

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Ontwerpen van testopstelling voor mobiel vacuümlaserlassen

Jarne Vranken

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Kris HENRIOULLE

PROMOTOR :

ing. Jef HOSTE

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Ontwerpen van testopstelling voor mobiel vacuümlaserlassen

Jarne Vranken

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Kris HENRIOULLE

PROMOTOR :

ing. Jef HOSTE



KU LEUVEN

Woord vooraf

Deze masterthesis vormt het finale werk van de masteropleiding 'Industriële Ingenieurswetenschappen Elektromechanica' gevolgd aan de Universiteit Hasselt in samenwerking met de Katholieke Universiteit Leuven. Ondanks de beperkte tijdsduur van één semester, ben ik erin geslaagd een prachtig resultaat neer te zetten, en daar ben ik trots op. Ik wil graag mijn oprechte dank uitspreken aan alle betrokken partijen die me hebben gesteund.

Allereerst wil ik Werkhuizen Hengelhof en in het bijzonder ing. Jef Hoste bedanken voor de waardevolle kans die hij mij bood om mijn bijdrage te leveren aan dit unieke project. Zijn voortdurende beschikbaarheid en bereidheid om ondersteuning te bieden. Ten tweede gaat mijn dank uit naar Prof. dr. ir. Kris Henroulli voor zijn begeleiding gedurende dit proces. Tot slot wil ik mijn ouders bedanken voor hun steun gedurende mijn hele opleiding

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst met tabellen	5
Lijst met figuren	8
Abstract	9
Abstract in English	11
1 Inleiding	13
1.1 Situering	14
1.2 Probleemstelling	16
1.3 Doelstellingen	17
1.4 Methode	18
1.5 Vooruitblik	18
2 Bronnenstudie	19
2.1 Laserlassen	19
2.1.1 Eigenschappen van laserstralen	19
2.1.2 Lasprincipes en -methoden	20
2.1.3 Besluit	23
2.2 Productie van buizen	24
2.2.1 Electric resistance welded (ERW)	24
2.2.2 Longitudinal submerged arc welding (LSAW)	25
2.2.3 Spiral submerged arc welding (SSAW)	29
2.2.4 Besluit	30
2.3 Dichtingen	31
2.3.1 O-ring	31
2.3.2 X-ring	32
2.3.3 Oliekeerring	33
2.3.4 Afdichtingen hydraulische cilinders	34
2.3.5 Labyrint afdichtingen	35
2.3.6 Besluit	35
2.4 Stick-slip	36
3 Voorontwerp	37

3.1	Vacuümpot	38
3.1.1	Morfologisch overzicht	38
3.1.2	Voorontwerp 1	39
3.1.3	Voorontwerp 2	40
3.2	Platen inklemmen	41
3.2.1	Morfologisch overzicht	41
3.2.2	Voorontwerp	41
3.3	Platen voortbewegen	44
3.3.1	Morfologisch overzicht	44
3.3.2	Voorontwerp	44
3.4	Aandrukrollen	45
3.4.1	Morfologisch overzicht	45
3.4.2	Voorontwerp	45
3.5	Geheel	46
4	Berekeningen	47
4.1	Inleiding	47
4.2	Krachten op vacuümpot	47
4.3	Aandrijfkraft voortbeweging platen	48
4.4	Krachten op transportketting	48
4.4.1	klemkracht platen	48
4.4.2	Kettingberekeningen V1 $z=25$	50
4.4.3	Kettingberekeningen V2 $z=15$	52
4.5	Schroefdraad voor klemkracht	54
4.5.1	Diameter	54
4.6	Frame	55
4.6.1	Buigmoment	55
4.6.2	Buigspanning	55
5	Basis ontwerp voor engineering	57
6	Besluit	59
	Literatuurlijst	63

Lijst van tabellen

3.1	morfolologisch overzicht vacuümpot	38
3.2	morfolologisch overzicht platen inklemmen	41
3.3	morfolologisch overzicht platen transporteren	44
3.4	morfolologisch overzicht aandrukrol	45

Lijst van figuren

1.1	zwaartekrachtgolven [3]	14
1.2	LIGO [5]	15
1.3	einstein telescoop [7]	15
1.4	vacuumlaserlas [8]	17
2.1	geleidingslassen [9]	20
2.2	keyhole lassen [9]	21
2.3	smelttemperatuur [10]	22
2.4	vacuum vs traditioneel [10]	23
2.5	ERW [12]	24
2.6	Pre bending [15]	25
2.7	U forming [15]	25
2.8	O-forming [15]	26
2.9	expanding [15]	26
2.10	JCOE [16]	27
2.11	JCOE foto's [16]	27
2.12	HME [17]	28
2.13	SSAW [19]	29
2.14	O-ring [20]	31
2.15	X-ring [21]	32
2.16	keerring [22]	33
2.17	cilinder [23]	34
2.18	labyrint [24]	35
2.19	principe schema stick slip [26]	36
3.1	voorontwerp vacuüm 1	39
3.2	voorontwerp vacuüm 2	40
3.3	voorontwerp vacuüm 2 doorsnede	40
3.4	platen inklemmen voorontwerp 2	42
3.5	ketting type k2	42
3.6	platen inklemmen voorontwerp 3	43
3.7	voorontwerp rollenbaan	45
3.8	voorontwerp aandrukrol	46
3.9	voorontwerp	46
4.1	schematisch overzicht krachten	49
5.1	platen aangeleverd	57

5.2	platen aangedreven	58
5.3	platen onder vacuümpot	58

Abstract

Deze masterproef, uitgevoerd bij Werkhuizen Hengelhof, bouwt voort op het project “On-site production of quasi-continuous UHV pipes”. Dit eerder project ontwikkelde een efficiënte methode voor de productie van 120 km ondergrondse buizen voor de Einstein Telescoop. De lasmethode die de uitkomst kan bieden is vacuümlaserlassen. In deze masterproef wordt een testmachine ontworpen voor het continu vacuümlaserlassen van twee platen, een productiemethode die tot nu toe niet bestaat.

De studie begint met een analyse van de hedendaagse productiemethoden voor gelaste buizen, gevolgd door onderzoek naar verschillende afdichtingen en een diepgaande verkenning van het vacuümlaserlassen.

Na de literatuurstudie wordt een schematisch voorontwerp gemaakt. Uit dit voorontwerp komen de verschillend onderdelen naar voren die nodig zijn voor de installatie. Elk van deze onderdelen wordt afzonderlijk ontworpen en uitgewerkt. Vervolgens worden de diverse onderdelen samengevoegd en wordt er een frame ontworpen om alles met elkaar te verbinden.

Het resultaat van deze masterproef is een voorontwerp dat, bij beschikbaarheid van extra subsidies, verder kan worden uitgewerkt en getest door de diverse partners die betrokken zijn bij het onderzoek naar efficiënte productiemethode voor de buizen.

Abstract in English

This master's thesis, conducted at Werkhuizen Hengelhof, builds on the project "On-site production of quasi-continuous UHV pipes." This earlier project developed an efficient method for producing 120 km of underground pipes for the Einstein Telescope. The welding method that can provide the solution is vacuum laser welding. This master thesis designs a test machine for continuous vacuum laser welding of two plates, a production method that did not exist until now.

The study begins with an analysis of contemporary production methods for welded tubes, followed by research on various seals and an in-depth exploration of vacuum laser welding.

After the literature review, a schematic preliminary design was made. From this preliminary design emerged the various sub-lobes required for the installation. Each of these parts are designed and worked out separately. Then the various parts are combined and a frame is designed to connect everything together.

The result of this master thesis is a preliminary design that, with the availability of additional subsidies, can be further developed and tested by the various partners who are involved in researching an efficient production method for the tubes.

Hoofdstuk 1

Inleiding

Dit hoofdstuk vormt de inleiding tot de masterproef en begint met de situering, waarin wordt toegelicht waarom en waar de masterproef wordt uitgevoerd. Hieropvolgend wordt aandacht besteed aan de doelstellingen, gevolgd door de formulering van de probleemstelling en een beschrijving van de gebruikte onderzoeksmethode. Ten slotte sluit het hoofdstuk af met een vooruitblik op de verwachte ontwikkelingen in de rest van de masterproef.

1.1 Situering

Deze masterproef vindt plaats bij Werkhuizen Hengelhoef, een middelgroot bedrijf gevestigd in Genk. Het is gespecialiseerd in machinebouw, plaatbewerking, constructies, verspaning en montage. Werkhuizen Hengelhoef biedt complete oplossingen op het gebied van engineering en industriële herstellingen aan[1].

Werkhuizen Hengelhoef heeft mee zijn schouders gezet onder het project rond de Einsteintele-scoop. Dit wordt een geavanceerd observatorium voor zwaartekrachtgolven, waardoor we dieper in het heelal kunnen kijken dan momenteel mogelijk is. Deze telescoop zal tien keer krachtiger worden dan de reeds bestaande telescopen. Onze regio, de grensregio van Nederland, België en Duitsland, is kandidaat om de Einstein telescoop te bouwen. Niet alleen vanwege de rust en de stabiele bodem, maar ook vanwege het sterke ecosysteem van kennisinstellingen en high-tech bedrijven [2] [3] .

Albert Einstein voorspelde het bestaan van deze zwaartekrachtgolven in zijn algemene relati-viteitstheorie. Zwaartekrachtgolven worden uitgezonden door objecten die aan een versnelling onderhevig zijn, bijvoorbeeld wanneer twee zwarte gaten samensmelten. Hierdoor komt er zeer veel energie vrij, die zich voortplant door de zwaartekrachtgolven. Dit wordt in figuur1.1 weer-gegeven. [3]



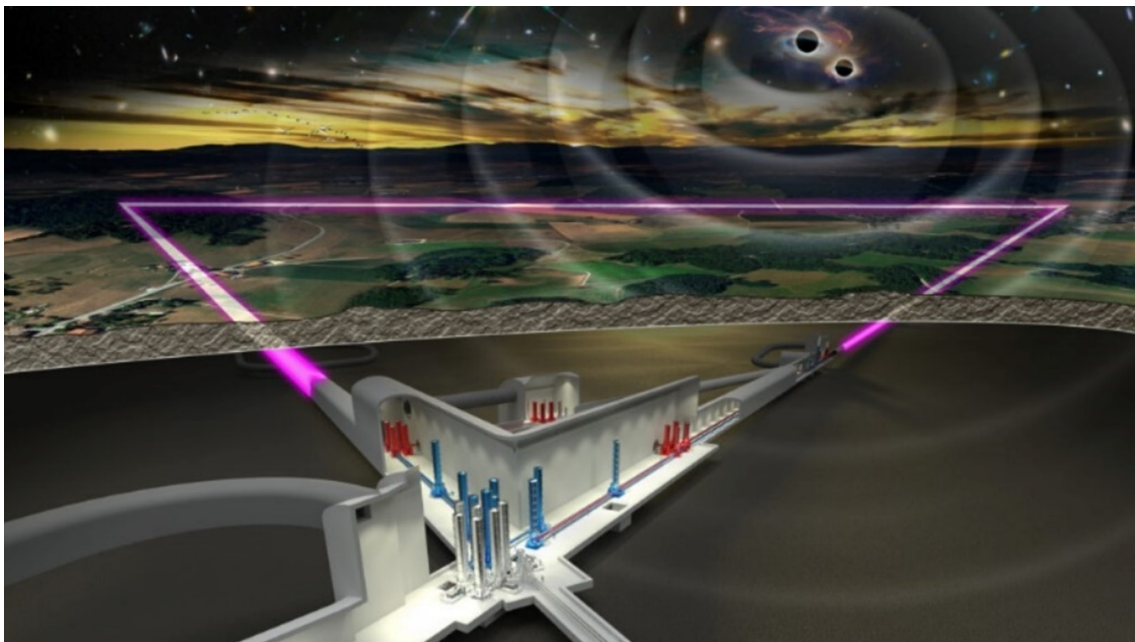
Figuur 1.1: zwaartekrachtgolven [3]

Het volledig begrijpen van het begrip zwaartekrachtgolven en het ontstaan hiervan is voor dit eindwerk minder van belang. Het gevolg van deze golven is wel belangrijk. Als de zwaartekracht-golven de aarde treffen, dan gaat de aarde zich vervormen. Deze vervormingen zijn miniem maar wel meetbaar. De Gravitational-wave Observatory (Ligo) in Louisiane detecteerde al zwaarte-krachtgolven. [4].



Figuur 1.2: LIGO [5]

Om deze vervormingen beter waar te kunnen nemen plant de Einstein Telescope Organization (ETO) een gigantisch geavanceerd ondergronds observatorium, de Einsteintelecoop (figuur 1.3). Dit observatorium neemt de vorm aan van een gelijkzijdige driehoek met zijden van 10 km in lengte. In tunnels worden laserstralen doorgestuurd die het mogelijk maken om de verandering van de aarde waarnemen. Als de aarde vervormt krijgen de tunnels een verandering van lengte. Door middel van laserstralen en spiegels kan deze verandering van afstand gemeten worden. Door deze tunnels op een diepte van 300 m onder de grond te bouwen, onderdrukt men de trillingen die op aarde worden veroorzaakt. Al de trillingen die op aarde veroorzaakt worden, worden waargenomen door de telescoop en moeten eruit gefilterd worden. Door de trillingen te onderdrukken wordt dit proces eenvoudiger. Tevens moeten de buizen waardoor de laserstralen schijnen onder UHV (ultra high vacuüm) gebracht worden, zodat door de laser verbrande koolwaterstofatomen niet aan de lens kleven [6].



Figuur 1.3: einstein telescoop [7]

Werkhuizen Hengelhoef, samen met FEF besser Fügen, RWTH Aachen University en Aperam zijn een onderzoek gestart naar het produceren van de buizen. In dit onderzoek hebben deze partners al de productiemethode en specificaties van de buis bepaald. De buis zal ondergronds in een continu proces gefabriceerd worden met een diameter van circa één meter en een lengte van 500m. Er wordt een RVS coil naar beneden gebracht. Uit deze coil zal de buis gevormd worden, waarna de buis met vacuümlaserlassen in gravitaire richting wordt dichtgelast. Gravitair betekent dat het lasproces wordt uitgevoerd in de richting van de zwaartekracht, in dit geval dus naar beneden gericht [8].

1.2 Probleemstelling

Voor het volledige project moet er 120 km aan buizen worden gefabriceerd op een diepte van circa 300 meter onder de grond. Als de productiemethodes die tegenwoordig ter beschikking zijn gebruikt zou worden dan worden de buizen met een lengte van ongeveer 20 m bovengronds vervaardigd met aan weerszijden een flens. Deze buizen moeten één voor één gemaakt, ingepakt en getransporteerd worden naar de productiesite en dan ondergronds geplaatst worden. Het ondergronds produceren van buizen in een continu proces biedt tal van voordelen, waaronder aanzienlijke tijds- en kostenbesparingen, evenals het verminderen van de belasting op het wegennetwerk[8].

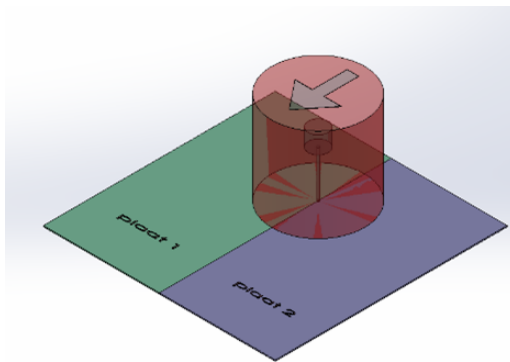
Het produceren van de UHV(ultra high vacuüm) buizen moet sneller gebeuren dan vandaag de dag. Hiervoor is er nog veel onderzoek en ontwikkeling nodig. Eén van deze ontwikkelingen is het ondergronds produceren van UHV buizen in een continue proces, waarbij vacuümlaserlassen gebruikt moet worden. Normaal gezien wordt vacuümlassen in een stilstaande kamer uitgevoerd. Doordat de buizen in een continue proces vervaardigd moet worden is deze techniek hier niet toepasbaar en zal er gebruik moeten gemaakt worden van een mobiele vacuümkamer. Deze productietechniek is vandaag de dag nog niet ontwikkeld.

1.3 Doelstellingen

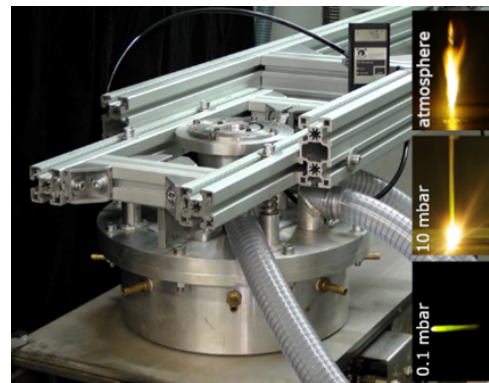
Het doel is het ontwerpen van een testopstelling die in staat is om vacuümlaserlassen continu uit te voeren. Hierbij is het de bedoeling dat platen met een constante snelheid onder de vacuümkamer door bewegen.

In eerste instantie moet er een bronnenstudie worden uitgevoerd om de hedendaagse productiemethodes van gelaste buizen in kaart te brengen.

Ten tweede moet er een testopstelling worden ontworpen voor het continu vacuümlaserlassen. Hierbij moet de vacuümlaserlasmachine over de platen bewegen. Figuur 1.4a toont een vereenvoudigde weergave. Bij deze testopstelling moet er rekening gehouden worden met de resultaten uit voorgaand onderzoek naar het produceren van de buizen onder de grond. Zo zal de diameter van één meter in rekening gebracht moeten worden. Het materiaal van de platen die aan elkaar moeten gelast worden is RVS304 met een dikte van 4 mm. De lassnelheid die bereikt moet worden is 0,5 tot 1 m/min. De testopstelling moet minimaal rechte platen kunnen bewerken. Gekromde platen is geen must. De dikte van de platen is vier mm, de breedte 500mm en lengte is 3000mm. Hierdoor kan een standaard plaat van 1500X3000X4 geknipt worden in 3 stukken.



(a) concept tekening mobiel vacuümlaserlassen



(b) voorbeeld vacuümlaserlas

Figuur 1.4: vacuümlaserlas [8]

1.4 Methode

Het project begint met een bronnenstudie om inzicht te krijgen in de productiemethodes van gelaste buizen. Deze studie houdt in de verschillende manieren van gelaste buizen in kaart te brengen. Het is niet de bedoeling om volledig in detail te gaan. Daarna wordt het project opgedeeld in specifieke deelproblemen. Elk van deze deelproblemen worden afzonderlijk behandeld. Deze manier van werken zorgt voor een gestructureerde aanpak. Zodra voor elk deelprobleem een passende oplossing is bedacht en uitgewerkt, worden deze deeloplossingen samengevoegd tot een geheel. Op dit punt wordt het project als één geheel beschouwd, waarna verder Als voor elk deelprobleem een gepaste oplossing is bedacht en uitgewerkt, worden deze deelproblemen terug samengevoegd tot één project. Vanaf nu is het project terug één geheel en kunnen de details uitgewerkt worden.

1.5 Vooruitblik

In hoofdstuk 2 wordt een bronnenstudie uitgevoerd. Deze studie richt zich op onderzoek naar het lassen van buizen in vacuüm, diverse productiemethodes van buizen, verschillende soorten afdichtingen en ten slotte het fenomeen van stick-slip. Vervolgens beschrijft hoofdstuk 3 de verschillende stappen die nodig zijn om tot een geschikte oplossing te bekomen, terwijl hoofdstuk 4 dieper ingaat op de benodigde berekeningen. Ten slotte geeft hoofdstuk 5 een blik op het eindontwerp.

Hoofdstuk 2

Bronnenstudie

2.1 Laserlassen

Laserlassen is een lastechniek waarbij er met behulp van laserstralen verschillende onderdelen aan mekaar gehecht kunnen worden. Laser is een afkorting voor “light amplification by stimulated emission of radiation”. De afkorting verwijst naar de manier waarop een laserstraal wordt opgewekt. Deze techniek heeft als voordelen dat het zeer snel, nauwkeurig en met weinig warmte invloed gepaard gaan. Door de geringe warmte invloed is nabewerking niet nodig. Het nadeel hierbij is dan wel dat er strenge eisen aan het product, de opspanning en de laser zelf zijn [9].

2.1.1 Eigenschappen van laserstralen

Deze paragraaf bespreekt de belangrijkste eigenschappen van laserstralen.

Vermogensdichtheid

Vermogensdichtheid $I[W/m^2]$ is het laservermogen $P[W]$ per oppervlak $A[m^2]$ van de bundel-doorsnede

$$I = \frac{P}{A}[W/m^2] \quad (2.1)$$

Met een laserstraal kan een vermogensdichtheid van circa $1020 W/m^2$ [9] bereikt worden. Dit is vele malen groter dan bijvoorbeeld autogeen en elektrische lasbogen. Voor autogeen lassen is dit $107 W/m^2$ en elektrische lasbogen $108 W/m^2$. Met hoge vermogensdichtheden kunnen diepe en tegelijkertijd smalle lassen bereikt worden. Hierdoor is er minder thermische vervorming en de lassnelheid is ook hoger[9].

Absorptie van laserstraling

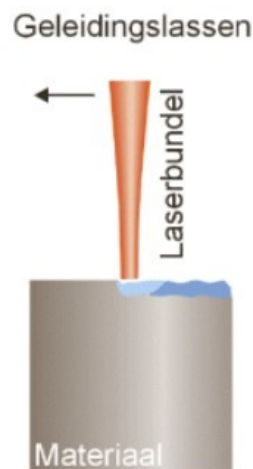
Voor het lassen is het belangrijk om zoveel mogelijk laserenergie in het materiaal te krijgen. De omzetting van licht naar warmte gebeurt in de bovenste laag van het te lassen materiaal. Slechts een klein deel van de energie wordt geabsorbeerd door het product. Het merendeel van de laserstraal wordt weerkaatst. Deze absorptie wordt uitgedrukt met de absorptiecoëfficiënt A . Deze coëfficiënt is afhankelijk van de optische eigenschappen van het materiaal en de golflengte van de laserstraal. De absorptiecoëfficiënt neemt af met toenemende golflengte. Zo is de absorptiecoëfficiënt voor een CO_2 laser op staal minder dan 20%. Voor een YAG-laserstraal is deze bijna 40% [9].

2.1.2 Lasprincipes en -methoden

Er zijn twee manieren om te lassen met behulp van laserstralen: geleidingslassen en keyhole lassen. Deze twee manieren worden in deze paragraaf besproken

Geleidingslassen

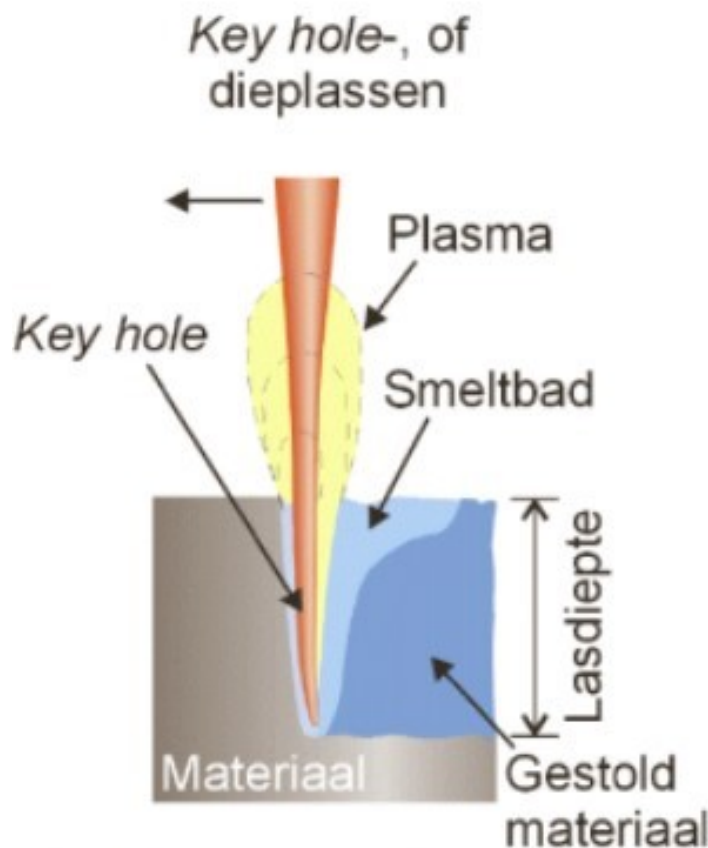
Geleidingslassen vindt plaats bij relatief lage intensiteiten ($< 10^8 W/m^2$). Hierdoor ontstaat er een ondiep smeltbad ($< 1\text{ mm}$). Dit smeltbad breidt zich uit door middel van warmtegeleiding in het metaal. De lage intensiteit zorgt voor een lage warmte inbreng wat op zijn beurt dan weer zorgt voor een ondiep smeltbad en een oppervlakte wat niet vervormt. Hierdoor is nabewerking niet meer nodig[9].



Figuur 2.1: geleidingslassen [9]

Keyhole lassen

Keyhole lassen vindt plaats bij hoge intensiteiten ($> 10^8 W/m^2$). Deze intensiteit kan men bereiken door gebruik te maken van optica (lenzen en spiegels). Hierdoor stijgt de temperatuur tot boven het verdampingstemperatuur van het materiaal. Doordat het materiaal verdampt ontstaat er een gat dat diep kan intreden. De diameter van dit gat is ongeveer 1.5 tot 2X de diameter van de laserstraal. Doordat de laserstraal weerkaatst in het gat is de absorptie groot (circa 80%). Doordat het materiaal verdampt ontstaat er een metaaldamp die aan de bovenkant van de keyhole ontsnapt. Deze metaaldamp absorbeert een deel van de energie. Hierdoor is het belangrijk om een beschermgas toe te voegen. Deze vermindert de metaaldamp en beschermt tevens tegen corrosie. Dit komt omdat het beschermgas een hoog ionisatiepotentiaal heeft. Hierdoor gaat er minder snel een plasmawolk boven de las gevormd worden. Door het toevoegen van de beschermgas is er tevens ook minder zuurstof aanwezig. Hierdoor kan het metaal minder reageren met de zuurstof en kan er minder corrosie gevormd worden. Een andere manier van beschermen is via vacuüm [9].

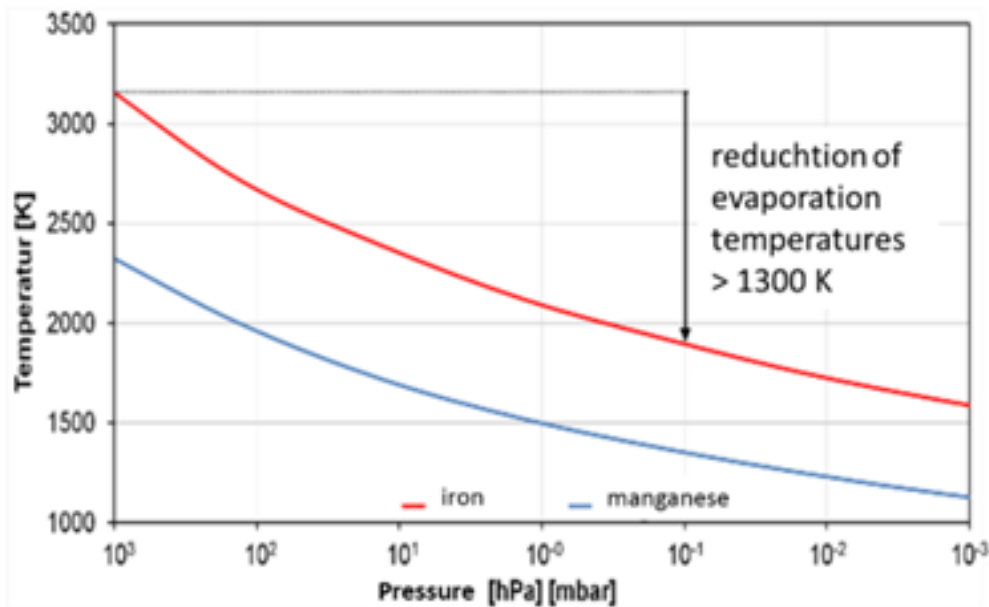


Figuur 2.2: keyhole lassen [9]

Vacuüm als vervanger voor beschermgas

Vacuüm wordt de vandaag de dag nog niet veel gebruikt als bescherming bij laserlassen. Bij deze methode wordt het werkstuk in een vacuümkamer geplaatst, waarna de hele kamer wordt vacuüm getrokken. Daarom zijn de producten beperkt qua afmetingen en gewicht. Deze manier van werken is zeer tijdrovend. Daarom deze studie voor het lassen met mobiele vacuümkamers.

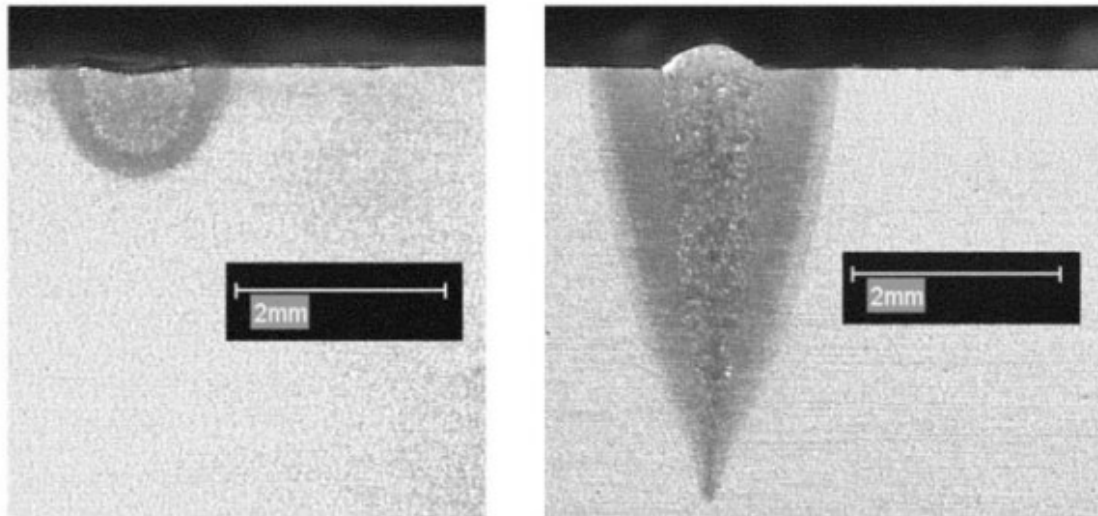
Eén van de voordelen die vacuüm biedt tegenover andere beschermgassen is dat er minder energie nodig is om dezelfde lasdiepte te bereiken. Dit komt doordat de smelt- en verdampingstemperatuur van metaal aanzienlijk lager is in vacuüm dan onder atmosferische druk zoals te zien in afbeelding 2.3 [10]



Figuur 2.3: smelttemperatuur [10]

Een bijkomend voordeel van vacuüm is dat er geen zuurstof aanwezig is. Hierdoor kunnen er geen onzuiverheden ontstaan tijdens het lassen zoals zuurstofbellen of oxidatie van het ijzer. Ook zijn er geen andere elementen meer in de lucht die verbrand kunnen worden. Hierdoor zal de damp die ontstaat verminderen. De damp die ontstaat is deze van het verdampte metaal en wordt direct afgezogen door de vacuüminstallatie.

In afbeelding 2.4 is een product met dezelfde parameters gelast (zelfde vermogen, materiaal, dikte, ...). Het verschil tussen beide is dat bij de rechtse foto vacuüm als beschermgas is gebruikt en bij de linkse niet [10].



Figuur 2.4: vacuüm vs traditioneel [10]

2.1.3 Besluit

Door te onderzoeken wat laserlassen is en welke eigenschappen laserlicht heeft is er een duidelijk beeld gevormd waarom het vacuüm belangrijk is bij het laserlassen. Ook is er een basis gevormd voor het benaderen van externe partijen, deze partijen moeten extra begeleiding voorzien tijdens het lassen. Zo moeten ze bijvoorbeeld helpen bij het juist instellen van het lasapparaat als ook de juiste brandpuntsafstand bepalen.

2.2 Productie van buizen

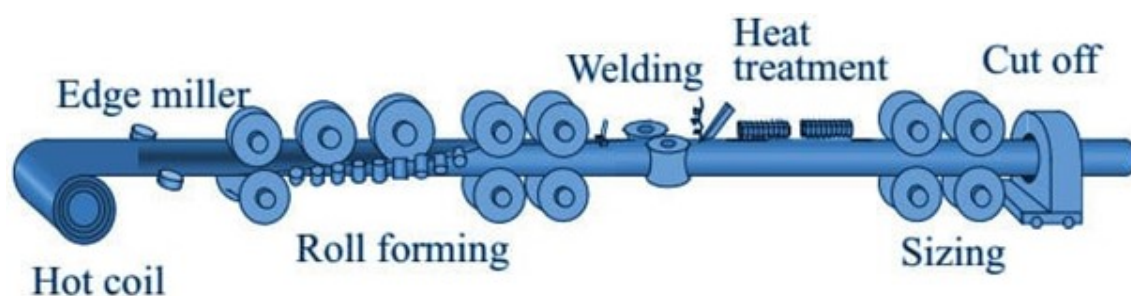
In deze paragraaf van de bronnenstudie wordt de focus uitsluitend gelegd op de productie van koudgewalste gelaste buizen. Het hoofddoel van dit onderzoek is een inzicht te krijgen in de verschillende productieprocessen die worden toegepast bij de vervaardiging van gelaste buizen. Dit inzicht is belangrijk als er een testmachine ontworpen dient te worden voor gekromde platen. Omdat de hoofddoelstelling niet het produceren van de buizen zelf is, is er gekozen om niet diep in te materie te duiken, en in plaats daarvan de verschillende stappen kort te weergeven.

2.2.1 Electric resistance welded (ERW)

De productie van gelaste buizen volgens het ERW principe gebeurt in een continu proces. De stappen die nodig zijn worden hieronder omschreven.

1. **Uncoiling en Flattening:** Het proces begint met het afrollen van de coils, waarbij de stalen strip wordt ontrollend en vervolgens wordt gladgestreken om een vlakke plaat te verkrijgen. Deze vlakke plaat vormt de basis voor de verdere verwerking
2. **Coil joining:** Zodra het einde van de coil is bereikt, wordt de volgende hieraan vast gelast.
3. **Edge trimming:** Om grote precisie bij het lassen te garanderen, worden de randen van de stalen platen bijgesneden en geëgaliseerd. Zo worden er mogelijke onregelmatigheden zoals bramen verwijderd van de plaat.
4. **forming:** De vlakke stalen platen worden vervolgens door middel van een walsproces omgezet naar een ronde buis.
5. **Welding:** Door middel van een hoogfrequente elektrische stroom worden de randen van de gewalste buis aan mekaar gelast.
6. **Quality control:** Tijdens en na het lassen worden strenge kwaliteitsprocedures toegepast om ervoor te zorgen dat de buizen voldoen aan de vastgelegde normen. Hier worden onder andere de lasnaden, wanddikte, afmetingen, ... gecontroleerd.
7. **pipe sizing and straightening:** In deze stap worden de buizen naar de gewenste diameter en wanddikte gebracht. Ook worden de buizen gerecht.
8. **Pipe cutting:** Tenslotte worden de buizen op de gewenste handelslengte afgezaagd.

[11], [12]



Figuur 2.5: ERW [12]

2.2.2 Longitudinal submerged arc welding (LSAW)

Bij LSAW worden de buizen niet in een continu proces vervaardigd. Het startmateriaal is ook niet een oneindig lange plaat, maar zijn stukken platen van de lengte van de buis. Deze platen worden vervolgens vervormd tot buis. Dit kan op verschillende manieren gebeuren. Deze verschillende manieren worden in deze paragraaf besproken. De afkortingen van de verschillende methodes slaan op de verschillende vormen die de plaat aanneemt bij het vervaardigen van de buis.

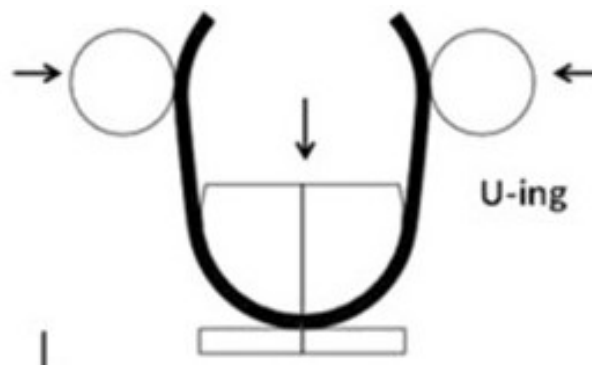
UOE

1. **Trimming:** De randen worden afgeschuind voor V-groeven te creëren voor het lassen. Ook wordt de plaat op breedte gemaakt.
2. **Pre-bending:** De randen van de plaat worden vooraf gebogen om een U-vorm te creëren met behulp van een speciale vormpers. Dit proces wordt weergegeven in afbeelding 2.6 [13] [14].



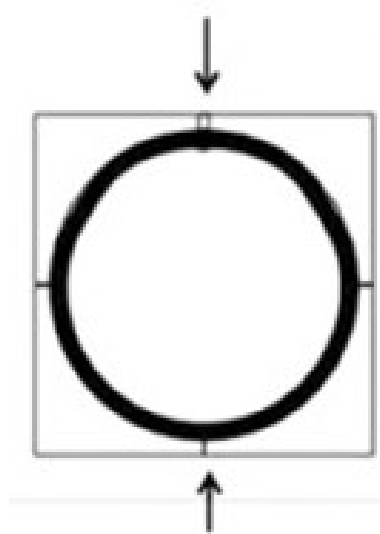
Figuur 2.6: Pre bending [15]

3. **U-forming:** De U-vormige plaat wordt vervolgens geperst met een U-vormpers om een U-vorm te bekomen. Zoals te zien in figuur 2.7.



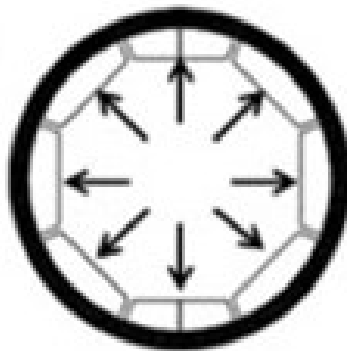
Figuur 2.7: U forming [15]

4. **O-forming:** De U vormige plaat wordt vervolgens geperst met een O-vormpers om uiteindelijk de ronde vorm te bekomen zoals te zien in figuur 2.8



Figuur 2.8: O-forming [15]

5. **Welding:** De randen van de plaat worden vervolgens aan elkaar gelast.
6. **Expanding:** Zoals te zien in figuur 2.9 wordt de diameter van de buis vergroot indien gewenst doormiddel van een uitzetmachine.

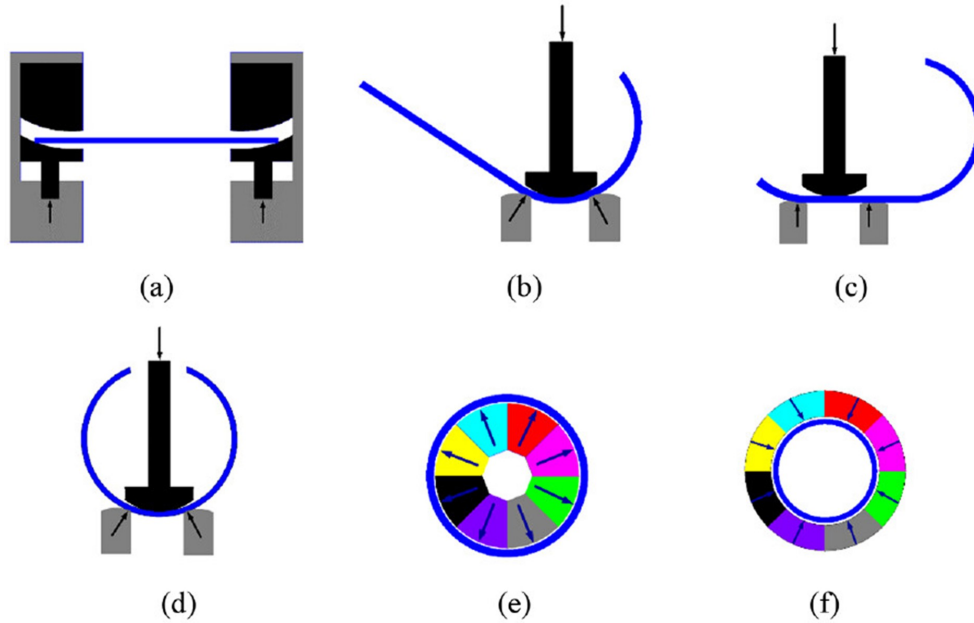


Figuur 2.9: expanding [15]

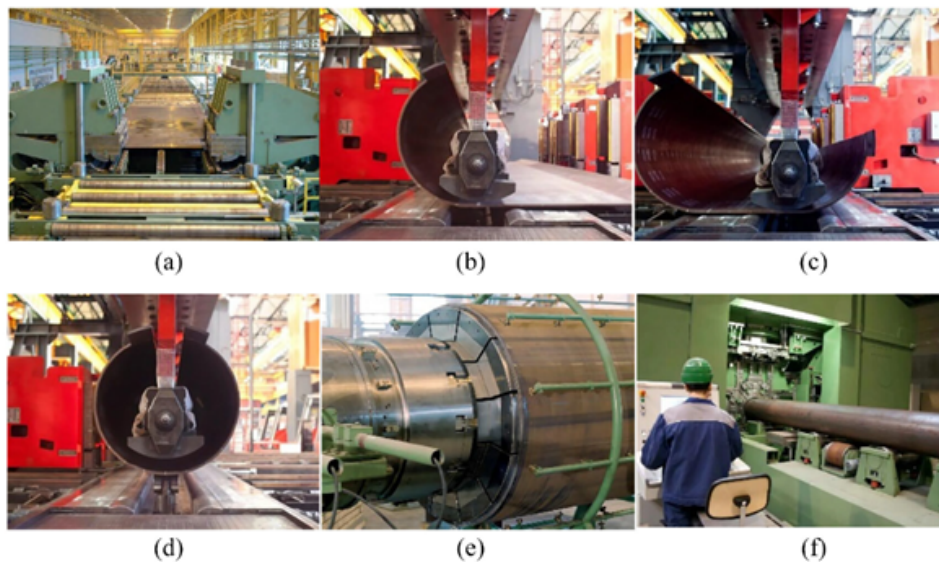
7. **Final processing:** Hierin wordt de buis op handelslengte gezaagd, gecontroleerd en indien nodig gecoat afhankelijk van de eindtoepassing.

JCOE

De productiemethode bij JCOE lijkt zeer sterk op de productiemethode van UOE. De eerste twee stappen zijn iddientiek namelijk trimming en pre-bending. De volgende stappen zijn verschillend. Eerst wordt de plaat in een J-vorm gebracht Dit is te zien in puntje b van afbeelding 2.11. Vervolgens in een C vorm. Zoals zichtbaar gemaakt in puntje C van afbeelding 2.11. De volgende stappen zijn weer identiek aan de UOE methode[16].



Figuur 2.10: JCOE [16]



Figuur 2.11: JCOE foto's [16]

HME

Een stalen plaat wordt door middel van walsrollen tot een ronde buis gewalst. Dit gebeurt door de plaat verschillende keren het proces te laten ondergaan[17].



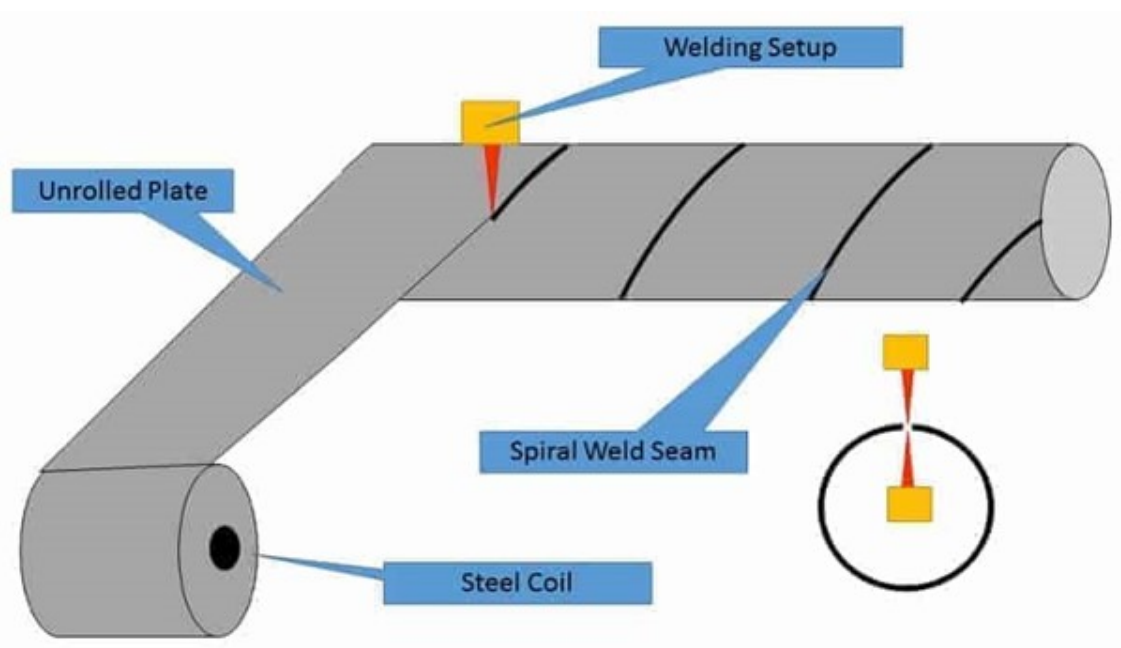
Figuur 2.12: HME [17]

2.2.3 Spiral submerged arc welding (SSAW)

De productiemethode van SSAW lijkt zeer sterk op de productiemethode van ERW.

1. **Uncoiling en Flattening:** Het proces begint met het afrollen van de coils, waarbij de stalen strip wordt ontrollt en vervolgens wordt gladgestreken om een vlakke plaat te verkrijgen. Deze vlakke plaat vormt de basis voor de verdere verwerking
2. **coil joining:** Zodra het einde van de coil is bereikt, wordt de volgende hieraan vast gelast.
3. **Edge trimming:** Om grote precisie bij het lassen te garanderen, worden de randen van de stalen platen bijgesneden en geëgaliseerd. Zo worden er mogelijke onregelmatigheden zoals bramen verwijderd van de plaat.
4. **forming:** De vlakke stalen platen worden vervolgens door middel van een walsproces omgezet naar een ronde buis. Een belangrijke opmerking die hier bij gemaakt moet worden is dat de gevormde buis tijdens het fabriceren wordt rondgedraaid.
5. **Welding:** Door middel van een hoogfrequente elektrische stroom worden de randen van de gewalste buis aan mekaar gelast.
6. **Quality control:** Tijdens en na het lassen worden strenge kwaliteitsprocedures toegepast om ervoor te zorgen dat de buizen voldoen aan de vastgelegde normen. Hier worden onder andere de lasnaden, wanddikte, afmetingen, ... gecontroleerd.
7. **pipe sizing and straightening:** In deze stap worden de buizen naar de gewenste diameter en wanddikte gebracht. Ook worden de buizen gerecht.
8. **Pipe cutting:** Tenslotte worden de buizen op de gewenste handelslengte afgezaagd.

[18]



Figuur 2.13: SSAW [19]

2.2.4 Besluit

Omdat de productiemethode in een continu proces moet voorlopen blijven enkel de methodes van ERW (Electric Resistance Welding) en SSAW (Spiral Submerged Arc Welding) over.

Bij nader onderzoek viel de optie van SSAW, ofwel spiraal gelaste buizen, af. Dit kwam doordat deze productiemethode vereist dat de volledige buis wordt rondgedraaid. Een alternatieve benadering zou kunnen zijn om de coil rond de buis te laten draaien. Echter, dit zou resulteren dat de ondergrondse tunnel voor de Einstein telescoop een grotere diameter moet hebben.

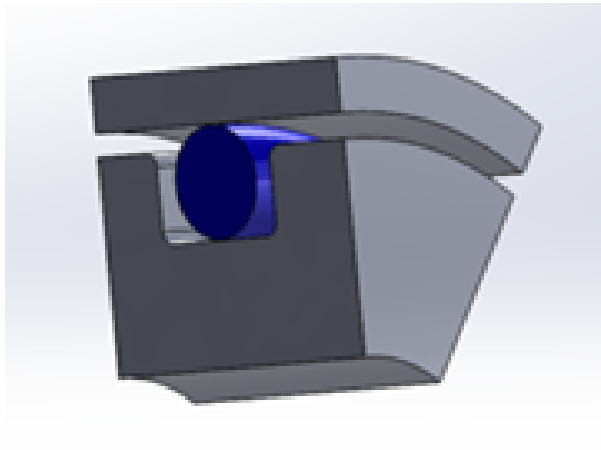
2.3 Dichtingen

In deze paragraaf van de bronnenstudie wordt er dieper ingegaan op de verschillende soorten dichtingen. Het doel is om een geschikte dichting te vinden voor de vacuümkamer zodat de platen met een constante snelheid zonder drukverlies onder de vacuümkamer kunnen doorschuiven.

2.3.1 O-ring

Een O-ring heeft de vorm van een ring, met een ronde doorsnede, en wordt veelvuldig gebruikt als afdichting vanwege zijn kostenefficiëntie, eenvoud in productie, betrouwbaarheid en gemakkelijke installatie. Hoewel deze vaak worden aangeduid als “rubberen O-ringen”, is het belangrijk op te merken dat ze niet uitsluitend van rubber worden gemaakt.

De O-ring wordt geplaatst in een groef die is ingebouwd in het materiaal dat moet worden afgedicht. Wanneer de ring wordt samengedrukt, past hij zich aan en zorgt voor de afdichting. Over het algemeen worden deze O-ringen voornamelijk gebruikt in statische toepassingen, maar ze kunnen ook beperkt worden ingezet in dynamische toepassingen. Bij dynamische toepassingen kan de dichting gaan rollen in de groef. Hierdoor verdraait hij zich en kan deze beschadigd geraken en dicht deze minder goed af [20].

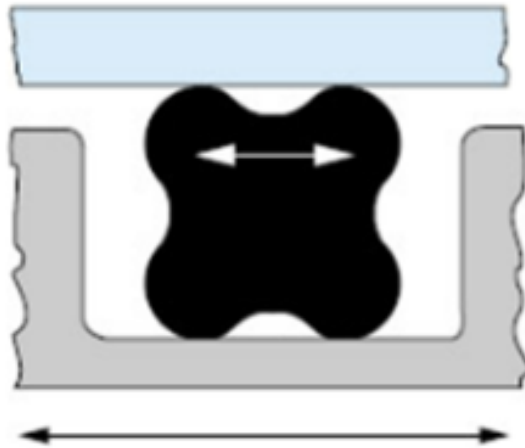


Figuur 2.14: O-ring [20]

2.3.2 X-ring

De X-ring is een variant van de O-ring en onderscheidt zich door zijn karakteristieke X-vormige doorsnede. Een andere benaming voor de X-ring is de “4-lippenafdichting” wat verwijst naar het feit dat deze afdichting vier afdichtingsvlakken heeft in gemonteerde toestand. Deze specifieke geometrie van de X-ring biedt enkele voordelen ten opzichte van de O-ring.

De X-ring is beter geschikt voor dynamische toepassingen dan de O-ring. Dit komt omdat de X-ring niet kan gaan rollen in zijn groef. Tevens is er bij de X-ring minder compressie nodig. Dit komt door de vorm van de afdichtingsring[21].



Figuur 2.15: X-ring [21]

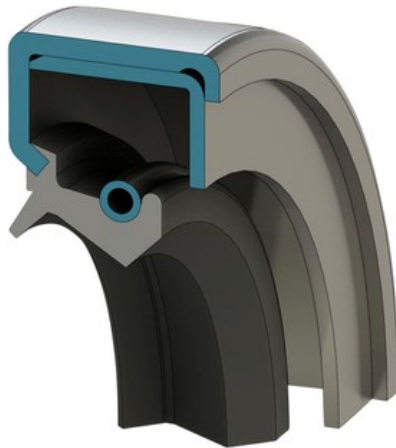
2.3.3 Oliekeerring

Deze afdichtingen kunnen ook andere mediums afdichten dan olie. De afdichtingen zijn omschreven in de norm DIN3760. In deze norm worden verschillende modellen omschreven. Zo zijn er afdichtingen met of zonder stoflip (voor vuil buiten te houden). De meeste keerringen bestaan uit een buitenmantel van metaal, of een metalen inlage omringd met rubber, en een afdichtingslip. De metalen buitenmantel is de basis en is bepalend voor de vorm en de maat van het product. Deze afdichtingen kunnen uitsluitend ronde assen afdichten.

De buitenmantel zorgt door middel van een perspassing voor een statische afdichting. De versterkingsring zorgt voor stabiliteit en het membraan houdt vet, olie en vuil tegen.

Bij een roterende as treedt er tussen de as en de afdichtingslip een hydrodynamisch effect op. Er vormt zich dus een dun laagje smeermiddel tussen de afdichtingslip en de as. Hiermee wordt de warmteontwikkeling en dus de slijtage beperkt.

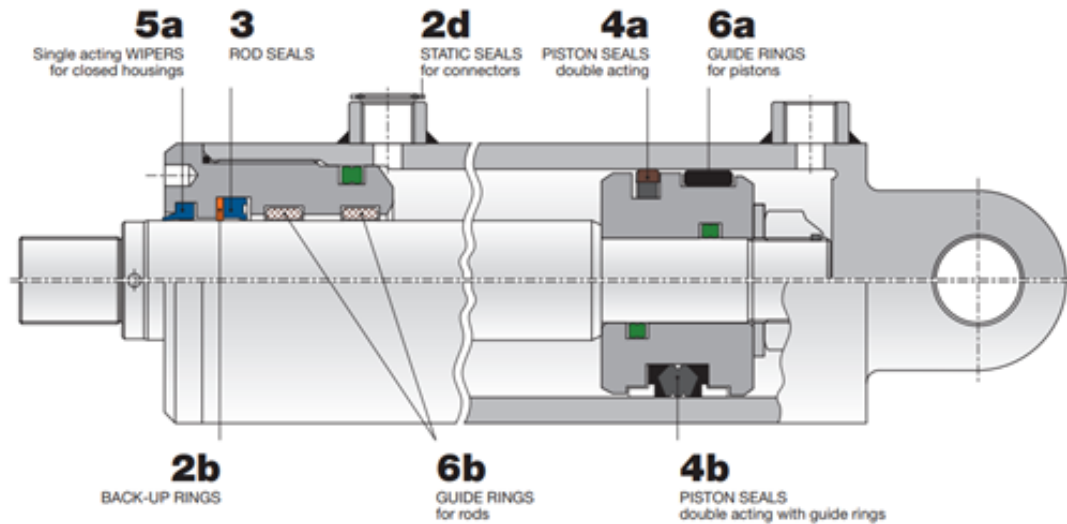
Tevens mag de oliekeerring nooit droog draaien. Want dan kan het hydrodynamisch effect niet optreden. Door de vorm van de afdichtingslip kan het hydrodynamisch effect optreden zonder dat de olie weglekt. De oppervlakteruwheid van de af te dichten as is ook belangrijk voor de werking van de keerring, een te glad oppervlak zorgt dat er geen smeerfilm kan optreden, terwijl een te ruwe as dan weer lekkages veroorzaakt. De aanbevolen oppervlakteruwheid is $Ra = 0,2 - 0,8 \mu m$ [22].



Figuur 2.16: keerring [22]

2.3.4 Afdichtingen hydraulische cilinders

Een hydraulische cilinder is een toepassing waarbij dynamische afdichten gebruikt worden. Daarom is het interessant om de manier van afdichten te bekijken. De werking van de dichting worden niet tot in detail besproken omdat de beweging die de cilinderstang maakt verschillend is van de situatie die nodig is bij dit eindwerk. Wel wordt er gekeken naar de verschillende componenten in de cilinder.[23].



Figuur 2.17: cilinder [23]

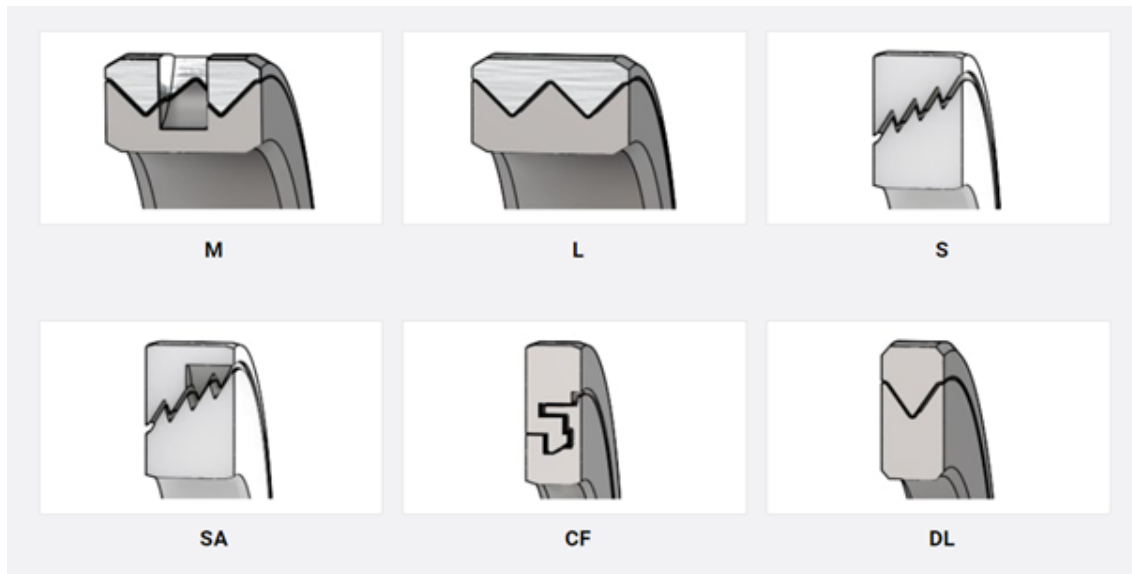
Afdichting 5a van afbeelding 2.17 heeft als functie om te voorkomen dat vuil de cilinder binnendringt, terwijl afdichting 3 verantwoordelijk is voor het afdichten van de cilinderstang, zodat er geen olie uit het systeem kan lekken. Bij afdichting 3 worden tevens back-upringen geïnstalleerd, die zorgen voor de juiste positionering van de afdichting hierdoor zal de slijtage verminderen.

Daarnaast zijn er geleidingsringen aangeduid als 6b, die dienen om de cilinderstang op zijn plaats te houden en te begeleiden. De aansluitingen van de cilinder zijn voorzien van statische afdichtingen, aangeduid als 2d in afbeelding 2.17.

Afdichting 4a is qua functie vergelijkbaar met afdichting 3, maar in dit geval zorgt afdichting 4a voor een afdichting aan de buitenkant van de cilinder. Ook hier worden geleidingsringen toegepast om de positionering en slijtage te optimaliseren.

2.3.5 Labyrint afdichtingen

Een labyrint afdichting is een type mechanische afdichting dat wordt gebruikt om de doorgang van vloeistoffen of gassen te voorkomen. De labyrint afdichting heeft een doolhofachtige opbouw met verschillende obstakels en bochten. Hierdoor is het voor het gas/vloeistof moeilijker om te ontsnappen. Ook deze afdichting is ontworpen om assen die ronddraaien af te dichten. Er zijn verschillende types van afdichtingen. Enkele hiervan worden weergegeven in afbeelding 2.18[24].



Figuur 2.18: labyrint [24]

2.3.6 Besluit

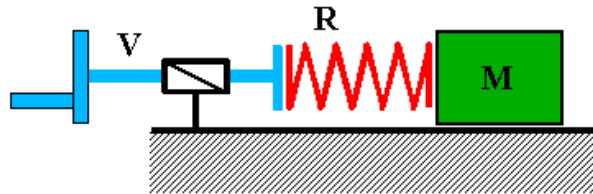
In deze bronnenstudie zijn er geen geschikte afdichtingen gevonden. Elke dichting die besproken is, is voor toepassingen waarbij een rond voorwerp afgedicht moet worden. Deze afdichtingen werken ook enkel als ze gebruikt worden bij ronde toepassingen, uitgezonderd de O en X ring. Deze afdichtingen zouden wel gebruikt kunnen worden bij toepassingen die niet rond zijn. Het nadeel van deze afdichting is dan weer dat ze minder geschikt zijn voor dynamische toepassingen.

De bronnenstudie over dichtingen heeft wel gezorgd voor meer inzicht in de verschillende soorten en technieken van afdichtingen zodat er kan nagedacht worden om een afdichting te ontwikkelen.

2.4 Stick-slip

Deze paragraaf onderzoekt het fenomeen stick-slip. Dit fenomeen doet zich voor wanneer twee voorwerpen relatief van elkaar bewegen en hierbij een schokkende beweging optreedt.

Afbeelding 2.19 illustreert een situatie waarin een massa wordt verplaatst door een veer, die de elasticiteit van het systeem vertegenwoordigt. Wanneer de kracht die nodig is om de veer in te drukken kleiner is dan de statische wrijvingscoëfficiënt, blijft de massa stilstaan (stick). Naarmate de veer verder wordt ingedrukt, neemt de kracht in de veer toe totdat de statische wrijvingskracht wordt bereikt. Hierdoor begint het object te bewegen (slip). Dit leidt tot een ontspanning van de veer totdat de kracht weer onder de dynamische wrijvingscoëfficiënt komt. Op dat moment begint het gehele proces opnieuw [25] [26].



Figuur 2.19: principe schema stick slip [26]

Hoofdstuk 3

Voorontwerp

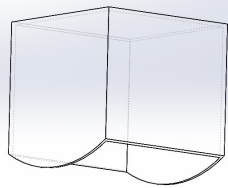
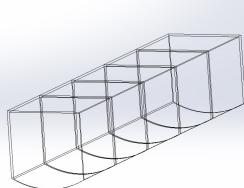
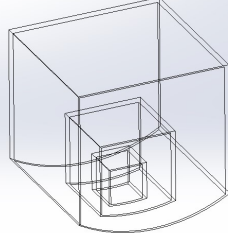
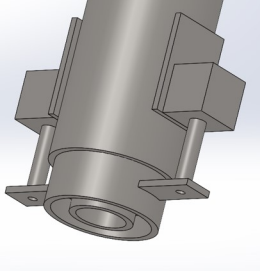
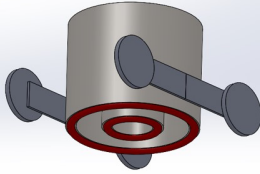
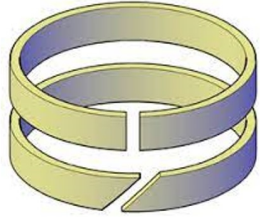
Het is cruciaal om het ontwerp gestructureerd aan te pakken. Om een heldere structuur in de masterproef te bereiken, is het "probleem" gesplitst in verschillende kleinere deelproblemen, waaronder de vacuümpot, inklemmen platen, voortbewegen platen en de aandrukrollen. Elk van deze deelproblemen worden afzonderlijk behandeld, waardoor de voortgang van de masterproef eenvoudig op te volgen is. Zodra alle deelproblemen zijn uitgewerkt, worden ze geïntegreerd tot een samenhangend geheel.

3.1 Vacuümpot

De vacuümpot moet een mobiele vacuümkamer worden. Het is de bedoeling dat de platen onder deze vacuümkamer kunnen voortbewegen. Ook moet er een ruimte voorzien zijn om de laserstraal door te laten gaan.

3.1.1 Morfologisch overzicht

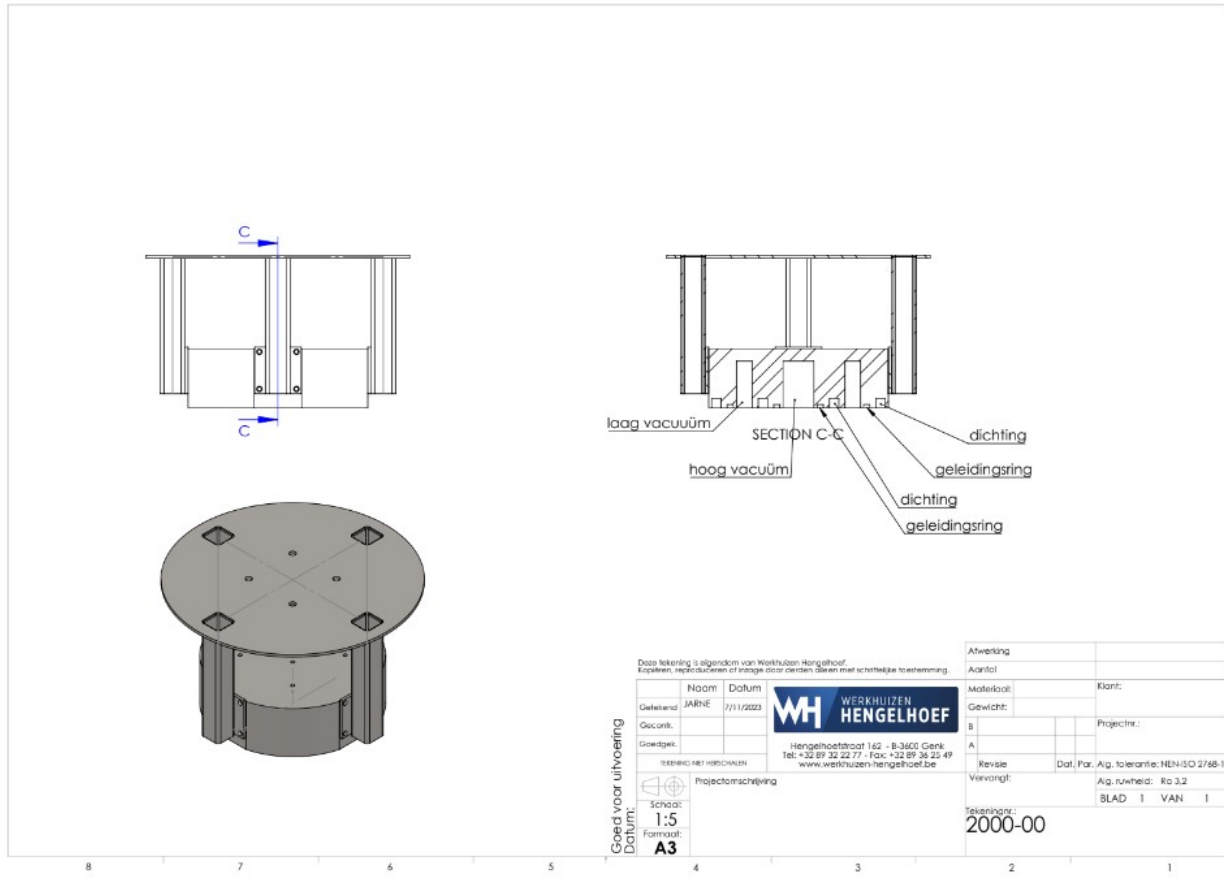
Tabel 3.1: morfologisch overzicht vacuümpot

	oplossing 1	oplossing 2	oplossing 3
hoeveel kamers	 <p>1 grootte</p>	 <p>achter elkaar</p>	 <p>in elkaar</p>
wrijvingsbeperking	 <p>cilinders</p>	 <p>wielen</p>	 <p>geleiding zoals cilinders</p>

3.1.2 Voorontwerp 1

Om het drukverschil minder groot te maken is er gekozen om twee kamers in elkaar te maken. In de bronnenstudie bij paragraaf 2.3.4 is er geleerd dat bij een hydraulische cilinder geleidingsringen gebruikt worden. Soortgelijke ringen gaan hier ook gebruikt worden voor de wrijvingskrachten te beperken.

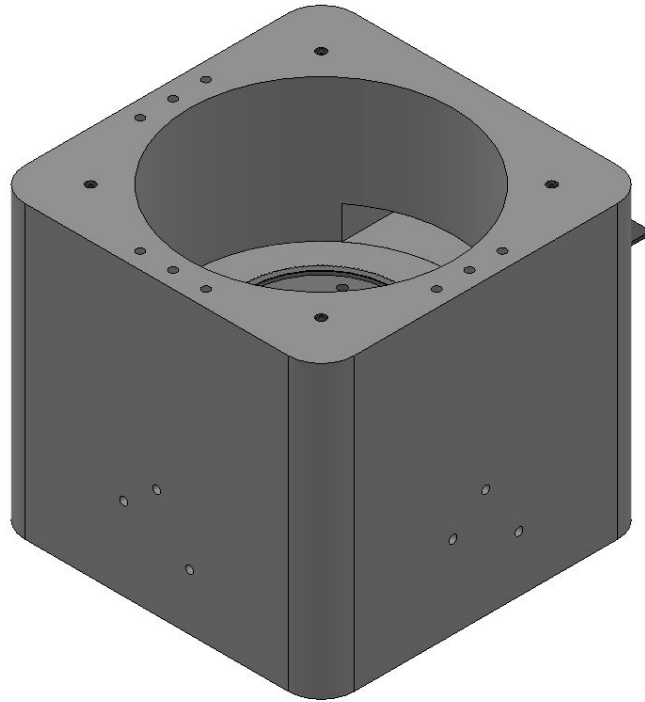
Het voorontwerp is zichtbaar gemaakt in afbeelding 3.1.



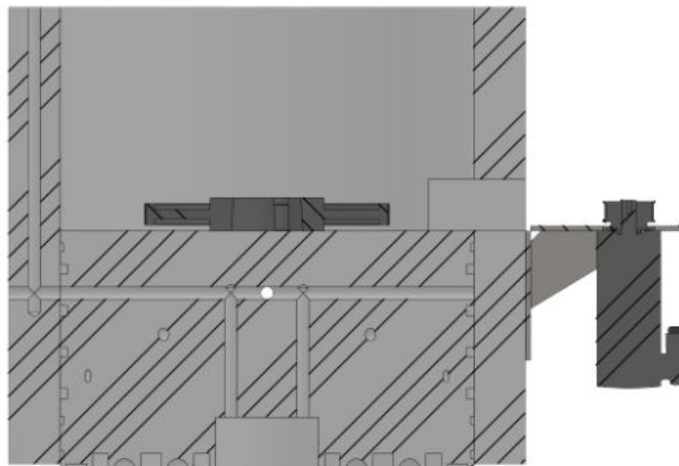
Figuur 3.1: voorontwerp vacuüm 1

3.1.3 Voorontwerp 2

Het voorontwerp is verder aangepast. Zo kan de pot een ronddraaiende beweging maken. De aandrijving gebeurt via een elektromotor met een tandriem als overbrenging. De pot blijft op zijn plaats door de geleidingsringen. Door de aandrijving bevindt de wrijving zich in het dynamisch gebied en is de kans op stick slip drastisch verminderd. Ook is de grote buitenste kamer uit voorontwerp 1 aangepast naar twee kleinere kamers. Deze kleinere kamers zijn sneller te fabriceren.



Figuur 3.2: voorontwerp vacuüm 2



Figuur 3.3: voorontwerp vacuüm 2 doorsnede

3.2 Platen inklemmen

Bij laserlassen wordt er geen toevoegmateriaal gebruikt. Daarom is het belangrijk om de spleet tussen de platen tot een minimum te beperken. Een bijkomend voordeel is dat er zo minder lekverliezen optreden. Daarom moet er een systeem bedacht worden om de platen tegen elkaar op te duwen en ze zo te houden.

3.2.1 Morfologisch overzicht

Tabel 3.2: morfologisch overzicht platen inklemmen

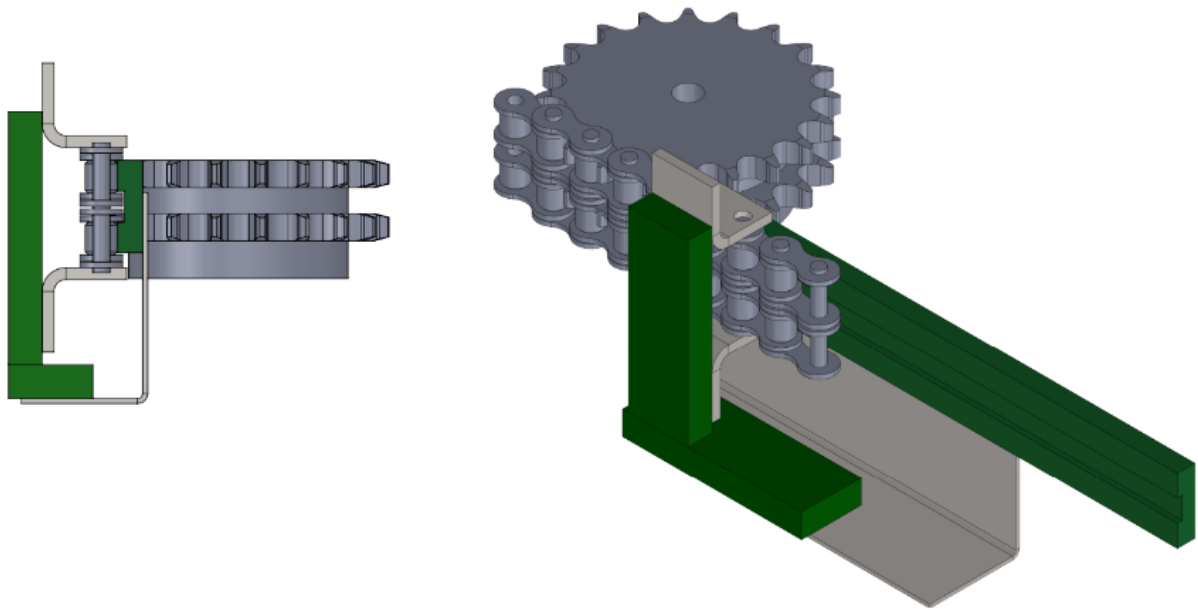
oplossing 1	oplossing 2	oplossing 3
 <p>5a Single acting WIPERS for closed housings 3 ROD SEALS 2d STATIC SEALS for connectors 4a PISTON SEALS double acting 6a GUIDE RINGS for pistons 2b BACK-UP RINGS 6b GUIDE RINGS for rods 4b PISTON SEALS double acting with guide rings</p> <p>cilinder</p>	 <p>geleidingswielen</p>	 <p>transportband</p>

3.2.2 Voorontwerp

Om een gelijkmatige druk te kunnen uitoefenen op de platen is er gekozen voor de transportband. Deze transportband oefent een drukkracht uit op de zijkant van de platen. Hierdoor worden de platen naar elkaar toe geduwd. Door te kiezen voor de transportband bereikt men een veel grotere drukoppervlakte ten opzichte van de geleidingswielen of de cilinders. Het voorontwerp is in verschillende stappen gebeurd.

Voorontwerp 1

Voorontwerp 1 is een principeschets van wat het uiteindelijk resultaat moet worden. Hierbij is er nog niet gekeken naar de maakbaarheid van het geheel. De ketting is voorzien met opzetplaatjes gemonteerd op zijn schakels. Deze opzetplaatjes zijn voorzien met rubberen blokken. Deze blokken moeten tegen de zijkant van de platen duwen. De geleidingen aan de onderzijde dient ervoor dat de ketting op het kettingwiel blijft zitten.



Figuur 3.4: platen inklemmen voorontwerp 2

Voorontwerp 2

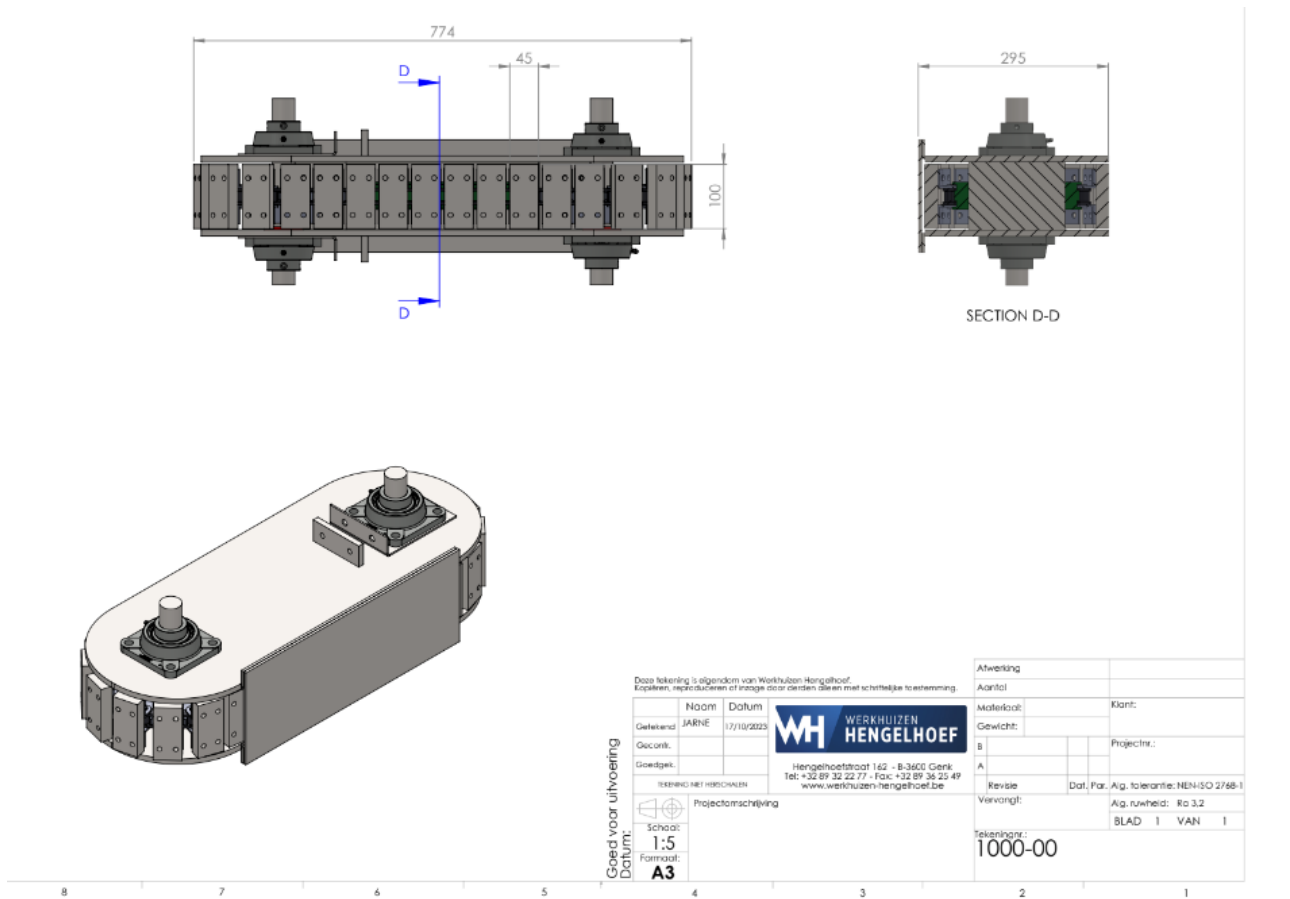
Bij dit voorontwerp is er wel gekeken naar de maakbaarheid. Zo is er gekozen voor een ketting met schakels van het type K2 zoals bijgevoegde afbeelding 3.5. Er is ook gekozen voor een enkele ketting en geen dubbele zoals zichtbaar in voorontwerp 1. Er is gekozen voor deze optie om het geheel minder hoog en zwaar te maken.



Figuur 3.5: ketting type k2

Verder zijn er geleidingsplaten toegevoegd om de ketting te ondersteunen. Ook is er rekening gehouden dat de ketting aangespannen dient te worden dus de lagers zijn verschuifbaar gemaakt.

Door middel van slopgaten en draadstangen kan de lager naar voor en achter verschoven worden, het resultaat is zichtbaar in figuur 3.6.






Figuur 3.6: platen inklemmen voorontwerp 3

3.3 Platen voortbewegen

Deze paragraaf beschrijft het ontwerp wat dient voor de ondersteuning en voortbeweging van de platen.

3.3.1 Morfologisch overzicht

Tabel 3.3: morfologisch overzicht platen transporteren

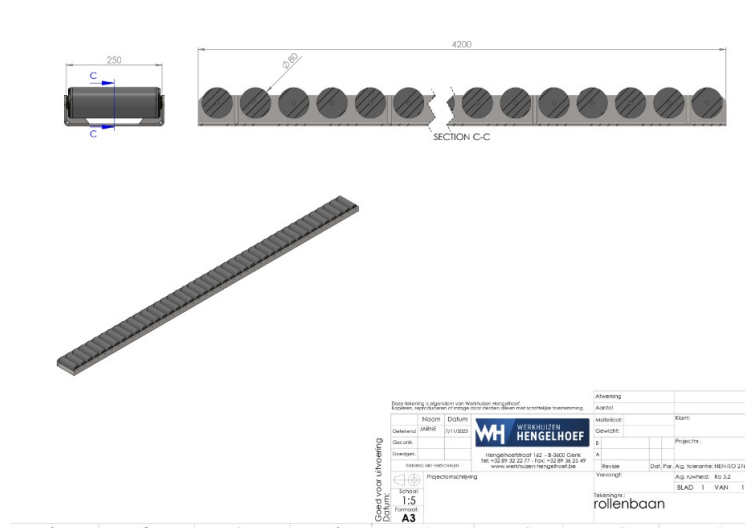
oplossing 1	oplossing 2	oplossing 3
		
rollenbaan	transportband	wrijving

3.3.2 Voorontwerp

Er is gekozen om de platen te laten bewegen door middel van de transportband die gekozen is in hoofdstuk 3.2.2 in combinatie met een niet aangedreven rollenbaan. De rollenbaan is gekozen zodat bij de vacuümkamer enkele rollen verwijderd kunnen worden. Dit is nodig zodat de laserstraal door de plaat heen kan laseren.

Voorontwerp 1

Het ontwerpen van een niet aangedreven rollenbaan is eenvoudig. Er is gekozen voor een geplooide plaat in een U-vorm met enkele verstevigingsplaten. Het voorontwerp wordt weergegeven in afbeelding 3.7. De rollen van de rollenbaan kunnen eenvoudig aangekocht worden bij verschillende leveranciers. Door de eenvoud van het kader rondom de rollen kan deze zelf gefabriceerd worden.



Figuur 3.7: voorontwerp rollenbaan

3.4 Aandrukrollen

Voor te voorkomen dat de platen omhoog komen of over mekaar gaan glijden tijdens het aanduwen moeten er aandrukrollen voorzien worden.

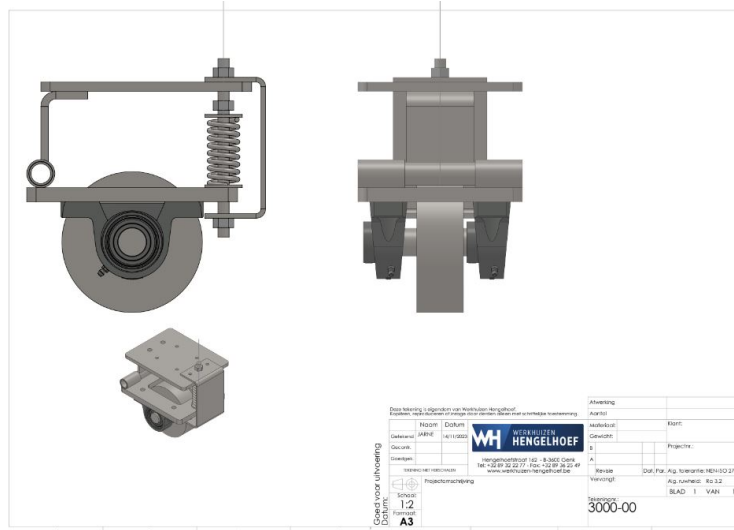
3.4.1 Morfologisch overzicht

Tabel 3.4: morfologisch overzicht aandrukrol

oplossing 1	oplossing 2	oplossing 3
<p>4 veren</p>	<p>1 veer</p>	<p>veren vervangen door cilinders</p>

3.4.2 Voorontwerp

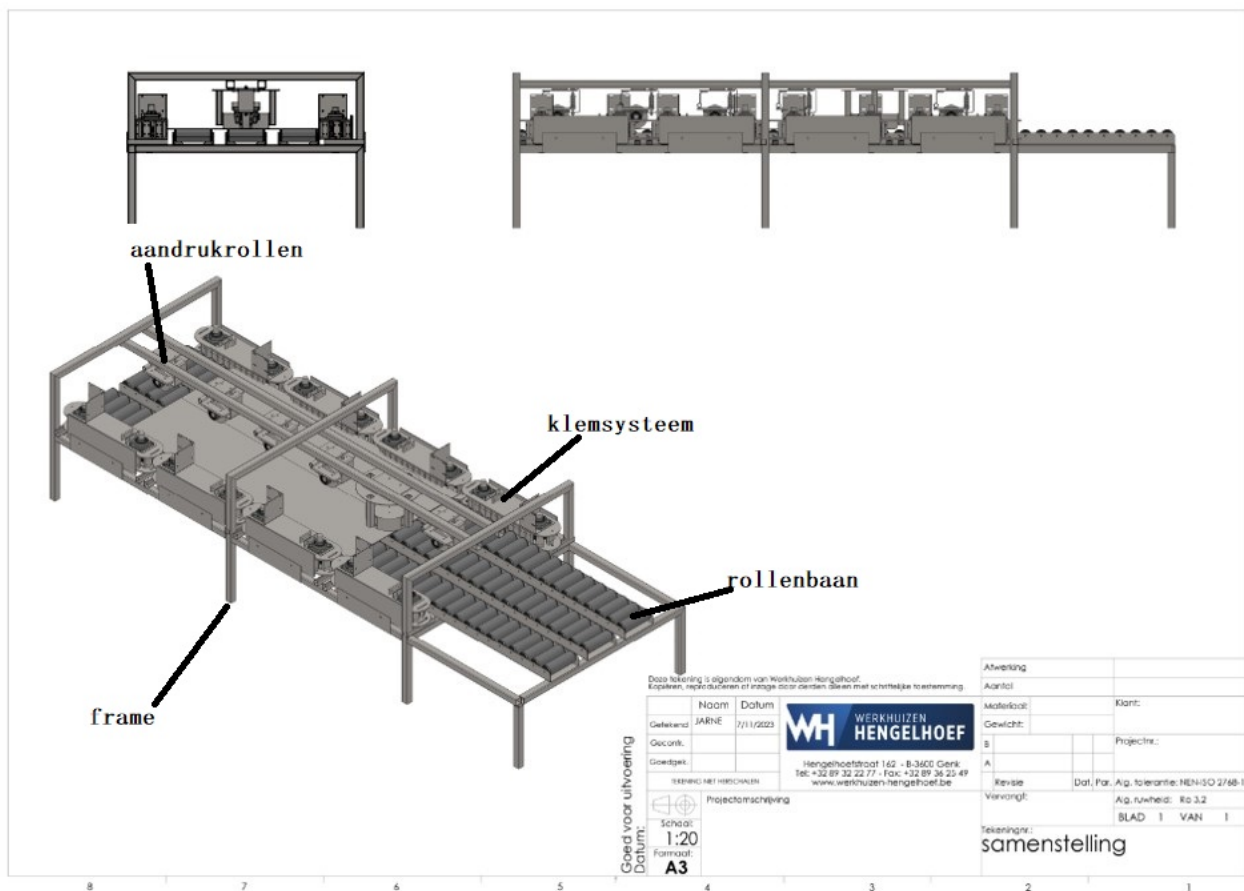
Er is gekozen voor het systeem met 1 veer. Doordat er voor een veer is gekozen in plaats van een hydraulische cilinder is er geen complexe aansturing nodig van de cilinders. Moesten de veren uiteindelijk tijdens het testen toch niet voldoen kan er nog steeds eenvoudig overgegaan worden naar de hydraulische cilinders. De keuze voor één veer in plaats van vier is gebeurd omdat de uitlijning van het geheel eenvoudiger is. Het uiteindelijk voorontwerp is zichtbaar in afbeelding 3.8



Figuur 3.8: voorontwerp aandrukrol

3.5 Geheel

In paragraaf 3.1 tot paragraaf 3.4 zijn de verschillende deelproblemen afzonderlijk besproken. Deze deelproblemen worden vervolgens samengevoegd tot één geheel. Het frame dat hiervoor nodig is, is zoals al de rest nog niet op sterkte berekend. Dit gebeurt in hoofdstuk 4 van deze masterproef.



Figuur 3.9: voorontwerp

Hoofdstuk 4

Berekeningen

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de berekeningen die nodig zijn voor deze masterproef.

4.2 Krachten op vacuümpot

De normaalkracht die de vacuümpot op de staalplaat uitoefent is afhankelijk van de oppervlak A en het drukverschil p . De druk wordt gegeven door:

$$p = \frac{F_{n,pot}}{A} \quad (4.1)$$

waarbij p de druk in Pa is, $F_{n,pot}$ de kracht in N en A de oppervlakte in m^2 .

Als we deze formule omvormen naar de kracht $F_{n,pot}$ bekomt men:

$$F_{n,pot} = p \cdot A \quad (4.2)$$

De oppervlakte van de vacuümpot heeft een cirkelvormige doorsnede. In het voorontwerp zijn er verschillende vacuümkamers voorzien. In deze berekeningen gaat er vanuit dat er één grote vacuümkamer is. Invulling in formule 4.2 levert op:

$$F_{n,pot} = p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4.3)$$

Door de vacuümpot onder bijna absoluut vacuüm te brengen, geldt hier een drukverschil van 1 bar. De specificaties van de pot zijn nog niet definitief, maar de diameter van de pot is geschat op 0,4m. Deze gegevens ingevuld in formule 4.3 resulteert in:

$$F_{n,pot} = 100000[Pa] \cdot \frac{\pi \cdot 0,4^2[m]^2}{4}$$

$$F_{n,pot} = 12566,4[N]$$

$$F_{n,pot} = 12,6[kN]$$

4.3 Aandrijfkracht voortbeweging platen

De aandrijfkracht van de plaat is afhankelijk van de wrijvingskracht $F_{w,pot}$ tussen de vacuümpot en de plaat. Deze kracht is afhankelijk van de wrijvingscoëfficiënt μ en de normaalkracht $F_{n,pot}$. De wrijvingskracht kan men bepalen met:

$$F_{w,pot} = F_{n,pot} \cdot \mu \quad (4.4)$$

De dynamische wrijvingscoëfficiënt μ tussen rubber en staal is 0,5 [27] en de normaalkracht $F_{n,pot}$ is berekend in formule 4.5 en bedraagt 12,6 [kN]. Als deze waarde wordt ingevuld in formule 4.4 bekomt men:

$$F_{w,pot2} = 12,6[kN] \cdot 0,5$$

$$F_{w,pot2} = 6,3[kN]$$

De kracht die nodig is voor de platen voortbewegen is 6,3 kN. De wrijvingskracht uitgeoefend door de kettingeleidingen aan weerskanten moeten de platen aandrijven. De bedoeling is dat twee transportkettingen (één aan elke kant) de plaat voortbewegen.

Er wordt een veiligheidsmarge genomen van 50 %. Dit is gedaan omdat de exacte afmetingen van de vacuümpot nog niet bekend zijn. Dit betekent dat aandrijfkracht van de platen minstens

$$F_{wpot} = 6,3[kN] \cdot 1,5$$

$$F_{wpot} = 9,45[kN]$$

moet zijn.

4.4 Krachten op transportketting

In deze paragraaf worden alle berekeningen die betrekking hebben op de transportketting berekend.

4.4.1 klemkracht platen

Doordat de stootkussens van de transportband van rubber zijn vervaardigd is de statische wrijvingscoëfficiënt μ_{stat} 1,2[←27]. Toch is hier verder gerekend met de dynamische wrijvingscoëfficiënt van μ 0,5. Deze keuze is gemaakt zodat de rubberen stootkussens zelfs in een dynamische toepassing de platen kunnen mee pakken. Formule 4.5 berekent de normaalkracht nodig op de stootkussens.

$$F_{n,stoot} = \frac{F_{wpot}}{\mu} \quad (4.5)$$

$$F_{n,stoot} = 18,9[kN]$$

Er wordt aan 2 kanten van de plaat geduwd. Hierdoor moet de normaalkracht per transportketting 9,45 kN bedragen. Afgerond naar boven bekomt men aan een kracht van 10kN.

De trekkracht waaraan de ketting blootgesteld is wordt veroorzaakt door de normaalkracht die nodig is om de platen aan te drijven.

De trekkracht waaraan de ketting blootgesteld wordt is de wrijvingskracht tussen de ketting en zijn geleiding plus de kracht veroorzaakt door de pot. De normaalkracht op de ketting is vastgelegd op 10kN. Dit is de kracht om de platen te kunnen voortbewegen onder de vacuümpot door. De wrijvingscoëfficiënt tussen ketting en zijn geleiding is 0,36 [27]. Als formule invullen bekomt men:

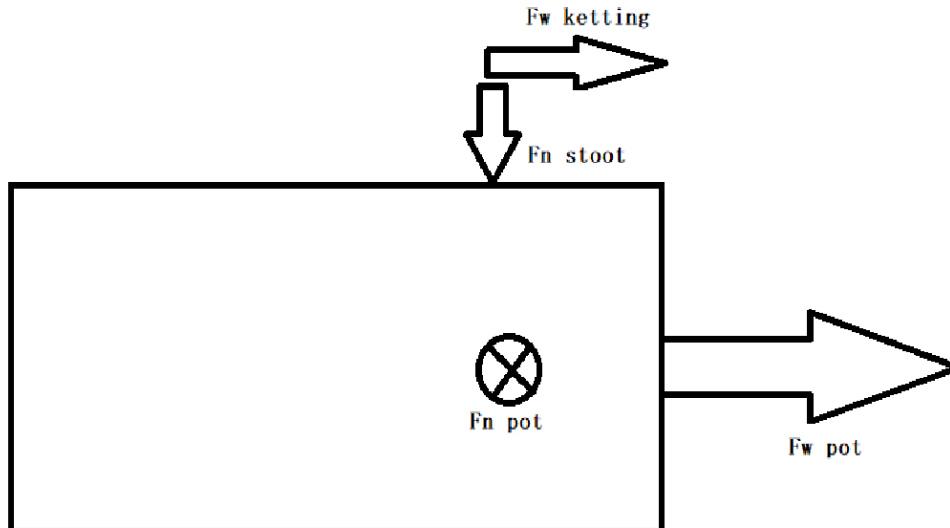
$$F_{W,ketting} = 10[kN] \cdot 0,36$$

$$F_{W,ketting} = 3,6[kN]$$

$$F_{ketting} = 3,6 + 5kN$$

$$F_{ketting} = 8,6kN$$

In afbeelding 4.1 is er een schematisch overzicht weergegeven. De kracht in de ketting is de som van F_w ketting en F_w pot.



Figuur 4.1: schematisch overzicht krachten

$$F_{ketting} = 3,6 + 5kN$$

$$F_{ketting} = 8,6kN$$

4.4.2 Kettingberekeningen V1 z=25

De ketting die gekozen is, is een ketting van het type 16B1 met opzetplaatjes. Deze ketting is gekozen omwille van de afmetingen en kan een trekkracht aan van 60kN. Deze ketting is dus sterk genoeg.

Aantal schakels

De steek p van deze ketting is 25,4 mm en de gewenste asafstand a_0 500mm. Het aantal tanden z van de kettingwielen is vrij gekozen en bedraagt 25. Door middel van formule 4.6 kan het benodigd aantal schakels x_0 berekend worden.

$$x_0 = 2 \cdot \frac{a_0}{p} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \left(\frac{z_2 - z_1}{2 \cdot \pi}\right)^2 \cdot \frac{p}{a_0} [27] \quad (4.6)$$

$$x_0 = 2 \cdot \frac{500}{25,4} + \frac{25 + 25}{2} + \left(\frac{25 - 25}{2 \cdot \pi}\right)^2 \cdot \frac{25,4}{500}$$

$$x_0 = 64,37$$

Deze waarde afronden bezorgt ons X.

$$X = 64$$

As afstand

Nu het exact aantal schakels bepaald is kan de daadwerkelijke as afstand a berekend worden.

$$a = \frac{p}{4} \cdot \left[\left(X - \frac{z_1 + z_2}{2} \right) + \sqrt{\left(X - \frac{z_1 + z_2}{2} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{z_2 - z_1}{\pi} \right)^2} \right] [27] \quad (4.7)$$

$$a = \frac{25,4}{4} \cdot \left[\left(64 - \frac{25 + 25}{2} \right) + \sqrt{\left(64 - \frac{25 + 25}{2} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{25 - 25}{\pi} \right)^2} \right]$$

$$a = 495,3[mm]$$

Koppel op de as

De trekkracht in de ketting is eerder berekend in paragraaf 4.4 en kwam uit op 8,6kN.

Het benodigd aandrijfkoppel kan men berekenen met:

$$T = F[N] \cdot r[m] \quad (4.8)$$

$$T = 8600[N] \cdot 0,1[m]$$

$$T = 860[Nm]$$

Minimale asdiameter

Het aandrijven van de as met de motor resulteert in een wringmoment op de as. Het gebruikte materiaal van de as is C45. Dit materiaal heeft een toelaatbare wringspanning τ van $210N/mm^2$ [27]. De transportketting kan 2 kanten op draaien. Dit komt dus neer op een wisselende belasting. Hierdoor moet er gerekend worden met een veiligheidsfactor van 1/3. De toelaatbare wringspanning τ_{max} bedraagt:

$$\tau_{max} = 0,7 \cdot \frac{1}{3} \cdot 210[N/mm^2]$$
$$\tau_{max} = 49[N/mm^2]$$

De minimale asdiameter kan berekend worden met:

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau_{max}}} [27] \quad (4.9)$$

Hierbij staat T voor het koppel in Nmm. Als de gekende gegevens ingevuld worden bekomt men:

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 860000}{\pi \cdot 49}}$$
$$d_{min} = 37,32mm$$

Om een as met een standaard maat te verkrijgen wordt gekozen voor een as met diameter 40mm.

Motorvermogen

De platen moeten kunnen bewegen met een snelheid tussen de 0,5 en 1m/s. De formule voor omtreksnelheid wordt gegeven in .

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (4.10)$$

Hierbij is d de diameter in m en n het toerental van de as in toeren per minuut.

als formule omgevormd wordt naar het toerental n bekomt men.

$$n = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d}$$

Voor omtreksnelheid van 0,5m/s bekomt men dan:

$$n = \frac{0,5 \cdot 60}{\pi \cdot 0,203}$$
$$n = 47tr/min$$

voor omtreksnelheid van 1m/s bekomt men:

$$n = \frac{1 \cdot 60}{\pi \cdot 0,203}$$

$$n = 94tr/min$$

Het vermogen P van de elektromotor kan berekend worden met formule

$$P = T \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (4.11)$$

Het vermogen van de motoren wordt berekend met een snelheid van de platen van 1m/s.

$$P = 860 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 94}{60}$$

$$P = 4921.82W$$

$$P = 5kW$$

Door een overbrenging van 1:30 te gebruiken wordt er gezorgd dat het aandrijftoerental 30X hoger kan zijn en het aangeleverd koppel 30X lager. Hierdoor moet er op zoek gegaan worden naar een motor van 3000 toeren per minuut. Het koppel van de motor moet minstens 16.67Nm bedragen.

Een motor van 5,5kW is geschikt voor dit koppel te kunnen leveren. Dit vermogen is ook geschikt om de transportketting aan te drijven.

4.4.3 Kettingberekeningen V2 z=15

Een betere oplossing is om een tandwiel te kiezen met minder tanden. Hierdoor is het benodigd koppel kleiner omdat de diameter kleiner is. De berekeningen gaan analoog aan hierboven

Aantal schakels

De steek p van deze ketting is 25,4 mm en de gewenste asafstand a_0 500mm. Het aantal tanden z van de kettingwielen zijn vrij gekozen en bedragen 15. Door middel van formule kan het benodigd aantal schakels x_0 berekend worden.

$$x_0 = 2 \cdot \frac{a_0}{p} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \left(\frac{z_2 - z_1}{2 \cdot \pi}\right)^2 \cdot \frac{p}{a_0} [27] \quad (4.12)$$

$$x_0 = 2 \cdot \frac{500}{25,4} + \frac{15 + 15}{2} + \left(\frac{15 - 15}{2 \cdot \pi}\right)^2 \cdot \frac{25,4}{500}$$

$$x_0 = 54,37$$

$$X = 54$$

Asafstand

Nu het exact aantal schakels bepaald is kan de daadwerkelijke asafstand a berekend worden.

$$a = \frac{p}{4} \cdot \left[\left(X - \frac{z_1 + z_2}{2} \right) + \sqrt{\left(X - \frac{z_1 + z_2}{2} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{z_2 - z_1}{\pi} \right)^2} \right] \quad [27] \quad (4.13)$$

$$a = \frac{25,4}{4} \cdot \left[\left(64 - \frac{15 + 15}{2} \right) + \sqrt{\left(64 - \frac{15 + 15}{2} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{15 - 15}{\pi} \right)^2} \right]$$

$$a = 495,3[mm]$$

Koppel op de as

De trekkracht in de ketting is berekend in paragraaf 4.4 en bedroeg 8,6 kN. De steekcirkeldiameter van het kettingwiel bedraagt 122,17 mm.

Het aandrijfkoppel kan men berekenen met:

$$\begin{aligned} T &= F[N] \cdot r[m] & (4.14) \\ T &= 8600[N] \cdot \frac{0,12217}{2}[m] \\ T &= 305,425[Nm] \end{aligned}$$

Minimale asdiameter

De minimale asdiameter kan berekend worden met:

$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau_{max}}} \quad [27] \quad (4.15)$$

Als de gekende gegevens ingevuld worden bekomt men:

$$\begin{aligned} d_{min} &= \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 305425}{\pi \cdot 49}} \\ d_{min} &= 31,66mm \end{aligned}$$

Voor een as met een standaard maat te verkrijgen wordt gekozen voor een as met diameter 35mm.

Motorvermogen

Het vermogen P van de elektromotor kan berekend worden met formule

$$P = T \cdot n \quad (4.16)$$

Het vermogen van de motoren wordt berekend met een snelheid van de platen van 1m/s. Het toerental moet wel staan in toeren per seconden

$$P = 305 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 94}{60}$$

$$P = 305 \cdot \frac{94}{60}$$

$$P = 3002,31W$$

Door een overbrenging van 1:30 te gebruiken wordt er gezorgd dat het aandrijftoerental 30X hoger kan zijn en het aangeleverd koppel 30X lager. Hierdoor moet er op zoek gegaan worden naar een motor met een toerental van 3000 toeren per minuut. Het koppel van de motor moet minstens 10.17Nm bedragen.

De motor die gekozen is, is een motor van 3kW met een nominaal koppel van 10,05 Nm. Dit koppel ligt in de buurt van het berekend koppel, maar net eronder. Door de extra veiligheidsmarges die ingebouwd zijn is deze keuze toch te verantwoorden.

4.5 Schroefdraad voor klemkracht

Om de klemkracht op de platen te genereren maakt men gebruik van twee trapezium schroefdraadspindels. Voor de berekening van deze spindels gaat gerekend worden dat één spindel de volledige normaalkracht uit formule 4.5 moet weerstaan. Dit omdat het exacte krachtenverloop niet gekend is.

4.5.1 Diameter

De trekspanning kan berekend worden met formule

$$\sigma_{druk} = \frac{F}{A_3} \quad (4.17)$$

Hierbij is F de kracht op de spindel in N en A_3 de kerndoorsnede van de schroefdraad. De kracht die inwerkt op de schroefdraad is berekend in paragraaf 4.3 en bedroeg 10 kN. Het gebruikte materiaal van de spindel is C45. De maximaal toegelaten drukspanning bedraagt 280 N/mm². Voor een veiligheidsmarge in te bouwen moet deze waarde worden vermenigvuldigd met 0,7 en het belastinggeval is een sprongbelasting dus deze waarde moet nog eens met 2/3 vermenigvuldigd worden.

$$A = \frac{F}{0,7 \cdot \frac{2}{3} \cdot \sigma_{druk}}$$

$$A = \frac{10000}{0,7 \cdot \frac{2}{3} \cdot 280}$$

$$A = 76,5mm^2$$

Een geschikte diameter zou 10 mm zijn. Toch wordt er gekozen voor een diameter van 16 mm.

Hierdoor kan de spindels een extra duwkracht aan.

4.6 Frame

Niet alleen de componenten afzonderlijk moeten nagerekend worden, ook het frame. Bij het frame wordt er gekeken naar het profiel waarop de klemming van de platen plaatsvind.

4.6.1 Buigmoment

Het maximaal buigmoment kan bepaald worden met formule 4.19. De kracht F is berekend in paragraaf 4.4.1 en bedraagt 10kN. De lengte van het profiel is 800mm. Dit is de afstand tussen de twee steunpoten. Bij de berekeningen gaat er van uit dat de kracht in het midden van het profiel plaatsvind.

$$Mb = F[N] \cdot s[mm] \quad (4.18)$$

$$Mb = 10000[N] \cdot 400[mm]$$

$$Mb = 4000000 Nmm = 4 \cdot 10^6 Nmm$$

4.6.2 Buigspanning

De buigspanning kan berekend worden via formule 4.19

$$\sigma_b = \frac{Mb \cdot y}{I_z} \quad (4.19)$$

Hierbij is y de afstand tot de neutrale vezel en I_z het traagheidsmoment. Dit traagheidsmoment voor een vierkante buis kan berekend worden met formule 4.20

$$I_z = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} - \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} \quad (4.20)$$

Als formule 4.19 en formule 4.20 samengevoegd en ingevuld worden voor een vierkant buis profiel van 100X100X5 bekomt men

$$\sigma_b = \frac{4 \cdot 10^6 \cdot 50}{\frac{100 \cdot 100^3}{12} - \frac{90 \cdot 90^3}{12}}$$

$$\sigma_b = 70 N/mm$$

De toelaatbare buigspanning voor een stalen S235 constructie bekomt men door:

$$\sigma_{bmax} = 180 \cdot 0,7 \cdot \frac{1}{3} N/mm$$

$$\sigma_{bmax} = 84 N/mm$$

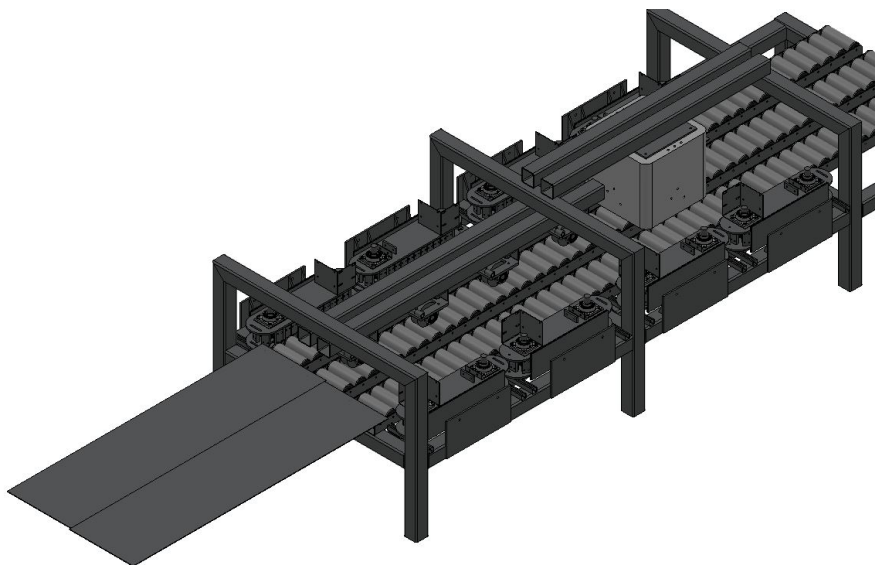
Een vierkant profiel van 100X100 wanddikte 5mm is dus sterk genoeg.

Hoofdstuk 5

Basis ontwerp voor engineering

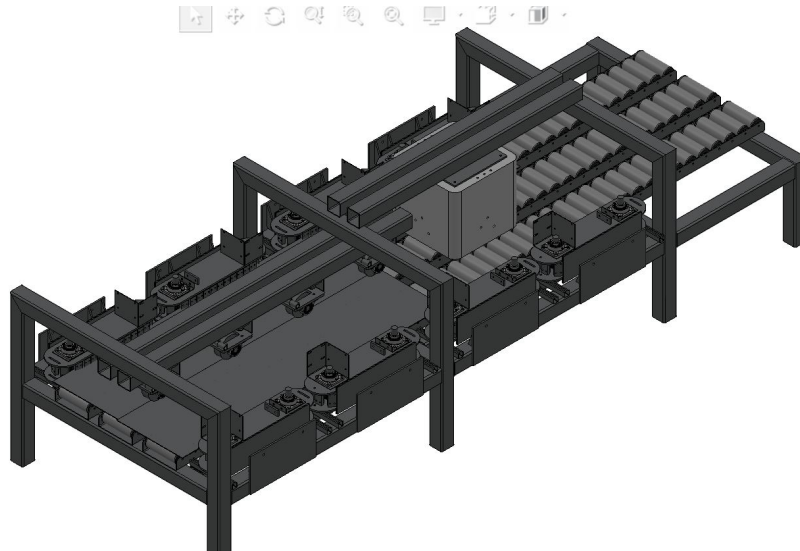
Het voorontwerp is reeds uitgewerkt in hoofdstuk 3 en de nodige berekeningen zijn uitgelegd in hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk worden de berekeningen toegepast op het voorontwerp en de werking van de testopstelling toegelicht.

Er worden twee vlakke platen met een dikte van 4mm en breedte van 500mm aangeleverd aan de testopstelling zoals zichtbaar in figuur 5.1. De lengte in dit voorbeeld is 2000m, deze lengte is onbelangrijk.



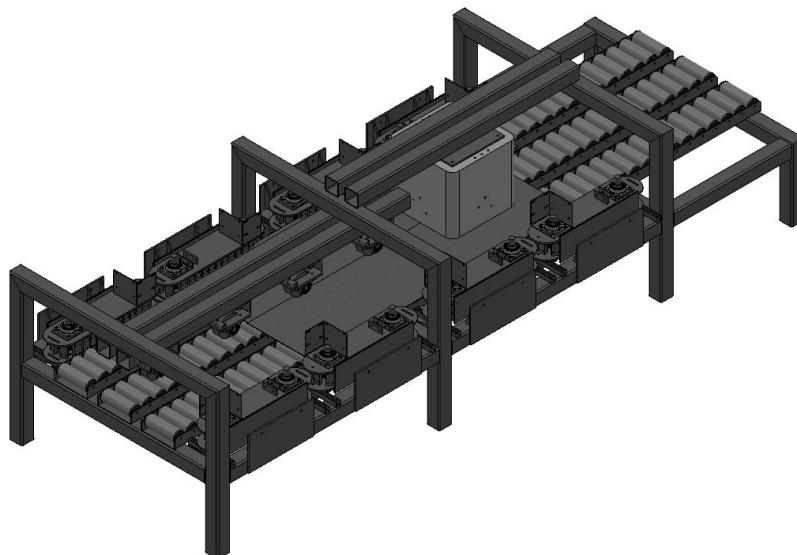
Figuur 5.1: platen aangeleverd

De platen worden samengedrukt door middel van aandrukkettingen, die opgespannen kunnen worden met draadstangen. Om ervoor te zorgen dat de spanning op de platen behouden blijft, worden enkele gegolfde veerringen gebruikt. De aandrukkettingen dienen tevens ook als aandrijving voor de platen. Waar de platen samenkomen zijn aandrukrollen voorzien. Deze rollen zorgen ervoor dat de plaat mooi vlak op de rollenbaan blijft liggen.



Figuur 5.2: platen aangedreven

De platen passeren vervolgens de vacuümpot. Deze pot bestaat uit verschillende kamers, waarbij het vacuüm groter wordt naarmate men verder naar het midden van de pot gaat. De pot maakt een draaiende beweging om het risico op het stick-slip-effect te verminderen. In het midden van de pot is een lens geplaatst, hierdoor gaat de laserstraal om effectief te laserlassen. Een verbeterpunt in het ontwerp is om de vacuümpot in de breedterichting van de platen te laten bewegen. Hierdoor moeten de platen minder goed uitgelijnd zijn. Zodat de laserstraal altijd perfect op de naad tussen de platen blijft. Dit verbeterpunt is niet geïntegreerd in dit ontwerp om de kostprijs te drukken tijdens het testen.



Figuur 5.3: platen onder vacuümpot

Hoofdstuk 6

Besluit

Het hoofddoel van deze masterproef was het uittekenen van een mechanisch voorontwerp, waarbij het mogelijk is om twee platen onder een vacuümkamer te laten bewegen. Deze doelstelling is succesvol gerealiseerd door gebruik te maken van innovatieve oplossingen, zoals de unieke manier waarop de platen worden voortbewogen en ondertussen geklemd. Ook de roterende beweging van de vacuümpot is een innovatieve manier om de wrijvingskracht te verminderen en de kans op stick-slip tot een minimum te beperken.

Het ontwerp biedt ruimte voor verdere verfijning en optimalisatie. Een mogelijke verbetering is om de vacuümpot in de breedte richting van de platen te laten bewegen. Dit maakt een nauwkeurige uitlijning van de laserstraal ten opzichte van de platen mogelijk. Door de vacuümpot ook in de lengterichting aan te sturen zouden er kleine snelheidsvariaties van de aandrijving kunnen opgevangen worden.

Daarnaast vereist de integratie van het laserlasapparaat nog verder uitwerking. Specifieke aandacht moet worden besteed aan het bepalen van het benodigde debiet om het hoog vacuüm te creëren rekening houdend met het lekverlies van de dichting. Ook het type lens en de afstand tot het las oppervlak moet nog extra aandacht krijgen.

De eerste testen van de vacuümpot kan met X-dichtingen gebeuren in combinatie van geleidingsringen. Deze aanpak maakt het mogelijk om snel en kostenefficiënt de resultaten te evalueren van de draaiende pot. Bovendien maakt deze methode het al mogelijk om een vacuüm te creëren en het ontwerp van de pot aan te passen zonder nieuwe dichting te moeten ontwerpen.

Literatuurlijst

- [1] 'Sectoren' Werkhuizen-hengelhoef.be <https://www.werkhuizen-hengelhoef.be/> (geraadpleegd op 27/09/2023)
- [2] 'Tijdreizen en zwaartekrachtgolven - wat albert einstein zo geweldig maakt' open universiteit <https://www.ou.nl/-/tijdreizen-en-zwaartekrachtgolven-wat-albert-einstein-zo-geweldig-maakt> (geraadpleegd op 27/09/2023)
- [3] 'Waarom de euregio maas-rijn? - einstein telescope,' Einsteintelecope.nl <https://www.einsteintelecope.nl/einstein-telescope/locatie/> (geraadpleegd op 26/09/2023).
- [4] 'Zwaartekrachtgolven gedetecteerd: een eerste blik op de botsing van twee zwarte gaten,' Nieuws.kuleuven.be <https://nieuws.kuleuven.be/nl/2016/zwaartekrachtgolven-gedetecteerd-een-eerste-blik-op-de-botsing-van-twee-zwarte-gaten> (geraadpleegd op 01/10/2023)
- [5] 'LIGO project begins new gravitational wave hunt' space.com <https://www.space.com/ligo-gravitational-wave-hunt-o4-campaign> (geraadpleegd op 01/10/2023)
- [6] Eos Wetenschap, "Einsteintelecoop 2: Welke technologie hebben we nodig?," YouTube. May 31, 2023. [Online]. <https://www.youtube.com/watch?v=PEf2W3XpkbA> (geraadpleegd 28/08/2023)
- [7] 'Einsteintelecoop.' Pomlimburg.be <https://pomlimburg.be/projecten/einsteintelecoop/> (geraadpleegd op 10/10/2023)
- [8] M. Angerhausen, G. Buchholz, J. Hoste, M. Purrio, A. Stahl, L. Stein, and P. Toussaint, "On-site production of quasi-continuous ultra-high vacuum pipes."
- [9] G. R. B. E. Romer, 'Lassen van metalen met hoogvermogen lasers,' Jan. 2009, <https://ris.utwente.nl/ws/files/5152940/PA.09.12Lassen-van-metalen-met-hoog-vermogen-lasers.pdf>[Online]. (geraadpleegd 12/10/2023)
- [10] U. Reisgen, W. N. Holtum, S. Jakobs, and S. Olschok, "Laser beam welding in mobile vacuum," ?, Jan. 2017, [Online]. Available: <http://publications.rwth-aachen.de/record/692293> (geraadpleegd op 12/10/2023)
- [11] "ERW Pipe — Electric Resistance Welded," Web Starter Kit. <https://www.nucorskyline.com/globalnav/products/pipe/erw> (geraadpleegd op 05/11/2023)
- [12] "Products, ERW — DSAW — SMLS pipe — Weiler Pipe llc.," Weiler Pipe Llc. <https://www.weilerpipe.com/products> (geraadpleegd op 05/11/2023)

- [13] “Total materia - articles.” <https://www.totalmateria.com/page>. (geraadpleegd op 15/11/2023)
- [14] “LSAW Steel Pipe Manufacturing Process JCOE - Permanent Steel Manufacturing Co.,Ltd,” Permanent Steel Manufacturing Co.,Ltd. <https://www.permanentsteel.com/newsshow/law-steel-pipe-manufacturing-process-jcoe.html> (geraadpleegd 16/11/2023)
- [15] G. Chatzopoulou, S. A. Karamanos, and G. E. Varelis, “Finite element analysis of uoe manufacturing process and its effect on mechanical behavior of offshore pipes,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 83, p. 13–27, 2016.
- [16] G. Chatzopoulou, S. A. Karamanos, and G. E. Varelis, “Finite element analysis of uoe manufacturing process and its effect on mechanical behavior of offshore pipes,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 83, p. 13–27, 2016.
- [17] No. 246 S. Y. B. Y. D. China Changsha, Hunan, “HME Roll Forming Production Line,HME Roll Forming Production Line,boiler tubes,seamless steel pipe,efw pipe.” <https://www.centerwaysteel.com/factorydetail/hme-roll-forming-production-line.html> (geraadpleegd 16/11/2023)
- [18] “SSAW Steel Pipe Manufacturing Process - Permanent Steel Manufacturing Co.,Ltd,” Permanent Steel Manufacturing Co.,Ltd. <https://www.permanentsteel.com/newsshow/ssaw-steel-pipe-manufacturing-process.html> (geraadpleegd 29/11/2023)
- [19] V. Patel, “Pipe manufacturing process for seamless welded pipe,” HardHat Engineer, Aug. 21, 2022. <https://hardhatengineer.com/pipe-class-piping-specifications-pipeend/pipe-manufacturing-process/> (geraadpleegd 30/11/2023)
- [20] Akb, “O-ring: alles wat u moet weten,” Sealution - Sealing Technology Engineers, Aug. 30, 2021. <https://sealution.eu/nl/kennisbank/o-ring> (geraadpleegd 30/11/2023)
- [21] “Wanneer gebruik je een X-ring?” <https://eriks.be/nl/know-how-hub/blogs/wanneer-gebruik-je-een-x-ring> (geraadpleegd 1/12/2023)
- [22] “oliekeerring” <https://shop.eriks.be/nl/afdichtingen-asafdichtingen-oliekeerringen/> (geraadpleegd 1/12/2023)
- [23] Sealtech, “SEALTECH, L’expert des joints hydrauliques (Benelux, Europe),” Sealtech, Jan. 27, 2022. <https://www.sealtech.be/> (geraadpleegd 1/12/2023)
- [24] “Labyrinth seals.” <http://www.kimman-seals.nl/artikelen/labyrinth-seals.html> (geraadpleegd 1/12/2023)
- [25] M. Vonk, “Stick-slip: van violen tot aardbevingen — the Quantum Universe,” The Quantum Universe, May 07, 2019. <https://www.quantumuniverse.nl/stick-slip-van-violen-tot-aardbevingen> (geraadpleegd 1/12/2023)
- [26] ‘stick slip’ wikipedia.be <https://nl.wikipedia.org/wiki/Stick-slip-effect> (geraadpleegd 15/12/2023)

- [27] Wilhelm Matek, H. Wittel, Hapax Vertalers (Amsterdam, and E. Al, Roloff/Matek machineonderdelen / Tabellenboek / Herbert Wittel, Dieter Jannasch, Joachim Voßiek, Christian Spura ; vertaling [uit het Duits]: Hapax Vertalers. Amsterdam: Boom, 2021.