KU LEUVEN

FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN

TECHNOLOGIECAMPUS GEEL

Gedragskarakteristieken van breekplaten bij laserablatie

Verbeteren en verhogen van de efficiëntie bij de huidige breekplaat voor zoutwatertoepassingen

Siebe VAN THIENEN

Promotor: Julien Van Esch

Co-promotor: Koen Van Rompaey

Masterproef ingediend tot het behalen van de graad van Master of Science in de industriële wetenschappen: Elektromechanica

Academiejaar 2015-2016

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor(en) als de auteur(s) is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, kan u zich richten tot KU Leuven technologiecampus Geel, Kleinhoefstraat 4, B-2440 Geel, +32 14 80 22 40 of via e-mail iiw.geel@kuleuven.be.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor(en) is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

VOORWOORD

Deze masterproef is mede tot stand gekomen dankzij de steun van veel mensen, waarvoor ik hen nadrukkelijk wil bedanken. Hierbij denk ik in de eerste plaats aan mijn dagelijkse begeleiders ing. Koen Van Rompaey en Julien Van Esch, wiens behulpzaamheid en geduld voor mij een grote steun was. Zonder hun raad en feedback zou deze masterproef er wellicht helemaal anders hebben uitgezien. Bijzondere dank gaat ook uit naar Roger Bours, Andy Wouters, Sven de Vries, Tom Maes, wiens visie bepalend was voor het realiseren van deze masterproef. Ook dr. Véronique Van Vlasselaer wil ik bedanken voor de belangrijke hulp bij de statistiek. Mijn medestudenten verdienen ook een speciale vermelding voor de boeiende discussies en inspirerende gesprekken gedurende het voorbije jaar. Tenslotte dank ik mijn ouders en broers, vrienden en in het bijzonder mijn vriendin Lisa Vandepaer voor hun onvoorwaardelijke steun.

Siebe Van Thienen

SAMENVATTING

Deze scriptie handelt over de verbeteren en vernieuwen van het productieproces van breekplaten voor zoutwatertoepassingen. Het huidige productieproces bestaat uit het mechanisch aanbrengen van verzwakkingen op de breekplaat door middel van messen.

In het uitgebreide vooronderzoek toonde verschillende analyses aan dat dit bestaande mechanisch proces heel moeilijk stabiel en robuust te krijgen is. De processpreiding is groot en de nominale ligging van de breekdruk fluctueert. Hierdoor is uitval is hoog en moet er met regelmaat bijgestuurd worden.

Voor de oorzaken die aan de basis liggen van deze problemen, zijn verschillende hypotheses bedacht en uitgebreid beschreven in dit werk.

Met Femtotechnologie, een nieuwe en veel belovende lasertechnologie, ontwikkelen we een nieuwe productiemethode voor breekplaten. Deze Femtotechnologie, steunt op het principe van ultrakorte pulsen die materiaal wegdampen zonder thermische schade te veroorzaken.

Deze nieuwe productiemethode stond bij het begin van de opdracht nog in zijn kinderschoenen. Er was nog bijzonder weinig info beschikbaar over de gedragskarakteristieken van de Femtolaser toegepast op breekplaten. Doorheen het onderzoek is gezocht naar belangrijke en kritische parameters die een grote invloed hebben op dit productieproces. Gedurende een belangrijk deel van het onderzoek is gezocht naar een stabiele en optimale geometrie van de groef. Vervolgens is de relatie gelegd met de productkwaliteit, meer specifiek de beheersing van de breekdruk.

Aan de hand van deze kennis is een algoritme opgesteld die de mogelijkheid biedt om een voorspelling te maken van de laserinstellingen bij opgegeven productspecificaties.

Aansluitend is er een nieuwe aanvullend algoritme uitgedacht om verschillende breekdrukfuncties te controleren. Ook biedt het de mogelijkheid om de materiaallotafhankelijkheid na te gaan alsook de het effect van de kallibratie te controleren.

Tijdens het onderzoek werd een verschil in breekdruk tussen een losse breekplaat en een ingebouwde breekplaat vastgesteld. Na het testen van verschillende alternatieve constructies is de oorzaak en een oplossing gevonden. In de assemblage is een extra component toegevoegd zodat het verschil tussen een losse en een ingebouwde breekplaat tot een minimum is beperkt.

Tot slot bevat deze scriptie ook een theoretische uitwerking van een mogelijke cyclestand om duurproef te doen.

INHOUDSTAFEL

VOORWOORD **3**

SAMENVATTING **4**

INHOUDSTAFEL **5**

LIJST MET AFKORTINGEN EN SYMBOLEN **8**

INLEIDING **9**

1 FIKE **11**

2 OMGEKEERDE OSMOSE **12**

2.1 Principe van osmose **12**
2.2 Osmotische druk **12**
2.3 Principe van omgekeerde osmose **13**
2.3.1 Toepassingen 14
2.3.2 Beveiligen met een breekplaat 15

3 BREEKPLAAT **17**

3.1 Toepassingsgebied **18**
3.2 Toepassingen **18**

4 SD-RO **19**

4.1 Ontwerp **19**
4.2 Specificaties **20**
4.3 Productieproces **21**
4.3.1 Productieproces disc 23
4.3.2 Productieproces assemblage 27
4.4 Disc en assemblage testen **29**
4.4.1 Breektest disc 29
4.4.2 Breektest assemblage 29
4.5 Normering **30**
4.6 Vraag van de markt **31**

5 ANALYSE TESTRESULTATEN SD-RO MECHANISCH GESCOORD **33**

5.1 Doel **33**
5.2 Verklaring van nummering **33**
5.3 Analyse en resultaten **34**
5.4 Conclusies af te leiden uit de analyse **34**
5.5 Verband tussen disc en assemblage **37**

6 HYPOTHESES **39**

6.1 Productieproces breekplaat **39**
6.1.1 Persinstallatie 39
6.1.2 Materiaaleigenschappen 40
6.1.3 Snijgereedschap 41
6.1.4 Meetapparatuur 43

6.1.5 Montage van assemblage 43
6.1.6 Operatorafhankelijkheid 43
6.1.7 Overige invloeden 44
6.2 De testprocedure 44
6.2.1 Lekkage tijdens het testen 44
6.2.2 Wijziging hold down load 44
6.2.3 Holddown ring 44

7 FEMTOTECHNOLOGIE 45

7.1 Technologie 45
7.1.1 Typische toepassingen met Femtolaser 45
7.2 Doel 46
7.3 Ontwerp 46
7.3.1 Vorm van de score 46
7.3.2 Aantal lijnen 47
7.3.3 Gewenste voorwaarde 47
7.4 Specificaties 47
7.5 Normering 48
7.6 Opstarten StarFemto FX 48
7.6.1 Het gebruik van matrixableren 48
7.6.2 Rechtstreeks vanuit Visual Laser Marker 49
7.6.3 Algemene opmerkingen 50
7.7 Parameters Femto 50
7.7.1 Frequentie 50
7.7.2 Snelheid 52
7.7.3 Counts of Executions (COE) 53
7.7.4 Energie 54
7.7.5 Matrix 55
7.7.6 Gebruik van meerdere lijnen 55
7.7.7 Afstand tussen lijnen 55
7.7.8 Uitvoering van meerdere lijnen 57
7.7.9 Walsrichting 59
7.7.10 Beam delay 59
7.7.11 Conclusie 60
7.8 Burst Pressure Calculator 61
7.8.1 Doel 61
7.8.2 Toepassing in Excel 61
7.8.3 Breekdrukfunctie 62
7.8.4 Parameters a en b 63
7.8.5 Afwijking voorspelling 65
7.8.6 Materiaaldikte 66
7.8.7 Beperkingen BPC 67
7.9 BPC na kalibratie 68
7.9.1 Doel 68
7.9.2 ANOVA-test 69
7.10 Betrouwbaarheidssinterval 73
7.11 Controle van BPC 75
7.11.1 De maat van de nauwkeurigheid van de voorspelling 75

7.12 Lotafhankelijkheid ... 76
7.13 Optimaliseren van Burst Pressure Calculator ... 76
7.13.1 Conclusie ... 79
7.14 Data loggen testresultaten ... 79
7.14.1 Doel ... 79
7.14.2 Template ... 79
7.15 Tooling voor assemblage ... 80
7.15.1 Optie 1 – Insert ... 80
7.15.2 Optie 2 – Pen speerpunt ... 81
7.15.3 Evaluatie tooling ... 82
7.16 Conclusie Femtotechnologie ... 82
7.16.1 Fouttolerantie bij verschillende materiaaldiktes ... 82
7.16.2 Fouttolerantie bij disc vs. Assemblage ... 85
7.16.3 Afwijkingen ten opzichte van de werkelijkheid ... 86
7.16.4 Spreiding bij het puntlassen ... 87
7.16.5 Lijncontact ... 87
7.16.6 Keuze van de gaskets ... 88
7.16.7 Operatorafhankelijkheid ... 88
7.16.8 Praktische voordelen ... 88
8 CYCLESTAND ... 89
8.1 Doel ... 89
8.2 Specificaties van de cyclestand ... 89
8.3 Cyclestand voor SD-RO ... 89
8.3.1 Principeschema cyclestand ... 90
8.3.2 Cyclepatroon ... 92
BESLUIT ... 93
LITERATUURLIJST ... 94
BIJLAGEN ... 96

LIJST MET AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

Ableren	Het verwijderen door verdamping
BA	Base
barg	Bar gauge of overdruk
BP	Breekdruk [barg]
BPC	Burst Pressure Calculator
COE	Counts of Executions
c_x	Concentratie van stof x [mol/m^3]
E	Energie [μJ]
f	Frequentie [Hz]
Gasket	Afdichting
HD	Hold down
HD load	Kracht om de breekplaat te klemmen bij het testen
i	de Van ’t Hoff-factor
LBF	Pound Force
n	Steekproefgrootte
Poly-SD	Poly-Scored Disc
PSI	Pound Square Inch
R	Gasconstante [8,1344 J/mol.K]
RO	Reverse Osmosis, omgekeerde osmose
s.e.	Standaardfout, standaardafwijking v/h steekproefgemiddelde
s_{BP}	Variantie van het model
SD-RO	Scored Disc-Reverse Osmose
s_{Res}	Variantie van de fouten
SS_x	Som van de kwadraten van de deviaties
T	Absolute temperatuur [K]
t_{crit}	Waarde op basis van de T-test
th	Dikte [μm]
u	atomaire massa-eenheid
v	Snelheid [mm/s]
x	Onafhankelijke variabele
x_0	Verwachtingswaarde
y	Afhankelijke variabele
$\hat{y}$	Voorspelling van afhankelijke variabele y
σ	Standaard deviatie

INLEIDING

Breekplaten dienen als beveiliging tegen overdruk. Een breekplaat is een dunne metalen plaat die in een houder, de assemblage, gemonteerd zit. Bij het overschrijden van de ontwerpdruk opent de breekplaat. Deze scriptie handelt over de bestaande en nieuwe productietechnologie van de veelzijdige breekplaat (Poly-SD) en de Scored Disc - Reversed Osmosis breekplaat (SD-RO).

Het tweede hoofdstuk beschrijft het principe van osmose en omgekeerde osmose. Breekplaten vinden een belangrijke toepassing als beveiliging voor zoutwater toepassingen. In het hoofdstuk daaropvolgend komt de breekplaat zelf aan bod. Hier zal alle nodige kennis uit de doeken gedaan worden die vereist is voor het verdere verloop. In hoofdstuk 4 wordt specifiek op de Scored Disc – Reverse Osmosis (SD-RO) in gegaan.

Traditioneel worden de verzwakkingen in een breekplaat mechanisch aangebracht. In die toekomst tracht men dit te doen met een Femtolaser. De opdracht was na te gaan of de Femtolaser hiervoor meer en betere mogelijkheden biedt en of we hiermee de efficiëntie van de huidige breekplaat kunnen verbeteren.

Een eerste stap bestaat uit het verkennen van deze laser en het optimaal gebruik hiervan. Hiervoor moeten de verschillende instellingen onderzocht worden. Een tweede stap gaat de mogelijkheid na om het opgegeven product te produceren binnen bepaalde productspecificaties. Verder was de ontwikkeling van een gebruiksvriendelijke applicatie “Burst pressure Calculator” die ons in staat stelt om een voorspelling van de productieparameters te maken een belangrijke opdracht.

Een analyse van het traditioneel productieproces volgt in hoofdstuk 5. Omwille van bedrijfsgeheim is dit beknopt beschreven in deze scriptie. Als basis moet de productieafwijking van de traditionele productietechnologie in kaart gebracht worden. Op basis van de analyse van het huidige proces dienen verbeteringen aangebracht te worden op zowel functioneel als productief gebied. In hoofdstuk 6 worden verschillende hypotheses opgesomd die aan de oorzaak kunnen liggen van uitval, afwijkingen en nog veel meer.

In hoofdstuk 7 snijden we de nieuwe Femtotechnologie aan. Het begin handelt over de elementaire basisbeginselen van deze lasertechnologie. Vervolgens wordt naar de juiste parameters gezocht en deze zullen toegepast worden op de breekplaat. In dit hoofdstuk komt ook de calculator aan bod die ons in staat stelt om een voorspelling van de productieparameters te maken. Een tooling voor een verbeterde montage en het aanbrengen van puntlassen op de breekplaat, werd ontwikkeld. Tot slot wordt nog een theoretisch uitwerking van een cyclestand beschreven. Deze cyclestand kan gebruikt worden om het product waarheidsgetrouw

te testen op het effect van wisselende belastingen in bedrijfs-omstandigheden (cycles).

1 FIKE

Sinds 1945 is Fike een internationaal erkende leverancier van producten en diensten voor de bescherming van mensen en waardevolle activa tegen gevaren zoals brand, explosies en overdruk. Hoewel het hoofdkantoor van Fike in de Verenigde Staten gevestigd is, heeft Fike lokale kantoren in 12 landen in 6 continenten, om zo dicht bij de internationale klanten te zijn en hen zo goed mogelijk van dienst te kunnen zijn.

In 1984 brak er een nieuwe fase aan voor Fike, met de oprichting van Fike Europe in Herentals (Figuur 1). Fike Europe heeft eigen afdelingen in engineering, productie, verkoop en klantenservice. Fike Europe kan zo, in samenwerking met klanten uit verscheidene industrieën, de meest geschikte en meest effectieve oplossingen in drukontlasting en explosiebeveiliging aanbieden. Met eigen middelen voor productontwikkeling en productie kan Fike Europe snel inspelen op de noden en behoeften van de Europese markt en specifieke, op maat gemaakte oplossingen ontwikkelen voor zijn klanten. Om nog beter te kunnen beantwoorden aan de wensen van klanten over geheel Europa heeft Fike Europe ook kantoren opgericht in de voornaamste Europese landen, die lokaal voor de verkoop en klantenservice kunnen instaan.

Figuur 1: Fike Europe, Herentals

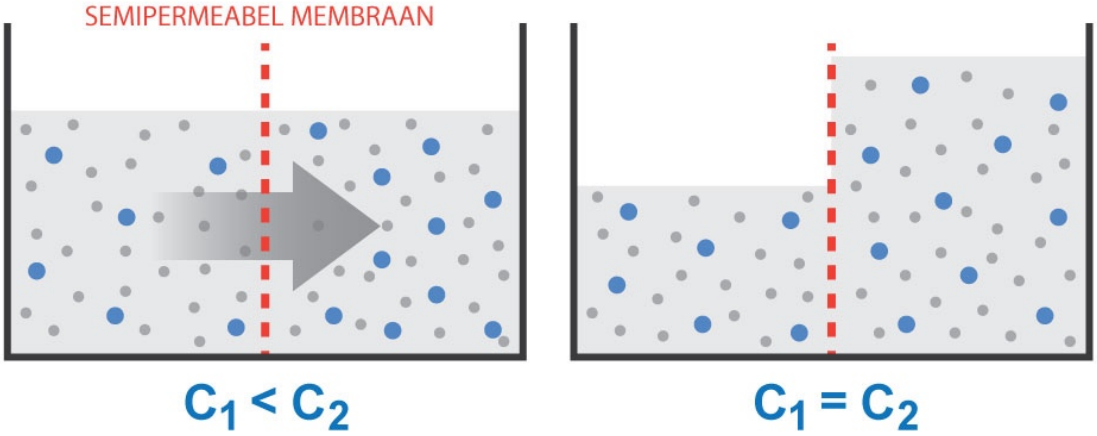
(Fike Europe [1], 2015)

2 OMGEKEERDE OSMOSE

Een veelvoorkomende zoutwatertoepassing is omgekeerde osmose. In dit deel zal het principe van omgekeerde osmose verklaard worden aan de hand van osmose. De beveiliging van deze toepassing gebeurt met behulp van breekplaten.

2.1 Principe van osmose

Osmose is het natuurlijk proces van het bewegen van oplosmiddel door een semipermeabel, of halfdoorlatend, membraan naar een oplossing met een hogere concentratie van een stof (bijvoorbeeld zout). Om het principe beter te verduidelijken Figuur 2.



Figuur 2: Werking van natuurlijke osmose bij een verschil in concentratie, gescheiden door een semipermeabel membraan. Het vloeistofniveau zal in de evenwichtssituatie zo gelegen zij dat de concentratie in beide helften gelijk is. Aan de linkerzijde van het semipermeabel membraan bevindt zich een concentratie c_1 die hoger is dan concentratie c_2 aan de rechterzijde van het membraan

Aan de linkerzijde van het semipermeabel membraan bevindt zich een concentratie c_1 die hoger is dan concentratie c_2 aan de rechterzijde van het membraan.

2.2 Osmotische druk

In Figuur 3 is een semipermeabel membraan te zien dat ondergedompeld is in een vloeistof. Enkel watermoleculen kunnen doorheen dit membraan. Vervolgens wordt aan de linkerzijde van het membraan een oplosbare stof toegevoegd, bijvoorbeeld zout. Het rechtergedeelte blijft onveranderd. Na een bepaalde duur zal er zich een nieuw evenwicht stellen. De watermoleculen van de vloeistof met een lagere concentratie aan opgeloste stoffen zijn gedeeltelijk door het semipermeabel membraan gestroomd richting de vloeistof met een hogere concentratie aan opgeloste stoffen. Hoewel door osmose de verhouding opgeloste stoffen aan beide kanten van het membraan dichter bij elkaar komt te liggen, zal

deze niet exact aan elkaar gelijk worden. Dit wordt veroorzaakt doordat het watervolume aan de kant van het membraan waar het water naartoe stroom, toeneemt en zodoende zal ook de druk aan die kant toenemen. Op het moment dat deze druk hoog genoeg is om de stroom van water door het membraan tegen te houden, zal het proces van osmose tot stilstand komen. De druk waarbij dit plaatsvindt is de osmotische druk (osmotische potentiaal). De osmotische druk π voor een verdunde oplossing:

$$\pi = i \cdot M \cdot R \cdot T$$

Met:

- i de Van 't Hoff-factor[1], M de concentratie van de oplossing [mol/m^3],
- R de gasconstante voor [8,3144 J/mol.K],
- T de absolute temperatuur [K]

(Reverse Osmosis, 2015)

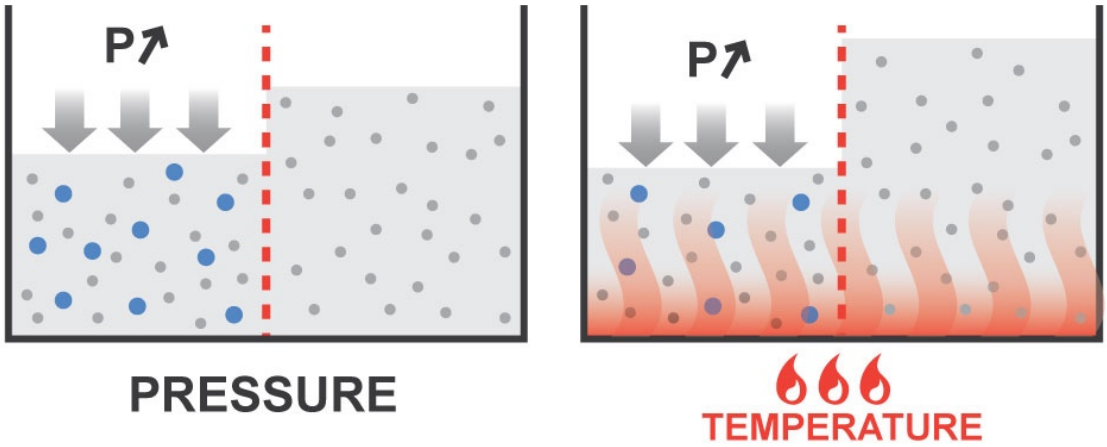
2.3 Principe van omgekeerde osmose

Omgekeerde osmose gaat het principe doen omkeren. Het halfdoorlatend membraan wordt gebruikt als extreem fijn filter dat enkel en alleen watermoleculen doorlaat. Het is een uitstekende en goedkope methode om water te zuiveren. Aan de ene kant van het membraan wordt zoutwater geplaatst, aan de andere kant bevindt zich zuiver drinkwater. Indien op het zoutwater een druk wordt aangebracht, zullen er enkel watermoleculen door de filter geperst worden en bewegen richting drinkbaar water.

Er zijn meerdere factoren die invloed hebben op de snelheid waarmee water door een semipermeabel membraan stroomt en de kwaliteit van het osmosewater. De volgende factoren, zoals weergegeven op Figuur 3 hebben de meeste invloed:

- Werkdruk: Een stijging van de werkdruk geeft een stijging in opbrengst en een betere zuivering.
- Temperatuur: Een stijging van de temperatuur geeft een stijging van de opbrengst en een minder goede zuivering.

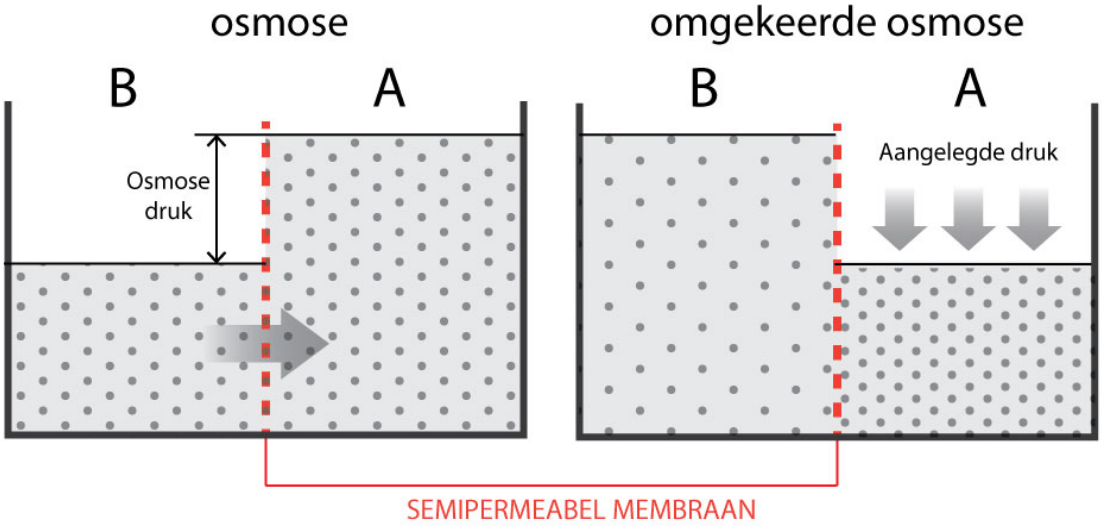
[1] Is een maat voor het gedrag van een oplossing ten opzichte van osmotische druk. (Genoemd naar J.H. van 't Hoff)



Figuur 3: Principe van omgekeerde osmose. Zowel een druk- als temperatuursstijging hebben een invloed op de zuiveringskwaliteit.

Echter is omgekeerde osmose niet in staat om bacterieel onveilig water te zuiveren, zoals steriel water voor ziekenhuizen en laboratoria. Het grootste gedeelte van bacteriën en virussen worden echter wel gezuiverd (>99,99%).

Natuurlijk voorkomend organisch materiaal (koolwaterstoffen) wordt gezuiverd. Organisch materiaal met een moleculair gewicht groter dan 150 u (atomaire massa-eenheden) worden voor 99,9% gezuiverd. De mate van zuivering van water met verontreinigde stoffen, die een moleculair gewicht onder de 150 u hebben, is afhankelijk van het moleculaire gewicht, vorm en ionische lading.



Figuur 4: Osmose vs. omgekeerde osmose.

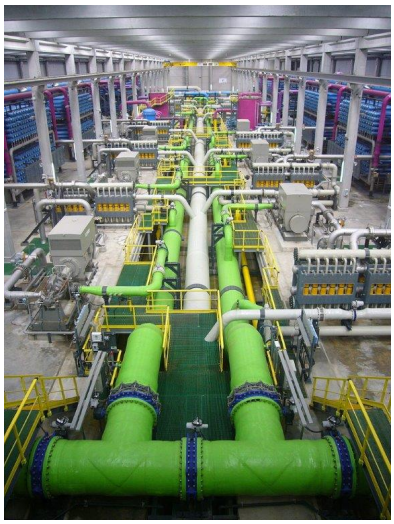
2.3.1 Toepassingen

Omgekeerde osmose (RO) voor systemen zijn uitermate geschikt voor waterzuivering in de zeevaart. Zoet- en zeewater, uit de buurt van industriële afvalstortplaatsen, is geschikt voor RO-zuivering. Oliën (brandstoffen e.d.) komen niet diep genoeg om door de drinkwaterpomp

opgezogen te kunnen worden. Zoetwatermeertjes en sloten met een gevaarlijk hoog pesticide of stikstofgehalte kunnen beter vermeden worden.

Enkele toepassing zijn:

- Waterzuivering: grootschalige productie van drinkwater uit zeewater,
- Ontziltingsinstallatie (Figuur 5),
- Bepaalde vormen van nierdialyse,
- Voedselindustrie: voor de bereiding van koffie en thee. Een hoge kwaliteit, zuiverheid en smaak kunnen zo bekomen worden. Ook de productie van kristalhelder ijs voor ijsblokjes is mogelijk,
- Zuivering van aquarium voor vissen,
- Biologische en chemische laboratoria,
- …



Figuur 5: Ontziltingsinstallatie waarin de breekplaat type SD-RO voornamelijk gebruikt wordt.

(Fike Engineering, Drawings)

2.3.2 Beveiligen met een breekplaat

In literatuur wordt vaak een werkingsgebied tot 40 bar vermeld. Indien in de installatie een fout optreedt, waardoor de druk in de installatie hoger oploopt dan toegestaan, kan dit mogelijk en gevaar betekenen voor de installatie alsook voor de operatoren rond de installatie. Dan dient de overdrukbeveiliging in werking te treden. Een breekplaat wordt vaak geplaatst tussen een veiligheidsafsluiter en het proces (onder de veiligheidsafsluiter). Dit is wenselijk indien er absoluut geen lekkage mag optreden. Een breekplaat biedt in deze situaties een voordelige oplossing, omdat de veiligheidsafsluiter in goedkoper materiaal kan worden uitgevoerd of weggelaten kan worden.

2.3.2.1 Voordelen van een breekplaat

De voordelen van een breekplaat ten opzichte van veiligheidsklep zijn:

- Een breekplaat is licht en heeft samen met de houder een kleine inbouwmaat.
- Een breekplaat is veelal goedkoper dan een veiligheidsklep, zeker in geval van corrosiebestendige materialen.
- Een breekplaat is eenvoudig uitgevoerd, heeft geen bewegende onderdelen en vraagt dus geen onderhoud.
- De afdichting is beter dan aan de zitting van een veiligheidsklep.
- De breekplaat heeft een korte responstijd voor volledige opening (enkele milliseconden).
- Vooral wanneer zeer grote ontlastingsopeningen nodig zijn, kan een breekplaat de enig praktisch bruikbare oplossing zijn.

2.3.2.2 Nadelen van een breekplaat

De nadelen van een breekplaat ten opzichte van veiligheidsklep zijn:

- Een breekplaat kan slechts éénmaal gebruikt worden en dient telkens vervangen te worden, de houder is vaak wel herbruikbaar.
- Na het openbarsten en de drukontlasting is er geen hersluiting zoals bij een veiligheidsklep en dient dat gedeelte van de installatie te worden afgesloten om terug verder te kunnen.
- Als de procesdruk en de bijbehorende breekdruk wijzigt, dan dient de breekplaat vervangen te worden. Bij veiligheidskleppen is een beperkte regeling mogelijk.
- De uiteindelijke geïnstalleerde breekplaat kan uiteraard niet getest worden.
- Veiligheidskleppen hebben over het algemeen een kleinere aanspreektolerantie (± 3%).
- Indien fragmentatie zou optreden, wordt mogelijk de leiding vervuild. Dit kan schade veroorzaken aan andere componenten in de leiding.
- Afzetting of kristallisatie van het medium op de breekplaat kan de breekdruk beïnvloeden.

(Osmoseapparaat, 2013) (Alliance for water efficiency, 2010) (DVF, 2011)

3 BREEKPLAAT

Een breekplaat (burst disc) is een eenmalig te gebruiken lekdichte overdrukbeveiliging. Het is zowel een beveiliging tegen interne overdruk als tegen mogelijk schadelijk onderdruk of vacuüm. Op het moment dat de breekplaat in werking treedt, kan het fluïdum, gas of een combinatie hiervan het proces verlaten zonder dat de infrastructuur ernstige schade oploopt. Breekplaten zijn ontworpen voor één bepaalde specifieke breekdruk met een bijhorende specifieke temperatuur, en zijn in tegenstelling tot een overdrukventiel, niet regelbaar.

Breekplaten zijn kwetsbare onderdelen. Deze worden dan ook meestal in een houder geplaatst. Bij elke type breekplaat hoort een specifieke breekplaathouder. Een houder bestaat uit een base (BA) en een hold down (HD). Figuur 6 toont de opbouw van een standaard Poly-SD. De Poly-SD wordt eerst in de base gelegd, vervolgens wordt de hold down op de base gemonteerd om een metaal-op-metaal afdichting te bekomen. Deze afdichting garandeert een lekdichte inklemming.

Figuur 6: Breekplaat (type Poly-SD) in houder. De losse disc (2”) met naamplaatje is in de base geplaatst met daarnaast een losse holddown. Afdichting is gebasseerd op metaal-op-metaal klemming.

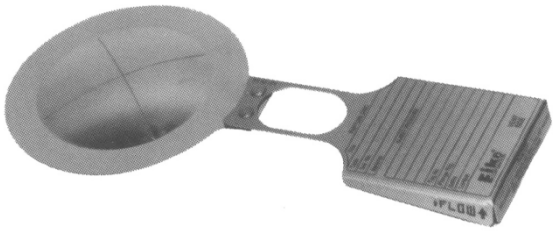
(Fike Engineering, Drawings)

> Fike is een pionier op het vlak van breekplaten. De drukontlastings-producten van Fike voldoen aan de internationale normen en zijn ontworpen om aan de vereisten van de industrie op het vlak van sterkte, betrouwbaarheid en kwaliteit van breekplaten meer dan alleen maar te beantwoorden. Van het beschermen van uw productie-processen tot het beschermen van uw veiligheidskleppen. De breekplaten en drukontlastingsproducten van Fike helpen u mee om uw kosten te verlagen en winst te vergroten.

(Fike Europe [2], 2015)

3.1 Toepassingsgebied

Breekplaten hebben een groot toepassingsgebied. De keuze van de breekplaat is afhankelijk van de toepassing. Deze drukbeveiligingen kunnen gebruikt worden bij een overdruk van 35 mbar tot 6500 bar, afhankelijk van de dimensionering. Breekplaten zijn bruikbaar bij een temperatuur gelegen tussen -200 °C en 550 °C en hebben een aanspreektolerantie gelegen tussen 5 en 10 %. Een vereiste is ook dat ze in geen geval fragmenteren en niet lekken (< 1 x 10^{-8} cm^3 He/s)[2].



Figuur 7: Losse breekplaat voorzien van naamplaatje, type Poly-SD.

(Fike Engineering, Drawings)

De keuze van het type breekplaat is afhankelijk van verschillende factoren:

- druk,
- medium,
- temperatuur,
- …

3.2 Toepassingen

Breekplaten worden in tal van toepassingen gebruikt. Enkele toepassingen waar deze voorkomen:

- aandrijving bij de ruimtevaart,
- compressoren,
- zuiveringen van zout- en drinkwater (cfr. 2.3),
- waterstraalsnijden,
- schuiminjectiesystemen,
- …

(Fike Europe [3], 2015)

[2] Bij testen in het labo onder vastgelegde omstandigheden.

4 SD-RO

De door Fike ontwikkelde Scored Disc-Reversed Osmosis (SD-RO) breekplaten zijn eenvoudige en betrouwbare drukontlastingen voor zoutwater toepassingen, bijvoorbeeld omgekeerde osmose processen.

Figuur 8: Breekplaat van het type SD-RO.

(Fike Engineering, Drawings)

Breekplaten zijn voorgekerfde breekplaten, die gebruik maken van een groef in de breekplaat die mechanisch verzwakt is door middel van kerftechniek. Het verschil tussen een Poly-SD en een SD-RO zit in de assemblage. Een Poly-SD wordt tussen een base en holddown geplaatst die te allen tijde verwijderd kunnen worden. De disc van een SD-RO is tijdens het productieproces aan de base én aan de holddown bevestigd. De assemblage van de SD-RO, kan in tegenstelling tot die van de Poly-SD, niet gedemonteerd worden.

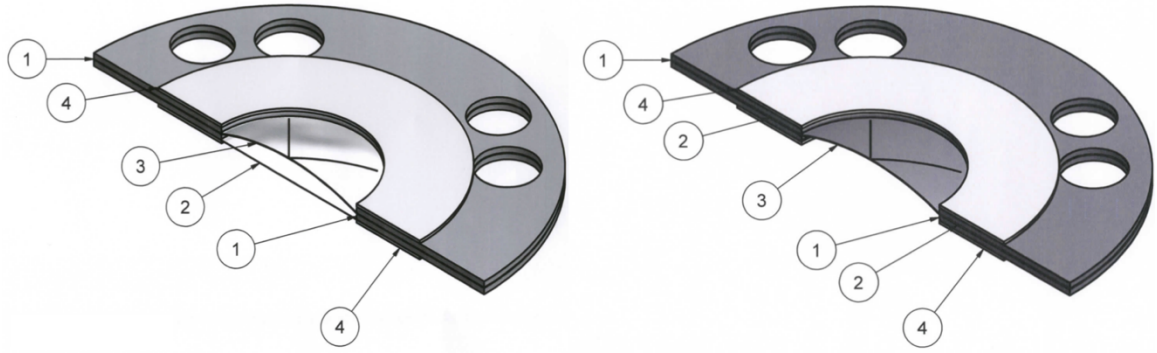
Naast de kerf, wordt er tijdens de productie van de breekplaat ook een bolling aangebracht. Deze bolling heeft twee functies. Een eerste functie is het kunnen weerstaan aan vacuüm. Een factor die meer aandacht vraagt, is het kunnen uithouden van drukcycli. Door een bolling aan te brengen, gaat het materiaal voorgespannen worden. Deze voorspanning zal er voor zorgen dat de breekplaat beter bestand is tegen druk cycli.

4.1 Ontwerp

De SD-RO breekplaten zijn ontworpen om direct tussen standaard voorlas-flenzen geïnstalleerd te worden zonder dat daarvoor specifieke houders vereist zijn. Wegens de minimale hoogte van het product moet bestaand leidingwerk niet gewijzigd worden, waardoor de breekplaten zonder meer in bestaande installaties kunnen worden gebruikt.

De assemblage bevat de volgende onderdelen (Figuur 9):

1. De holddown (HD) en de base (BA) ring, zijn beide identiek
2. Teflon seal, hier zijn twee uitvoeringen mogelijk (cfr. 4.3.2 Productieproces assemblage)
3. SD-RO disc
4. Gasket



Figuur 9: Doorsnede SD-RO, met verschillende uitvoering van teflon seal.Links is een ontwerp met een doorlopende teflon seal. Rechts is een assemblage waar de teflon seal ringvorming is.

1. HD/BA ring 2. Teflon seal 3. SD-RO disc 4. gasket

(Fike Engineering, Drawings)

4.2 Specificaties

De SD-RO heeft een maximumtemperatuur van 200°C. Onder deze temperatuur zal de met standaard geassembleerde AFM34 pakking, probleemloos afdichten. Dit type breekplaat is vervaardigd uit Inconel 625[3], omwille van zijn corrosievaste eigenschap. Deze is zeer belangrijk in hygiënische toepassingen. De SD-RO heeft een tolerantie van plusminus tien procent bij 22 graden Celsius. De werking van deze breekplaat berust op het principe van een voorwaarts werkende kerving. Tabel 1 geeft een overzicht van de specificaties voor de mechanisch gekerfde SD-RO. Tabel 2 toont het overzicht van de verdeling wat betreft afmetingen en breekdruk.

(Fike Europe [4], 2015)

[3] Legering van nikkel gelegeerd met chroom en ijzer (NiCrFe).

Tabel 1: Productspecificaties van SD-RO (mechanische productie)

Type	SD-RO
Werking	Direct-werkend voorgekerfd
Afmeting	1.5″ - 2″ - 3″ - 4″ -6" / DN40 - DN50 - DN80 - DN100 - DN150
Breekplaatmateriaal	Inconel 625
Procesdichting	AFM 34 / PTFE
Maximale werktemperatuur	200 °C
Beschermende deklaag	Nee
Verhouding tussen werkdruk en Minimale breekdruk	95%
Flensafmeting	ANSI 150 – 300 / DN10 – 40
Cyclische / pulserende belasting	Geschikt
Damptoepassingen	Geschikt
Vloeistoftoepassingen	Geschikt
Geen fragmentatie	Geschikt
Zittingsconfiguratie	Vlak
Gebruik tussen standaard flenzen	Ja

Tabel 2: Verdeling van grootte en afmetingen van bestaande SD-RO (mechanische gescoord).

Afmetingen	**ANSI**	**1,5″**	**2″**	**3″**	**4″**	**6″**
	DN	40	50	80	100	150
Breekdruk[1]	**ANSI**	10	9	8	8	6
	DN	20	20	20	20	20

(Fike Engineering, Tables)

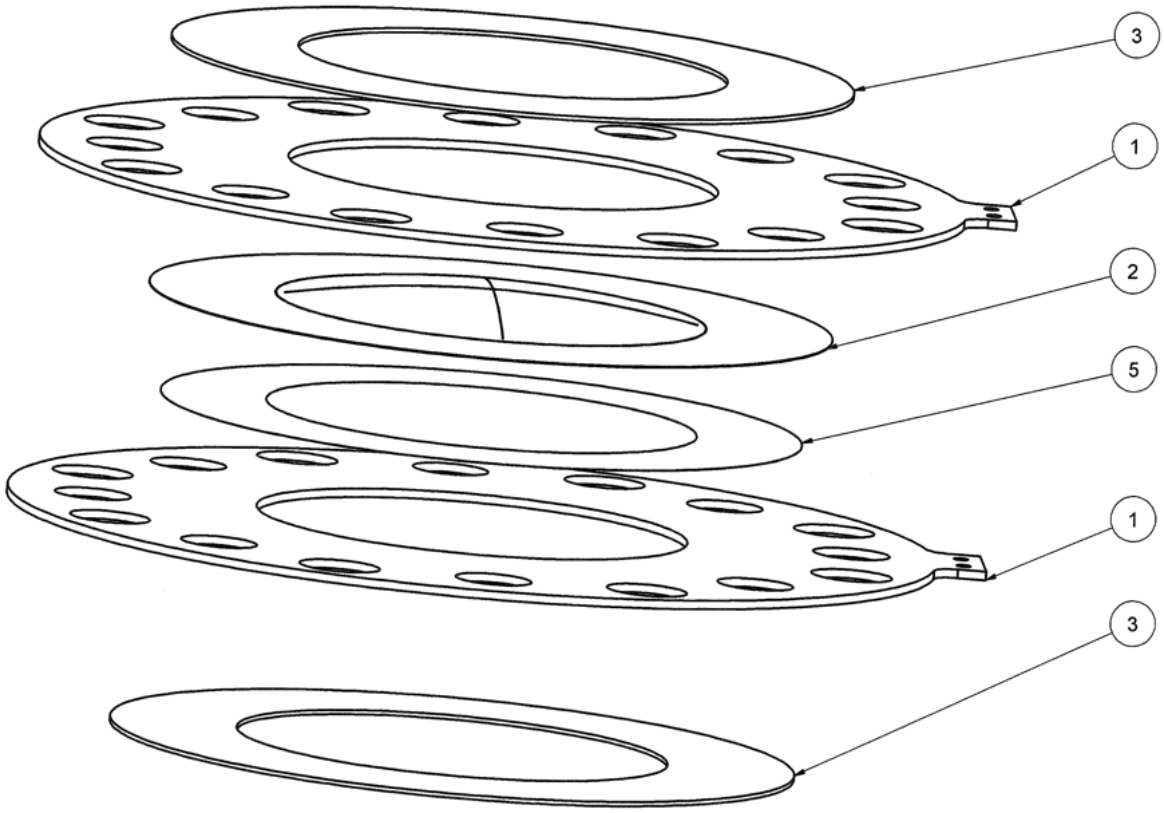
4.3 Productieproces

Het productiedomein van de SD-RO begint met het maken van de disc. De disc wordt in de holddown ring geplaatst. Met behulp van twee puntlassen wordt de disc aan de holddown ring bevestigd. Op de disc wordt nu een teflon seal aangebracht tussen base en disc. Nadien kan de base ring op de disc geplaatst worden. Na centreren wordt de base bevestigd aan de holddown door puntlassen. Als beide ringen gelast zijn, wordt aan weerszijde een gasket aangebracht om de breekplaat lekdicht te maken. Tot slot wordt een naamplaat voorzien met de specificaties van de SD-RO. Figuur 10 en Figuur 11 toont een overzicht van de samenstelling voor de twee mogelijke ontwerpen.

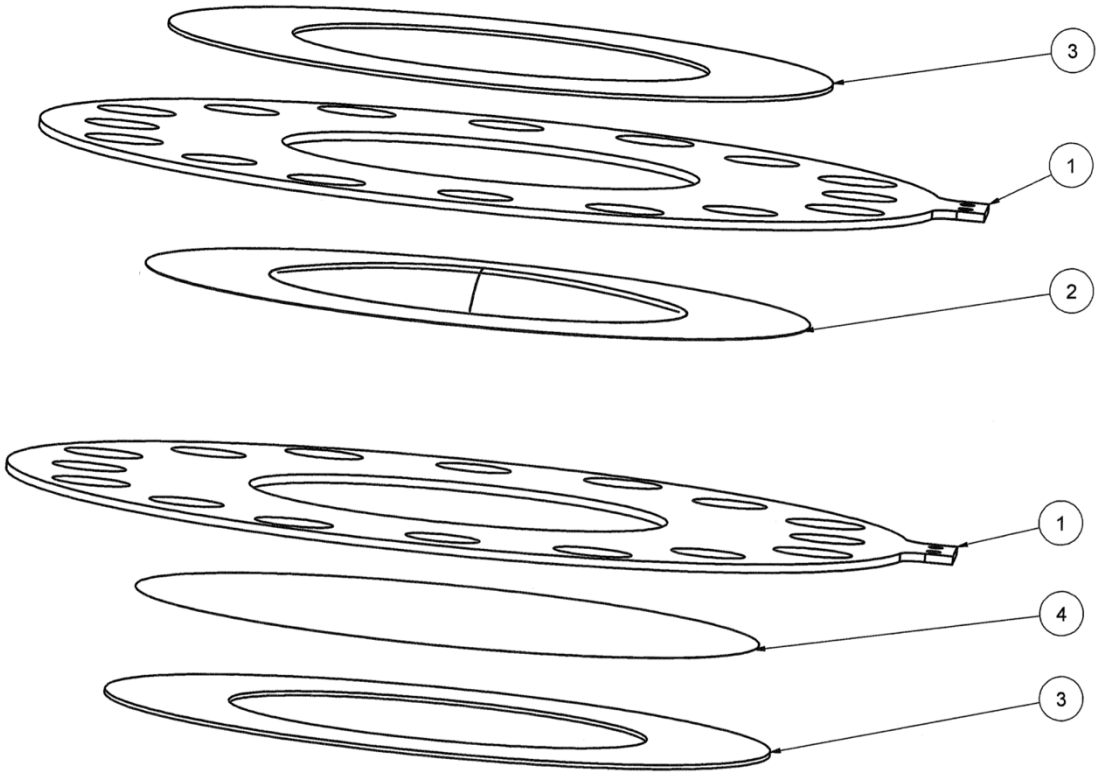
Legende Figuur 10 en Figuur 11:

1: Base ring 2: SD-RO disc 3: gasket

4: teflon seal schijf 5: teflon seal ring



Figuur 10: Exploded view van een assemblage van SD-RO met een teflon seal in ringvorm.



Figuur 11: Exploded view van een assemblage van SD-RO met een teflon seal in schijfvorm.

4.3.1 Productieproces disc

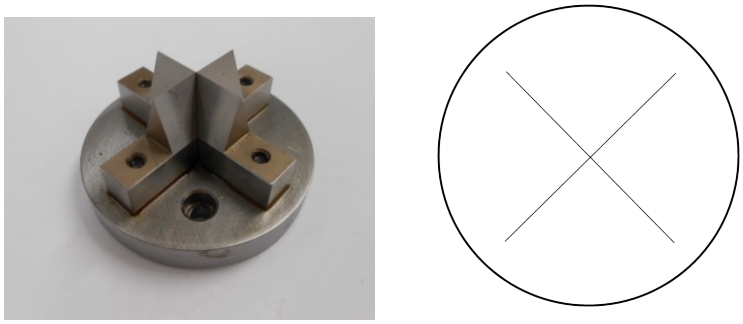
De productie van een disc start vanuit een metalen plaat van 920 mm bij 920 mm. Met behulp van een geautomatiseerde laser (Lasercell 1005, Trumpf) worden uit deze plaat verschillende ronde schijven gesneden, afhankelijk van de gewenste afmeting.

4.3.1.1 Kerfgereedschap

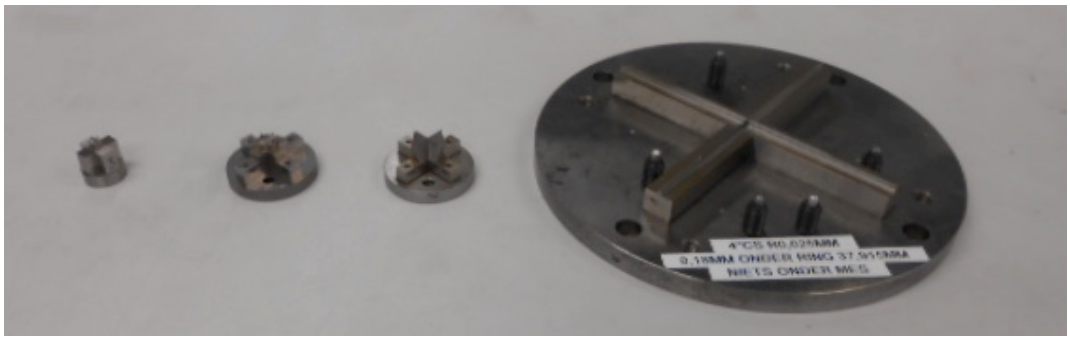
Vervolgens wordt de ronde metalen schijf in een pers geplaatst die voorzien is van kerfgereedschap (zie Figuur 12). Het materiaal dient verzwakt te worden om, bij een door de klant gekozen breekdruk, te breken en fragmentatie te vermijden. De pers duwt het kerfgereedschap in het materiaal zodanig dat de materiaaldikte lokaal afneemt. Het restmateriaal zal een maat zijn voor de uiteindelijke breekdruk van de breekplaat.

Bij elke afmeting van een disc hoort een specifieke grootte van messen. De afronding of radius van de messen is afhankelijk van de dikte van het materiaal van de disc. Bij materiaal met een dikte van meer dan 0,53 mm, bedraagt de afrondingstraal 0,1 mm. Voor diktes kleiner dan 0,53 mm, is de straal gelijk aan 0,05 mm. De messen die bij de productie van de SD-RO gebruikt worden, wijken lichtjes af van de messenset voor de Poly-SD. Onder andere de lengte van het mes is verschillend.

De messen worden onder een microscoop gemonteerd op een messenplaat zodanig dat het snijpunt van de vier messen goed uitgelijnd is. De verzwakking (score) gebeurt in de vorm van een kruis met vier gelijke benen.



Figuur 12: Messenset voor 1,5" mechanische score en eenvoudige voorstelling van de vorm van de score (cross-scored) op een disc.



Figuur 13: Overzicht van diverse messensets (0,75" – 1" – 1,5" - 4").

Nadat de score gebeurd is, moet de disc nog worden gebold. De bewerking gebeurt in een andere pers. De disc wordt met de score naar boven gericht in de basetooling geplaatst. De pers duwt een holddown ring op de randen van de disc. Met perslucht wordt onder de disc druk aangebracht. De persdruk bedraagt 90% van de minimale breekdruk en wordt een vooraf geprogrammeerde tijd aangehouden. Hierdoor komt de disc bol te staan.

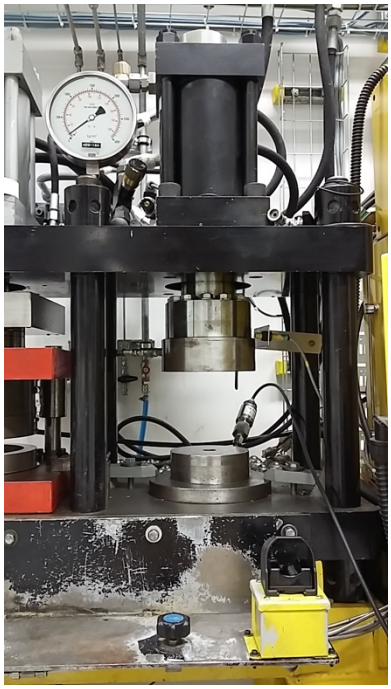
4.3.1.2 Persinstallatie

Het labo beschikt over twee persinstallaties. Persinstallatie A, weergegeven op Figuur 14, dient voor de productie van de discs met afmetingen tot en met drie inch. Bij grotere afmetingen (vier en zes inch) wordt overgegaan naar persinstallatie B.

Figuur 14: Persinstallatie A voor het score (links) en testen (rechts) van breekplaten tot twee inches.

De persinstallatie bestaat uit twee persen. De linkse pers (detailweergave op Figuur 15) voorziet de score van de disc. De rechtse pers heeft

meerdere functies. Zowel het bollen als het testen van de disc gebeuren op deze pers. Nadat de assemblage gemonteerd is, kan ook deze getest worden op de rechtse pers.



Figuur 15: Detailweergave van de testpers van persinstallatie A.

De correct gemonteerde messen worden in de pers geplaatst. Op deze messen staan twee parameters vermeld die belangrijk zijn voor een goede kalibratie. Eén parameter geeft weer welke ring onder de messen geplaatst moet worden (grove kallibratie). De andere parameter duidt op de dikte van de chimes[4] die onder de ring geplaatst moeten worden voor een exacte bepaling van de hoogte (fijne kallibratie).

Worden de messen gedemonteerd voor een slijpbeurt of worden er volledig nieuwe messen geplaatst, dan zal er steeds een nieuwe bepaling moeten gebeuren van bovenstaande parameters. De kallibratie is noodzakelijk om de pers een juist nulpunt te bezorgen. Dit nulpunt komt overeen met de positie zodanig dat de messen van het kerfgereedschap de bewegende persplaat net niet zouden raken. Een juist nulpunt is nodig om een exacte kerfdiepte te bekomen bij de productiestap van de kerf. Een verkeerde instelling van het nulpunt kan als gevolg hebben dat de werkelijke kerfdiepte verschillend is van de gewenste kerfdiepte of dat het kerfgereedschap de volledige disc doorklieft. Wat een beschadiging van de messen kan veroorzaken.

De pers kent tal van instelparameters waar er slechts twee van variabel zijn. Bij het mechanisch scoren, wat gebeurt op het linker gedeelte van de

[4] Dunne metalen ringen met een dikte variërend van 0,01 mm tot 0,1 mm

persinstallatie, worden enkel *score load* en *thickness (chime)* aangepast. De waarde van de parameters zijn bepaald met behulp van de laatste gemaakte overeenkomstige disc. Vanuit deze waarde zal een eerste disc gemaakt worden en getest. Afhankelijk van de testresultaten zullen de parameters al dan niet nodig worden aangepast. De overige parameters zijn in alle gevallen constant.

Een overzicht van alle parameters van de pers:

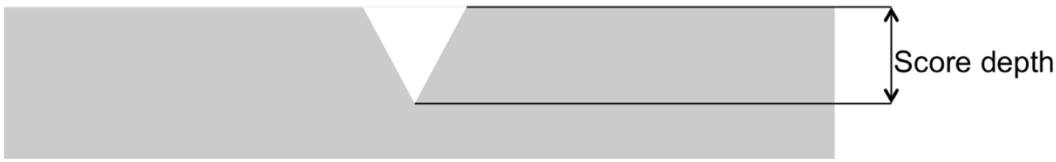
- Score Load [LBF][5] of [PSI][6]: de kracht waarmee de messen in het materiaal worden geduwd,
- Score Dwell [s]: de tijdsduur dat de pers druk uitoefent op het materiaal,
- Score Depth [mm]: de theoretische dikte van het resterende materiaal, wordt ook *chime* genoemd (Figuur 16),
- Annealing Time [min]: de tijdsduur van het spanningsvrij maken van het materiaal, niet van toepassing bij de SD-RO,
- Annealing temperature [°C]: de temperatuur van het spanningsvrij maken, niet van toepassing bij de SD-RO,
- Target Bulge pressure [PSIG][7]: breekdruk waar tijdens de productie naar gestreefd wordt, is eveneens de nominale breekdruk,
- HD Load [PSI] of [LBF]: hold down load, kracht die wordt gebruikt om de breektest uit te voeren, deze kracht simuleert de torque van het boutenpatroon,
- Dwell time bulge [s]: tijdsduur dat de maximale kracht wordt aangehouden tijdens de bolling om het materiaal de juiste vorm te laten aannemen,
- Bulge [%]: percentage van de target bulge pressure om de disc te bollen (90%),
- Target burst test pressure [PSIG]: berekende waarde aan de hand van de bulge en de target bulge pressure.

---

[5] Pound of pound-force: 1 LBF = 4,44822 N.

[6] Pound-force per square inch, druk uitgeoefend door één pound-force op één vierkante inch: 1 PSI = 6.894755 kPa.

[7] pounds-force per square inch gauge, relatieve druk ten opzichte van de omgevingsdruk.



Figuur 16: Aanduiding van score depth op een doorsnede van een disc.

4.3.2 Productieproces assemblage

De volgende stap is het monteren tot een assemblage. Tijdens deze fase wordt de eerder gemaakte disc tussen houders geplaatst. Afhankelijk van het ontwerp, is het houdermateriaal anders. Er is de keuze uit roestvast staal (316L) of uit duplex roestvaststaal[8]. Het duplex materiaal heeft als nadeel dat het een hogere kostprijs kent en wordt enkel gebruikt bij specifieke vraag van de klant.

4.3.2.1 De productievolgorde

De volgende stappen geven het productieproces van een SD-RO met teflon seal in ringvorm. Figuur 17, aan het einde van stap vier, toont de exploded view. Het naamplaatje (Figuur 18) wordt na stap vier bevestigd aan de assemblage. Figuur 19 geeft een voorbeeld van de gegevens die op een naamplaat worden vermeld.

Stap 1: het plaatsen en centreren van de disc [2] op de holddownring [1, bovenaan]. De disc wordt met de bolling naar onder aangebracht om een goede centrering te hebben ten opzichte van de base ring. De disc wordt met twee puntlassen, verschoven over 180°, aan de holddownring verbonden.

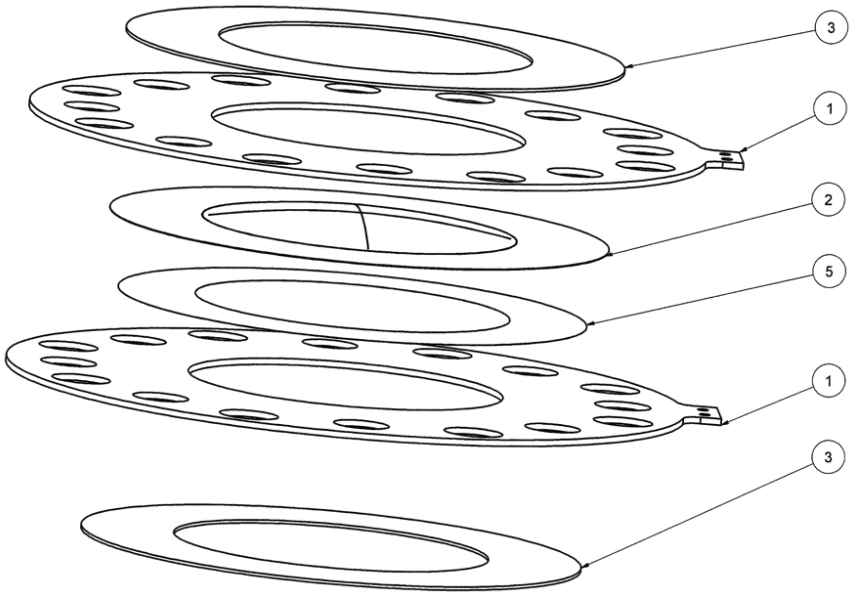
Stap 2: bestaat uit het toevoegen van een teflon seal [5]. In de meeste gevallen volstaat een teflon ring. Met behulp van enkele druppeltjes water blijft deze teflon gasket beter op zijn positie.

Stap 3: bestaat uit het plaatsen van de base ring [1, onderaan]. Na het centreren wordt deze opnieuw met 8 puntlassen, verschoven over 45° bevestigd. De volgorde van het puntlassen verloopt kruislings.

Stap 4: het aanbrengen van een zelfklevende gasket [3] aan weerszijde van de assemblage. De assemblage wordt nog voorzien van een naamplaatje met de specificaties van de bijhorende SD-RO.

---

[8] Onderscheid zich van het klassieke roestvast staal door een grotere corrosievastheid en sterkte bij goede taaiheid, goede lasbaarheid en redelijke bewerkbaarheid. (Cr: 43-27 %, Ni: 4,5 – 7 %, Mo: 2 – 6 %, C < 0,03 %.

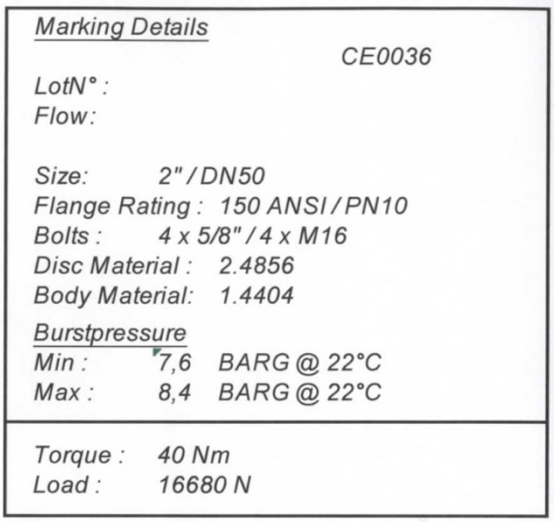


Figuur 17: Exploded view van een assemblage van SD-RO met een teflon seal in ringvorm.

(Fike Engineering, Drawings)

Figuur 18: Blanco naamplaatje dat aan de SD-RO wordt bevestigd.

(Fike Engineering, Drawings)


Marking Details
CE0036
LotN° :
Flow:
Size: 2" / DN50
Flange Rating : 150 ANSI / PN10
Bolts : 4 x 5/8" / 4 x M16
Disc Material : 2.4856
Body Material: 1.4404
Burstpressure
Min : 7,6 BARG @ 22°C
Max : 8,4 BARG @ 22°C
Torque : 40 Nm
Load : 16680 N

Figuur 19: Gegevens die op het naamplaatje worden aangebracht (willekeurige gegevens). De exacte gegevens worden steeds op de ontwerptekening aangebracht om later overgenomen te worden op het naamplaatje.

(Fike Engineering, Drawings)

4.4 Disc en assemblage testen

4.4.1 Breektest disc

Nadat een order geproduceerd is, wordt gecontroleerd of de productieparameters (score load en thickness) voldoen. Dit gebeurt aan de hand van een breekproef. De disc wordt in de pers geplaatst en met een *hold down load* duwt de pers de disc op de base. De disc wordt onderworpen aan druk afkomstig van perslucht. De druk neemt lineair toe en blijft stijgen tot de breekplaat het begeeft. Nu is de breekdruk van de disc bekend. De breekdruk moet tussen de minimale en de maximale breekdruk liggen en de breekplaat mag niet fragmenteren.

4.4.2 Breektest assemblage

Indien de testresultaten binnen de aanspreektolerantie liggen en er geen fragmentatie optreedt, wordt er ook een test op de assemblage gedaan. Hierbij duwt de pers de assemblage op een base. Opnieuw wordt de druk lineair opgevoerd tot de disc in de assemblage scheurt. Ook hier is fragmentatie niet toegestaan. Ligt ook deze breekdruk binnen het tolerantiegebied, dan is de breekplaat geschikt voor fabricage. Ligt de breekdruk echter buiten het tolerantiegebied of treedt er fragmentatie op, dan moeten eerder geproduceerde discs en/of assemblages vernietigd worden en wordt het proces opnieuw (Normalisatie, 2003).

4.5 Normering

De testen gebeuren aan de hand van de internationale norm EN ISO 4126-2:2003 (E)[9]. Deze norm legt het minimum aantal breektesten per batch op. Een overzicht is gegeven in volgende tabel.

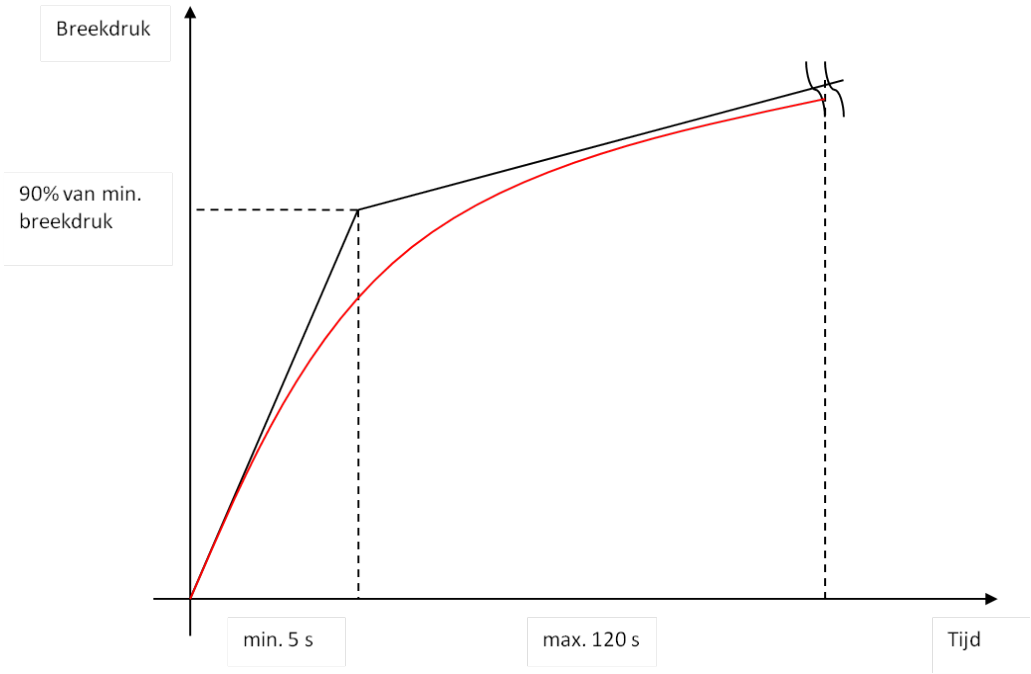
Tabel 3: Wettelijk minimum aantal breektesten per batch.

Aantal stuks per batch	Aantal breektesten
Minder dan 10	2
10 tot 15	3
16 tot 30	4
31 tot 100	6
101 tot 250	4 % met een minimum van 6
251 tot 999	3 % met een minimum van 10
1 000 en meer	Minimum 30

De norm schrijft voor dat de druk op de breekplaat tijdens een breektest 90% van de minimale breekdruk moet kunnen verdragen. De tijdsduur tot dit percentage moet minimaal 5 seconden in beslag nemen. Vervolgens dient de druk lineair toe te nemen. Het meetapparaat moet in een zo klein mogelijke resolutie worden ingesteld. De breekplaat moet in maximum 120 seconden, gemeten ten opzichte van 90% van de minimale breekdruk, breken. De breektesten dienen steeds plaats te vinden bij een temperatuur gelegen tussen 15°C en 30°C.

Figuur 20 geeft het verloop weer van de druk tijdens een breektest zoals de norm het voorschrijft. De rode lijn geeft het drukverloop weer zoals het praktisch zal voorkomen.

[9] Veiligheidsvoorzieningen voor bescherming tegen ontoelaatbare overdruk - Deel 2: Veiligheidsvoorzieningen met een breekplaat (ISO 4126-2:2003)(+AC:2004+2006),



Figuur 20: Verloop druk bij een breektest

(Part 2: Brusting disc safety devices, 2004)

4.6 Vraag van de markt

Tabel 4: Typische vraag van de markt voor SD-RO per jaar, onderverdeeld in breekdruk en afmetingen.

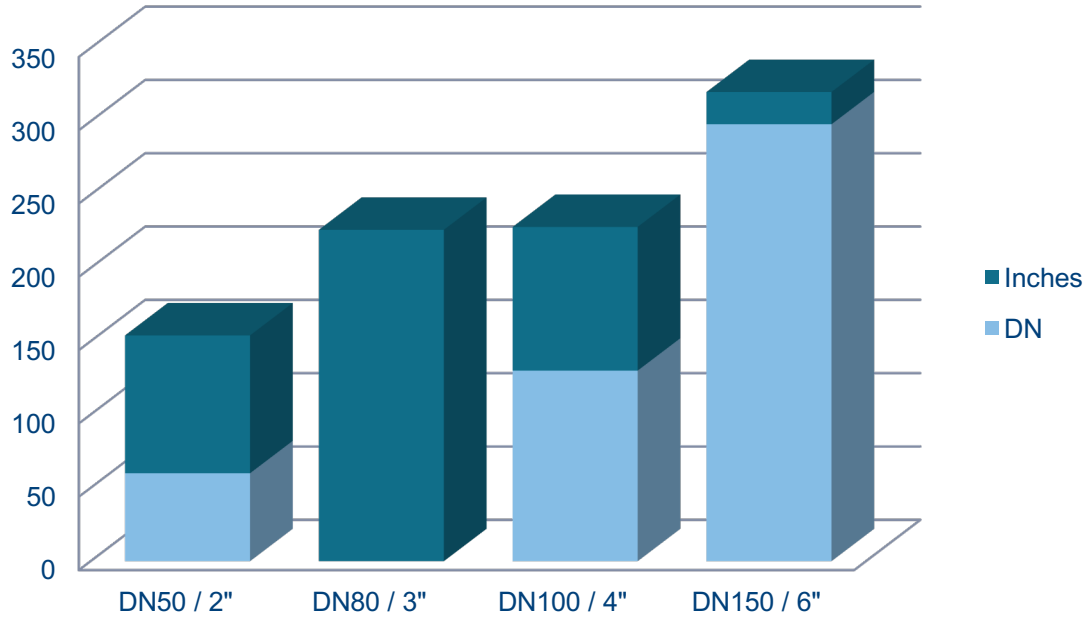
Gevraagde druk in BARG	Aantal
3,1	28
6	193
7	80
8	272
8,5	20
8,8	3
9	69
9,5	14
10	114
15,5	20
15,8	30
18	24
20	51

Gevraagde afmetingen	Aantal
2"	94
DN50	60
	154
3"	226
DN80	0
	226
4"	98
DN100	130
	228
6"	22
DN150	298
	320

De meest voorkomende breekdrukken zijn 6, 8 en 10 barg[10], af te lezen in Tabel 4 en Figuur 21. Samen vertegenwoordigen ze 63,1 % van de vraag. De kleinst gevraagde breekdruk bedraagt 3,1 barg en de hoogst gevraagde breekdruk 20 barg.

Wat de afmetingen betreft, verloopt de verdeling meer gespreid. De kleinste afmeting die verkocht wordt, is de twee inch. Bij deze afmeting ligt het aantal ook het kleinst. Drie en vier inch worden ongeveer evenveel verkocht en de meest verkochte afmeting bedraagt zes inch. Deze afmeting is goed voor 30% van het marktaandeel van de SD-RO.

De gemiddelde werkingstemperatuur van de SD-RO, die de markt vraagt, bedraagt 20°C. Er is tot nu toe een maximale werkingstemperatuur van 50 °C gevraagd. Vanaf 2010 tot en met 2015 werden in totaal 928 breekplaten (type SD-RO) verkocht.



Figuur 21: Aantal breekplaten (type SD-RO) per afmeting

(Van Thienen, 2016)

[10] bar gauge of overdruk

5 ANALYSE TESTRESULTATEN SD-RO MECHANISCH GESCOORD

Zoals eerder aangegeven moeten discs (resp. assemblages) van eenzelfde lot getest worden vooraleer die geschikt zijn voor verkoop. Alle data van de breektesten op discs en assemblages worden bewaard. Met behulp van deze data, waarvan de eerste meting plaatsvond in augustus 2009 en gedurende 5 jaar lang doorliep, wordt getracht een overzicht te krijgen van één bepaald type breekplaat, nl. de Poly-SD. Met de kennis uit deze resultaten kan de SD-RO verbeterd worden met betrekking tot de spreiding, de materiaaldikte en nog enkele andere parameters.

Dit hoofdstuk beschrijft enkel de methode voor de analyse. De volledige analyse, inclusief cijfers en gevoelige informatie, is enkel binnen Fike Europe bekend gemaakt.

5.1 Doel

Het eerste deel van de analyse onderzoekt de spreiding van de breekdruk van zowel disc als assemblage. Aan de hand van de resultaten, worden factoren gezocht die de spreiding veroorzaken.

Het tweede deel gaat na of er een verband bestaat tussen de breekdruk van een disc en een assemblage.

5.2 Verklaring van nummering

Er is een selectie gemaakt van de Poly-SD's vervaardigd uit materiaal Inconel 625, dit materiaal zal later ook gebruikt worden voor de SD-RO.

De eerste drie cijfers geven het type ontwerp weer, de drie daaropvolgende cijfers zijn een weergave voor de afmetingen/design van de breekplaat, de volgende twee cijfers stellen het materiaal voor waaruit de breekplaat geproduceerd is en de laatste drie cijfers geven de sequentie van de breekvolgorde, de eerste ontwerpbreekdruk krijgt 001 toegekend, de volgende zal 002 toegekend krijgen.

Een voorbeeld: 60293776001

- 602 geeft weer dat het om een breekplaat gaat van het type Poly-SD,
- 937 heeft betrekking op de afmeting alsook op de soort tekening: disc, assemblage, etc.
- 76 stelt Inconel 625 voor, het gebruikte materiaal voor de breekplaat type SD-RO,
- 001 duidt aan dat het om een eerste ontwerp gaat.

5.3 Analyse en resultaten

Alvorens een analyse toe te passen, dienen eerst alle data omgevormd te worden naar een vereenvoudigde structuur. Bij elk resultaat van een breektest van een disc of assemblage moet de score load en de score thickness vermeld worden. De operator beoordeelt elke disc (resp. assemblage) in een Excel document met een bepaalde kleur. Tabel 5 is een verklarende tabel:

Tabel 5: Verklarende tabel voor interpreteren van testresultaten.

Positief resultaat	DISC OK
	ASSEMBLAGE OK
Negatief resultaat	DISC NOK
	ASSEMBLAGE NOK
Afgeleverde disc	
Afgekeurde disc	X

Aangezien de testresultaten niet over één bepaalde breekplaat gaat, maar over Poly-SD's[11] met alle mogelijke afmetingen en breekdrukken, is er telkens een procentuele afwijking ten opzichte van hun nominale genomen. Zo kunnen de verschillende breekplaten onderling vergeleken worden.

De klant heeft de keuze tussen een aanspreektolerantie van 5 of 10%.

Opmerking: zoals reeds vermeld is de volledige analyse, inclusief cijfers en gevoelige informatie, is enkel binnen Fike Europe bekend gemaakt.

5.4 Conclusies af te leiden uit de analyse

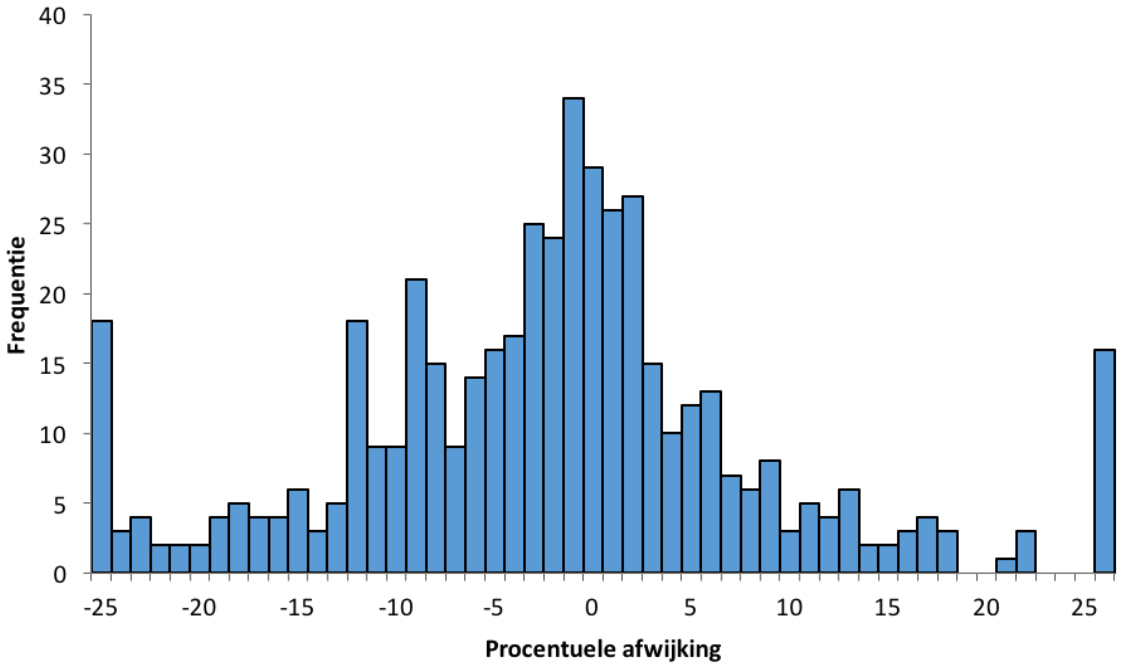
1. Het uitvalspercentage was niet optimaal.
2. De operator moet zelf beoordelen wanneer een breektest van een disc of assemblage voldoet indien het op de grens van het tolerantiegebied ligt. Uit resultaten blijkt dat sommige operatoren 'onterecht' breekplaten afkeuren omdat hun testresultaten dicht tegen de tolerantiegrenzen liggen. Andere laten testresultaten op de tolerantiegrens probleemloos door. Deze beslissing is operatorafhankelijk en dus subjectief.
3. Een menselijke fout is niet te vermijden. Deze kan plaatsvinden bij de omzetting tussen eenheden (bar naar PSI) of een typfoutje in het Excel document. Dit zorgt mogelijk voor afwijkingen binnen de testresultaten.

---

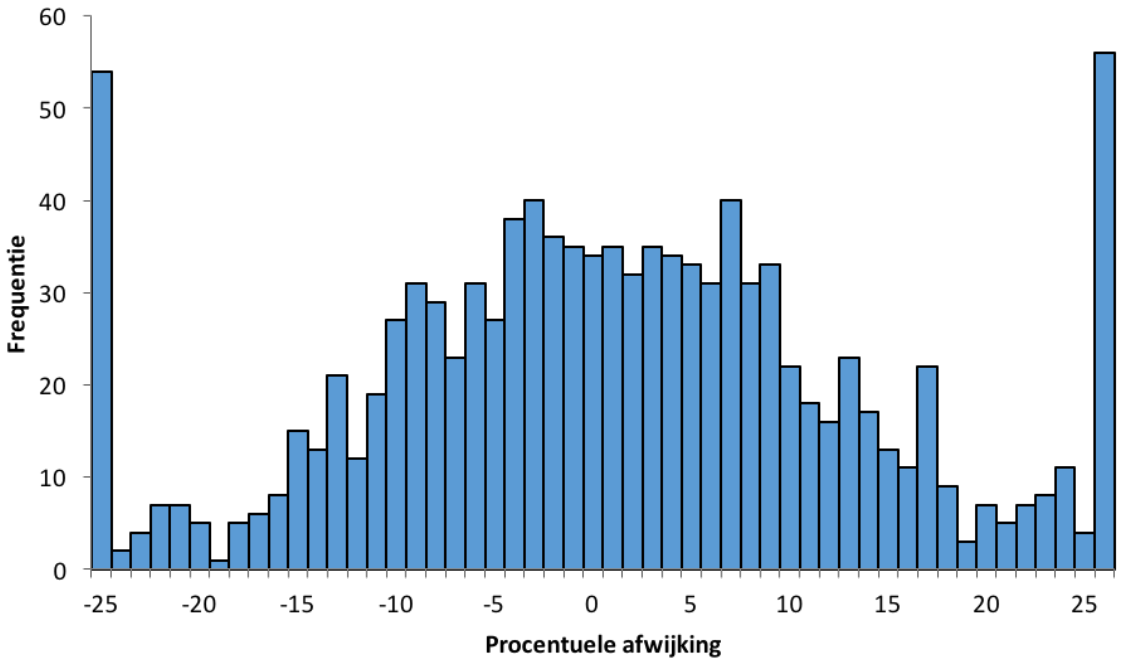
[11] Een SD-RO is een assemblage. Het eindproduct bevat een Poly-SD. Daardoor is het mogelijk om de kennis van de Poly-SD te gebruiken om de SD-RO te analyseren.

4. Er zijn zowel **<u>breektesten</u>** op 5 als op 10%.
    a. Bij de productie op basis van 5% tolerantie is een duidelijke piek waar te nemen rond 0 % afwijking, wat een betere ligging van de resultaten weergeeft. Dit duidt mogelijk op een betere procesbeheersing. Figuur 22 geeft het histogram voor 5% tolerantie.
    b. Bij 10% tolerantie is de procentuele afwijking meer afgevlakt. De resultaten leunen minder aan bij de nominale waarde. Figuur 23 geeft het histogram voor 10 % tolerantie.

Statistisch gezien sluit de productie van 10% tolerantie minder aan bij de normale verdeling.



Figuur 22: Histogram van de procentuele afwijking ten opzichte van de nominale breekdruk van de breekresultaten bij een toegestane tolerantie van 5 %. Er is een duidelijke piek waar te nemen rond de 0 % afwijking.



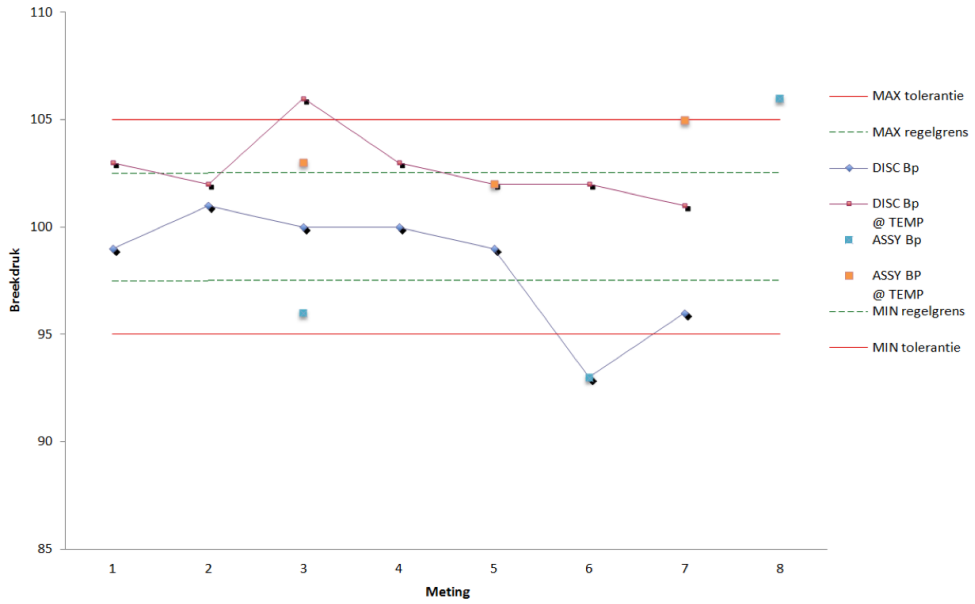
Figuur 23: Histogram van de procentuele afwijking ten opzichte van de nominale breekdruk van de breekresultaten bij een toegestane tolerantie van 10 %.

Dit valt mogelijk te verklaren doordat bij 5% sneller wordt bijgestuurd bij de productie. Bij 10% tolerantie zal er minder snel bijgestuurd worden omdat de grenzen meer open liggen.

Om onafhankelijk van de operator, op steeds dezelfde wijze te werken, kan er bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van een regelkaart (Figuur 24). Daarbij kan een onderscheid gemaakt worden tussen regelgrenzen en controlegrenzen.

- Een regelgrens geeft een indicatie als de productie goed is of dat er moet bijgestuurd worden.
- Een controlegrens dient weer te geven of het product al dan niet geschikt is voor de klant. Het product wordt aanvaard of afgekeurd.

Door gebruik te maken van een visuele controle is de test minder afhankelijk van 'het buikgevoel' van de operator. De ene operator zal sneller bijsturen dan de andere. Deze methode zal ook sneller systematische fouten blootleggen.



Figuur 24: Voorbeeld van een regelkaart met ±10% tolerantie en enkele willekeurige meetpunten.

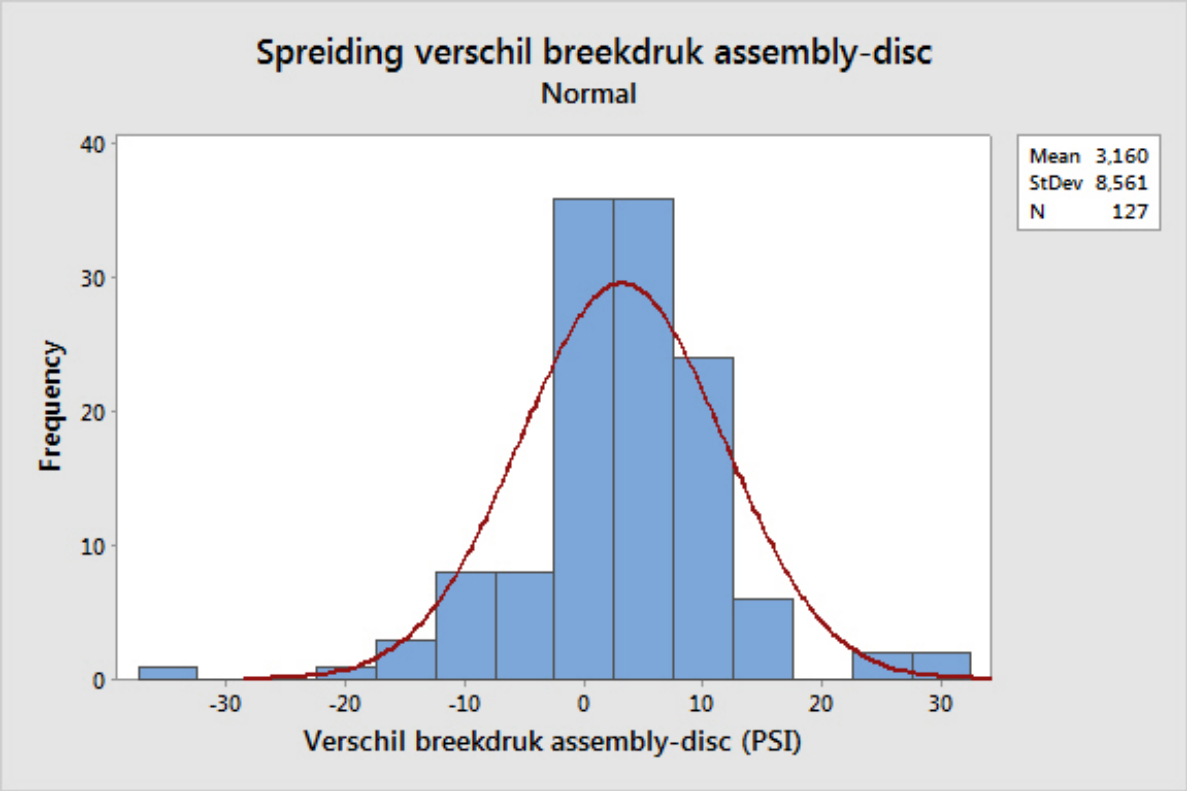
5. Bij de **<u>assemblage testen</u>** zijn er zowel bij 5 als bij 10% tolerantie betere benaderingen van de normale verdeling. Opgemerkt: moet worden dat er van een aantal types opmerkelijk minder testresultaten zijn waardoor een veralgemening niet helemaal correct is.
6. De breekdruk van een assemblage scoort gemiddeld hoger dan de breekdruk van een losse disc[12].

5.5 Verband tussen disc en assemblage

Het verband kan nagegaan worden door het absolute verschil te nemen van het breekresultaat van de assemblage en het bijhorende resultaat van de disc. Is het verschil positief, dan komt dit neer op een stijging van de breekdruk bij een assemblage ten opzichte van een disc. Is dit negatief, dan duidt dit op een afname in breekdruk. Belangrijk is hierbij dat er geen gebruik gemaakt wordt van procentuele afwijkingen. Hierdoor lijkt eenzelfde absolute afwijking bij een hogere breekdruk minder invloed te hebben dan bij een lagere nominale breekdruk.
Mogelijk is er geen eenduidig verband te bewijzen doordat er minder testen gebeurd zijn waar zowel breektesten voor disc als assemblage plaatsvonden.

[12] Vermoedelijk is de oorzaak hiervan de centrering. Deze werd manueel uitgevoerd met mogelijk een lichte afwijking. Deze centreringsfout kan aan de basis liggen van afwijkende breekresultaten.

Hieruit blijkt dat, met uitzondering van enkele uitschieters, het absolute verschil tussen de grootste en kleinste breekdruk steeds gelijk blijft. Met een stijgende nominale druk verschuift het verschil. Het verschil zal minder positief zijn.



Figuur 25: Spreiding van de verschillen tussen breekdruk bij een disc en assemblagetest.

6 HYPOTHESES

De spreiding van de breekresultaten is niet te wijten aan één factor. De oorzaak ligt bij een combinatie van verschillende factoren. Ook zal de invloed van de ene factor sterker doorwegen dan de andere. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van alle factoren die mogelijk een invloed hebben op de spreiding. In samenspraak met productie hebben we gekozen om de belangrijkste hypotheses na te gaan, namelijk het verschil tussen disc assemblage, het ontwerp van de houders en de centrering van de disc ten opzichte van de houder.

6.1 Productieproces breekplaat

Hieronder zijn enkele hypotheses opgesomd die mogelijk een invloed hebben op de spreiding van de breekresultaten. De hypotheses zijn bedenkingen die nader onderzocht kunnen worden voor een betere productiebeheersing van het productieproces.

6.1.1 Persinstallatie

De persinstallatie wordt in de huidige productiemethode zowel gebruikt voor het mechanisch scoren als voor de breektesten. Opmerking: later zal bij laserablatie de pers enkel de functie voor breektesten vervullen.

6.1.1.1 Doorbuiging van de constructie van de pers

De spreiding van de breekresultaten kan mogelijk te wijten zijn aan doorbuiging van de persconstructie. Bij een stijgende druk (resp. score load) neemt de belasting op de constructie toe. Deze belasting wordt opgevangen door de metalen tafel waarop de pers gemonteerd is, de zuiger, de cilinder, de dichtingen, de ophanging van de cilinders, de messen, de chimes.... Bij hogere score load is de vervorming mogelijk hoger dan bij lagere score load, waardoor de invloed van deze parameter een ander effect heeft.

6.1.1.2 Evenwijdigheid van de persvlakken

Door belasting van de hydraulische pers is het mogelijk dat de persvlakken hun evenwijdigheid verliezen. Hierdoor wijzigt de drukverdeling van de messen met variatie van groefdiepte binnen eenzelfde disc. Hierdoor kan mogelijk de breekdruk wijzigen.

6.1.1.3 Vervuiling van de persvlakken

Vervuiling van de persvlakken kan afwijkingen geven in discs. Indien er tijdens het productieproces spanen of onzuiverheden tussen persvlak en werkstuk blijven kleven geeft dit afwijkingen van het originele ontwerp.

6.1.1.4 Bedrijfsduur van de persinstallatie

De bedrijfsduur van de pers kan een verschil opleveren in productieparameters. Bij langdurig gebruik warmt de pers op.

Een stijging van olietemperatuur resulteert in een daling van de viscositeit van de gebruikte olie. Deze variabele zal een afwijking geven tijdens productie aangezien warmere olie sneller rondgepomt kan worden. De pers zal dus sneller zijn ingestelde druk bereiken, doordat de pers deze sneller bereikt, wordt het snijgereedschap een langere tijd met de ingestelde druk in het materiaal geduwt. Deze tijd kan mogelijk bepalend zijn voor de vervorming van het materiaal. Een temperatuursstijging heeft ook een invloed op de wrijvingseigenschappen van de installatie.

6.1.2 Materiaaleigenschappen

6.1.2.1 Elastisch gedrag van het materiaal

Tijdens het productieproces worden de messen in het werkstuk geduwd. Als de persduur bereikt is, worden de messen van het materiaal gehaald en bestaat de kans dat het materiaal terugveert en de score minder diep is dan werkelijk gedacht.

6.1.2.2 Kwaliteit van het materiaal

Het gebruikte materiaal heeft een belangrijke invloed op het productieproces. De kwaliteit die de producent documenteert, kan afwijken van de werkelijkheid. De kwaliteit is vaak gelegen in een interval dat volgens normen opgelegd is omdat periodiek produceren kleine afwijking kan opleveren. Indien er in het materiaal kleine onzuiverheden ingesloten zitten, verschillen de mechanische eigenschappen mogelijk van de opgegeven eigenschappen door de producent. Ook is het mogelijk dat binnen eenzelfde lot een verschil is in materiaalkwaliteit. Ook de spreiding op de nominale plaatdikte kan in vraaggesteld worden. Een afwijking van de plaatdikte heeft een directe invloed op de groefdiepte.

6.1.2.3 Chimes

Naast een verschil in plaatdikte binnen eenzelfde lot, is de werkelijke afmeting van de gebruikte chimeringen in vraag te stellen. Indien er door veelvuldig gebruik, of door zware belasting, een lichte afwijking optreedt, kan dit invloed hebben op de groefdiepte.

6.1.2.4 Plaatdikte

Bij de productie van twee breekplaten met een verschillende breekdruk, maar een identieke plaatdikte, zullen de spanningen een belangrijke invloed hebben op de breekdruk. Bij een diepere score in een materiaal ontstaan er meer spanningen. Deze spanningen hebben een effect op de

breekdruk. De invloed hiervan kan een belangrijke factor zijn voor de keuze van de gebruikte plaatdikte.

6.1.3 Snijgereedschap

6.1.3.1 Verschil radius

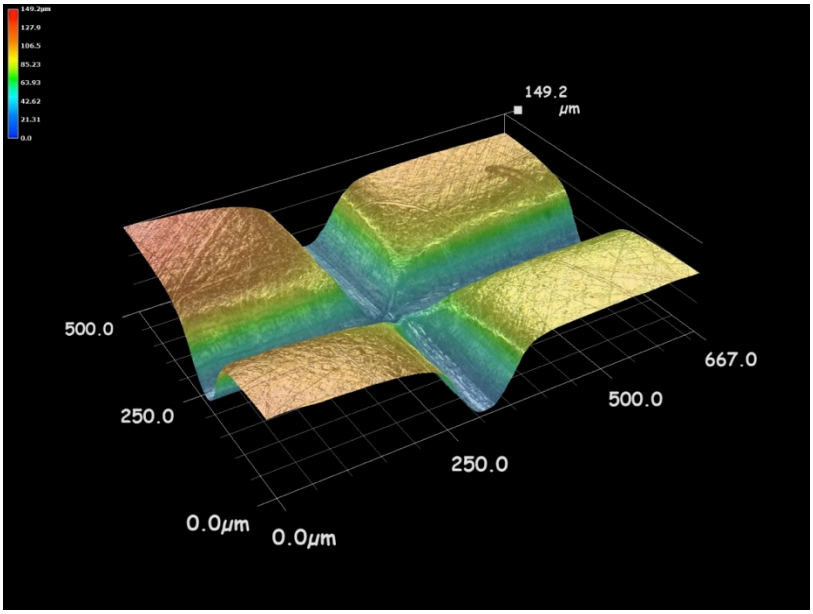
De radius van de messen is afhankelijk van de materiaaldikte. Bij materiaal met een dikte groter dan 0,021 inch, bedraagt de afrondingstraal 0,1 mm. Een materiaaldikte kleiner van 0,021 inch heeft een straal gelijk aan 0,05 mm. Dit verschil in radius kan een invloed hebben op de kerfwerking.

6.1.3.2 Gebruik van snijolie

Het sporadisch gebruik van snijolie kan zorgen voor een verschil in score dieptes. Indien een messenset voorzien is van snijlolie, neemt de wrijving af tussen de messen en het werkstuk. Dit kan leiden tot een andere groef, wat resulteert in meer spanningen en een lagere breeksterkte, en resulteert in een afwijking ten opzichte van de nominale breekdruk.

6.1.3.3 Montage van het snijgereedschap

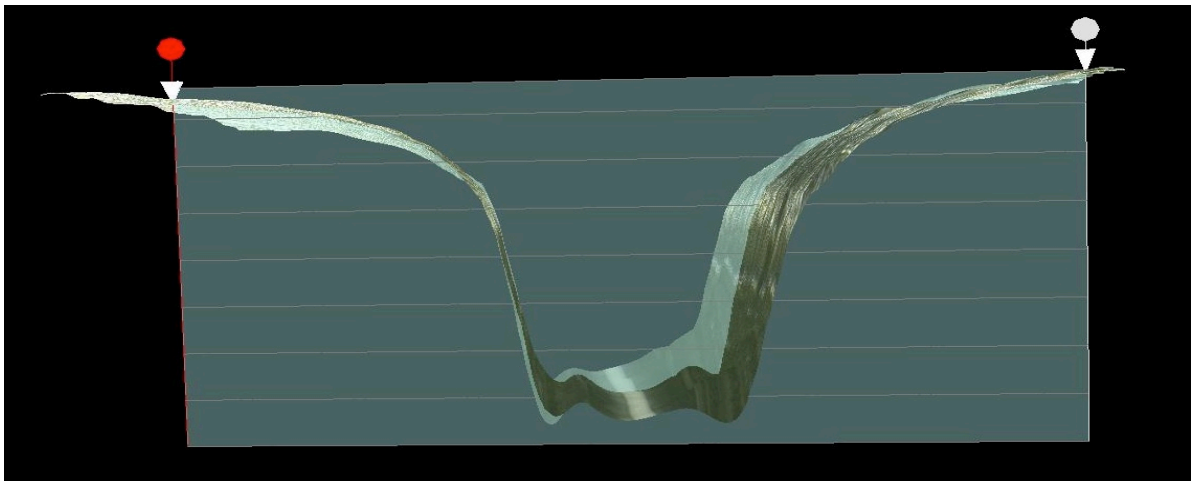
De manuele montage van de messen onder een microscoop (Figuur 26) geeft een variatie in productie. Afhankelijk van de nauwkeurigheid, precisie en de exacte handelingen van de operator resulteert dit in een ander snijpunt bij het type corss-scored. Indien er een imperfectie plaatsvindt, blijft er een kam staan. Deze kam kan mogelijk resulteren in een verschil in reactie van drukbelasting/cycles.



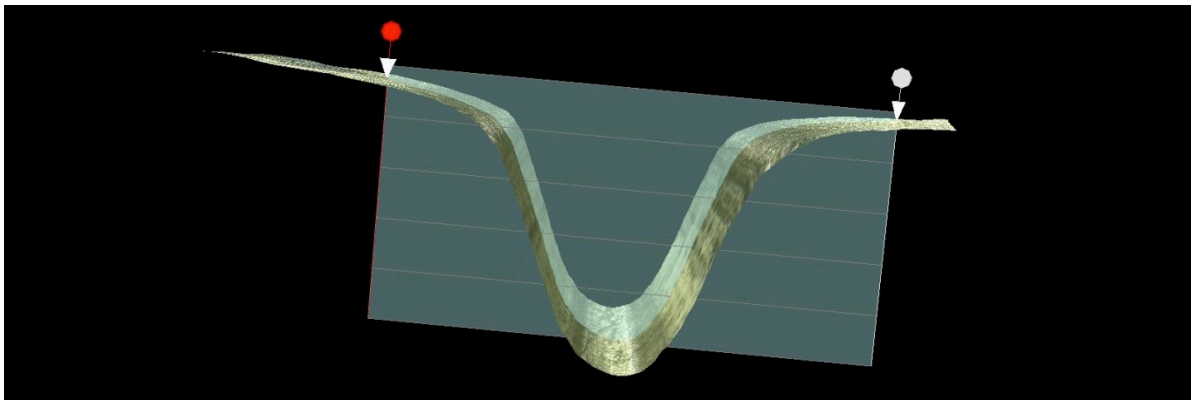
Figuur 26: Vergroting van het snijpunt van SD-RO, 1 inch - 316L 1.4404

6.1.3.4 Slijtage van het snijgereedschap

De slijtage van messen is ongustig voor het productieproces. De afname van meshoogte zal resulteren in een verschil in snedediepte. Dit zou de diversiteit van breekdrukken van eenzelfde type disc verklaren. Ook de kwaliteit (materiaal, radius, afwerking, opervlakteruwheid, vorm, tophoek etc.) van de geslepen messen bepaalt de vorm van de groef. Deze bepaalt de reactie van de disc. Figuur 27 en Figuur 28 tonen een verschil in snedekwaliteit. Bij scherpe overgangen treedt kerfwerking op. Dit resulteert in een sterke verlaging van de breekdruk, sterk gelegen onder de minimale treksterkte.



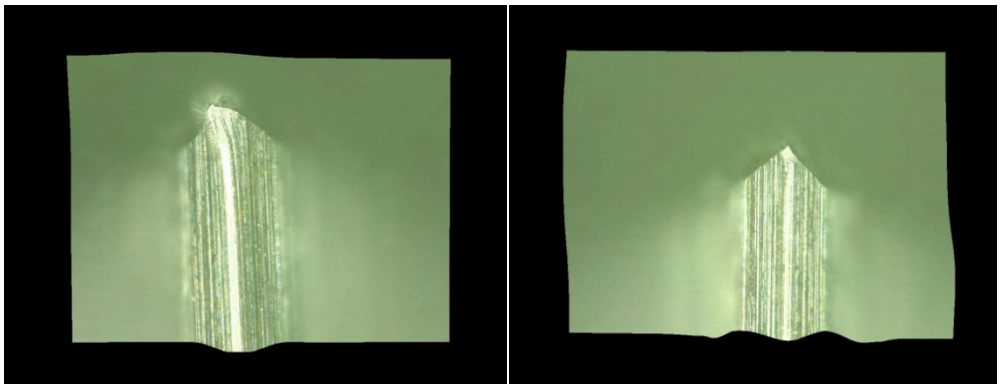
Figuur 27: Vergroting van afgekeurde snede. Het verloop heeft een kenmerkende W-vorm, wat een negatieve invloed heeft op de stabiliteit van de breekplaat.



Figuur 28: Vergroting van een correcte snede. Het verloop heeft een typerende V-vorm. Door de vloeiende overgangen voorheen de groef, is een betere stabiliteit gegarandeerd.

6.1.3.5 Kwaliteit van nieuw snijgereedschap

De kwaliteit van nieuwe messensets bepaalt de maximum haalbare snedekwaliteit. Figuur 29 toont een nieuwe messenset die nog niet werd gebruikt, maar al wel een afwijking op terug gevonden werd. Hierdoor is een perfect montage niet meer mogelijk. (cfr. 6.1.3.1)



Figuur 29: Vergroting van neuspunt van een ongebruikte messenset, met en zonder beschadiging

6.1.4 Meetapparatuur

De herhaal- en meetnauwkeurigheid van de meetapparatuur kan nog verder onderzocht worden en mogelijke afwijkingen hierop kunnen verminderd/opgelost worden.

6.1.5 Montage van assemblage

6.1.5.1 Invloed van een puntlas

Bij het monteren van de assemblage wordt er gebruik gemaakt van puntlassen. Het lasprocedé heeft het typerend kenmerk om spanning toe te voegen in het materiaal. Dit kan een mogelijke verklaring geven voor het verschil in breekdruk tussen disc en assemblage.

6.1.5.2 Centrering disc

Bij de montage van de samenstelling is er de mogelijkheid dat de disc niet concentrisch geplaatst wordt tussen de holddown en de base. Deze imperfectie kan een andere werking van de breekplaat veroorzaken. Hier is nadien een tooling voor ontworpen om dit te vermijden. (cfr. 7.15)

6.1.5.3 Afronding holddown en base

De afrondingstralen van holddown en base zijn belangrijk voor het gedrag van de breekplaat. Een juiste montage van de ringen dringt zich dan ook op.

6.1.6 Operatorafhankelijkheid

Afhankelijk van de intrepretatie van de meetresultaten door de operator zal het productieproces anders gestuurd worden. De reactie van de operator op dit proces bepaalt de kwaliteit van de discs. Zo kan mogelijk de ene operator sneller tevreden zijn met een breekresultaat dan een andere operator.

6.1.7 Overige invloeden

Welk effect heeft de productiesnelheid op de spreiding van meetresultaten en staat dit in verband met de spreiding van breekresultaten? Zorgt een hogere snelheid voor een vergroting van spreiding van testresultaten?
Moet er voldoende tijd voorzien worden zodanig dat de materiaalstructuur de tijd krijgen om zich te vormen of is deze invloed verwaarloosbaar?

6.2 De testprocedure

6.2.1 Lekkage tijdens het testen

Een disctest maakt gebruik van perslucht. Onder de disc is een afdichting voorzien die eventuele lekken moet voorkomen. Bovenaan de disc, is geen afdichting voorzien maar is het ontwerp zo opgesteld dat het metaal van de disc rechstreeks op het metaal van de pers duwt om lekkage te voorkomen. Mogelijk is door slijtage een kleine lek niet uit te sluiten.

6.2.2 Wijziging hold down load

De hold down load van een disctest wordt bewust verschillend gekozen van de hold down load van een assemblage test. Door deze wijziging zorgt de operator ervoor dat het resultaat van de assemblagetest binnen de tolerantie blijft.

6.2.3 Holddown ring

Bij de breektest van een disc duwt de holddown ring de disc op de base. Hierbij is de ring van de holddown schuin afgewerkt om lekkage te beperken. Dit berust op het principe van metaal-op-metaal dichting. Bij de breektest van een assemblage heeft de holddown ring een rechte afwerking. Een teflon seal is aangebracht en vervult nu de functie van dichting.

Een andere soort van inklemming kan een andere reactie op de krachten bewerkstelligen waardoor een breekplaat anders zal reageren.

7 FEMTOTECHNOLOGIE

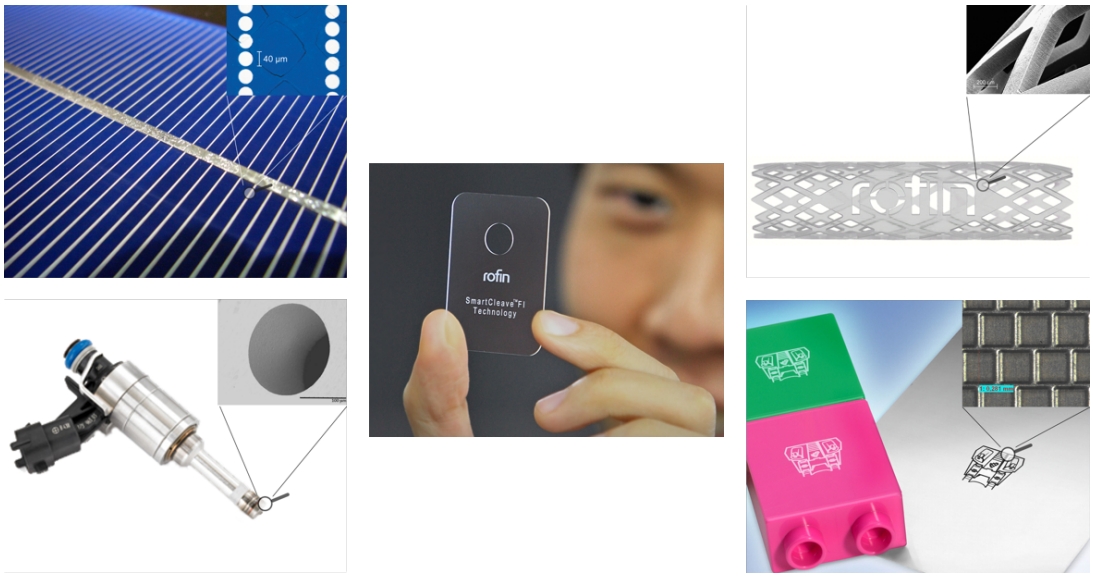
7.1 Technologie

Koud laser materiaal bewerking met ultrakorte[13] puls lasers is één van de meest veelbelovende nieuwe technologieën voor high-precision snijden, structuren en het boren van bijna alle soorten materiaal zonder thermische schade. Dit maakt het mogelijk om voorheen onmogelijke eigenschappen en nieuwe toepassingen te realiseren. Slechts minimale of geen post-processing is nodig.

De Star Femto FX is ideaal afgestemd op industrieel materiaal verwerking van de vragen in de elektronica-, halfgeleider-, micro-technologie, gebruikt in medische apparatuur en andere industrieën.

7.1.1 Typische toepassingen met Femtolaser

- Snijden van materialen zoals metaal, kunststof of brosse materialen zoals glas of saffier.
- Het boren van verschillende geometrieën (nl. conisch, elliptisch, …) met de hoogste precisie.
- Structureren van materialen in micrometer bereik zonder schade aan andere lagen toe te brengen.



Figuur 30: Toepassingen van koud laser materiaalbewerkingen met de Femtotechnologie

(Rofin-Baasel, 2016)

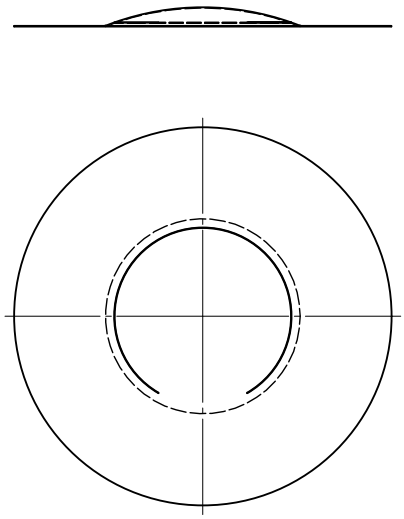
[13] Femto is het SI-voorvoegsel dat gebruikt wordt om een factor 10^{-15} aan te duiden. Het is afgeleid van het Deense *femten* wat vijftien betekent.

7.2 Doel

Het uiteindelijk doel is om met deze technologie breekplaten te produceren. De mechanische productie van SD-RO bereikt de grenzen van het maximale hoogst haalbare rendement. De uitval is vrij hoog en de processpreidingen op breekdrukken is niet optimaal. Door het blootleggen van enkele pijnpunten en het zien van nieuwe opportuniteiten bij gebruik van femtechnologie werd het verwachtingspatroon van de productie bijgesteld. Met de huidige methode kan aan deze nieuwe verwachting niet meer voldaan worden. Met een grondige studie zal nagegaan worden of deze technologie de tekorten van het mechanisch score kan elimineren.

7.3 Ontwerp

Het ontwerp van de SD-RO met laserablatie is gebaseerd op de oorspronkelijke werktekeningen van single hinge (C-vormige geometrie). Deze single hinge genoot de voorkeur door de vele voordelen met laserablatie. Figuur 31 toont het algemene ontwerp van de SD-RO. De bolling is in functie van de breekdruk.



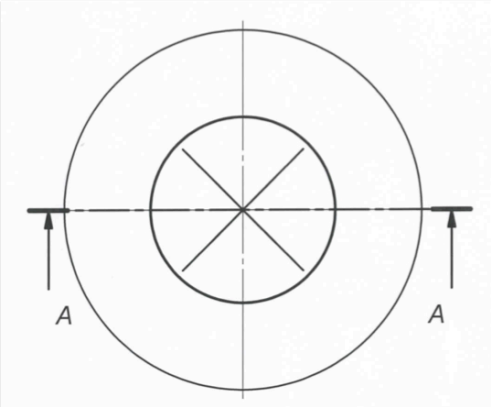
Figuur 31: Algemene ontwerptekening voor breekplaat van het type SD-RO. De bolling van de breekplaat is afhankelijk van breekdruk.

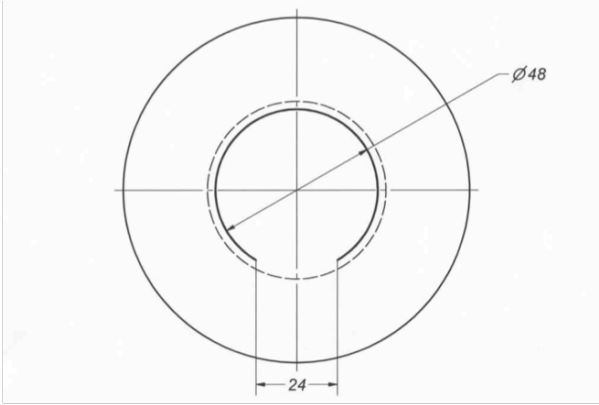
7.3.1 Vorm van de score

Aan de hand van bestaande tekeningen is het ontwerp voor de SD-RO voor ablatie bepaald. Bij de keuze van de score is geopteerd voor single hinge. Cross scored heeft als nadeel dat het snijpunt van de benen een mogelijke pinhole[14] kunnen opleveren. Deze pinhole zou met de juiste parameters wel kunnen weg gewerkt worden. Bijkomend is dat het risico op een gedeeltelijke opening vrij groot is. Dit is echter niet gewenst. Het

[14] Een diepere inbranding bij het begin of het einde van een groef.

voordeel van single hinge is dat een afwijking van de galvokop [15] gelijkaardig is voor de volledige doorsnede omwille van zijn concentrische karakter. Het risico op een gedeeltelijke openingen is gering. Echter is de afgelegde weg wel 30% groter.





Figuur 32: De linkse figuur toont de vorm van de traditionele cross scored. Rechts de vorm van single hinge (voor 2”).

7.3.2 Aantal lijnen

Omwille van de dieptebeperking van één lijn, zijn er meerdere lijnen naast elkaar geplaatst. Empirisch is getest hoeveel cirkelsegmenten naast elkaar nodig zijn met een optimale tussenafstand zodanig dat er een goede groef bekomen wordt. Belangrijk is dat de volgorde en de tussenafstand van groot belang zijn voor de kwaliteit van de groef (cfr. 7.7.7).

7.3.3 Gewenste voorwaarde

Het doel is om een groef te bekomen waarbij de overgangen steeds voldoende vloeiend verlopen om kerfwerking uit te sluiten. Belangrijk is ook dat de groef overal gelijkaardig verloopt omdat variatie in vorm kan leiden tot variatie in breekdruk. Tijdens het bollen van de disc mogen ook geen haarscheurtjes ontstaan. Deze haarscheurtjes kunnen de disc verzwakken, na veelvuldige wisselende blootstelling aan de werkdruk. Dit kan leiden tot een breekdruk die zich onder de werkdruk bevindt.

7.4 Specificaties

De laser kent tal van parameters. Echter is besloten om maar enkele parameters als variabele te gebruiken. (cfr. 7.7) Alle parameters laten variëren geeft een zeer onstabiel proces en risico op fouten.

---

[15] Lens die de laserstaal in- en uitschakelt en de gewenste richting geeft.

Een eerste prototype met laserablatie kent volgende specificaties:

Tabel 6: Productspecificaties van SD-RO voor eerste prototype bij laserablatie.

Type	SD-RO
Afmeting	1.5″ - 2″ - 3″ - 4″ / DN40 - DN50 - DN80 - DN100
Breekplaatmateriaal	Inconel 625
Procesdichting	AFM 34 / PTFE
Maximale werktemperatuur	200 °C
Beschermende deklaag	Nee
Verhouding tussen werkdruk en Minimale breekdruk	95%
Flensafmeting	ANSI 150 – 300 / DN10 – 40
Cyclische / pulserende belasting	Geschikt
Damptoepassingen	Geschikt
Vloeistoftoepassingen	Geschikt
Geen fragmentatie	Geschikt
Zittingsconfiguratie	Vlak
Gebruik tussen standaard flenzen	Ja

(Fike Engineering, Tables)

7.5 Normering

De normering is analoog met 4.5 Normering.

7.6 Opstarten StarFemto FX

7.6.1 Het gebruik van matrixableren

Voor een juiste opstartprocedure, volg de volgende stappen:

1. Draai de hoofdschakelaar in de juiste positie, positie **I**. [Computer start op]
2. Meld je aan op de PC.
    a. [Computer meldt zich aan en start bijhorende software op]
3. Druk de knop **System start in.** [De knop lichtop, de deur opent]
4. Druk op **Homing**. [Achtung, wollen Sie…]
5. Druk op OK. [Deur sluit automatisch]
6. Druk op Reset Error. [In de rode balk verschijnt *OK*]
7. Ga naar het tabblad **MPS Applikation**.
8. Druk op **Auto** (F9).
9. In de werkbalk komt **Active Program** tevoorschijn. Duw op het blauwe gedeelte. Kies het juiste CNC programma en bevestig met **Open.**

10. Indien nodig kan de NC code nog gewijzigd worden door **Edit.NC** te selecteren.
11. Bewaar de aanpassingen.
12. CTRL + ALT + 2: Ga naar de applicatie Visual Marking Controller VMC2.
13. Druk op **F3** en geef het wachtwoord op.
14. Ga naar het tabblad **PIO Layout selection**.
15. Selecteer een lay-out voor de juiste binaire waarde. (Tot nu toe steeds gekozen voor waarde 1)
16. Bevestig door op **OK** te drukken
17. Kies in de drop down list de juiste lay-out voor een tweede maal.
18. De lasermachine is nu juist ingesteld. Druk **CTRL + ALT + 1**.
19. Kies **Start** (F9) om de productie te starten.

7.6.2 Rechtstreeks vanuit Visual Laser Marker

Indien rechtstreeks vanuit VLM gewerkt wordt, wijkt de procedure een beetje af. De eerste vijf stappen zijn analoog, nadien moeten nog bijkomend volgende stappen uitgevoerd worden:

1. Stel de juiste **M_z-waarde** in. Standaard moet de lens een off-set van 61,9 mm hebben. Een juiste instelling wordt bekomen door bij deze waarde de dikte van het materiaal bij op te tellen.
    a. Maak gebruik van *Tip* indien een verplaatsing gewenst is zolang de drukknop van de gewenste richting is bediend,
    b. Maak gebruik van *Jog* indien een verplaatsing gewenst is van een op voorhand gekozen afstand in micrometers.
    c. De snelheid voor beide verplaatsingsmogelijkheden kan vermeerderd worden met een factor. Deze kan met behulp van een schuifbalk ingesteld worden.
2. Kies onderaan Auto (F9).
3. CTRL + ALT + 2. In het programma *LaserConsole* open je het tabblad *Laser*. Zorg dat *Enable Emission* is ingeschakeld.
4. Open *Visual Laser Marker*.
5. Laad het gewenste bestand in. Controleer de parameters.
6. Bewaar het bestand.
7. Klik op *Initialize Hardware*.
8. Klik op *Start Marking* (F9).

7.6.3 Algemene opmerkingen

Bij de opstart zal een buzzer te horen zijn. De machine controleert de stand van het koelwater. Deze toon duurt standaard enkele seconden. Blijft dit geluid aanhouden, controleer of het koelwaterpijl binnen de aangegeven grenzen ligt.

Deur kan geopende en gesloten worden door ***Safety Acknowledge*** [gele drukknop] en ***Process Start/Stop*** [witte drukknop] gelijktijdig te bedienen. Indien de computer actief is in de CNC-applicatie, kan de deur ook worden bediend met F3.

7.7 Parameters Femto

In deze paragraaf komen de parameters aan bod die kunnen gewijzigd worden bij het instellen van de Femtolaser. Om een idee te krijgen welke invloed elke parameter heeft, is voor elke parameter afzonderlijk de resulterende diepte en de breedte opgemeten. Met behulp van deze data zijn functies en karakteristiek opgesteld. Voor elke parameter is de optimale waarde geselecteerd met het oog op een stabiele werking van de laser, een beperkte productietijd en vloeiend verloop en vorm van de groef.

De uitwerking van de formules die de parameters voorstellen zijn in deze scriptie weergeven in hun algemene vorm. De algemene schrijfwijze van de formules kadert in het beschermen van bedrijfsgevoelige informatie.

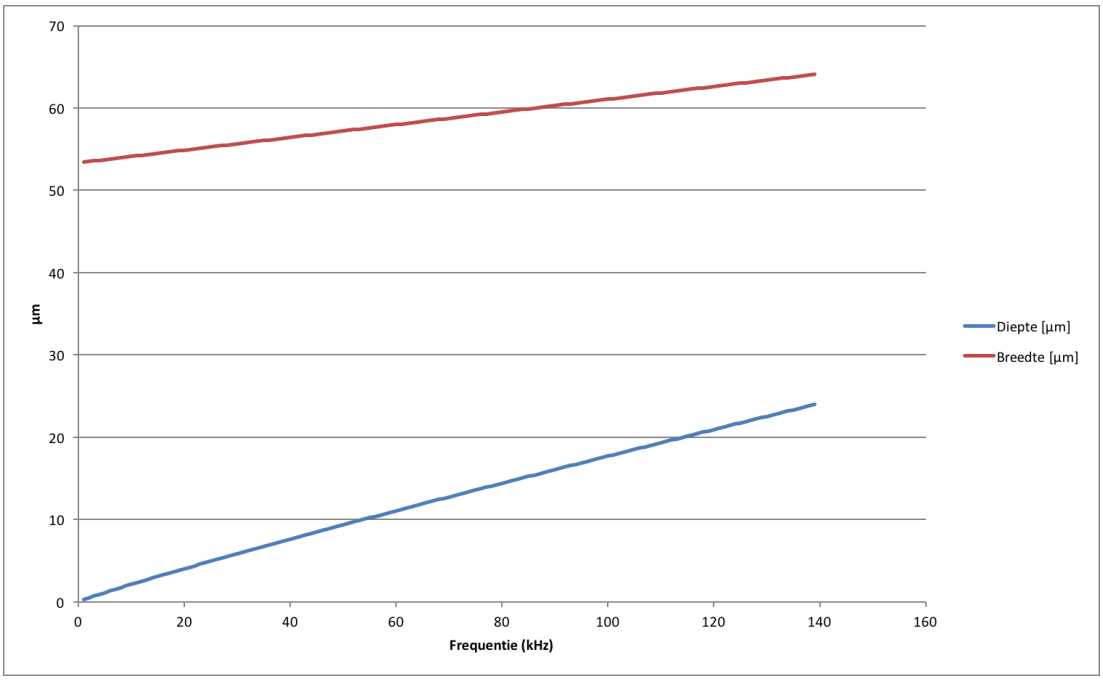
7.7.1 Frequentie

De Star Femto FX heeft een bereik van één enkele puls tot een frequentie van 1000 kHz. Een toename van de frequentie resulteert in een bredere en diepere ablatie. Met behulp van verschillende meetpunten werden volgende vergelijkingen bekomen. De overige parameters dienen constant te blijven. Figuur 33 toont het verband van de breedte (resp. diepte) van de groef in functie van de frequentie.

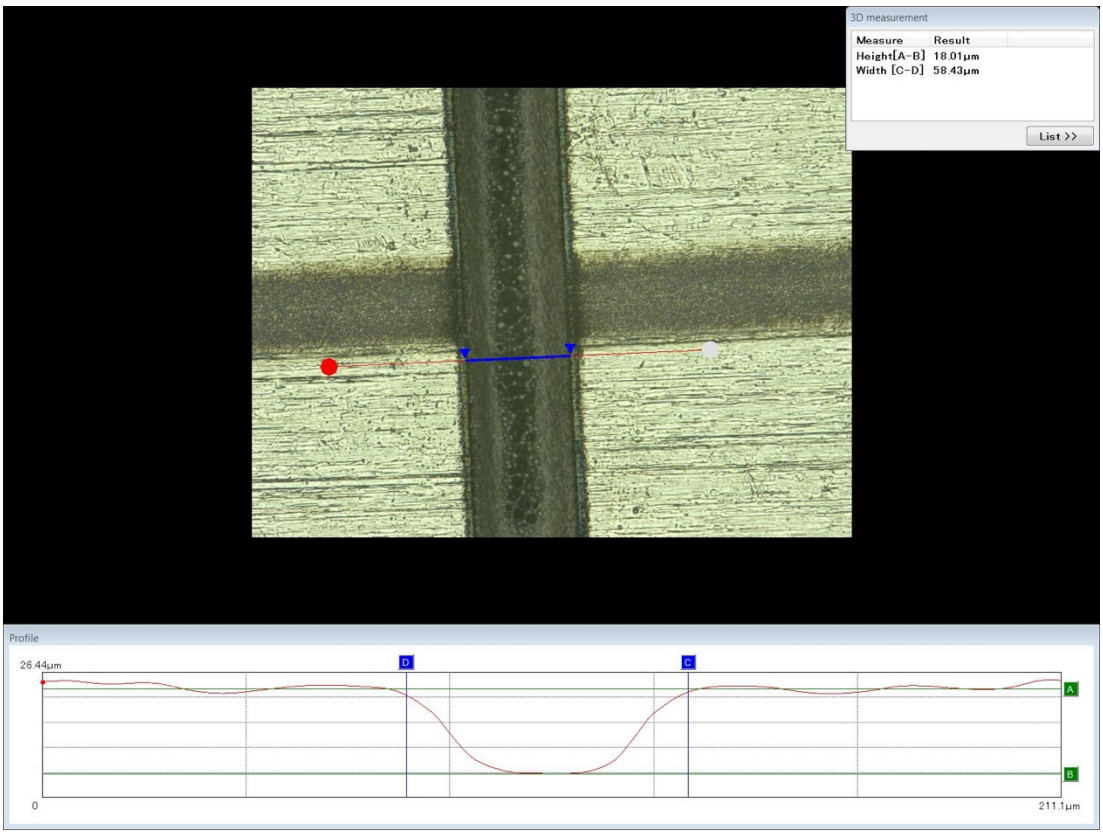
$$diepte = d_1 \cdot f^{d_2}$$

$$breedte = b_1 \cdot f + b_2$$

In deze formule stelt f de frequentie voor, uitgedrukt in kHz.



Figuur 33: Invloed van de frequentie op de breedte en de diepte van een groef.



Figuur 34: Doorsnede van een groef met een frequentie van 120 kHz. De diepte (groen) en de breedte (blauw) zijn opgemeten.

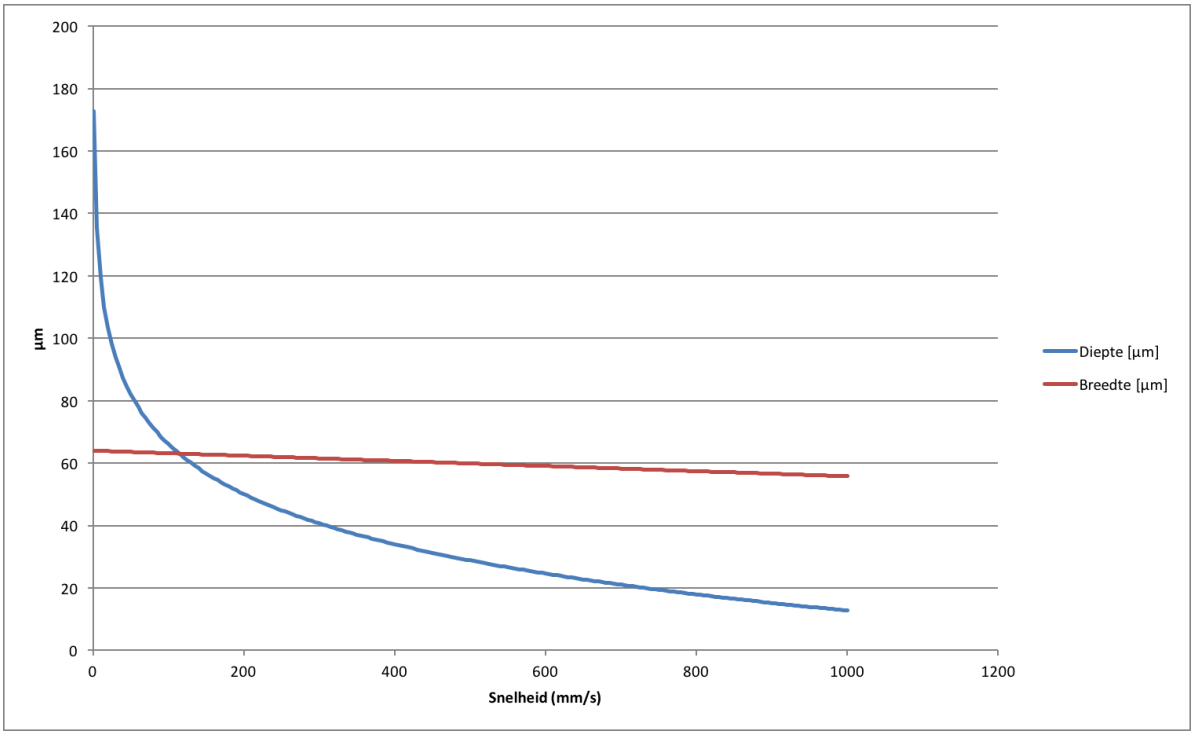
7.7.2 Snelheid

Een verhoging van de snelheid vertaalt zich in een lineaire versmalling van de groef. De diepte vertoont een wiskundig verband volgens een natuurlijke logaritme. Enkel bij lage snelheden zal een sterke verandering optreden. Bij hogere snelheden is het verschil kleiner en quasi lineair zoals Figuur 35 weergeeft.

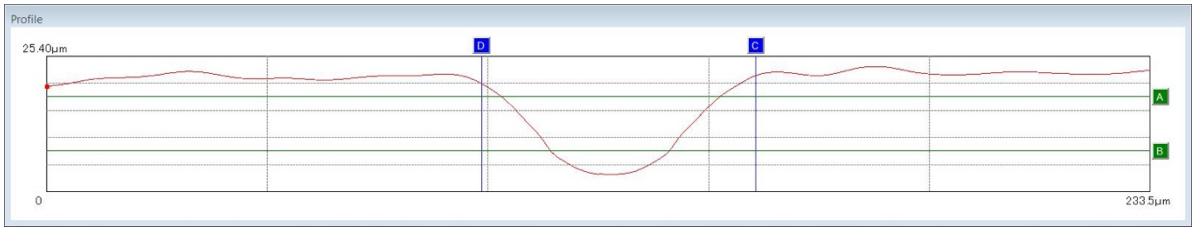
$$Diepte = d_1 \cdot ln(v) + d_2$$

$$Breedte = b_1 \cdot v + b_2$$

De snelheid v wordt ingevuld in mm/s.



Figuur 35: Invloed van de snelheid op de breedte en de diepte van een groef.



Figuur 36: Doorsnede van een groef bij een snelheid van 1000 mm/s.

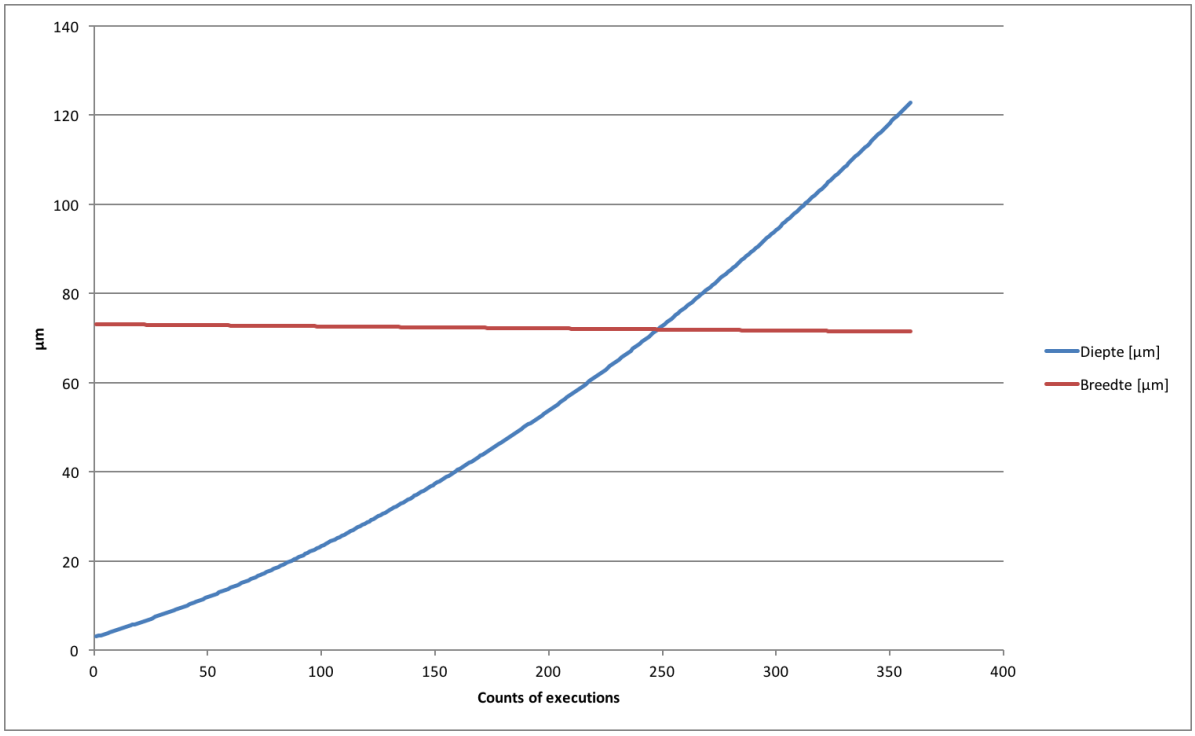
7.7.3 Counts of Executions (COE)

De breedte van een groef is onafhankelijk van de *counts of executions*[16]. Deze blijft nagenoeg constant. Een verklaring hiervoor is gegeven in §7.7.8. De diepte van de groef is wel sterk afhankelijk van deze parameter. Er is een kwadratisch verband te zien op Figuur 37.

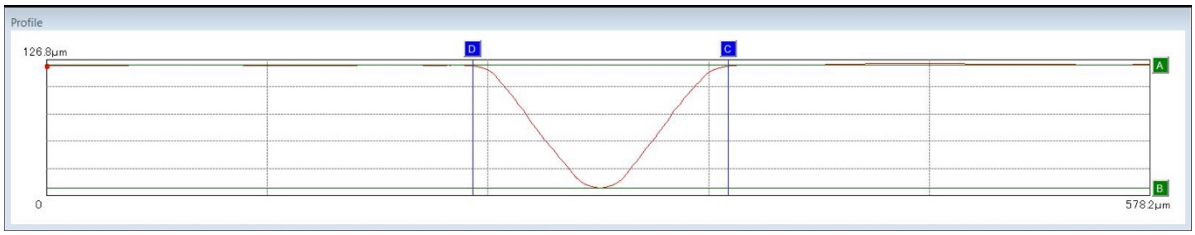
$$Diepte = d_1 \cdot COE^2 + d_2 \cdot COE + d_3$$

$$Breedte = b_1 \cdot COE + b_2$$

COE stelt de *Counts of Executions* voor. Deze eenheid is dimensieloos.



Figuur 37: Invloed van de counts of executions op de breedte en de diepte van een groef.



Figuur 38: Doorsnede van een groef bij 225 uitvoeringen.

[16] Het aantal herhalingen van eenzelfde figuur die de laser achtereenvolgens uitvoert.

7.7.4 Energie

De breedte en de diepte van de groef wordt voorgesteld in Figuur 39. De breedte stijgt volgens een kwadratisch functie. De diepte kent een parabolisch verloop. Het afbuigen van de curve van de diepte heeft als mogelijke oorzaak het ontstaan van een smeltbad. Door het smeltbad zal niet alle toegevoegde energie gebruikt worden voor de ablatie maar ook voor het onderhouden van het smeltbad en vervolgens verdamping. Een tweede fenomeen dat ook optreedt is reflectie. Het smeltbad fungeert als 'spiegel' waardoor een aandeel van de energie diffuus weerkaatst wordt. Deze energie zal opnieuw niet gebruikt worden voor de gewenste ablatie van het materiaal.

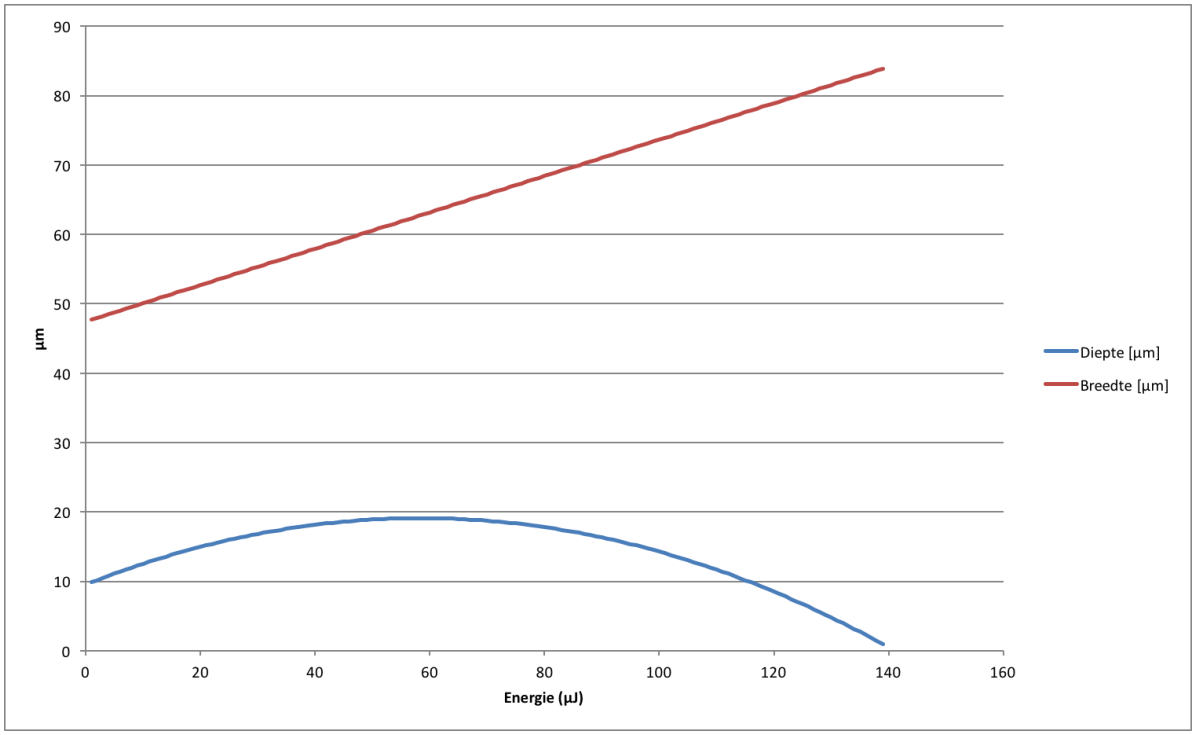
De diepte kan voorgesteld worden door:

$$diepte = -d_1 \cdot E^2 + d_2 \cdot E + d_3$$

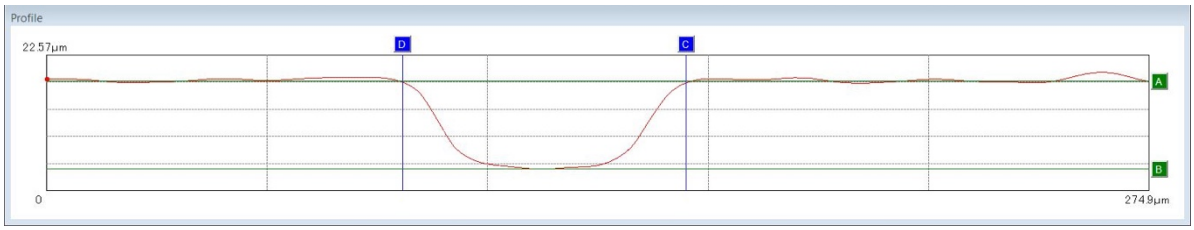
De breedte heeft volgende formule:

$$breedte = b_1 \cdot E + b_2$$

In de formule wordt de energie voorgesteld door E. De formule is geldig indien de energie uitgedrukt wordt in µJ.



Figuur 39: Invloed van de energie op de breedte en de diepte van een groef.



Figuur 40: Doorsnede van een groef waarbij de energie ingesteld is op 80 µJ.

7.7.5 Matrix

Een korte samenvatting van de parameters is weergeven in Tabel 7. In de eerste kolom is de parameter gegeven die aangepast kan worden. Bovenaan staat de invloed op de groef. Een voorbeeld: Stijgt de energie, dan zal de groefbreedte lineair toenemen.

Tabel 7: Matrix met de invloed van elke parameter op de groef bij laserablatie.

↗	Groefbreedte	Groefdiepte	V-vorm	Hoogte/Breedte
Energie	lineair stijgend	parabolisch	breder	parabolisch
Frequentie	exponentieel stijgend	exponentieel stijgend	constant	lineair
Snelheid	lineair dalend	logaritmisch	smaller	logaritmisch
Count of exe.	constant	exponentieel	smaller	exponentieel

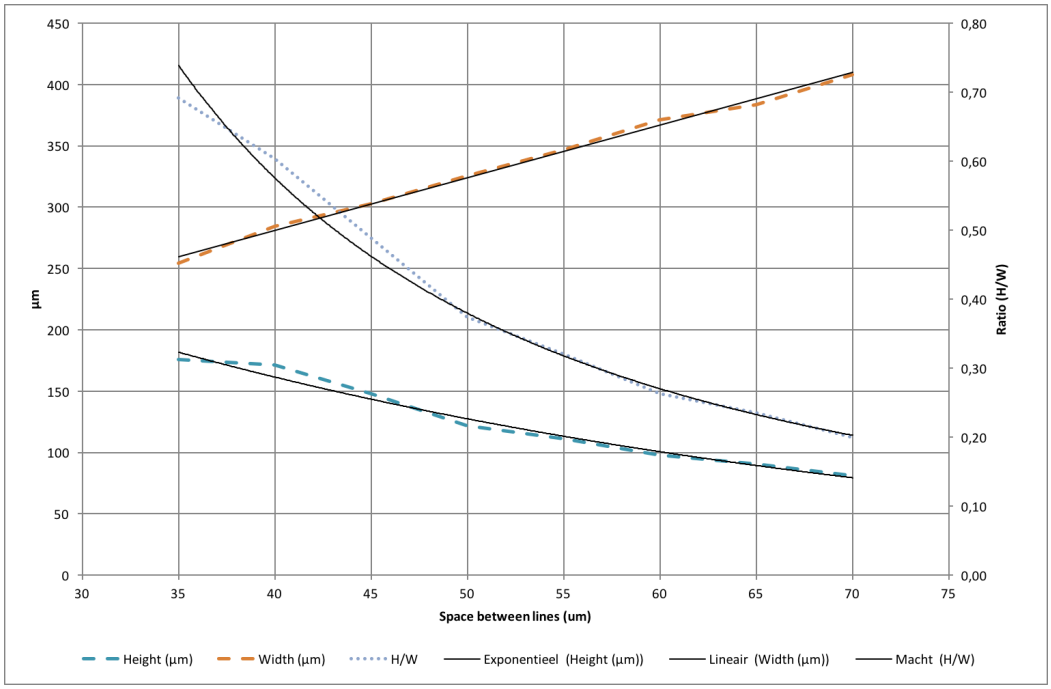
7.7.6 Gebruik van meerdere lijnen

Het gebruik van meerdere lijnen bij een ablatie is vereist om een bepaalde diepte te bekomen. Tijdens de testen bleek dat er bij het gebruik van één lijn de diepte begrensd is tot een maximale diepte. Deze maximale diepte is materiaalafhankelijk. Het blijven verhogen van de *counts of executions* resulteert niet in blijvende toename van de diepte. Vanaf een aantal *counts of executions* blijft de diepte van de groef echter constant. De breedte van de groef neemt wel toe. De verklaring hiervoor ligt bij de hoek tussen de twee vlakken die de groef vormt. Vormen zij een bepaalde kritische hoek, dan treden deze op als reflectievlakken. De laserstraal zal niet tot op het diepste punt van de groef geraken maar zal door weerkaatsing een verbreding van de groef veroorzaken. Hieruit kan besloten worden dat afhankelijk van de diepte, er meerdere lijnen vereist zijn. Bijkomend voordeel is dat het profiel van de snede vloeiender verloopt bij meerdere lijnen. Dit reduceert de invloed van kerfwerking. Dit verhoogt de levensduur van de breekplaat en geeft een stabielere werking.

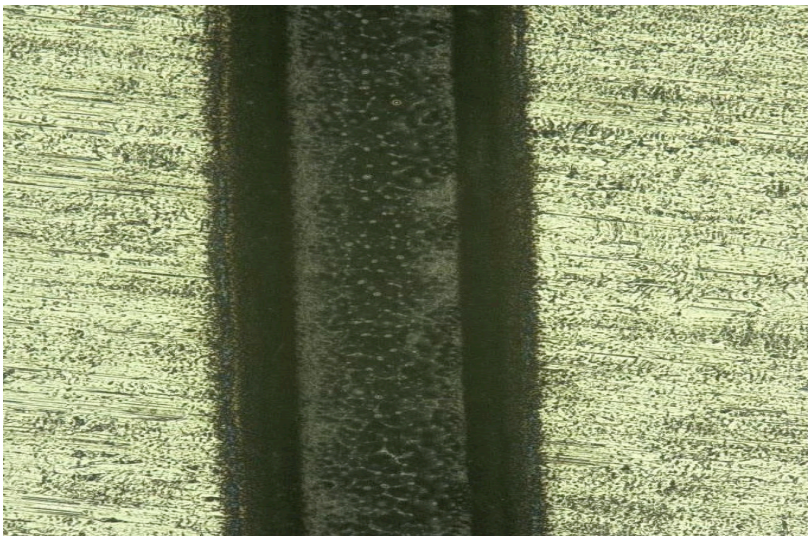
7.7.7 Afstand tussen lijnen

Bij een volgende test is de invloed van de tussenafstand nagegaan (Figuur 41). Is de afstand tussen twee opeenvolgende lijnen te groot, ontstaat er een golvende snede. Een te kleine afstand zorgt op zijn beurt voor een diepere maar spitsere groef. Deze vorm kan nadelig zijn voor de levensduur van breekplaat. Plotse overgangen vertonen sneller kerfwerking. Dit kan problemen opleveren bij het bollen van de disc en bij

een procescyclus waar de druk sterk varieert. Het risico op het ontstaan van haarscheurtjes verhoogt hierdoor. Een juiste keuze van de tussenafstand is essentieel voor een goede doorsnede van de groef.

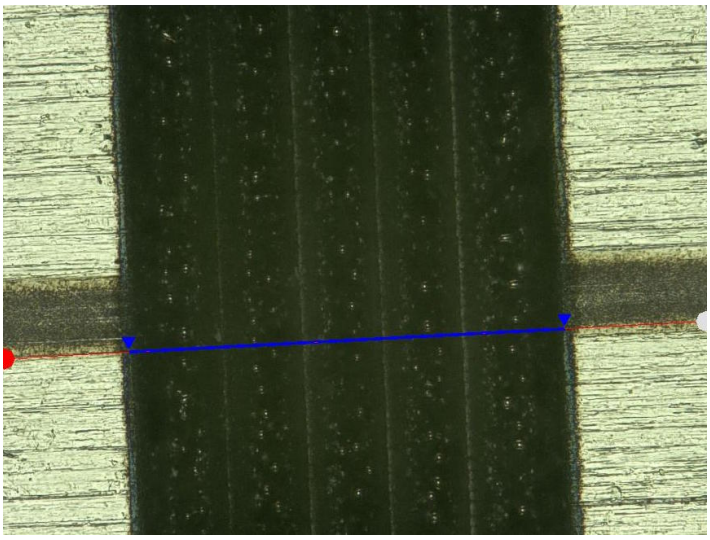


Figuur 41: Invloed van de tussenafstand op de breedte en de diepte van de groef. Ratio is de verhouding van hoogte en breedte.



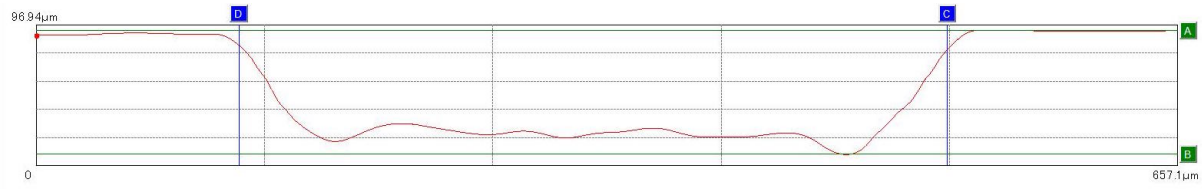
Figuur 42: Bovenaanzicht van een groef met meerdere lijnen met correcte tussenafstand. Het aantal lijnen is visueel niet te achterhalen en het profiel is gekenmerkt door vloeiende overgangen.

Liggen de lijnen voldoende dicht naast elkaar, dan vloeien deze perfect in elkaar over. Het is moeilijk visueel te bepalen hoeveel lijnen effectief gebruikt werden. Figuur 42 toont een ontwerp waarbij er vijf lijnen naast elkaar geplaatst met een tussenafstand van β µm[17].



Figuur 43: Bovenaanzicht van een groef met meerdere lijnen met een foutieve tussenafstand. Het aantal lijnen is nadien goed zichtbaar. Het profiel heeft typisch een grillige vorm, met verhoging van de kerfwerking.

Is de tussenafstand groter zoals op Figuur 43, dan is het wel mogelijk om visueel te bepalen hoeveel lijnen naast elkaar geplaatst zijn. Figuur 44 toont opnieuw een zijaanzicht van een ontwerp met vijf lijnen, elk met een tussenafstand van 70 µm. De doorsnede vertoont een golvend patroon.



Figuur 44: Doorsnede van groef met meerdere lijnen en te grote tussenafstand.

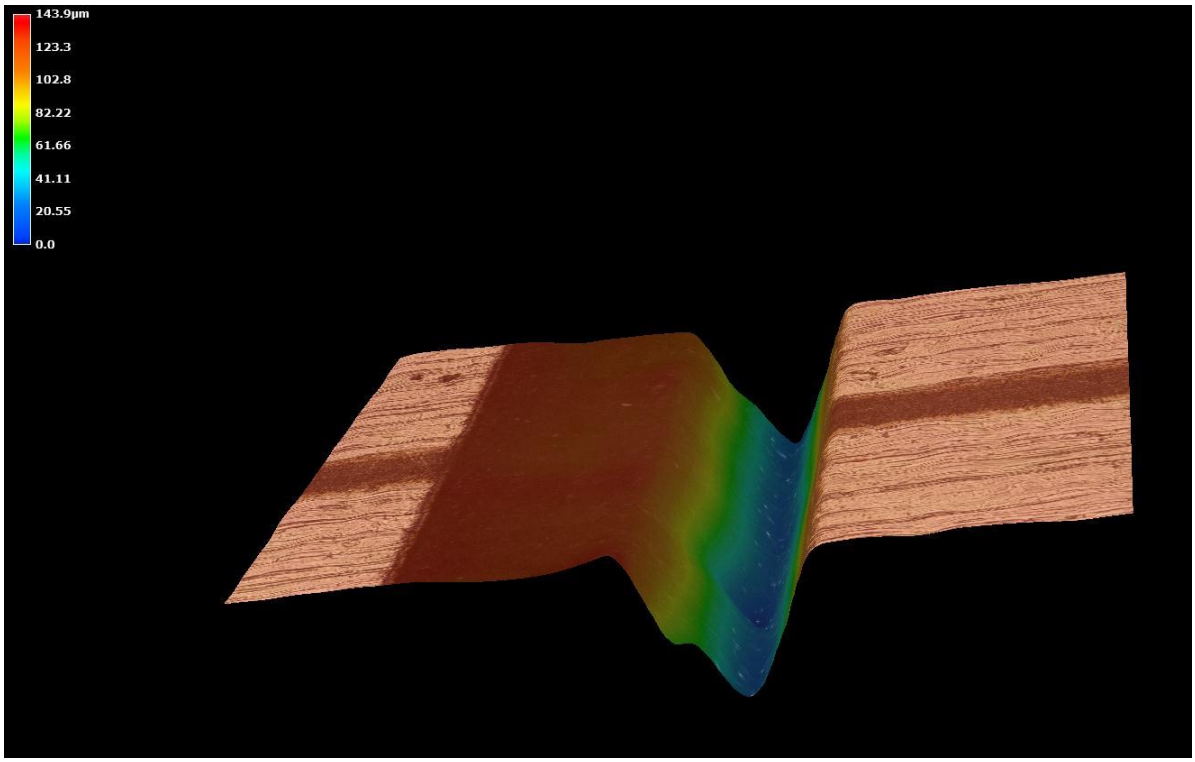
De voorkeur gaat uit naar het ontwerp waarbij het aantal lijnen net niet visueel kan bepaald worden. Dit zorgt voor een maximale breedte van de groef zonder dat er een golvend oppervlak ontstaat. Zo is een stabiele werking verzekerd.

7.7.8 Uitvoering van meerdere lijnen

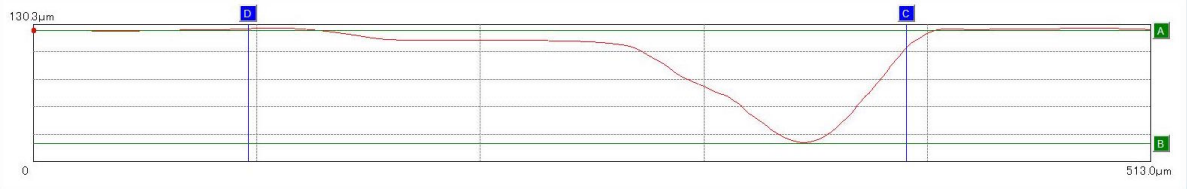
Bijkomend werd vastgesteld dat bij een zeer kleine tussenafstand een uitzonderlijk fenomeen optreedt. De eerste lijnen vertonen een zeer ondiepe snede. De laatst uitgevoerde lijn is sterk geableerd. Een

[17] De correcte tussenafstand is nu gekend binnen Fike Europe maar is omwille van bedrijfsgeheim in deze scriptie niet opgenomen.

verklaring was niet meteen voorhanden. Bij het aanpassen van de volgorde van uitvoering werd uiteindelijk een mogelijke verklaring gevonden. Oorspronkelijk werden de lijnen steeds van links naar rechts aangebracht op de disc. De geringe warmte die ontstaat bij de eerste groef is niet volledig verdwenen bij het aanvatten van de volgende lijn. Indien de warmte te sterk toeneemt, ontstaat er een smeltbad. Bij het ableren van de volgende lijn, ontstaat er sneller een smeltbad aangezien er nog een restwarmte is van de vorige ablatie. Dit smeltbad is aanwezig en blijft behouden aan de behandelde warme kant. De ablatie is uitgesproken aanwezig aan de nieuwe koude kant. Er ontstaat een 'ploegend' effect en een asymmetrische V-vorm.



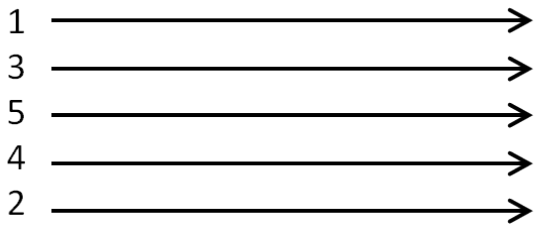
Figuur 45: Probleem bij de uitvoering van meerdere lijnen. Te kleine tussenafstand van de lijnen resulteert in een smalle en ondiepe asymmetrische groef.



Figuur 46: Doorsnede van foutieve uitvoering van meerdere lijnen. Te kleine tussenafstand van de lijnen resulteert in een smalle en ondiepe asymmetrische groef.

In overleg met productie werd tot een oplossing gekomen. Door de volgorde aan te passen, kon het smeltbad vermeden worden. Eerst wordt de meest linkse lijn uitgevoerd. Vervolgens de lijn uiterst recht. Nadien de tweede lijn van links om dan de voorlaatste lijn uit te voeren. De lijnen zijn in dezelfde richting geableerd. Indien we deze logica doortrekken

kunnen we dit toepassen voor elk aantal lijnen. Een voorbeeld hiervan wordt in Figuur 47 weergeven voor 5 lijnen.



Figuur 47: Volgorde van uitvoering bij meerdere lijnen

7.7.9 Walsrichting

De walsrichting van het discmateriaal geeft een kleine meetonnauwkeurigheid. Wordt gemeten volgens de walsrichting, dan is er geen eenduidig maximum (bovenkant groef) dat gebruikt kan worden als referentie voor een dieptemeting. Een correcte referentie is noodzakelijk om de invloed van de parameters na te gaan in functie van de breedte/diepte van de snede. Daarom is steeds gestreefd om loodrecht op de walsrichting te meten.

7.7.10 Beam delay

Deze eigenschap heeft de mogelijkheid om een wachttijd te geven voor het in- en uitschakelen van de laserstraal.

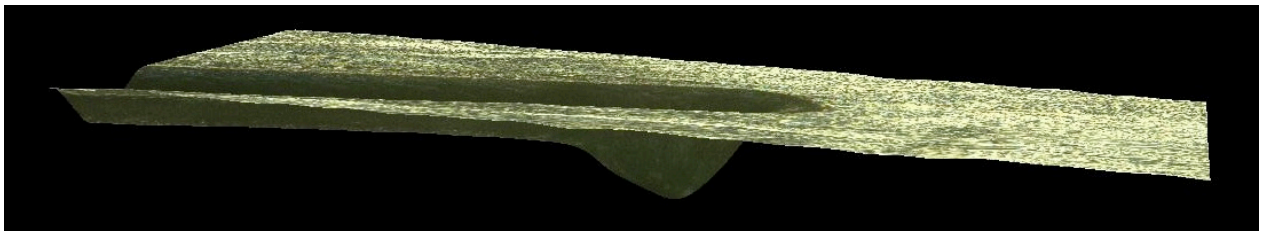
Beam off delay: wachttijd [ms], die vóór het uitschakelen van de laserstraal werkzaam wordt, om de traagheid van de galvokop op het einde van een groef te compenseren. De beam off delay voor Inconel 625 bedraagt 0,50 ms. Deze is voldoende om een vloeiende overgang te garanderen bij het einde van de groef.

Beam on delay: wachttijd [ms], die na het inschakelen van de laserstraal tot aan het begin van de laserbeweging werkzaam wordt. Empirisch is gebleken dat deze standaard 0 ms mag bedragen. Er zal geen fout optreden bij de groef van de breekplaat.

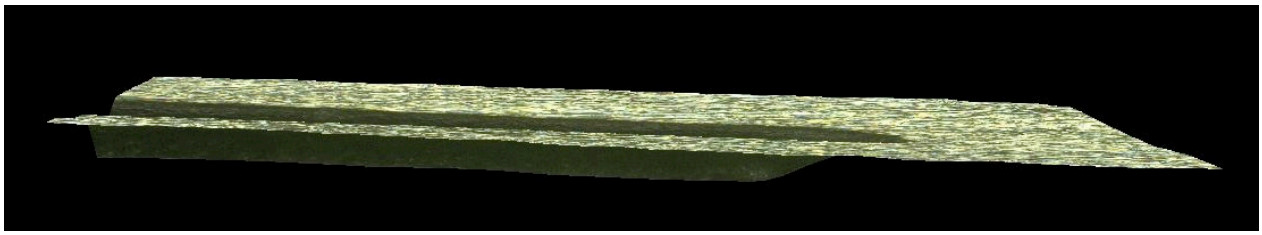
Figuur 48 tonen de invloed van deze parameters. Indien deze niet worden aangepast is er de mogelijkheid dat er een *pinhole*[18] ontstaat. De pinhole zorgt bij dikke materialen met diepe groeven voor lekken. Dit is niet gewenst en is eenvoudig te voorkomen met een juiste instelling van de beam delay.

---

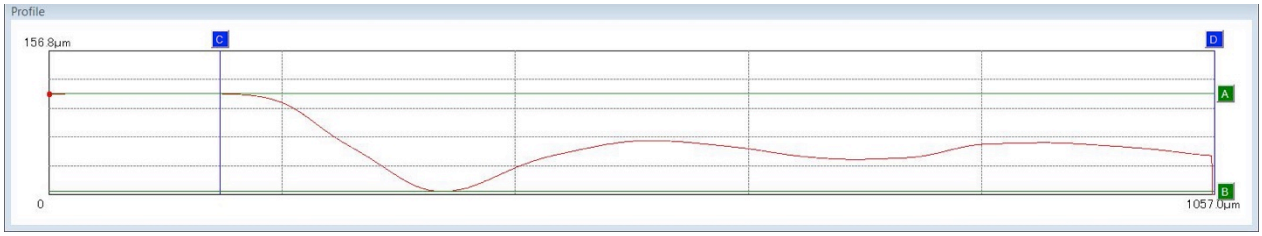
[18] Een diepere inbranding bij het begin of het einde van een groef.



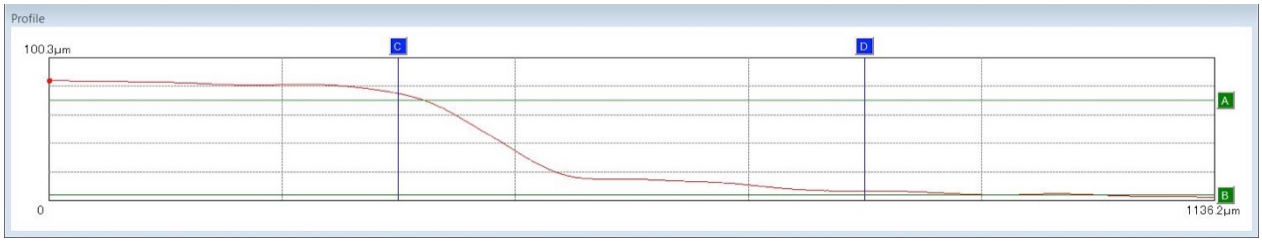
Figuur 48: Driedimensionale weergave zonder beam off delay. De groef heeft een pinhole aan het einde wat risico geeft op doorbranding en instabiele werking.



Figuur 49: Driedimensionale weergave met aangepaste beam off delay. Verbeterd einde van de groef.



Figuur 50: Doorsnede groef zonder beam off delay. Duidelijke pinhole is waar te nemen en het verloop is grillig.



Figuur 51: doorsnede groef weergave met aangepaste beam off delay. De pinhole is vermeden en het verloop is niet meer grillig.

7.7.11 Conclusie

Na de testen zijn de parameters geëvalueerd. De energie, de frequentie en de snelheid zijn vastgelegd op vaste waarde die af te lezen zijn in Tabel 8. De keuze is gebaseerd volgens het profiel van de groef. Er is in het bijzonder gelet op een vloeiende overgang in de doorsnede. Indien er meerdere combinaties mogelijk waren, is de voorrang gegeven aan de kortste cyclustijd. Eenmaal alle parameters gekozen waren, is een test gedaan door alle gekozen waardes te combineren. Deze test gaf een positief resultaat.

Tabel 8: Overzicht van parameters voor het instellen van de Femtolaser na de testen.

Energie	80 µJ
Frequentie	120 kHz
Snelheid	1000 mm/s
Counts of Executions	variabel

(VisualLaserMarker gebruikershandboek Versie 4.6)

7.8 Burst Pressure Calculator

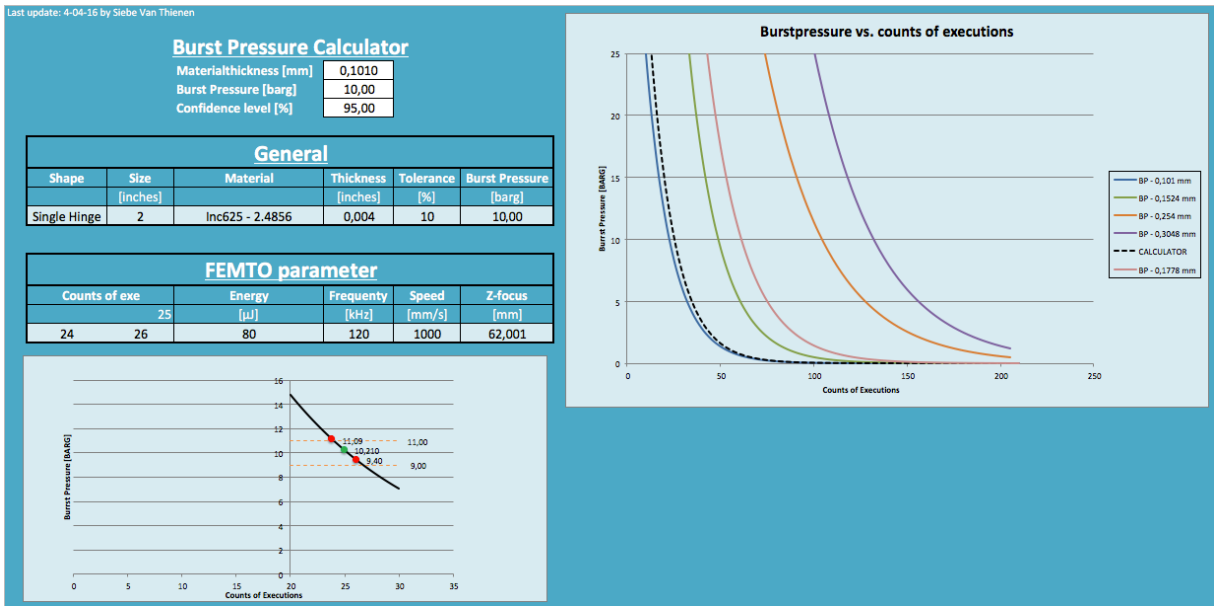
7.8.1 Doel

De Burst Pressure Calculator (BPC), algoritme dat met dit onderzoek is ontwikkeld, moet ons in staat stellen om een voorspelling te maken van breekplaat op basis van een materiaaldikte, een breekdruk en een betrouwbaarheidsinterval. Deze tool is gericht op de productie van breekplaten en zal gebruik maken van data uit de productieomgeving. Door steeds de laatste nieuwe data te gaan toevoegen zal de kennis van het productieproces geleidelijk aan verhogen. Ook voorspellingen op materiaaldiktes die nooit eerder getest werden, zijn mogelijk en moet de productieafdeling in staat stellen snel nieuwe orders te kunnen produceren zonder eerst onnodig veel testen te doen.

Momenteel is de BPC enkel in staat om voorspellingen te maken voor twee inches. Indien juiste data van andere afmetingen beschikbaar zijn, kan ook voor deze afmetingen een voorspelling gemaakt worden.

7.8.2 Toepassing in Excel

Door alle data van breektesten te gaan analyseren, is het mogelijk om op voorhand een voorspelling te maken van de juiste parameters. Dit biedt de mogelijkheid om een initiële parameterset te bepalen die gebruikt wordt voor een eerste breektest. Blijkt de voorspelde breekdruk niet te voldoen, dan moet er manueel een correctie uitgevoerd worden. De calculator is opgebouwd in een Excel rekenblad. Het beginscherm wordt afgebeeld in Figuur 52.



Figuur 52: Overzicht van de Burst Pressure Calculator, ontwikkeld in Excel

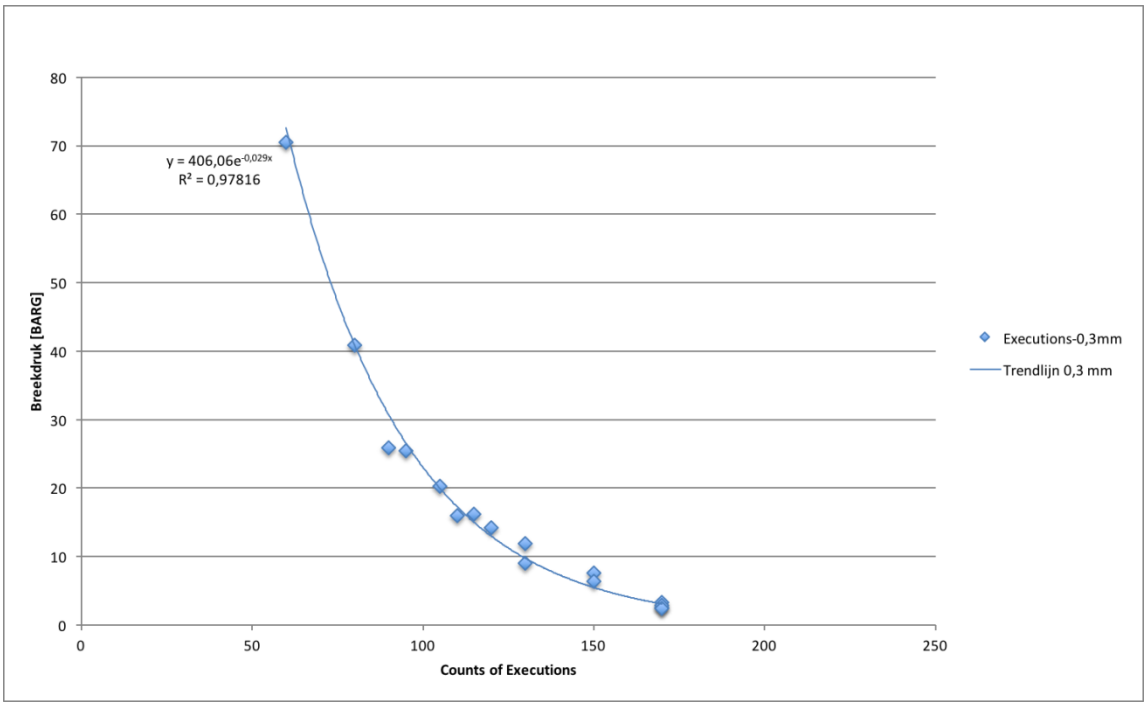
7.8.3 Breekdrukfunctie

Op basis van testresultaten van verschillende breektesten voor het materiaal Inc625, is een vergelijking gezocht waarbij een verband bestaat tussen de breekdruk en de *counts of executions COE*. Bij het uitzetten van de testresultaten is een trendlijn te zien met bijhorende functie. Dit functievoorschrift is van de vorm:

$$BP = a \cdot e^{-b \cdot COE}$$

In deze vergelijking stelt *BP* de breekdruk voor in barg en *COE* de *counts of executions*. Constante a en b zijn afhankelijk van de materiaaldikte. Deze vergelijking is opgesteld voor verschillende materiaaldiktes.

Figuur 53 geeft het functievoorschrift van een materiaaldikte van 0,3 mm. Naast het functievoorschrift, toont Excel ook de determinatiecoëfficiënt R^2. Hoe dichter R^2 in absolute waarde bij 1 is, hoe beter de meetpunten aansluiten bij de curve. De intuïtieve betekenis van de waarde van r is de volgende: als R^2 dicht bij 1 is, dan sluiten de meetpunten die je bekomt uit de steekproef goed aan bij de curve, of iets wiskundiger geformuleerd, dan is in zekere mate een wiskundig verband aanwezig tussen de meetpunten. Is $R^2 = 0$, dan sluiten de meetpunten niet aan bij een curve.



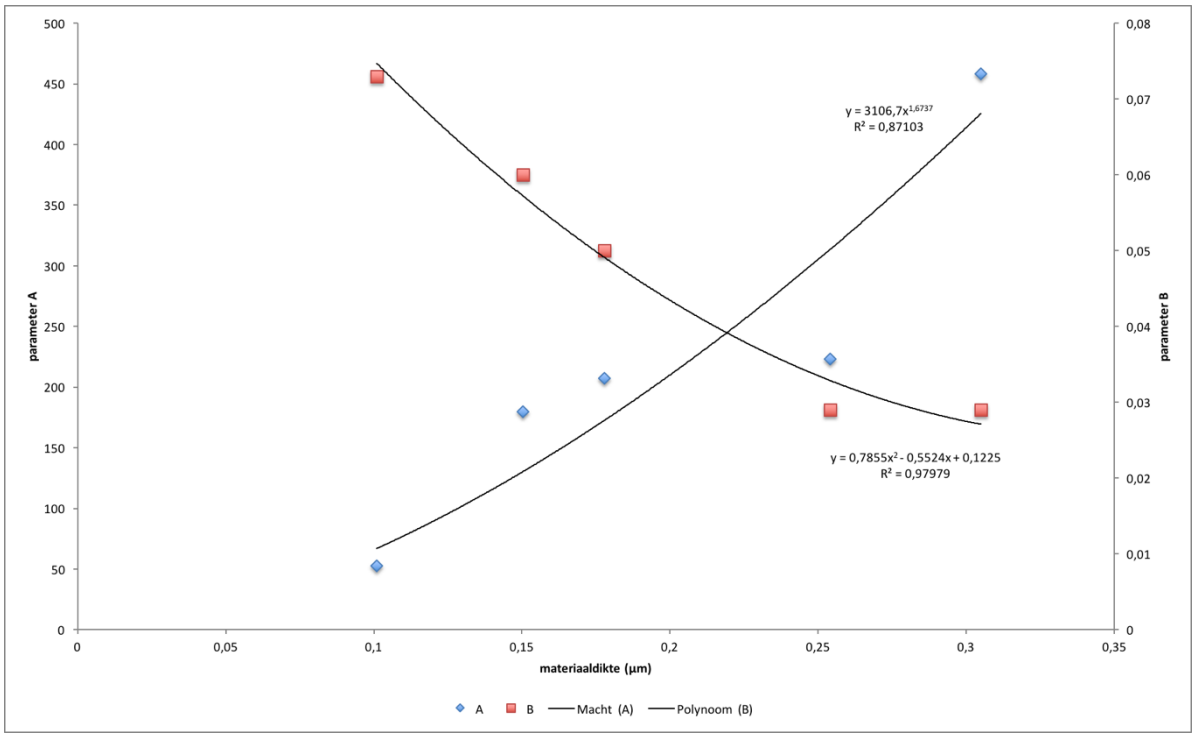
Figuur 53: Curve en functievoorschrift van een disc met dikte 0,3 mm. Trendlijn is opgesteld aan de hand van meetpunten.

7.8.4 Parameters a en b

Eenmaal deze functies gekend zijn, is op zoek gegaan naar het functievoorschrift voor *a* en *b*. Deze functievoorschriften werden gevonden door een trendlijn te bepalen van de waarde van de constante in functie van de *materiaaldikte th* (in mm) zoals op Figuur 54 te zien is. Het resultaat voor deze functie is gegeven door:

$$a = 0{,}9504 \cdot th^2 - 0{,}6116 \cdot th + 0{,}1261$$

$$b = 2707{,}4 \cdot th^{1{,}6577}$$



Figuur 54: Curve en functievoorschrift voor het bepalen van constante a en b. De constante a en b vormen de basis voor de calculatie van een breekplaat.

Vormen we de vergelijking van de breekdruk om, bekomen we de vergelijking:

$$BP = a \cdot e^{-b \cdot COE}$$

$$\ln BP = \ln(a \cdot e^{-b \cdot COE})$$

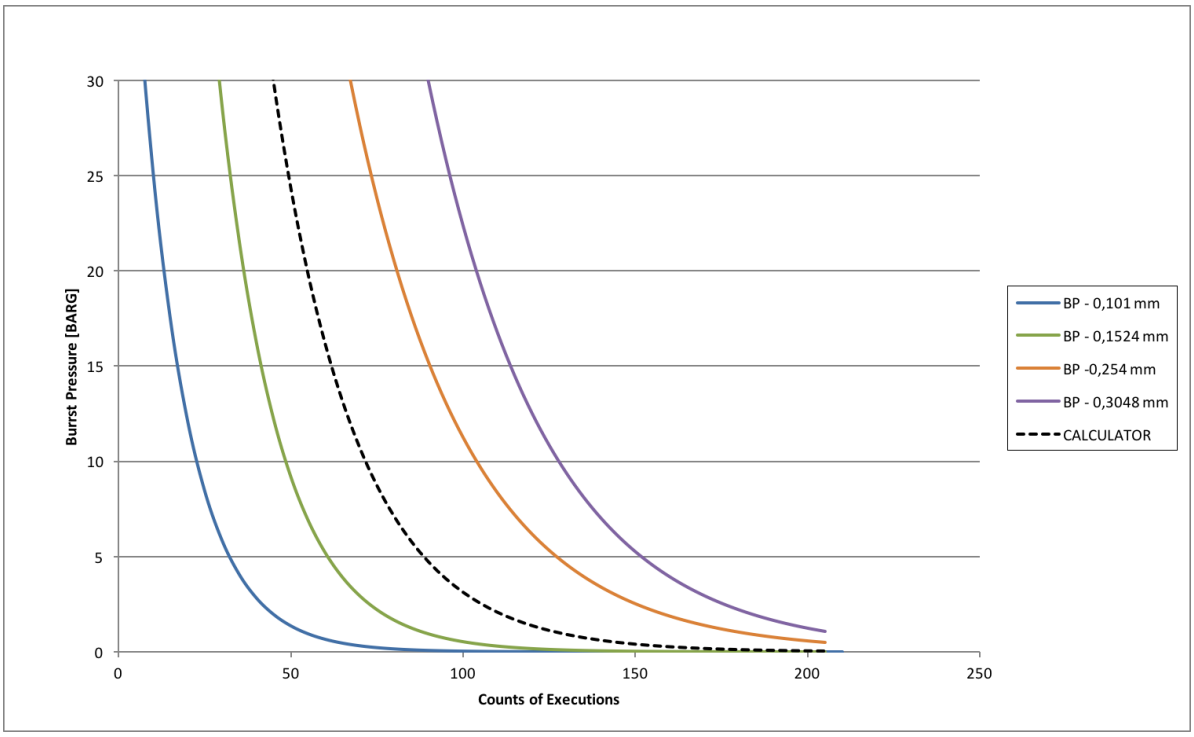
$$\ln BP = \ln(a) - b \cdot COE$$

$$COE = \frac{\ln(BP) - \ln(a)}{-b}$$

Vullen we de vergelijking voor a en b in, dan is de vergelijking voor de breekdruk gegeven door:

$$COE = \frac{\ln(BP) - \ln(0{,}9504 \cdot th^2 - 0{,}6116 \cdot th + 0{,}1261)}{-2707{,}4 \cdot th^{1{,}6577}}$$

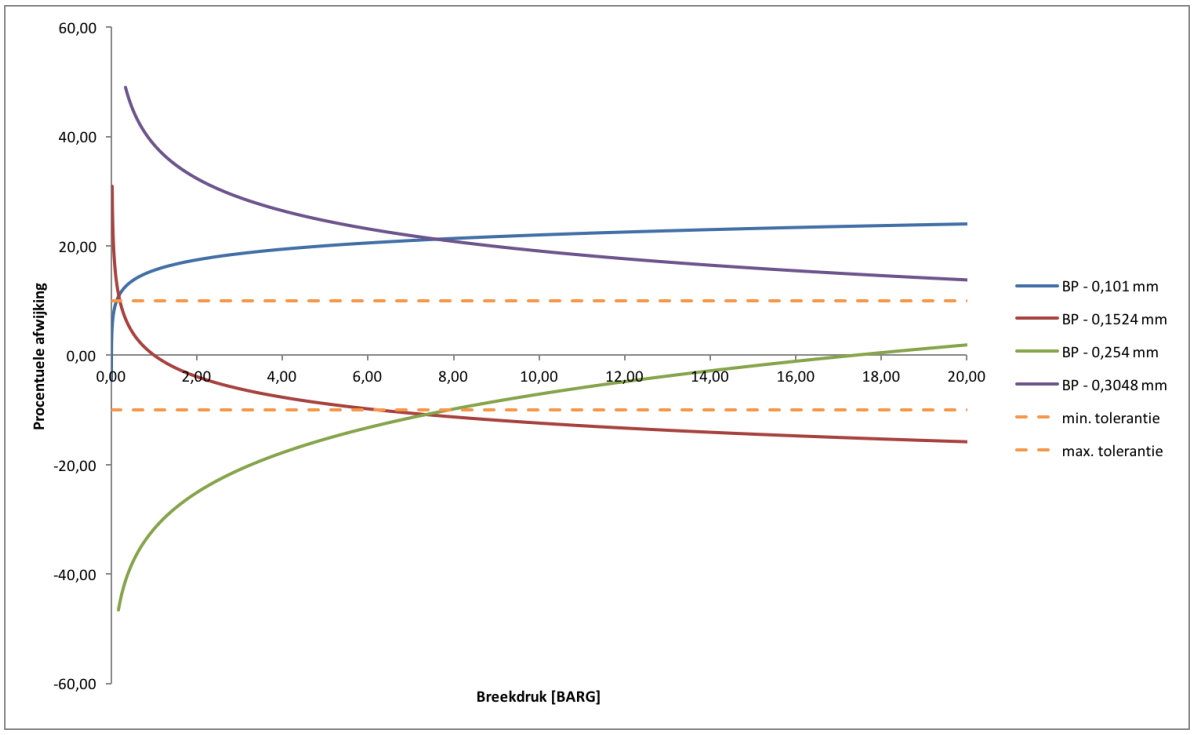
Deze vergelijking invullen voor de gekende materiaaldiktes geeft een voorspelling op basis van de bestaande data. Als controle kan de voorspelling van de breekdrukfunctie en de opgemeten breekdrukfunctie vergeleken worden. Figuur 55 toont de stippellijn van de voorspelling aan en de volle lijnen zijn gekende data. Hieruit blijkt dat de voorspelling een goede benadering vormt van de werkelijkheid.



Figuur 55: Curve van gekende datasets en voorspelling (stippellijn)

7.8.5 Afwijking voorspelling

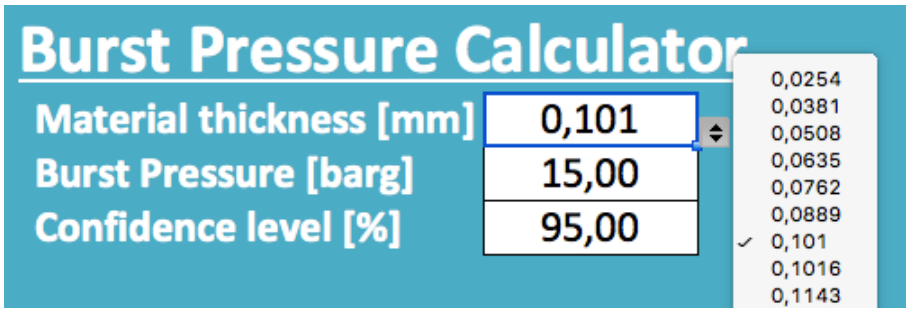
De voorspelling is niet volledig optimaal. Dit is te wijten aan het feit dat we gebruik maken van counts of executions. Deze parameter is steeds een geheel getal. De formule die eerder werd afgeleid, komt niet uit op geheel getal en zal moeten afgerond worden. Door deze afronding wordt bewust een fout gecreëerd. Figuur 56 geeft de procentuele afwijking van de voorspelling ten opzichte van het werkelijke functievoorschrift. Bij hogere drukken is de procentuele afwijking constanter. Bij lage drukken stijgt deze plots sterk en valt buiten het tolerantiegebied. Bij de keuze van de materiaaldikte zal deze curve een belangrijke invloed hebben. De materiaaldikte 0,254 mm (groene lijn) heeft de kleinste procentuele afwijking binnen het werkingsgebied van de SD-RO. Op deze materiaaldikte zijn ook de meeste testen uitgevoerd, waardoor een betere voorspelling mogelijk is. Indien op de andere materiaaldiktes ook meer testen worden uitgevoerd, zullen ook deze procentuele waardes afnemen. De voorspelling zal verbeteren door meer data te verzamelen.



Figuur 56: Procentuele afwijking van de voorspelling ten opzichte van de werkelijke curves.

7.8.6 Materiaaldikte

De calculator is voorzien van een keuzelijst voor het materiaal. Er kan geen willekeurige materiaaldikte worden ingegeven. Dit om onbestaande combinaties uit te sluiten. Ook moet er een breekdruk worden gekozen. Vervolgens geeft de calculator de voorspelling van de parameters.



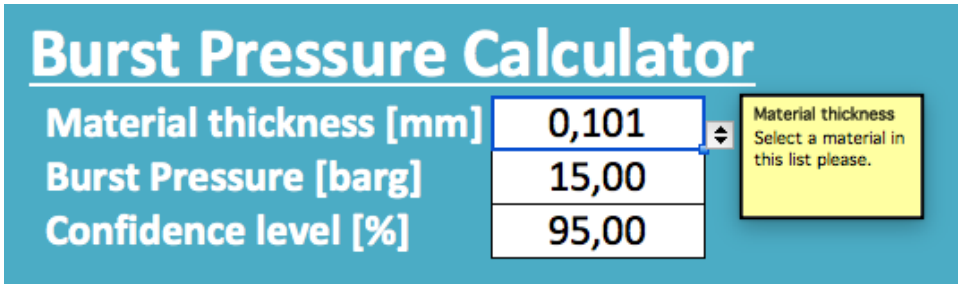
Figuur 57: Voorbeeld van keuzelijst voor materiaaldikte uit Burst Pressure Calculator

Tabel 9: Overzicht van parameters bij Burst Pressure Calculator

General					
Shape	Size	Material	Thickness	Tolerance	Burst Pressure
	[inches]		[inches]	[%]	[barg]
Single Hinge	2	Inc625 - 2.4856	0,010	10	10,00

FEMTO parameter					
Counts of Executions		Energy	Frequency	Speed	Z-focus
	105	[µJ]	[kHz]	[mm/s]	[mm]
104	106	80	120	1000	62,154

Om de gebruiker te helpen, zijn er hulpteksten voorzien. Telkens de gebruiker een invoervak aanduidt, verschijnt er een boodschap. Het geeft aan wat verwacht wordt als invoerwaarde. Figuur 58 toont dit voor materiaaldikte. Indien de gebruiker een foutieve waarde ingeeft of een waarde kiest die buiten de specificaties ligt van de data sheet, zal er een (fout)boodschap tevoorschijn komen. Figuur 59 toont de boodschap wanneer een breekdruk gekozen is die buiten de data sheet valt.



Figuur 58: Hulpboodschap bij het gebruik van de calculator. Bij een aanklikken van een invoervak komt een boodschap tevoorschijn met daarop meer uitleg van de verwachte invoerwaarde.

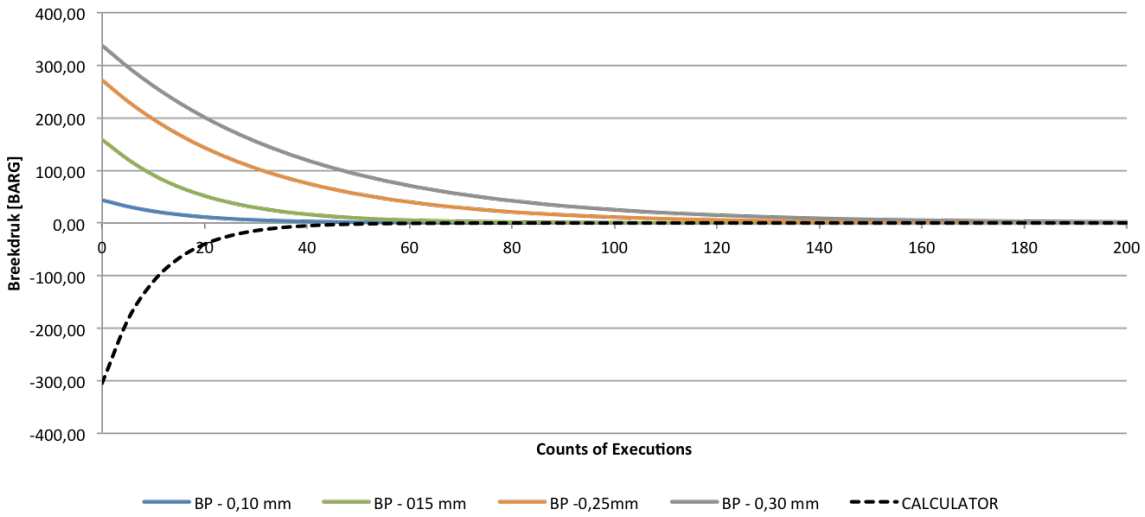
Figuur 59: Foutboodschap bij het foutief invoeren van een invoervak. De boodschap is slechts een melding. Verder gaan met de (foutieve) invoerwaarde is mogelijk.

7.8.7 Beperkingen BPC

De calculator geeft de mogelijkheid om eenvoudig een voorspelling te maken. Belangrijk is dat de voorspelling enkel mag gebeuren op basis van interpolatie. Wordt er binnen de minimale en de maximale gekende materiaaldikte (grenzen) voorspeld, dan zal de voorspelling een goede

benadering vormen. Buiten deze grenzen (cfr. extrapolatie) zal de voorspelling niet meer waarheidsgetrouw zijn.

In Figuur 60 zien we dat de voorspelling bij een lage waarde voor counts of executions resulteert in een negatieve breekdruk. Dit is foutief. Daarom zal de calculator een melding geven indien een materiaaldikte ingegeven wordt die buiten de interpolatiegrenzen ligt.



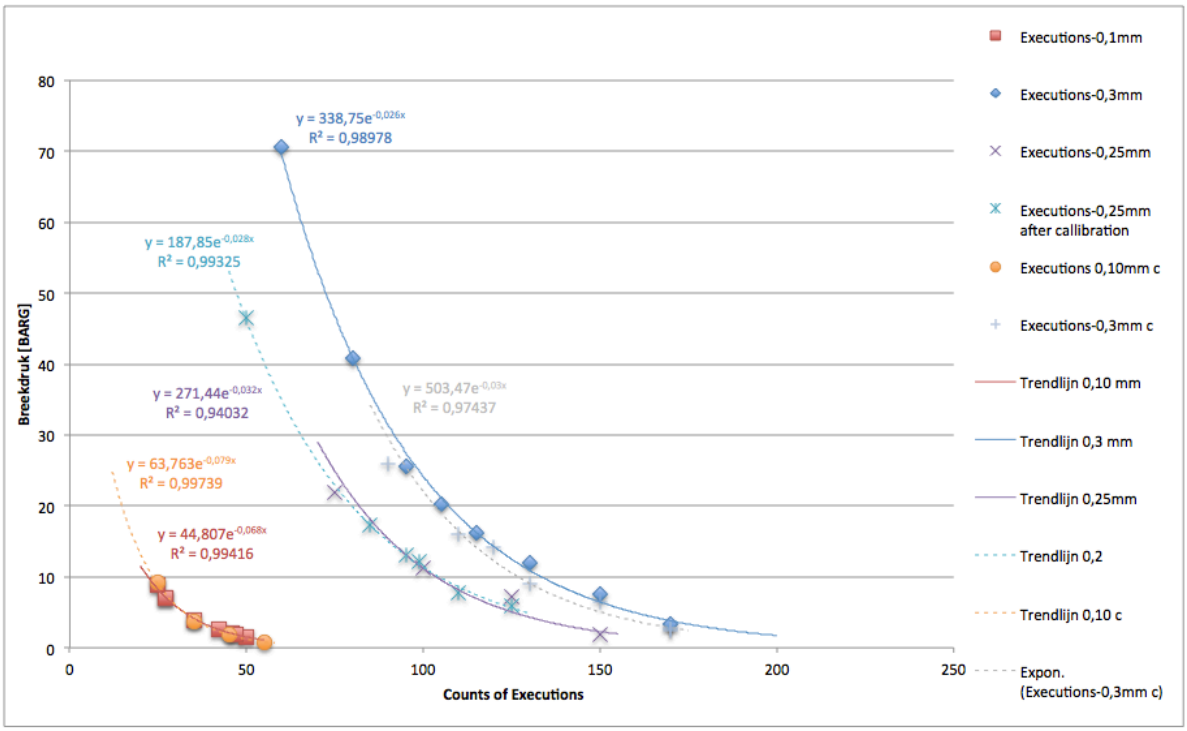
Figuur 60: Voorbeeld van een foutieve extrapolatie. Deze voorspelling resulteert in een negatieve breekdruk. De operator moet deze visuele controle steeds uitvoeren wanneer een materiaal geselecteerd wordt dat buiten de grenzen ligt van het eerder opgemeten materiaal.

7.9 BPC na kalibratie

7.9.1 Doel

Bij de start van de lente was een kalibratie van de laser noodzakelijk. De machine was enkele keren in fout gegaan. Een technieker van de leverancier (Rofin) heeft meteen ook een scanfieldcorrectie[19] toegepast, wat eerder al nodig bleek. Nadien bleek de eerder ontwikkelde calculator niet meer correct te zijn. Er drong zich de vraag op of de kalibratie werkelijk een ander gedrag van de laserstraal had veroorzaakt, of dat twee identiek geproduceerde breekplaten een lichte afwijking kunnen vertonen. Figuur 61 toont de een trendlijn doorheen meetpunten van vóór de kalibratie en een trendlijn doorheen meetpunten van na de kalibratie.

[19] Compensatie van de afbuiging van de laserbundel die door de lens gecreëerd wordt.



Figuur 61: Trendlijn van datapunten die opgemeten werden voor en na de kalibratie van de laser. De volle lijn toont de trendlijn van meetpunten voor kalibratie. De stippellijn toont de trendlijnen na kalibratie.

Met behulp van statistiek is het mogelijk te achterhalen of de curves al dan niet gelijkwaardig zijn. Vertonen de curves statisch gezien geen merkwaardige verschillen, dan kunnen beide datasets gecombineerd worden tot een grote verzameling van meetpunten.

7.9.2 ANOVA-test

Met behulp van een ANOVA-test[20] gaan we de datasets voor en na de kalibratie vergelijken met elkaar. We testen de nulhypothese[21]:

$$H_o\colon \text{ß}_{voor} = \text{ß}_{na} \quad of \quad \text{ß}_{voor} - \text{ß}_{na} = 0$$

waarbij ß de populatieparameter is voor de counts of executions COE. Deze komt overeen met parameter b in de algemene schrijfwijze van de gelineariseerde breekdrukfunctie (cfr. 7.8.3). Indien $\text{ß}_{voor} - \text{ß}_{na}$ statistisch verschillend is van nul, dan meteen de nulhypothese verwerpen.

De statistische test die nagaat of de nulhypothese verworpen kan worden, is:

---

[20] Analysis of Variance, variantieanalyse

[21] De hypothese waarbij het verschil tussen de populatieparameters gelijk aan nul is.

$$t = \frac{b_{voor} - b_{na}}{\sqrt{s^2_{b_{voor}} - s^2_{b_{na}}}} \sim T(n_{voor} + n_{na} - 4)$$

Indien de nulhypothese waar is, dan geldt:

$$ß_{voor} - ß_{na} \sim N\left(0, s_{b_{voor} - b_{na}}\right)$$

Waarbij $ß_{voor} - ß_{na}$ een normaal verdeling volgt met gemiddelde 0 en standaard deviatie $s_{b_{voor} - b_{na}}$.

Om de statistische test te berekenen, is de variantie $s^2_{b_{voor}}$en s^2_{na} nodig. De varianties van de metingen voor en na de berekeningen, wordt als volgt berekend:

$$s^2_{b_{voor}} = \frac{s^2_{res_{voor}}}{s^2_{COE_{voor}}(n_{voor} - 1)} \; ; \; s^2_{b_{na}} = \frac{s^2_{res_{na}}}{s^2_{COE_{na}}(n_{na} - 1)} \qquad (1)$$

De variantie is afhankelijk van de variantie van de fouten s^2_{res} (variance of residuals), de variantie in de onafhankelijke variable COE (counts of ...), en het aantal observaties *n*.

Onder de assumptie dat de variantie van verschillende populaties (hier: voor/na de kalibratie) hetzelfde is, kunnen we de pooled variantie berekenen. Dit heeft als voordeel dat we een stabielere inschatting kunnen maken van de populatievariantie, en geeft ons een betrouwbaardere inschatting of de nulhypothese al dan niet verworpen kan worden.

Bemerk dat de teller van de statistische test gelijk is aan:

$$s_{b_{voor} - b_{na}} = \sqrt{s^2_{b_{voor}} - s^2_{b_{na}}}$$

We kunnen de tellers nog substitueren met (1), dan krijgen we:

$$s_{b_{voor} - b_{na}} = s_{res,pooled} \sqrt{\frac{1}{s^2_{COE_{voor}}(n_{voor} - 1)} - \frac{1}{s^2_{COE_{na}}(n_{na} - 1)}}$$

waarbij $s^2_{res,pooled}$ gelijk is aan het gewogen gemiddelde van de foutenvariantie voor (resp. na) kalibratie op basis van de vrijheidsgraden. Het aantal vrijheidsgraden is gelijk aan het aantal observaties verminderd met het aantal parameters in de vergelijking (hier: 2). Als Het aantal metingen voor of na verschilt in aantal, zal die met de meeste metingen het sterkste doorwegen.

$$s^2_{res,pooled} = \frac{(n_{voor} - 2)s^2_{res_{voor}} + (n_{na} - 2)s^2_{res_{na}}}{(n_{voor} - 2) + (n_{na} - 2)}$$

waarbij

- $s^2_{res,pooled}$ de gepoolde variantie voorstelt,
- $s_{res,pooled}$ de gepoolde standaard deviatie is,
- $n-2$ het aantal vrijheidsgraden voorstelt.

De nulhypothese wordt getest met de gepoolde en ongepoolde varianties. Indien bij beide testen de nulhypothese niet verworpen kan worden, kunnen we zeggen dat de meetresultaten voor en na de kallibratie niet verschillen.

(Zaiontz, Confidence and prediction intervals for forecasted values, 2013-2016)

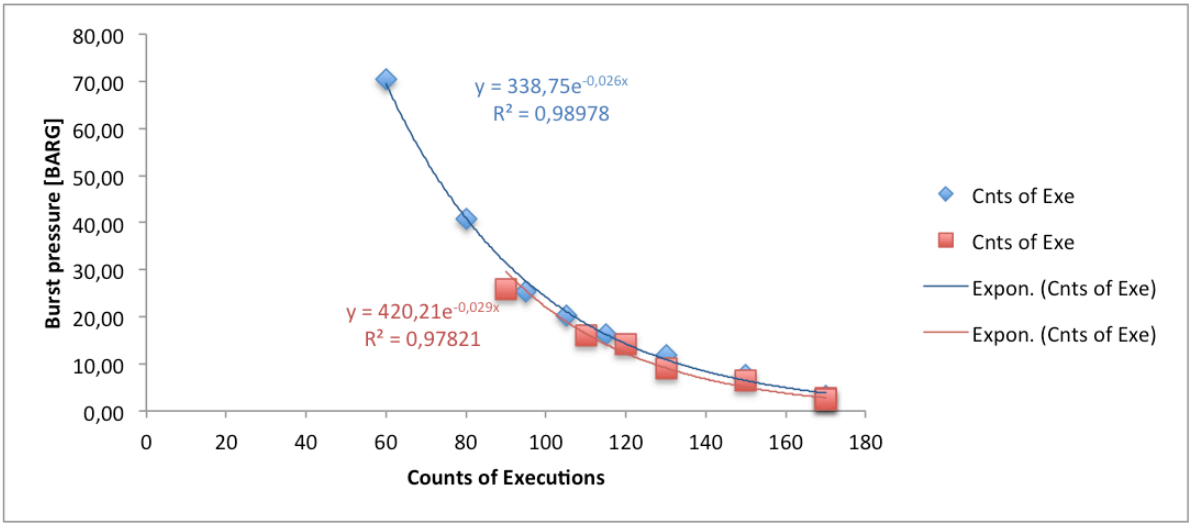
7.9.2.1 Regressieanalyse

Deze kennis programmeren we in Excel, om vervolgens deze test te kunnen toepassen op elke set meetpunten.

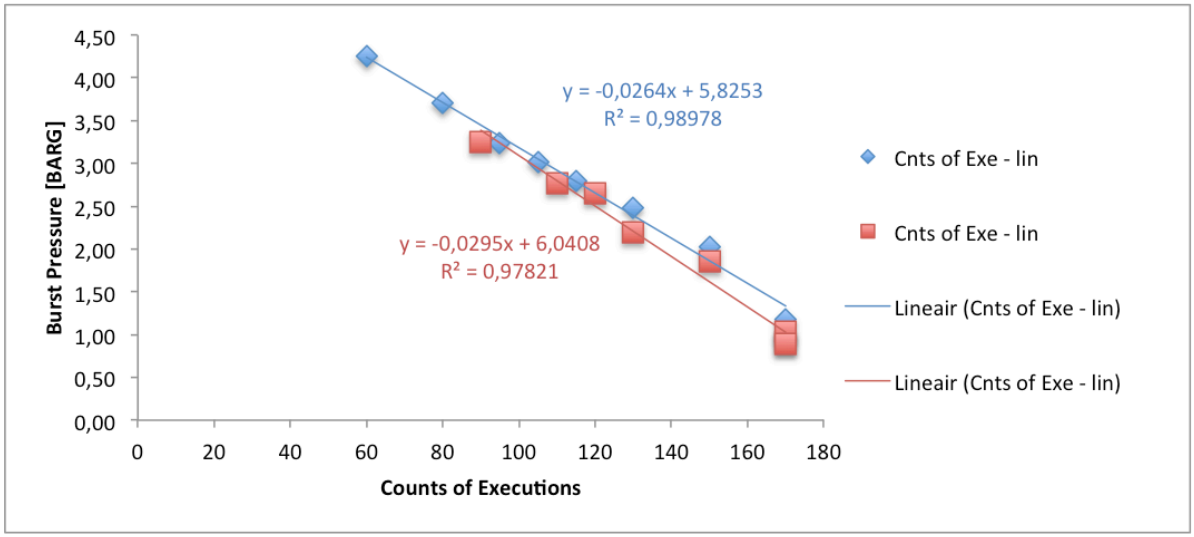
Alvorens de formules te kunnen gebruiken, moeten de we de trendlijnen lineariseren. Figuur 62 toont de huidige breekdruk trendlijn van één bepaalde materiaaldikte, zoals eerder gebruikt bij de calculator. Figuur 63 toont de gelineariseerde trendlijn. Het lineariseren kan eenvoudig door de basisformule van de exponentiële functie om te vormen tot:

$$BP = a \cdot e^{-b \cdot COE}$$

$$\ln BP = \ln a - b \cdot COE$$



Figuur 62: Trendlijnen voor en na (blauw resp. rood) kalibratie in het bestaande exponentiële verband voor een breekplaat met materiaaldikte van 0,3 mm.



Figuur 63: Resultaat van de trendlijnen na linearisatie.

Vanuit deze aangepaste functie kan verder worden gewerkt. In Excel zijn alle nodige formules geprogrammeerd wat ons uiteindelijk brengt tot Figuur 64. Het besluit van dit soort analyse is afhankelijk van de p-waarde (p-value). De p-waarde bedraagt hier afgerond 0,63. Dit is beduidend hoger dan het vooropgestelde significantieniveau alfa, waardoor de H_0-hypothese niet verworpen kan worden. Hieruit kunnen we afleiden dat de meting voor en na de kallibratie statistisch niet verschillend zijn. Indien de p-waarde lager zou zijn dan alfa, dan zou er een significante (p-waarde < 0,05) of een sterk significante (p-waarde < 0,01) aanduiding zijn dat beide curves verschillen. De extra meetpunten die opgemeten werden na de kalibratie mogen dus gecombineerd worden met de data opgemeten voor de kallibratie.

Comparison of two slopes

	Before callibration	After callibration	
n	8	8	=count(x)
b	-0,026	-0,029	=slope(y,x)
S_{y-x}	0,105	0,147	=steyx(y,x)
S_x	36,247	30,909	=stdev(x)
S_b	0,00110	0,00180	s_{y-x} / (s_x * SQRT(n-1))

S_{b1-b2}	0,002	sqrt(S_{b1}^2+S_{b2}^2)
t	-0,333	(b_1-b_2)/(s_{b1-b2})
df	12	(n_1 + n_2 - 4)
alpha	0,05	
p-value	0,628	=TDIST(|t|,df,2)
t-crit	-1,782	=TINV(alpha;df)
sig	no	=yes if p-value < alpha

using pooled error variance		
S_res^2	0,01631	$((n_2-2)s_y\text{-}x_1^2+(n_2+2s_y\text{-}x_2^2)/(n_1+n_2-4)$
s_b1-b2	0,00205	s_{res}*sqrt(1/s_{x1}^2(n_1-1))+1/(s_{x2}^2(n_2-1)))
t	1,49577	(b_1-b_2)/(s_{b1-b2})
df	12	(n_1 + n_2 - 4)
alpha	0,05	
p-value	0,91973	=TDIST(|t|,df,2)
t-crit	-1,78229	=TINV(alpha;df)
sig	no	=yes if p-value < alpha

Figuur 64: Oplossing van vergelijking van twee datasets in Excel (Anova-test) voor breekplaat met materiaaldikte van 0,3 mm. Deze test toont geen significante verschillen tussen beide datasets.

Na het samenvoegen van alle meetpunten kan de calculator opnieuw verfijnd worden. We bekomen en verbeterde vergelijking voor zowel constante a als b (cfr 7.8.4). De vergelijkingen zijn als volgt:

$$a = 2707{,}4 \cdot th^{1{,}6677}$$

$$b = 0{,}9504 \cdot th^2 - 0{,}6116 \cdot th + 0{,}1261$$

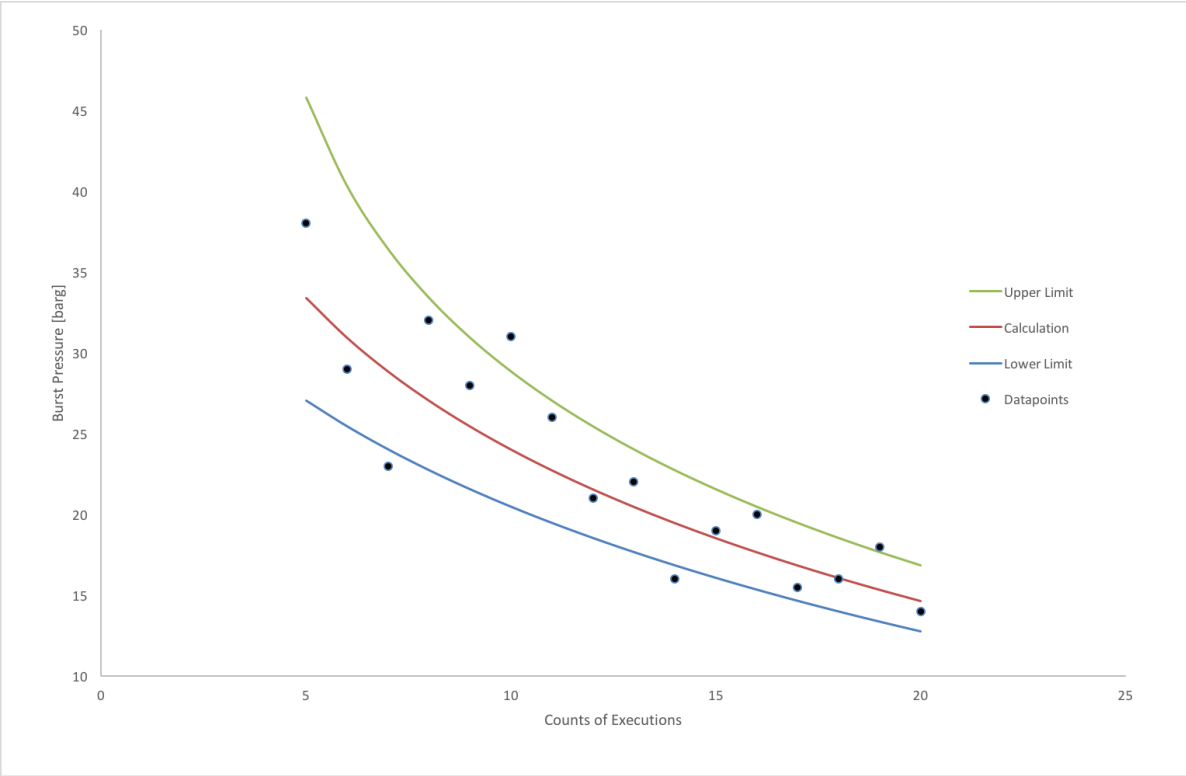
Merk op dat de vergelijking van a sterk afwijkt van de eerdere vergelijking. De trendlijn vertoonde eerder een exponentieel verband, dit is nu aangepast naar een machtstrendlijn.

(MC Clave, 2007) (Toetsen van verschillen tussen twee of meer groepen, 2006)

7.10 Betrouwbaarheidssinterval

Een uitbreiding van de calculator is het toevoegen van een betrouwbaarheidsinterval. In de calculator is standaard gebruik gemaakt van het 95 % betrouwbaarheidssinterval. In tegenstelling tot de eerder berekende puntschatting (de formule gaf ons één geheel getal als resultaat) geeft een betrouwbaarheidsinterval een interval weer waarbinnen de geschatte waarden van de breekdruk met 95 % zekerheid zullen in liggen met betrekking tot de parameter counts of executions. De boven- en ondergrens van het interval zijn stochastische variabelen, die dus bij elke herhaling van het experiment een (mogelijk) andere waarde aannemen. De bovengrens (resp. ondergrens) worden uit steekproefgegevens bepaald.

Dit wil zeggen dat er een kans van 95 % is dat voorspelde waarde van BP op basis van de werkelijke lineaire regressie van de meetpunten in het betrouwbaarheidsinterval liggen. Figuur 65 geeft een voorbeeld hoe een betrouwbaarheidsinterval er grafisch uitziet. De boven- en ondergrenzen bakenen een zone af. Dit is het betrouwbaarheidsinterval. De meetpunten liggen verspreid rond de voorspelling.



Figuur 65: Fictief voorbeeld van een betrouwbaarheidsinterval. De groene en blauwe lijnen vormen de grenzen van het interval. De meetpunten (zwarte punten) liggen verspreid rond de voorspelling (rode lijn).

Het betrouwbaarheidsinterval voor de voorspelde waarde $\hat{y}$ van x is

$$\hat{y} \pm t_{crit} \cdot s.e.$$

waarbij de standaard fout van de voorspelling gelijk is aan

$$s.e. = s_{yx}\sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{SS_x}}$$

waarbij

- $\hat{y}$ de voorspelde waarde voor BP is,
- t_{crit} de t-waarde op basis van de T-test is,
- $s.e$ de standaardfout van de voorspelling is,
- s_{yx} de standaardafwijking van de toevallige afwijking ε is,
- n het aantal meetresultaten is,
- x_0 de waarde is van x die wordt gebruikt om y te voorspellen,
- $\bar{x}$ het gemiddelde is van de steekproefwaarden,
- SS_x de som van de kwadraten van de x-waarden.

(Toetsen van verschillen tussen twee of meer groepen, 2006)

7.11 Controle van BPC

De controle van de BPC gebeurt aan de hand van RMSE (Root Mean Square error). De nauwkeurigheid van de voorspelling kan worden beoordeelt op basis van de voorspellingsfout[22]. Kennis van de nauwkeurigheid van een voorspelling helpt bij het kiezen van de te gebruiken voorspellingsmethode en de parameters van de voorspellingsformule.

7.11.1 De maat van de nauwkeurigheid van de voorspelling

In deze scriptie is geopteerd voor RMSE. Dit is de kwadratische afwijking en wordt gedefinieerd als de wortel uit het gemiddelde kwadratische verschil tussen de voorspelde en de werkelijke waarden:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(F_t - Y_t)^2}{n}}$$

waarbij:

- $RMSE$ de gemiddelde kwadratische afwijking weergeeft,
- F_t de voorspellingswaarde is,
- Y_t de werkelijke waarde is,
- n het aantal meetresultaten voorstelt.

RMSE is geen eenduidige maat. Het moet door de analist met de juiste aandacht geïnterpreteerd worden binnen de gepaste context. In deze situatie zal de RMSE een waarde van de breekdruk uitdrukken die een gemiddelde voorspellingsfout van her algoritme voorstelt. Hoe kleiner de RMSE, hoe beter de voorspelling.

Bij de controle van de werking van de calculator bleek dat binnen het werkingsgebied van de SD-RO, de voorspelling zeer goed was. Bij lage drukken (tot 12 barg). Bij hogere drukken bleek de afwijking toe te nemen. De toenemende afwijking is te wijten aan het feit dat van de meeste materiaaldiktes nog maar beperkte data beschikbaar is. Doorheen de tijd zal er extra data beschikbaar zijn (door extra testen afkomstig van orders) en zal de calculator zichzelf bijsturen. Hoe meer data er beschikbaar is, hoe beter het algoritme van de BPC functioneert.

(Zaiontz, Confidence and prediction intervals for forecasted values, 2013-2016) (MCClave, 2007)

---

[22] het verschil tussen de werkelijke waarde en de voorspelling

7.12 Lotafhankelijkheid

De leverancier van het basismateriaal levert een certificaat af volgens de norm (EN10204:2004). De ANOVA-test biedt ook de mogelijkheid om de lotafhankelijkheid te controleren. Door breekplaten van een nieuw materiaallot te produceren en daarop breektesten uit te voeren, kan een nieuwe curve gevonden worden. Met behulp van een variantieanalyse kan onderzocht worden of de nieuwe curve en de bestaande al dan niet vergelijkbaar zijn. Indien er een duidelijk verschil merkbaar is (p-waarde< 0.05) dan is een manuele aanpassing nodig van de calculator. De vergelijking voor constanten a en b zal opnieuw bepaald moeten worden om zo de algemene vergelijking opnieuw te optimaliseren.

Stap 1: Verzamelen van data.

Sorteer de data, maak zelf een onderscheid welk verband getest moet worden. Een voorbeeld hiervan is nagaan of een nieuw lot afwijkende resultaten geeft.

Stap 2: Data importeren in Excel.

Plaats de data in de beide tabellen in het tabblad *Linearisation*. De functie dient eerst gelineariseerd te worden. Om de lotafhankelijkheid te controleren, wordt het natuurlijk logaritme berekend van de breekdruk. Ga steeds na of het bereik van de curves correct is én dat de linearisatie daadwerkelijk lineair is.

Stap 3: Data analyseren

In het tabblad *t-test* kan het resultaat worden bekeken. Vooreerst dient een waarde voor alpha gekozen te worden. In de template is gekozen voor 0,05. Indien de p-waarde groter is dan alpha, is er geen significante aanduiding dat de beide datasets verschillen. (cfr. Figuur 64)

7.13 Optimaliseren van Burst Pressure Calculator

Het vernieuwen van de voorspelling gebeurt door data toe te voegen. Door continu nieuwe testresultaten aan te vullen, zal de kwaliteit van de voorspelling verbeteren. Een juiste optimalisatie wordt hier beschreven:

Stap 1: Verzamelen van nieuwe data.

Het uitbreiden van bestaande curves, breekdruk in functie van counts of executions, of het opmeten van geheel nieuwe curves zijn beide een mogelijk optie.

Stap 2: De nieuwe data importeren in Excel.

Breng de nieuwe data aan in het bestaande tabblad van de gekozen materiaaldikte. Indien een nieuwe materiaaldikte gekozen werd, moet de gebruiker handmatig een nieuw tabblad toevoegen.

Stap 3: Opstellen/vernieuwen van de trendlijn.

De bestaande trendlijnen vernieuwen automatisch. Door nieuwe data toe te voegen, verandert het bereik van de curve. Het bereik past zich automatisch aan. Indien een totaal nieuwe curve moet toegevoegd worden, moet zowel de curve als de trendlijn manueel worden aangebracht. Het wiskundige verband van de trendlijn is tot op heden exponentieel. Het functievoorschrift en de R-kwadraat worden best ook weergegeven op de grafiek. Des te beter R-kwadraat 1 benadert, des te beter is de keuze van het wiskundige verband.

Stap 4: Bepalen van a en b.

Deze stap bepaald het algemene verloop van de parameters a en b. Voeg in het tabblad *Bepaling a en b* de waarde voor a en b toe in de tabel bij de juiste materiaaldikte. Indien een nieuwe materiaaldikte werd opgemeten, past de curve zich automatisch aan. Controleer telkens of het wiskundige verband van de trendlijn nog optimaal is. Door extra meetpunten toe te voegen is het mogelijk dat dit verband verbeterd kan worden.

Stap 5: Algemene formule aanpassen.

Gebruik het functievoorschrift van zowel constante a en constante b om de algemene formule te bepalen voor een willekeurige materiaaldikte. Voeg in het tabblad *Parameters* de verbeterde vergelijkingen in de daarvoor voorziene tabel *A* (resp. tabel *B*). Indien het wiskundige verband in vorige stap gewijzigd werd, moet de formule manueel worden aangepast. Tabel *Function* toont het functievoorschrift en de waarde voor a en b voor de specifiek gekozen materiaaldikte in het tabblad *Function*.

A	
A = A1 . x ^A2	
A1	A2
2707,4	1,6677

B		
B = B1 . x^2 + B2 . x + B3		
B1	B2	B3
0,9504	-0,6116	0,1261

Figuur 66: In te vullen tabel a en b. Bovenaan in de tabel staat het algemene functievoorschrift.

Stap 6: Betrouwbaarheidsinterval vernieuwen.

Open het tabblad *Confidence*. Dit werkblad geeft het interval bij de voorspelling van gekende materiaaldiktes. Indien er nieuwe data werd toegevoegd moet nagegaan worden of het bereik overal correct is. Wanneer er een nieuwe materiaaldikte is toegevoegd, moet manueel een extra tabel worden toegevoegd. Figuur 67 geeft een overzicht van een bestaande tabel. De gebruikte formules zijn naast de cellen vermeld (voor een Engelstalige versie van Excel). In het tablad *Function* moet dan de extra materiaaldikte ook worden opgenomen.

Confidence and prediction intervals for forecasted values

0,101						
Confidence interval for the forecast value						
n	12	=count(x)				
df	10	=n-2				
mean(x)	4,212	=mean				
x_0	10,00	hoped for				
y_0	129,00	forecast	prediction interval		test for y-interval	
S_{res}	0,952	=STEYX(y,x)				
SS_x	100,2981	=devsq(y,x)	y_0	129,00	y_0	
s_e	0,6147	$=s_{res}$*sqrt(1/n+(x_0-xmean)^2/SS_x	s_e	0,485374	s_e	
t-crit	-1,812461	=TINV(0,05;df)	t-crit	-1,812461	t-crit	
Lower	130,1142	y_0-t-crit*s_e	Lower	129,8797	Lower	
Upper	127,8858	y_0+t-crit*s_e	Upper	128,1203	Upper	

Figuur 67: Voorbeeld van een tabel in het tabblad Confidence.

Stap 7: Parameters aanpassen

In het tabblad *Parameters* (Figuur 68) kunnen verder nog andere parameters worden aangepast. Onder andere de keuzelijst van materiaaldiktes, de minimum/maximum breekdruk volgens de data sheet, de toleranties en de overige Femtoparameters kunnen gewijzigd worden. Standaard zijn deze ingesteld volgens de data sheet van de SD-RO.

A

A = A1 * x^A2	
A1	A2
3106,07	1,6737

B

B = B1 * x^2 + B2 * x + B3		
B1	B2	B3
0,7855	-0,5524	0,1225

Function

A= 313,39 B= 0,033

y = 313,39 * e^(-0,0329 * n)

Document settings	
Last Update	24/04/16
Operator	Siebe Van Thienen

Material thickness [mm]
0,0254
0,0381
0,0508
0,0635
0,0762
0,0889
0,101
0,1016
0,1143
0,127
0,1397
0,1524
0,1651
0,1778
0,1905
0,2032

Burst pressure between	
Min. burst pressure [barg]	9
Max. burst pressure [barg]	20

General

Shape	Single Hinge
Size [inches]	2
Material	Inc625 - 2.4856
Tolerance [%]	5 10 other

FEMTO

Energy [µJ]	80
Frequency [kHz]	120
Speed [mm/s]	1000
Z-focus offset [mm]	61,9

Figuur 68: Afdruk van het tabblad parameters.

7.13.1 Conclusie

Aangezien steeds met eenzelfde lot is gewerkt, is er nog geen definitieve conclusie. Er is echter wel de mogelijkheid om de lotafhankelijkheid te controleren. Indien blijkt dat er wel degelijk een verschil is tussen verschillende loten, zal de BPC moeten aangepast worden met nieuwe data en zal de oudere data verwijderd moeten worden.

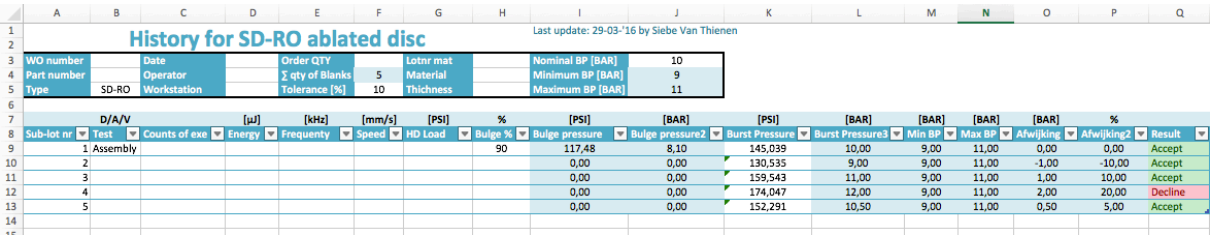
7.14 Data loggen testresultaten

7.14.1 Doel

Om kennis uit bestaande data te halen, is het uiterst belangrijk dat de data goed bewaard worden. Vroeger werd deze data al ingegeven en bewaard maar tijdens de analyse bleek dat er veel tijd nodig was om deze in een juiste structuur te krijgen, omdat deze gegevensinvoer op een ongelukkige manier was opgebouwd. Ook bleken er enkele verbeteringen mogelijk voor de invoer. Met deze informatie is er getracht een vernieuwde en verbeterde versie van de huidige template te maken.

7.14.2 Template

Bij de analyse van de bestaande data kwamen enkele tekortkomingen van de spreadsheet aan het licht. Deze spreadsheet was niet gebruiksvriendelijk om een eenvoudige analyse op te voeren. Daarom werd een nieuwe spreadsheet (Figuur 69) aangemaakt. In de vernieuwde spreadsheet zijn berekeningen geïmplementeerd zodanig dat de operator geen berekeningen meer dient te maken. Zo zal er automatisch ingevuld worden hoeveel blanks de operator al heeft gebruikt, wat de procentuele afwijking is ten opzichte van de nominale druk, de vaste parameters worden in een volgende regel automatisch overgenomen etc. Ook kan de operator nu simpelweg aflezen of een breektest voldoet of niet. Eerder moest hij zelf een beslissing maken. Bijkomend is op een extra tabblad nog een regelkaart voorzien. Deze werd eerder uitvoerig besproken (zie blz. 35). Tenslotte is op een laatste tabblad nog een omrekening mogelijk tussen verschillende eenheden.



History for SD-RO ablated disc

Last update: 29-03-'16 by Siebe Van Thienen

WO number		Date		Order QTY		Lotnr mat	
Part number		Operator		∑ qty of Blanks	5	Material	
Type	SD-RO	Workstation		Tolerance [%]	10	Thichness	

Nominal BP [BAR]	10
Minimum BP [BAR]	9
Maximum BP [BAR]	11

	D/A/V		[µJ]	[kHz]	[mm/s]	[PSI]	%	[PSI]	[BAR]	[PSI]	[BAR]	[BAR]	[BAR]	[BAR]	%	
Sub-lot nr	Test	Counts of exe	Energy	Frequenty	Speed	HD Load	Bulge %	Bulge pressure	Bulge pressure2	Burst Pressure	Burst Pressure3	Min BP	Max BP	Afwijking	Afwijking2	Result
1	Assembly						90	117,48	8,10	145,039	10,00	9,00	11,00	0,00	0,00	Accept
2								0,00	0,00	130,535	9,00	9,00	11,00	-1,00	-10,00	Accept
3								0,00	0,00	159,543	11,00	9,00	11,00	1,00	10,00	Accept
4								0,00	0,00	174,047	12,00	9,00	11,00	2,00	20,00	Decline
5								0,00	0,00	152,291	10,50	9,00	11,00	0,50	5,00	Accept

Figuur 69: Voorbeeld van de template met willekeurige waarden ingevuld.

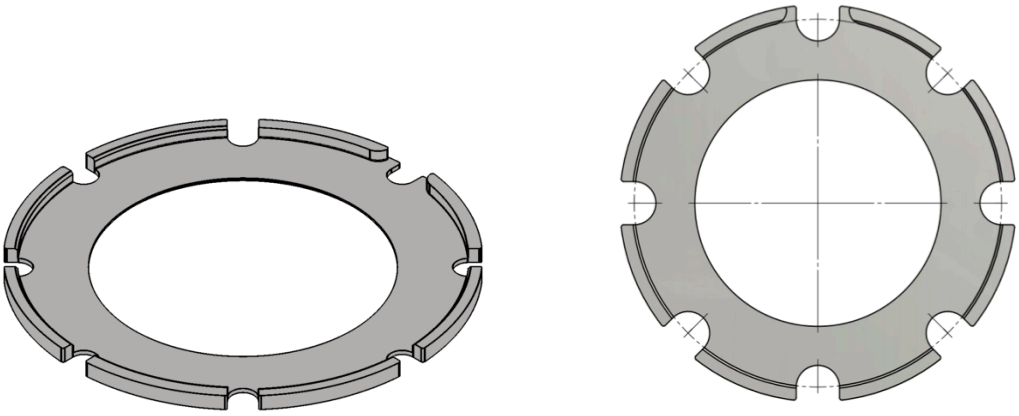
7.15 Tooling voor assemblage

Bij de productiestap van disc tot assemblage werden de onderdelen manueel in elkaar gepast en met puntlassen gemonteerd. Dit bleek echter geen optimale methode te zijn. Met regelmaat waren assemblages niet geschikt omwille van een slechte centrering. Daarom is een tooling ontwikkeld die een correcte centrering garandeert en eenvoudig en ergonomisch in gebruik is. Twee opties zijn mogelijk. De eerste maakt gebruik van een centrering aan de hand van de buitendiameter. Een andere optie maakt gebruik van een pen-speerpunt principe.

7.15.1 Optie 1 – Insert

Deze tooling (Figuur 71) is gebaseerd op een dubbele buitendiameter centrering. Figuur 70 geeft een visuele ondersteuning van volgende beschrijving. De basering wordt aangebracht in de tooling. Aan de andere zijde wordt de disc met de bolling naar de basering geplaatst. De disc wordt met 2 puntlassen aan de flens bevestigd. Dit geheel wordt uit de tooling gehaald en omgedraaid. Vervolgens wordt eerst de teflon gasket aangebracht. Tenslotte de HD ring aanbrengen en in de uitsparingen de puntlassen plaatsen. De volgorde van de volgende stappen is hier van belang. De eerste puntlas mag op eender welke plaats aangebracht zijn. Vervolgens dient de overstaande zijde gelast te worden. De derde puntlas wordt 90 graden verschoven aangebracht om vervolgens opnieuw de overstaande te bevestigen. Deze methodiek wordt steeds herhaald tot alle acht punten gelast zijn. Bijkomstig kunnen de dichtingen aangebracht worden voor de uiteindelijke montage.

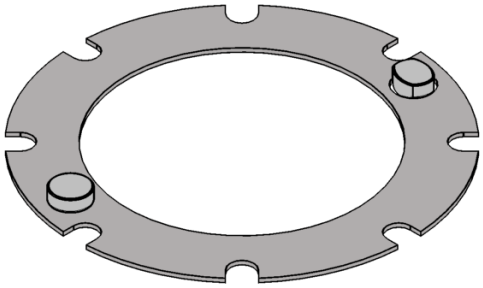
Figuur 70: Assemblageproces met gebruik van tooling



Figuur 71: Tooling optie 1 - Insert

7.15.2 Optie 2 – Pen speerpunt

Een andere mogelijkheid is gebruik maken van de reeds aangebrachte gaten. De centrering gebeurt op basis van een pen en een speer die in de gaten past zoals op Figuur 72 te zien is. De speer belet een overdimensionering van de tooling. De pen in het gat aanbrengen maakt enkel nog een rotatie mogelijk rond de as van de pen. Een tweede pen kan praktische problemen opleveren. Het is echter niet mogelijk om de pennen exact uit te lijnen. Er zal steeds en lichte afwijking op zitten. De speer laat een kleine foute marge toe zonder aan centrering in te boeten. Een nadeel van deze methode is in dit geval de braam, die tijdens het laseren ontstaat, in de gaten. Deze braam is afkomstig van de productiestap waarbij de gaten worden aangebracht. Met behulp van een laser wordt het metaal uitgesneden. Deze braam ligt op de plaats waar de speerpunt contact maakt. De productiestap van de laser moet worden aangepast zodanig dat de braam op een andere plaats blijft staan. De gebruikshandelingen zijn analoog aan die van de andere tooling.



Figuur 72: Tooling optie 2 - Pen speerpunt

In overleg met productie en engineering is gekozen voor optie 1 omwille van zijn eenvoud. Begin februari is de tooling geproduceerd. In bijlage is de technische tekening met correcte dimensionering terug te vinden.

7.15.3 Evaluatie tooling

De tooling heeft zijn nut al bewezen. Het plaatsen van de puntlassen gebeurt steeds op dezelfde plaatsen. De centrering van de disc gebeurt tegen de binnendiameter van de tooling. Hiervoor werd een kleine speling voorzien. Bij het ontwerp werd geen rekening gehouden met de radius die op de hoek van de binnendiameter werd aangebracht. Hierdoor is de speling te groot waardoor een optimale centrering niet altijd mogelijk is. Een mogelijke aanpassing zou een verkleining van de speling zijn waardoor een betere centrering mogelijk is.

7.16 Conclusie Femtotechnologie

Het gebruik van de Femtotechnologie voor het maken van de SD-RO resulteert in een stabieler en robuuster productieproces, een verhoging van de productkwaliteit en een merkelijke uitvalsreductie. Toch is een spreiding van de breekresultaten niet uit te sluiten. In een volgend deel worden enkele oorzaken aangehaald die een invloed kunnen hebben op de spreiding en zijn mogelijke oplossingen bedacht om de spreiding te reduceren. Tenslotte worden er nog enkele praktische voordelen opgesomd van de BPC.

7.16.1 Fouttolerantie bij verschillende materiaaldiktes

7.16.1.1 Type van belastinggeval

Een dun materiaal zal bij het bollen sterk plastisch vervormen. Een dikker materiaal zal dit verschijnsel minder vertonen. Hierdoor zal een dun materiaal eerder op treksterkte belast worden en een dikker materiaal eerder op afschuiving. Beide belastingsgevallen vertonen mogelijk een andere reactie tijdens een breektest.

7.16.1.2 Invloed van de counts of executions

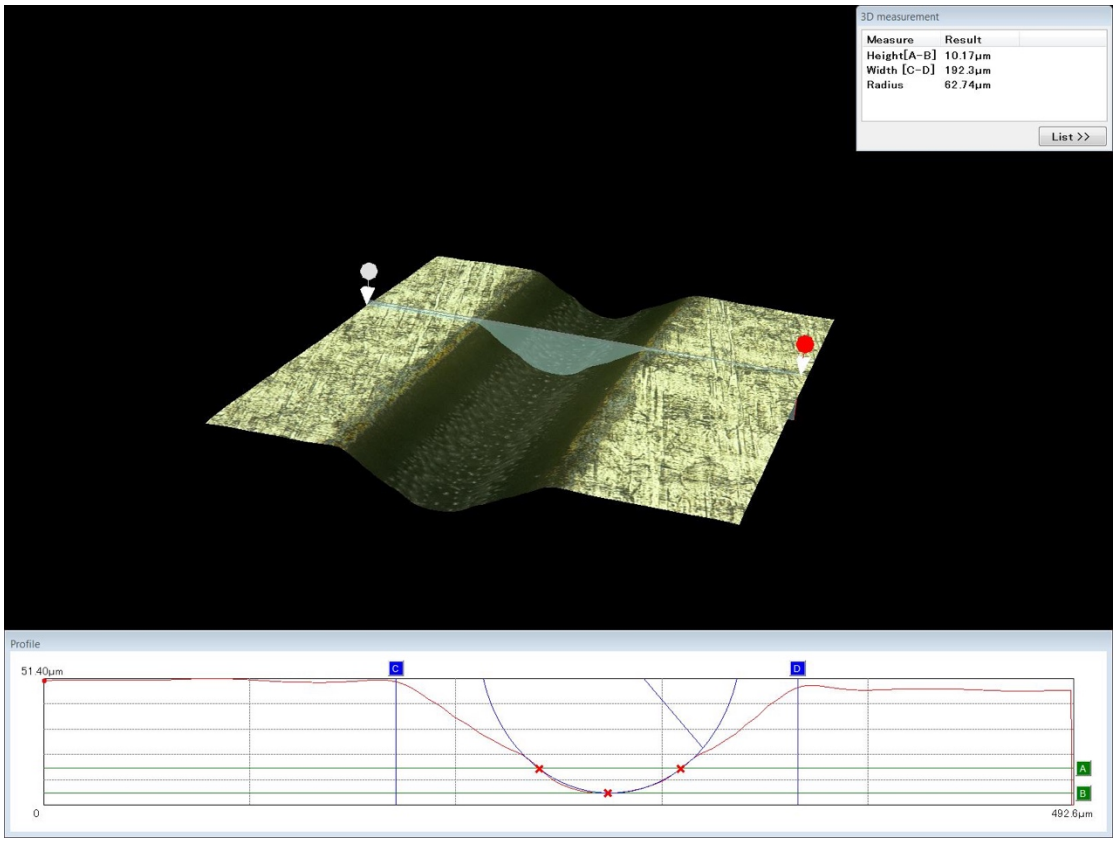
Indien twee materialen worden gekozen voor het ontwerp van een breekplaat, zal bij het dikste materiaal de fouttolerantie kleiner zijn dan bij het dunnere materiaal. Aangezien het aantal lijnen naast elkaar constant blijft, zal de groef van het dikkere materiaal een smaller verloop vertonen. Door het smalle verloop, is de kans op reflectie van de laserstraal groter en zal er minder energie gebruikt kunnen worden voor de effectieve ablatie. De energie verdeelt zich meer over het oppervlak van het materiaal. Dit verklaart mogelijk het feit dat, bij een dikker materiaal, het vermeerderen of verminderen met één counts of executions, een kleinere invloed heeft op de breekdruk ten opzichte van het dunnere materiaal. Het aantal lijnen verhogen bij een dunner

materiaal kan mogelijk een oplossing bieden om een kleinere fouttolerantie te bekomen.

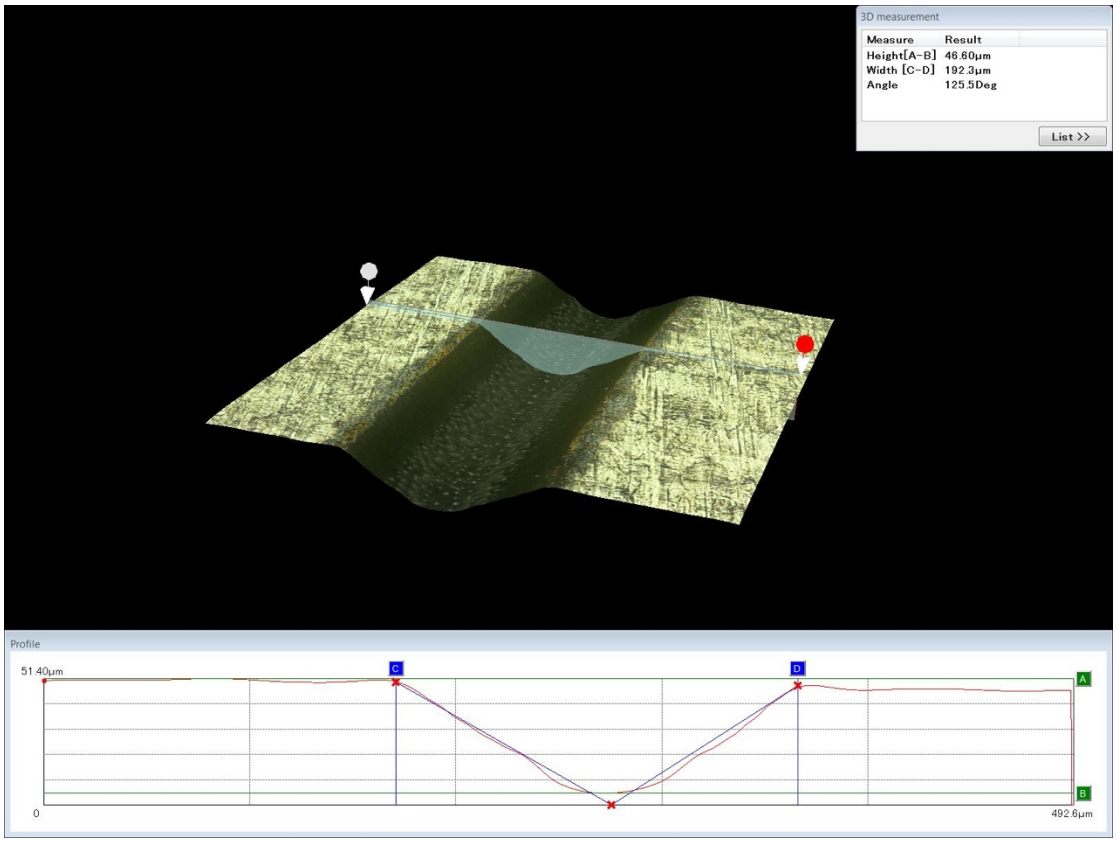
7.16.1.3 Radius in de groef

Na het ableren is de radius in de groef opgemeten met een microscoop zoals op Figuur 73 en Figuur 74 geïllustreerd wordt. Aangezien het aantal lijnen bij de ablatie constant blijft, zal de breedte bovenaan de groef nagenoeg constant zijn. De diepte varieert met de materiaaldikte en de breekdruk. Een relatief lage breekdruk bij een dikker materiaal resulteert in een diepere groef met een kleinere hoek.

Tabel 10 geeft enkele waardes voor verschillende materiaaldiktes weer. Een stijgende materiaaldikte heeft een kleinere radius en een kleinere hoek als gevolg.



Figuur 73: Radius opgemeten met micropscoop voor een materiaaldikte van 0,1524 mm.



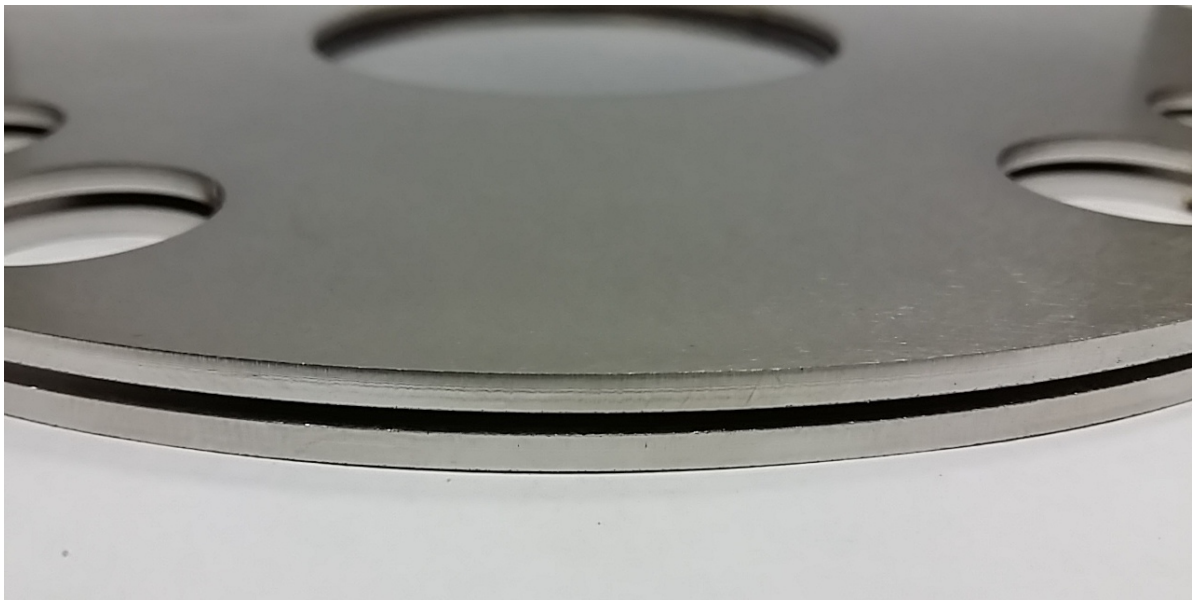
Figuur 74: Hoek opgemeten met microscoop voor een materiaaldikte van 0,1524 mm.

Tabel 10: Radius en hoek van enkele groeven voor verschillende materiaaldiktes

Materiaaldikte [mm]	Radius [µm]	Hoek [°]
0,101	126,8	152,5
0,1524	62,74	125,5
0,254	21,66	76,19
0,3048	10,44	56,63

7.16.1.4 Speling van de HD/BA

De HD/BA zijn onafhankelijk van de materiaaldikte. Zodoende zal bij een dikker materiaal de speling groter zijn tussen HD/BA. Bij het puntlassen wordt de speling weggewerkt door net voor het puntlassen beide onderdelen goed tegen elkaar te klemmen. De speling is te zien op Figuur 75, in dit voorbeeld werd een materiaal van 0,254 mm gebruikt en één puntlas aangebracht. Door de HD/BA tegen elkaar te duwen, ontstaat een extra spanning in de HD/BA en staan beide bol. Dit kan mogelijk een invloed hebben op de spreiding van de breekresultaten bij assemblages.



Figuur 75: Speling die ontstaat door bij het puntlassen van de base aan de holddown.

7.16.1.5 De vacuümtafel van de Femtolaser

Indien gekozen wordt voor een basismateriaal dat de volledige vacuümtafel afdekt, is er een grotere onderdruk. Een grotere onderdruk resulteert in een vlakker bovenoppervlak van het materiaal waardoor de laserstraal loodrecht invalt. Indien de laserstraal niet loodrecht invalt, daalt de hoeveelheid energie per oppervlak en daalt het rendement van de ablatie.

Een dunner materiaal past zich beter aan de vorm van de vacuümtafel aan. Hierdoor is de kans op een vlak oppervlak groter, wat mogelijk resulteert in een betere ablatie (hogere energiedichtheid). Dikkere materialen passen zich moelijker aan de vorm van de vacuümtafel aan waardoor ze mogelijk lichtjes bol of hol blijven staan tijdens het ableren.

7.16.2 Fouttolerantie bij disc vs. Assemblage

Niet enkel de materiaaldikte is van belang bij de fouttolerantie. Ook blijkt er een verschil te zijn tussen de fouttolerantie van een disc en een assemblage. Mogelijke oorzaken en oplossingen zijn in deze paragraaf beschreven.

7.16.2.1 Puntlasbevestiging

Standaard is de disc met twee puntlassen bevestigd aan de HD, beide puntlassen zijn 180° verschoven. Bij de breektesten bestaat de mogelijkheid dat de disc vervormd. De puntlassen houden de disc op de juiste plaats maar loodrecht op de verbindingslijn tussen beide punten kan de disc wel verplaatsen. Wetende dat het door een juiste HD load niet zou mogen gebeuren. Door het aantal puntlassen te verhogen, zou het vervormen al dan niet belet kunnen worden.

7.16.2.2 Constante HD Load

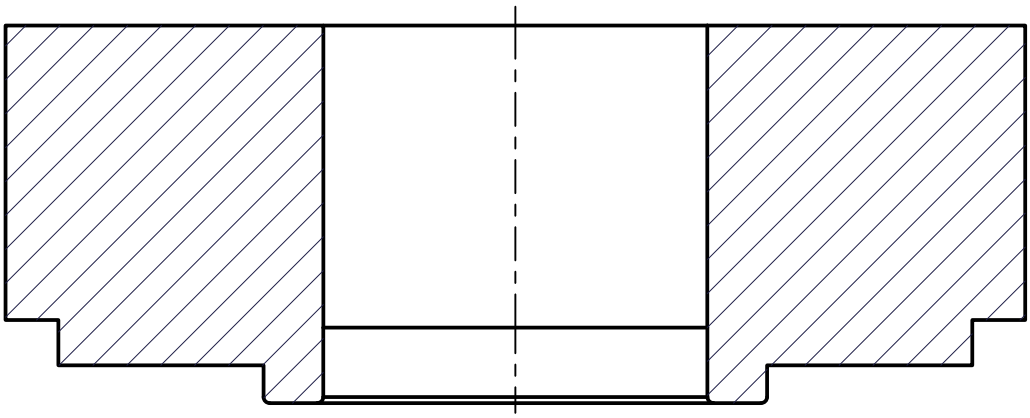
Bij de disctest en de assemblagetest blijft de HD load constant, hoewel de tooling omgedraaid wordt. Aangezien de tooling aan de ene zijde een groter oppervlak heeft dan aan de andere zijde, is er een andere kracht die inwerkt op de disc (resp. Assemblage). Aangezien de druk constant gehouden wordt en de kracht gelijk is aan:

$$F = p \cdot A$$

Daardoor zal bij een disctest een andere kracht plaatsvinden dan bij een assemblagetest. Mogelijk kan de disc meer slippen bij de assemblage.

7.16.2.3 Inwerking van de kracht

Bij de disc test wordt de tooling (Figuur 76) zo geplaatst dat er een kleiner oppervlak is die net naast de bolling aansluit. Hierdoor kan de disc nagenoeg niet slippen. Wordt de assemblage getest, dan wordt de tooling onderste boven geplaatst. Hierdoor vergroot het oppervlak (cfr. 7.16.2.2). Wordt de breekplaat bij de klant gemonteerd, dan is de krachtwerking nog anders. Daar wordt met behulp van bouten de assemblage tussen flenzen voorzien.



Figuur 76: Perstooling voor het testen van breekplaten. De tooling wordt gebruikt in getekende postitie voor discs, voor assemblages wordt de tooling omgedraaid.

7.16.3 Afwijkingen ten opzichte van de werkelijkheid

7.16.3.1 Afwijking van het meetapparaat

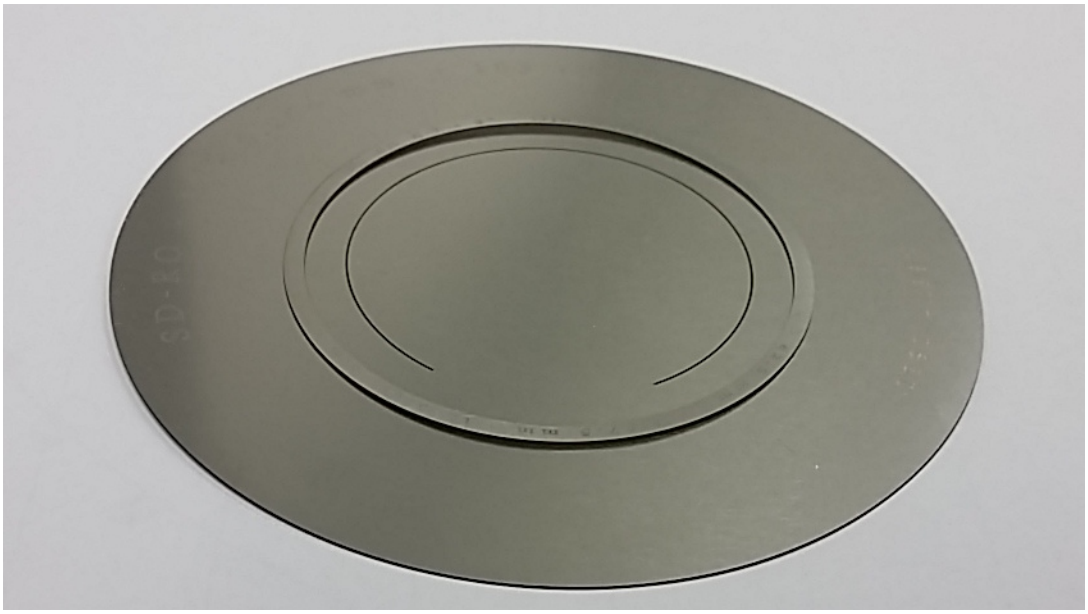
De persinstallatie is uitgerust met een analoge en een digitale manometer. Voor een breektest kan uitgevoerd worden, moet een HD load ingesteld worden alsook de breekdruk. Tijdens de breektest is waar te nemen dat beide manometers een verschillende druk weergeven. Zodoende wijkt de HD load af van de opgegeven waarde die bij het ontwerp vermeld staat.

7.16.4 Spreiding bij het puntlassen

Bij testen met de assemblage is gebleken dat het opvoeren van het aantal puntlassen een verbetering geeft in de stabiliteit van de meetresultaten. Traditioneel is de assemblage voorzien van twee puntlassen. Indien het aantal wordt opgedreven naar zestien puntlassen, verschoven over 22,5 ° en kruislings aangebracht, dan vertoont de assemblage een stabieler gedrag en komt overeen met een losse disc. De spreiding kan door deze kleine aanpassing twee tot drie keer verkleind worden.

7.16.5 Lijncontact

Bij het zoeken naar een verklaring tussen het verschil in breekdruk bij een disc en een assemblage, is getracht om de testprocedure zo eenvormig te krijgen. Standaard worden assemblagetesten uitgevoerd met dezelfde tooling als die van de disc, maar de tooling wordt omgedraaid om het oppervlak op de gasket te vergroten (zoals in werkelijkheid). Bij een poging waarbij de tooling niet werd omgedraaid, vertoonde de assemblage gelijke resultaten als een losse disc. Dit inzicht heeft het onderzoek naar een mogelijke oplossing geleid. Er is gezocht naar een oplossing om de invloed van de stand van de tooling uit te sluiten. Toen kwam het idee om het ontwerp te verbeteren door het toevoegen van een ring aan de assemblage. De ring heeft als doel de kracht en dus vlaktedruk, die de pers (resp. de flenzen bij montage) uitoefent, te concentreren net naast de groef. Dit lijncontact vertoont merkelijk betere resultaten. De disc en de assemblage reageren zo op een analoge manier bij een breektest. Deze aanvulling geeft de mogelijkheid om het aantal disctesten te reduceren. Hierbij is de BPC ook toepasbaar voor het maken van assemblages en moeten er geen nieuwe curves opgesteld worden voor de assemblage.



Figuur 77: Toevoegen van een ring die een lijncontact moet simuleren.

Bij de productie mag er nu vanuit gegaan worden dat de resultaten van een disc gelijkwaardig zijn aan die van een assemblage. Bij het testen van de werking van de BPC, bleek dat de spreiding van zowel disc als assemblage veel beter is.

7.16.6 Keuze van de gaskets

Ook de invloed van de gaskets is nagegaan. Bij testen zonder gaskets, waarbij er enkel een metaal-op-metaal afdichting is, was de spreiding van de breekdrukken kleiner. Vanuit productie werd meegegeven dat het type van gaskets dat geschikt is voor voedingstoepassingen, sterk vervormt bij het klemmen tussen flenzen. Aangezien SD-RO frequent ingezet wordt bij het beveiligen van installaties voor het zuiveren van drinkwater, zal de spreiding groter zijn. Indien gebruik gemaakt kan worden van een stijvere gasket, kan de spreiding verkleind worden.

7.16.7 Operatorafhankelijkheid

In tegenstelling tot de traditionele productiemethode, is bij Femtotechnologie de productie van breekplaten operator onafhankelijk. Met behulp van de BPC kan een voorspelling gedaan worden van de parameters voor de Femto. Door een disc (resp. assemblage) te gaan ableren en vervolgens te testen kan gecontroleerd worden of de parameters een goede combinatie vormen. Indien de afwijking niet binnen de toegestane tolerantie ligt, kunnen de parameters manueel bijgestuurd worden (binnen het voorspellinginterval). Bij de traditionele productiemethode was de spreiding soms zo groot dat de operator een andere materiaaldikte koos. Door de verbeterde productiemethode is dit niet meer nodig en volstaat het om de parameters te wijzigen.

7.16.8 Praktische voordelen

Door het gebruik van de BPC is het mogelijk om de productietijd van het gehele eindproduct te halveren. In de toekomst zal de voorspelling steeds correcter gebeuren waardoor de productietijd mogelijk geminimaliseerd kan worden tot één derde van de huidige productietijd. Dit is te wijten aan reduceren van de uitval. Met behulp van de voorspelling moet eerst gezocht worden naar juiste parameters. Indien deze gevonden zijn, is het mogelijk om een hele batch te gaan produceren. Vervolgens moet het aantal testen uitgevoerd worden zoals de norm beschrijft. Indien blijkt dat enkele breekplaten niet aan de specificaties voldoen, moet gezocht worden naar de oorzaak. De spreiding op de breekresultaten zou hier niet de oorzaak van mogen zijn. Indien binnen productie beslist wordt om een nieuwe Femtolaser aan te schaffen, is het mogelijk om aan de hand van de algoritmes die voor handen zijn, na te gaan of de voorspelling blindelings gebruikt kan worden. Indien niet, moet voor die bepaalde laser de karakteristieken nog bepaald worden.

8 CYCLESTAND

8.1 Doel

Een cycletest registreert het aantal keren dat een product een belasting kan verdragen. Een uitbreiding op deze masterproef is het controleren van breekplaten op een cyclestand. Het patroon van een cycle kan door de klant zelf gekozen worden. Zo kan een beeld gevormd worden van de levensduur (onder bepaalde voorwaarden) en hoe een breekplaat zich gedraagt na enkele belastingen. Gedraagt de breekplaat zich dan nog steeds gelijkaardig of vertoont deze andere kenmerken. Een mogelijke methode van de cyclestand is hier theoretisch uitgedacht. Tot op heden is de breekplaat nog niet op de cyclestand getest.

8.2 Specificaties van de cyclestand

Het toepassingsgebied van de SD-RO heeft typerend zoutwater in gebruik. Om waarheidsgetrouw te testen, zal ook voor de cyclestand zoutwater gebruikt worden. De cycledruk varieert tussen 0 en 90% van de minimale breekdruk van de breekplaat. Aangezien het economisch gezien niet interessant is om alle mogelijke combinaties te testen, wordt voorgesteld om te starten met de kleinste breekplaat (1,5 inch) en grootste (4 inch) die op de Femtolaser gemaakt kan worden. De cyclestand moet voorzien worden van een ontluchtingsventiel om de lucht die zich ophoopt af te voeren. Ook een vulventiel is nodig om de installatie van zoutwater te voorzien. De mogelijkheid om meerdere breekplaten gelijktijdig te testen is ook zeer aangeraden. Hierdoor kunnen lange wachttijden vermeden worden en kunnen extreme resultaten sneller worden geëvalueerd.

8.3 Cyclestand voor SD-RO

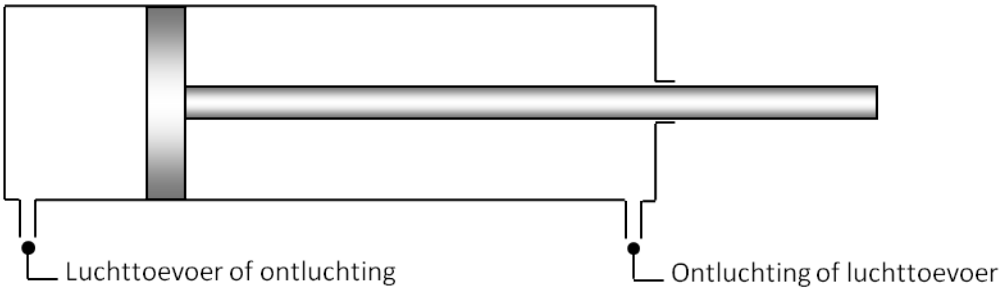
Fike Europe beschikt over 3 cyclestanden. Eén daarvan is ontworpen door masterstudenten Industriële Ingerieurswetenschappen Elektromechanica van Lessius Hogeschool Mechelen.

De teststanden om breekdrukken te meten werken op basis van perslucht of olie, afhankelijk van de toepassing. Dit om gevaarlijke situaties te vermijden met risicovolle of explosieve stoffen. Dit is ook zo beschreven in de ISO-normen.

Indien een breekplaat op cycles wordt getest, dient de teststand gebruik te maken van het medium dat later ook effectief zal gebruikt worden in de toepassing. Om de SD-RO op een van deze testbanken te gaan testen, zal een tooling ontwikkeld moeten worden die via de gebruikelijke perslucht een waterdruk genereert. Het partoon waarmee de cycles voorkomen, zal op maat van de klant zijn. Dit om de cycletest waarheidsgetrouw na te bootsen. De druk wordt bepaald aan de hand van maximum druk van de

kleinste maat en de minimum druk van de grootste maat van de disc. Standaard wordt binnen Fike Europe gewerkt op basis van 90% van de minimum breekdruk.

De cyclestand voor de SD-RO is oorspronkelijk ontworpen met perslucht. Via de tooling zal de perslucht het water op druk brengen. Dit kan gebeuren met een dubbelwerkende cilinder. De dubbelwerkende cilinder bevat minimaal 2 aansluitingen. Afhankelijk van de aangestuurde ingang, zal de zuiger in- of uitschuiven.



Figuur 78: Dubbelwerkende cilinder

Bij de cyclestand zal een aansluiting van de cilinder verbonden worden met perslucht. De zuiger zal als membraan functioneren tussen de perslucht en het water. Aan de andere zijde van de zuiger zal het volledige circuit van water worden voorzien. Wordt de druk aan de perslucht zijde nu verhoogd, dan zal de zuiger bewegen en druk op het water zetten tot beide drukken gelijk zijn en er een evenwicht optreedt. Aangezien een gas samendrukbaar is, is er voor de zuiger een buffervat voorzien om drukschommelingen op te vangen. Hoe groter het volume perslucht, hoe stabieler het systeem zich zal gedragen. Na de dubbelwerkende cilinder wordt aan de waterzijde een kraan voorzien om eventuele luchtophopingen te verwijderen en het systeem te voorzien van het nodige water. Het circuit is zo opgebouwd dat er meerdere breekplaten tegelijkertijd getest kunnen worden. Voor elke breekplaat is een afsluiter voorzien indien de breekplaat het zou begeven, dat de cycletest kan blijven doorgaan voor de overige breekplaten.

De SD-RO is, in een zelf ontworpen flenshouder, geplaatst met ingebouwde drukmeting. De drukmeting is zo dicht mogelijk bij de breekplaat geplaatst om meetfouten te voorkomen.

8.3.1 Principeschema cyclestand

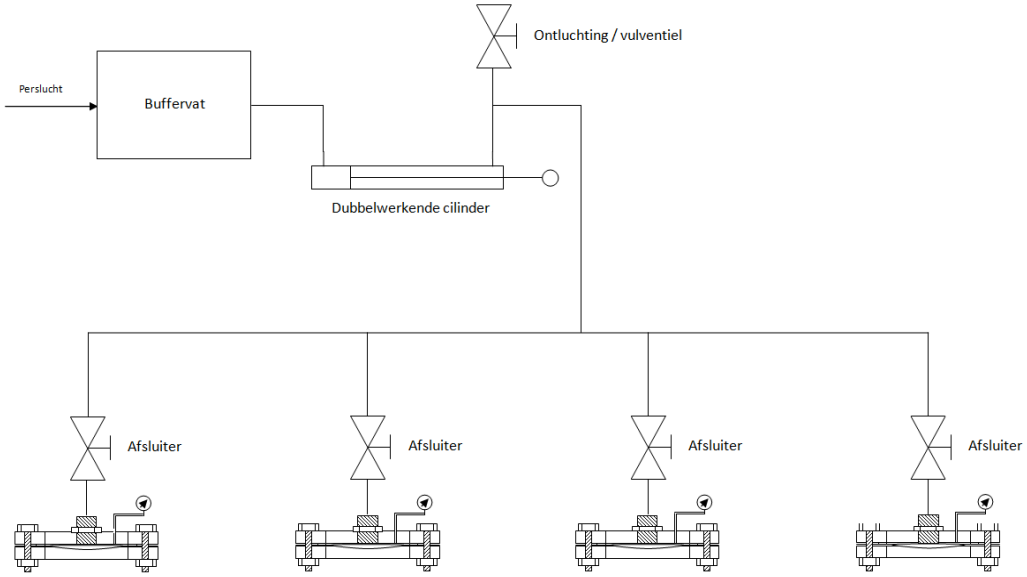
Een schematische voorstelling van de volledige cyclestand wordt weergegeven in Figuur 79: Principeschema cyclestand SD-RO.

8.3.1.1 Vulventiel

Vlak na de dubbelwerkende cilinder wordt een ventiel voorzien. Dit ventiel heeft een dubbele functie. Het fungeert als vulventiel om het circuit van water te voorzien en als ontluchting om luchtbellen uit het systeem te verwijderen. Let hierbij op dat het vulventiel steeds op de hoogst mogelijke positie geplaatst moet worden.

8.3.1.2 Afsluiter

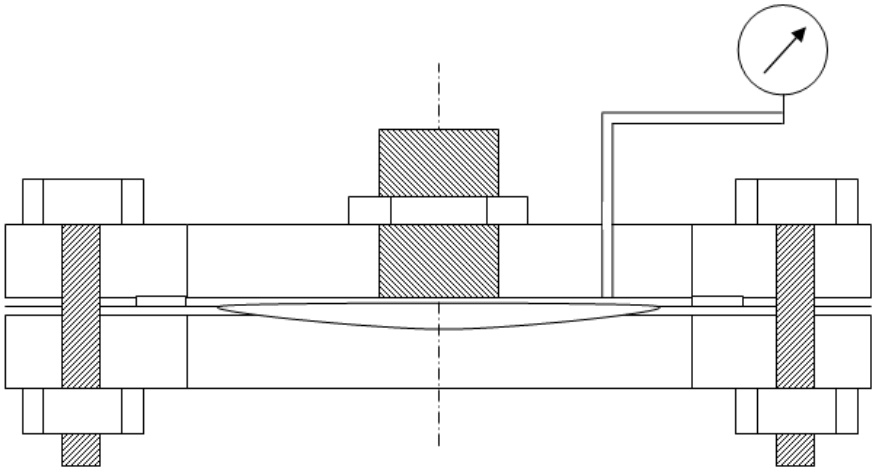
Vervolgens is het vloeistofcircuit voorzien van meerdere afsluiters. Deze kraan maakt het mogelijk om breekplaten apart te vervangen zonder dat er veel water lekt. Een bijkomstend voordeel is dat elke breekplaat afzonderlijk kan worden ge(de)monteerd tijdens de test. Zo is een defecte breekplaat eenvoudig en snel gewisseld.



Figuur 79: Principeschema cyclestand SD-RO

8.3.1.3 Breekplaathouder

De breekplaathouder bestaat uit 2 flenzen. De bovenste flens is een blinde flens voorzien met 2 boringen. Eén boring zorgt voor de toevoer van het medium, in dit geval water. Op de andere boring wordt de drukmeting aangesloten die de cycles opmeet. Figuur 80 is een vergroting van een mogelijke breekplaathouder.

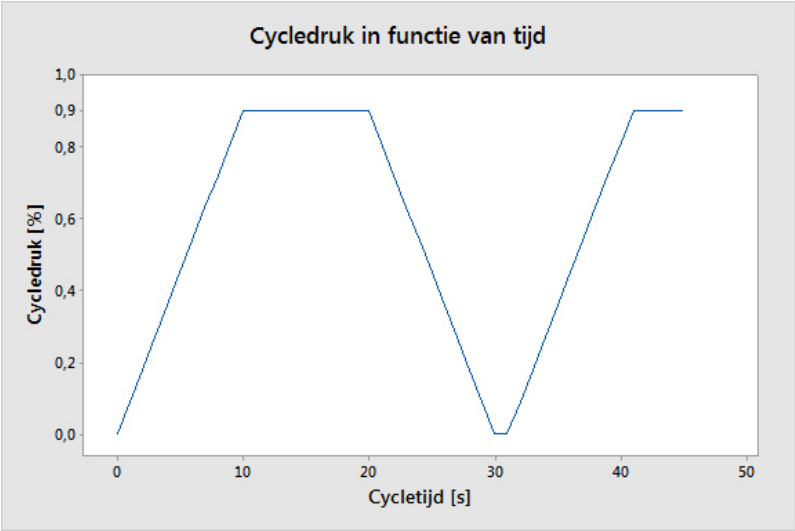


Figuur 80: Breekplaathouder voor een SD-RO te testen in een cyclestand.

Tracht de drukmeting zo dicht als mogelijk bij de druktoevoer te plaatsen, rekening houdend dat de drukmeting niet rechtstreeks op de druktoevoer mag geplaatst worden, om meetfouten te voorkomen. De drukmeting is bewust niet langs opzij aangebracht, dit bracht in het verleden meetafwijkingen met zich mee.

8.3.2 Cyclepatroon

Het cyclepatroon kan door de klant gekozen worden. Het patroon is opgebouwd uit een linieare drukstijging van 0 bar tot 90% van de minimale druk. Deze druk wordt gedurende 10 seconden aangehouden om dan opnieuw lineair te dalen tot 0 barg. Eenmaal de 0 barg bereikt is, stijgt de druk opnieuw tot 90% van de minimum druk. Hieronder een verduidelijkend schema:



Figuur 81: Cyclepatroon SD-RO

BESLUIT

Door dit onderzoek zijn nu de belangrijkste kritische parameters en de gedragskarakteristieken van de Femtolaser voor het maken van scores in breekplaten in kaart gebracht, specifiek voor de breekplaat types SD-RO (zoutwatertoepassingen). Er is onderzocht wat een goede geometrie is voor deze scores. De relatie is daarbij vastgelegd met de productkwaliteit, meer specifiek de beheersing van de breekdruk.

Vanuit deze kennis en gedragskarakteristieken is een theoretisch model met bijhorende algoritmes opgemaakt en vervolgens verwerkt in een rekenmodel.
Met behulp van dit rekenmodel, de 'Burst Pressure Calculator', kunnen we voortaan, vanuit de opgegeven productspecificaties, een theoretische voorspelling maken van de productieparameters en de laserinstellingen.

Met een aanvullend algoritme 'Testing two slopes for exponential - ANOVA' is het nu ook mogelijk om verschillende breekdrukfuncties te controleren. Bovendien biedt deze de mogelijkheid om de materiaallotafhankelijkheid na te gaan, alsook het effect van een kallibratie te controleren. Beide algoritmes zijn met de nodige statistiek onderbouwd.

Enerzijds zijn we hiermee in staat om snel een nieuwe productontwikkeling te doen binnen dit breekplaatconcept. Men kan snel een proces vastleggen van een nieuwe breekplaat en testen doen, met een minimum aan iteratieslagen. Anderzijds kan deze aanpak en methode en een goede basis zijn bij de ontwikkeling nieuwe designs van breekplaten en de fabricage ervan.

De oorzaak en een oplossing is gevonden voor het probleem van verschil in breekdruk tussen een losse breekplaat (in de meetopstelling) en een ingebouwde breekplaat. Dit verschil kan worden weggewerkt door het toevoegen van een extra ring, zonder dat andere componenten moeten gewijzigd worden.

Conclusie: het inzetten van Femto lasertechnologie voor het maken van de scores van breekplaten voor zoutwatertoepassingen resulteert in:
- een eenvoudiger en korter fabricageproces van de score,
- een stabieler en robuuster productieproces,
- een verhoging van de productkwaliteit, m.n. de beheersing van de breekdruk (kleinere spreiding en kleinere fouttolerantie),
- een merkelijke uitvalsreductie,
- sneller ontwikkelproces.

Kortom deze verbeterde geableerde breekplaat voldoet beter aan de opgelegde specificaties. Dit onderzoek kan als basis dienen voor het ontwerp van vele toekomstige nieuwe producten met de Femtotechnologie.

LITERATUURLIJST

Alliance for water efficiency. (2010). *Reverse Osmosis Filter Discharge Water Introduction*. From Alliance for water efficiency: http://www.allianceforwaterefficiency.org/RO_Discharge_Introduction.aspx?terms=alternate+water+source

(1987). In K. Bosch, *Elementare Einführung in die angewandte Statistik* (pp. 180-183). Braunschweig, Wiesbaden, Duitsland: Friedr. Vieweg & Sohn.

Coppens, M. (2012). *Statistiek Deel 1.* Geel: Campinia Media.

Coppens, M. (2012). *Statistiek Deel 2.* Geel: Campinia Media.

DVF. (2011 17-Juli). *De voor- en nadelen van een breekplaat t.o.v. een overdrukklep.* Retrieved 2016 7-Maart from http://static.ow.ly/docs/De%20voor-%20en%20nadelen%20van%20een%20breekplaat%20t.o.v.%20veiligheidsklep_gtF.pdf

EMIS. (2015 13-Oktober). *Reverse osmosis*. From EMIS: http://emis.vito.be/techniekfiche/reverse-osmosis?language=en

Fike Engineering, F. E. Drawings. *Drawings.* Fike Europe, Herentals.

Fike Engineering, F. E. Tables. *Tables.* Fike Europe, Herentals.

Fike Europe [1]. (2015). *Fike's Presence in Europa*. From Fike: http://www.fike.be/history.php

Fike Europe [2]. (2015). *Drukontlastingsproducten - Citaat*. From Fike: http://www.fike.be/ne/pressurerelief.html

Fike Europe [3]. (2015). *Engineered Products*. Retrieved 2015 йил 3-augustus from Fike: http://www.fike.com/products/engineered-products/

Fike Europe [4]. (2015). *Salt Water Applications, Type SD-RO.* Herentals: Fike Europe.

MC Clave, B. e. (2007). Het volledig gerandomiseerde ontwerp: één factor. In B. e. MC Clave, *Statistiek, een inleiding voor het hoger onderwijs* (pp. 308 - 319). Amsterdam: Pearson Education.

MCClave, B. e. (2007). Het meten van de nauwkeurigheid van voorspellingen: MAD en RMSE. In B. e. MCClave, *Statistiek, een inleiding voor het hoger onderwijs* (pp. 394-410; 590-593). Amsterdam: Pearson Education.

Normalisatie, B. v. (2003). *Veiligheidsvoorzieningen voor bescherming tegen ontoelaatbare overdruk - Deel 2.* NBN. Brussel: NBN.

Osmoseapparaat. (2013). *Omgekeerde osmose*. From Osmoseapparaat.nl: https://www.osmoseapparaat.nl/omgekeerde-osmose

Reverse Osmosis. (2015 10-May). Retrieved 2015 йил 3-August from Robwink: http://www.robwink.nl/index.php?load=meerinforo

Rofin-Baasel. (2016, April 7). *Ultra short pulse laser*. Opgehaald van Roofin-Baasel: https://www.rofin.com/en/products/ultrashort-pulse-lasers/starfemto-fx/

Safety devices for protection against excessive pressure. (2004). *II*, 39.

Toetsen van verschillen tussen twee of meer groepen. (2006, 05 23). Opgeroepen op 03 01, 2016, van Pearson Education: www.pearsoneducation.nl/burnsbush/Hoofdstuk%2017.ppt

Van Thienen, S. Aantal breeekplaten per afmeting. *Vraag van de markt.* Fike Europe, Herentals.

Victor Reinz. (2015 augustus). *AFM 34 techincal Data.* From Victor Reinz - Seeling products: http://datenblatt.reinz.de/_pdf/out/web1/AFM_34_en.pdf

VisualLaserMarker gebruikershandboek Versie 4.6. Günding: Rofin - Sinar Laser GmbH.

Zaiontz, C. (2013-2016). *Comparing the slopes for two independent samples*. Opgeroepen op 02 28, 2016, van Real Statistics Using Excel: http://www.real-statistics.com/regression/hypothesis-testing-significance-regression-line-slope/comparing-slopes-two-independent-samples/

Zaiontz, C. (2013-2016). *Confidence and prediction intervals for forecasted values*. Opgeroepen op Februari 28, 2016, van Real Statistics Using Excel: http://www.real-statistics.com/regression/confidence-and-prediction-intervals/

BIJLAGEN

Fike
FIKE EUROPE

BREEKPLATEN

Data Sheet

Zoutwatertoepassingen
Type SD-RO

Beschrijving

SD-RO breekplaten zijn ontwikkeld om eenvoudige, betrouwbare drukontlasting te verschaffen voor zoutwatertoepassingen zoals b.v. in omgekeerde osmoseprocessen.

Deze breekplaten zijn voorgekerfde breekplaten, die gebruik maken van een breuk van de breekplaat die mechanisch verzwakt is d.m.v. een kerftechniek.

De SD-RO-breekplaten zijn ontworpen om direct tussen standaard voorlas-flenzen geïnstalleerd te worden zonder dat daarvoor specifieke houders vereist zijn. Wegens de minimale hoogte van het product moet bestaand leidingwerk niet gewijzigd worden, waardoor de breekplaten zonder meer in bestaande installaties kunnen worden gebruikt.

Eigenschappen en voordelen

- Intrinsiek veilig ontwerp
- Hoge werkverhouding
- Opening zonder fragmentatie
- Vloeistof- en damptoepassingen
- Uitstekende corrosiebestendigheid
- Snelle vervanging van bestaande uitrusting

Specificaties

Type	SD-RO
Werking	Direct-werkend voorgekerfd
Afmetingen (1)	1,5" - 2" -3" - 4" - 6" / DN40 - DN50 - DN80 - DN100 - DN150
Breekplaatmateriaal	Inconel 625
Procesdichting	AFM 34 (2)
Maximale werktemperatuur	200°C
Beschermende deklaag	Nee
Verhouding tussen werkdruk en minimale breekdruk	95%
Flensafmeting	ANSI 150 - 300 / PN10 - 40
Cyclische / pulserende belasting	R
Damptoepassingen	R
Vloeistoftoepassingen	R
Geen fragmentatie	R
Zittingsconfiguratie	Vlak
Gebruik tussen standaardflenzen	Ja
	R = AANBEVOLEN

(1) Neem contact op met Fike voor andere afmetingen.
(2) Ander dichtingsmateriaal op aanvraag - vraag na bij Fike.

Breekdruk in barg bij 22°C (1)

Afmetingen	ANSI	1,5"	2"	3"	4"	6"
	DN	40	50	80	100	150
De minimale / maximale breekdruk zal niet bestand zijn tegen volledige vacuümdruk	MIN	10	9	8	8	6
	MAX	20	20	20	20	20

(1) Voor hogere of lagere breekdrukken, gelieve contact op te nemen met Fike.

Toleranties (1)

Tolerantie bij 22°C	Standaard ± 10%

(1) Vraag bij Fike na wat de mogelijkheden zijn voor kleinere toleranties.

Tolerantie wordt door ISO/EN omschreven als een totale tolerantie met inbegrip van zowel proces- als breektolerantie.
Volgens ISO/EN kunnen de breekplaten als volgt gemarkeerd worden:
- Breekdrukspecificatie met tolerantie (in % of in een waarde uitgedrukt).
  B.v.: 10 barg ± 10% bij 22°C (± 1 barg)
- Maximale en minimale breekdruk.
  B.v.: max 11 barg bij 22°C – min 9 barg bij 22°C

Op aanvraag kunnen de breekplaten, volgens ASME-code sectie VIII, worden gemarkeerd met het gemiddelde breektestresultaat en de breektolerantie van ± 5% voor breekdrukwaarden ≥ 2,76 barg (± 0,15 barg voor breekdrukwaarden < 2,76 barg).

8.1220.30.3

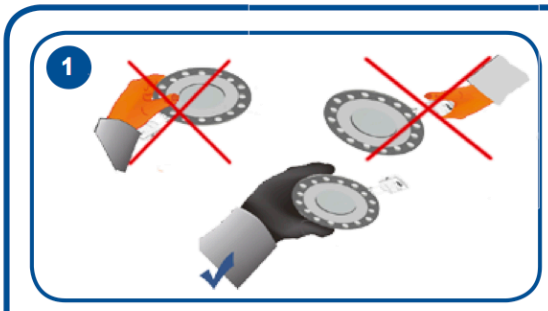
Fike behoudt zich het recht voor de bovenvermelde gegevens te veranderen zonder verwittiging.
Deze gegevens mogen niet gebruikt worden voor constructie zonder schriftelijke bevestiging.

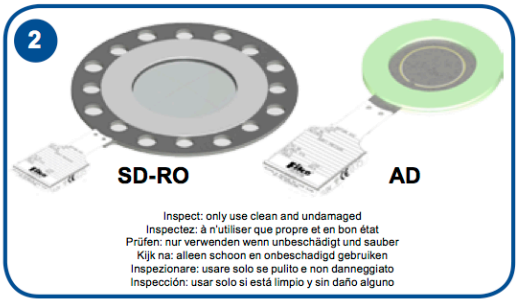
Fike Europe B.v.b.a • Toekomstlaan 52 • B2200 Herentals • Belgium
Tel. +32 14 210031 • Fax +32 14 210743 • email fike-europe@fike.com • website: http://www.fike.be

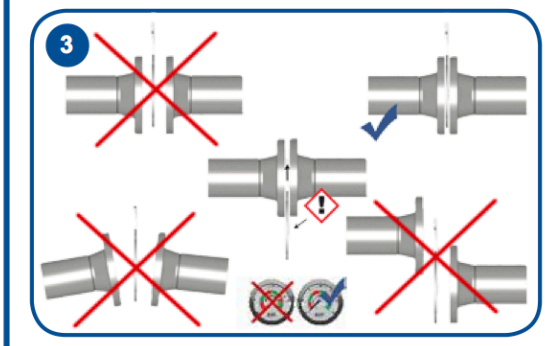
FIKE EUROPE

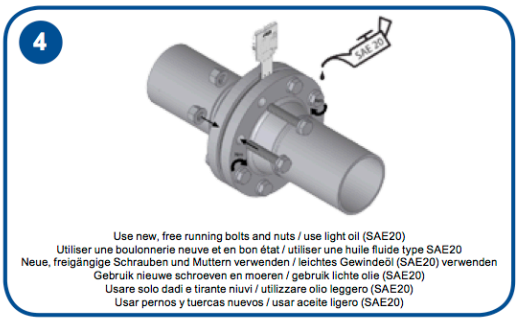
INSTALLATION - INSTALLATIE - INSTALLAZIONE - INSTALACIÓN

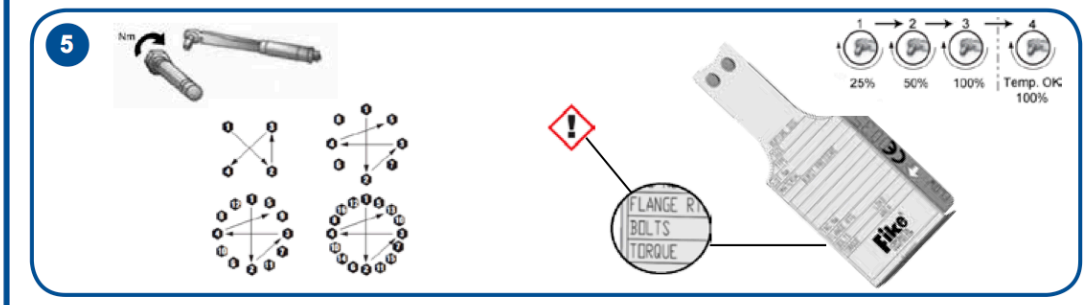
SD-RO, SD-TC and AD-Series



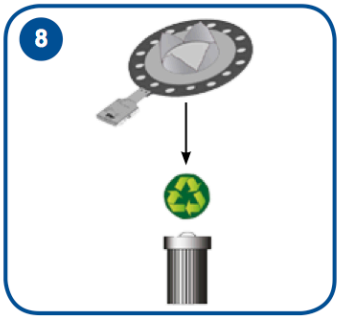








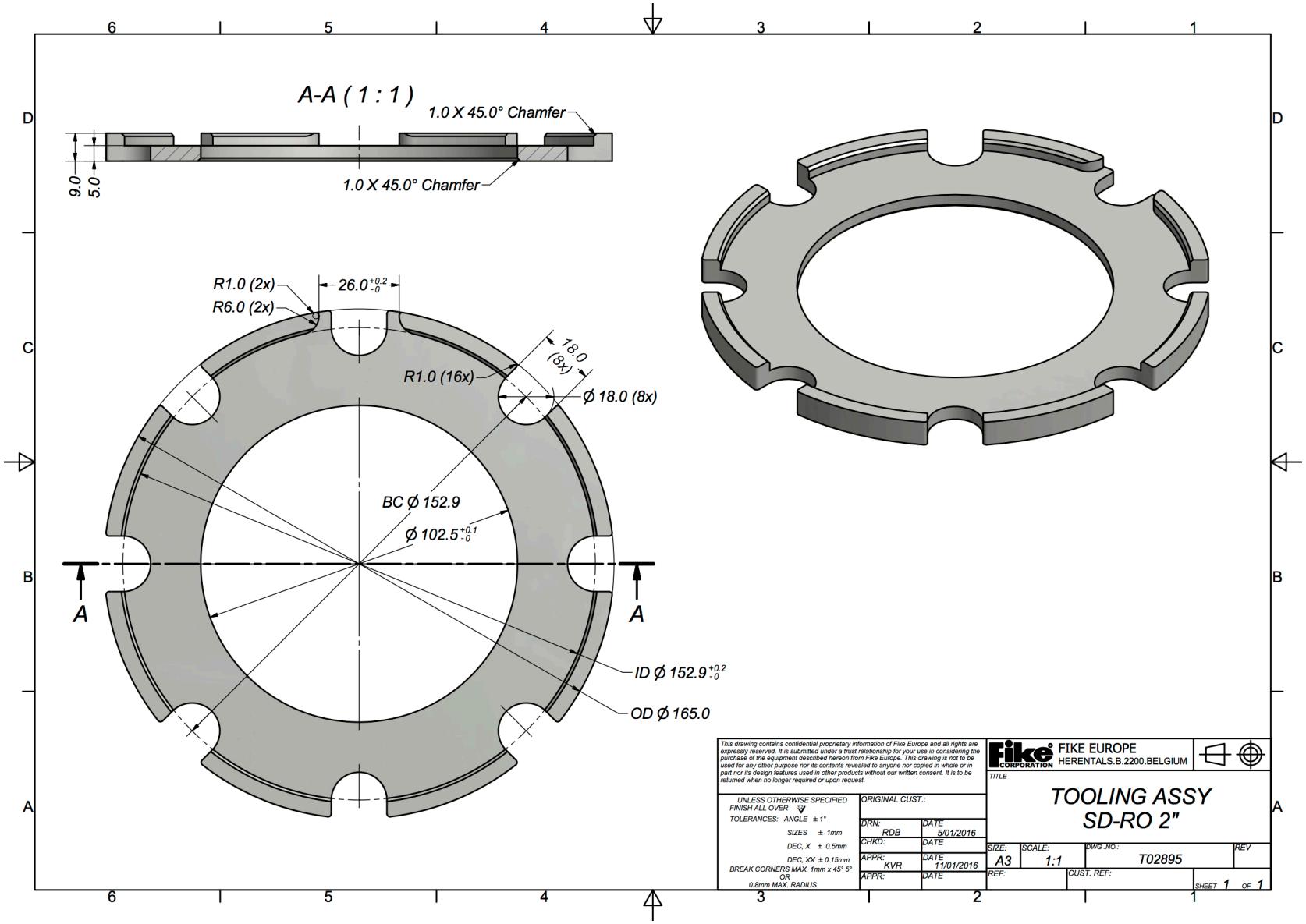
REPLACE - REMPLACER - ERSETZEN - VERVANGEN - SOSTITUIRE - CAMBIAR



Fike Europe B.v.b.a - Toekomstlaan 52 - B2200 Herentals - Belgium
Tel. +32 14 210031 - Fax +32 210743
email fike-europe@fike.com - website http://www.fike.be

Fike United Kingdom www.fike.co.uk
Fike France www.fike.fr
Fike Germany www.fike.de
Fike Italy www.fike.it
Fike Ibérica www.fike.es
Fike Ireland www.fike.ie

8.I150.99.0



This drawing contains confidential proprietary information of Fike Europe and all rights are expressly reserved. It is submitted under a trust relationship for your use in considering the purchase of the equipment described hereon from Fike Europe. This drawing is not to be used for any other purpose nor its contents revealed to anyone nor copied in whole or in part nor its design features used in other products without our written consent. It is to be returned when no longer required or upon request.

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
FINISH ALL OVER √
TOLERANCES: ANGLE ± 1°
SIZES ± 1mm
DEC, X ± 0.5mm
DEC, XX ± 0.15mm
BREAK CORNERS MAX. 1mm x 45° 5° OR 0.8mm MAX. RADIUS

ORIGINAL CUST.:	
DRN: RDB	DATE 5/01/2016
CHKD:	DATE
APPR: KVR	DATE 11/01/2016
APPR:	DATE

FIKE CORPORATION
FIKE EUROPE
HERENTALS.B.2200.BELGIUM

TITLE
TOOLING ASSY
SD-RO 2"

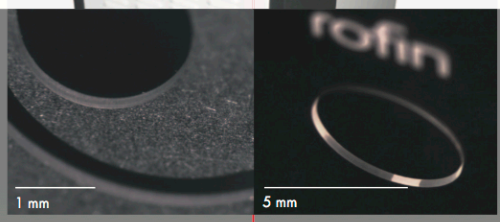
SIZE:	SCALE:	DWG .NO.:	REV
A3	1:1	T02895	

REF: CUST. REF: SHEET 1 OF 1

rofin

StarFemto FX

Cold Laser Material Processing for Industrial Applications



Cold laser material processing with ultrashort pulse lasers is one of the most promising new technologies for high-precision cutting, structuring and drilling of almost all kinds of material without thermal damage. This allows to realize previously impossible features and new applications. Only minimal or no post-processing needed.

The StarFemto FX is ideally matched to industrial material processing applications in the electronics, semiconductor, micro technology and medical device manufacturing as well as other industries.

Features

- Ultrashort pulses adjustable from 300 fs to 10 ps
- Wavelengths: 1030 nm, 515 nm, 343 nm
- Stabilized pulse energy up to 200 µJ (closed loop)
- Repetition rate from single pulse up to 1 MHz
- Complete solutions for cutting, structuring and drilling applications

Customer Benefits

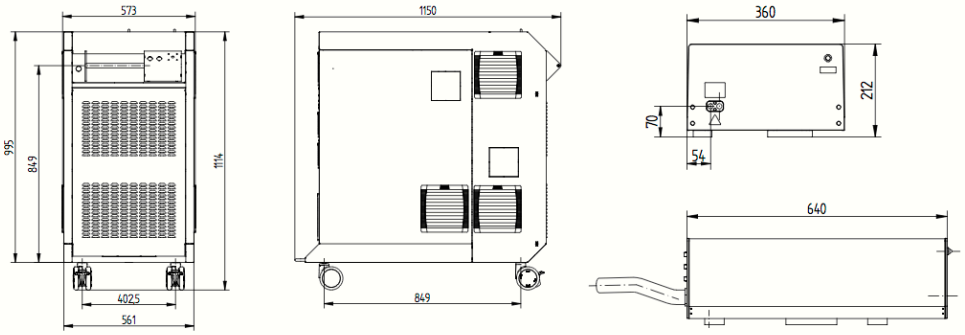
- High-precision laser processing without thermal damage
- Only minimal or no post-processing
- Virtually no restriction on material choice
- Robust industrial use (24/7)
- Safe and easy system integration and maintainability
- Small footprint

ROFIN-BAASEL Lasertech is responsible for the laser micro market within the ROFIN group. The wide range of products includes lasers and laser systems for high precision welding, cutting, structuring and drilling. The complete product development is carried out in-house in direct cooperation with customers. Numerous innovations as well as lasers and laser systems installed all over the world indicate the creative energy and product quality of the ROFIN group **for more than 40 years.**

WE THINK LASER

rofin

StarFemto FX



StarFemto FX										
Wavelength	nm	1030			515			343		
Nominal power after Pulse on Demand	W	6	10	15	3	5	7.5	1.5	2.5	3.75
Max. pulse energy	µJ	200			100			50		
Pulse width (typical)	fs–ps	300 fs to 10 ps			300 fs to 10 ps			ca. 300 fs		
Min. pulse frequency	kHz	single pulse								
Max. pulse frequency	kHz	200 / 600 / 1000								
Beam quality	M^2	< 1.2	< 1.2	< 1.3	< 1.4			< 1.7		
Pulse peak power	MW	max. 660			max. 330			max. 165		
Beam diameter	mm	3.5 ± 0.5								
Beam divergence angle	mrad	< 0.6			< 0.3			< 0.25		
Polarization		Linear horizontal								
Environmental and Electrical Operating Conditions										
Operating voltage	VAC/A	230 / 10								
Line frequency	Hz	50/60								
Power consumption	kVA	1.1								
Weight output module	kg	53								
Weight power supply	kg	230								
Operational temperature	°C	15 – 30								
Dimensions output module	mm (h x w x l)	212 x 360 x 640								
Dimensions power supply	mm (h x w x l)	1.114 x 573 x 1.150								
Options										
Beam delivery		Complete beam delivery for cutting, structuring and drilling applications available								

ROFIN-BAASEL Lasertech GmbH & Co.KG
Petersbrunner Str. 1b | 82319 Starnberg
Phone:+49 (0)8151-776-0 | Fax:+49 (0)8151-776-4159
E-mail: sales@baasel.de

AT: Phone:+49-(0)8151-776-0
E-mail: sales@baasel.de

Benelux: Phone:+31-(0)78-69310-37
E-mail: info@rofin-baasel.nl

CA: Phone:+1-905-607-0400
E-mail: info-canada@rofin-inc.com

CH: Phone: +41-(0)32-322 1010
E-mail: info@rofin-baasel.ch

CN: Phone:+86-21-68552216
E-mail: info@rofin-baasel.com.cn

ES/PT: Phone:+34-948-324-600
E-mail: info@rofin-es.com

F: Phone:+33-(0)1-6911-3636
E-mail: info@rofin.fr

IN: Phone:+91-(22)28477501
E-mail: sales.micro@rofin.in

IT: Phone:+39-039-2729-1
E-mail: info@rofin.it

JP: Phone:+81-(0)46-229-8655
E-mail:info@rofin-baasel.co.jp

KR: Phone:+82-(0)2-837-1750
E-mail: info@rofin.co.kr

SG: Phone:+65-6482-1091
E-mail: reception@rofin-baasel.com.sg

TW: Phone:+ 886-2-2790-1300
E-mail: info@rofin-baasel.com.tw

UK: Phone:+44-(0)1327-701-100
E-mail: sales@rofin-baasel.co.uk

US: Phone:+1-847-483-6300
E-mail: info@rofin-inc.com

More detailed information upon request. Subject to modifications. ©ROFIN-BAASEL_StarFemto_FX_01/15_E_V2.0_gehrke.hildmann

FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
TECHNOLOGIECAMPUS GEEL
Kleinhoefstraat 4
2440 GEEL, België
tel. + 32 14 80 22 40
iiw.geel@kuleuven.be
iiw.kuleuven.be

LID VAN ASSOCIATIE KU LEUVEN