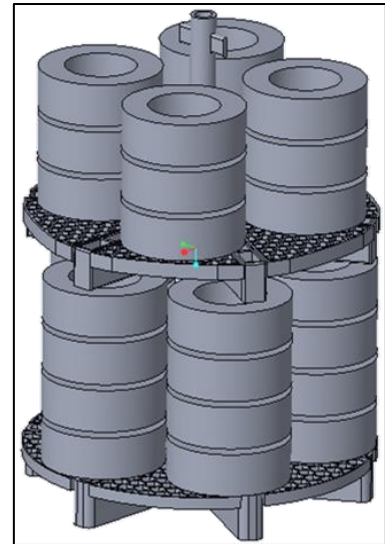
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	5472	5	4	20	6100	WAAR
Spin 1	4152	5	3	15	4250	WAAR
Spin 2	0	0	0	0	4250	WAAR
Spin 3	0	0	0	0	4250	WAAR
				35		WAAR

32 componenten

Hoogte: 2128mm

Nota's: Te zwaar.

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1700	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	500	500	/	
Spin	SAFE NIEUW	1	315	315	/	
Segment	SAFE NIEUW	12	32	384	/	
Bus H50	/	0	4,22	0	/	
Bus H100	/	0	8,05	0	/	
Bus H125	/	0	9,85	0	/	
Component	/	32	252	8064	/	
Onderst.	/	96	4	384	/	
Totale massa				9811,5	9000	ONWAAR

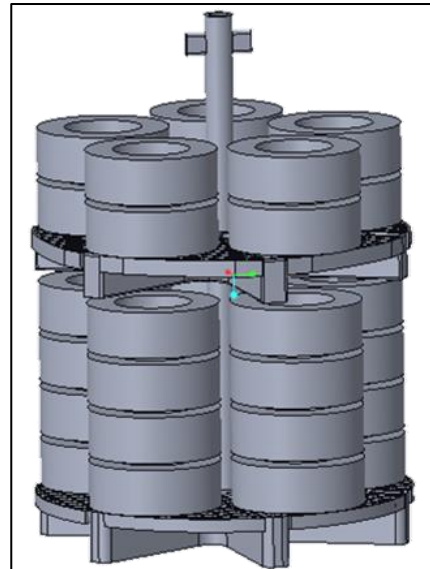
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	5472	5	4	20	6100	WAAR
Spin 1	3360	4	3	12	4250	WAAR
Spin 2	0	0	0	0	4250	WAAR
Spin 3	0	0	0	0	4250	WAAR
				32		WAAR

30 componenten

Hoogte: 1920mm

Nota's: Te zwaar.

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1700	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	500	500	/	
Spin	SAFE NIEUW	1	315	315	/	
Segment	SAFE NIEUW	12	32	384	/	
Bus H50	/	0	4,22	0	/	
Bus H100	/	0	8,05	0	/	
Bus H125	/	0	9,85	0	/	
Component	/	30	252	7560	/	
Ondersteuning	/	90	4	360	/	
Totale massa				9283,5	9000	ONWAAR

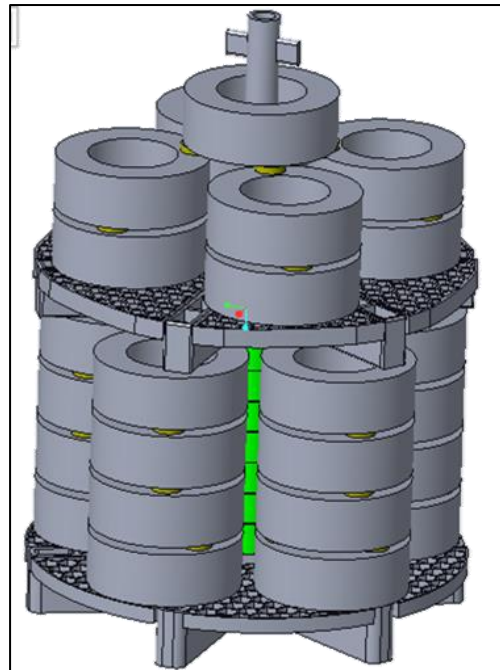
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	5472	5	4	20	6100	WAAR
Spin 1	2832	5	2	10	4250	WAAR
Spin 2	0	0	0	0	4250	WAAR
Spin 3	0	0	0	0	4250	WAAR
				30		WAAR

29 componenten

Hoogte: 2128mm

Nota's: Te zwaar.

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1700	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	500	500	/	
Spin	SAFE NIEUW	1	315	315	/	
Segment	SAFE NIEUW	12	32	384	/	
Bus H50	/	0	4,22	0	/	
Bus H100	/	0	8,05	0	/	
Bus H125	/	0	9,85	0	/	
Component	/	29	252	7308	/	
Ondersteuning	/	87	4	348	/	
Totale massa				9019,5	9000	ONWAAR

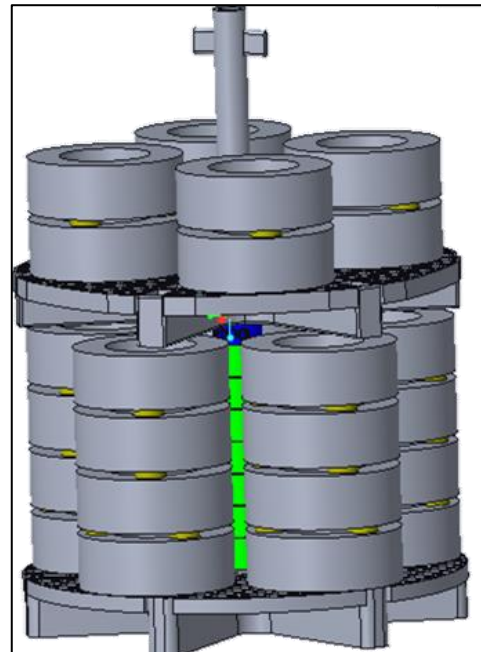
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	5472	5	4	20	6100	WAAR
Spin 1	2568	4	2 + 1 extra	9	4250	WAAR
Spin 2	0	0	0	0	4250	WAAR
Spin 3	0	0	0	0	4250	WAAR
				29		WAAR

28 componenten

Hoogte: 1920mm

Nota's: Stapeling 5 rondom op de voet is moeilijk haalbaar op gebied van positionering.

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1700	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	500	500	/	
Spin	SAFE NIEUW	1	315	315	/	
Segment	SAFE NIEUW	12	32	384	/	
Bus H50	/	0	4,22	0	/	
Bus H100	/	0	8,05	0	/	
Bus H125	/	0	9,85	0	/	
Component	/	28	252	7056	/	
Ondersteuning	/	84	4	336	/	
Totale massa				8755,5	9000	WAAR

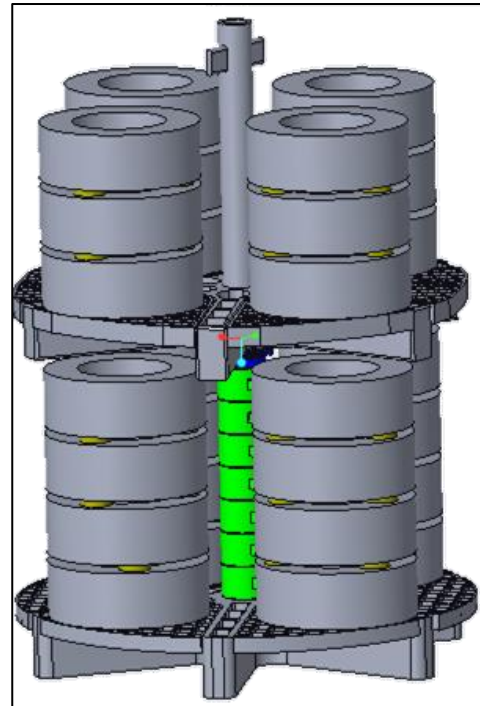
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	5472	5	4	20	6100	WAAR
Spin 1	2304	4	2	8	4250	WAAR
Spin 2	0	0	0	0	4250	WAAR
Spin 3	0	0	0	0	4250	WAAR
				28		WAAR

2^e configuratie 28 componenten

Opbouw:

Hoogte: 2128mm

Nota's: Binnen maximaal gewicht en stabiele stapeling. 4 componenten op elkaar stapelen is moeilijk. De afgeleiden opbouw hiervan met maar 3 componenten op elkaar gestapeld op de voet is de uiteindelijk gekozen stapeling.



Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1700	

Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	500	500	/	
Spin	SAFE NIEUW	1	315	315	/	
Segment	SAFE NIEUW	12	32	384	/	
Bus H50	/	0	4,22	0	/	
Bus H100	/	0	8,05	0	/	
Bus H125	/	0	9,85	0	/	
Component	/	28	252	7056	/	
Onderst.	/	84	4	336	/	
Totale massa				8755,5	9000	WAAR

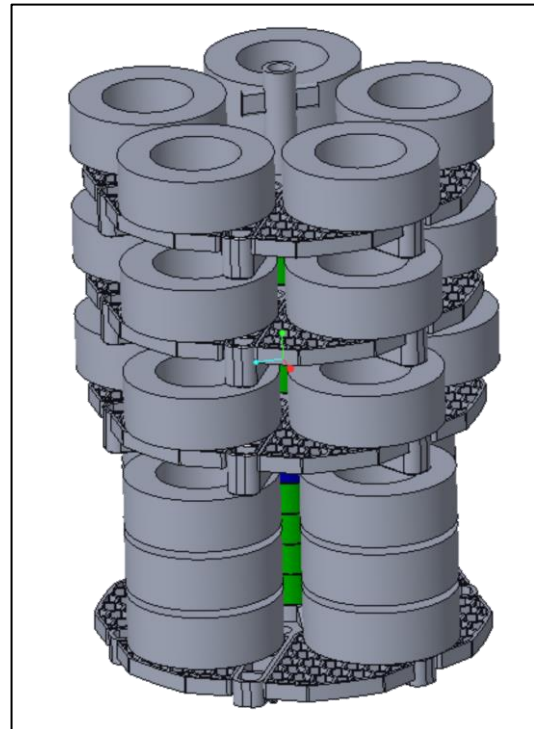
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	4416	4	4	16	6100	WAAR
Spin 1	3360	4	3	12	4250	WAAR
Spin 2	0	0	0	0	4250	WAAR
Spin 3	0	0	0	0	4250	WAAR
				28		WAAR

Configuraties 1450

27 componenten

Nota's: Te zwaar, te hoog

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1450	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	256,5	256,5	/	
Spin	SAFE NIEUW	3	205,5	616,5	/	
Segment	SAFE NIEUW	24	25	600	/	
Bus H50	/	2	4,22	8,44	/	
Bus H100	/	4	8,05	32,2	/	
Bus H125	/	6	9,85	59,1	/	
Component	/	27	252	6804	/	
Ondersteuning	/	81	4	324	/	
Totale massa				8865,24	9000	WAAR

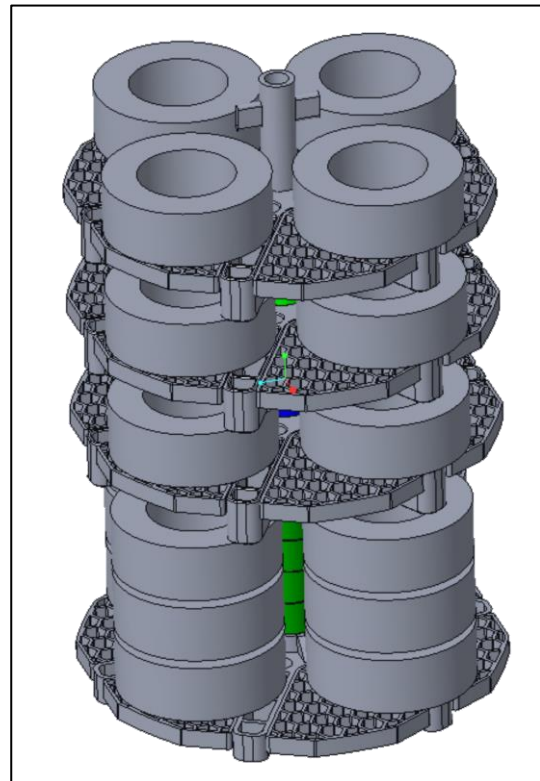
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	3318	4	3	12	2500	ONWAAR
Spin 1	1470	5	1	5	1020	ONWAAR
Spin 2	1470	5	1	5	1020	ONWAAR
Spin 3	1470	5	1	5	1020	ONWAAR
				27		WAAR

24 componenten

Hoogte: 2218 mm

Nota's: 4 rond leggen op de voet en 3 hoog => de straal van de steekcirkel waarop de centerlijnen van de 4 componenten liggen is 7mm kleiner dan de 2/3^{de} armlengte => max belasting op 2/3 armlengte = 2500kg voor de voet terwijl de massa op de voet = $4 \cdot 3 \cdot 264 = 3168$ kg. Dus belasting te groot.

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1450	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	256,5	256,5	/	
Spin	SAFE NIEUW	3	205,5	616,5	/	
Segment	SAFE NIEUW	24	25	600	/	
Bus H50	/	2	4,22	8,44	/	
Bus H100	/	4	8,05	32,2	/	
Bus H125	/	6	9,85	59,1	/	
Component	/	24	252	6048	/	
Ondersteuning	/	72	4	288	/	
Totale massa				8073,24	9000	WAAR

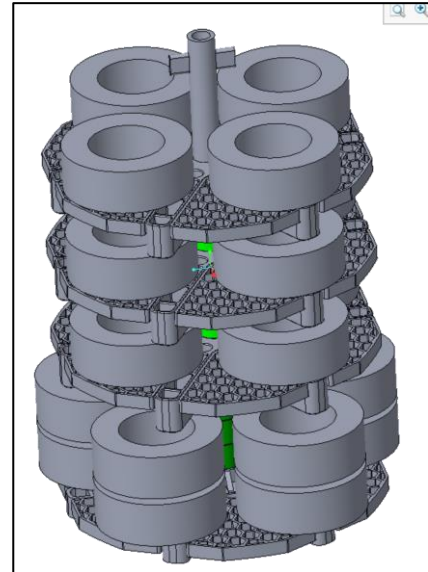
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	3318	4	3	12	2500	ONWAAR
Spin 1	1206	4	1	4	1020	ONWAAR
Spin 2	1206	4	1	4	1020	ONWAAR
Spin 3	1206	4	1	4	1020	ONWAAR
				24		WAAR

22 componenten

Hoogte: 2026 mm

Nota's: Te zwaar

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1450	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	256,5	256,5	/	
Spin	SAFE NIEUW	3	205,5	616,5	/	
Segment	SAFE NIEUW	24	25	600	/	
Bus H50	/	2	4,22	8,44	/	
Bus H100	/	2	8,05	16,1	/	
Bus H125	/	6	9,85	59,1	/	
Component	/	22	252	5544	/	
Ondersteuning	/	66	4	264	/	
Totale massa				7529,14	9000	WAAR

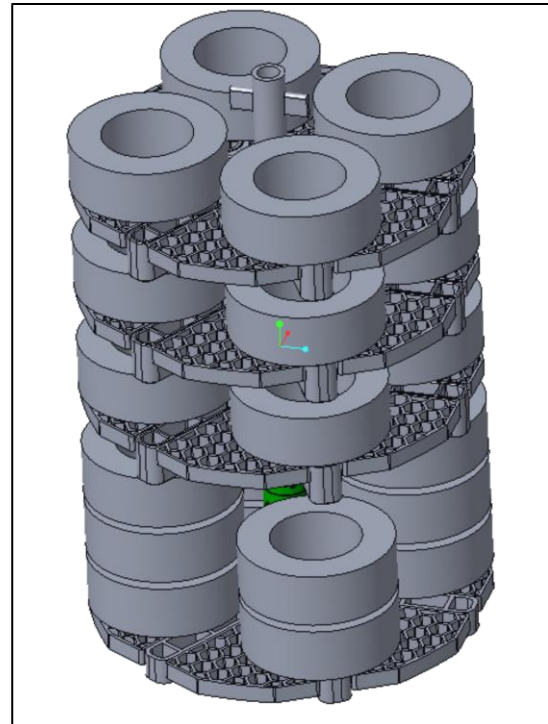
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	2790	5	2	10	2500	ONWAAR
Spin 1	1206	4	1	4	1020	ONWAAR
Spin 2	1206	4	1	4	1020	ONWAAR
Spin 3	1206	4	1	4	1020	ONWAAR
				22		WAAR

2^e configuratie 22 componenten:

Hoogte: 2218 mm

Nota's: Te zwaar

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1450	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	164,5	164,5	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	256,5	256,5	/	
Spin	SAFE NIEUW	3	205,5	616,5	/	
Segment	SAFE NIEUW	24	25	600	/	
Bus H50	/	2	4,22	8,44	/	
Bus H100	/	4	8,05	32,2	/	
Bus H125	/	6	9,85	59,1	/	
Component	/	22	252	5544	/	
Ondersteuning	/	66	4	264	/	
Totale massa				7545,24	9000	WAAR

	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	2790	4	2 + 2 extra	10	2500	ONWAAR
Spin 1	1206	4	1	4	1020	ONWAAR
Spin 2	1206	4	1	4	1020	ONWAAR
Spin 3	1206	4	1	4	1020	ONWAAR
				22		WAAR

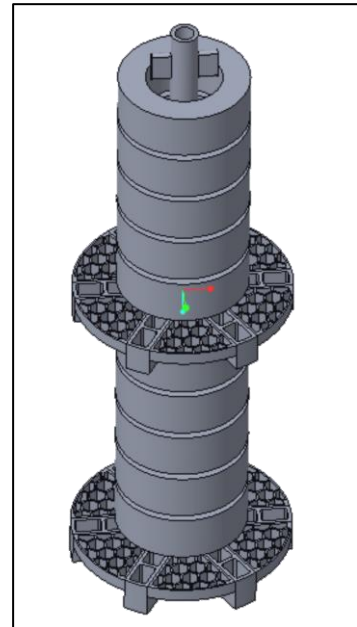
1000 configuraties

10 componenten

Hoogte: 2745 mm

Nota's: Configuraties op 1000mm boom zijn niet van toepassing aangezien deze voor veel andere componenten worden gebruikt en er geen extra ovens beschikbaar zijn.

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1000	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	196,83	196,83	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	191,33	191,33	/	
Spin	SAFE NIEUW	1	162	162	/	
Segment	SAFE NIEUW	12	11	132	/	
Bus H50	/	1	4,22	4,22	/	
Bus H100	/	0	8,05	0	/	
Bus H125	/	9	9,85	88,65	/	
Component	/	10	252	2520	/	
Ondersteuning	/	30	4	120	/	
Totale massa				3415,03	9000	WAAR

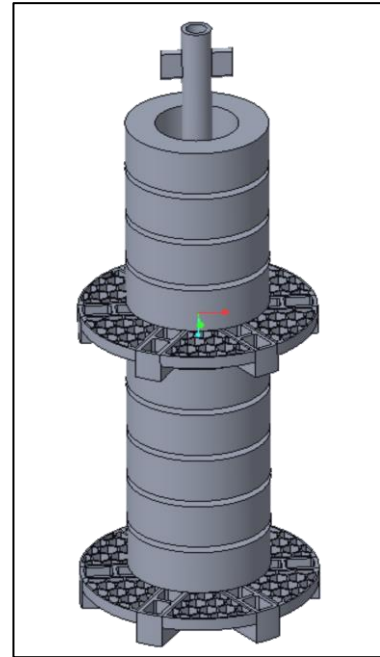
	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	1386	1	5	5	2560	WAAR
Spin 1	1386	1	5	5	2240	WAAR
Spin 2	0	0	0	0		WAAR
Spin 3	0	0	0	0		WAAR
				10		WAAR

9 componenten

Hoogte: 2504 mm

Nota's: Configuraties op 1000mm boom zijn niet van toepassing aangezien dit gestel voor veel andere componenten wordt gebruikt en er geen extra ovens beschikbaar zijn.

Component:	027-F1245-E021	
Massa	252	kg
Batchgrootte:	18	
Gestel	1000	



Onderdeel	Leverancier	Aantal	Massa per component (kg)	Massa (kg)	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Paal	SAFE	1	196,83	196,83	9000	
Voet	SAFE NIEUW	1	191,33	191,33	/	
Spin	SAFE NIEUW	1	162	162	/	
Segment	SAFE NIEUW	12	11	132	/	
Bus H50	/	1	4,22	4,22	/	
Bus H100	/	0	8,05	0	/	
Bus H125	/	9	9,85	88,65	/	
Component	/	9	252	2268	/	
Onderst.	/	27	4	108	/	
Totale massa				3151,03	9000	WAAR

	Belasting (kg)	# rondom	# hoog	#componenten	Max. Toel. Massa (kg)	Controle
Voet	1386	1	5	5	2560	WAAR
Spin 1	1122	1	4	4	2240	WAAR
Spin 2	0	0	0	0		WAAR
Spin 3	0	0	0	0		WAAR
				9		WAAR

Bijlage B: Voorbeeld metingen coon (LM1167)

Deze bijlage geeft een voorbeeld van alle metingen die gebeuren op de conen en de waardes die hieruit berekend worden door het meetprogramma zelf. Deze metingen zijn bij alle componenten uitgevoerd maar enkel de meetwaarden van component LM1167 zijn opgenomen in deze bijlage.

VOLGNR
TOESTAND
BORING
HOOGTEREDUCTIE

LM1167
hard
boven

0

Meetcirkel	Meetpunt	Coördinaten contactpunt				Diameter		
		XC	YC	ZC	ZC-Ref	op ZC	op ZC-Ref	gemiddeld
Cirkel 1	1	187,231	0,015	-24,938	-24,932	374,462	374,465	374,400
	2	162,152	-93,604	-24,940				
	3	93,601	-162,104	-24,930				
	4	0,010	-187,147	-24,922				
	5	-93,586	-162,118	-24,937				
	6	-162,156	-93,617	-24,949				
	7	-187,227	0,015	-24,945				
	8	-162,121	93,608	-24,935				
	9	-93,595	162,143	-24,938				
	10	0,013	187,208	-24,928				
	11	93,575	162,083	-24,913				
	12	162,091	93,577	-24,915				
Cirkel 2	13	158,521	91,518	-38,648	-38,665	366,084	366,074	366,151
	14	91,526	158,524	-38,649				
	15	0,002	183,097	-38,664				
	16	-91,524	158,573	-38,670				
	17	-158,546	91,542	-38,668				
	18	-183,093	0,015	-38,675				
	19	-158,586	-91,551	-38,685				
	20	-91,543	-158,552	-38,672				
	21	0,005	-183,031	-38,659				
	22	91,537	-158,512	-38,658				

	23	158,565	-91,525	-38,665		366,167	366,167		
	24	183,105	0,009	-38,670		366,210	366,213		
Cirkel 3	25	178,981	0,008	-52,399		357,962	357,963	357,911	
	26	154,987	-89,463	-52,396		357,908	357,907		
	27	89,471	-154,950	-52,390		357,852	357,847		
	28	0,010	-178,917	-52,394		357,834	357,832		
	29	-89,491	-155,004	-52,410		357,965	357,973		
	30	-155,015	-89,493	-52,417	-52,397	357,986	357,998		
	31	-178,951	0,014	-52,402		357,902	357,905		
	32	-154,963	89,477	-52,392		357,880	357,877		
	33	-89,477	155,002	-52,403		357,948	357,951		
	34	0,010	178,973	-52,397		357,946	357,946		
	35	89,473	154,964	-52,385		357,878	357,871		
	36	154,967	89,465	-52,384		357,875	357,867		
	Cirkel 4	37	151,415	87,423		-66,124			349,681
38		87,429	151,421	-66,125			349,697	349,692	
39		0,003	174,880	-66,135			349,760	349,761	
40		-87,417	151,445	-66,136			349,727	349,728	
41		-151,402	87,426	-66,129			349,661	349,658	
42		-174,827	0,006	-66,131		-66,134	349,654	349,652	
43		-151,462	-87,442	-66,153	349,781		349,793		
44		-87,437	-151,451	-66,151	349,757		349,767		
45		0,011	-174,834	-66,137	349,668		349,670		
46		87,420	-151,381	-66,122	349,619		349,612		
47		151,427	-87,402	-66,130	349,681		349,678		
48	174,875	0,008	-66,136	349,750	349,751				
Cirkel 5	49	170,786	0,010	-79,879			341,572	341,572	341,552
	50	147,891	-85,365	-79,875			341,519	341,517	
	51	85,375	-147,856	-79,868			341,469	341,462	
	52	0,004	-170,763	-79,881			341,526	341,527	
	53	-85,406	-147,934	-79,900		341,635	341,647		
	54	-147,931	-85,390	-79,894	-79,879	341,614	341,622		
	55	-170,743	0,008	-79,874		341,486	341,482		
	56	-147,864	85,379	-79,870		341,486	341,481		
	57	-85,374	147,917	-79,882		341,573	341,575		
	58	0,019	170,814	-79,881		341,628	341,629		
	59	85,392	147,900	-79,876		341,562	341,560		

	60	147,900	85,384	-79,875		341,554	341,551	
--	----	---------	--------	---------	--	---------	---------	--

BORING

onder

Meetcirkel	Meetpunt	Coördinaten contactpunt				Diameter werkelijk		
		XC	YC	ZC	ZC-Ref	op ZC	op ZC-Ref	gemiddeld
Cirkel 6	13	165,851	44,442	-135,120		343,403	343,403	343,414
	14	171,668	0,009	-135,131		343,336	343,328	
	15	165,790	-44,410	-135,138		343,269	343,257	
	28	-44,442	165,930	-135,102		343,556	343,566	
	29	0,010	171,805	-135,091		343,610	343,627	
	30	44,467	165,951	-135,103		343,610	343,619	
	43	-165,790	-44,411	-135,134	-135,118	343,270	343,260	
	44	-171,575	0,011	-135,155		343,150	343,128	
	45	-165,714	44,416	-135,162		343,125	343,099	
	58	44,452	-165,857	-135,116		343,420	343,422	
	59	0,007	-171,776	-135,096		343,552	343,566	
60	-44,467	-165,982	-135,077		343,669	343,695		
Cirkel 7	10	169,749	-45,468	-148,876		351,465	351,452	351,617
	11	175,768	0,012	-148,868		351,536	351,528	
	12	169,809	45,510	-148,858		351,603	351,601	
	25	45,533	169,910	-148,831		351,810	351,824	
	26	0,010	175,914	-148,829		351,828	351,844	
	27	-45,505	169,892	-148,838		351,760	351,771	
	40	-169,660	45,463	-148,903	-148,855	351,290	351,262	
	41	-175,652	0,009	-148,901		351,304	351,277	
	42	-169,728	-45,472	-148,883		351,426	351,410	
	55	-45,534	-169,965	-148,811		351,916	351,943	
	56	0,013	-175,901	-148,824		351,802	351,821	
57	45,519	-169,836	-148,845		351,659	351,666		
Cirkel 8	7	173,783	46,571	-162,593		359,829	359,826	359,859
	8	179,883	0,008	-162,601		359,766	359,758	
	9	173,720	-46,534	-162,613		359,688	359,673	
	22	-46,572	173,879	-162,567		360,015	360,027	
	23	0,013	180,044	-162,556	-162,587	360,088	360,107	
	24	46,607	173,903	-162,557		360,079	360,098	
	37	-173,688	-46,527	-162,624		359,623	359,601	

	38	-179,756	0,012	-162,636		359,512	359,483	
	39	-173,625	46,525	-162,644		359,500	359,466	
	52	46,591	-173,831	-162,576		359,932	359,939	
	53	0,010	-180,037	-162,552		360,074	360,095	
	54	-46,605	-173,964	-162,533		360,196	360,229	
Cirkel 9	4	177,703	-47,602	-176,346		367,935	367,917	368,120
	5	184,012	0,012	-176,332		368,024	368,014	
	6	177,771	47,642	-176,322		368,088	368,084	
	19	47,677	177,912	-176,282		368,378	368,398	
	20	0,010	184,193	-176,279		368,386	368,408	
	21	-47,643	177,869	-176,296	-176,315	368,277	368,289	
	34	-177,590	47,594	-176,374		367,713	367,678	
	35	-183,858	0,009	-176,373		367,716	367,682	
	36	-177,666	-47,598	-176,351		367,862	367,841	
	49	-47,680	-177,967	-176,262		368,486	368,518	
	50	0,011	-184,189	-176,273		368,378	368,403	
	51	47,660	-177,823	-176,297		368,197	368,208	
Cirkel 10	1	181,759	48,703	-190,054		376,341	376,341	376,349
	2	188,115	0,009	-190,070		376,230	376,221	
	3	181,664	-48,656	-190,101		376,133	376,105	
	16	-48,713	181,843	-190,031		376,508	376,523	
	17	0,011	188,306	-190,013		376,612	376,637	
	18	48,731	181,906	-190,018		376,639	376,662	
	31	-181,626	-48,659	-190,092	-190,054	376,061	376,039	
	32	-187,957	0,012	-190,113		375,914	375,879	
	33	-181,547	48,654	-190,117		375,906	375,869	
	46	48,728	-181,810	-190,034		376,452	376,465	
	47	0,012	-188,312	-190,010		376,624	376,651	
	48	-48,746	-181,969	-190,002		376,769	376,801	

Meetcirkel	Meetpunt	Diameter				Overmaat tov afgewerkt			Hoek tussen ptn met gem overmaat		
		gewenst op ZC-Ref				min	max	gemiddeld	werkelijk	verschil	gemiddeld
		voorgedraaid	verschil	afgewerkt	verschil						
Cirkel 1	1	375,118	-0,656	375,281	-0,816	-0,793	-0,994	-0,882	16,717	-0,033	16,642
	2		-0,659		-0,818						
	3		-0,745		-0,910						
	4		-0,824		-0,994						
	5		-0,736		-0,897						
	6		-0,639		-0,793						
	7		-0,664		-0,820						
	8		-0,709		-0,871						
	9		-0,684		-0,844						
	10		-0,702		-0,868						
	11		-0,808		-0,983						
	12		-0,792		-0,966						
Cirkel 2	13	366,852	-0,768	367,107	-1,034	-0,866	-1,049	-0,956	16,700	-0,050	
	14		-0,755		-1,020						
	15		-0,658		-0,914						
	16		-0,672		-0,925						
	17		-0,701		-0,955						
	18		-0,666		-0,916						
	19		-0,622		-0,866						
	20		-0,689		-0,941						
	21		-0,790		-1,049						
	22		-0,764		-1,024						
	23		-0,685		-0,940						
	24		-0,642		-0,894						
Cirkel 3	25	358,586	-0,624	358,933	-0,970	-0,935	-1,102	-1,022	16,635	-0,115	
	26		-0,678		-1,026						
	27		-0,734		-1,086						
	28		-0,752		-1,102						
	29		-0,621		-0,961						
	30		-0,600		-0,935						
	31		-0,684		-1,029						

	32		-0,706		-1,057					
	33		-0,638		-0,982					
	34		-0,640		-0,988					
	35		-0,708		-1,063					
	36		-0,711		-1,066					
Cirkel 4	37	350,317	-0,636	350,757	-1,082					
	38		-0,620		-1,065					
	39		-0,557		-0,996					
	40		-0,591		-1,029					
	41		-0,656		-1,099					
	42		-0,663		-1,105	-0,964	-1,145	-1,054	16,515	-0,235
	43		-0,536		-0,964					
	44		-0,560		-0,990					
	45		-0,649		-1,087					
	46		-0,698		-1,145					
	47		-0,637		-1,078					
	48		-0,567		-1,006					
	Cirkel 5	49	342,044	-0,472	342,575	-1,003				
50			-0,524		-1,058					
51			-0,575		-1,113					
52			-0,518		-1,048					
53			-0,409		-0,928					
54			-0,430		-0,953	-0,928	-1,113	-1,023		
55			-0,558		-1,093					
56			-0,557		-1,095					
57			-0,470		-1,001					
58			-0,416		-0,946					
59			-0,482		-1,015					
60			-0,490		-1,024					

BORING

onder

Diameter		
gewenst op ZC-Ref	Overmaat tov afgewerkt	Hoek tussen ptn met gem overmaat

Meetcirkel	Meetpunt	voorgedraaid	verschil	afgewerkt	verschil	min	max	gemiddeld	werkelijk	verschil	gemiddeld
Cirkel 6	13	344,487	-1,083	344,991	-1,589	-1,296	-1,892	-1,577			
	14		-1,151		-1,663						
	15		-1,218		-1,734						
	28		-0,931		-1,425						
	29		-0,877		-1,364						
	30		-0,877		-1,372						
	43		-1,217		-1,731						
	44		-1,337		-1,863						
	45		-1,361		-1,892						
	58		-1,067		-1,569						
	59		-0,935		-1,426						
60		-0,817		-1,296							
Cirkel 7	10	352,755	-1,290	353,168	-1,715	-1,224	-1,906	-1,551	16,623	-0,127	16,687
	11		-1,219		-1,639						
	12		-1,153		-1,567						
	25		-0,946		-1,343						
	26		-0,927		-1,324						
	27		-0,995		-1,397						
	40		-1,465		-1,906						
	41		-1,451		-1,891						
	42		-1,329		-1,758						
	55		-0,839		-1,224						
	56		-0,953		-1,347						
57		-1,096		-1,502							
Cirkel 8	7	361,021	-1,192	361,341	-1,516	-1,112	-1,875	-1,483	16,704	-0,046	
	8		-1,255		-1,584						
	9		-1,333		-1,669						
	22		-1,006		-1,314						
	23		-0,933		-1,234						
	24		-0,942		-1,243						
	37		-1,399		-1,741						
	38		-1,509		-1,858						
	39		-1,521		-1,875						

	52		-1,089		-1,403					
	53		-0,947		-1,246					
	54		-0,825		-1,112					
Cirkel 9	4	369,284	-1,349	369,513	-1,596					
	5		-1,260		-1,499					
	6		-1,197		-1,429					
	19		-0,906		-1,114					
	20		-0,898		-1,105					
	21		-1,007		-1,223	-0,995	-1,835	-1,393	16,747	-0,003
	34		-1,571		-1,835					
	35		-1,568		-1,831					
	36		-1,422		-1,672					
	49		-0,799		-0,995					
	50		-0,906		-1,109					
	51		-1,087		-1,304					
Cirkel 10	1	377,554	-1,213	377,691	-1,350					
	2		-1,324		-1,470					
	3		-1,421		-1,586					
	16		-1,046		-1,168					
	17		-0,942		-1,054					
	18		-0,915		-1,029	-0,890	-1,822	-1,341	16,672	-0,078
	31		-1,493		-1,652					
	32		-1,640		-1,812					
	33		-1,648		-1,822					
	46		-1,102		-1,226					
	47		-0,930		-1,040					
	48		-0,785		-0,890					

Bijlage C: Voorbeeld metingen kopcirkel (LM1167)

Dit is een voorbeeld van de kopcirkelmetingen van component LM1167. Enkel de nuttige meetwaarden worden hier weergegeven om de hoeveelheid te beperken. Deze metingen zijn voor alle componenten uitgevoerd.

item nr	piece	R&D drawing min	R&D drawing max	min tip dia top	max tip dia top	min tip dia middle	max tip dia middle	min tip dia under	max tip dia under	avg tip dia top report	avg tip dia middle report	avg tip dia under report
027-F1245E021	LM1167	598,496	599,596	598,475	598,791	598,835	599,265	598,388	599,314	598,607	599,027	598,838
027-F1245E021	LM1168	598,496	599,596	598,436	598,799	598,830	599,253	598,449	599,363	598,604	599,019	598,859
027-F1245E021	LM1169	598,496	599,596	598,512	598,727	598,876	599,279	598,390	599,397	598,617	599,067	598,897
027-F1245E021	LM1170	598,496	599,596	598,412	598,787	598,845	599,255	598,327	599,474	598,615	599,072	598,920
027-F1245E021	LM1171	598,496	599,596	598,496	598,736	598,938	599,068	598,661	598,780	598,634	598,988	598,717
027-F1245E021	LM1172	598,496	599,596	598,509	598,691	598,911	599,002	598,613	598,808	598,626	598,978	598,717
027-F1245E021	LM1173	598,496	599,596	598,404	598,683	598,870	599,065	598,684	598,858	598,535	598,964	598,766
027-F1245E021	LM1174	598,496	599,596	598,419	598,792	598,921	599,097	598,663	598,847	598,597	599,003	598,765
027-F1245E021	LM1175	598,496	599,596	598,569	598,793	598,919	599,063	598,569	598,726	598,670	598,983	598,648
027-F1245E021	LM1176	598,496	599,596	598,514	598,771	598,842	599,025	598,613	598,707	598,644	598,929	598,648
027-F1245E021	LM1177	598,496	599,596	598,549	598,848	598,872	599,085	598,596	598,799	598,681	598,977	598,697
027-F1245E021	LM1178	598,496	599,596	598,511	598,817	598,901	599,145	598,578	598,865	598,676	599,021	598,720
027-F1245E021	LM1179	598,496	599,596	598,535	598,731	598,873	599,216	598,532	599,219	598,654	599,037	598,846
027-F1245E021	LM1180	598,496	599,596	598,531	598,770	598,811	599,151	598,484	599,277	598,647	598,996	598,837
027-F1245E021	LM1181	598,496	599,596	598,492	598,895	598,869	599,178	598,262	599,305	598,677	599,017	598,771
027-F1245E021	LM1182	598,496	599,596	598,492	598,698	598,933	599,101	598,617	599,210	598,624	599,011	598,824
027-F1245E021	LM1183	598,496	599,596	598,544	598,744	598,873	599,023	598,570	598,796	598,648	598,943	598,698
027-F1245E021	LM1184	598,496	599,596	598,624	598,870	598,522	598,774	598,926	599,025	598,739	598,676	598,977
027-F1245E021	LM1185	598,496	599,596	598,631	598,915	598,845	599,049	598,731	598,865	598,769	598,936	598,793
027-F1245E021	LM1186	598,496	599,596	598,641	598,956	598,892	599,021	598,793	598,879	598,802	598,962	598,837
027-F1245E021	LM1187	598,496	599,596	598,754	598,954	598,919	598,985	598,646	598,764	598,859	598,941	598,697
027-F1245E021	LM1189	598,496	599,596	598,602	598,830	598,969	599,031	598,602	598,771	598,719	598,977	598,678
027-F1245E021	LM1190	598,496	599,596	598,637	598,882	598,945	599,005	598,574	598,780	598,761	598,980	598,673
027-F1245E021	LM1194	598,496	599,596	598,654	598,830	598,955	599,051	598,658	598,746	598,747	599,009	598,691

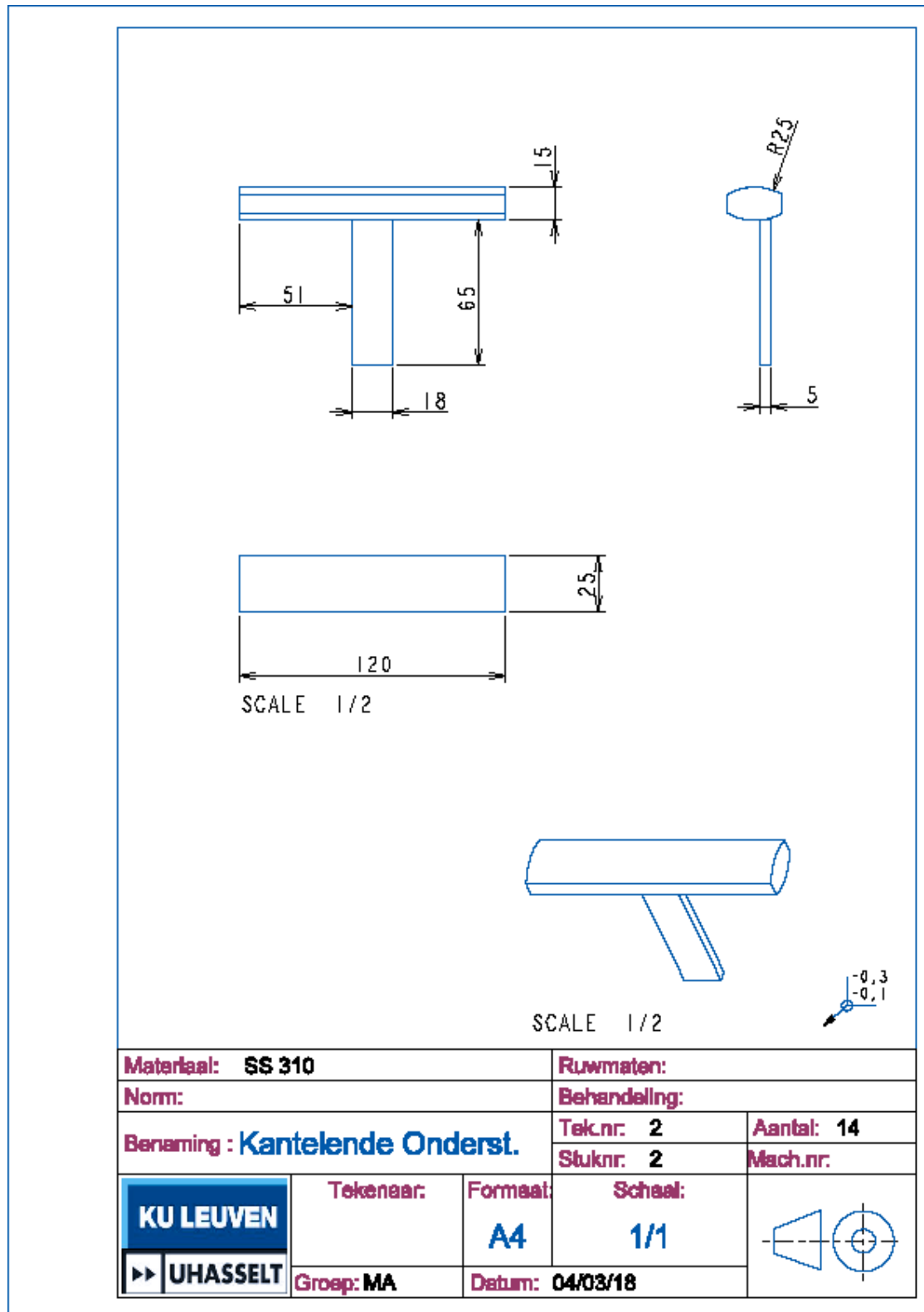
piece	dia soft	average distortion top	average distortion middle	average distortion under	Conicity (of average diameter top and under)	roundness top	roundness middle	roundness under	smallest distortion	biggest distortion	average distortion	range R&D	range
LM1167	599,3	-0,66747	-0,24997	-0,44901	-0,21846	0,157999	0,214548	0,462858	-0,91186	0,013852	-0,45548	1,1	0,925716
LM1168	599,3	-0,68247	-0,25822	-0,39364	-0,28882	0,18105	0,21129	0,457069	-0,86352	0,063428	-0,44477	1,1	0,926943
LM1169	599,3	-0,68026	-0,22267	-0,40669	-0,27357	0,107647	0,20134	0,503412	-0,9101	0,096724	-0,43654	1,1	1,006823
LM1170	599,3	-0,70072	-0,24966	-0,39972	-0,301	0,187632	0,205006	0,573692	-0,97341	0,173974	-0,45003	1,1	1,147385
LM1171	599,3	-0,68372	-0,29683	-0,57949	-0,10423	0,120081	0,065058	0,059865	-0,8038	-0,23177	-0,52001	1,1	0,572026
LM1172	599,3	-0,70035	-0,34377	-0,58926	-0,11109	0,091001	0,045476	0,09743	-0,79135	-0,29829	-0,54446	1,1	0,493055
LM1173	599,3	-0,75607	-0,33276	-0,52905	-0,22702	0,13946	0,097387	0,086757	-0,89553	-0,23537	-0,53929	1,1	0,660163
LM1174	599,3	-0,6946	-0,29098	-0,54469	-0,14991	0,186105	0,087789	0,092163	-0,88071	-0,20319	-0,51009	1,1	0,677515
LM1175	599,3	-0,61895	-0,30889	-0,65249	0,033538	0,111857	0,072216	0,078641	-0,73113	-0,23668	-0,52678	1,1	0,494453
LM1176	599,3	-0,65745	-0,36676	-0,63984	-0,01761	0,128151	0,091705	0,046798	-0,7856	-0,27505	-0,55468	1,1	0,510552
LM1177	599,3	-0,60168	-0,32184	-0,60241	0,000731	0,149498	0,106556	0,101649	-0,75117	-0,21528	-0,50864	1,1	0,53589
LM1178	599,3	-0,63635	-0,27728	-0,57868	-0,05767	0,152978	0,121958	0,143576	-0,78933	-0,15532	-0,49744	1,1	0,634005
LM1179	599,3	-0,66697	-0,25572	-0,42429	-0,24268	0,098078	0,171562	0,343784	-0,76807	-0,08051	-0,44899	1,1	0,687569
LM1180	599,3	-0,6499	-0,31911	-0,41943	-0,23047	0,119497	0,169629	0,396363	-0,81579	-0,02306	-0,46281	1,1	0,792725
LM1181	599,3	-0,6062	-0,27667	-0,51663	-0,08957	0,201547	0,154831	0,521554	-1,03818	0,004924	-0,4665	1,1	1,043109
LM1182	599,3	-0,70475	-0,28304	-0,38669	-0,31806	0,10278	0,084018	0,296297	-0,80753	-0,09039	-0,45816	1,1	0,71714
LM1183	599,3	-0,65598	-0,35215	-0,6168	-0,03918	0,100427	0,075223	0,112793	-0,75641	-0,27693	-0,54164	1,1	0,479479
LM1184	599,3	-0,55278	-0,65233	-0,32425	-0,22853	0,122742	0,12591	0,049491	-0,77824	-0,27476	-0,50979	1,1	0,503489
LM1185	599,3	-0,52738	-0,35277	-0,50211	-0,02527	0,142085	0,101883	0,06721	-0,66947	-0,25089	-0,46075	1,1	0,418579
LM1186	599,3	-0,50157	-0,3439	-0,46439	-0,03718	0,157448	0,064549	0,043061	-0,65902	-0,27935	-0,43662	1,1	0,379667
LM1187	599,3	-0,44569	-0,34817	-0,59472	0,14903	0,100164	0,03322	0,059138	-0,65386	-0,31495	-0,46286	1,1	0,33891
LM1189	599,3	-0,58403	-0,29998	-0,61346	0,029434	0,11376	0,031013	0,084887	-0,69835	-0,26896	-0,49915	1,1	0,429383
LM1190	599,3	-0,54041	-0,32476	-0,62325	0,082839	0,122588	0,029933	0,102758	-0,72601	-0,29483	-0,49614	1,1	0,431177
LM1194	599,3	-0,55773	-0,29696	-0,59807	0,040335	0,087923	0,048357	0,04382	-0,64566	-0,2486	-0,48425	1,1	0,397053

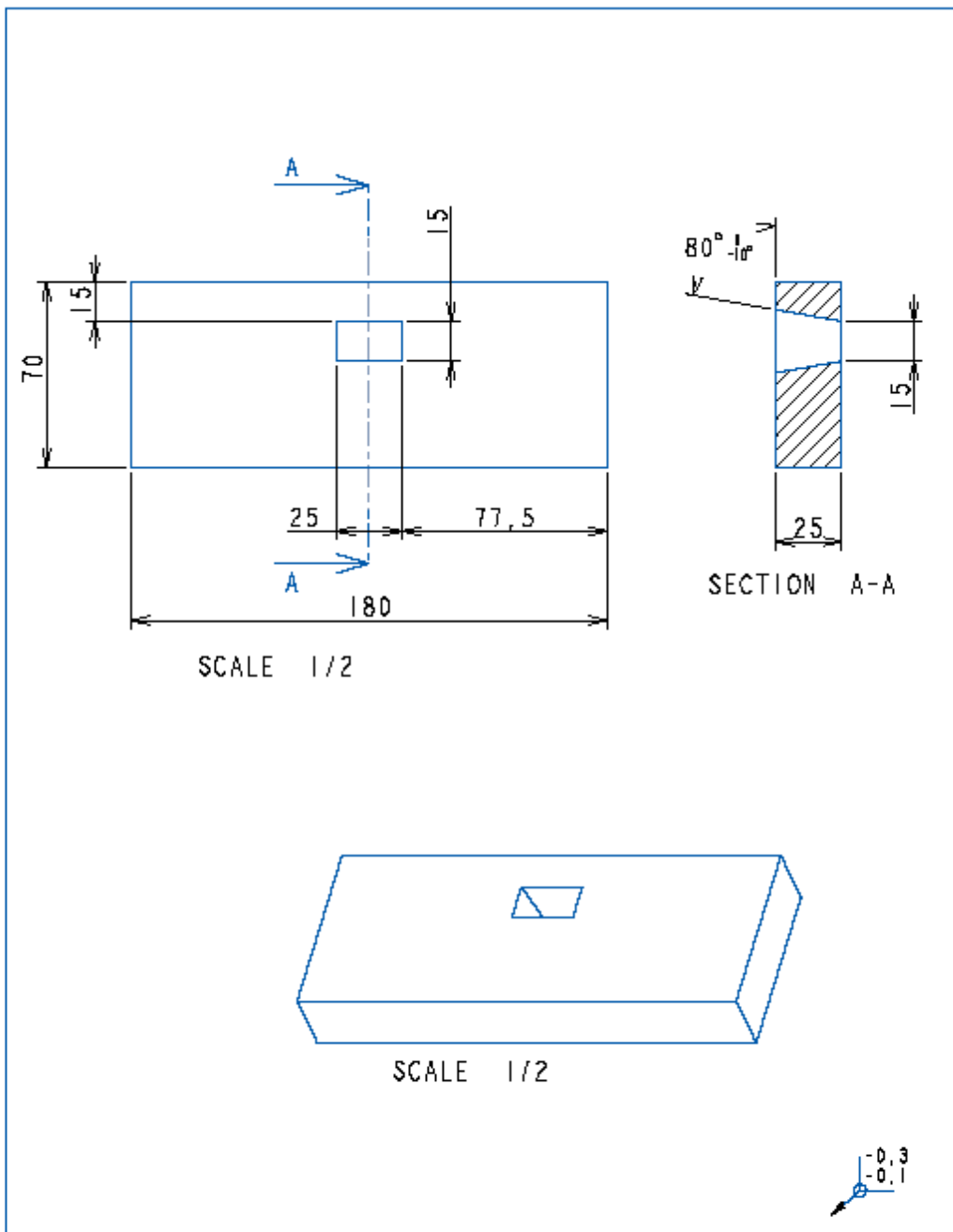
Bijlage D: 2D tekeningen ondersteuning

De 2D-tekeningen van de ontworpen ondersteuning voor de tweede testbatch.

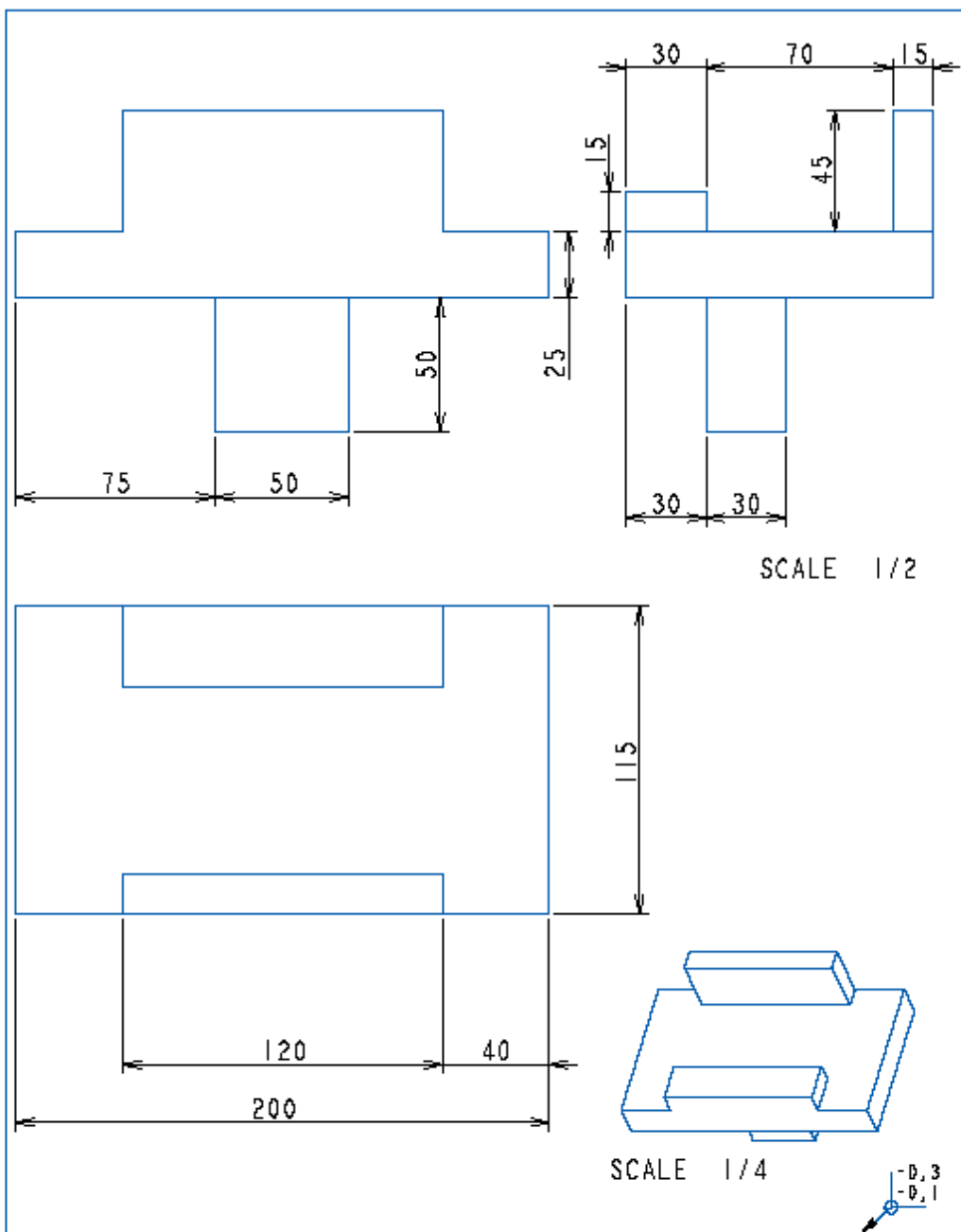
Kantelende ondersteuning

Kantelend blokje





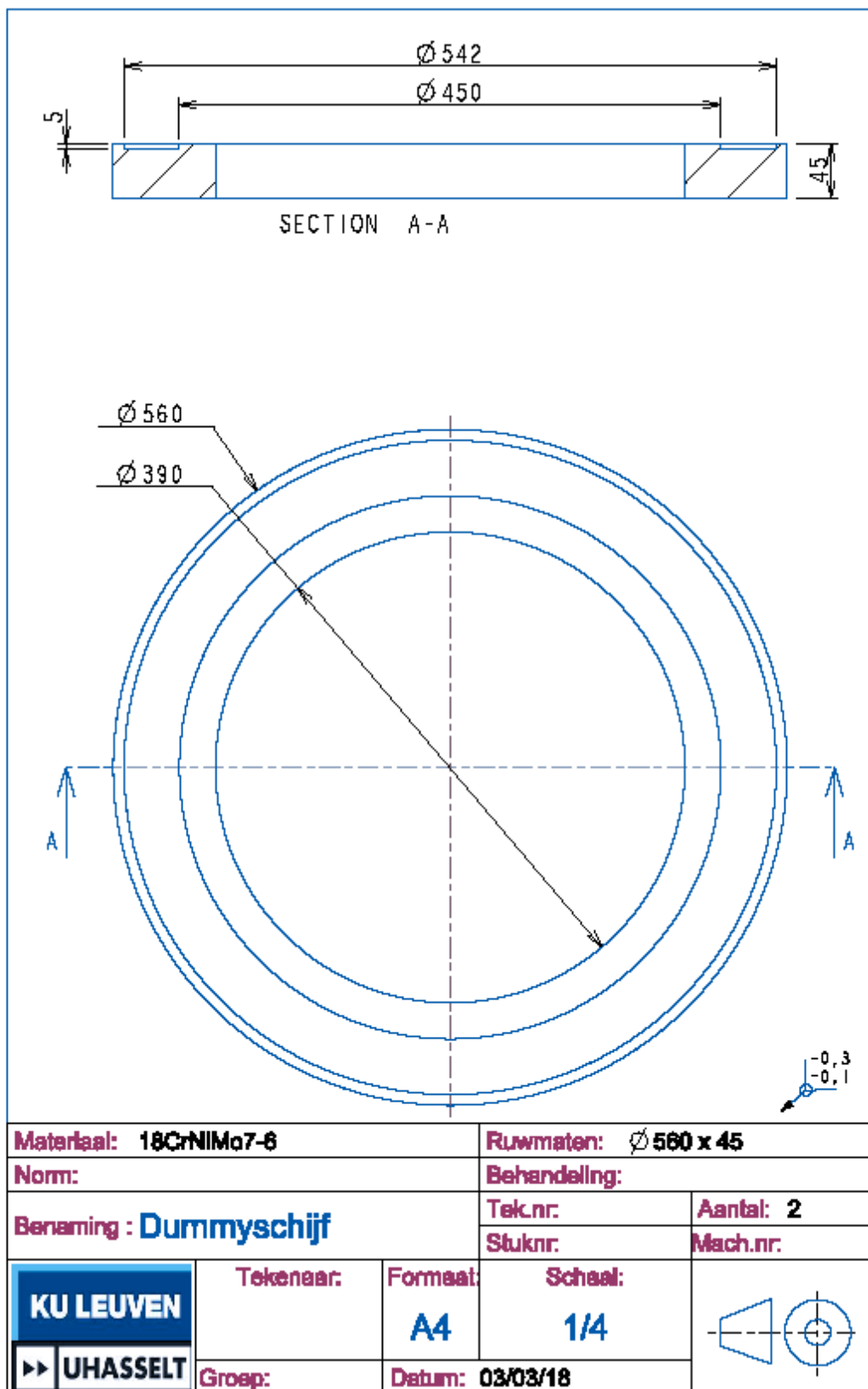
Materiaal: SS 310		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : PLAAT_KANTELENDE ONDERSTEUNING		Tek.nr: 2	Aantal: 14
		Stuknr: 3	Mach.nr: 1
 	Tekenaar:	Formaat: A4	Schaal: 1/1
	Groep: MA	Datum: 04/03/18	



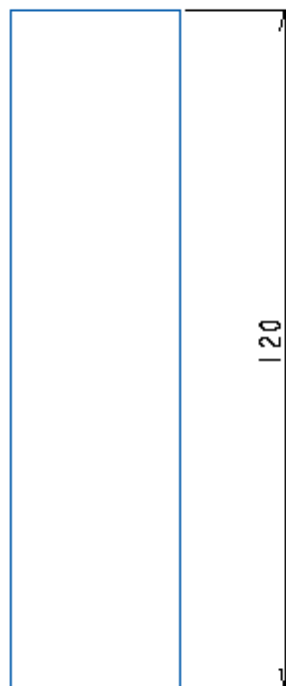
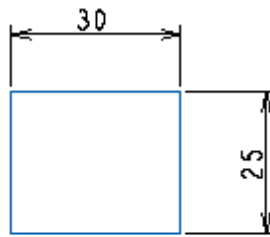
SCALE 1/2

SCALE 1/4

Materiaal: SS 310		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : Vaste ondersteuning		Tek.nr: 1	Aantal: 6
		Stuknr: 1	Mach.nr:
	Tekenaar:	Formaat:	Schaal:
	Groep: MA	A4	1/1
	Datum: 04/03/18		



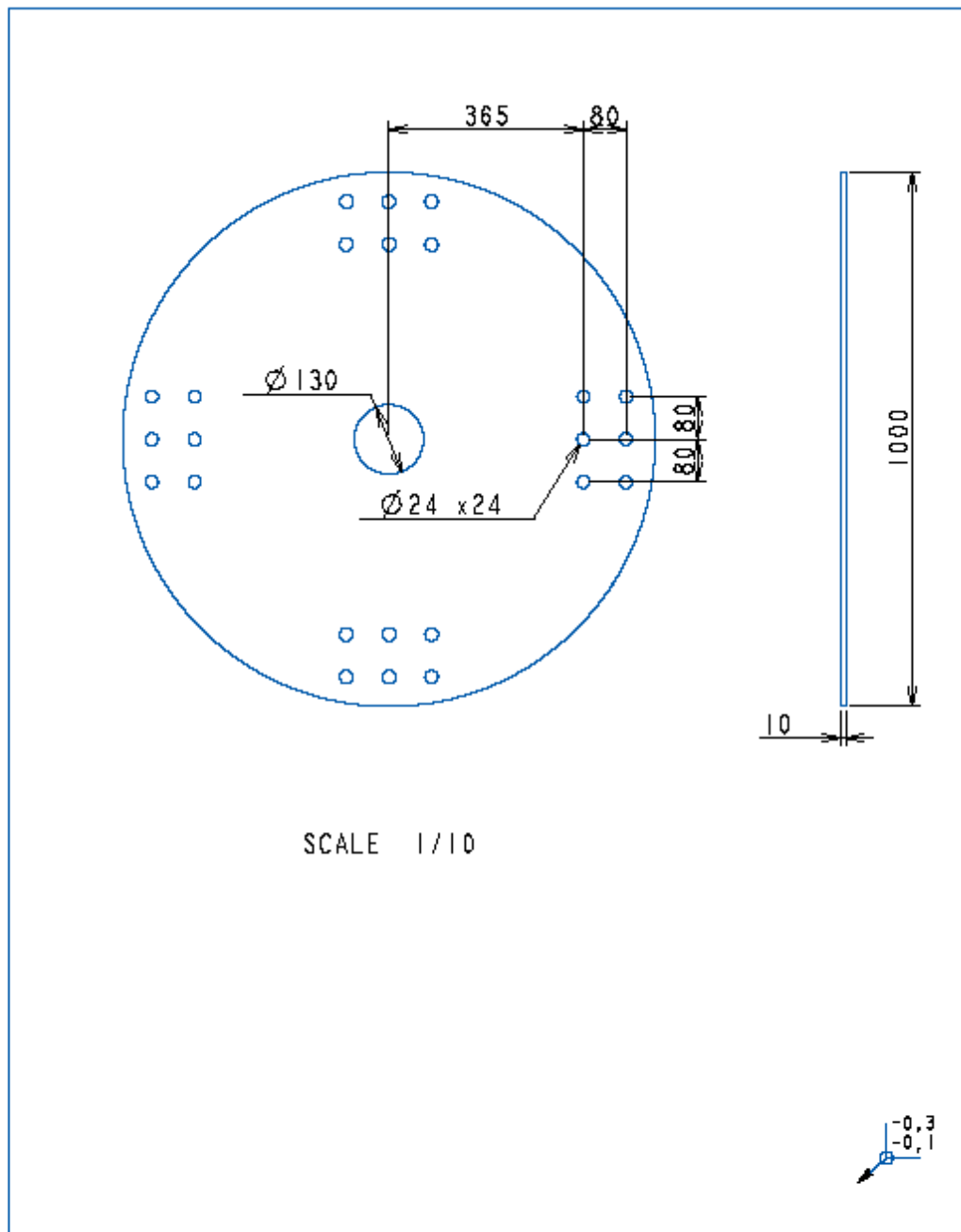
Blokje tussenondersteuning



Materiaal: SS 310		Ruwmaten: 25 x 30 x 120	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : Onderst. blokje		Tek.nr.:	Aantal: 54
		Stuknr.:	Mach.nr.:
	Tekenaar:	Formaat: A4	Schaal: 1/1
	Groep:	Datum: 03/03/18	

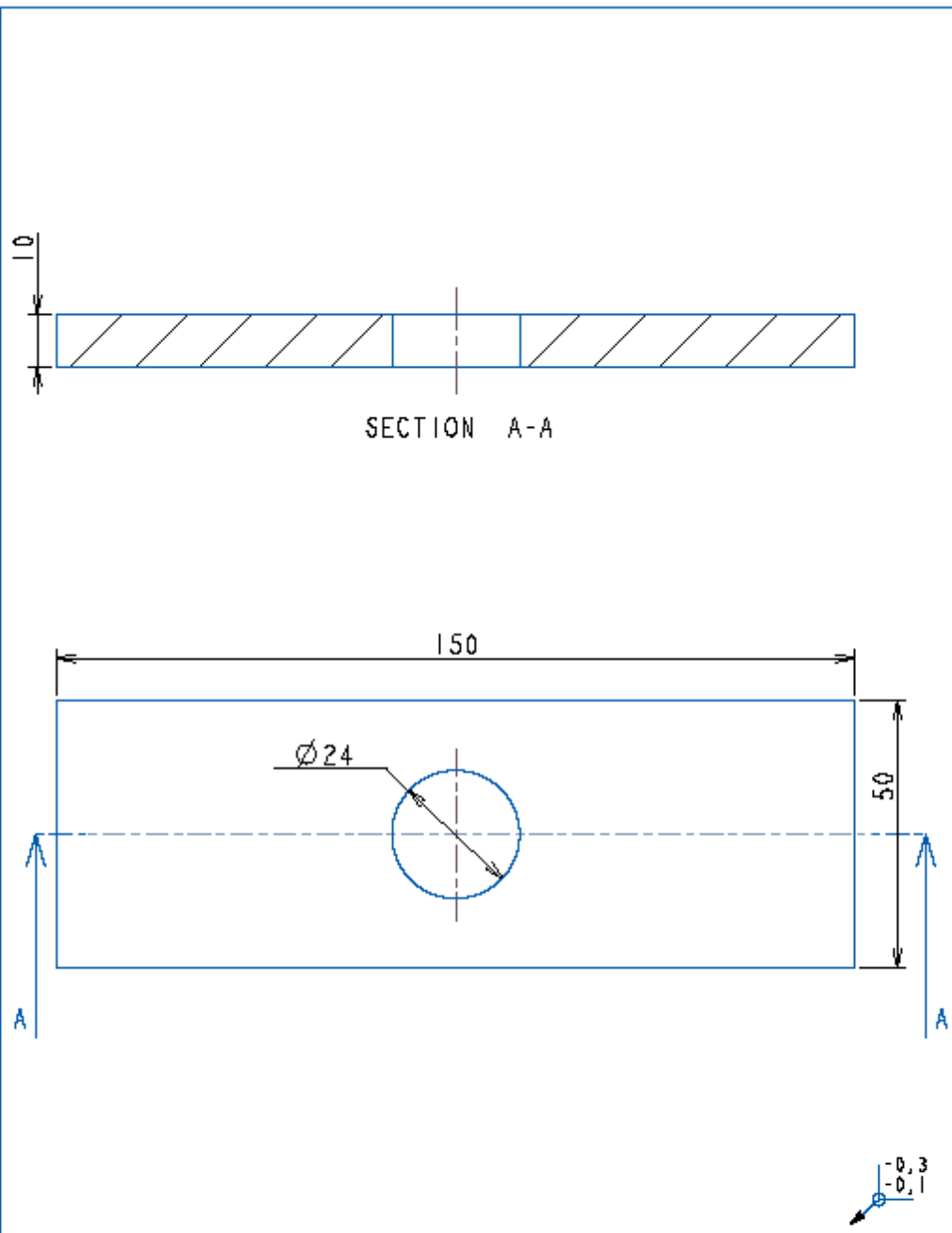
Bijlage E: 2D tekeningen tooling en borging draadstang

Borging draadstang plaat

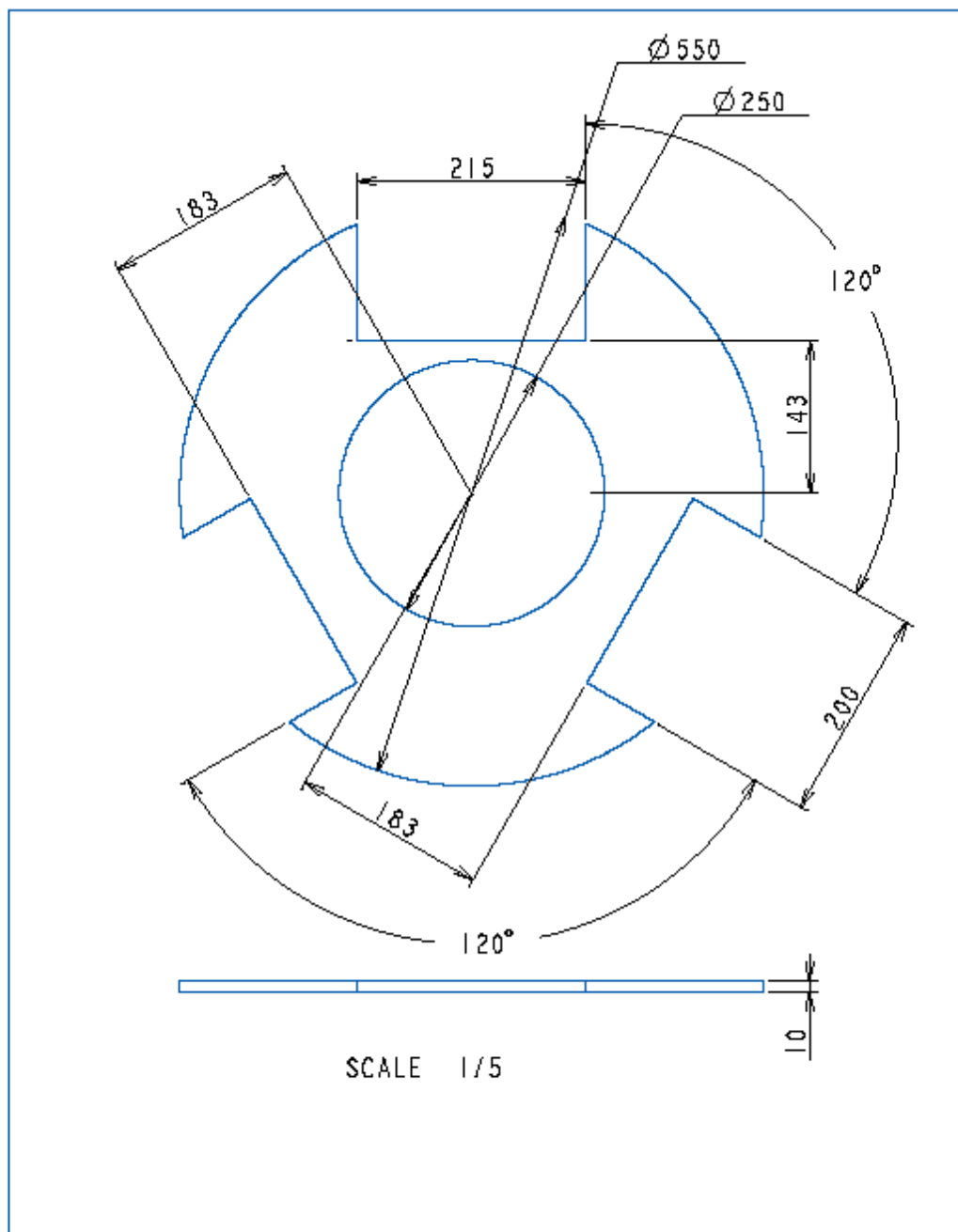


SCALE 1/10

Materiaal:		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : PLAAT_BORINGDRAADSTANG		Tek.nr:	Aantal:
		Stuknr:	Mach.nr:
 	Tekenaar:	Formaat:	Schaal:
		A4	1/1
Groep:	Datum: 27/05/18		

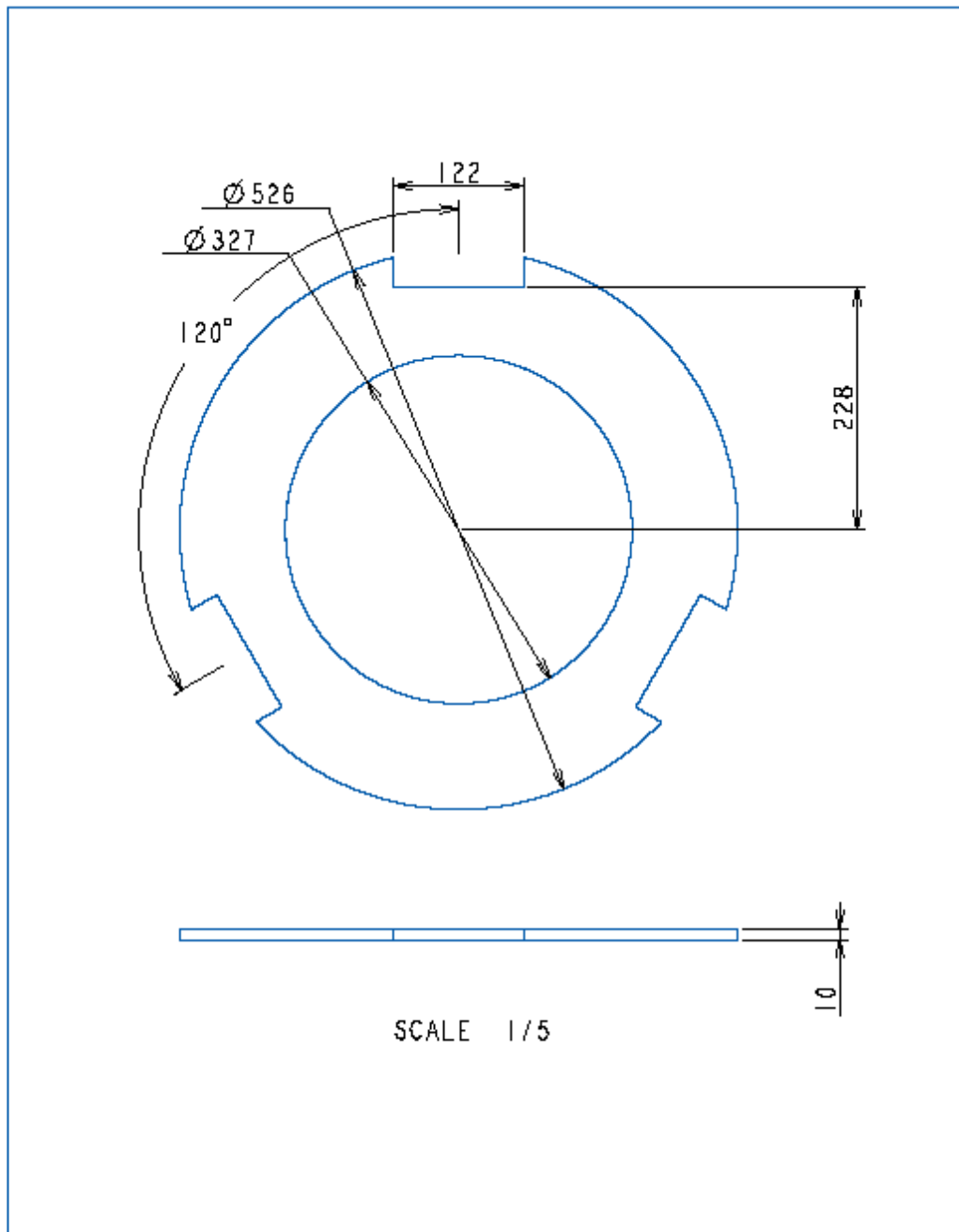


Materiaal: Ck45		Ruwmaten: 150 x 50 x 10	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : VLAKPLAATJE		Tek.nr.:	Aantal: 20
		Stuknr.:	Mach.nr.:
	Tekenaar:	Formaat: A4	Schaal: 1/1
	Groep:	Datum: 08/03/18	



Materiaal:		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : POSITIONERING_ONDERSTEUNINGEN		Tek.nr:	Aantal:
		Stuknr.	Mach.nr.
	Tekenaar:	Formaat:	Schaal:
		A4	1/1
	Groep:	Datum: 27/05/18	

Positionering blokjes tussen componenten

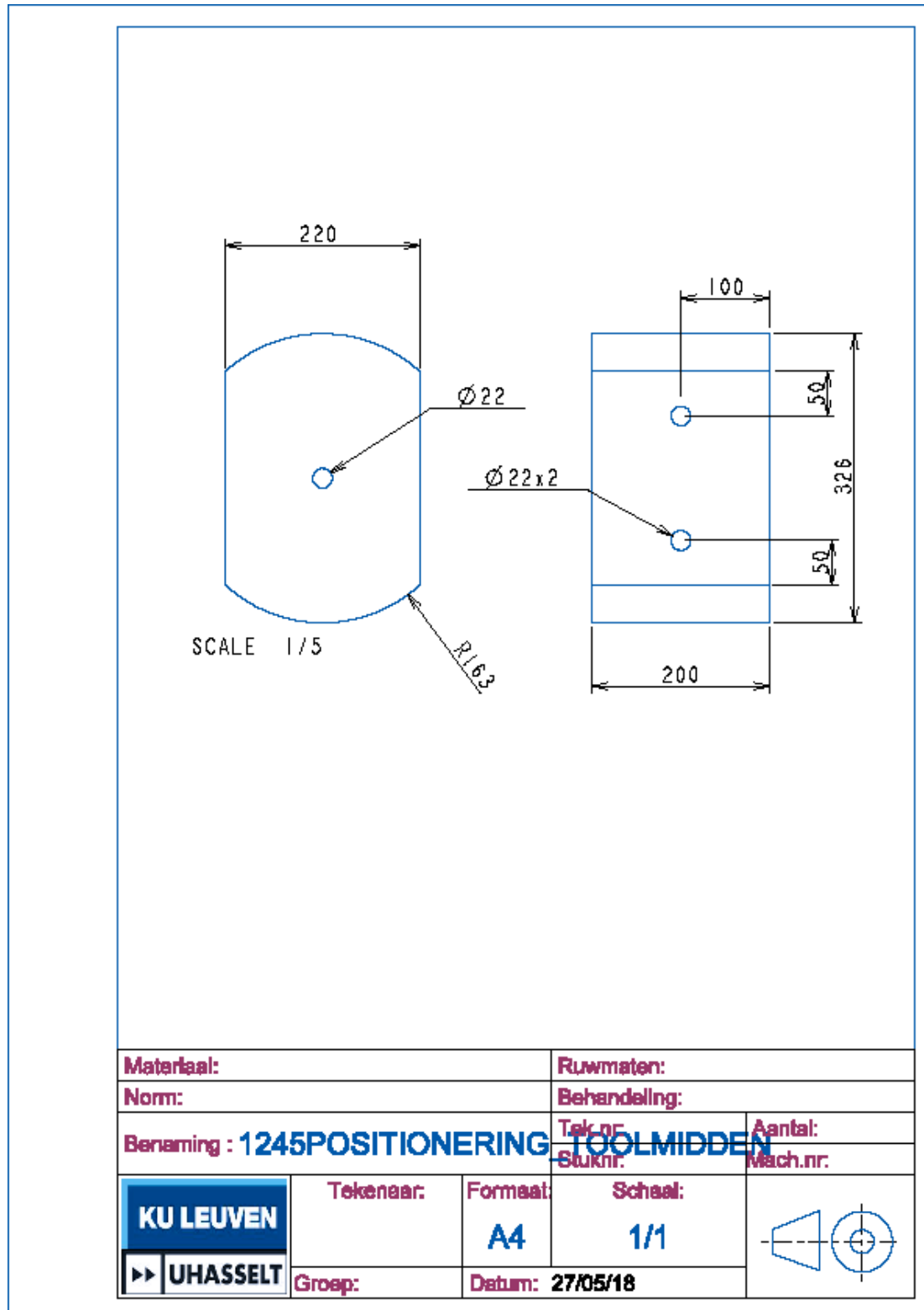


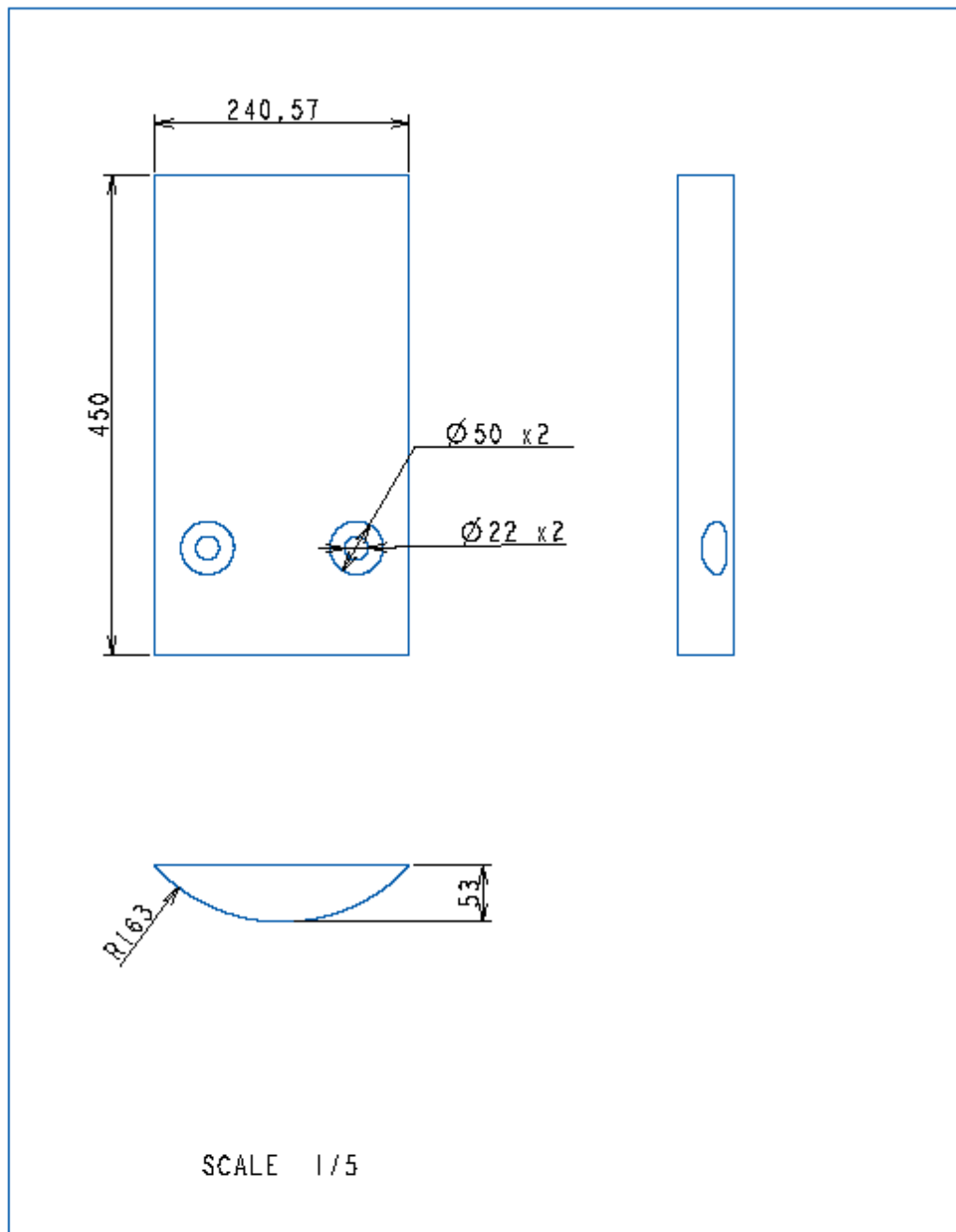
Materiaal:		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : 1245POSITIONERING BLOKJES		Tek.nr:	Aantal:
		Stuknr:	Mach.nr:
KU LEUVEN	Tekenaar:	Formaat:	Schaal:
		A4	1/1
UHASSELT	Groep:	Datum: 27/05/18	

Positionering component tool

De positionering tool bestaat een middenblok en twee zijkanten. Door de middenblok loop een stang met vanboven een haak op. De zijkanten zijn op de middenblok verbonden door middel van 2 doorlopen stangen / bouten met aan de andere zijde een moer.

Middenblok






SCALE 1/5

Materiaal:		Ruwmaten:	
Norm:		Behandeling:	
Benaming : 1245POSITIONERING TOOL_FLANK		Tek.nr.	Aantal: 2
		Stuknr.	Mach.nr.
 	Tekenaar:	Formaat:	Schaal:
		A4	1/1
Groep:	Datum: 27/05/18		

Bijlage F: Materiaalgegevens

Cronite HR32 [19]


De gestellen zijn van dit materiaal gemaakt. De datasheet is van het materiaal bij AFE Technologies (leverancier van de gestellen).

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	480 MPa	69600 psi	As Cast
Tensile Strength, Yield	250 MPa	36300 psi	As Cast
Elongation at Break	8.0 %	8.0 %	As Cast; 5.65 A ⁰⁵
Rupture Strength 	3.40 MPa @Temperature 1150 °C, Time 3.60e+7 sec	493 psi @Temperature 2100 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	5.30 MPa @Temperature 1100 °C, Time 3.60e+7 sec	769 psi @Temperature 2010 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	8.00 MPa @Temperature 1050 °C, Time 3.60e+7 sec	1160 psi @Temperature 1920 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	12.0 MPa @Temperature 1000 °C, Time 3.60e+7 sec	1740 psi @Temperature 1830 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	18.0 MPa @Temperature 950 °C, Time 3.60e+7 sec	2610 psi @Temperature 1740 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	25.0 MPa @Temperature 900 °C, Time 3.60e+7 sec	3630 psi @Temperature 1650 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	34.0 MPa @Temperature 850 °C, Time 3.60e+7 sec	4930 psi @Temperature 1560 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	45.0 MPa @Temperature 800 °C, Time 3.60e+7 sec	6530 psi @Temperature 1470 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	59.0 MPa @Temperature 750 °C, Time 3.60e+7 sec	8560 psi @Temperature 1380 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	78.0 MPa @Temperature 700 °C, Time 3.60e+7 sec	11300 psi @Temperature 1290 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.40 %	0.40 %	
Chromium, Cr	18 %	18 %	
Iron, Fe	40.6 %	40.6 %	As Remainder
Manganese, Mn	1.0 %	1.0 %	
Nickel, Ni	37 %	37 %	
Niobium, Nb (Columbium, Cb)	1.5 %	1.5 %	
Silicon, Si	1.5 %	1.5 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

Cronite HR5 [20]

De bussen en de paal zijn van dit materiaal gemaakt. De datasheet is van AFE Technologies(leverancier)

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	460 MPa	66700 psi	As Cast
Tensile Strength, Yield	240 MPa	34800 psi	As Cast
Elongation at Break	6.0 %	6.0 %	As Cast; 5.65 A ²⁵
Rupture Strength 	3.20 MPa @Temperature 1150 °C, Time 3.60e+7 sec	464 psi @Temperature 2100 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	4.70 MPa @Temperature 1100 °C, Time 3.60e+7 sec	682 psi @Temperature 2010 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	7.00 MPa @Temperature 1050 °C, Time 3.60e+7 sec	1020 psi @Temperature 1920 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	10.5 MPa @Temperature 1000 °C, Time 3.60e+7 sec	1520 psi @Temperature 1830 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	16.0 MPa @Temperature 950 °C, Time 3.60e+7 sec	2320 psi @Temperature 1740 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	23.0 MPa @Temperature 900 °C, Time 3.60e+7 sec	3340 psi @Temperature 1650 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	32.0 MPa @Temperature 850 °C, Time 3.60e+7 sec	4640 psi @Temperature 1560 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	42.0 MPa @Temperature 800 °C, Time 3.60e+7 sec	6090 psi @Temperature 1470 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	56.0 MPa @Temperature 750 °C, Time 3.60e+7 sec	8120 psi @Temperature 1380 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
	75.0 MPa @Temperature 700 °C, Time 3.60e+7 sec	10900 psi @Temperature 1290 °F, Time 10000 hour	Stress Rupture
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.40 %	0.40 %	
Chromium, Cr	18 %	18 %	
Iron, Fe	41.8 %	41.8 %	As Remainder
Manganese, Mn	1.0 %	1.0 %	
Nickel, Ni	37 %	37 %	
Silicon, Si	1.8 %	1.8 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Het optimaliseren van batchgroottes en het opvolgen en verbeteren van vervormingen van componenten in een harderij

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

Jaar: **2018**

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,

Gubbelmans, Wim

Oversteys, Sebastiaan

Datum: **4/06/2018**