

Abstract (Nederlands)

In de wereld van het nucleaire studieonderzoek worden voortdurend nieuwe experimenten ontwikkeld. Een belangrijk onderdeel hiervan vormen de experimenten met betrekking tot materiaalonderzoek. Voor elk experiment moet een opstelling ontwikkeld worden die functioneel is en het goede verloop van het experiment waarborgt. Nu men bezig is naar met onderzoek naar materiaaldegradatie door bestraling en blootstelling aan vloeibaar loodbismut moet ook hiervoor een opstelling ontworpen worden.

Als student in de industriële ontwerpen heb ik hierbij de wetten van de ontwerpmethodologie gevolgd. In het begin van de verhandeling wordt aan de lezer het hoe en waarom verduidelijkt. Vanaf hoofdstuk 3 begint het eigenlijke ontwerp. Eerst wordt een overzicht gegeven van de eisen die gesteld worden aan het ontwerp. In de informatiefase (hoofdstuk 4) wordt uitgelegd vanuit welke gegevens uitgegaan wordt en waar deze gevonden werden. In de exploratiefase (hoofdstuk 5) wordt al deze informatie overzichtelijk weergegeven en volgens duidelijke criteria beoordeeld. In hoofdstuk 6 wordt een keuze gemaakt voor één concept. Deze keuze wordt hier dan ook gefundeerd. Hierna krijgt de lezer nog een overzicht van de technische uitwerking en de bouw van het prototype (hoofdstuk 7 en 8). Tenslotte wordt het eindconcept in hoofdstuk 9 nog getoetst aan de eisen die in de beginfase van het ontwerp werden opgesteld.

Abstract (English)

New experiments are constantly being developed in the world of nuclear research. An important part of these experiments are those related to material research. Every experiment needs an installation that is functional and guarantees a good experiment. As research on material degradation by radiation and exposure to liquid lead-bismuth is being carried out, a new installation has to be developed.

Being a student in industrial design, I have tried to follow the laws of methodology in design. In the beginning of the essay the whys and wherefores are explained to the reader. Chapter 3 is the start of the actual design process. In this chapter an overview of the list of demands characteristic for the installation will be given. In the next chapter (chapter 4) will be explained what data is being used and where this information was found. In chapter 5 an overview of this information is being generated and evaluated according to clear criteria. The next chapter (chapter 6) explains the choice for one final concept in a well-founded way. Chapter 7 and 8 give an overview of the technical development and the building of the prototype. Finally the result will be tested against the list of demands that was formulated in the first phase of the design process in chapter 9.

Voorwoord

In dit voorwoord wil ik mij speciaal richten tot alle mensen die geholpen hebben bij de totstandkoming van dit eindwerk.

In de eerste plaats wil ik de promotor aangeduid door de Hogeschool West-Vlaanderen departement PIH, namelijk Dr. Ir. Jan Detand, bedanken voor de begeleiding en de raadgevingen die ik van hem ontving gedurende de ganse loop van het eindwerk. Het is niet altijd vanzelfsprekend om in een drukbezette uurrooster toch nog een plaatsje te vinden om regelmatig af te spreken.

Daarnaast gaat natuurlijk ook mijn dank uit naar het Studiecentrum voor Kernenergie dat mijn eindwerk mogelijk maakte. Het is door de kennis en expertise reeds aanwezig in het bedrijf dat ik van het begin op het juiste spoor gezet ben, en door de constante begeleiding dat ik hiervan niet afgedwaald ben. In het bijzonder dank ik Rik-Wouter Bosch, Willy Claes, Mark Eyckmans, Roger Mertens en Jozef Peeters voor hun begeleiding en goede raad.

Tot slot wil ik ook nog alle mensen die ik niet persoonlijk kan opnemen in dit voorwoord, maar die direct of indirect toch bijgedragen hebben tot het eindresultaat, bedanken.

Inhoudsopgave

ABSTRACT (NEDERLANDS)	I
ABSTRACT (ENGLISH)	II
VOORWOORD	III
INHOUDSOPGAVE	IV
LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN EN AFKORTINGEN	VI
LIJST VAN FIGUREN	VII
1. INLEIDING	1
1.1 De opdrachtgever	1
1.2 Omschrijving van de opdracht	1
1.3 De doelgroep	2
1.4 Methodologie ^[3]	3
2. SITUERING VAN HET EINDWERK BINNEN HET GEHEEL	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Beschrijving van het wetenschappelijke experiment	5
2.2.1 Algemeen ^{[4] [5] [6]}	5
2.2.2 De testvoorbereidingen	6
2.2.3 De eigenlijke test	7
2.3 De werkomgeving	9
2.4 Conclusie	10
3. DE EISEN	11
3.1 Inleiding	11
3.2 Gebruikerseisen	11
3.3 Omgevingseisen	12
3.4 Onderzoekseisen	14
3.5 Wettelijke eisen ^[7]	15
3.6 Conclusie	15
4. VERDER VERLOOP VAN DE INFORMATIEFASE	16
4.1 Inleiding	16
4.2 Functionele analyse	16
4.3 Marktstudie	17
4.3.1 Openen van de bestralingscapsules	17
4.3.2 Smelten en verwarmen	19
4.3.3 Reinigen van de trekstaafjes	21
4.4 Testen	22
4.4.1 Morfologische kaart	22
4.4.2 Testen in verband met het openen van de bestralingscapsules	23
4.4.3 Testen in verband met het uitsmelten van loodbismut	24
4.4.4 Testen in verband met het verwijderen van de trekstaafjes	27
4.4.5 Testen in verband met reinigen van de trekstaafjes	31
4.5 Conclusie	32
5. DE EXPLORATIEFASE	33
5.1 Inleiding	33
5.2 Morfologische kaart	33
5.2.1 Openen van de bestralingscapsules	35
5.2.2 Uitsmelten van het loodbismut	39
5.2.3 Verwijderen van de trekstaafjes	44
5.2.4 Reinigen van de trekstaafjes	49
5.3 Conclusie	51
6. BESLISSINGSFASE	52
6.1 Inleiding	52
6.2 Een keuze gebaseerd op ergonomie	52
6.2.1 Ergonomie bij het vervaardigen	52
6.2.2 Ergonomie tijdens de werkingsfase van de opstelling	52
6.2.3 Ergonomie bij de afbraak	54
6.3 De maquettes	54
6.3.1 Inleiding	54
6.3.2 Het railsysteem	55

6.3.3.	<i>Rollend systeem</i>	57
6.4.	<i>Conclusie</i>	59
7.	TECHNISCHE UITWERKING	60
7.1.	<i>Inleiding</i>	60
7.2.	<i>Uitwerken van de functionele analyse</i>	60
7.3.	<i>Productstructuur</i>	62
7.4.	<i>Modelleren in CAD</i>	64
7.4.1.	<i>De zaaginstallatie</i>	64
7.4.2.	<i>Smelten en verwijderen</i>	65
7.4.3.	<i>Reinigen</i>	73
7.5.	<i>Het bedieningspaneel</i>	75
7.6.	<i>Conclusie</i>	77
8.	HET PROTOTYPE.....	78
8.1.	<i>Inleiding</i>	78
8.2.	<i>Bouw van het prototype</i>	78
8.3.	<i>Evaluatie van het prototype</i>	79
8.4.	<i>Conclusie</i>	79
9.	EVALUATIE VAN DE EISEN	80
9.1.	<i>Inleiding</i>	80
9.2.	<i>Evaluatie van de eisen</i>	80
9.3.	<i>Conclusie</i>	83
10.	EINDCONCLUSIE	84
	BRONVERMELDINGEN.....	85

Lijst van gebruikte symbolen en afkortingen

- ° C: graden Celsius
- ADS: Accelerator Driven System
- BR2: Belgische Reactor 2
- BWR: Boiling Water Reactor
- CAD: Computer Aided Design
- DFD: Design For Disassembly
- Dr. : Dokter
- DRAB: Dienst voor Radioactief Afval Beheer
- Hz: Hertz
- Ir: Ingenieur
- ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor
- kHz: kilohertz
- l/min: liter per minuut
- LHMA: Lage, Hoge en Middelmattige Activiteit
- LME: Liquid Metal Embrittlement
- M4: Metrische schroefdraad 4
- MTR: Materials Testing Reactor
- MYRRHA: Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications
- PE: PolyEthyleen
- PIH: Provinciale Industriële Hogeschool
- PVC: PolyVinylChloride
- PWR: Pressurised Water Reactor
- RAFM : Reduced Activation Ferritic Martensic Steel
- SCK-CEN: StudieCentrum voor Kernenergie – Centre d’Etude Nucleaire
- SSRT: Slow Strain Rate Test
- TTS: Tensile Test Specimen

Lijst van figuren

FIGUUR 1.1 DE WERKNEMERS VAN DE DIENST LHMA	3
FIGUUR 2.1 TENSILE TEST SPECIMEN	6
FIGUUR 2.2 BESTRALINGSCAPSULE	6
FIGUUR 2.3 BR2-REACTOR	7
FIGUUR 2.4 OVERZICHT VAN DE SSRT OPSTELLING	8
FIGUUR 2.5 ALPHAKAST	9
FIGUUR 2.6 HOTCEL MET MANIPULATOR	10
FIGUUR 4.1 CIRKELZAAG	18
FIGUUR 4.2 STEEKZAAG	18
FIGUUR 4.3 LASERSNIJDEN	18
FIGUUR 4.4 BUISOVEN	19
FIGUUR 4.5 VERWARMINGSLINT	19
FIGUUR 4.6 HETELUCHTPISTOOL	19
FIGUUR 4.7 VEWARMINGSKABEL	20
FIGUUR 4.8 WIKKELELEMENT	20
FIGUUR 4.9 INDUCTIEVERWARMING	20
FIGUUR 4.10 LASER	20
FIGUUR 4.11 VERWARMINGSPLAAT	21
FIGUUR 4.12 VERWARMINGSMANTEL	21
FIGUUR 4.13 ULTRASONE HOMOGENISATOR	21
FIGUUR 4.14 ULTRASOON BAD	22
FIGUUR 4.15 TESTOPSTELLING	25
FIGUUR 4.16 TEST 5: VERWIJDEREN TREKSTAAFJES DOOR WET VAN ARCHIMEDES	28
FIGUUR 4.17 TEST 6: VERWIJDEREN TREKSTAAFJES MET PLUNJER	29
FIGUUR 4.18 TEST 6: IDENTIFICATIE TREKSTAAFJES MBV GOOTJE	30
FIGUUR 4.19 TEST 8: VERWIJDEREN TREKSTAAFJES MBV EEN MAGNEET	31
FIGUUR 5.1 CIRKELZAAG	35
FIGUUR 5.2 STEEKZAAG	36
FIGUUR 5.3 SNIJSYSTEEM GEBASEERD OP GUILLOTINE	37
FIGUUR 5.4 LASERSNIJDEN	38
FIGUUR 5.5 VERWARMINGSKABEL	39
FIGUUR 5.6 HETELUCHTPISTOOL	40
FIGUUR 5.7 INDUCTIEVERWARMING	41
FIGUUR 5.8 WIKKELELEMENT	42
FIGUUR 5.9 LASER	43
FIGUUR 5.10 TREINTJE VAN TREKSTAAFJES	44
FIGUUR 5.11 DUWEN MET PLUNJER	45
FIGUUR 5.12 MET BEHULP VAN DE ZWAARTEKRACHT	46
FIGUUR 5.13 MET MAGNETEN	47
FIGUUR 5.14 UITBLAZEN MET PERSLUCHT	48
FIGUUR 5.15 ULTRASONE HOMOGENISATOR IN VERWARMDE OLIE	49
FIGUUR 5.16 VERWARMD ULTRASOON BAD	50
FIGUUR 6.1 RAILSISTEEM - POSITIE 1	56
FIGUUR 6.2 RAILSISTEEM - POSITIE 2	57
FIGUUR 6.3 RAILSISTEEM - POSITIE 3	57
FIGUUR 6.4 ROLLEND SYSTEEM - POSITIE 1	58
FIGUUR 6.5 ROLLEND SYSTEEM - POSITIE 2	58
FIGUUR 6.6 ROLLEND SYSTEEM - POSITIE 3	58
FIGUUR 7.1 PRODUCTSTRUCTUUR	63
FIGUUR 7.2 METABO STEEKZAAG	64
FIGUUR 7.3 DE GEHELE INSTALLATIE	65
FIGUUR 7.4 POSITIE 1 - ZAGEN	66
FIGUUR 7.5 POSITIE 2 - UITSMELTEN LOOdBISMUT	66
FIGUUR 7.6 VERWIJDEREN TREKSTAAFJES	67
FIGUUR 7.7 EXPLODED VIEW VAN HET ONDERSTEL	69
FIGUUR 7.8 EXPLODED VIEW KARRETJE	70
FIGUUR 7.9 VERWARMINGSKABEL	71

FIGUUR 7.10 EXPLODED VIEW KLEM-VERWARMINGSELEMENT	72
FIGUUR 7.11 ZEEFJE	73
FIGUUR 7.12 ULTRASONE HOMOGENISATOR MET VERWARMINGSPLAAT	74
FIGUUR 7.13 BEGINSCHERM	75
FIGUUR 7.14 OVERZICHTSCHERM	75
FIGUUR 7.15 ZAAGSCHERM	76
FIGUUR 7.16 SMELTSCHERM	76
FIGUUR 7.17 REINIGINGSSCHERM	77

1. Inleiding

1.1 *De opdrachtgever*

Het Belgisch Studiecentrum voor Kernenergie (SCK-CEN) is een instelling van openbaar nut onder voogdij van de Belgische federale minister van Energie. Het SCK-CEN werd opgericht in 1952 teneinde de Belgische academische en industriële wereld toegang te verschaffen tot de wereldwijde ontwikkeling van kernenergie. Sinds 1991 geeft de statutaire opdracht voorrang aan onderzoek over problemen met betrekking tot de samenleving:



- Veiligheid van kerninstallaties
- Stralingsbescherming
- Veilige behandeling en berging van radioactief afval
- Strijd tegen ongecontroleerde proliferatie van splijtbaar materiaal
- Strijd tegen terrorisme ^[1] ^[2]

Het SCK-CEN is dus een studiecentrum waar wetenschappelijk onderzoek wordt gedaan naar alles wat met kernenergie te maken heeft.

1.2 *Omschrijving van de opdracht*

De opdracht is: "Het ontwerpen van een ontmanteling- en afvalverwerkingsinstallatie voor bestraalde trekstaafjes in een hot cel"

Om de opdrachtomschrijving te kunnen begrijpen is echter al wat uitleg vereist.

Het eindwerk wordt uitgevoerd voor de corrosiegroep van de dienst technologie op het SCK-CEN. De corrosiegroep houdt zich bezig met onderzoek van constructiemateriaal gebruikt in verschillende types van kerninstallaties (BWP, PWR, ITER, ADS). Momenteel loopt een onderzoek naar het gebruik van vloeibaar loodbismut als koelmiddel voor warmtetransport in een aantal nieuwe types nucleaire reactoren zoals fusie en Accelerator Driven Systems (ADS). Vooraleer overgegaan wordt tot het bouwen van zulke reactoren is

natuurlijk heel wat onderzoek nodig. Een belangrijke vraag is: Hoe reageert het reactormateriaal op dit vloeibare loodbismut? Die vraag is natuurlijk essentieel, omdat het onaanvaardbaar zou zijn indien het reactormateriaal aangetast zou worden wanneer de reactor actief is.

Tijdens het onderzoek worden verschillende materialen getest. Het te testen materiaal (verschillende soorten roestvast staal) wordt in de BR2 reactor van het SCK-CEN bestraald in capsules gevuld met vloeibaar loodbismut. Daarna moet het radioactieve materiaal worden getest en onderzocht in een beveiligde omgeving, een zogenaamde hotcel (zie ook 2.3 De werkomgeving).

Vooraleer de trekstaafjes getest kunnen worden op sterkte moeten de bestralingscapsules weer ontmanteld worden. De bestralingscapsules moeten geopend worden, daarna moeten de roestvrij stalen trekstaafjes uit het loodbismut worden gesmolten. De trekstaafjes moeten vervolgens worden schoongemaakt en getest. Het loodbismut moet worden opgevangen in kleine vaatjes en als afval worden afgevoerd.

Het doel van het eindwerk is om deze installatie te ontwerpen.

1.3 De doelgroep

De doelgroep van het eindwerk is tweeledig. Allereerst zijn er de werknemers van de dienst voor Lage Hoge en Middelmatische Activiteit (LHMA) van het SCK-CEN. Op deze dienst bevindt zich het labo met de hotcels. Het zijn de werknemers van LHMA die de installatie zullen moeten bedienen.

Om ervaring op te doen met het werk in een omgeving beveiligd voor straling werd in de beginfase een bezoek werd gebracht aan de hotcels van de dienst LHMA. Hier werd op een duidelijke en interactieve manier door de werknemers zelf getoond hoe er gewerkt wordt met de hotcels. Ook alle vragen kregen hier een antwoord. Door deze terugkoppeling naar de realiteit werd een juist beeld gevormd van de doelgroep en hun manier van werken.



Figuur 1.1 De werknemers van de dienst LHMA

Daarnaast zijn er ook nog de onderzoekers en wetenschappers van het team MYRRHA die de resultaten gebruiken. Ook zij vormen een deel van de doelgroep. Voor hen is vooral de accuraatheid van de testresultaten belangrijk

Het eindwerk situeert zich dus binnen het SCK-CEN over 2 diensten, de dienst technologie in verband met de theoretische kennis en expertise, die verantwoordelijk is voor het ontwerp van de capsules en de dienst LHMA die verantwoordelijk is voor de hotcells.

1.4 Methodologie^[3]

Het gehele ontwerpproces kunnen we opdelen in 4 fasen: de informatiefase, de exploratiefase, de beslissingsfase en de testfase.

- *Informatiefase:*

Dit beheerst het verzamelen en opdoen van alle relevante informatie. Deze fase is de beginfase van elk ontwerp. De belangrijkste vragen zijn: begrijp ik de opdracht? Welke informatie heb ik nog nodig om de opdracht te kunnen starten? Wat wordt er verwacht? Wat is de context? Eens deze vragen beantwoord zijn, kan er overgegaan worden naar een volgende fase.

- *Exploratiefase:*

Uitgaande van de gevonden informatie moet er nu geëxploreerd worden. Informatie moet geschift en verdeeld worden. Wat is wel bruikbaar en wat niet? Met welke informatie ga ik

verder werken? Op welk gebied is nog meer opzoekingswerk nodig. Het eindresultaat van deze fase bestaat telkens uit een aantal mogelijke oplossingen.

- *Beslissingsfase:*

Na het exploreren moet er een beslissing genomen worden. Op basis van het reeds verzette werk kan er een gefundeerde keuze gemaakt worden voor een bepaalde (deel)oplossing. Helpende vragen hierbij zijn: welk alternatief heeft het meeste kans tot slagen? Welk alternatief zal in de praktijk het meeste kans maken? Welk alternatief komt het best overeen met de bedoeling van deze opdracht? Welk alternatief voldoet het best aan de gestelde eisen?

- *Testfase:*

De laatste van de 4 fasen is de testfase. Door de realisatie of partiële realisatie van een gedeelte van het ontwerp krijg je een interactie met de werkelijkheid zelf. Door het idee uitgewerkt te zien, worden vele elementen die eerst eerder vaag waren verduidelijkt. Problemen die eerder niet voorzien waren komen zo vaak aan de oppervlakte. Beantwoordt de maquette of de test niet aan hetgeen verwacht werd dient er bijgesteld of herbegonnen te worden. Helpende vragen zijn: Waarom werkt het? Of waarom gebeurt er iets anders dan verwacht werd? Zijn er nog andere benaderingen mogelijk? Kan er nog bijgesteld worden?

Al deze fasen zijn in elk ontwerpproces onontbeerlijk. Niet altijd zijn deze fasen echter zo strikt te scheiden van elkaar. Ontwerpen is een proces van lange duur en soms komt men er in het midden van het proces achter dat niet alle nodige informatie reeds opgezocht is. Dan komt men dus weer terecht in een fase van informeren en zal er misschien ook weer geëxploreerd, beslist en getest moeten worden. Vaak wordt het ontwerpproces daarom ook beschreven als een spiraal die telkens opnieuw de 4 fasen doorloopt.

Om een goed verloop van het eindwerk te garanderen werd aan het begin van het project ook een projectfiche opgemaakt. Deze kan teruggevonden worden in bijlage 1.

2. Situering van het eindwerk binnen het geheel

2.1. Inleiding

Dit is in feite het begin van de informatiefase. Voor de duidelijkheid is het goed om nog even te herhalen wat dit juist inhoudt:

“De informatiefase beheerst het verzamelen en opdoen van alle relevante informatie. De belangrijkste vragen zijn: begrijp ik de opdracht? Welke informatie heb ik nog nodig om de opdracht te kunnen starten? Wat wordt er verwacht? Wat is de context? Eens deze vragen beantwoord zijn, kan er overgegaan worden naar een volgende fase.”^[3]

2.2. Beschrijving van het wetenschappelijke experiment

2.2.1. Algemeen^{[4] [5] [6]}

Zoals reeds vermeld is men op het SCK-CEN bezig met onderzoek naar een nieuwe soort reactoren, die vloeibaar loodbismut kunnen gebruiken als koelmiddel. Het onderzoek concentreert zich vooral op materiaaldegradatie door bestraling en blootstelling aan vloeibaar loodbismut.

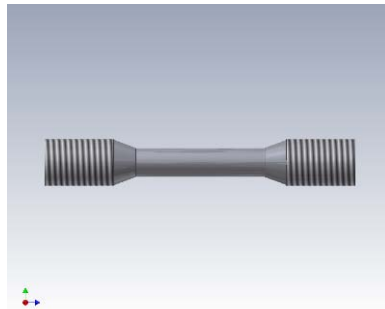
Het is geweten dat bij normaal taai materialen zoals staal in aanwezigheid van bepaalde vloeibare metalen soms een brosse breuk optreedt. Dit verschijnsel wordt ook wel Liquid Metal Embrittlement of LME genoemd. Het uiteindelijke doel van het wetenschappelijke experiment is een beter inzicht krijgen in de effecten van Liquid Metal Embrittlement op ferritisch martensitisch staal¹. LME resulteert bij trektesten in een significante vermindering van de verlenging bij breuk. Tot nu toe is echter maar zeer weinig gekend over het effect van loodbismut op de mechanische eigenschappen van RAFM. Dit wil men daarom verder onderzoeken aan de hand van trektesten uitgevoerd op kleine trekstaafjes uit staal. De testen zijn reeds uitgevoerd met niet bestraald materiaal. Nu wil men deze nog eens herhalen met bestraald materiaal om het effect van stralings schade aan het

¹ Ferritisch Martensitisch staal: Voor fusie wordt materiaal onderzocht dat maar beperkt geactiveerd wordt door straling, zgn. RAFM = Reduced Activation Ferritic Martensitic Steel

materiaal na te gaan. Staal wordt door bestraling brosser en daardoor gevoeliger voor LME.

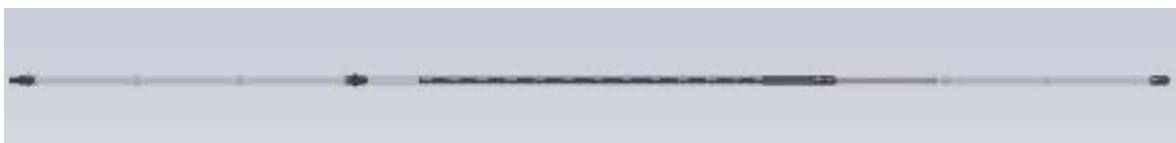
2.2.2. De testvoorbereidingen

De trektesten worden uitgevoerd op een aantal kleine trekstaafjes, tensile test specimen genaamd.



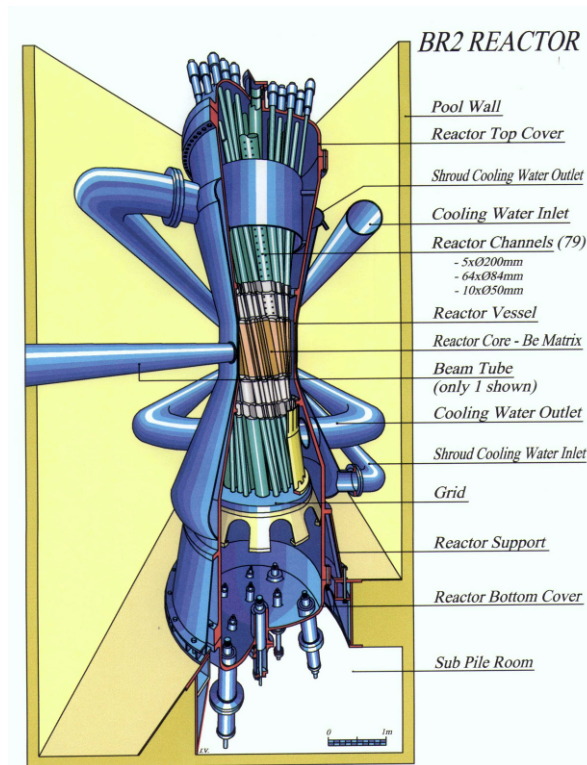
Figuur 2.1 Tensile Test Specimen

Deze trekstaafjes worden eerste in een lange bestralingscapsule gebracht, waarna de capsule gevuld wordt met loodbismut.



Figuur 2.2 Bestralingscapsule

De bestralingscapsules worden dan gedurende een welbepaalde periode ondergebracht in de BR2-reactor en bestraald, zodanig dat het effect van de straling in rekening kan gebracht worden bij de verdere testen.



Figuur 2.3 BR2-reactor

Hierna worden de bestralingscapsules getransporteerd naar de dienst LHMA van het SCK-CEN. Op deze dienst bevindt zich ook hotcel 12 waarin de test zal plaatsvinden. (zie ook 3.2. De werkomgeving).

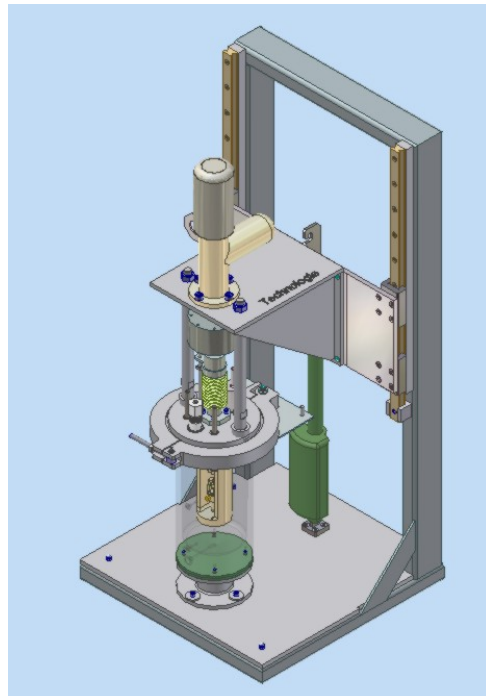
Eens de bestralingscapsule in de hotcel is binnengebracht moeten de trekstaafjes weer uit de bestralingscapsule gehaald en gereinigd worden. Pas dan zal de test kunnen plaatsvinden. Het doel van het eindwerk is om hiervoor de installatie te ontwerpen. Het volledige proces hiervan zal in de rest van de thesis uitgebreid besproken worden.

2.2.3. De eigenlijke test

Wanneer de trekstaafjes weer beschikbaar zijn kan de trektest of Slow Strain Rate test plaatsvinden.

De testopstelling bestaat uit een trekbank die ervoor zorgt dat een trekstaafje langzaam kapot getrokken wordt. De kracht die hiervoor nodig is en de bijbehorende verplaatsing zijn een maat voor de sterkte en de taaiheid van het materiaal. Het Tensile Test Specimen wordt in een autoclaaf geplaatst die daarna gesloten wordt. Via een systeem van buizen en verwarmingselementen wordt het vloeibare metaal toegevoerd daar waar het Tensile

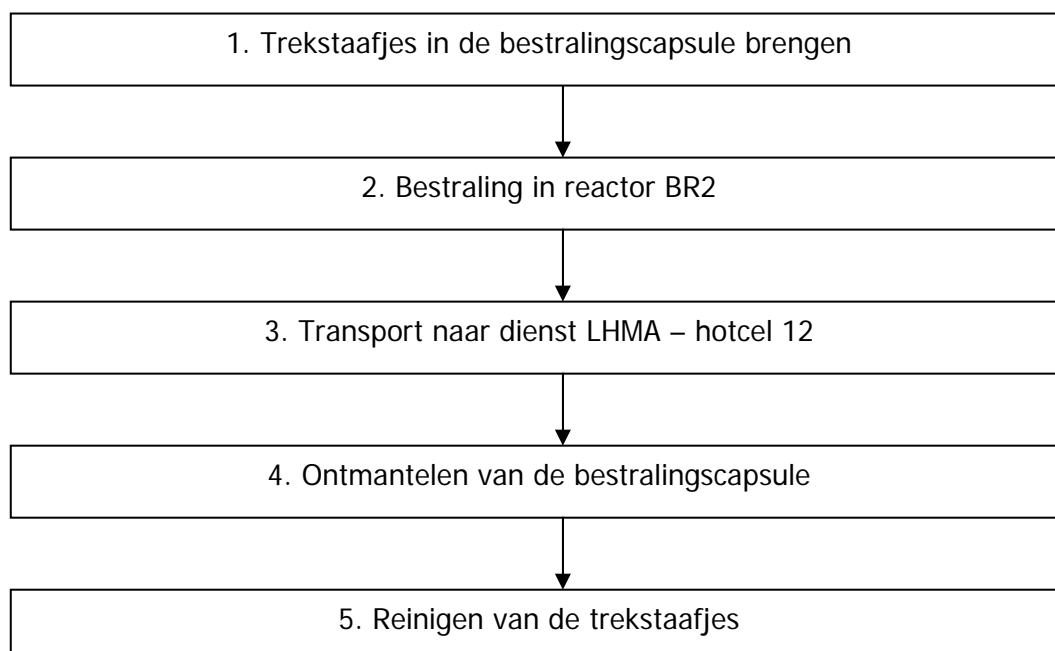
Test Specimen zit. Hierna kan dan de trektest op het trekstaafje onder gecontroleerde omstandigheden (temperatuur, druk, belasting, verplaatsing, spanning, ...) uitgevoerd worden. ^[4]



Figuur 2.4 Overzicht van de SSRT opstelling

De gegevens die uit de test gehaald worden kunnen dan gebruikt worden om conclusies te trekken in verband met de gevoeligheid voor LME van het materiaal in loodbismut.

Schematische weergave:



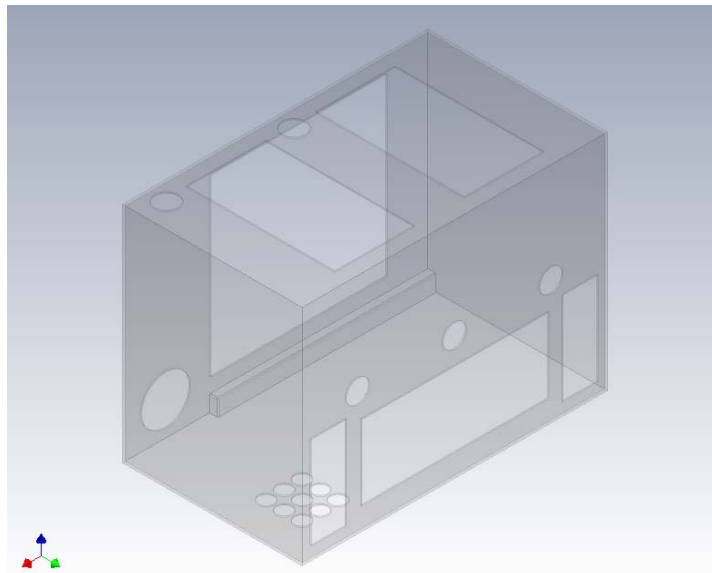


6. Slow Strain Rate Test

2.3. De werkomgeving

Nadat de bestaling op de trekstaafjes heeft plaatsgevonden, is het noodzakelijk om de testen uit te voeren in een hermetisch afgesloten omgeving. Om deze reden worden de bestraalde capsules via een container getransporteerd naar een hotcel op de dienst LHMA.

Een hotcel kan beschreven worden als een hermetisch afgesloten en gecontroleerde omgeving voor het uitvoeren van testen en experimenten op bestraald materiaal. Het is een soort van bunker, geconstrueerd uit lood en beton die een zogenaamde alfakast omgeeft. De alfakast zorgt ervoor dat besmetting buiten de cel zo goed als uitgesloten is, de loden en betonnen afscherming zorgt ervoor dat bestraling tot een minimum beperkt wordt.



Figuur 2.5 Alphakast

Het spreekt voor zich dat alle menselijke interactie bij het uitvoeren van de test van buiten de hotcel zal moeten gebeuren. Dit gebeurt met 3 manipulatoren die aangebracht zijn in hotcel 12. De manipulatoren kan men zien als een soort van robotarmen die van

buiten de hotcel manueel bediend kunnen worden, en binnenin de hotcel de uitgevoerde beweging zo exact mogelijk nabootsen. In de hotcel zijn ramen voorzien waarlangs men hetgeen gebeurt in de hotcel kan volgen.



Figuur 2.6 Hotcel met manipulator

2.4. Conclusie

In dit hoofdstuk werd het eindwerk geplaatst binnen het groter geheel van het wetenschappelijke experiment. De te ontwerpen opstelling is slechts een onderdeel van het geheel, dat als doelstelling heeft het uitvoeren van de test mogelijk te maken.

3. De eisen

3.1. *Inleiding*

Alvorens aan het genereren van ideeën te beginnen is het nodig een gefundeerd pakket van eisen op te stellen. Het doel is een overzicht te krijgen van alle elementen waarmee in de loop van het ontwerp rekening moet gehouden worden. We denken hierbij zowel aan eisen naar de gebruiker toe, als eisen betreffende de omgeving, het experiment en de wetgeving.

3.2. *Gebruikerseisen*

- *Functioneel*

Dit betekent concreet dat de installatie in staat moet zijn om:

- de bestralingscapsules te openen
- de trekstaafjes uit de capsule te verwijderen
- de trekstaafjes proper te maken
- de trekstaafjes volledig intact te laten
- De trekstaafjes te identificeren

- *Eenvoudig*

Eenvoudige constructie met zo weinig mogelijk manipulaties bij gebruik, zodanig dat het gebruikersgemak hoog ligt en het werken aangenaam blijft.

- *Ergonomische gebruikersinterface*

De bediening van alle knoppen, toestellen,... moet op een duidelijke en ergonomisch verantwoorde manier kunnen plaatsvinden.

- *Design for Disassembly (DFD)*

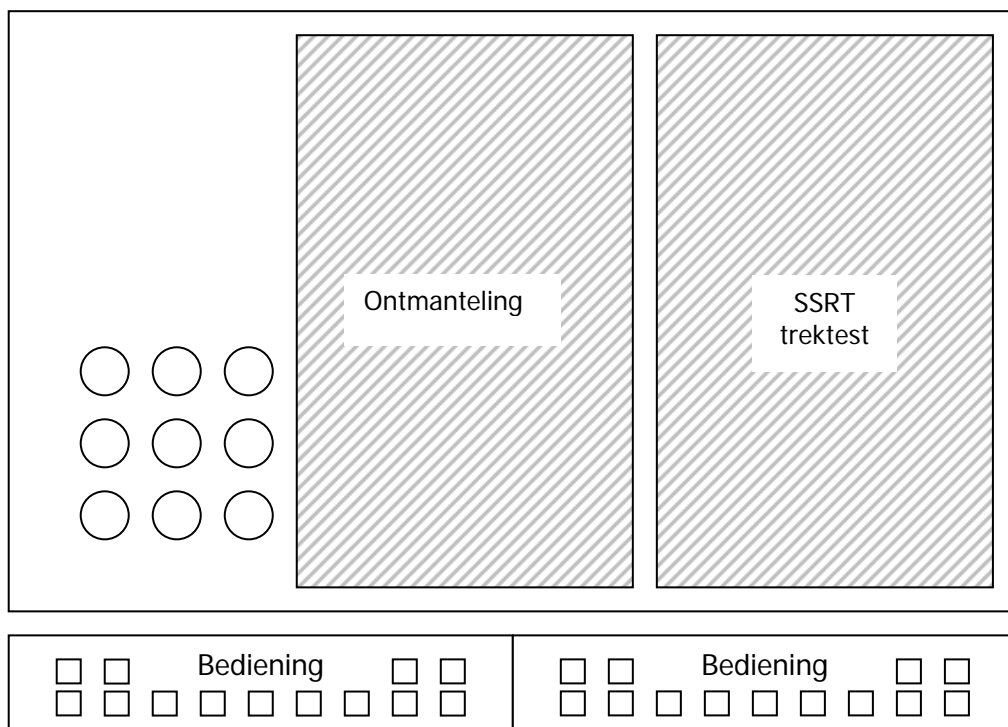
Eens de proeven afgelopen zijn, zal de installatie weer afgebroken moeten worden. Na het verloop van de testen is de hele opstelling echter gecontamineerd. Het afbreken en afvoeren moet dus onder veilige omstandigheden gebeuren. Hiervoor bestaan procedures op het SCK-CEN. Onder gecontroleerde omstandigheden wordt via de achtersluis een container op de hotcel aangesloten waarin al het gecontamineerde materiaal kan worden afgevoerd. Belangrijk is dus van bij het ontwerp rekening te houden met de afmetingen

van deze container zodanig dat de ontmanteling vlot kan gebeuren. De afmetingen van deze container bedragen: Ø 240 x 680 mm.

3.3. *Omgevingseisen*

- *Compactheid*

De beschikbare ruimte in een hotcel is beperkt (2210 x 1300 x 1630 mm). In deze ene hotcel moet de gehele proef kunnen uitgevoerd worden (ook de trekproef en dergelijke) en bijgevolg is de ruimte voor de ontmantelinginstallatie beperkt. De ruimte beschikbaar voor de ontmantelinginstallatie is ongeveer 750 x 1300 x 1630mm. Dit betekent dat de opstelling zo compact mogelijk moet zijn.



Figuur 3.1 Ruimte in hotcel 12

- *Bediening met manipulatoren*

Aangezien er gewerkt moet worden met radioactieve stalen, moeten alle manipulaties gebeuren in een veilige omgeving, de zogenaamde hotcel. De bediening moet dus kunnen plaatsvinden van buiten deze hotcel met behulp van de aanwezige manipulatoren. In hotcel 12 zijn drie manipulatoren aanwezig.

De installaties zullen binnen het bereik van de manipulators geplaatst moeten worden. De manipulators werken namelijk binnen een bepaalde straal waardoor de hoeken en het plafond van de alfabox niet bereikbaar zijn voor de manipulators. Door de positie van de ontmantelingsinstallatie in de hotcel zullen maar twee van de drie manipulators gebruikt kunnen worden voor de ontmanteling.

Doordat er gewerkt wordt met manipulators betekent dit ook dat zeer kleine onderdelen niet gebruikt kunnen worden en dat voorwerpen die moeten kunnen vastgenomen met de manipulator hierop voorzien moeten zijn.

- *Eisen en beperkingen naar materialen*

Omwille van de aanwezigheid van radioactieve straling kunnen niet alle materialen gebruikt worden. Materialen die sterk onderhevig zijn aan deze stralingen en kunnen hun bruikbaarheid verliezen. De meeste kunststoffen zijn uitgesloten aangezien zij onder invloed van straling gaan verbrossen. De kunststoffen die dit verschijnsel niet vertonen zijn zeer beperkt en daarbij ook zeer duur, waardoor ook zij maar beperkt gebruikt worden. Een kunststof die minder onderhevig is aan straling en ook niet te duur is, is Polyethyleen (PE). Deze kunststof wordt ook gebruikt in de toepassing voor persluchtdarmen, maar dan versterkt met nylon.

Waar mogelijk dienen dus metalen gebruikt te worden in plaats van kunststoffen. Hierbij denken we aan inox, aluminium, messing. Deze materialen ondervinden minder directe hinder van de aanwezigheid van radioactieve straling.

- *Eisen naar verbindingen:*

Lijm, siliconen en kunststof verbindingen zijn uit den boze omwille van hun gevoeligheid voor radioactieve straling. Deze kunnen geen blijvende verbinding garanderen. Wel kunnen schroeven, bouten, lassen, solderen en niet-kunststof verbindingstukken gebruikt worden.

- *Eisen naar aandrijvingen*

In de alfabox zijn zowel aansluitingen voorzien voor elektrische en pneumatische aandrijvingen. Elektronica is echter gevoelig voor straling en ook de draden brokkelen soms af onder invloed van de straling. Daarom moet er op gelet worden dat de voeding

steeds buiten de alfakast geplaatst wordt en dat slechts een uiterst minimum aan voorzieningen en draden in de alfakast terecht komt.

- *Functioneel design*

Vormgeving is in de onderzoekswereld niet echt van primair belang. Toch wil dit niet zeggen dat de vormgeving volledig buiten beschouwing moet gelaten worden. We streven daarom naar een functionele vormgeving. Hierbij kan uitgegaan worden van het principe 'Form follows function'.

3.4. Onderzoekseisen

- Voorzien van back-up systemen

Het eindwerk kadert in een onderzoeksproject dat niet zomaar herhaald kan worden. De te testen stalen moeten namelijk gedurende een bepaalde periode onder specifieke en exact gekende omstandigheden ondergebracht worden in een MTR-reactor. Het is evident dat een dergelijk experiment niet zomaar kan herhaald worden. Zowel qua kostenefficiëntie als qua tijdsefficiëntie is dit uit den boze. Daarom is het belangrijk dat het experiment niet misloopt. Op de plaatsen waar iets fout kan lopen moet daarom een bijkomend back-up systeem voorzien worden.

- Waarborgen van wetenschappelijke exactheid

Om de juistheid van het experiment te kunnen verzekeren is het noodzakelijk dat de ontmanteling op geen enkele wijze de trektest beïnvloed. De eigenschappen van de trekstaafjes mogen dus dit niet veranderen tijdens de ontmanteling. Concreet betekent dit dat een temperatuur van 200° C ($\pm 10^\circ$ C) nooit zal mogen overschreden worden tijdens de ontmanteling.

- Positie van de trekstaafjes

De positie van de trekstaafjes is een belangrijk onderzoekscriterium. Naargelang van de plaats van de trekstaafjes in de bestralingscapsule, en dus ook hun plaats in de BR2-reactor, werden ze blootgesteld aan een andere dosis straling. Het is dus belangrijk dat bij het ontmantelen, de oorspronkelijke positie die de trekstaafjes innamen in de capsule, bekend blijft.

3.5. Wettelijke eisen^[7]

Het spreekt voor zich dat dergelijke proeven en opstellingen niet mogen gebeuren zonder controle van buitenaf. Daarom zal voor er van enige proef sprake kan zijn een controle moeten gebeuren van de gehele hotcel en dus ook de opstelling. Deze controle zal gebeuren door AIB-Vinçotte. AIB-Vinçotte staat bekend om zijn inspecties, certificaten, testen en trainingen, zowel in België als in de rest van de wereld. AIB-Vinçotte moet een uitbatingvergunning geven vooraleer er in de hotcel gewerkt kan worden. Pas als alles goedgekeurd is zullen er testen mogen plaatsvinden.

3.6. Conclusie

Eens alle eisen opgesteld en geverifieerd zijn kan overgegaan worden naar de volgende fase van het ontwerp. Belangrijk is dat de opgestelde eisen hierbij altijd in het achterhoofd gehouden worden.

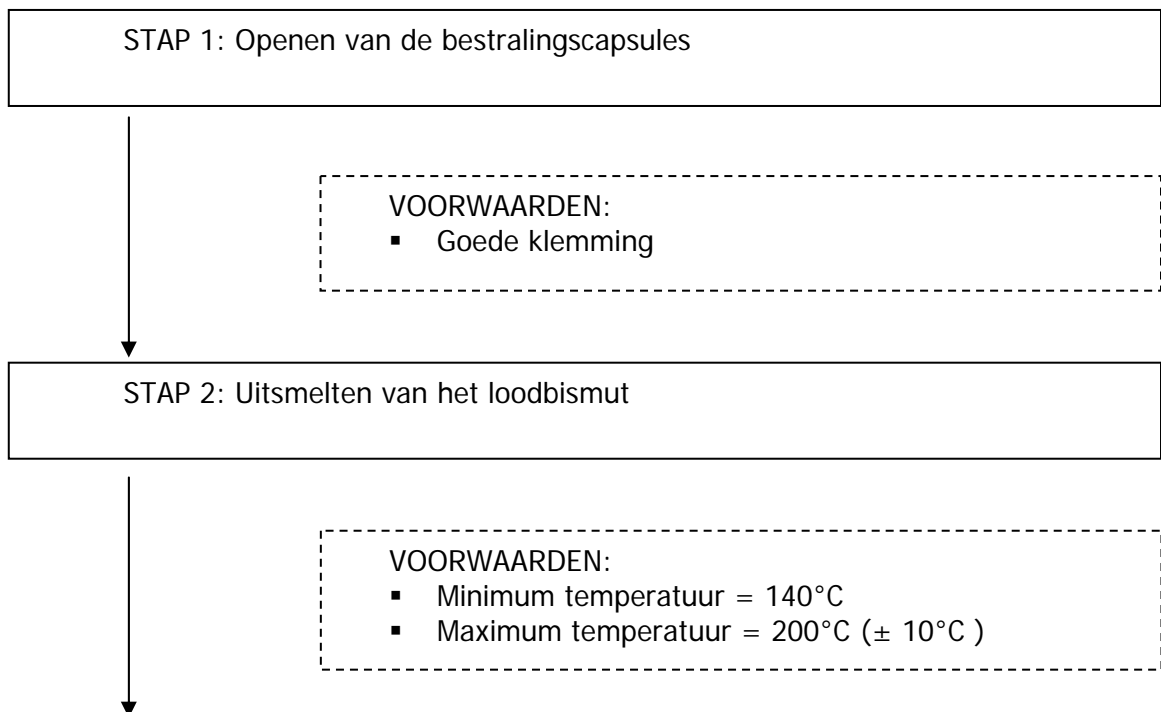
4. Verder verloop van de informatiefase

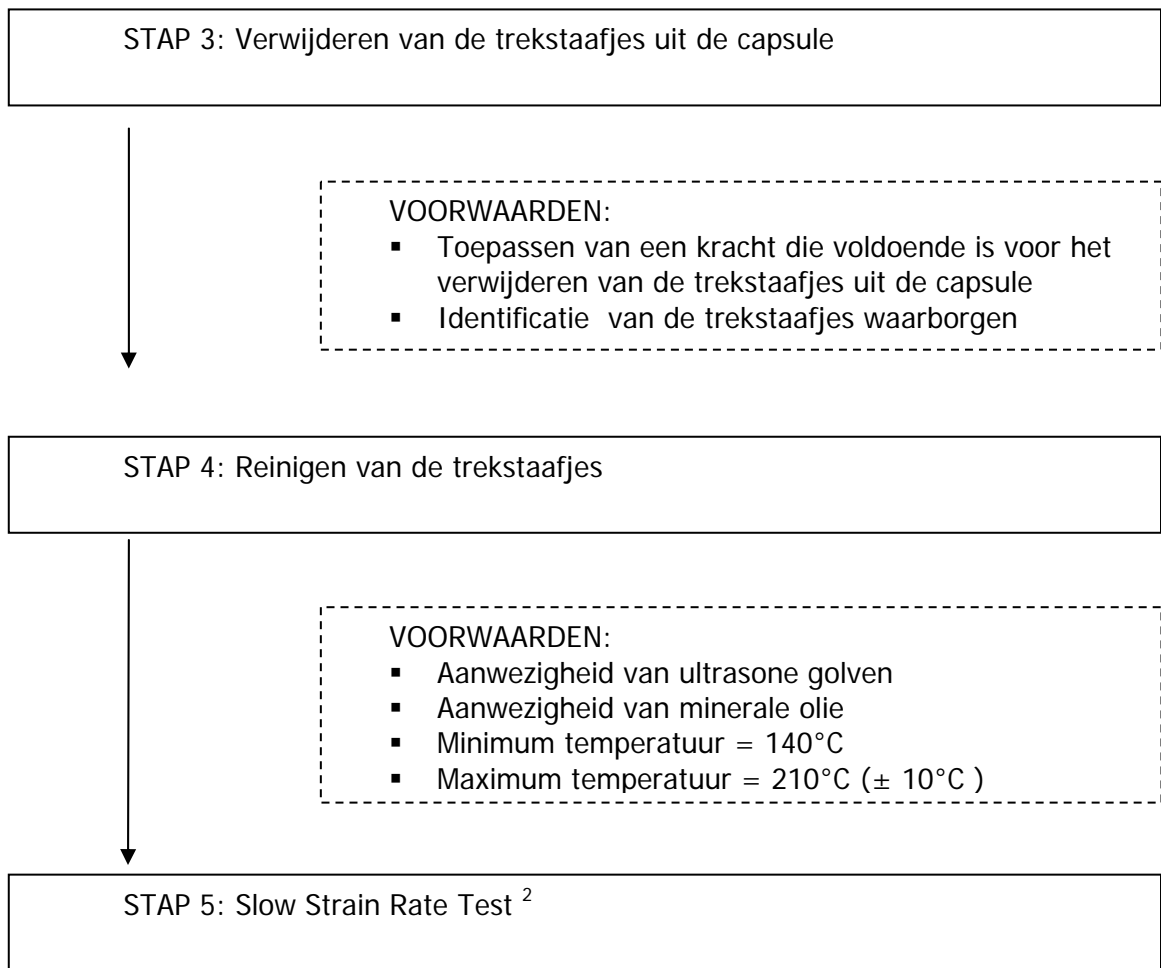
4.1. Inleiding

Nadat de opdracht goed begrepen is en ook de eisen gekend zijn, is het nodig verdere informatie te genereren. Er zijn een aantal belangrijke vragen die nog steeds onbeantwoord blijven. Welke mogelijkheden zijn er om tot een oplossing voor de opdracht te komen? Zijn er middelen en/of apparaten beschikbaar op de hedendaagse markt waarmee tot een oplossing gekomen kan worden? Hoe gedraagt het loodbismut zich bij verschillende omstandigheden? Het is belangrijk om op al deze vragen in de mate van het mogelijke een antwoord te vinden, en dit gestructureerd te benaderen.

4.2. Functionele analyse

In de functionele analyse wordt een overzicht gegeven van de stappen die moeten doorlopen worden om tot een functionele installatie te komen. Hierbij wordt dan telkens vermeld aan welke voorwaarden voldaan moet worden.





4.3. Marktstudie

In de functionele analyse is reeds uitgezocht, welke functies de installatie moet kunnen vervullen. In de marktstudie onderzoeken we nu, welke mogelijkheden de hedendaagse markt biedt, om aan die functies te kunnen voldoen.

4.3.1. Openen van de bestralingscapsules

Bij het openen van bestralingscapsules denken we onmiddellijk aan zagen. Zeer uiteenlopende types kunnen hiervan teruggevonden worden op de markt. Het is onnodig alle types te bespreken, voldoende is aan te geven dat er cirkelzagen en steekzagen bestaan en dat beide zowel pneumatisch als elektrisch voorhanden zijn. Naast zagen kunnen er natuurlijk ook messen gebruikt worden. Op de markt was geen systeem te vinden waarmee rechtstreeks de bestralingscapsules met messen geopend kunnen

² SSRT: De Slow Strain Rate Test vormt een deel van het wetenschappelijk onderzoek en wordt verder in deze thesis buiten beschouwing gelaten.

worden. Daarom komt het mes ook niet voor in het volgende overzicht. In de morfologische kaart wordt hierop echter wel teruggekomen. Ook meer hoogtechnologische technieken als lasersnijden zouden een optie kunnen zijn.

Overzicht:

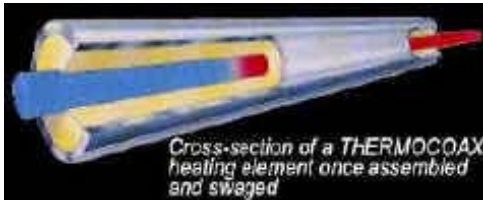
 <p>Figuur 4.1 Cirkelzaag</p>	<p>Cirkelzagen kunnen zowel elektrisch als pneumatisch gestuurd worden. Afhankelijk van het type zaag kan het toerental al dan niet geregeld worden. Door het hoge toerental en de constante frictie is koeling vaak noodzakelijk. ^[8]</p>
 <p>Figuur 4.2 Steekzaag</p>	<p>Ook steekzagen bestaan in pneumatische en elektrische versie. Afhankelijk van het type zaag is de slag of steek ook verschillend. Bij de pneumatische versies is de grootte van de slag recht evenredig met de cilindergrootte en dus ook met de grootte van de zaag. ^[9]</p>
 <p>Figuur 4.3 Lasersnijden</p>	<p>Bij het lasersnijden wordt een laserbundel samen met een sterke gasstraal op het te snijden materiaal gericht. Door de absorptie van de laserenergie smelt het materiaal zeer lokaal. Door beweging van het materiaal ten opzichte van de laser wordt een snede gegenereerd. Afhankelijk van het te snijden materiaal moet een laser met andere golflengte gekozen worden. ^[10]</p>

4.3.2. Smelten en verwarmen

Op gebied van smelten en verwarmen biedt de hedendaagse technologie veel mogelijkheden. Het is onmogelijk deze stuk voor stuk op te sommen. We beperken ons daarom tot een samenvatting.

Overzicht:

 <p>Figuur 4.4 Buisoven</p>	<p>Buisovens zijn verkrijgbaar op de markt in verschillende uitvoeringen. De afmetingen, het temperatuurbereik en dergelijke kunnen verschillen van model tot model. Bepaalde modellen kunnen ook onder een hoek opgesteld worden.^{[11] [12]}</p>
 <p>Figuur 4.5 Verwarmingslint</p>	<p>Verwarmingslinten zijn verkrijgbaar in verschillende lengtes en breedtes, voor verschillende temperatuurbereiken en met een verschillend vermogen. Ze kunnen aangebracht worden op de plaats waar het gewenst is.^{[11] [12]}</p>
 <p>Figuur 4.6 Heteluchtpistool</p>	<p>Afhankelijk van het type heteluchtpistool kunnen temperaturen bereikt worden tussen de 50° C en 600° C. Het luchtdebiet varieert tussen 250 l/min en 500l/min. Het heteluchtpistool kan één of meerdere standen hebben.^[13]</p>



Figuur 4.7 Vewarmingskabel

Deze verwarmingskabels zijn in feite weerstandsdraden met een kleine diameter die speciaal ontworpen zijn om in elk apparaat ingebouwd te kunnen worden. De kabel is opgebouwd uit één of twee stroomvoerende kernen omhuld met een flexibel metaal en voorzien van isolatie. [14]



Figuur 4.8 Wikkelement

De wikkelementen bouwen op hetzelfde principe als de verwarmingskabels. Ze zijn echter minder flexibel en minder goed geïsoleerd. [15]



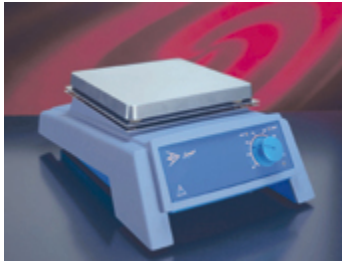
Figuur 4.9 Inductieverwarming

Bij inductieverwarming wordt een wisselend magnetisch veld opgewekt in een spoel. Hierdoor ontstaan wervelstromen in het werkstuk en wordt warmte gegenereerd. Ook in de spoel wordt warmte opgewekt, waardoor het noodzakelijk is dat deze gekoeld wordt. [16] [17]



Figuur 4.10 Laser

Doordat er een wisselwerking plaatsvindt tussen de laserstraal en het te smelten materiaal wordt de energie van de laser omgezet in warmte. Afhankelijk van het te smelten of te verwarmen materiaal moet een laser met een andere golflengte gekozen worden. [10]



Figuur 4.11 Verwarmingsplaat

Verwarmingsplaten zijn geschikt om iets van onder af op te warmen. Ze kunnen geleverd worden voor verschillende bereiken van temperatuur, verschillende afmetingen en verschillende vermogens. De temperatuur is meestal regelbaar. ^[11] ^[12]



Figuur 4.12 Verwarmingsmantel

Bij verwarmingsmantels wordt de warmte niet enkel toegevoerd langs de onderkant maar ook langs de zijwanden. Ook verwarmingsmantels bestaan in verschillende modellen. Temperatuur, afmetingen en vermogens kunnen verschillen. Sommige modellen hebben een ingebouwde magnetische roerder. ^[11] ^[12]

4.3.3. Reinigen van de trekstaafjes

De laatste resten van het loodbismut kunnen enkel verwijderd worden met behulp van ultrasone golven in verwarmde minerale olie. De mogelijkheden voor het genereren van ultrasone golven op kleine schaal zijn beperkt.

Overzicht:



Figuur 4.13 Ultrasone homogenisator

Deze toestellen bestaan zowel met analoge als met digitale aflezing en zetten de netfrequentie van 50Hz om in een ultrasone frequentie van 20 kHz. Een probe brengt het ultrasone signaal naar de vloeistof toe. Zowel het uitgangsvermogen als de trillingsintensiteit zijn regelbaar. ^[11] ^[12]



Figuur 4.14 Ultrasoon bad

Ultrasone baden komen voor in verschillende modellen. Er bestaan systemen met of zonder verwarming (tot maximaal 80° C). Er kan geopteerd worden voor hetzij een analoog, hetzij een digitaal model. Ook de ultrasone energie is vaak regelbaar. ^[11] ^[12]

4.4. Testen

4.4.1. Morfologische kaart

In deze morfologische kaart wordt een overzicht gegeven van een aantal mogelijke oplossingen per onderdeel van de opstelling. De bedoeling is om op een gestructureerde manier de mogelijkheden weer te geven.

In de opstelling worden vier stappen onderscheiden: het openen van de bestralingscapsules, het smelten van het loodbismut, het verwijderen van de trekstaafjes uit de bestralingscapsules en het reinigen van de trekstaafjes. Voor het openen van de capsules, het smelten van het loodbismut en het verwijderen van de trekstaafjes zijn verschillende oplossingen mogelijk. Om de trekstaafjes te reinigen weet men uit ervaring dat men gebruik moet maken van ultrasone golven in verwarmde olie. Dit beperkt natuurlijk aanzienlijk de oplossingsmogelijkheden voor het vierde deel van de opstelling.

Na het opmaken van een morfologische kaart is het ook nuttig om zoveel mogelijk van de oplossingen te testen. Het is immers niet steeds duidelijk of de voorgestelde oplossingen ook haalbaar zijn. Spijtig genoeg is het ook niet altijd mogelijk om alle oplossingen te testen. In functie van de beschikbare middelen en de mogelijkheden werden dus een aantal testen uitgevoerd. Deze zijn in de morfologische kaart gekleurd weergegeven.

Morfologische kaart:

	Oplossing 1	Oplossing 2	Oplossing 3	Oplossing 4	Oplossing 5	Oplossing 6
Openen capsule	TEST 1: Cirkelzaag	TEST 2: Steekzaag	Snijden met mes	Lasersnijden		
Smelten loodbismut	Verwarmingkabel	TEST 3: Hete lucht	Inductie	Weerstandsdraad	Laser	TEST 4: Verwarmingslint
Verwijderen trekstaafjes	TEST 5: Drijven (wet van Archimedes)	TEST 6: Duwen met plunjer	TEST 7: Met behulp van de zwaartekracht	TEST 8: Met magneten	Uitblazen met perslucht	
Reinigen trekstaafjes	TEST 9: Ultrasone homogenisator in warme olie	Verwarmd ultrasoon bad				

4.4.2. Testen in verband met het openen van de bestralingscapsules

- Test 1: Cirkelzaag

Met deze test willen we proberen hoe het zagen verloopt bij een automatisch lopende elektrische cirkelzaag, gekoeld met alcohol.

Beschrijving van de test:

- Een buis met buitendiameter 10mm en binnendiameter 8mm wordt volledig gevuld met loodbismut
- De buis wordt tegen het zaagblad geplaatst en naar beneden gedrukt met behulp van gewichtjes
- Er wordt gekeken of er koelmiddel (alcohol) aanwezig is
- De zaag wordt in werking gesteld

Resultaten van de test:

Het zagen gaat traag, het resultaat is wel een mooie zaagsnede.

- Test 2A: Manuele steekzaag

De bedoeling is om het effect van verschillende soorten zaagtanden te testen. De zaagtest wordt uitgevoerd op een buis met de kleinste diameter uit het experiment, en ook op een buis met de grootste diameter uit het experiment. Ook belangrijk is het feit te weten of er al dan niet bramen ontstaan.

Beschrijving van de testen:

- Een buis met buitendiameter 10mm en binnendiameter 8mm wordt volledig gevuld met loodbismut
- Een buis met buitendiameter 26mm en binnendiameter 18mm wordt volledig gevuld met loodbismut
- Er wordt gewacht tot het loodbismut volledig uitgehard en afgekoeld is
- De buis wordt geklemd
- De buis wordt gezaagd met een handzaag van 18 tanden per duim en met een handzaag van 24 tanden per duim

Resultaten van de test:

Het zagen gaat vlot met beide type zagen. Enkel het begin is wat moeilijker bij de zaag met 24 tanden per duim. Noch bij de buis met de kleine diameter, noch bij de buis met de grote diameter vormt het zagen een probleem. Ook bramen lijken op het eerste zicht geen probleem te zullen leveren. Het zaagoppervlak is vrij tot zeer vlak.

- Test 2B: Automatische steekzaag

Met deze test willen we proberen hoe het zagen verloopt met een metabo steekzaag. Bij dit type zaag is geen koeling nodig.

Beschrijving van de test:

- Een buis met buitendiameter 10mm en binnendiameter 8mm wordt volledig gevuld met loodbismut
- De zaag wordt in werking gesteld

Resultaten van de test:

Het zagen gaat traag maar zonder problemen.

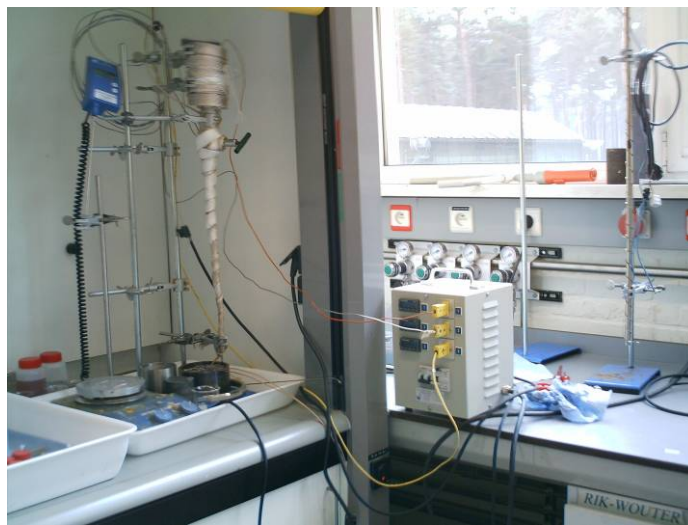
4.4.3. Testen in verband met het uitsmelten van loodbismut

Vooraleer een ontmantelinginstallatie ontworpen wordt, is het belangrijk een inzicht te krijgen in de eigenschappen van loodbismut. Daarom werd er een testopstelling gemaakt.

Principe van de opstelling: Lange buizen die de bestralingscapsules voorstellen kunnen gevuld worden met staafjes, die de trekstaafjes moeten voorstellen. Loodbismut kan

gesmolten worden in een reservoir en wanneer het gesmolten is kan de buis gevuld worden met het loodbismut. Op deze manier krijgen we een dummy die als maatstaf kan dienen voor de echte bestralingscapsule. Voor het uitsmelten en verwarmen wordt gebruik gemaakt van een verwarmingslint.

Verschillende testen worden nu uitgevoerd, met als doel beter te begrijpen wanneer en hoe het loodbismut uitsmelt en hoe de staafjes te verwijderen zijn. Hiervoor kan de buis opnieuw verwarmd worden, waarbij de temperatuur gevolgd en gecontroleerd kan worden. De buis kan onder verschillende hoeken opgesteld worden.



Figuur 4.15 Testopstelling

- Test 3: Hete lucht

Met deze test willen we uitzoeken of het mogelijk is om het loodbismut uit te smelten met behulp van een heteluchtpistool.

Beschrijving van de test:

- 10 trekstaafjes worden in een buis gestoken
- De buis wordt gevuld met vloeibaar loodbismut
- Er wordt gewacht tot het loodbismut uitgehard is
- Het loodbismut wordt weer uitgesmolten met behulp van een heteluchtpistool

Resultaten van de test:

Het is mogelijk om het loodbismut op deze manier uit te smelten. Het is echter niet echt een handige methode. Eerst moet de geopende kant van de buis verwarmd worden totdat

uit dit deel het loodbismut verwijderd is. Daarna moet de hete lucht gericht worden op het volgende stuk van de buis. Dit gaat zo voort tot al het loodbismut uitgesmolten is.

- Test 4: Verwarmingslint en Test 7: verwijderen trekstaafjes mbv de zwaartekracht

Deze test heeft als doel uit te zoeken wat er gebeurt met het loodbismut en de trekstaafjes wanneer we de buis opstellen onder een hoek en dan het loodbismut uitsmelten. Dezelfde test wordt uitgevoerd onder verschillende hoeken en de temperatuur wordt hierbij in de gaten gehouden. Test 4 en test 7 worden hier gecombineerd uitgevoerd.

Beschrijving van de test:

- 10 trekstaafjes worden in een buis gestoken
- De buis wordt gevuld met vloeibaar loodbismut
- Er wordt gewacht tot het loodbismut uitgehard is
- De buis wordt opgesteld onder de gewenste hoek
- Temperatuursensors worden aangebracht
- Het loodbismut wordt weer uitgesmolten

Hoek van 20°	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loodbismut begint te vloeien op 280° C ▪ Trekstaafjes blijven zitten. Na veel getik met een schroevendraaier komen de staafjes er moeizaam uit, maar uiteindelijk zetten we de buis schuiner om de staafjes (12 in totaal) er vlotter te laten uitkomen.
Hoek van 30°	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loodbismut begint te vloeien op 310° C ▪ Trekstaafjes blijven zitten. Met behulp van genoeg getik op de buis komen de staafjes eruit
Hoek van 30°	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loodbismut begint te vloeien op 225° C ▪ Trekstaafjes komen er in eerste instantie niet uit ▪ Wanneer de verwarming blijft aanstaan, komen de trekstaafjes er toch uit

Hoek van 45°	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loodbismut begint te vloeien op 210°C (reden: verwarmingsband is beter aangebracht, tot op het topje), ▪ Trekstaafjes blijven zitten. Na genoeg getik komen ze wel uit de buis.
Hoek van 60°	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loodbismut vloeit eruit op een temperatuur rond 250°C ▪ Trekstaafjes blijven zitten, na 1 tik komen ze er wel uit.
Hoek van 70°	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loodbismut vloeit op 190°C ▪ De trekstaafjes vallen eruit na lichtjes tikken

Resultaten van de test:

- Het loodbismut vloeit steeds voor de staafje eruit vallen
- De temperatuur waarbij het loodbismut begint te vloeien verschilt sterk van experiment tot experiment. De laagst gemeten temperatuur is 210°C, terwijl het smeltpunt van loodbismut op $\pm 130^\circ\text{C}$ ligt. Dit kunnen we wijten aan het feit dat de temperatuur wordt gemeten op één plaats in de verwarmingsband, het is onmogelijk de temperatuur van het loodbismut zelf te meten. Het feit dat de verwarmingsband een temperatuur van bijvoorbeeld 300° C bereikt heeft, betekent niet dat het loodbismut ook die temperatuur heeft. De verwarmingsband is ook nogal moeilijk aan te brengen, waardoor de temperatuur niet overal evenredig verdeeld is. De manier van aanbrengen van de verwarmingsband bepaalt ook mee de temperatuur waarop het loodbismut begint te vloeien.
- Uit de hoek valt moeilijk af te leiden of de trekstaafjes al dan niet uit de buis zullen vallen

4.4.4. Testen in verband met het verwijderen van de trekstaafjes

- Test 5A: Drijven (Wet van Archimedes)

Loodbismut is zwaarder dan de trekstaafjes. Het idee is dat, als een kant van de buis geopend wordt en de buis verticaal geplaatst wordt met de opening naar boven, de trekstaafjes zouden moeten komen bovendrijven wanneer het loodbismut gesmolten is (wet van Archimedes). Wanneer de trekstaafjes dan allemaal aan elkaar bevestigd worden, zou het zeer gemakkelijk moeten zijn om alle trekstaafjes te verwijderen door ze er simpelweg langs boven uit te trekken.



Figuur 4.16 Test 5: Verwijderen trekstaafjes door wet van Archimedes

Beschrijving van de test:

- 10 trekstaafjes worden aan elkaar gepuntlast met behulp van kleine strookjes metaal
- Dit treintje van trekstaafjes wordt in een buis gestoken
- De buis wordt gevuld met vloeibaar loodbismut
- Er wordt gewacht tot het loodbismut uitgehard is
- Het loodbismut wordt opnieuw gesmolten

Resultaten van de test:

De trekstaafjes komen, tegen de verwachtingen in, niet bovendrijven, en kunnen dus onmogelijk op deze manier verwijderd worden.

- Test 5B:

Aangezien test 5A niet loopt zoals verwacht, wordt de test herhaald. Deze keer worden de trekstaafjes echter niet aan elkaar gelast. Bedoeling is om te controleren of de trekstaafjes nu wel komen bovendrijven.

Beschrijving van de test:

- 10 trekstaafjes worden één voor één in een buis gestoken
- De buis wordt gevuld met vloeibaar loodbismut
- Er wordt gewacht tot het loodbismut uitgehard is
- Het loodbismut wordt opnieuw gesmolten

Resultaten van de test:

Ook nu komen de trekstaafjes niet bovendrijven. De opwaartse kracht uitgeoefend door het loodbismut is blijkbaar niet sterk genoeg om de staafjes in de buis omhoog te duwen.

- Test 6A: Verwijderen trekstaafjes met plunjer

Een meer gecontroleerde manier om de trekstaafjes uit de buis te verwijderen, is om ze manueel met een plunjer uit te duwen.



Figuur 4.17 Test 6: Verwijderen trekstaafjes met plunjer

Beschrijving van de test:

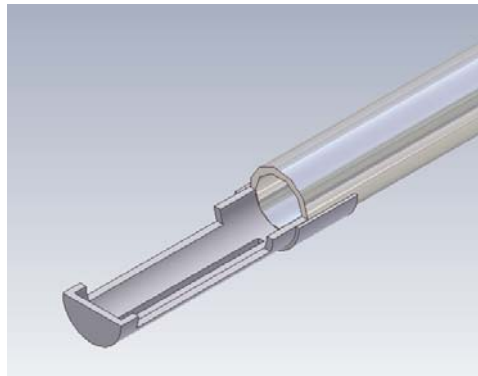
- 10 trekstaafjes worden in een buis gestoken
- De buis wordt gevuld met vloeibaar loodbismut
- Er wordt gewacht tot het loodbismut uitgehard is
- Het achterste stuk wordt van de buis gezaagd, zodanig dat de buis aan beide kanten open is
- De buis wordt onder een hoek van 30° opgesteld
- Een verwarmingsband en een temperatuursensor wordt aangebracht
- De buis wordt verwarmd, zodanig dat het loodbismut weer uitsmelt.

Resultaten van de test:

Het loodbismut begint te vloeien op een temperatuur van 198° C en vloeit uit de buis. De staafjes blijven zitten, maar worden gemakkelijk verwijderd met behulp van een plunjer.

- Test 6B: Gecontroleerd verwijderen trekstaafjes met plunjer

Bij het uitduwen met de plunjer vallen de trekstaafjes in een willekeurige volgorde uit de buis. Een manier om de volgorde van de trekstaafjes te behouden is misschien om een gootje te bevestigen aan de buis waarin de trekstaafjes dan terecht komen. De trekstaafjes kunnen dan één voor één uit het gootje gehaald worden, en hun volgorde blijft gekend. In het gootje moet dan wel een opening voorzien worden om het loodbismut weg te laten vloeien.



Figuur 4.18 Test 6: Identificatie trekstaafjes mbv gootje

Beschrijving van de test:

- 10 trekstaafjes worden in een buis gestoken waaraan een gootje bevestigd is
- De buis wordt gevuld met vloeibaar loodbismut
- Er wordt gewacht tot het loodbismut uitgehard is
- De achterkant wordt van de buis gezaagd, zodanig dat de buis aan beide zijden geopend is
- Het loodbismut wordt opnieuw gesmolten
-
- Resultaten van de test:

Het loodbismut begint te vloeien op een temperatuur van ongeveer 210° C en vloeit gedeeltelijk weg langs de voorziene opening in het gootje. De rest loopt over de randen van het gootje. De trekstaafjes blijven in eerste instantie zitten. De trekstaafjes worden

dan rustig met een plunjer uit de buis geduwd, en kunnen één voor één in de juiste volgorde uit het gootje genomen worden.

- Test 7:

Deze test werd reeds uitgevoerd in combinatie met test 4.

- Test 8: Verwijderen trekstaafjes mbv een magneet

Aangezien de trekstaafjes magnetische eigenschappen bezitten, zou het mogelijk moeten zijn de trekstaafjes met behulp van magneten uit de buis te verwijderen.



Figuur 4.19 Test 8: Verwijderen trekstaafjes mbv een magneet

Beschrijving van de test:

- 10 trekstaafjes worden één voor één in een buis gestoken
- We leggen de buis horizontaal
- De magneet wordt langs de buitenzijde van de buis bewogen met de bedoeling de trekstaafjes één voor één te verwijderen

Resultaten van de test:

Het blijkt vrij moeilijk te zijn om de trekstaafjes op deze manier te verwijderen. Na lange tijd proberen slagen we er echter wel in.

Aangezien de trekstaafjes zelfs moeilijk te verwijderen zijn wanneer de buis niet met loodbismut gevuld is, zien we ervan af het experiment te herhalen met een buis die wel gevuld is met loodbismut.

4.4.5. Testen in verband met reinigen van de trekstaafjes

- Test 9: Reinigen trekstaafjes met een ultrasone homogenisator

Nadat de trekstaafjes verwijderd zijn uit de buizen kleven er nog resten loodbismut aan. Deze test heeft als doel na te gaan of deze resten loodbismut te verwijderen zijn met ultrasone golven en verwarmde olie.

Beschrijving van de test:

- Een maatbeker wordt gevuld met olie
- De olie wordt verwarmd op een verwarmingsplaat
- De trekstaafjes worden in de olie ondergedompeld
- Een ultrasone probe wordt met de tip in de olie gedompeld
-
- Resultaten van de test:
- De staafjes zijn te reinigen met behulp van dit systeem, soms neemt het wel wat tijd in beslag. Het reinigen verloopt vlotter wanneer een magnetische roerder gebruikt wordt in combinatie met de ultrasone golven en de warme olie.
-

4.5. Conclusie

Na het uitvoeren van de functionele analyse, de marktstudie en de testen is er een heleboel informatie verzameld. Deze informatie moet nu verwerkt worden. Dit gebeurt in de exploratiefase.

5. De exploratiefase

5.1. Inleiding

Op een gegeven moment, wanneer voldoende informatie gegenereerd is, is het moment aangebroken om te starten met de exploratiefase. Dit betekent echter niet dat de informatiefase nu volledig afgelopen is. Ontwerpen is immers een continu proces. Wanneer meer informatie vereist is, wordt de vorige fase opnieuw doorlopen.

Een korte herhaling van wat de exploratiefase inhoudt:

“Uitgaande van de gevonden informatie moet er nu geëxploreerd worden. Informatie moet geschift en verdeeld worden. Wat is wel bruikbaar en wat niet? Met welke informatie ga ik verder werken? Op welk gebied is nog meer opzoekwerk nodig. Het eindresultaat van deze fase is telkens een aantal mogelijke oplossingen.”

[3]

5.2. Morfologische kaart

In punt 4.4.1 werd reeds uitgelegd wat een morfologische kaart is.

Elke deeloplossing uit die kaart wordt in de pagina's die volgen gedetailleerder bekeken en beoordeeld aan de hand van een aantal voor en nadelen. Om een objectieve beoordeling mogelijk te maken, worden voor elk van de 4 delen van de opstelling een aantal criteria opgesteld. Aan de hand van deze criteria wordt dan een scorekaart opgesteld voor elke deeloplossing. Score 5 = zeer goed, 3 = goed, 1 = slecht, 0 = onaanvaardbaar. Aan elk criterium wordt ook nog een gewicht toegekend, het gewicht staat in direct relatie tot het belang van het criterium. De totaalscore wordt berekend door voor elk criterium het product te maken van het gewicht met de behaalde score, en dan deze waarden op te tellen. Indien een oplossing een score 0 haalt op één van de criteria, valt deze in principe al weg als mogelijke eindoplossing.

Morfologische kaart:

	Oplossing 1	Oplossing 2	Oplossing 3	Oplossing 4	Oplossing 5
Openen capsule	1.1 Cirkelzaag	1.2 Steekzaag	1.3 Snijden met mes	1.4 Lasersnijden	
Smelten loodbismut	2.1 Verwarmingkabel	2.2 Hete lucht	2.3 Inductie	2.4 Weerstandsdraad	2.5 Laser
Verwijderen trekstaafjes	3.1 Treintje van trekstaafjes	3.2 Duwen met plunjer	3.3 Met behulp van de zwaartekracht	3.4 Met magneten	3.5 Uitblazen met perslucht
Reinigen trekstaafjes	4.1 Ultrasone homogenisator in warme olie	4.2 Verwarmd ultrasoon bad			

5.2.1. Openen van de bestralingscapsules

- Oplossing 1.1 - Cirkelzaag



Figuur 5.1 Cirkelzaag

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eenvoudig ▪ Economisch ▪ Compact ▪ Geen verstopping van de zaag 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Opwarming door wrijving ▪ Koelmiddel nodig

Bespreking:

Hoewel dit type zaag duidelijk een aantal pluspunten heeft, vormt de noodzaak aan koelmiddel een zeer groot nadeel. Door het gebruik van koelmiddel krijgen we na gebruik een extra, gecontamineerde afvalstof. Deze zal onder beveiligde omstandigheden moeten afgevoerd worden. Dit verloopt volgens een vastgestelde procedure, en ook het prijskaartje hiervan is niet te onderschatten.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Afval	Beïnvloeding experiment	Gewicht
2	2	4	5	
5	5	0	5	45

5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 1.2 – Steekzaag



Figuur 5.2 Steekzaag

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eenvoudig ▪ Economisch 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Opwarming door wrijving

Bespreking:

Een aantal van de pluspunten die we terugvonden bij de cirkelzaag, zijn niet aanwezig bij de steekzaag. Een groot voordeel is wel dat de noodzaak van het gebruiken van koelmiddel wegvalt. Dit betekent één afvalstof minder.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Afval	Beïnvloeding experiment	
2	2	4	5	gewicht
5	5	3	5	57

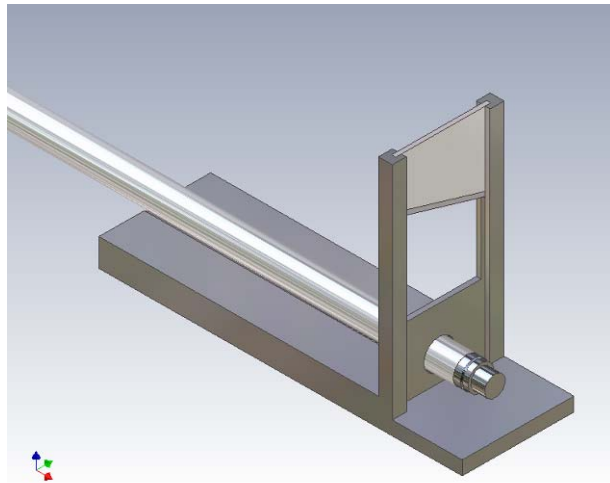
5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 1.3 – Snijden met mes



Figuur 5.3 Snijstelsysteem gebaseerd op guillotine

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Weinig bramen ▪ Economisch 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grote kracht nodig ▪ Kans op vervorming capsule

Bespreking:

Doordat de kans op vervorming van de bestralingscapsule bestaat, valt de bruikbaarheid van deze methode eigenlijk al weg. Immers, indien de bestralingscapsule zou vervormen, wordt het moeilijk tot zelfs onmogelijk om de trekstaafjes uit de capsule te verwijderen.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Afval	Beïnvloeding experiment	
2	2	4	5	gewicht
5	3	5	0	36

5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 1.4 – Lasersnijden



Figuur 5.4 Lasersnijden

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoge precisie ▪ Hoge snijsnelheid ▪ Braamvrije snedes ▪ Kleine snedebreedte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mogelijke beïnvloeding van de trekstaafjes door de warmte van de laser ▪ Duur

Bespreking:

Hoewel de hoge precisie, de snelheid en de vrijheid van bramen een groot voordeel vormen, is de mogelijke beïnvloeding van de trekstaafjes onaanvaardbaar. Reeds in het eisenpakket werd duidelijk gemaakt dat de uitkomst van het experiment op geen enkele wijze mag beïnvloed worden door de wijze van ontmantelen van de trekstaafjes.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Afval	Beïnvloeding experiment	
2	2	4	5	gewicht
1	1	5	0	24

5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

5.2.2. Uitsmelten van het loodbismut

- Oplossing 2.1 - Verwarmingskabel



Figuur 5.5 Verwarmingskabel

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Economisch ▪ Gekende methode op het SCK-CEN ▪ Kan bevestigd worden daar waar nodig ▪ Temperatuur regelbaar en controleerbaar wanneer gebruikt in combinatie met thermokoppels ▪ Een back-up systeem door voorzien van een dubbele kabel is mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precisiewerk bij het aanbrengen ▪ Duur ▪ Extra instrumentatie (Variacs) nodig

Bespreking:

Deze methode van verwarmen heeft duidelijk een aantal voordelen. Denkend aan de eis dat de temperatuur niet hoger mag worden dan 200 °C (± 10), is het feit dat de temperatuur regelbaar en controleerbaar is een niet te onderschatten voordeel. Ook de mogelijkheid tot het inbouwen van een back-up systeem is een belangrijk pluspunt.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Afval	T –regeling	Back-up	
2	2	4	5	5	gewicht
5	5	5	4	5	85

5 = zeer goed 3 = goed 1 = slecht 0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 2.2 – Hete lucht



Figuur 5.6 Hetelucht pistool

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Economisch ▪ Flexibel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatuur moeilijk te regelen en controleren ▪ Alleen lokale verwarming mogelijk ▪ Back-up systeem enkel mogelijk door dubbele apparatuur te voorzien

Bespreking:

Met deze methode zou het zeer moeilijk worden om de warmte net daar toe te voeren waar het nodig is. Het gevolg hiervan zou een onregelmatige en ongecontroleerde uitsmelting van het loodbismut zijn. Het feit dat de methode zeer economisch is weegt hiertegen niet op.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Afval	T –regeling	Back-up	
2	2	4	5	5	gewicht
5	5	5	0	1	45

5 = zeer goed 3 = goed 1 = slecht 0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 2.3 – Inductie



Figuur 5.7 Inductieverwarming

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Snelle verwarming ▪ Nauwkeurige temperatuurregeling 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inductiespoel moet gekoeld worden ▪ Voorzien in een back-up systeem is moeilijk ▪ Technisch complex voor in een hotcel ▪ Duur

Bespreking:

Hoewel een snelle verwarming en nauwkeurige temperatuurregeling een groot voordeel zijn, vormen de technische complexiteit en de kost een afrader.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Afval	T –regeling	Back-up	
2	2	4	5	5	gewicht
1	1	3	5	1	46

5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

-
-
-
-
-
-

- Oplossing 2.4 – Weerstandsdraad/wikkellement



Figuur 5.8 Wikkelement

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eenvoudig ▪ Economisch ▪ Temperatuur regelbaar en controleerbaar in combinatie met thermokoppels 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niet echt flexibel waardoor het moeilijk wordt een back-up systeem te voorzien

Bespreking:

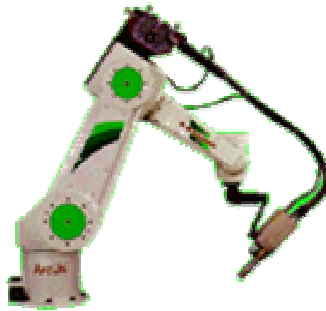
Enkel de moeilijkheid van een in te bouwen back-up systeem vormt een nadeel. Dit nadeel weegt echter wel door.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Afval	T –regeling	Back-up	
2	2	4	5	5	gewicht
5	5	5	4	1	65

5 = zeer goed 3 = goed 1 = slecht 0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 2.5 – Laser



Figuur 5.9 Laser

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nauwkeurig te richten ▪ Nauwkeurige temperatuurregeling 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Duur ▪ Back-up systeem enkel mogelijk door dubbele apparatuur te voorzien in de hotcel

Bespreking:

De nauwkeurig te richten hitte en goed temperatuurregeling vormen een groot voordeel. De kost is echter groot in vergelijking met andere systemen, en deze zien we dan nog eens verdubbelen bij het invoeren van een (noodzakelijk) back-up systeem. Door de noodzaak van dubbele apparatuur zal ook de toch al beperkte ruimte in de hotcel verminderd worden.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Afval	T –regeling	Back-up	
2	2	4	5	5	gewicht
1	1	5	5	1	54

5 = zeer goed 3 = goed 1 = slecht 0 = onaanvaardbaar

5.2.3. Verwijderen van de trekstaafjes

- Oplossing 3.1 – Treintje van trekstaafjes



Figuur 5.10 Treintje van trekstaafjes

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eenvoudig systeem ▪ Geen nood aan extra energietoevoer ▪ Weinig contaminatie doordat loodbismut in de capsule kan blijven ▪ Gemakkelijke identificatie van de trekstaafjes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Blijkt niet te werken na testen

Bespreking:

Wat in eerste instantie een goed systeem leek met een aantal belangrijke voordelen, blijkt bij nader inzien niet mogelijk te zijn. Bij testen is namelijk gebleken dat de trekstaafjes niet het verwachte gedrag vertonen (zie ook 4.3.1 Testen in verband met uitsmelten)

Scorekaart:

Eenvoud	Contaminatie	Toepasbaarheid	Energie	Identificatie	
2	5	5	3	4	gewicht
5	5	0	5	5	70

5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 3.2 – Duwen met plunjers



Figuur 5.11 Duwen met plunjers

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eenvoudig ▪ Geen extra energie nodig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capsule moet aan 2 kanten geopend worden ▪ Meer kans op contaminatie door ongecontroleerd uitvloeien van loodbismut ▪ Moeilijke identificatie van de trekstaafjes

Bespreking:

Dit eenvoudig systeem heeft weinig kans op falen. Wel zal de bestralingscapsule in plaats van aan één kant aan beide kanten geopend moeten worden. Indien er geopteerd zou worden voor een dergelijk systeem, moet er ook een goed opvangsysteem voor het loodbismut voorzien worden om de kans op contaminatie van de omgeving zo veel mogelijk te beperken. Ook moet er een manier gevonden worden om de identificatie van de trekstaafjes te verzekeren.

Scorekaart:

Eenvoud	Contaminatie	Toepasbaarheid	Energie	Identificatie	
2	5	5	3	4	gewicht
3	3	3	5	1	55

5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 3.3 – Met behulp van de zwaartekracht



Figuur 5.12 Met behulp van de zwaartekracht

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geen extra energie of andere krachten nodig ▪ Eenvoudig ▪ Weinig tot geen kans op falen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Loodbismut moet apart opgevangen worden ▪ Moeilijke identificatie van de trekstaafjes

Bespreking:

Van alle oplossingen zal dit de meest eenvoudige zijn. Niets is eenvoudiger dan het gebruiken van de zwaartekracht, een kracht die we zonder meer tot onze beschikking hebben. Ook faalkansen worden hier tot een minimum beperkt. Het uitgesmolten loodbismut zal echter wel apart opgevangen en afgevoerd moeten worden en een systeem is noodzakelijk om de trekstaafjes te identificeren.

Scorekaart:

Eenvoud	Contaminatie	Toepasbaarheid	Energie	Identificatie	
2	5	5	3	4	gewicht
5	3	5	5	1	69

5 = zeer goed 3 = goed 1 = slecht 0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 3.4 – Met magneten



Figuur 5.13 Met magneten

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geen extra energie nodig ▪ Loodbismut kan in capsule blijven ▪ Gemakkelijke identificatie trekstaafjes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Blijkt niet te werken na testen

Bespreking:

Hoewel de contaminatie beperkt zou zijn doordat het loodbismut in de bestralingscapsule kan blijven, en de identificatie van de trekstaafjes vlot zou verlopen, kan met dit systeem niet verder gewerkt worden. Bij testen is namelijk gebleken dat dit principe niet toepasbaar is (zie ook 4.3.1 testen in verband met uitsmelten).

Scorekaart:

Eenvoud	Contaminatie	Toepasbaarheid	Energie	Identificatie	
2	5	5	3	4	gewicht
3	5	0	5	5	66

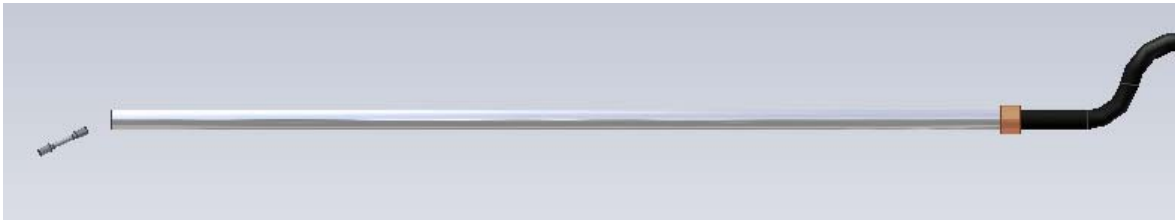
5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 3.5 – Uitblazen met perslucht



Figuur 5.14 Uitblazen met perslucht

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Weinig kans op falen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Extra energie en persluchtaansluiting nodig ▪ Meer kans op contaminatie ▪ Capsule moet aan beide kanten geopend worden ▪ Moeilijke identificatie trekstaafjes ▪ Ongecontroleerd

Bespreking:

Het voordeel van deze oplossing is dat de trekstaafjes met 100 procent zekerheid uit de bestralingscapsule verwijderd zullen zijn. Hiertegenover staat echter dat het geen eenvoudige oplossing is, en dat de kans op contaminatie door weggeblazen loodbismut zeer groot is. Ook naar identificatie van de trekstaafjes achteraf zullen we hier problemen ondervinden.

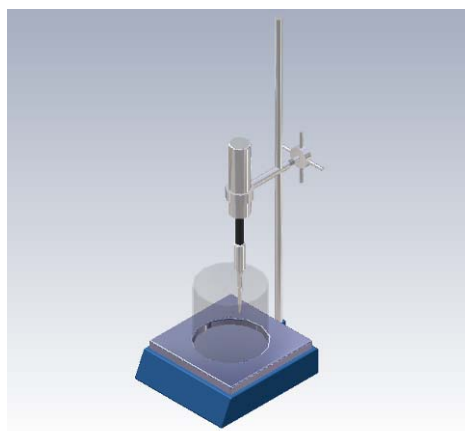
Scorekaart:

Eenvoud	Contaminatie	Toepasbaarheid	Energie	Identificatie	
2	5	5	3	4	gewicht
1	1	3	1	1	29

5 = zeer goed 3 = goed 1 = slecht 0 = onaanvaardbaar

5.2.4. Reinigen van de trekstaafjes

- Oplossing 4.1 – Ultrasonische homogenisator in warme olie



Figuur 5.15 Ultrasonische homogenisator in verwarmde olie

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Goede reiniging trekstaafjes mogelijk ▪ Verwarming tot 200°C mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Apart verwarmingsysteem nodig voor de olie ▪ Vinger moet exact gepositioneerd worden door gebruiker

Bespreking:

Bij het gebruik van dit systeem is oplettendheid van de gebruiker een vereiste. De gebruiker moet controleren dat de vinger juist gepositioneerd wordt. De vinger moet onder de olie zitten en mag ook niet tegen de bodem of de rand van de pot geplaatst worden. Nog een nadeel is dat een aparte verwarmingsplaat voor het verwarmen van de olie voorzien moet worden.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Haalbaarheid	Veiligheid	
2	2	5	5	gewicht
3	1	3	3	38

5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

- Oplossing 4.2 – Verwarmd ultrasoon bad



Figuur 5.16 Verwarmd ultrasoon bad

Pluspunten	Minpunten
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eenvoudig ▪ Veilig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestaat enkel voor lage temperaturen (tot 70° C)

Bespreking:

Hoewel dit systeem zowel in eenvoud als in veiligheid het vorige systeem overtreft, is dit niet beschikbaar in versies die de olie kunnen opwarmen tot de gewenste temperatuur.

Scorekaart:

Kost	Eenvoud	Haalbaarheid	Veiligheid	
2	2	5	5	gewicht
3	3	0	5	37

5 = zeer goed

3 = goed

1 = slecht

0 = onaanvaardbaar

5.3. Conclusie

Wanneer we het eindresultaat van deze vergelijking bekijken, zien we dat een heleboel oplossingen wegvallen omwille van verscheidene redenen. Deze oplossingen zijn in de onderstaande tabel gearceerd weergegeven. Van de oplossingen die nog overblijven na het verwijderen van deze die niet voldoen aan de eisen, zoeken we naar degene die het best scoort op de opgestelde criteria. Dit zijn de oplossingen met de hoogste score. De hoogste scores zijn in het vet weergegeven.

	Oplossing 1	Oplossing 2	Oplossing 3	Oplossing 4	Oplossing 5
Openen capsule	1.1 Cirkelzaag Score 45	1.2 Steekzaag Score 57	1.3 Snijden met mes Score 36	1.4 Lasersnijden Score 24	
Smelten loodbismut	2.1 Verwarmingkabel Score 85	2.2 Hete lucht Score 45	2.3 Inductie Score 46	2.4 Weerstandsdraad Score 65	2.5 Laser Score 54
Verwijderen trekstaafjes	3.1 Treintje van trekstaafjes Score 70	3.2 Duwen met plunjer Score 55	3.3 Met behulp van de zwaartekracht Score 69	3.4 Met magneten Score 66	3.5 Uitblazen met perslucht Score 29
Reinigen trekstaafjes	4.1 Ultrasone homogenisator in warme olie Score 38	4.2 Verwarmd ultrasoon bad Score 37			

De exploratiefase kan op dit punt beëindigd worden. Belangrijk is nu dat uit hetgeen onderzocht en geëxploreerd is een gefundeerde beslissing voor een bepaald concept voortkomt. Dit gebeurt in de volgende fase, de beslissingsfase.

6. Beslissingsfase

6.1. Inleiding

Zoals reeds gemeld is nu het moment aangebroken waarop beslissingen genomen moeten worden. Een korte samenvatting van wat deze beslissingsfase inhoudt:

“Na het exploreren moet er een beslissing genomen worden. Op basis van het reeds verzette werk kan er een gefundeerde keuze gemaakt worden voor een bepaalde (deel)oplossing. Helpende vragen hierbij zijn: welk alternatief heeft het meeste kans tot slagen? Welk alternatief zal in de praktijk het meeste kans maken? Welk alternatief komt het best overeen met de bedoeling van deze opdracht? Welk alternatief voldoet het best aan de gestelde eisen?”^[3]

6.2. Een keuze gebaseerd op ergonomie

Hoewel de gegeven opdracht een complex probleem behandelt waarbij met veel factoren rekening gehouden moet worden omwille van de omgeving waarin gewerkt wordt, is er gekozen voor een eenvoudige oplossing. Sterker nog: er is gekozen voor de meest eenvoudige oplossing die binnen de gegeven tijdspanne gevonden kon worden. Dit is gedaan met als doelstelling de ergonomie naar de gebruiker te kunnen waarborgen.

6.2.1. Ergonomie bij het vervaardigen

Hoe eenvoudiger het ontwerp, hoe eenvoudiger het ook zal zijn om de opstelling te maken. Dit is een bewuste keuze. Binnen de industriële context van het ontwerp is het immers niet belangrijk dat het ontwerp modebewust oogt. Belangrijk is dat het binnen het SCK-CEN gebouwd kan worden en dat het ontwerp functioneel is. Door een eenvoudig ontwerp te vervaardigen zal de bouw ook binnen een korte tijdspanne en aan een lage kostprijs kunnen gebeuren. Dit is belangrijk, omdat bij wetenschappelijk onderzoek tijd en geld een belangrijke factor vormen.

6.2.2. Ergonomie tijdens de werkingsfase van de opstelling

De gehele opstelling zal moeten bediend worden met behulp van 2 manipulators. Hoewel het systeem van de manipulators een zeer ingenieus en goedwerkend systeem

is, spreekt het voor zich dat hiermee rekening dient gehouden te worden bij het ontwerp. Complexe bewegingen moeten zo veel mogelijk vermeden worden bij het bedienen van de ontmantelinginstallatie. Ook is het zo dat het dieptezicht tijdens het werken in een hotcel beperkt is. Dit komt omdat alle handelingen uitgevoerd worden vanuit één standpunt voor de hotcel. Het is onmogelijk om de opstelling bijvoorbeeld vanuit een zijdelingse hoek te bekijken. Hierbij komt nog dat de maximale last die een manipulator kan dragen beperkt is tot \pm acht kilogram.

Rekening houdend met deze factoren kunnen de bewegingen die uitgevoerd moeten worden binnen de hotcel best eenvoudig en zoveel mogelijk rechtlijnig zijn.

Eens er testen met actief materiaal uitgevoerd zijn in een hotcel is het een zeer complexe onderneming om nog interventies binnenin de cel zelf uit te voeren. Dit ligt natuurlijk aan het feit dat de omgeving beschermd moet blijven tegen straling en besmetting. De kans dat zo'n interventie zou moeten plaatsvinden, moet daarom tot een uiterst minimum beperkt worden. Concreet houdt dit in dat de kans op falen van de ontmantelinginstallatie zo klein mogelijk gehouden moeten worden. Daarom wordt er beslist om elektronica zoveel mogelijk uit de hotcel te weren. Mechanische bewegingen krijgen de voorkeur op geautomatiseerde bewegingen. Daar waar in de opstelling toch een elektrische sturing nodig is, wordt de voeding buiten de hotcel geplaatst zodat bij falen dit onderdeel gemakkelijk kan vervangen worden. Een andere manier om de faalkansen te beperken is door te verzekeren dat de installatie zeer robuust en stabiel is. Dit betekent dat de wanddiktes groot genoeg moeten zijn en verbindingen stevig.

Werken in een hotcelomgeving is ook alles behalve routinewerk. Op de dienst LHMA staan verschillende hotcels, die allen een ander experiment herbergen. Na verloop van tijd worden de experimenten in de hotcels ook vervangen. Daarom is het naar de gebruiker toe belangrijk dat de installatie in de hotcel eenvoudig en begrijpbaar is. Het bedieningsprincipe moet voor zich spreken. In het optimale geval zou de gebruiker de installatie moeten kunnen bedienen zonder dat een extra woord van uitleg vereist is.

Rekening houdend met al deze feiten is er gekozen voor een geïntegreerd systeem. Hiermee wordt bedoeld dat de onderdelen van de opstelling geen aparte modules maar wel één geheel vormen. Het openen van de bestralingscapsule, het smelten van het loodbismut en het verwijderen van de trekstaafjes gebeurt na elkaar in één installatie. Het voordeel hiervan is dat de bestralingscapsule maar éénmaal geklemd moet worden en dat

enkel rechtlijnige verplaatsingsbewegingen nodig zijn. Ook biedt het duidelijkheid naar de gebruiker toe in verband met de bedieningsvolgorde. Het reinigen gebeurt echter wel apart. Dit is zo omdat de faalkans van dit deel van de installatie het grootst is door de combinatie van ultrasone golven en elektrische verwarming. Indien dit zou ingebouwd worden in de rest van de installatie en zou falen, faalt de hele installatie. Indien dit deel apart gehouden wordt, kan het gemakkelijker worden vervangen.

6.2.3. Ergonomie bij de afbraak

Na afloop van het experiment zal de opstelling moeten afgebroken worden om plaats te maken voor een nieuw experiment. Er is bewust voor gekozen om hiermee tijdens het ontwerp van de installatie rekening te houden. Bij de afbraak wordt aan de achterzijde van de hotcel een container gekoppeld waarin dan met behulp van de aanwezige manipulators het besmette materiaal wordt gestoken. De container wordt dan gesloten en verwijderd. De dienst voor radioactief afvalbeheer (DRAB) van het SCK-CEN zorgt dat alles verder in goede banen loopt.

Belangrijk is dus dat geen enkel stuk van de installatie groter is dan de inhoud van de container. Stukken die toch groter zijn worden daarom opgedeeld in kleinere stukken en aan elkaar bevestigd met schroeven. Met behulp van de manipulators is het mogelijk deze schroeven los te krijgen op voorwaarde dat de schroefdraad minimaal van het type M4 is.

Naar afvalbeheer toe is het ook voordeliger om de hoeveelheid materiaal zo veel mogelijk te beperken. Dit moet natuurlijk afgewogen worden tegen het feit dat het ontwerp zo stabiel mogelijk moet zijn.

6.3. De maquettes

6.3.1. Inleiding

Om de haalbaarheid van dit idee te testen vooraleer over te gaan naar het definitieve ontwerp is het nuttig om van een aantal ideeën een maquette te maken. Door het maken en het testen van de maquette krijgt men een beter inzicht in de eigenschappen van het ontwerp(idee). Is het wel realistisch? Waar zitten er nog fouten? Wat zijn de zwakke punten? Deze dingen komen bij het maken van een tekening (zowel manueel als computergestuurd) niet altijd even duidelijk naar voren. Door het maken van een

maquette kunnen vaak fouten die anders pas in een latere fase van het ontwerp ontdekt zouden worden, vermeden worden.

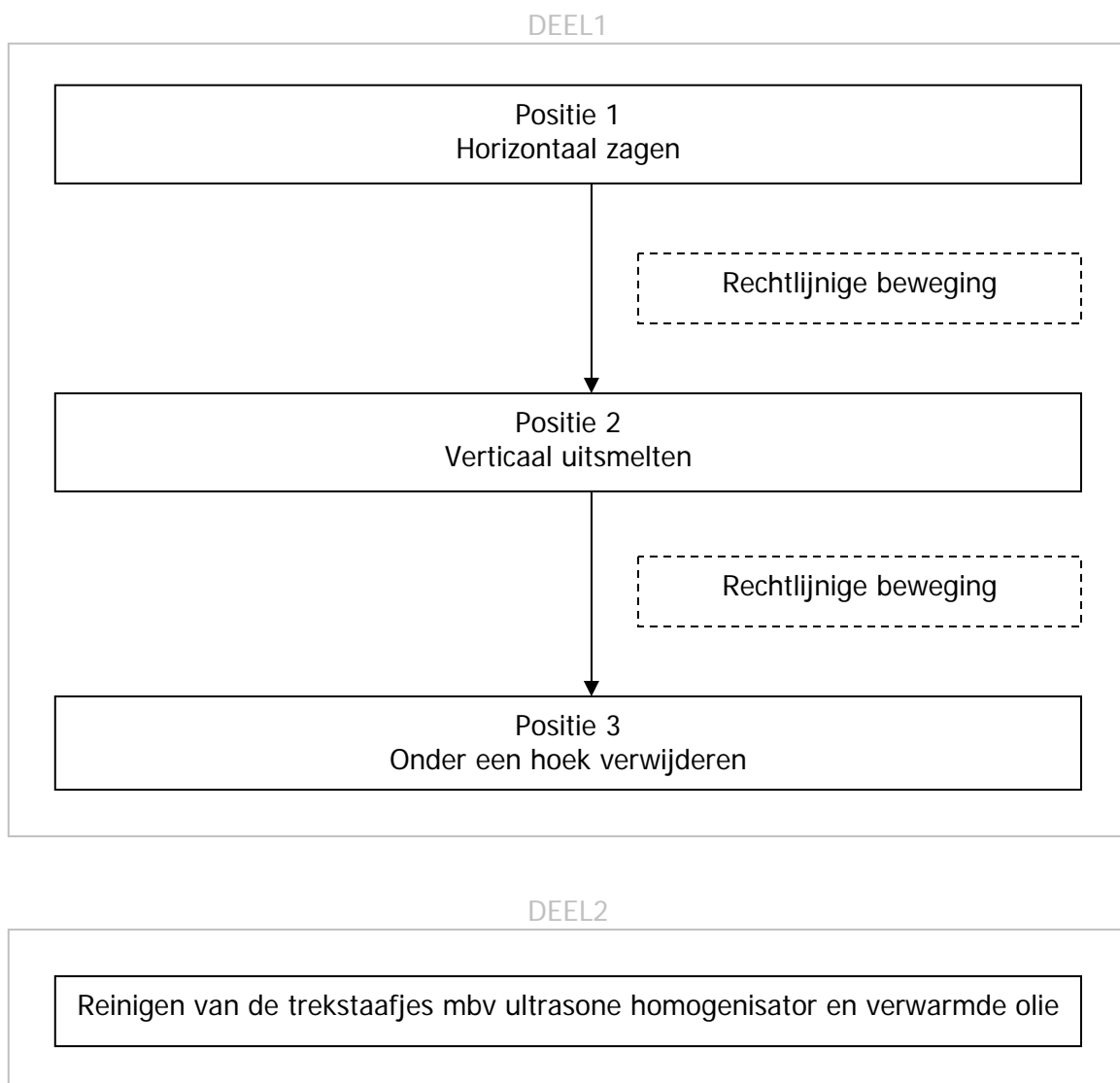
Het maken van een maquette gebeurt dus vooral met het oog op functionaliteit. Het is dus ook niet nodig veel tijd te verspillen aan details. Om vlog tot resultaat te komen werd besloten te werken met balsahout, een zacht soort hout die zeer gemakkelijk bewerkbaar is.

6.3.2. Het railsysteem

Het idee is om het verwarmingselement en klemsysteem in elkaar te integreren. Het verwarmingselement is gebaseerd op een buisoven en bestaat grof gesteld uit een doos waarin een uitsparing voor de bestralingscapsule voorzien is en waarin een verwarmingskabel van het type Thermocoax gemonteerd wordt. Door deze doos te sluiten met behulp van een klem zou de bestralingscapsule ook meteen geklemd zijn. Deze doos kan dan via een railsysteem op drie verschillende, vaste posities geplaatst worden.

In positie 1 wordt het klem-verwarmingselement horizontaal geplaatst en kan de bestralingscapsule geopend worden door het topje van de capsule te zagen. In positie 2 wordt een zeefje op het open uiteinde van de capsule bevestigd, het klem-verwarmingselement wordt verticaal geplaatst en het loodbismut wordt uitgesmolten door de verwarmingskabel in te schakelen. Het loodbismut wordt opgevangen in een opvangpot. In positie 3 wordt eerst het zeefje weer verwijderd en dan wordt het klem-verwarmingselement onder een hoek geplaatst. Op deze manier vallen de trekstaafjes met behulp van de zwaartekracht één voor één uit de bestralingscapsule. De trekstaafjes komen nu terecht op een hellend vlak en worden door een gootje geleid in de volgorde waarin ze uit de capsule komen. Hieruit kunnen de trekstaafjes één voor één verwijderd worden en overgebracht worden naar de reinigingsopstelling.

- Schematische weergave:



- De maquette:



Figuur 6.1 Railsysteem - positie 1



Figuur 6.2 Railsysteem - positie 2



Figuur 6.3 Railsysteem - positie 3

- **Besluit:**

Na het maken van de maquette bleek duidelijk dat dit systeem te kampen had met een aantal nadelen. Door het gewicht van het klem-verwarmingselement dat volledig gedragen moet worden door de zijdelingse rail wordt het moment werkend op de stang die in de rail geleidt vrij groot. Hierdoor wordt de volledige constructie minder stabiel. Om dit probleem te kunnen oplossen moeten extra voorzieningen getroffen worden om de stabiliteit te kunnen garanderen. Beter leek het echter om van het railsysteem af te stappen en over te gaan naar een ander systeem.

6.3.3. Rollend systeem

Systeem 2 gaat uit van hetzelfde idee als systeem 1. Het klem en verwarmingssysteem vormen nog steeds 1 geheel. Het systeem van de rail is echter vervangen door een rollend karretje. Het karretje kan ook op 3 vaste plaatsen gepositioneerd worden. In positie 1 ligt het klem-verwarmingselement horizontaal en kan het topje van de bestralingscapsule gezaagd worden, in positie 2 wordt een zeefje op de capsule bevestigd en wordt de capsule verticaal geplaatst door middel van een scharnierende beweging. In deze positie wordt het loodbismut uitgesmolten. In positie 3 wordt eerst het zeefje weer verwijderd en daarna kan het klem-verwarmingselement manueel onder een zelf gekozen

hoek gehouden worden om de trekstaafjes uit de bestralingscapsule te schudden. Ook nu vallen de trekstaafjes op een hellend vlak in de juiste volgorde in een gootje. De trekstaafjes worden stuk voor stuk uit het gootje gepikt en gewassen met behulp van de reinigingsopstelling.

- De maquette:

Om ook de realiseerbaarheid van dit idee te testen, en om eventuele fouten en zwakke punten te visualiseren werd ook hiervan een maquette gemaakt in balsahout.



Figuur 6.4 Rollend systeem - positie 1



Figuur 6.5 Rollend systeem - positie 2



Figuur 6.6 Rollend systeem - positie 3

- Besluit:

In vergelijking met het voorgaande systeem, is deze oplossing veel stabiel. Het probleem van het optredende moment komt hier niet meer voor. Wel valt in positie 2 het zwaartepunt sterk vooraan in de opstelling. In de technische uitwerking zal hiermee wel rekening moeten gehouden worden om de stabiliteit in elke positie te kunnen garanderen.

6.4. Conclusie

In deze fase is eerst en vooral beslist om de keuze voor het concept te baseren op ergonomie. Dit is belangrijk, zowel bij constructie als tijdens de werkingsfase en bij de afbraak. Als gevolg hiervan is het concept een geïntegreerd geheel geworden. Enkel voor het laatste deel, het reinigen is gekozen voor een aparte opstelling.

Uit dit idee zijn 2 principemaquettes voortgekomen. In de eerste maquette kwamen onmiddellijk een aantal zwakke punten naar voren. In de tweede maquette werden deze zwakke punten weggewerkt. Uiteindelijk werd er dan ook gekozen om verder te werken met concept 2: het rollende systeem.

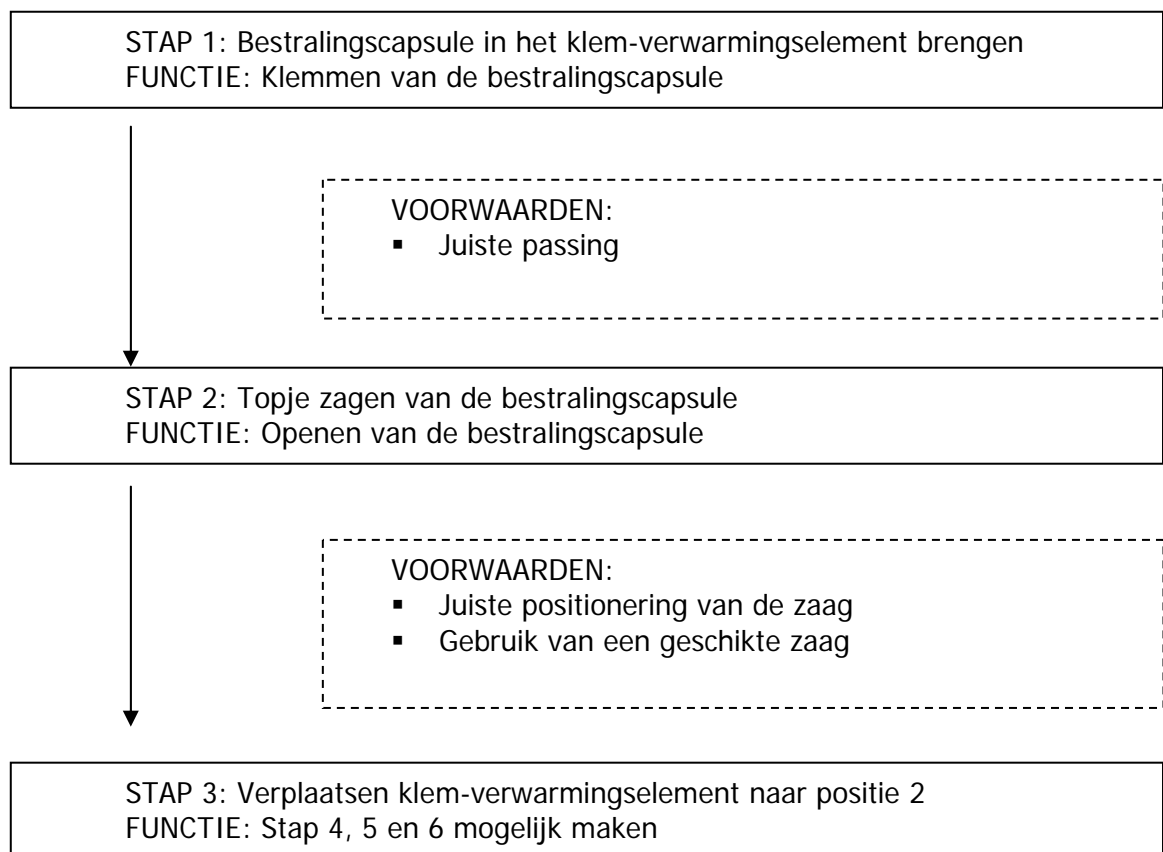
7. Technische uitwerking

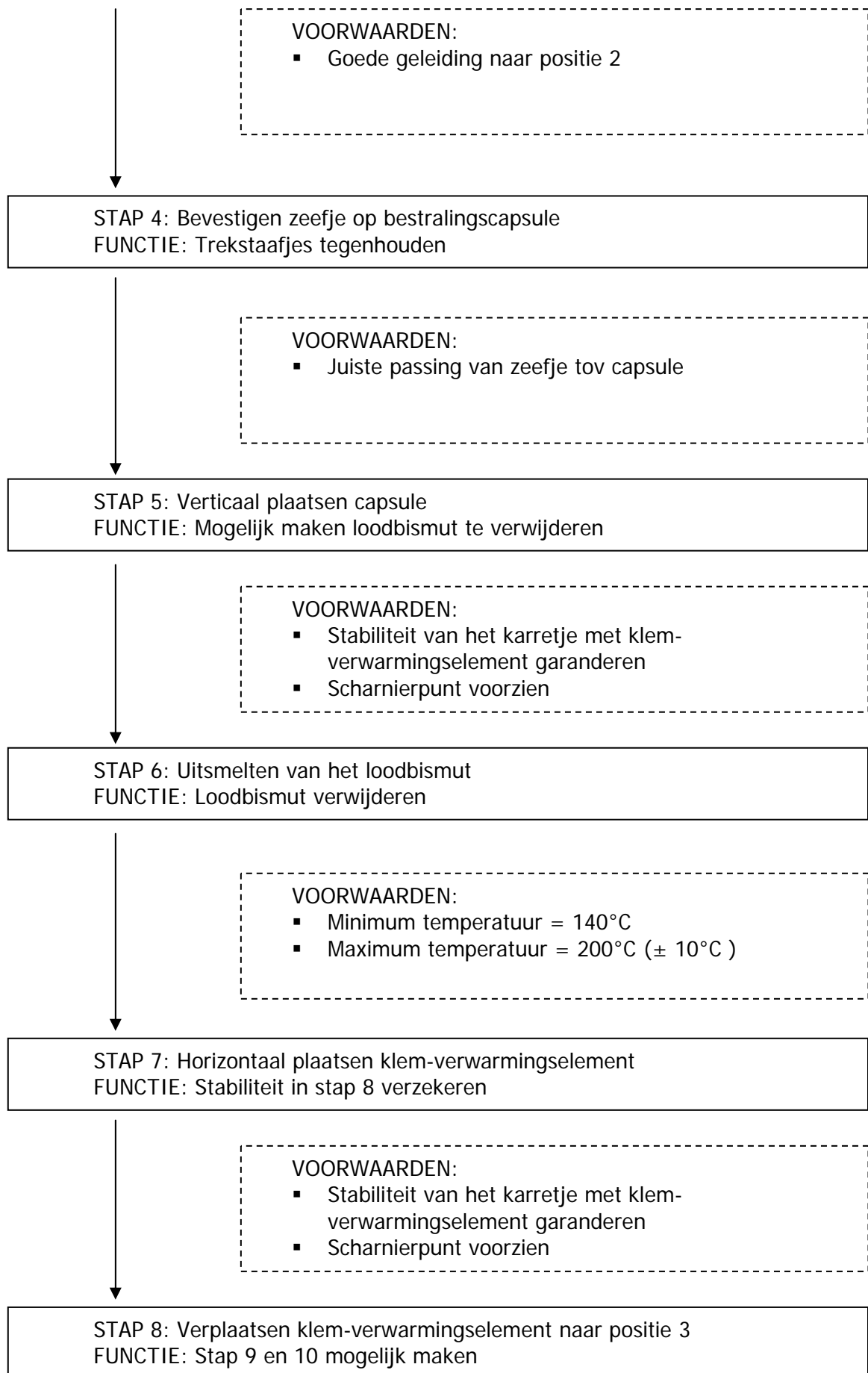
7.1. Inleiding

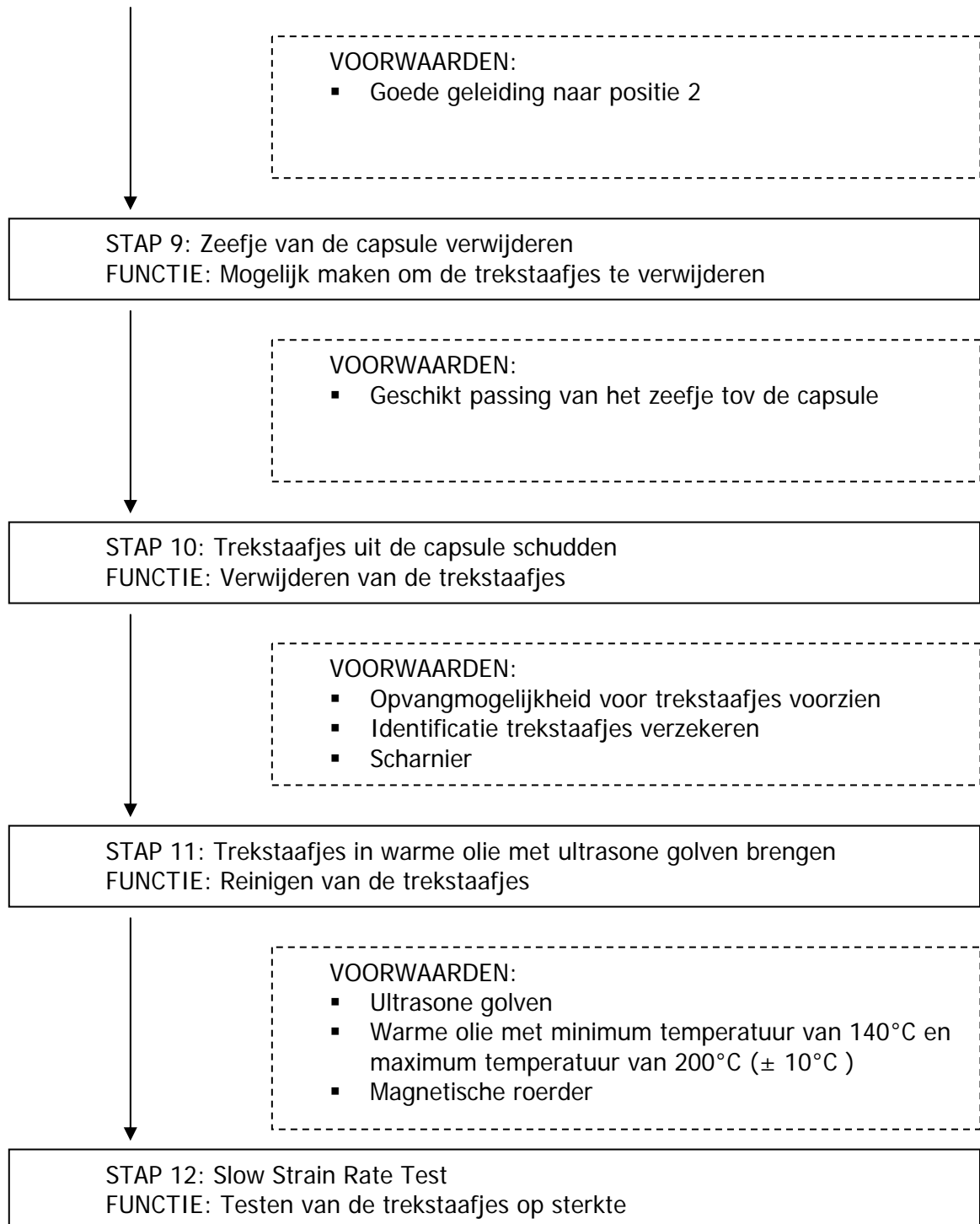
Eénmaal de beslissing gevallen is, kan er begonnen worden met de technische uitwerking. Dit houdt in dat er materialen en bewerkingsmethoden gekozen moeten worden, en dat er dimensies toegekend moeten worden. Om dit gestructureerd te kunnen doen wordt er eerst de functionele analyse verder uitgewerkt. Ook wordt een productstructuur opgesteld.

7.2. Uitwerken van de functionele analyse

Vooraleer er begonnen wordt met de technische uitwerking is het nuttig alles nog eens op een rijtje te zetten. Nu het concept gekend is kan de functionele analyse uitgebreider beschreven worden. Alle stappen worden nog eens bekeken, bij elke stap wordt nu ook de functie en de voorwaarden vermeld.

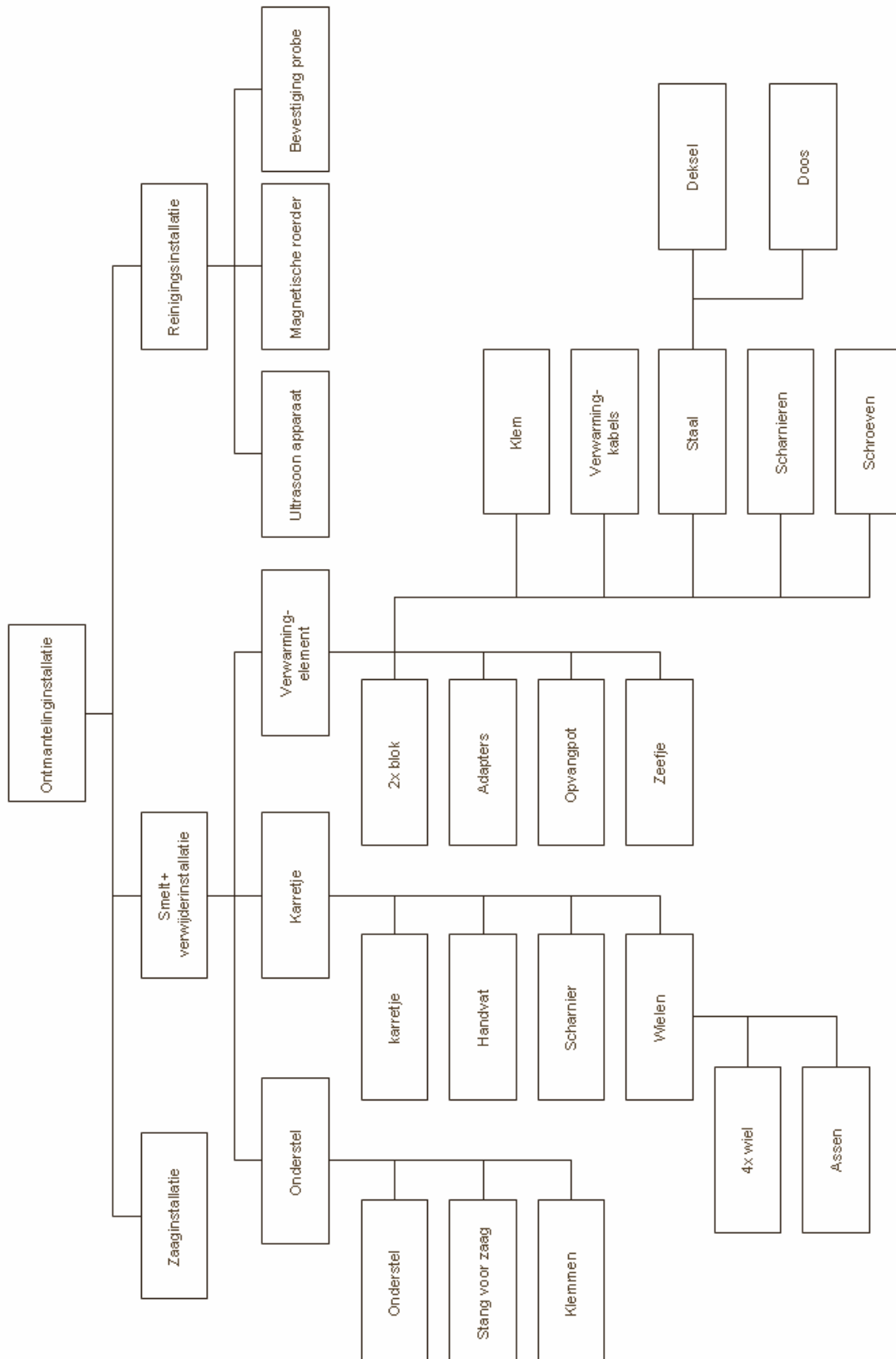






7.3. Productstructuur

Een productstructuur wordt opgesteld met als doelstelling inzicht te krijgen in de onderdelen die het ontwerp bevat. De productstructuur wordt ieder volgend niveau wordt meer in detail getreden tot uiteindelijk elk onderdeel vermeld is.



Figuur 7.1 Productstructuur

7.4. Modelleren in CAD

CAD is de afkorting van Computer Aided Design. Er bestaan tal van computerprogramma's die als doelstelling hebben het modelleren van een ontwerp en het genereren van technische informatie in verband met het ontwerp te vergemakkelijken. Op het SCK-CEN is men recent begonnen met het gebruik van Autocad Inventor. Daarom werd mij ook gevraagd het modelleren uit te voeren in Autocad Inventor.

In Autocad Inventor wordt het model opgebouwd in 3-dimensionele vorm. Dimensies en maataanduidingen kunnen rechtstreeks ingevoerd worden. Alle onderdelen worden eerst apart getekend, maar kunnen daarna geassembleerd worden tot een (virtueel) geheel. Ook het genereren van exploded views is zo mogelijk.

Wanneer het 3D-model klaar is kunnen hiervan ook technische tekeningen gegenereerd worden, die dan kunnen worden gebruikt bij de bouw van het ontwerp. (zie bijlage 2)

7.4.1. De zaaginstallatie

Voor het openen van de capsules wordt gekozen voor een elektrische steekzaag. De redenen waarom het gebruik van een steekzaag voordelig is werden uitgebreid besproken in punt 5.2. Hoewel pneumatische systemen in een hotcel soms meer aangewezen zijn dan elektrische wordt toch gekozen voor een elektrische zaag. De reden hiervoor is dat een elektrisch systeem compacter is. Om de gewenste slag te kunnen bereiken zou de pneumatische cilinder vrij groot moeten zijn. Door het gebrek aan ruimte in de hotcel wordt dus geopteerd voor een elektrisch systeem.



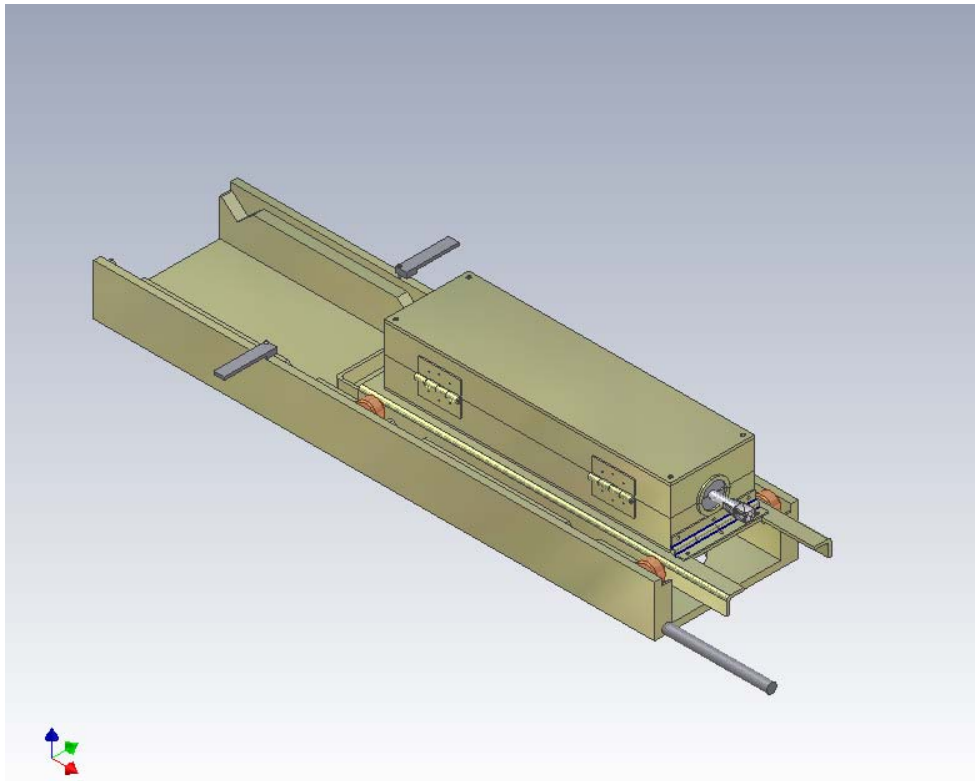
Figuur 7.2 Metabo steekzaag

De zaag moet een vaste positie innemen ten opzichte van de rest van de installatie, zodanig dat steeds hetzelfde stuk van de capsule verwijderd wordt. Daarom wordt aan het onderstel van de installatie voor het smelten en verwijderen een stang bevestigd waaraan de zaag dan bevestigd dient te worden (zie ook 7.3.2 Smelten en verwijderen).

7.4.2. Smelten en verwijderen

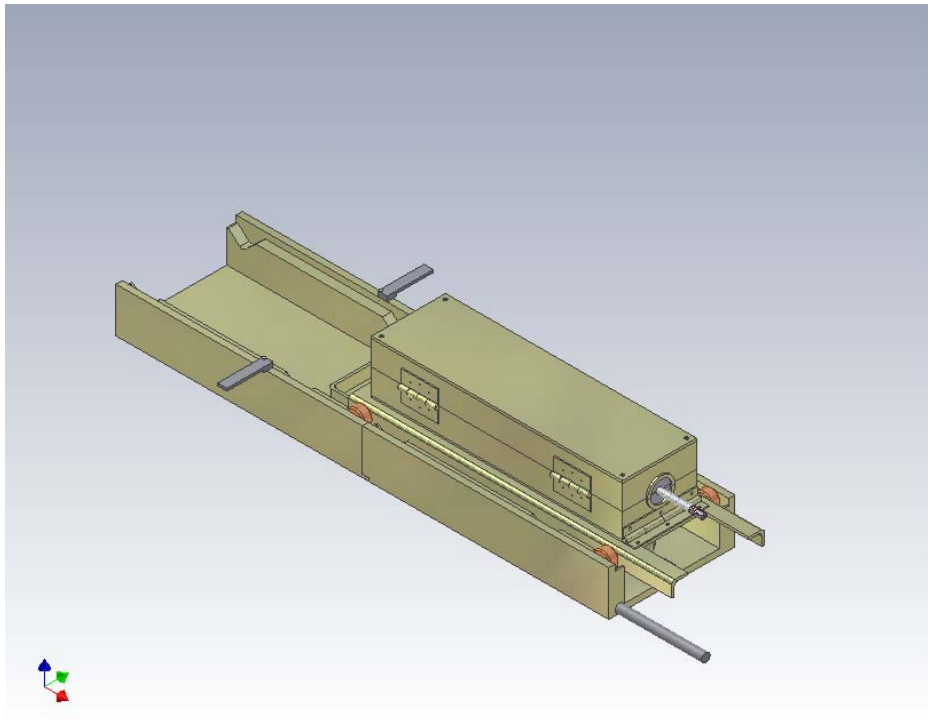
- Het geheel

Om de uitleg in verband met de technische uitwerking van de installatie te kunnen begrijpen, wordt er eerst een beeld gegeven van het geheel. Op deze manier is het mogelijk een overzicht te krijgen, en zal de rest van de beschrijving duidelijker zijn.

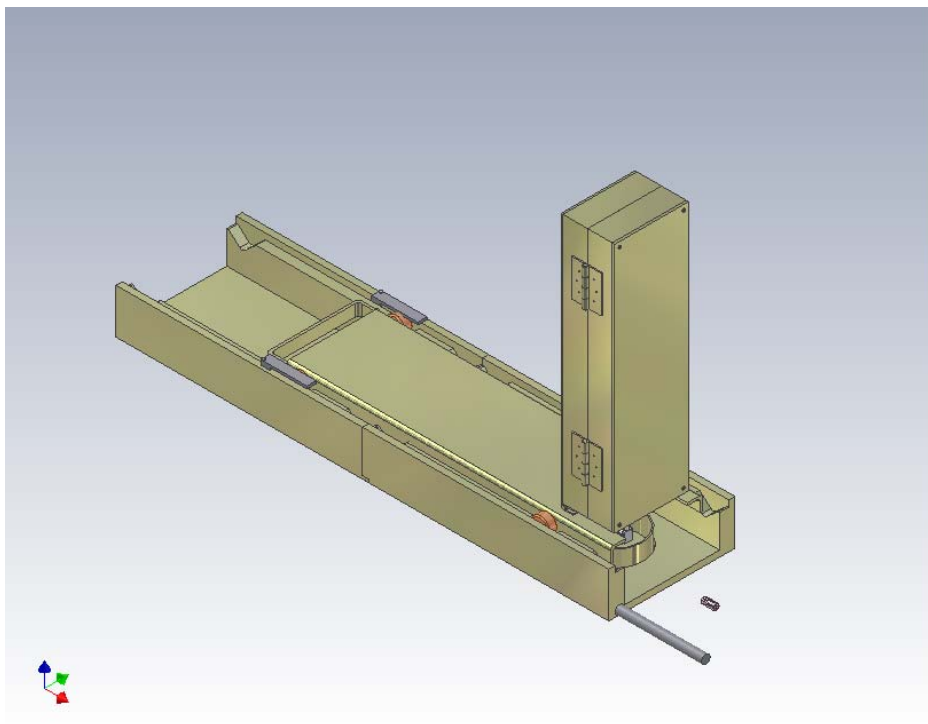


Figuur 7.3 De gehele installatie

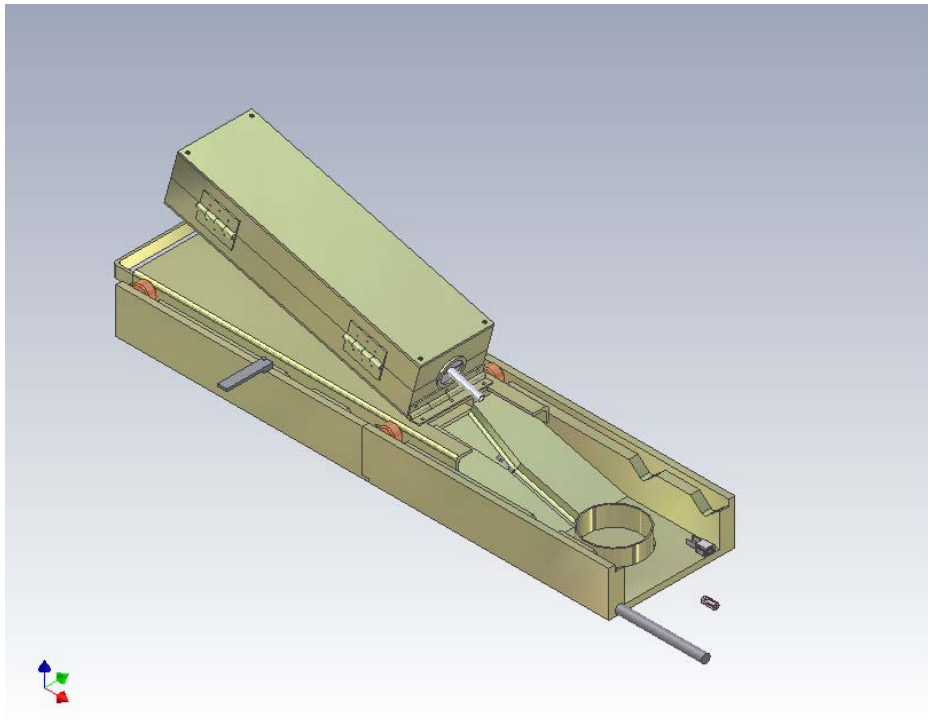
Zoals reeds gezegd zijn er 3 verschillende posities. Positie 1 om te zagen, positie 2 om het loodbismut uit te smelten en positie 3 om de trekstaafjes te verwijderen. Deze 3 posities worden geïllustreerd in de volgende figuren.



Figuur 7.4 Positie 1 - zagen



Figuur 7.5 Positie 2 - uitsmelten loodbismut



Figuur 7.6 Verwijderen trekstaafjes

- Het onderstel

Het onderstel is bedoeld om het karretje op 3 vaste plaatsen te kunnen positioneren en om het karretje van de ene positie naar de andere te kunnen geleiden.

Het geheel is opgebouwd uit 2 grote onderdelen. Dit is zo opdat bij demontage de afzonderlijke stukken in de container voor het verwijderen van afval zouden passen. Deze 2 afzonderlijke delen worden aan elkaar gemonteerd met schroeven. Deze hebben een schroefdraad M4, zodanig dat het mogelijk wordt de 2 stukken in de hotcel weer te demonteren met behulp van de manipulatoren.

Voor de positionering worden verzinkingen in het onderstel voorzien waarin de wieltjes van het karretje kunnen neerzakken zodat het karretje vaststaat. Wanneer het karretje dient verplaatst te worden van de ene positie naar de andere, kan het eenvoudigweg manueel uit de verzinkingen getrokken worden. Om dit te vergemakkelijken zijn schuine wanden voorzien die de wielen gemakkelijk zullen geleiden.

Vooraan aan het onderstel wordt een stang gemonteerd. Dit is opdat de zaag een vaste positie zou kunnen innemen ten opzichte van de capsule en het onderstel. Op deze manier liggen de afmetingen van het stuk dat van de capsule verwijderd wordt vast.

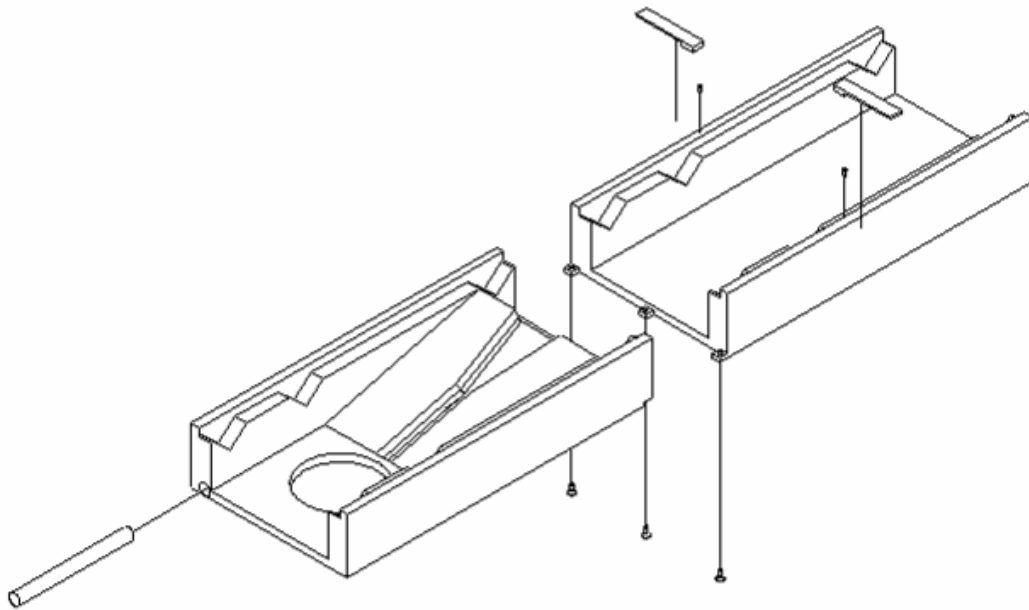
In positie 2 zal het klem-verwarmingselement verticaal geplaatst worden op het karretje. Hierdoor zal het zwaartepunt vooraan op het karretje komen te liggen waardoor de opstelling minder stabiel wordt. Daarom worden op het onderstel ter hoogte van de achterwielen klemmen voorzien die over de wielen gedraaid kunnen worden zodanig dat het gehele karretje geblokkeerd wordt en onmogelijk naar voor kan kantelen. Deze klemmen worden bevestigd met behulp van 2 kleine pennetjes.

Ter hoogte van positie 2 wordt in het onderstel een uitsparing voorzien waar een opvangpot voor het gesmolten loodbismut komt te staan. Dit is een pot met standaardafmetingen. De uitsparing zorgt ervoor dat de positie van de pot steeds juist is, dat het loodbismut niet naast de pot zal terechtkomen en de kans op contaminatie van de andere onderdelen in de hotcel verkleint.

Ter hoogte van positie 3 wordt een hellend vlak met een gootje voorzien. De uitsparing is trechtervormig en aan de hoeken afgerond. Deze vorm zal ervoor zorgen dat de trekstaafjes opgevangen worden en dan langzaam langs het gootje naar beneden zullen schuiven in de volgorde waarin ze uit de capsule komen. De positie van de trekstaafjes in de capsule blijft zo dus gekend. Beneden in het gootje worden de trekstaafjes tegengehouden door een kleine opstaande wand.

Het gehele onderstel wordt vervaardigd uit inox omwille van de stevigheid en de goede bestandheid tegen straling.

De stukken worden gefreesd. Er wordt gekozen voor een frees met diameter 12. Hierdoor wordt dus gewerkt met een afrondingsstraal van 6mm voor de gefreesde stukken.



Figuur 7.7 Exploded view van het onderstel

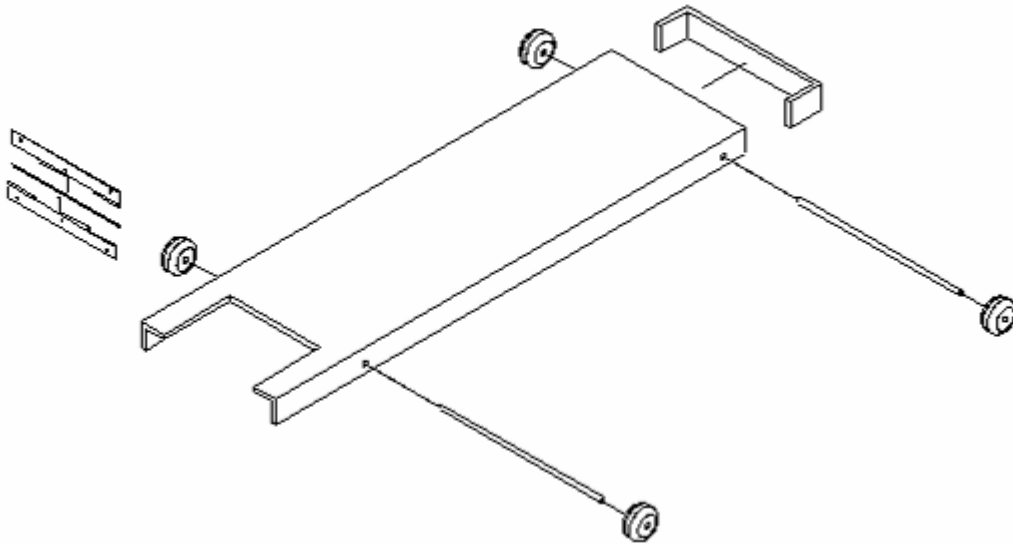
- Het karretje

Het karretje is bedoeld om het klem-verwarmingselement te dragen en te verplaatsen.

Het is opgebouwd uit een centraal dragend vlak waaraan vier wielen gemonteerd worden op een as. De twee verlengingen aan de voorzijde van het dragend vlak zijn bedoeld om het klem-verwarmingselement te ondersteunen wanneer het in verticale positie komt te staan. Vooraan zit een scharnier waaraan het klem-verwarmingselement bevestigd zal worden. Dit is zo groot mogelijk gedimensioneerd opdat de volledige constructie stevig genoeg zou zijn. Achteraan het karretje is een handvat voorzien. Dit handvat kan vastgenomen worden met een manipulator. Op deze manier kan het karretje naar de verschillende posities gerold worden. Het handvat wordt gelast aan de rest van het karretje.

Het dragend vlak, het handvat, de wielassen en het scharnier worden om dezelfde reden als bij het onderstel geconstrueerd in inox. De wieltjes zijn gemaakt uit messing, dit om vastlopen te voorkomen.

Het dragend vlak is geplooid plaatwerk, de wieltjes kunnen worden gedraaid, en het handvat gefreesd.



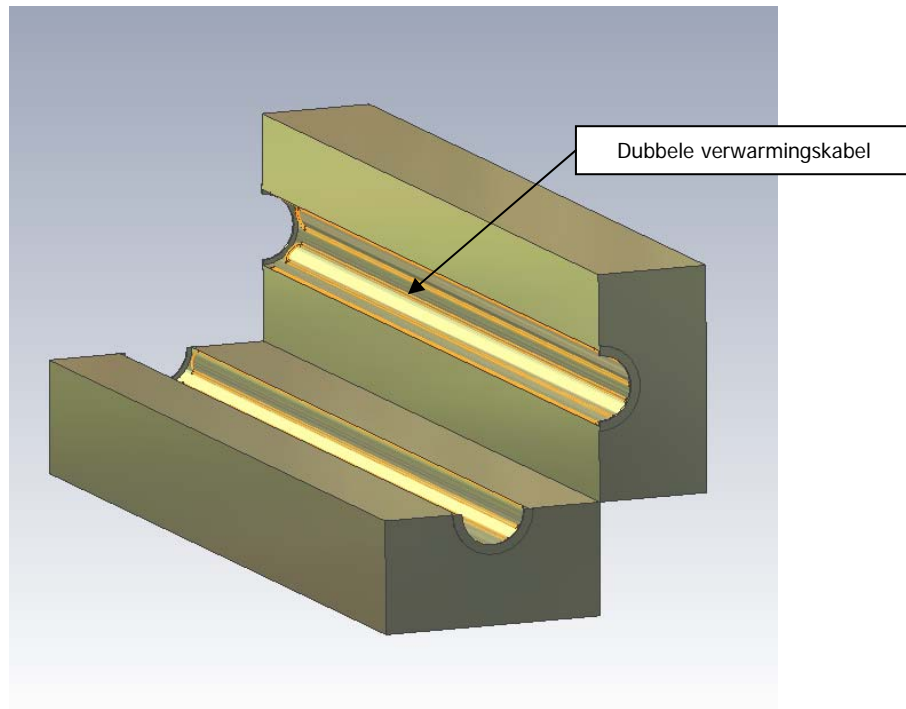
Figuur 7.8 Exploded view karretje

- Het klem-verwarmingselement

Het klem-verwarmingselement is zoals de naam zegt, bedoeld om te klemmen en te verwarmen.

Het geheel kan gezien worden als een soort van doos bestaande uit een bovenstuk en een onderstuk. Het bovenstuk en onderstuk zijn identiek. De 2 stukken zijn scharnierend aan elkaar bevestigd zodanig dat de doos geopend kan worden. In de doos is een holte voorzien om de capsule te positioneren. Er moet echter kunnen gewerkt worden met bestralingscapsules van verschillende buitendiameters. Daarom worden er 3 verschillende adapters voorzien die in de doos gelegd kunnen worden. Afhankelijk van de capsule wordt voor een ander type adapter gekozen. De capsule past in de holte van de adapter. In de doos wordt een thermocoax verwarmingskabel gemonteerd. Wanneer deze in werking is, zal er opwarming plaatsvinden. De warmte wordt geleid door de adapter en verwarmt zo ook de bestralingscapsule en het loodbismut dat zich in de capsule bevindt.

Omwille van het feit dat het systeem niet mag falen wordt een dubbele verwarmingskabel in de doos gemonteerd. Indien kabel 1 faalt, wordt dan kabel 2 in werking gesteld.

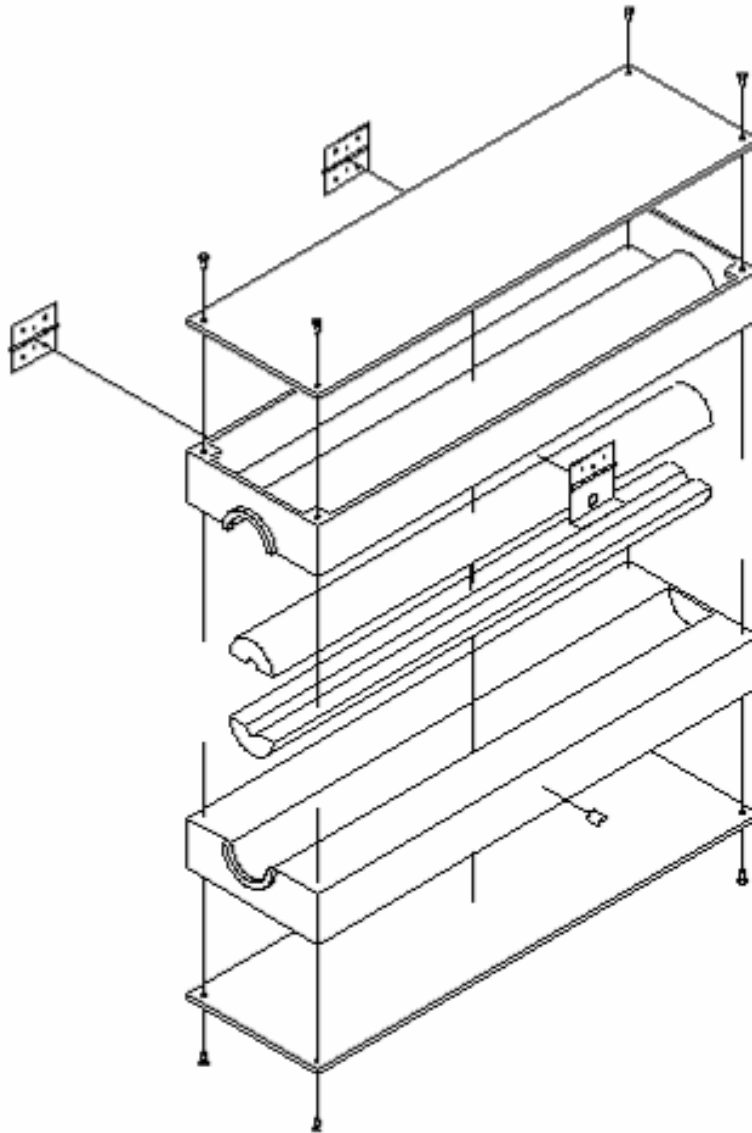


Figuur 7.9 Verwarmingskabel

Om de adapter en de bestralingscapsule te klemmen wordt aan de doos een pennetje gelast waarover een klem geschoven kan worden. Op deze manier blijven de adapter en de capsule steeds juist gepositioneerd.

Alle onderdelen zijn gemaakt uit inox, behalve de adapters. De adapters worden gemaakt uit aluminium, omwille van de goede warmtegeleidende eigenschappen.

Het maken van het klem-verwarmingselement is een combinatie van plaatwerk en frezen.



Figuur 7.10 Exploded view klem-verwarmingselement

- Het zeefje

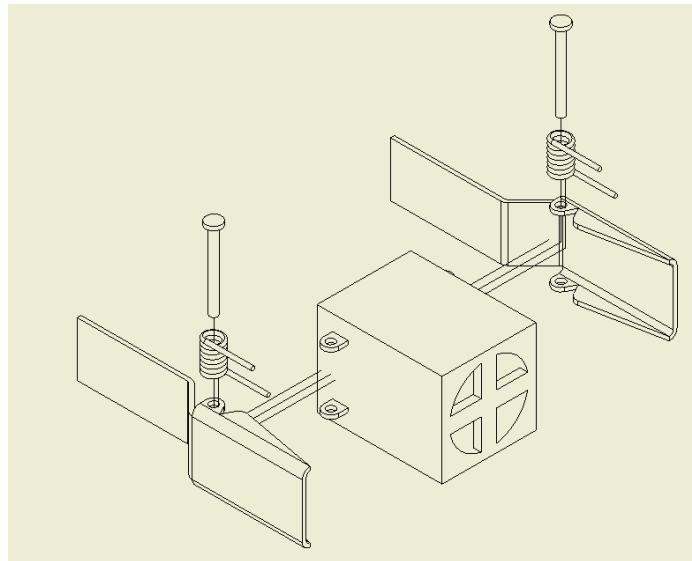
Het zeefje heeft als functie het loodbismut door te laten en tegelijkertijd de trekstaafjes tegen te houden. Het wordt op de capsule bevestigd wanneer het karretje zich in positie 2 bevindt, net voor het klem-verwarmingselement verticaal geplaatst wordt en het uitsmelten van het loodbismut begint. Voor het karretje verplaatst wordt naar positie 3 wordt het zeefje verwijderd.

Het zeefje is langs 1 kant voorzien van een ronde opening waarin de capsule past. Aan de andere zijde zijn gaten voorzien waarlangs het gesmolten loodbismut kan wegvloeien. De gaten zijn echter niet groot genoeg om de trekstaafjes door te laten. Het zeefje wordt op de capsule geklemd met 2 klemmetjes. Deze kunnen opgeduwd worden wanneer het

zeefje bevestigd moet worden en zullen automatisch klemmen rond de capsule wanneer het zeefje aangebracht is. De veertjes aan beide kanten van het zeefje zorgen hiervoor.

Ook het zeefje is opgebouwd uit inox. De veertjes bestaan uit verenstaal.

De klemmetjes zijn geplooid plaatwerk, het zeefje zelf kan worden gefreesd.



Figuur 7.11 Zeefje

7.4.3. Reinigen

Het reinigen gebeurt in een aparte opstelling. Het reinigen moet gebeuren met ultrasone golven in verwarmde olie.

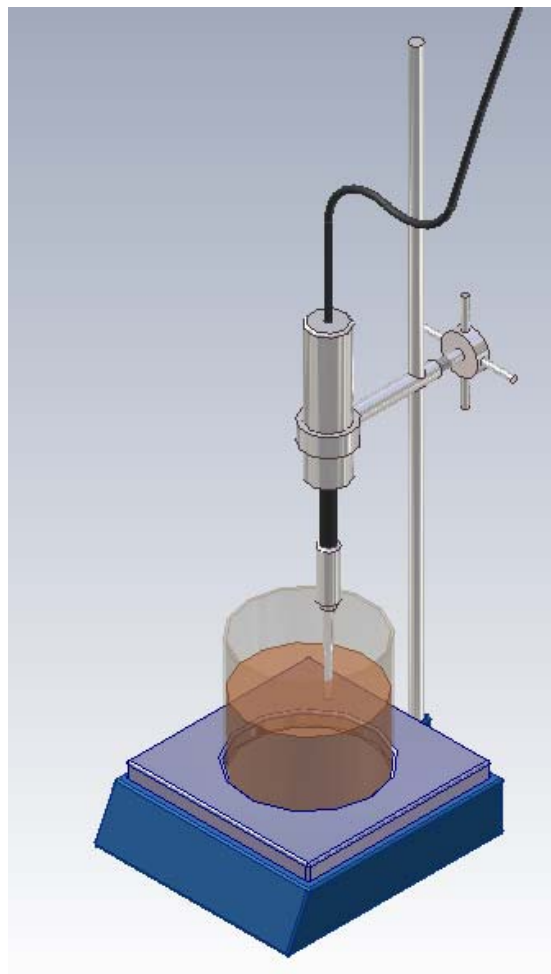
De reinigingsinstallatie bestaat uit een verwarmingsplaat met ingebouwde magnetische roerder en een ultrasone homogenisator. Op de verwarmingsplaat kan een standaardpot geplaatst worden. Wanneer deze gevuld wordt met olie kan de verwarmingsplaat aangezet worden en warmt de olie op. De temperatuur kan via een bedieningspaneel buiten de hotcel geregeld worden.

Aan deze plaat kan een ultrasone homogenisator bevestigd worden. Deze kan zo gepositioneerd worden dat hij ultrasone golven genereert in de warme olie. De positie van de homogenisator kan ingesteld worden met behulp van de manipulatoren. Een speciale

draaiknop die gemakkelijk hanteerbaar is voor de manipulatoren wordt hiervoor bevestigd aan de installatie.

Indien nodig kan de magnetische roerder aangezet worden.

De trekstaafjes worden dus in de warme olie ondergedompeld, en worden blootgesteld aan de ultrasone golven en eventueel ook de magnetische roerder. De temperatuur van de olie (regelbaar tot 200°C) ligt boven het smeltpunt van loodbismut ($\pm 130^{\circ}\text{C}$). Het vloeibare loodbismut wordt door ultrasoon reinigen met de olie vermengd en zo van het trekstaafje verwijderd. De trekstaafjes zijn nu klaar voor de trektest.



Figuur 7.12 Ultrasone homogenisator met verwarmingsplaat

7.5. *Het bedieningspaneel*

De bediening van alle apparaten in hotcel 12 gebeurt met een touchscreen dat aanwezig is aan de buitenkant van de hotcel. Alle nodige signalen worden doorgegeven via een PLC-sturing.

Het beginscherm is een algemeen scherm dat gebruikt wordt voor alle hotcels. Hierop bevinden zich 4 knoppen: licht, sas, ventilatie, toestellen. Onder de knop toestellen zal een verwijzing zitten naar de ontmantelinginstallatie.



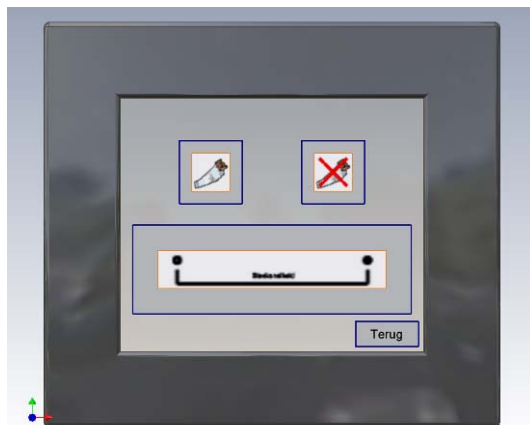
Figuur 7.13 Beginscherm

Wanneer men drukt op de knop voor de ontmantelinginstallatie komt men eerst terecht op een overzichtscherm. Hierop ziet men wat er moet gebeuren, en ook in welke volgorde. Men kan 3 knoppen bedienen, één voor het zagen, één voor het verwarmen, en één voor het wassen. Elk van deze knoppen leidt naar een nieuw scherm.



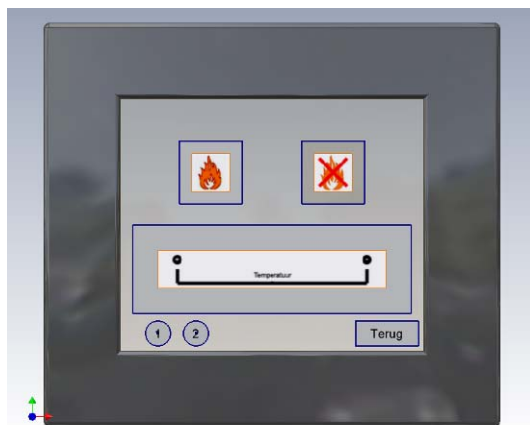
Figuur 7.14 Overzichtscherm

Drukt men op de knop met de zaag, dan komt men terecht op het scherm voor de bediening van de zaag. Hierop bevinden zich verschillende knoppen. Eén knop is bedoeld voor het inschakelen van de zaag en een andere voor het uitschakelen van de zaag. Ook de steeksnelheid van de zaag kan aangepast worden. Op elk scherm is eveneens een knop aanwezig om terug te keren naar het overzichtsscherm.



Figuur 7.15 Zaagscherm

Vanuit het overzichtsscherm kan men ook kiezen voor het symbool dat verwijst naar de verwarming. Dit scherm is analoog opgebouwd aan het vorige scherm. Men kan ervoor kiezen de verwarming aan te zetten of niet en eveneens kan de temperatuur geregeld worden. Er kan ook een keuze gemaakt worden tussen verwarmingskabel 1 of verwarmingskabel 2. De PLC sturing is echter zo geprogrammeerd dat het onmogelijk is beide verwarmingskabels tegelijkertijd in te schakelen. Op die manier beschikt men steeds over een back-up verwarmingssysteem als één van beide kabels faalt. Met de knop terug komt men weer terecht in het overzichtsscherm.



Figuur 7.16 Smeltscherm

Wanneer men hier kiest voor het symbool dat verwijst naar het reinigen komt men terecht op het laatste scherm. Hier kan men de verwarming van de olie, de magnetische roerder en de ultrasone golven in en uitschakelen.



Figuur 7.17 Reinigingscherm

Op deze manier kan dus de gehele installatie bediend worden. Door te werken met verschillende schermen voorkomt men dat de verschillende toestellen gelijktijdig aangezet zouden worden. Wanneer men drukt op de knop terug, worden automatisch de toestellen die nog in gebruik zijn, uitgeschakeld.

7.6. Conclusie

In deze technische uitwerking is een korte beschrijving gegeven in verband met de uitwerking van alle componenten van de opstelling. Ook de bediening werd kort besproken.

Aan de hand van de gemaakte tekeningen in deze fase van het ontwerp kan ook een prototype gebouwd worden. Dit gebeurt in de volgende fase.

8. Het prototype

8.1. Inleiding

In de technische uitwerking werd alles in detail overdacht en uitgewerkt. Het resultaat hiervan was een uitgewerkt ontwerp en een boel technische tekeningen. Aan de hand hiervan kan nu een prototype gebouwd worden. Een prototype is een goede manier om het ontwerp op een kritische manier te bekijken en te testen. Eventuele fouten die pas aan het licht komen bij de bouw van het prototype zijn nog niet onoverkomelijk en kunnen nog weggewerkt worden vooraleer overgegaan wordt tot het bouwen van het eindproduct. Best kan een prototype daarom ook zo realistisch mogelijk gemaakt worden: toepassen van de juiste materialen en bewerkingsmethoden is een pluspunt.

Dit deel van het ontwerp noemen we ook wel de testfase.

“Door de realisatie of partiële realisatie van een gedeelte van het ontwerp krijg je een interactie met de werkelijkheid zelf. Door het idee uitgewerkt te zien, worden vele elementen die eerst eerder vaag waren verduidelijkt. Problemen die eerder niet voorzien waren komen zo vaak aan de oppervlakte. Beantwoord de maquette of de test niet aan hetgeen verwacht werd dient er bijgesteld of herbegonnen te worden.”^[3]

8.2. Bouw van het prototype

Het ontwerp is een combinatie van plaat-, draai- en freeswerk. Dit is een gevolg van de eisen in verband met het materiaalgebruik. Alle stuks zijn namelijk opgebouwd uit metaal, hetzij inox, hetzij messing of aluminium. Omwille het feit dat ik zelf niet over de nodige apparatuur voor dit soort bewerkingen kan beschikken werd er besloten om het prototype te laten maken door gespecialiseerde arbeiders in de hoofdwerkplaats van het SCK-CEN. Ook door hun ervaring en grondige kennis in verband met plaatbewerking, frezen, lassen en andere technieken is dit de beste manier om te komen tot een prototype. Zo bekomt men ook een prototype waarmee realistische testen kunnen uitgevoerd worden. Gezien de wetenschappelijke context van het eindwerk is dit een zeer belangrijk punt.

Naast het bouwen van dit prototype, houdt men zich in de hoofdwerkplaats ook bezig met de bouw van andere experimenten en opstellingen. Daarom moest er rekening gehouden worden met de planning die gehanteerd werd binnen de hoofdwerkplaats. Dit betekent dat het prototype pas in juni afgewerkt zal zijn.

8.3. Evaluatie van het prototype

Het prototype zal geëvalueerd worden aan de hand van zo veel mogelijk realistische testen. De opstelling wordt volledig gebouwd zoals ze in hotcel 12 zal komen en het gehele ontmantelingsproces zoals beschreven in de vorige hoofdstukken zal doorlopen worden. Het enige verschil is dat men de testen zal uitvoeren in een onbestraalde omgeving. Uit de testen zal dan blijken of het ontwerp geschikt is voor toepassing in de praktijk en of er nog aanpassingen moeten gebeuren.

Aangezien de bouw van het prototype pas beëindigd zal zijn in juni, is het onmogelijk om de testen nog uit te voeren binnen het kader van het eindwerk. De testen zullen daarom uitgevoerd worden door andere werknemers van het SCK-CEN, in opdracht van wie het eindwerk plaatsvond.

8.4. Conclusie

Aan de hand van het prototype zal de bruikbaarheid van het ontwerp definitief getest worden. Hieruit moet blijken of er nog aanpassingen nodig zijn en of het ontwerp toepasbaar is in het wetenschappelijke experiment.

9. Evaluatie van de eisen

9.1. Inleiding

Ook de evaluatie van de eisen vormt een onderdeel van de testfase. Nu worden alle eisen stuk voor stuk opnieuw bekeken en vergeleken met hetgeen verwezenlijkt werd in het ontwerp. Er wordt geoordeeld of er al dan niet voldaan is aan de eisen. Indien er op bepaalde punten afgeweken wordt van de in het begin opgestelde eisen wordt hierop dieper ingegaan. Zijn er nog verbeteringen mogelijk, dan worden voorstellen tot verbetering gedaan.

9.2. Evaluatie van de eisen

9.2.1. Gebruikerseisen

- *Functioneel*

Bij het ontwerp werd voortdurend rekening gehouden met de functies die de installatie zal moeten vervullen. De bestralingscapsules kunnen geopend worden, de trekstaafjes kunnen verwijderd en ook proper gemaakt worden .

- *Eenvoudig*

Het resulterende ontwerp is zo eenvoudig mogelijk gebleven. Mechanische manipulaties zijn steeds verkozen boven geautomatiseerde. Bewegingen zijn eenvoudig en rechtlijnig.

- *Ergonomische gebruikersinterface*

De bediening gebeurt met een touchscreen. De knoppen zijn voorzien van symbolen om een gemakkelijke bediening mogelijk te maken.

- *Design for Disassembly (DFD)*

Tijdens het ontwerp is er rekening gehouden met de afbraak die achteraf zal moeten plaatsvinden. Geen enkel stuk van de installatie is groter dan de afmetingen van het afvoervat voor het afval. Schroeven die moeten losgedraaid worden bij de ontmanteling hebben een schroefdraad minimum M4, zodanig dat dit met een manipulator kan gebeuren.

9.2.2. Omgevingseisen

- *Compactheid*

De gehele installatie is zo compact mogelijk uitgevoerd. Het zagen, smelten en verwijderen gebeurt op een zeer klein oppervlak. Ook bij de keuze van de toestellen is er rekening gehouden met het feit dat de opstelling compact moet zijn. Een voorbeeld hiervan is de keuze voor een elektrische zaag in plaats van een pneumatische.

- *Bediening met manipulatoren*

Bij het ontwerp is er zo veel mogelijk rekening gehouden met het feit dat de bediening moet kunnen plaatsvinden met behulp van manipulatoren. Het zou echter kunnen dat bij testen blijkt dat dit op sommige plaatsen over het hoofd gezien werd. Aanpassingen kunnen dan nog gemakkelijk gebeuren door een andere knop, een plaatje, ... aan het desbetreffende instrument te lassen.

- *Eisen en beperkingen naar materialen*

Omwillen van de aanwezigheid van radioactieve stralingen is er gekozen om in de installatie enkel te werken met metalen. Aangezien inox zeer goed bestand is tegen radioactiviteit is bijna uitsluitend gekozen voor inox. Enkel daar waar inox problemen zou kunnen geven is gekozen voor andere materialen (vb messing voor de wielletjes).

Voor darmen en draden werd gekozen voor PE versterkt met nylon. Dit is één van de weinige kunststoffen die redelijk goed bestand is tegen straling.

- *Eisen naar verbindingen:*

Enkel niet kunststof verbindingen zijn gebruikt: lassen, schroeven, bouten, solderen.

- *Eisen naar aandrijvingen:*

Enkel elektriciteit wordt gebruikt als aandrijving. Vanwege de gevoeligheid van elektronica voor straling is de voeding buiten de hotcel geplaatst. Enkel een minimum aan draden bevindt zich in de hotcel.

- *Functioneel design*

Het ontwerp is zo eenvoudig mogelijk gehouden. Er is weinig of geen rekening gehouden met vormgeving. Dit is misschien een punt dat voor verbetering vatbaar is. Aangezien echter in een wetenschappelijke omgeving gewerkt wordt is dit van ondergeschikt belang.

9.2.3. Onderzoekseisen

- Voorzien van back-up systemen

Daar waar het kritisch punt van de installatie zit is een back-up systeem voorzien. In het klem-verwarmingselement zijn 2 verwarmingsdraden verwerkt, zodanig dat als 1 draad faalt de andere ingeschakeld kan worden.

- Waarborgen van wetenschappelijke exactheid

Om de juistheid van het experiment te kunnen verzekeren is het noodzakelijk dat de ontmanteling op geen enkele wijze de trekstaafjes beïnvloedt. De eigenschappen van de trekstaafjes mogen niet veranderen tijdens de ontmanteling. Concreet betekent dit dat een temperatuur van 200° C ($\pm 10^\circ$ C) nooit zal mogen overschreden worden tijdens de ontmanteling. Daarom is er voor gezorgd dat de temperatuur in elk onderdeel waar verwarmd kan worden (klem-verwarmingselement, reiniging) met behulp van thermokoppels en temperatuurregelaars geregeld en gecontroleerd kan worden. Het is mogelijk om een limiet te zetten op de te bereiken temperatuur. Dit is een mogelijke verbetering aan het ontwerp. De elektronica van de verwarming zou zo geprogrammeerd kunnen worden dat een temperatuur van 200°C nooit overschreden kan worden.

- Positie van de trekstaafjes

Tijdens het ontmantelen dient de positie van de trekstaafjes gekend blijft. De trekstaafjes blijven liggen in de positie waarin ze uit de capsule vallen. In geval er toch iets zou mislopen is er echter een back-up systeem. De trekstaafjes hebben verschillende lengtes die minimaal van elkaar verschillen. Mochten de trekstaafjes door elkaar geraken, dan kunnen ze met een schuifpasser (die steeds aanwezig is in de hotcel) opgemeten worden. Uit de lengte van het trekstaafje kan dan opnieuw de positie bepaald worden.

9.2.4. Wettelijke eisen

Om te weten of de hotcel volledig voldoet aan de eisen in verband met veiligheid moet nog een keuring door AIB-vinçotte plaatsvinden. AIB-vinçotte is een onafhankelijk inspectiebedrijf voor veiligheid, kwaliteit en controle. Zij zullen bepalen of een uitbatingvergunning wordt verleend of niet.

9.3. Conclusie

Alle eisen zijn nu beoordeeld aan de hand van het ontwerp. Toetsen van de eisen aan het prototype is echter nog niet mogelijk doordat het prototype nog niet klaar is. Eens het prototype klaar is, zal dit ook nog moeten gebeuren. Er zullen testen uitgevoerd worden zowel binnen als buiten de hotcel. Eventueel zouden er op deze manier nog onbekende parameters aan bod kunnen komen. Deze kunnen dan geëvalueerd en indien nodig bijgestuurd worden.

10. Eindconclusie

De opdracht was om een ontmantelinginstallatie te ontwerpen voor bestraalde trekstaafjes. Deze opdracht werd aangepakt volgens de regels van de ontwerpmethodologie. Op deze manier werd een installatie ontworpen die voldoet aan de eisen die eigen zijn aan het ontwerp. De installatie is in staat de bestralingscapsules te openen, loodbismut te smelten en uit de capsule te verwijderen, de trekstaafjes in de juiste volgorde uit de bestralingscapsules te halen en uiteindelijk de trekstaafjes te reinigen. Hierna zijn de staafjes klaar voor de trektest die het eigenlijke doel vormt van het experiment.

Bronvermeldingen

- [1] The Belgian Nuclear Research Centre Information Package 2004, CD-rom
- [2] SCK-CEN, Studiecentrum voor kernenergie [online], Mol, 2004, Beschikbaar op het World Wide Web: www.sckcen.be, [26.09.2004]
- [3] Dejonghe, W., Ontwerpmethodologie, cursus gedoceerd in kader van het vak ontwerpmethodologie, Hogeschool West-Vlaanderen, departement Provinciale Industriële Hogeschool, Kortrijk, 2004
- [4] Sapundjiev, D. en Bosch, R.W., Liquid metal embrittlement of fusion materials n Pb-17Li: part I literature review and design hot cell SSRT set-up, Mol, s.n., 2004, 40p.
- [5] Sapundjiev, D., Al Mazouzi, A. en Van Dyck S., Synergetic effects between neutron irradiation an LME: PIE tests in lead-bismuth eutectic: part I tests on non irradiated samples, Mol, s.n., 2004, 31p.
- [6] Sapundjiev, D., Al Mazouzi, A. en Van Dyck S., Synergetic effects between neutron irradiation an LME: PIE tests in lead-bismuth eutectic: part II tests on pre-irradiated samples, Mol, s.n., 2004, 41p
- [7] Vinçotte, Vinçotte Diensten [online], Brussel, 2005, Beschikbaar op het World Wide Web: www.aib-vincotte.com, [01.10.2004]
- [8] Buehler, Emerson industrial automation [online], Lake Bluff, 2001, Beschikbaar op het World Wide Web, <http://www.buehler.com>, [01.10.2004]
- [9] The saws page of www.select.omniaLco.uk, an affiliate of screwfix [online], UK, Beschikbaar op het World Wide Web, <http://www.select.omnia.co.uk/tools/saws/>, [01.10.2004]
- [10] Alpatron, Alpatron special products [online],Rotterdaom, Beschikbaar op het World Wide Web, <http://www.alpatronspecialproducts.nl/>, [01.10.2004]
- [11] VWR, De Catalogus VWR International: verbruiksmateriaal en apparatuur, 2003-2004
- [12] VWR, , Catalogus VWR België [online], Leuven, 2003, Beschikbaar op het World Wide Web : <http://be.vwr.com>, [01.10.2004]
- [13] Steinel, Hot air guns [online], Herzebrook-Clarholz, Beschikbaar op het World Wide Web: <http://www.steinell.de/englisch/produkte/heimwerker/heissluft/index.html>, [01.10.2004]
- [14] Thermocoax, Thermocoax, from vision to reality [online], Suresnes, Beschikbaar op het World Wide Web <http://www.thermocoax.fr>, [01.10.2004]

- [15] Mechaheat Electric Heating, Elementverwarming [online], Oss, Beschikbaar op het World Wide Web <http://www.mechaheat.nl/nederl/MHframeMS.htm>, [01.10.2004]
- [16] Vdb Enigeneering, Inductieverwarming [online], Wageningen, Beschikbaar op het World Wide Web: <http://www.inductieverwarming.nl.eu.org/inductie2.html>, [01.10.2004]
- [17] Ameritherm Incorporated, Precision induction heating [online], Scottsville, Beschikbaar op het World Wide Web: <http://www.ameritherm.com/aboutinduction.html>, [01.10.2004]
- [18] Ongena, J. en Van Oost, G., Kernfusie: energiebron voor de toekomst, Brussel, Koninklijke militaire school/Laboratorium voor plasmafysica, 1999, 15p.
- [19] Lake, J., Bennet, G. en Kotek, J., Kernenergie: Veiliger en zuiniger reactoren kunnen zelfs alternatieve energie mogelijk maken, Eos, maart 2002, p17-23