

Samenvatting

In deze Bacheloropdracht wordt naar een oplossing gezocht voor het probleem dat er nog geen meetopstelling bestaat waarmee de temperatuursveranderingen gemeten kunnen worden in het corticale botweefsel van een pijpbeen dat geruimd wordt. Deze meetopstelling is nodig om het model te kunnen valideren dat deze temperatuursontwikkeling simuleert.

Een pijpbeen moet meestal geruimd worden wanneer deze zodanig gebroken is, dat de botstukken aan elkaar gezet moeten worden met een pen en schroeven. Deze pen wordt in de geruimde mergholte van het pijpbeen ingebracht. Dit ruimen wordt gedaan met een speciale boorkop, de ruimer. Hiermee wordt al het beenmerg en een deel van het corticale botweefsel weggehaald om de mergholte groter te maken.

Bij het ruimen ontstaat warmte die schadelijk kan zijn voor het herstel van de botbreuk. Om inzicht te krijgen in deze warmteontwikkeling moet de temperatuur gemeten kunnen worden tijdens het ruimen. Om dit ex vivo te kunnen doen is er een meetopstelling nodig met de volgende functies:

- Het bot vasthouden.
- Het bot verwarmen.
- Het bot uitlijnen.
- Het ruimafval opslaan.
- De temperatuur meten.
- Het torsiekoppel meten.
- De verkregen meetsignalen overdragen.
- De ontvangen meetsignalen vastleggen.

Iedere functie is een onderdeel van de meetopstelling, waarvoor verschillende mogelijkheden zijn onderzocht, geanalyseerd en beoordeeld. Aan de hand van deze beoordeling is een eindontwerp opgesteld.

De meetopstelling zal bestaan uit een vloeistofbak, gevuld met een saline zoutoplossing, die tot lichaamstemperatuur verwarmd kan worden. In de vloeistofbak wordt een houder geplaatst waarin een segment van een bot gefixeerd is met behulp van een legering met een laag smeltpunt. Deze legering wordt in de houder gegoten wanneer het bot de juiste locatie en oriëntatie heeft binnen deze houder. De legering stolt, waarna de thermokoppels in het bot bevestigd kunnen worden. De vloeistofbak is zelf met een montageplaat aan de digitale torsiekoppelsensor bevestigd.

Het bot kan hierna geruimd worden, waarbij het ruimafval in de vloeistofbak terecht komt en zo hygiënisch opgevangen wordt. De temperatuur en het torsiekoppel kunnen tijdens het ruimen continue gemeten worden waarbij deze meetgegevens direct naar de computer verstuurd worden. De opgeslagen meetgegevens kunnen later gebruikt worden voor het valideren van het model.

Het voorgestelde eindontwerp van de meetopstelling voldoet aan alle eisen en is daarmee geschikt voor dit onderzoek. Uit de analyse en beoordeling van de verschillende oplossingen blijkt daarnaast dat het ook de beste oplossing is voor dit type onderzoek.

Voorwoord

Toen ik voor het eerst de omschrijving van deze opdracht las had ik het gevoel dat die goed bij mijn Bachelor studie Advanced Technologie (AT) en mijn interesses zou passen. Bij AT wordt uitgebreid stilgestaan bij innovatieve ontwerpen, thermisch gedrag, materiaalkunde en modelleren. Het sluit ook goed aan bij mijn vervolgstudie, namelijk de Master studie Biomedical Engineering. Daarnaast zou ik het ook erg mooi vinden als de voorgestelde meetopstelling een bijdrage kan leveren aan het onderzoek naar de warmteontwikkeling tijdens het ruimen van botten.

Door het uitvoeren van deze opdracht heb ik een betere kijk gekregen op het ontwerpproces dat bij de ontwikkeling van producten komt kijken. Daarnaast heb ik een heleboel kennis opgedaan op bijvoorbeeld het gebied van botweefsels en hun mechanische en thermische eigenschappen en heb ik leren werken met SolidWorks 2011, het softwarepakket waarmee ik de 3-D modellen en technische tekeningen van de meetopstelling heb gemaakt.

Daarnaast wil ik graag van deze gelegenheid gebruik maken om de volgende mensen te bedanken:

- Edsko Hekman als mijn directe begeleider en tevens opdrachtgever.
- Bart Verkerke als de voorzitter van mijn bacheloropdracht commissie.
- Herman Hemmes als extern lid van mijn bacheloropdracht commissie.
- Willem van de Wijdeven voor het beantwoorden van mijn vragen over botcement.
- Martijn Wessels voor zijn hulp bij de torsiekoppelsensor.

En natuurlijk niet te vergeten: mijn ouders, familie, huisgenoten en vrienden, voor hun aanmoedigingen, oprechte interesse en soms kritische vragen, bedankt!

- Paul Straathof -

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	1
Voorwoord.....	2
Inhoudsopgave.....	3
Lijst van figuren.....	5
Lijst van tabellen	5
Lijst van vergelijkingen	5
Lijst van bijlagen.....	5
Verklarende woorden- en begrippenlijst	6
Hoofdstuk 1 – Introductie	7
1.1 Inleiding	7
1.2 Opbouw van botten, isotropie en diversiteit	7
1.3 Fracturen, verpenen, ruimen, en irrigatie.....	10
1.4 Temperatuursontwikkeling en stroming in bot en ander weefsel	11
1.5 Korte- en langetermijnschade door hoge temperaturen.....	12
1.6 Conclusie	14
Hoofdstuk 2 – Het model	15
2.1 Inleiding	15
2.2 De warmtevergelijkingen	15
2.3 Invoerparameters.....	16
2.4 Aannames.....	16
2.5 Het model valideren.....	16
Hoofdstuk 3 – De probleemomschrijving.....	17
Hoofdstuk 4 – De ontwerpdoelen	18
Hoofdstuk 5 – Functieanalyse van de meetopstelling.....	19
5.1 Overzicht van de functies	19
5.2 Samenhang tussen de functies.....	19
Hoofdstuk 6 – Overzicht van de eisen.....	20
6.1 Eisen aan de bevestiging van het bot.....	20
6.2 Eisen aan de verwarming van het bot.....	21
6.3 Eisen aan het uitlijnen van het bot.....	21
6.4 Eisen aan het opslaan van het ruimaafval.....	22
6.5 Eisen aan het meten van de temperatuur	22

6.6	Eisen aan het meten van het torsiekoppel.....	23
6.7	Eisen aan het overdragen van de meetsignalen	23
6.8	Eisen aan het vastleggen van de meetsignalen.....	24
6.9	Overige eisen.....	24
Hoofdstuk 7 – Mogelijke oplossingen.....		27
7.1	Morfologisch overzicht.....	27
7.2	Oplossingen voor het bevestigen van het bot	28
7.3	Oplossingen voor het verwarmen van het bot.....	32
7.4	Oplossingen voor het uitlijnen van het bot.....	33
7.5	Oplossingen voor het opvangen van het ruimafval	37
7.6	Oplossingen voor het meten van de temperatuur.....	38
7.7	Oplossingen voor het meten van het torsiekoppel.....	40
7.8	Oplossingen voor het overdragen van de meetsignalen.....	41
7.9	Oplossingen voor het vastleggen van de meetsignalen.....	42
7.10	Overige oplossingen	43
Hoofdstuk 8 – Voorlopige meetopstelling		45
8.1	Morfologisch overzicht gesorteerd	45
8.2	Het bot bevestigen en uitlijnen	46
8.3	Het bot verwarmen en het ruimafval opvangen.....	47
8.4	De temperatuur meten	47
8.5	Het torsiekoppel meten	48
8.6	De signalen versturen en opslaan	48
8.7	Overige	48
Hoofdstuk 9 – Voorgestelde meetopstelling.....		50
9.1	Overzicht	50
9.2	Ingegoten Botsegment	50
9.3	Uitgelijnd botsegment.....	51
9.4	Aangebrachte thermokoppels.....	52
9.5	Bevestigde torsiekoppelsensor	52
Hoofdstuk 10 – Conclusies en discussie		53
Bronnen.....		54
Bijlagen.....		56

Lijst van figuren

Figuur 1. Een opengewerkt pijpbeen (a) en een doorsnede van een bovenbeen (b).....	7
Figuur 2. De diafysale opbouw van een pijpbeen.	8
Figuur 3. De opbouw van osteonen uit de cortex van een pijpbeen.	9
Figuur 4. Een intramedullaire pen (a) en een röntgenfoto van een verpende fibula met bevestigingsschroeven (b).....	10
Figuur 5. Het blokschema van de samenhang tussen de functies van de meetopstelling.....	19
Figuur 6. Een eenvoudig gietsysteem, opengewerkt.	29
Figuur 7. Schematische weergave van twee verschillende klemsystemen in (a) en (b).	30
Figuur 8. Overzicht van drie mogelijke manieren om het bot met schroeven te bevestigen in (a), (b) en (c).....	31
Figuur 9. Bepaling van het optimale referentiepunt in (a) en een extreme situatie in (b).	34
Figuur 10. Bepaling van de optimale ruimtes, waarbij as 3 de meest optimale as is om langs te ruimen.	35
Figuur 11. De methodes voor grof verplaatsen in (a), gedeeltelijk opengewerkt en voor grof kantelen in (b), opengewerkt.	36
Figuur 12. De methodes voor fijn verplaatsen in (a) en fijn kantelen in (b).	37
Figuur 13. De verschillende mogelijkheden voor het plaatsen van de thermokoppels met het zijaanzicht in (a) en het bovenaanzicht in (b). De richtingen zijn: (r) voor radiaal, (t) voor tangentieel en (x) voor axiaal.	39
Figuur 14. De bovenzijde van een Mini45 torsiekoppelsensor.....	48
Figuur 15. Het voorgestelde eindmodel, opengewerkt.....	50
Figuur 16. Een ingegoten botsegment in de giethouder, opengewerkt.	50
Figuur 17. Een uitgelijnd en ingegoten botsegment met uitlijnsysteem nog bevestigd op de giethouder, opengewerkt in (a). Het botsegment balanceert op de punt in de giethouder, opengewerkt in (b).	51
Figuur 18. De positie van de magneten ten opzichte van elkaar, met de noord- en zuidpolen tegen elkaar.....	52
Figuur 19. Plaatsing en bevestiging van het thermokoppel in het corticale deel van het bot. Zijaanzicht in (a) en bovenaanzicht in (b).....	52
Figuur 20. De torsiekoppelsensor, bevestigd aan de montageplaat, met bouten voor de bevestiging aan de vloestofbak.....	52

Lijst van tabellen

Tabel 1. Morfologisch overzicht van de oplossingen per functie en subfunctie.....	27
Tabel 2. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van gietmaterialen.	28
Tabel 3. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van legeringen als gietmateriaal.	29
Tabel 4. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van lijmsorten.	31
Tabel 5. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van bevestigingssystemen.....	32
Tabel 6. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van vloeistoffen voor het warmtebad.	33
Tabel 7. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende verwarmingssystemen.	33
Tabel 8. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende systemen voor het richten van het bot bij het uitlijnen.	36
Tabel 9. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende systemen om het bot te verplaatsen en te kantelen.	37
Tabel 10. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende opvangsystemen voor het ruimaafval.	38
Tabel 11. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van geleidende materialen voor het bevestigen van de sensoren.	40
Tabel 12. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende temperatuursensoren.....	40
Tabel 13. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende methodes voor het meten van het torsiekoppel.	41
Tabel 14. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende systemen om de meetsignalen over te dragen.....	42
Tabel 15. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende oplossingen voor het vastleggen van de meetsignalen.....	42
Tabel 16. Morfologisch overzicht van de oplossingen per functie, gesorteerd op basis van de analyses en beoordelingen.	45

Lijst van vergelijkingen

Vergelijking 1. De gebruikte warmtevergelijking uit het model.	15
---	----

Lijst van bijlagen

Bijlage 1. Technische tekeningen van de gehele meetopstelling	56
Bijlage 2. Technische tekeningen van het bevestigingssysteem	57
Bijlage 3. Technische tekeningen van het verwarmingssysteem.....	58
Bijlage 4. Technische tekeningen van het uitlijnsysteem	59
Bijlage 5. Technische tekeningen van de torsiekoppelsensor	60
Bijlage 6. Technische tekeningen van de montageplaat	61
Bijlage 7. Eigenschappen van de legeringen	62

Verklarende woorden- en begrippenlijst

Anatomische begrippen

Cavum medullare
Corticaal bot
Distaal
Dorsaal
Endosteum
Epifyse
Ex vivo
Femur
Foramina
Humerus
In vitro
In vivo
Intramedullair
Isthmus
Necrose
Ossa longa
Periosteum
Proximaal
Spongieus bot
Tibia
Trabecula
Ulna
Vascularisatie

Mergholte
Compact bot
Het verst verwijderd van het midden
Aan de achterkant
Binnenbeenvlies
Eindeel van een pijpbeen
Buiten het lichaam
Dijbeen
Openingen in bot voor bloedvaten en zenuwen
Opperarmbeen
Onder laboratorium omstandigheden
In of op het levende lichaam zelf
In de mergholte
Vernauwing of smalste deel van de mergholte
Het afsterven van weefsel
Pijpbeenderen
Beenvlies
Naar het midden toe gericht
Sponsachtig bot
Scheenbeen
Steunend botweefselbundeltje
Ellepijp
Doorgroeiing met bloedvaten

Eenheden

g
Hz
J
K
kg
m
mm
rad
s
W
°
%
°C

gram ($1 \text{ g} = 1 \times 10^{-3} \text{ kg}$)
hertz ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$)
joule
kelvin
kilogram ($1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$)
meter ($1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$)
millimeter ($1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$)
radialen ($1 \text{ rad} \approx 57,2958^\circ$)
seconde
watt ($1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$)
graad ($1^\circ \approx 0,0175 \text{ rad}$)
procent
graad/graden Celsius ($0^\circ \text{C} = 273,15 \text{ K}$)

Natuurkundige begrippen

Anisotroop
Soortelijke warmte
Thermische geleidbaarheid
Temperatuurvereffeningscoëfficiënt
Warmtecapaciteit

De fysische eigenschappen zijn in verschillende richtingen ongelijk
De hoeveelheid energie die nodig is om een bepaalde massa met 1°C te verwarmen, in $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
De mate waarin warmte afgevoerd kan worden, in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Beschrijft de snelheid waarmee een bepaald oppervlak in temperatuur kan veranderen, in $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
De hoeveelheid energie die nodig is om iets met 1°C te verwarmen, in $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$

Symbolen

∅

doorsnede/diameter

Hoofdstuk 1 – Introductie

1.1 Inleiding

Wanneer personen botbreuken oplopen worden deze fracturen meestal vastgezet met pennen en schroeven. Bij een gebroken pijpbeen wordt een dergelijke pen in de mergholte ingebracht nadat deze uitgeboord is. Dit proces wordt ruimen genoemd, omdat de mergholte leeggehaald en vergroot wordt. Bij het ruimen ontstaat er warmte in het bot door de wrijving tussen het botweefsel en de kop van de ruimer. Bij een te grote warmteontwikkeling raakt het botweefsel beschadigd, waardoor het genezingsproces van de fractuur minder goed zal verlopen.

Het doel van deze bacheloropdracht is dan ook om een meetopstelling te ontwerpen die het voor het eerst mogelijk maakt om die warmteontwikkeling in kaart te brengen. Er bestaat al een computermiddel dat deze warmteontwikkeling kan simuleren. Dit model is ontwikkeld door E. Hekman aan de Universiteit Twente en staat beschreven in Hoofdstuk 2. Dit model moet echter nog gevalideerd worden, wat met behulp van metingen aan deze opstelling mogelijk moet worden.

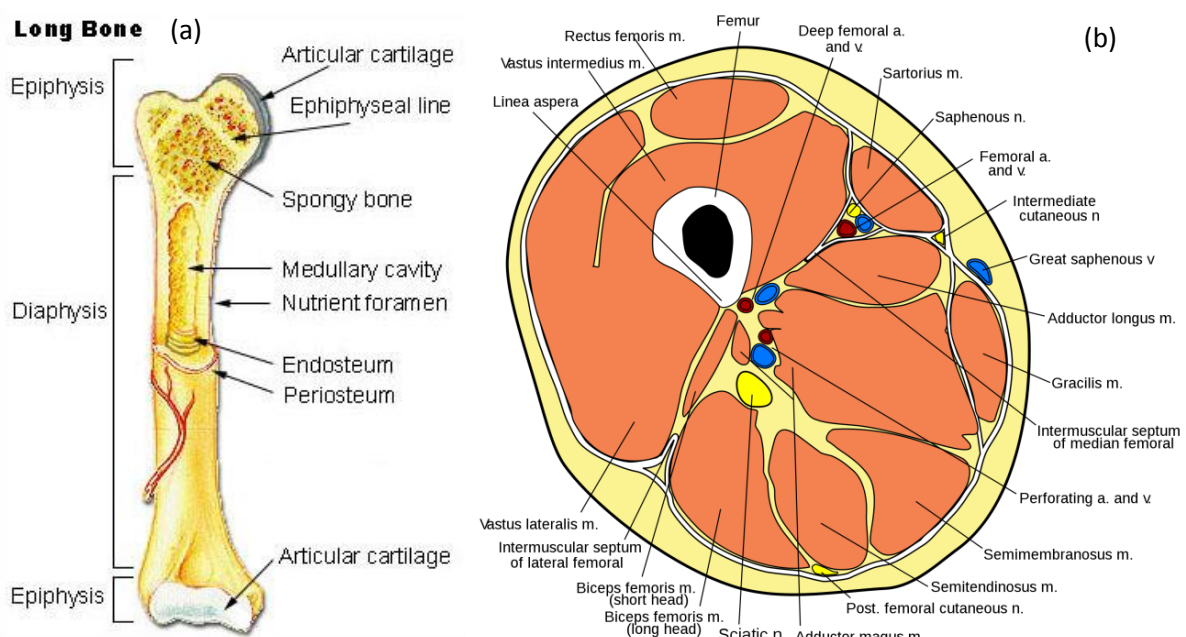
1.2 Opbouw van botten, isotropie en diversiteit

1.2.1 Algemeen

Het menselijk skelet bestaat uit een groot aantal pijpbeenderen, de ossa longa, waaronder femur, tibia, humerus en ulna. Al deze botten zijn volgens een zelfde systeem opgebouwd. Dit systeem kan in verschillende niveaus ingedeeld worden, van macroscopisch naar microscopisch. (1)

1.2.2 Het gehele pijpbeen

Pijpbeenderen bestaan altijd uit de volgende vijf onderdelen: 2 einddelen, of epifysen, 1 middendeel, de diafyse of corpus. Deze worden met elkaar verbonden via de metafyse, het sponsachtige bot. Ieder pijpbeen heeft een proximale, of naar het lichaam gerichte, epifyse en een distale, of van het lichaam af gerichte, epifyse. (2) In Figuur 1a zijn de verschillende delen te zien.



Figuur 1. Een opengewerkt pijpbeen (a) en een doorsnede van een bovenbeen (b).

In dit onderzoek ligt de focus bij de diafyse die de lengteas vormt van een pijpbeen. Spieren, membranen, gewrichten, zenuwen, lymfevaten en bloedvaten perforeren het bot, omvatten het, of zitten er aan vast, zoals te zien in Figuur 1b.

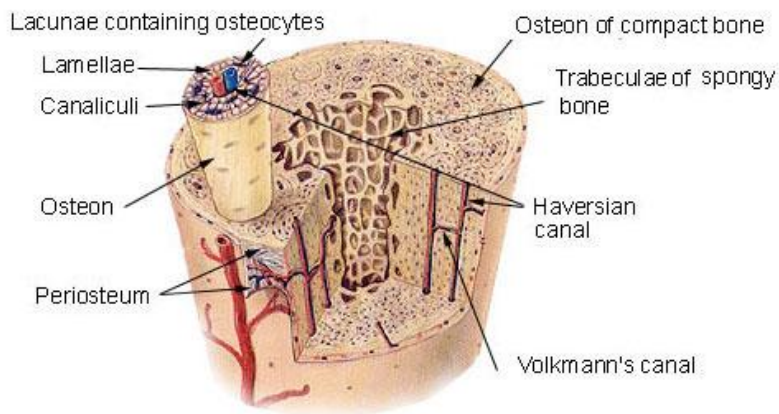
1.2.3 Diafysale opbouw en geometrie

De opbouw van de diafyse is nagenoeg hetzelfde over de gehele lengte. Het is van binnen naar buiten samengesteld uit de volgende 5 concentrisch opgebouwde, anisotrope weefsels (3):

- Geel beenmerg in de mergholte, het cavum medullare
- Endosteum, het beenvlies dat de mergholte bekleedt
- Spongieus bot, een dunne laag sponsachtig bot
- Corticaal bot, een compacte laag bot
- Periosteum, het beenvlies aan de buitenkant van een bot

In Figuur 2 zijn de verschillende weefsels te zien waaruit de diafyse opgebouwd is.

Compact Bone & Spongy (Cancellous Bone)



Figuur 2. De diafysale opbouw van een pijpbeen.

Deze opbouw verandert wanneer de diafyse overgaat in de metafyse. Het gele beenmerg en het endosteum gaan daar over in spongieus bot. Op de gewrichtsvlakken van de epifyse verandert het periosteum in hyalien kraakbeen. De geometrie en dichtheid van de verschillende weefseltypes hangen af van het soort epifyse. (2)

De geometrie van de femorale diafyse kan als een cilinder met een zandlopervormige holte beschouwd worden, maar deze vereenvoudiging kent beperkingen:

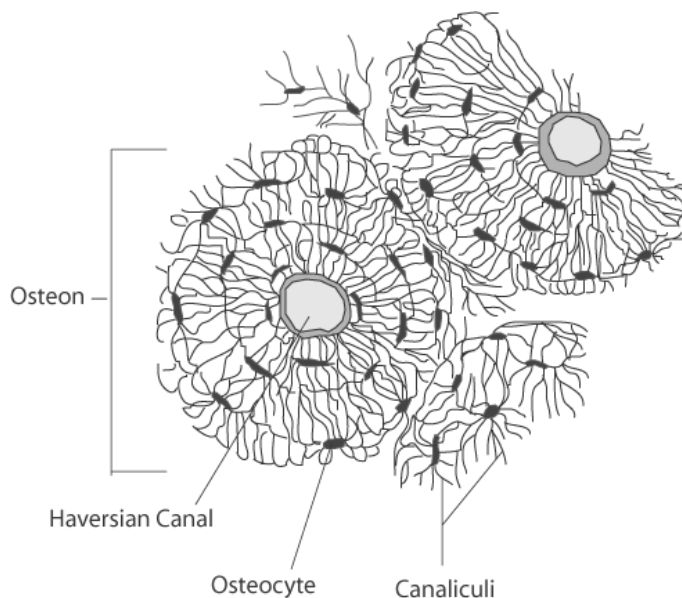
- De linea aspera is een verdikking van het corticale bot en bevindt zich aan de dorsale zijde van het femur. Distaal gaat de linea aspera over in een driehoekig afgeplat stuk bot, de facies poplitea. (2)
- Het femur is licht gekromd, waardoor het corticale bot een hoek maakt met het snijvlak, loodrecht op de lengteas. (4) Deze hoek zorgt er voor dat dikte van het corticale bot varieert, evenals de diameter van de mergholte.
- De meeste pijpbeenderen hebben een isthmus, de locatie waar de mergholte de kleinste diameter heeft. Onderzoek heeft aangetoond dat de locatie van de isthmus erg kan verschillen, Rubin et al. kwamen op een locatieverschil van 78 mm langs de lengteas van de diafyse. (5)

- Wanneer de doorsnede van de diafyse van een femur in een linker en rechter helft opgedeeld wordt, kunnen er significante verschillen gevonden worden in de corticale dikte en de radiale breedte van de mergholte. De scheidslijn tussen links en recht loopt langs de anterior-posterior as door de linea aspera, een verdikking van het corticale bot. (6)
- Zoals in alle pijpbeenderen, bevinden zich in het femur ook foramina, die doorlopen tot aan de mergholte. De locatie en geometrie van deze foramina verschillen erg per individu. (7)

Deze en andere inter-individuele verschillen in geometrie worden ook gevonden bij de andere pijpbeenderen. Dergelijke verschillen worden veroorzaakt door leeftijdsverschil, maar ook botaandoeningen, geslacht, erfelijke aanleg, ongevallen, lichaamsgewicht, beroep en etniciteit bepalen de uiteindelijke opbouw van de individuele botten. (6)

1.2.4 Weefselopbouw

Corticaal bot bestaat uit Haversiaanse systemen, ook wel osteonen genoemd. Een enkel osteon is opgebouwd uit langgerekte, concentrische lamellen, met in het centrum daarvan het centrale, of Haversiaanse, kanaal. Dit kanaal is bedekt met endosteum en bevat bloedvaten, lymfevaten en zenuwen. Ze zijn onderling verbonden met de perforerende, of Volkmanns, kanalen, die loodrecht op de Haversiaanse kanalen staan. Vanwege hun cilindrische vorm, bevindt er zich een ruimte tussen de osteonen onderling, welke wordt opgevuld door interstitiële osteonen. Deze 2 typen osteonen worden bij elkaar gehouden door een derde type, de perifere osteonen. (3) In Figuur 3 is een weergave te zien van de verschillende delen waaruit osteonen bestaan.



Figuur 3. De opbouw van osteonen uit de cortex van een pijpbeen.

Spongieus bot is opgebouwd uit trabeculae, die weer zijn opgebouwd uit lamellen en osteocyten. De holtes tussen de trabeculae zijn opgevuld met rood beenmerg. Rood beenmerg bevat vetcellen en cellen die nieuwe bloedcellen aanmaken en het daarbij behorende netwerk van bloedvaten. Ook is het beenmerg betrokken bij het lymfestelsel. (3)

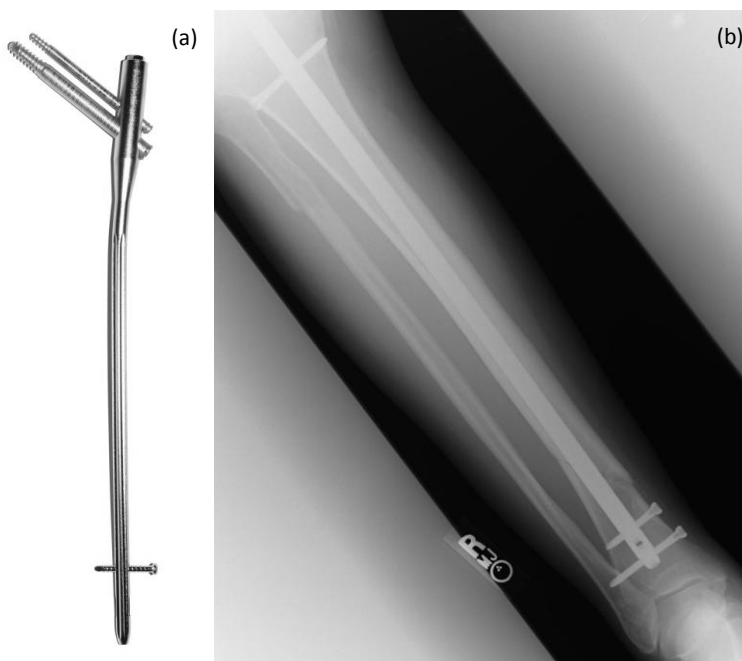
Endosteum en periosteum bevatten osteoblasten en osteoclasten. De buitenste laag van het periosteum is versterkt met compact en onregelmatig bindweefsel. De binnenkant van het periosteum zit verbonden met het corticale bot, door middel van perforerende collageenvezels, ook wel Sharpey's vezels genoemd. (3)

1.2.5 De bouwstenen

Er zijn uiteindelijk twee typen bouwstenen: organische en anorganische. Ongeveer 65% van de botmassa bestaat uit anorganische hydroxyapatieten, overwegend calciumfosfaat kristallen. De lamellen zijn opgebouwd uit collageenvezels die met deze dicht op elkaar gepakte kristallen zijn omwonden. De organische bouwstenen bestaan uit de volgende 4 celtypen: osteogene cellen, osteoblasten, osteoclasten en osteocyten. Wanneer de osteogene cellen veranderen in osteoblasten, gaan ze botweefsel produceren, waarna ze ingekapseld raken en zo osteocyten vormen, de volwassen botcellen. Osteoclasten zijn botafbrekende cellen. Behalve deze cellen is er ook nog het osteoïd: een eiwitmengsel, bestaande uit proteoglycanen, glycoproteïnen en type-1 collageen dat wordt uitgescheiden door osteoblasten. (3)

1.3 Fracturen, verpenen, ruimen, en irrigatie

Bij pijpbeenfracturen kunnen een aantal verschillende technieken worden gebruikt om deze te helpen genezen. Deze technieken zorgen er voor dat de verschillende stukken bot ten opzichte van elkaar niet meer kunnen bewegen. Het botweefsel krijgt zo de kans om weer aan elkaar te groeien. De uiteindelijk gekozen techniek hangt af van het type breuk, de toestand en geschiedenis van de patiënt en het betreffende pijpbeen. Bij dit onderzoek wordt gekeken naar het ruimen, een techniek waarbij de mergholte uitgeboord en groter gemaakt wordt. Hierna wordt een intramedullaire pen, te zien in Figuur 4a, in de mergholte gebracht, dit heet verpenen. Het ruimen en verpenen wordt voornamelijk toegepast bij fracturen aan het femur, de tibia, de humerus en de ulna. (8) (9)



Figuur 4. Een intramedullaire pen (a) en een röntgenfoto van een verpende fibula met bevestigingsschroeven (b).

De introductie van de intramedullaire pen wordt toegeschreven aan Gerhard Küntscher, die er over publiceerde in 1939. Hij beschreef 77 gevallen waarbij er gebruik was gemaakt van een intramedullaire pen. (10) Om deze gemakkelijker te kunnen plaatsen introduceerde hij het handmatig ruimen in 1950 en het gemotoriseerde ruimen in 1955. In 1960 werd irrigatie en afzuiging geïntroduceerd door Lorenzi, Olerud en Dankwardt-Lillieström, welke ondanks goede resultaten nog nauwelijks in de praktijk gebruikt worden. (11)

Het ruimen en verpennen gaat bij het femur als volgt te werk: er wordt een klein gat geprikt met een priem, door de epifyse, tot aan de mergholte. Dit gat heeft een diameter die groot genoeg is om een voerdraad in de mergholte te drukken. Deze voerdraad zorgt ervoor dat de kop van de ruimer, die met een flexibele as aan een aandrijving zit, goed de kromming van het femur kan volgen. Als de voerdraad op zijn plek zit, wordt het gat in de epifyse en de mergholte verder vergroot, door de ruimerkop in het botweefsel te drukken. Dit gebeurt meestal in stappen, met een steeds grotere kop, totdat de grootte van het gat zodanig is, dat de gewenste pen geplaatst kan worden. Wel moet worden opgemerkt dat door de anisotrope mechanische eigenschappen van het corticale botweefsel, de uiteindelijke diameter van het geruimde kanaal ongelijk aan de diameter van de ruimerkop zal zijn. (12) De ingebrachte pen wordt op meerdere plekken aan het bot vastgeschroefd voor extra stabiliteit en draagvermogen. In Figuur 4b is het eindresultaat van een dergelijke operatie te zien.

Bij sommige experimentele systemen kan, via de voerdraad, de mergholte tijdens het ruimen ook geïrrigeerd worden. De irrigatievloeistof, met daarin botsplinters, bloed, merg en ander weefsel wordt afgezogen en opgevangen. (13)

Behalve de thermische complicaties die optreden tijdens en na het ruimen, zoals beschreven in Paragraaf 1.5, zijn er nog andere complicaties bij geruimd of ongeruimd verpennen:

- Door het vergroten van de mergholte wordt het corticale bot lokaal dunner. De afname in sterkte wordt echter opgevangen doordat een grotere intramedullaire pen gebruikt kan worden. In verband met mogelijke fractures bij het vastschroeven van het bot aan de pen, moet er wel rekening gehouden worden met het dunner geworden corticale bot. (13)
- De corticale en diafysale bloedvaten worden kapot gemaakt, waardoor de doorbloeding lokaal verstoord raakt. (13)
- Bij opereren in het algemeen, en implanteren in het bijzonder, heeft de patiënt te maken met een vergrote kans op infecties.
- Door de toenemende druk tijdens het ruimen of verpennen, wordt de inhoud van de mergholte, vet en botsplinters, gedeeltelijk in de bloedbaan gedrukt. De hierdoor gevormde embolieën verstoren lokaal de doorbloeding en worden door de rest van de bloedbaan getransporteerd. Dit verhoogt de kans op complicaties elders in het lichaam, met name de kans op longembolieën. Aangepaste ruimerkoppen en nieuwe technieken zullen hier wellicht verandering in kunnen brengen. (12) (14)

1.4 Temperatuursontwikkeling en stroming in bot en ander weefsel

Door de betrokkenheid van veel verschillende weefsels, met wisselende geometrieën en thermische en mechanische eigenschappen, is de stroming en ontwikkeling van warmte in het botweefsel zeer complex te noemen. Toch zijn er slechts twee mechanismen die een rol spelen bij de warmteontwikkeling tijdens het ruimen (15) (16):

- De lokale vervormingen van het weefsel door de druk die de ruimer er op uitoefent.
- Wrijving tussen de ruimerkop en het weefsel waar het mee in aanraking komt.

Baumgart et al. hebben aangetoond dat er slechts een zeer geringe hoeveelheid warmte ontstaat wanneer het botweefsel wordt uitgerekt totdat het scheurt. De wrijving tussen de ruimerkop en het weefsel is dan ook de hoofdoorzaak van de warmteontwikkeling en wordt beïnvloed door de volgende factoren (15):

- De scherpheid van de ruimer.
- De kracht die uitgeoefend wordt door de chirurg op de ruimer.
- De dynamische wrijvingscoëfficiënt tussen het metaal van de ruimer en het bot.
- De tijd waarin geruimd wordt.
- De thermische geleidbaarheid van de ruimer.
- De draaisnelheid van de ruimerkop.
- De specifieke warmtecapaciteit van de ruimer.
- De buitenste diameter van de ruimer.
- De dichtheid van de ruimer.

Nadat de warmte is ontstaan, verplaatst het zich van de warme gebieden naar de koude gebieden. Dit kan op de 4 klassieke manieren gebeuren:

- Geleiding door de verschillende weefsels en materialen heen.
- Straling van warmer materiaal naar kouder materiaal.
- Convectorie, zoals de stroming van bloed en irrigatievloeistof.
- Massatransport, zoals de verplaatsing van warmte via botsplinters.

Omdat het ruimen de normale doorbloeding lokaal verstoort, zal via de bloedvaten in de mergholte geen of zeer weinig warmte afgevoerd kunnen worden. De bloedvaten in het corticale weefsel en het periosteum zullen wel warmte afvoeren, tenzij deze ook beschadigd raken door het ruimen of al beschadigd waren vanwege de fractuur.

Het metaal van de ruimerkop kan de ontstane warmte beter afvoeren waardoor de meeste warmte dan ook in eerste instantie via de ruimerkop wegstroomt. Wanneer de ruimerkop is opgewarmd zal het warmtetransport plaatsvinden via het botweefsel dat in contact komt met de ruimerkop. De verdere details van warmteontwikkeling zoals gebruikt binnen het model worden behandeld in Hoofdstuk 2.

1.5 Korte- en langetermijnschade door hoge temperaturen

1.5.1 Algemeen

Er zijn apparaten in ontwikkeling om tijdens het ruimen de temperatuur te meten in de mergholte. (17) Deze apparaten zijn echter nog niet bruikbaar om metingen te doen naar de warmteontwikkeling tijdens het in vivo ruimen van botten. De lokale temperatuursverhogingen kunnen slechts benaderd worden met behulp van dieren- en computermodellen en kadaver studies. Ook zijn er een aantal casestudy's gedaan naar de complicaties bij patiënten, veroorzaakt door necrose ten gevolge van het ruimen. Er zijn zelfs patiënten beschreven waarbij de weefselsterfte zo groot was, dat het bot uiteindelijk bloot kwam te liggen. Dit zijn echter wel zeldzame gevallen, waarbij, door slecht gebruik van de ruimer in combinatie met een zeer nauwe mergholte, een dergelijk trauma kon ontstaan. (18) (19)

Afhankelijk van de temperatuur en de tijd van blootstelling, zijn er een aantal mechanismen die een rol spelen bij necrose. Karmani (20) laat zien dat er in de wetenschap nog geen consensus is over welke temperaturen precies schadelijk zijn, omdat er veel verschillende weefsels tegelijk bij betrokken zijn. Ook zijn alle eerder uitgevoerde onderzoeken dusdanig verschillend van opzet dat vergelijkingen maken niet eenvoudig is. Ochsner et al. (19) hebben echter een duidelijke indeling gemaakt voor de verschillende graden van thermische en mechanische schade:

- 0° graad: geen thermische schade, geen devascularisatie
- 1° graad: geen thermische schade, wel devascularisatie
- 2° graad: lokale thermische schade en devascularisatie, kritiek bij infecties
- 3° graad: massale thermische schade en devascularisatie, kritiek bij infecties

Bij schade van de 1° graad is het goed om op te merken dat er wel degelijk thermische schade optreedt, maar dat de beschadigde weefsels direct worden verwijderd door het ruimen.

Over een aantal algemene effecten en mechanismen is meer duidelijkheid. Deze kunnen zich acuut of op lange termijn manifesteren.

1.5.2 Acute effecten

De acute effecten, bij temperaturen van 50 °C of minder, zijn beperkt. Er wordt een verhoogde doorbloeding waargenomen en de kleine aderen en haarvaatjes zetten uit. Soms stopt een deel van de doorbloeding in de kleinere vaten, of veranderd deze zelfs van richting. (21)

Bij temperaturen boven 50 °C zullen eiwitten zo beschadigd raken dat zij niet meer kunnen functioneren. Bij bepaalde typen enzymen kan dit al beginnen bij temperaturen boven 40 °C, maar dan zijn lange perioden van blootstelling nodig welke tijdens het boren niet gehaald zullen worden. Collageen is minder gevoelig, maar zal bij temperaturen boven 60 °C ook denatureren. (20)

Bij temperaturen van 100 °C of meer zal het water in de cellen verdampen. Hierdoor zullen de cellen uitdrogen, krimpen, membranen zullen scheuren en uiteindelijk zal er verbranding plaatsvinden. Hierdoor neemt de mogelijkheid om warmte af te voeren aanzienlijk af en zal het weefsel lokaal verder opwarmen, wat het omringende weefsel verder zal beschadigen. (18) (20)

1.5.3 Langetermijneffecten

Tengevolge van de acute effecten zal het lichaam zichzelf proberen te herstellen. Bij blootstelling aan temperaturen tot 50 °C zal na een aantal dagen de doorbloeding herstellen. De loop van de bloedvaten worden niet of nauwelijks veranderd. Acute effecten hebben geen blijvend effect op de lokale bloedsomloop. Oude vetcellen worden afgebroken en opnieuw opgebouwd en beschadigd botweefsel wordt afgebroken en vervangen door vetcellen. Hydroxyapatieten laten los van de collageenvezels en zorgen zo voor een herstructurering van de collageenvezels. Enzymen raken gedeactiveerd en kunnen onvoldoende hun werk doen. Bij blootstelling aan 50 °C, of 47 °C voor 5 minuten, is er na meer dan 1 jaar nog geen herstel van het botweefsel zichtbaar. (20) (21)

Bij blootstelling aan hogere temperaturen zijn de effecten minder lokaal: beschadigd weefsel herstelt niet, dood weefsel wordt nauwelijks afgebroken en de doorbloeding kan niet herstellen. Wanneer zelfs huidweefsel beschadigd raakt, wat gebeurt bij temperaturen van 52 °C of meer, dan waren de temperaturen in het bot aanzienlijk hoger. (20)

1.6 Conclusie

Er is een groot aantal onderzoeken gedaan naar het thermische gedrag van botweefsel bij het ruimen, evenals de gevolgen van oververhit botweefsel door het ruimen. Desondanks is er nog geen duidelijk beeld van de warmtestroming door het gehele botweefsel heen. Dit onderzoek moet het mogelijk maken om een beter beeld te kunnen krijgen van de optredende temperaturen tijdens het ruimen.

Hoofdstuk 2 – Het model

2.1 Inleiding

Er is een model ontworpen die de warmtestroming door het corticale botweefsel van een pijpbeen tijdens het ruimen kan simuleren. In dit model wordt gebruik gemaakt van een warmtebron die de warmteontwikkeling nabootst die ontstaat door de wrijving tussen de ruimerkop en het botweefsel. Omdat de kop van de ruimer zich langs de lengteas door het bot heen verplaatst, beweegt ook de warmtebron in dit model. Hierdoor ontstaat een warmteverdeling in het bot die niet alleen varieert met de plaats in het bot, maar ook door de tijd heen verandert. Het resultaat van een dergelijk complex model kan alleen door een computer berekend worden. Door gebruik te maken van warmtevergelijkingen, de eindige-differentiemethode en een groot aantal invoerparameters, wordt een warmteverdeling in het bot tijdens het ruimen als eindresultaat verkregen.

2.2 De warmtevergelijkingen

Van een zeker volume aan bot valt te zeggen dat de mate waarin de temperatuur ervan met de tijd verandert, bepaald wordt door de hoeveelheid warmte die er van buitenaf in stroomt plus de energie die binnen het volume wordt gegenereerd. Vergelijking 1 beschrijft dit gedrag, waarbij er sprake is van warmteopslag wanneer de som van de warmte die ontwikkeld wordt en de warmte die naar binnen stroomt positief is.

$$-\nabla \cdot \mathbf{q}(\mathbf{r}, t) + g(\mathbf{r}, t) = \rho C_p \frac{\delta T(\mathbf{r}, t)}{\delta t}$$

Vergelijking 1. De gebruikte warmtevergelijking uit het model.

Omdat we aannemen dat het pijpbeen een cilindrische geometrie heeft, is er sprake van rotatiesymmetrie. De afhankelijkheid van x , y en z , de drie ruimtelijke dimensies die ook wel de cartesische coördinaten worden genoemd, wordt vervangen door de afhankelijkheid van de straal r en de hoogte z langs de lengteas, slechts twee ruimtelijke dimensies. Deze omschrijving van cartesische naar cilindrische coördinaten zorgt ervoor dat het probleem 2-dimensionaal wordt in plaats van 3-dimensionaal.

Door de draaisnelheid van de ruimer te vermenigvuldigen met het torsiekoppel wordt het vermogen bepaald dat nodig is bij het ruimen. Ditzelfde vermogen wordt gebruikt voor de warmtebron die door de mergholte heen beweegt.

Door de complexiteit van het systeem is het niet mogelijk om de warmtevergelijkingen exact op te lossen en zal er dus een benaderingsmethode gebruikt moeten worden. Dit is de eindige-differentiemethode, een methode waarbij partiële differentiaalvergelijkingen op een numerieke wijze opgelost kunnen worden.

2.3 Invoerparameters

Het model maakt gebruik van verschillende variabelen die zo aangepast kunnen worden dat het mogelijk is uiteenlopende situaties te simuleren. Het model maakt gebruik van de volgende parameters die als invoer gebruikt worden:

- Het torsiekoppel in N·m.
- De draaisnelheid van de ruimer in $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$.
- De ruimsnelheid langs de lengteas in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- De geruimde lengte in mm.
- De locatie van de temperatuursensoren, als afstand tot de ruimerkop in mm.
- De binnen- en buitendiameters van de geruimde diafyse in mm.
- De diameter van de ruimerkop in mm.
- De dichtheid van botweefsel in $\times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- De specifieke warmte van botweefsel in $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- De thermische geleidbaarheid van botweefsel in $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Een aantal parameters wordt uit de literatuur gehaald, zoals de eigenschappen van botweefsel en de eigenschappen van de ruimerkop. Het is mogelijk om hier aparte metingen voor te doen, wanneer de literatuur hier onvoldoende en/of onbetrouwbare gegevens voor levert.

2.4 Aannames

Ieder model is een beperkte weergave van de werkelijkheid door de aannames die erin gedaan worden. Zo worden bij dit model de volgende aannames gedaan:

- Corticaal botweefsel is isotroop.
- Corticaal botweefsel is homogeen.
- De geometrie van een pijpbeen is cilindrisch.
- De eigenschappen van bot uit de literatuur zijn betrouwbaar en representatief.
- Het effect van een sensor op de meting is te verwaarlozen.
- Er vindt geen warmtestroming plaats langs de omtrek.

Deze aannames worden gedaan om het model eenvoudiger te maken zonder dat het functionaliteit verliest. Of de aannames kloppen valt pas na de validatie te zeggen, wel is het zo dat de aannames onderbouwd zijn met behulp van literatuur of resultaten uit al eerder gedane experimenten.

2.5 Het model valideren

Het resultaat van de simulatie wordt vergeleken met de temperaturen die gemeten zijn op een bepaalde plek in het corticale botweefsel. Als beide waarden gelijk zijn op verschillende plaatsen, dan is het model dus in staat de werkelijkheid na te bootsen en kan het daarmee voorspellingen doen. Dit moet uiteraard gelden voor meerdere metingen, aan verschillende botten en onder verschillende omstandigheden. Achteraf kunnen invoerparameters, aannames of zelfs het hele model aangepast worden wanneer mocht blijken dat de simulaties geen realistisch beeld geven.

Hoofdstuk 3 – De probleemomschrijving

Zoals eerder beschreven, worden gebroken pijpbeenderen geruimd om er een pen in te kunnen plaatsen die het genezingsproces bevordert en de patiënt zijn mobiliteit grotendeels teruggeeft. Bij het ruimen kan echter thermische schade aan het bot en de omringende weefsels ontstaan. Of deze schade optreedt, hangt af van de factoren die in Paragraaf 1.4 worden genoemd. Chirurgen zijn zich bewust van de risico's en houden hier al rekening mee tijdens het ruimen. Er is echter nog geen goed beeld van de mate waarin de verschillende factoren een rol spelen bij de warmteontwikkeling en de uiteindelijke temperaturen in het corticale bot tijdens het ruimen.

Om thermische schade te voorkomen is het van belang om voorafgaand aan een operatie te kunnen voorspellen hoe de temperaturen in het corticale bot zich zullen ontwikkelen. Hiervoor is een model nodig dat bruikbare voorspellingen kan doen aan de hand van de gegevens van de patiënt, de eigenschappen van de ruimer en de omstandigheden waaronder geopereerd zal worden.

Het model dat in Hoofdstuk 2 beschreven staat kan dergelijke voorspellingen doen, maar zonder validatie valt niet te zeggen hoe goed de simulatie de werkelijkheid benadert. De betrouwbaarheid van de voorspellingen hangt af van het fysische model en de invoerparameters. Met behulp van metingen, waarbij die parameters gevarieerd worden, kan gekeken worden of de voorspelde temperaturen overeenkomen met de gemeten temperaturen in het corticale bot.

Wanneer er onderzoek gedaan moet worden naar processen die zich in het menselijk lichaam afspelen, dan worden de meest representatieve resultaten verkregen door te meten op de plek waar het proces ook daadwerkelijk plaatsvindt. In dit geval zou de warmteontwikkeling tijdens het ruimen in het bot van de patiënt zelf gemeten moeten worden. Het is echter zeer lastig om deze temperatuur te meten zonder de patiënt extra te belasten tijdens de operatie. Dit is dan ook de belangrijkste reden dat dergelijke metingen nog nooit zijn uitgevoerd. Door de wisselende geometrie van het pijpbeen kunnen er zeer verschillende temperaturen in hetzelfde gebied van het bot optreden. Hierdoor is het noodzakelijk om meerdere metingen langs de ruimrichting uit te voeren. Het nauwkeurig meten van de temperatuur kan alleen met sensoren die in direct contact staan met het materiaal, maar het plaatsen van sensoren in het bot brengt extra schade met zich mee en vergroot de tijdsduur van de operatie.

Samengevat is het probleem dat er nog geen meetopstelling bestaat waarmee de temperatuursveranderingen gemeten kunnen worden in het corticale botweefsel van een pijpbeen dat geruimd wordt. Met deze meetresultaten kan het model gevalideerd worden.

Om een dergelijke meetopstelling te kunnen ontwerpen, moeten de volgende problemen opgelost worden:

- Het is zeer moeilijk om de temperatuursontwikkeling te meten tijdens het in vivo ruimen van een pijpbeen.
- Daarnaast is het zeer moeilijk om in 1 meting het wisselende temperatuursprofiel te bepalen van de gehele dwarsdoorsnede van een pijpbeen.
- Het is onbekend of de theoretische onderbouwing van het model voldoende is om er de werkelijke situatie mee te kunnen simuleren.
- Ook is het onbekend of de materiaalparameters die gebruikt worden in het model voldoende representatief zijn.

Hoofdstuk 4 – De ontwerpdoelen

De problemen die beschreven zijn in Hoofdstuk 3 moeten opgelost worden om de gewenste meetopstelling als resultaat te hebben. Deze problemen vormen stuk voor stuk de basis van de ontwerpdoelen van dit onderzoek, welke hieronder beschreven worden.

Omdat het zeer moeilijk is om de temperatuur te meten tijdens het ruimen van het bot van een patiënt, moet er een oplossing bedacht worden die het mogelijk maakt om deze temperatuur toch te kunnen meten. Ook moeten er meerdere metingen tegelijk uitgevoerd kunnen worden op het bot, zodat het wisselende temperatuursprofiel van de gehele dwarsdoorsnede van een bot in 1 keer bepaald kan worden.

Aangezien het niet zeker is of de theoretische onderbouwing van het model voldoende is om er de werkelijkheid mee te kunnen simuleren, moet dit gekwantificeerd kunnen worden. Ook moet bepaald worden of de materiaalparameters die gebruikt worden in het model voldoende representatief zijn.

Om uiteindelijk het model te kunnen valideren, moet het mogelijk worden de temperatuur te meten in het corticale botweefsel van een pijpbeen dat geruimd wordt. Hiervoor moet er een meetopstelling ontworpen worden waarmee dit voor het eerst mogelijk wordt.

Met deze meetopstelling moeten de volgende doelen behaald worden:

- Ex vivo de temperatuursontwikkeling tijdens het ruimen kunnen meten.
- Meerdere temperatuursmetingen tegelijk uit kunnen voeren.
- De bruikbaarheid van het fysische model kunnen bepalen.
- De juistheid van de materiaalparameters kunnen aantonen.

Hoofdstuk 5 – Functieanalyse van de meetopstelling

5.1 Overzicht van de functies

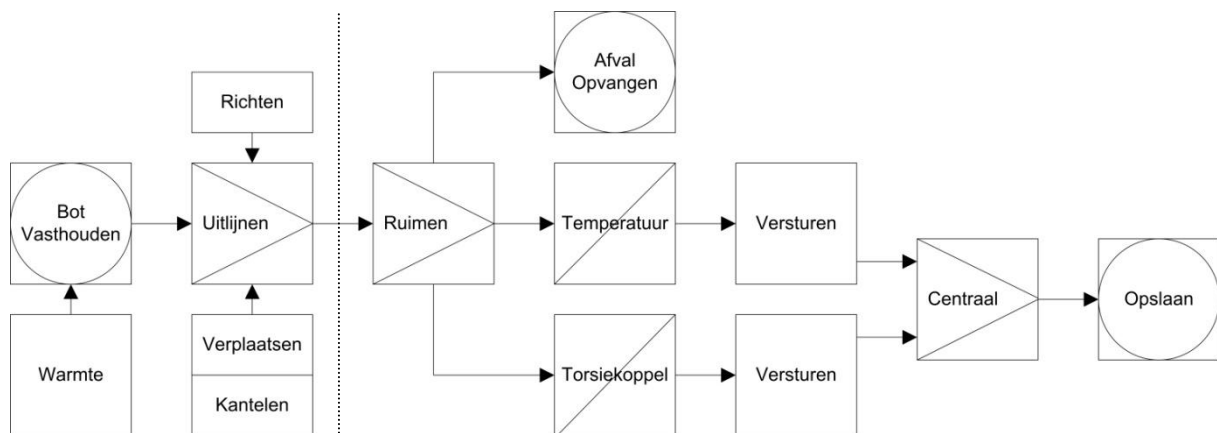
De beoogde meetopstelling heeft de volgende functies en subfuncties:

- Het bot vasthouden.
- Het bot verwarmen.
- Het uitlijnen van het bot, met als subfuncties:
 - Richting geven aan het verplaatsen en het kantelen.
 - Het bot verplaatsen en kantelen.
- Het ruimafval opslaan.
- De temperatuur meten.
- Het torsiekoppel meten.
- De verkregen meetsignalen overdragen.
- De ontvangen meetsignalen vastleggen.

In Hoofdstuk 6 worden de eisen waaraan de meetopstelling moet voldoen per functie uitgewerkt en ook worden eventuele wensen behandeld. Daarnaast worden nog een aantal algemene eisen besproken die gesteld worden aan de onderzoeks- en constructiematerialen, de meetopstelling in zijn geheel en het gebruik ervan.

5.2 Samenhang tussen de functies

De verschillende functies staan met elkaar in verband, zoals weergegeven in Figuur 5. Er valt duidelijk een onderscheid te maken tussen de functies die voor het ruimen en functies die tijdens het ruimen een rol spelen.



Figuur 5. Het blokschema van de samenhang tussen de functies van de meetopstelling.

Hoofdstuk 6 – Overzicht van de eisen

6.1 Eisen aan de bevestiging van het bot

Het is van groot belang dat het bot op zijn plaats blijft tijdens de metingen. Als het bot losraakt of verschuift tijdens het ruimen, kan dit tot gevolg hebben dat het botsegment of de meetopstelling beschadigd raken waardoor de meetresultaten onbruikbaar worden. Een belangrijke factor hierin is de grip van het klemsysteem op de oneffen buitenkant van het bot. De kracht die de ruimer op het bot uitoefent, bestaat uit een torsiekoppel van maximaal 10 N·m en een naar beneden gerichte kracht van maximaal 20 N. De warmte die tijdens het ruimen ontstaat mag de gebruikte bevestigingsmethode niet verzwakken. Verwacht wordt dat de buitenkant van het bot niet warmer zal worden dan 50 °C.

Daarnaast mag de bevestigingsmethode de thermische en mechanische eigenschappen van het bot niet meer dan 2% veranderen. Dergelijke veranderingen kunnen bijvoorbeeld veroorzaakt worden door chemische interacties met omringende materialen of de druk die uitgeoefend wordt op het bot. Bevestigingsmethoden die het bot binnendringen zijn niet uitgesloten, zolang de afstand van het bevestigingspunt tot het te ruimen traject en de temperatuursensoren meer dan 15 mm bedraagt. Volgens het model hebben ze dan geen invloed op het warmteprofiel.

Er kan rekening gehouden worden met de diameter en omtrek van de te gebruiken botten en de mogelijke variatie hierin bij verschillende soorten botten. Het zou namelijk wenselijk zijn, maar niet vereist, om zoveel mogelijk verschillende typen pijpbeenderen te kunnen testen met deze meetopstelling. Een universele bevestigingsmethode zou dit mogelijk kunnen maken. Mochten de geometrische variaties alle bruikbare bevestigingsmethoden uitsluiten, dan is het voldoende om alleen te kijken naar de bevestiging van 1 type pijpbeen. Ook hierbij dient rekening gehouden te worden met de variatie van de buitendiameters en het oppervlak van de verschillende botten. In het geval van bijvoorbeeld het femur kunnen de onderlinge verschillen in diameter oplopen tot 22%. (6)

Het is wenselijk dat geruimde botten gemakkelijk vervangen kunnen worden voor ongeruimde botten. Hierdoor zal de conditie van het botweefsel zo min mogelijk verslechteren voorafgaand aan de metingen en zal er niet teveel tijd aan het voorbereiden van de metingen worden besteed. De uiteindelijke manier van bevestigen moet ook gecombineerd kunnen worden met het verwarmingssysteem van de botten, het systeem dat het ruimaafval opvangt, de verschillende sensoren met hun aansluitingen en de constructie voor het ruimen zelf.

Samengevat zijn dit de eisen die gesteld worden aan de bevestiging van het bot:

- De bevestiging moet rekening houden met het oneffen oppervlak van het bot.
- De bevestiging moet een torsiekoppel van 10 N·m kunnen overdragen.
- De bevestiging moet een naar beneden gerichte kracht van 20 N aankunnen.
- De bevestiging moet werkzaam blijven bij temperaturen tot 50 °C.
- De thermische en mechanische eigenschappen van de botten mogen maximaal 2% veranderen door de gebruikte bevestigingsmethode.
- De bevestigingsmethode moet te combineren zijn met de andere onderdelen van de opstelling.

Daarnaast zijn er nog de volgende wensen met betrekking tot de bevestiging van het bot:

- Er moeten verschillende typen pijpbeenderen gebruikt kunnen worden, waaronder het femur, de tibia, de humerus en de ulna.
- Geruimde botten moeten gemakkelijk en snel te vervangen zijn voor nieuwe botten.

6.2 Eisen aan de verwarming van het bot

Om de toestand van het menselijk lichaam tijdens het boren zo goed mogelijk na te bootsen, is het van belang om de proeven uit te voeren bij lichaamstemperatuur. Het is daarnaast van belang om schommelingen in de omgevingstemperatuur op te vangen. Dat betekent dat het gehele bot verwarmd moet worden tot een temperatuur waarvan de afwijking niet groter mag zijn dan 0,1 °C. Doordat het bot verwarmd wordt tot ver boven de temperatuur waarbij het bewaard wordt, zal de conditie van het bot verslechteren. De gekozen manier van verwarmen moet er voor zorgen dat de conditie van het botweefsel niet meer dan 2% verandert tijdens de metingen. Samengevat zijn dit de eisen die gesteld worden aan het verwarmingssysteem:

- Het bot moet tot een constante lichaamstemperatuur $\pm 0,1$ °C verwarmd kunnen worden.
- De thermische en mechanische eigenschappen van het bot mogen niet meer dan 2% veranderen door het verwarmen.

6.3 Eisen aan het uitlijnen van het bot

Voordat het bot geruimd kan worden moet deze in de juiste positie en oriëntatie gebracht worden. De lengteas van de mergholte moet hierbij in het verlengde van de lengteas van de ruimerkop komen te liggen, de as waarlangs geruimd zal worden. Een tweede eis is dat de ruimerkop de sensoren niet mag kunnen raken tijdens het ruimen. Deze zouden hierdoor kunnen verschuiven en/of beschadigd kunnen raken, met onbruikbare meetresultaten tot gevolg. De aanwezigheid van beenmerg tussen de ruimerkop en de temperatuursensoren heeft een zo groot effect op de metingen dat er wordt geëist dat er zich geen beenmerg bevindt tussen de ruimerkop en de temperatuursensoren. Zowel de uitlijning van het bot alsook de diameter van de ruimerkop zijn hierbij van belang. Ondanks het feit dat er meerdere handelingen nodig zullen zijn bij het uitlijnen, is er wel de wens om dit allemaal zo snel en gemakkelijk mogelijk te kunnen doen, dus in zo min mogelijk handelingen.

Samengevat zijn dit de eisen die gesteld worden aan het positioneren van de ruimer:

- Het bot moet verplaatst kunnen worden in het vlak loodrecht op de ruimas.
- Het bot moet gekanteld kunnen worden tot in het verlengde van de ruimas.
- Het uitlijnen moet met een minimale nauwkeurigheid van 0,1 mm gedaan worden.
- De ruimerkop mag de sensoren niet kunnen raken tijdens het ruimen.
- Tussen de ruimerkop en de temperatuursensor mag geen beenmerg zitten, slechts corticaal botweefsel.

Daarnaast is er nog de volgende wens:

- Het uitlijnen moet in zo min mogelijk handelingen uitgevoerd kunnen worden.

6.4 Eisen aan het opslaan van het ruimafval

Tijdens het ruimen van de botten zullen er botfragmenten, merg en eventuele conserveringsmiddelen vrijkomen. Bij het werken met menselijk weefsel moet er altijd rekening gehouden worden met mogelijk besmettingsgevaar. Het betreft dan onder andere blootstelling aan het hepatitis B virus en het humane deficiëntie virus (HIV). (22) Het ruimafval moet dan ook op hygiënische wijze opgeslagen kunnen worden. Om blootstelling te minimaliseren moet dit tijdens het ruimen automatisch gebeuren en zonder tussenkomst van een persoon. Ook moet duidelijk zijn of het opslagsysteem vol zit of niet, dit om eventuele capaciteitsproblemen tijdens het ruimen te voorkomen. Het verwijderen van het ruimafval uit de meetopstelling moet zonder al te veel moeite gedaan kunnen worden. In Paragraaf 6.9.4 worden verder de algemene hygiëne-eisen besproken die gesteld worden aan de meetopstelling in zijn geheel en het gebruik ervan.

Samengevat zijn dit de eisen die gesteld worden aan het opslaan van het ruimafval:

- Het ruimafval moet automatisch en op hygiënische wijze opgevangen kunnen worden.
- Tijdens de metingen moet duidelijk zijn hoe vol het opslagsysteem is.
- Het opgevangen ruimafval moet gemakkelijk en op hygiënische wijze uit de meetopstelling verwijderd kunnen worden.

6.5 Eisen aan het meten van de temperatuur

Aangezien het doel van de meting is om een beter beeld te krijgen van de temperaturen in het corticale botweefsel, is het onvoldoende om een sensor aan de buitenkant van het bot te bevestigen. De sensor moet de temperatuursontwikkeling binnenin het corticale deel van het bot kunnen meten. Deze sensor moet voldoen aan een aantal eisen op het gebied van de prestaties die het moet leveren. Zo moet de sensor een bereik hebben van 0 °C tot 150 °C, met een resolutie van 0,1 °C. Daarnaast mag de sensor zo min mogelijk invloed uitoefenen op de warmteverdeling in het bot. De eigenschappen van de sensor zelf, de plaatsing in het bot en de bevestiging aan het bot hebben effect op de lokale temperatuur. Dit effect mag niet groter zijn dan 2%, om de meetresultaten niet teveel te beïnvloeden.

Mocht er voor het plaatsen van de sensor in het bot geboord gaan worden, dan is het van groot belang dat het botweefsel zo min mogelijk beschadigd raakt. De vorming van te grote ruimtes of het beschadigd raken van het botweefsel door verbranding zal een slechtere warmtegeleiding tussen het botweefsel en de sensor tot gevolg hebben. De thermische en mechanische eigenschappen van het botweefsel mogen dan ook niet meer dan 2% veranderen. Daarnaast moet het gat met een nauwkeurigheid van 0,1 mm geboord worden. De sensor mag ook niet van zijn plaats raken tijdens het meten, want dan worden er eigenlijk metingen verricht aan meerdere locaties in het bot.

Samengevat zijn dit de eisen die gesteld worden aan het meten van de temperatuur:

- De temperatuur moet gemeten worden binnenin het corticale bot.
- Het volume van het meetpunt mag niet groter zijn dan $0,3 \text{ mm}^3$.
- De sensor moet een resolutie hebben van $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- De sensor moet een bereik hebben van $0\text{-}150 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- De sensor zelf, de bevestiging en de plaatsing mogen de meting maximaal 2% verstoren.
- Bewerkingen van het bot mogen de thermische en mechanische eigenschappen maximaal 2% veranderen.
- Eventuele gaten moeten met een nauwkeurigheid van $0,1 \text{ mm}$ geboord worden.
- De sensor mag niet kunnen bewegen in het bot.

6.6 Eisen aan het meten van het torsiekoppel

Om het torsiekoppel dat ontstaat tijdens het ruimen te kunnen meten, is er een sensor nodig met een resolutie van $0,1 \text{ N}\cdot\text{m}$ en een bereik van $0\text{-}10 \text{ N}\cdot\text{m}$. Het torsiekoppel dat uitgeoefend wordt door de ruimer op het bot zal maximaal $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ zijn, de bevestiging van de sensor moet dit aankunnen.

Samengevat zijn dit de eisen die gesteld worden aan het meten van het torsiekoppel:

- De sensor moet een resolutie van $0,1 \text{ N}\cdot\text{m}$ hebben.
- De sensor moet een bereik van $0\text{-}10 \text{ N}\cdot\text{m}$ hebben.
- De bevestiging van de sensor moet een torsiekoppel van $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ aankunnen.

6.7 Eisen aan het overdragen van de meetsignalen

Tijdens de metingen zullen verschillende sensoren gebruikt worden die allemaal hun eigen signaal produceren. Deze signalen kunnen spanningen gemeten in volts, of stromen gemeten in ampères zijn, welke variëren met de tijd. Het kan ook zijn dat een sensor onderdeel is van een meetinstrument die het meetsignaal automatisch omzet in de gewenste meetwaarden $^{\circ}\text{C}$ of $\text{N}\cdot\text{m}$. In plaats van het meetsignaal kan dan deze waarde afgelezen en overgedragen worden. Het is vereist dat de manier van overdracht aansluit bij de manier van opslaan van de signalen.

Het overdragen van de signalen of waardes moet tijdens het ruimen automatisch gebeuren, zodat het mogelijk is om zoveel mogelijk metingen per seconde uit te voeren. De meetfrequentie moet minimaal 20 metingen per seconde zijn. Dat geldt voor zowel de metingen aan de temperatuur, per sensor, als aan de metingen aan het torsiekoppel. De manier waarop deze informatie overgedragen wordt hangt af van de output van de sensor of het meetinstrument.

Samengevat is dit de eis die gesteld worden aan de overdracht van de meetsignalen:

- De overdracht van de meetsignalen moet aansluiten bij de manier waarop ze opgeslagen moeten worden.
- De meetfrequentie bedraagt minimaal 20 metingen per seconde.

6.8 Eisen aan het vastleggen van de meetsignalen

De meetsignalen of meetwaardes moeten uiteindelijk op 1 plek verzameld en bewaard kunnen worden. Aangezien de meetresultaten gebruikt zullen worden in een computermodel, moet de ontvangen informatie uiteindelijk ook digitaal opgeslagen en bewerkt kunnen worden. De meetgegevens moeten ook voor langere tijd opgeslagen kunnen worden, zodat deze meerdere keren en over een langere periode te gebruiken zijn.

Samengevat zijn dit de eisen die gesteld worden aan de opslag van de meetsignalen:

- De meetsignalen moeten op 1 plaats opgeslagen kunnen worden.
- De meetsignalen moeten digitaal bewerkt kunnen worden.
- De meetsignalen moeten voor langere tijd opgeslagen kunnen worden.

6.9 Overige eisen

6.9.1 Eisen aan de botten en het botweefsel

Om het eerder genoemde model te kunnen valideren, moet het gebruikte bot een cilindrische geometrie hebben met de diafysale opbouw van een pijpbeen. Dit zorgt ervoor dat er sprake is van een zelfde soort warmtestroming als in het gebruikte model. Daarnaast zorgt een bot met cilindrische opbouw ervoor dat tijdens het ruimen geen merg aanwezig is tussen de ruimerkop en de temperatuursensor. Naast de plaatsing van de sensoren heeft de vorm van het bot hier de grootste invloed op.

Bij het gebruik van menselijke botten voor metingen, zeker bij destructieve metingen, moet altijd de overweging worden gemaakt om in plaats van menselijke botten, dierlijke botten te gebruiken. Afhankelijk van het soort dieren zijn deze botten in grotere aantallen verkrijgbaar, goedkoper, kleven er minder veiligheidsrisico's aan en zijn de ethische bezwaren tegen het gebruik ervan minder zwaarwegend. (23)

Bij het testen van botten of botweefsels worden ook regelmatig materialen gebruikt die niet dierlijk of menselijk zijn. Het is belangrijker dat de eigenschappen analoog zijn, dan dat het daadwerkelijk dierlijk of menselijk botweefsel betreft. (24) Soms vindt er ook een combinatie tussen organisch en anorganisch materiaal plaats om de juiste eigenschappen te verkrijgen. (25) Voor dit onderzoek zijn er al metingen verricht aan synthetische botsegmenten, waardoor hier geen behoefte meer aan is. Het is voor dit onderzoek van belang dat de thermische en mechanische eigenschappen van het uiteindelijk te gebruiken bot zoveel mogelijk overeenkomen met die van humaan corticaal bot. Uit onderzoek dat op het gebied van dierlijke (26) (27) en anorganische (28) botmodellen is gedaan, blijkt dat er geen bruikbare vervanging is voor de menselijke diafyse zoals nodig voor dit onderzoek. De geometrische, mechanische en thermische eigenschappen wijken af van die van menselijk bot. Er zijn wel vervangingen mogelijk per eigenschap, maar een substituuut die op alle drie de terreinen dezelfde eigenschappen heeft bestaat niet. Het is dan ook de eis dat er gebruik wordt gemaakt van menselijk botweefsel.

Een andere eis is dat het te gebruiken botweefsel niet aangetast mag zijn door botaandoeningen. Hoewel dit in de praktijk natuurlijk wel voor komt, zouden de materiaaleigenschappen zodanig af kunnen wijken dat de meetresultaten onbruikbaar worden voor het model.

6.9.2 Eisen aan de conservering van het bot

Bij het gebruik van organisch testmateriaal is het belangrijk dat dit op de juiste manier geconserveerd wordt. Het conserveren van kadavermateriaal kan op verschillende manieren, die allemaal hun eigen effect hebben op de mechanische en thermische eigenschappen ervan. Het is dan ook vereist dat de gebruikte conserveringsmethode deze eigenschappen niet meer dan 2% verandert.

6.9.3 Eisen aan het gebruik van het bot

Bij het omgaan met menselijk weefsel moet er rekening gehouden worden met het feit dat er maar weinig mensen hun lichaam aan de wetenschap schenken. Daarom moet er per test zo weinig mogelijk botmateriaal gebruikt worden aangezien het destructieve tests betreft, waarbij hergebruik van het materiaal voor andere doeleinden is niet of nauwelijks mogelijk. Vanuit het model gezien is er in de ruimrichting minimaal 30 mm aan bot nodig om te voorkomen dat de warmtestroming verstoord raakt door de uiteinden van het botsegment.

Zoals eerder genoemd mogen de mechanische en thermische eigenschappen van het botweefsel niet meer dan 2% veranderen wanneer er mechanische of chemische bewerkingen op worden uitgevoerd.

6.9.4 Eisen aan de gehele meetopstelling

De meetopstelling moet veilig te gebruiken zijn, waarbij de kans op schade aan de gebruikers, omstanders en materiële zaken tot een minimum beperkt dient te worden.

Behalve het verwijderen van het ruimafval moet de rest van de meetopstelling gemakkelijk schoon te maken zijn, hoewel deze niet gesteriliseerd hoeft te kunnen worden. Dit maakt een hygiënische werkomgeving mogelijk en voorkomt het ontstaan van eventuele meetfouten door vervuilingen.

Kapotte onderdelen moeten vervangen kunnen worden zonder de hele opstelling te moeten ontmantelen. Ook voor het schoonmaken van losse onderdelen is het vereist deze gemakkelijk lost te kunnen halen en terug te kunnen plaatsen. Dit geldt voornamelijk voor de onderdelen die in contact komen met botweefsel.

6.9.5 Eisen aan het verrichten van de metingen

De warmte die ontstaat bij het ruimen zal naar zowel het botweefsel als de ruimerkop stromen, waardoor beiden zullen opwarmen. Zolang de ruimerkop nog opwarmt is het onduidelijk hoeveel warmte er uiteindelijk in het botweefsel gaat zitten. In een dergelijke situatie zal de gemeten temperatuur geen volledig beeld geven van de temperatuur in het corticale botweefsel. Het is dan ook vereist dat tijdens het ruimen alle warmte naar het corticale bot stroomt.

Voor het valideren van het model is het daarnaast noodzakelijk dat de locatie van de temperatuursensor bekend is. Deze kan dan vergeleken worden met hetzelfde punt in het model. Ook moeten tijdens het ruimen de draaisnelheid van de ruimerkop en de snelheid langs de lengteas bekend en constant zijn. Hierdoor kunnen de verschillende metingen beter met elkaar vergeleken worden. De draaisnelheid en ruimsnelheid zullen anders zijn bij iedere meting, omdat de geometrieën en materiaaleigenschappen van de te ruimen botten onderling verschillen.

6.9.6 Overige eisen samengevat

Samengevat zijn dit de overige eisen die gesteld worden:

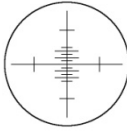
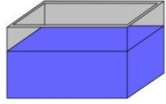
- Tijdens het ruimen mag er geen beenmerg tussen de ruimerkop en de temperatuursensor zitten.
- Er moet gebruik worden gemaakt van menselijk botweefsel.
- Het bot mag niet aangetast zijn door botaandoeningen.
- De conserveringsmethode mag de thermische en mechanische eigenschappen van het bot niet meer dan 2% veranderen.
- De lengte van het corticale bot is minimaal 30 mm in de ruimrichting.
- Bewerkingen van het bot mogen de thermische en mechanische eigenschappen maximaal 2% veranderen.
- De opstelling moet veilig te gebruiken zijn.
- De opstelling moet gemakkelijk schoon te maken zijn.
- Onderdelen van de opstelling moeten gemakkelijk los te halen zijn voor onderhoud of vervanging.
- Tijdens het ruimen moet alle warmte naar het corticale botweefsel stromen.
- De locatie van de temperatuursensor in het corticale bot moet bekend zijn.
- De ruimerkop moet met een constante en bekende snelheid langs de lengteas het bot ruimen.
- De ruimerkop moet met een constante en bekende draaisnelheid het bot ruimen.

Hoofdstuk 7 – Mogelijke oplossingen

7.1 Morfologisch overzicht

Om de mogelijk oplossingen per functie overzichtelijk weer te geven is er gekozen om gebruikt te maken van een morfologisch overzicht, zoals weergegeven in Tabel 1. De oplossingen worden in de volgende paragrafen verder beschreven, geanalyseerd en beoordeeld naar de gestelde eisen.

Tabel 1. Morfologisch overzicht van de oplossingen per functie en subfunctie.

Functies	Oplossing #1	Oplossing #2	Oplossing #3	Oplossing #4
Bot vasthouden	 Ingieten	 Inklemmen	 Vastlijmen	 Vastschroeven
Bot verwarmen	 IR-lamp	 Verwarmingsmantel	 Vloeistofbad	
- Richten	 Laser	 Markeringen	 Op het oog	
Uitlijnen				
- Verplaatsen & Kantelen	 Grof	 Fijn		
Ruimafval opslaan	 Afzuiging	 Opvangbak	 Vloeistof	
Temperatuur meten	 IR-thermometer	 Thermistor	 Thermokoppel	 Weerstandsthermometer
Torsiekoppel meten	 Analoog	011010011110101010 101001011001001010 100100111001111010 101010101010101001 010101010101010101 010110010111011010 011100101001011011 Digitaal		
Signaal versturen	 Analoog	011010011110101010 101001011001001010 100100111001111010 101010101010101001 010101010101010101 010110010111011010 011100101001011011 Digitaal		
Signaal vastleggen	 Analoog	011010011110101010 101001011001001010 100100111001111010 101010101010101001 010101010101010101 010110010111011010 011100101001011011 Digitaal		

7.2 Oplossingen voor het bevestigen van het bot

Zoals aangegeven in het morfologisch overzicht zijn er 4 mogelijke oplossingen voor het bevestigen van bot aan een ander materiaal, in dit geval de meetopstelling zelf. Een 5^e mogelijkheid is een combinatie van de 4 genoemde oplossingen in het geval dat de toepassing van 1 enkele methode niet voldoende is.

7.2.1 De houder

Aangezien het bot aan slechts een specifiek onderdeel van de meetopstelling wordt bevestigd, kan deze de houder genoemd worden. Deze houder is vooralsnog ongedefinieerd en kan zowel los als vast aan de rest van de meetopstelling bevestigd zijn. Nadat een bot in de houder geplaatst is kan deze aan de opstelling bevestigd worden met behulp van bouten, klemmen of doordat alleen de zwaartekracht de houder op zijn plaats houdt.

Bij directe plaatsing van het bot in de opstelling, dus bij het gebruik van een ingebouwde houder, zijn er problemen te verwachten van praktische aard. Het bot zal minder gemakkelijk bevestigd en vervangen kunnen worden en in tegenstelling met een vaste houder maakt het gebruik van een losse houder het mogelijk om voorafgaand aan de metingen meerdere botten in hun houders te plaatsen. Na iedere meting kan dan direct de houder vervangen worden, zonder eerst nog het hele bevestigingsproces uit te moeten voeren. Dit scheelt tijd, omdat bijvoorbeeld lijm of gietmiddel dan al uitgehard zijn.

Temperatuursensoren kunnen als laatste bevestigd worden, maar het is ook mogelijk om deze al vooraf in het bot te plaatsen dat al in de houder zit. Er moet dan wel gebruik gemaakt worden van wegwerp sensoren. Het is ook mogelijk om per type pijpbeen een specifieke houder te maken, zodat met een zelfde bevestigingssysteem voor de houders, verschillende bottypes getest worden.

7.2.2 Oplossing #1 - Ingieten

Bij het ingieten wordt het bot in de houder geplaatst waarna de vrije ruimte wordt opgevuld met een vloeibaar materiaal dat uithardt onder de juiste omstandigheden. De onregelmatige vorm van het bot en de wrijving tussen de verschillende materialen voorkomt dat het bot kan bewegen in de houder. Zoals bij de eisen genoemd, mogen de omstandigheden waarbij met het gietmateriaal gewerkt moet worden, zoals hoge temperaturen, straling of chemicaliën, de eigenschappen van het botweefsel niet teveel aantasten. Een geanalyseerde en beoordeelde lijst van mogelijke gietmaterialen is te zien in Tabel 2.

Tabel 2. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van gietmaterialen.

Materiaal	Auto vulmiddel	Cement	Giethars	Gips	Legering	Rubber	PMMA	Weging
Compatibiliteit	3	4	3	4	3	4	3	3
Gebruik	3	4	3	4	4	3	3	5
Grip	4	3	4	2	5	2	4	6
Prijs	4	5	3	5	3	4	3	2
Temperatuursbereik	3	5	4	5	2	2	4	1
Uithard tijd	2	1	2	1	5	2	2	7
Warmtegeleiding	1	3	1	3	5	1	1	4
Genormaliseerde Eindscore	6,3	6,9	6,2	6,4	10,0	5,5	6,2	

Omdat een groot aantal legeringen als gietmiddel bruikbaar zijn, volgt er nog een losse analyse en beoordeling van deze materialen in Tabel 3.

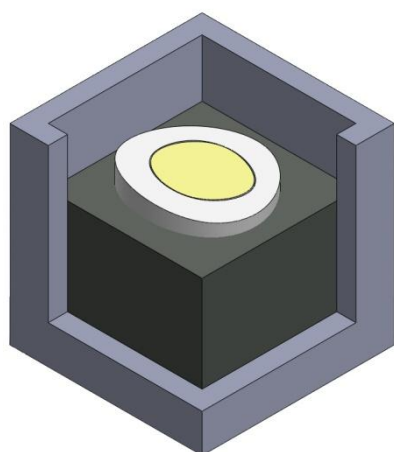
Tabel 3. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van legeringen als gietmateriaal.

Materiaal (Smeltpunt in °C)	#1 (58)	#2 (59)	#3 (77)	#4 (89)	#5 (96)	Weging
Compatibiliteit	3	3	4	4	2	4
Giftigheid	2	4	4	4	1	1
Prijs	4	1	3	1	5	2
Temperatuursbereik	3	3	4	4	5	3
Genormaliseerde Eindscore	8,2	7,1	10,0	8,9	8,9	

Om te voorkomen dat het bot tijdens het ruimen los kan scheuren is het van groot belang dat het gietmateriaal goed hecht aan het bot. Een geschikt hechtingsoppervlak creëren zal daarbij helpen. Omdat er een goede hechting tussen het bot en het gietmateriaal is, zal na de meting het geruimde bot zeer moeilijk uit de houder te verwijderen zijn. Dit kan voorkomen worden door een wegwerphouder te gebruiken waardoor het niet noodzakelijk is het bot uit de houder te verwijderen. Er kan ook voor gekozen worden voor een gietmateriaal dat met behulp van een oplosmiddel van de houder gescheiden kan worden, zonder de houder aan te tasten. Het gietmateriaal kan ook gesmolten worden, in deze fase mag het bot thermische schade oplopen, alleen de houder moet tegen de hitte kunnen.

De eigenschappen van het botweefsel zullen minder veranderen wanneer deze zo lang mogelijk bij de conserveringstemperatuur bewaard blijven in het geval van lange uithardtijden. Het zou dan ook handig zijn wanneer het bot in een materiaal gegoten wordt dat uit kan harden bij temperaturen onder 0 °C. Het materiaal moet echter ook stabiel blijven bij gebruikstemperaturen tot 50 °C.

Omdat bevestiging door ingieten een universele bevestigingsmethode is, kan deze ook voor andere botten gebruikt worden, zonder de opstelling aan te hoeven passen. Een eenvoudig ingietsysteem is te zien in Figuur 6.



Figuur 6. Een eenvoudig gietsysteem, opengewerkt.

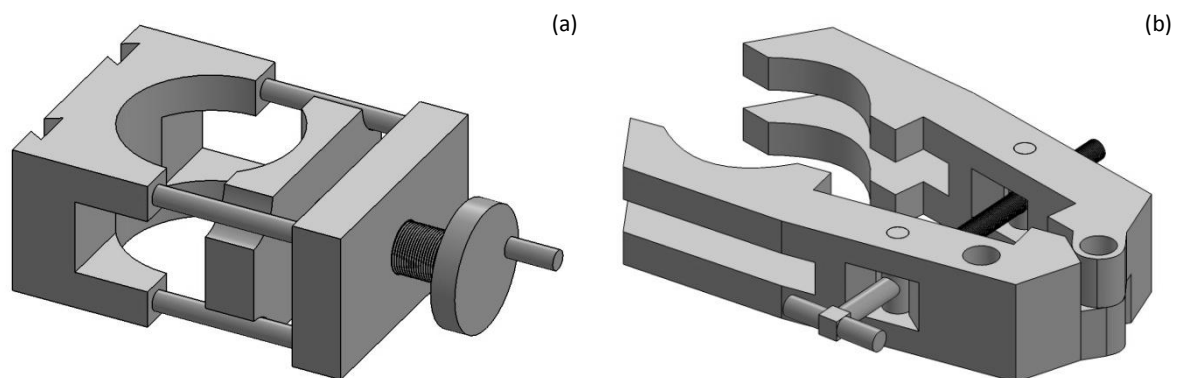
Bij het ingieten van het bot kunnen eventuele verdere bevestigingsmaterialen of temperatuursensoren al meegegoten worden. Hierdoor hoeft het materiaal niet nog verder bewerkt te worden. Het bot kan ook als een puzzelstukje in de opstelling geplaatst worden, wanneer bij het gieten een verwijderbare mal gebruikt wordt met een niet cilindrische vorm. Verwacht wordt dat het krimpen of uitzetten van het bot en de gietmaterialen bij verschillende temperaturen geen problemen op zal leveren.

Het bot kan ook ingegoten worden onder een bepaalde hoek, waardoor deze stap bij het uitlijnen overgeslagen kan worden. Deze hoek wordt bepaald door de methode beschreven in Paragraaf 7.4.2.1. Het bot kan dan onder deze hoek in de houder geplaatst en gehouden worden, waarna het gietmateriaal het bot fixeert. Wanneer bij het kantelen van het bot de lengteas samenvalt met het middelpunt van de houder, dan zal er bij het uitlijnen ook geen verplaatsing nodig zijn. De houder kan dan iedere keer op de zelfde plek onder de ruimer bevestigd worden.

7.2.3 Oplossing #2 - Inklemmen

Een klemsysteem is snel en eenvoudig in gebruik en kan toegepast worden zolang het bot niet beschadigd raakt door te grote klemkrachten. De klemmen mogen ook geen warmte onttrekken aan het bot en zullen dus samen met het hele systeem op de gewenste temperatuur gebracht moeten kunnen worden. Door het aanbrengen van groeven, extra ruwe oppervlakken of extra aangrijppunten op het bot of de klem wordt voor een optimale grip gezorgd. Het onregelmatig gevormde oppervlak van het bot zal echter voor problemen zorgen, omdat er door alle onregelmatigheden een effectief veel kleiner contactoppervlak tussen het bot en de klem zal zijn. Dit kan enigszins verholpen worden door gebruik te maken van klemoppervlakken die het botoppervlak enigszins volgen.

Twee mogelijke klemmen zijn te zien in Figuur 7, waarbij in beide gevallen gebruik wordt gemaakt van dezelfde oppervlakken om het bot tussen te klemmen. Het is niet mogelijk om met deze klemmen het bot gekanteld vast te zetten. Dit zou alleen mogelijk zijn bij het gebruik van parallelle klemoppervlakken, maar die hebben te weinig grip op het bot.



Figuur 7. Schematische weergave van twee verschillende klemsystemen in (a) en (b).

7.2.4 Oplossing #3 - Vastlijmen

Het bot vastlijmen aan de opstelling zal minder bevestigingsmateriaal en een kortere wachttijd opleveren in vergelijking met het ingieten van het bot. Lijmen zijn ook beter ontworpen om verschillende materialen duurzaam te verbinden. Maar ook bij het gebruik van lijm mag het effect op het botweefsel groter dan 2% zijn. De lijm moet stabiel blijven bij temperaturen tot 50 °C en wanneer

er bevroren botten gelijmd moeten worden bedraagt de minimum gebruikstemperatuur -20 °C. Zie Tabel 4 voor een analyse en beoordeling van een aantal verschillend lijmsorten.

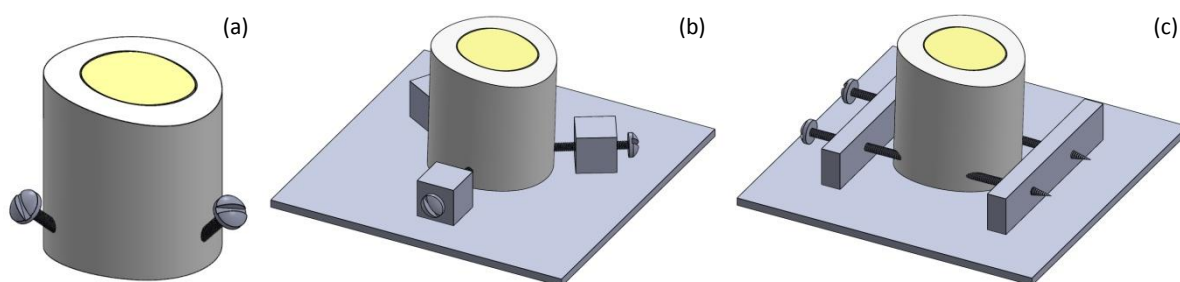
Tabel 4. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van lijmsorten.

Materiaal	Houtlijm	Secondelijm	Tweecomponentenlijm	Weging
Gebruik	3	3	2	4
Grip	1	2	2	6
Prijs	5	3	3	2
Temperatuursbereik	2	4	3	3
Uithard tijd	1	5	3	5
Warmtegeleiding	1	1	1	1
Genormaliseerde Eindscore	5,9	10,0	7,5	

Het kan zijn dat er tussen de houder en het bot een 3^e materiaal geplaatst moet worden, zodat er 2 verschillende lijmen gebruikt kunnen worden wanneer er geen bruikbare lijm beschikbaar is die het bot direct aan de houder kan lijmen. Bij het gebruik van een materiaal dat gemakkelijk ingedrukt kan worden, ontstaat er een groter contactoppervlak met het oneffen bot.

7.2.5 Oplossing #4 - Vastschroeven

Het direct vastschroeven van het bot aan de houder is mogelijk wanneer de schroeven de warmte-ontwikkeling en stroming in het bot niet beïnvloeden. Er moet ook genoeg corticaal bot zijn om een voldoende stevige bevestiging mogelijk te maken. Bij botten met weinig corticaal botweefsel zal het gebruik van een kleine schroef weinig grip opleveren en het gebruik van een grote schroef heeft een grote kans om scheuren in het botweefsel te veroorzaken. Het voordeel is dat schroeven snel aan te brengen zijn, waarna er ook direct aan het bot gemeten kan worden. Bij het gebruik van dikke schroeven moeten de schroefgaten voorgeboord worden om de kans op scheuren en barsten te verkleinen. De schroeven kunnen op verschillende manieren aangebracht worden, zie Figuur 8 voor een overzicht van deze mogelijkheden. Een schroef die door het gehele bot geboord wordt, kan tot 6 keer meer grip hebben. (29)



Figuur 8. Overzicht van drie mogelijke manieren om het bot met schroeven te bevestigen in (a), (b) en (c).

7.2.6 Analyse

Om de juiste bevestigingsmethode te kunnen kiezen is het van belang om de aangegeven oplossingen te beoordelen op het wel of niet voldoen aan de eisen en aan die beoordeling een score te verbinden om onderlinge vergelijkingen mogelijk te maken. Zie Tabel 5 voor deze analyse en beoordelingen.

Tabel 5. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van bevestigingssystemen.

Eisen en wensen	Ingieten	Inklemmen	Vastlijmen	Vastschroeven	Weging
De bevestiging houdt rekening met het oneffen botoppervlak.	5	2	2	4	7
De bevestiging kan een torsiekoppel van 10 N·m overdragen.	5	3	3	4	6
De bevestiging kan een naar beneden gerichte kracht van 20 N aan.	5	3	3	4	5
De bevestiging moet werkzaam blijven bij temperaturen tot 50 °C.	4	5	4	5	4
De thermische en mechanische eigenschappen van de botten mogen maximaal 2% veranderen door de gebruikte bevestigingsmethode.	4	4	3	3	3
De bevestigingsmethode moet te combineren zijn met de andere onderdelen van de opstelling.	4	4	2	4	8
Er moeten verschillende typen pijpbeenderen gebruikt kunnen worden. (Wens)	5	3	2	5	1
Geruimde botten moeten gemakkelijk en snel te vervangen. (Wens)	3	5	2	3	1
Genormaliseerde Eindscore	10,0	7,5	5,8	8,9	

7.3 Oplossingen voor het verwarmen van het bot

7.3.1 Algemeen

Hoewel er vele verschillende lichaamstemperaturen zijn, die variëren per individu, tijd van de dag, gezondheidstoestand en plaats in het lichaam, is het voldoende om een temperatuur van 37,0 °C aan te nemen voor de metingen met deze meetopstelling. Deze temperatuur ligt in de buurt van de gemiddelde lichaamstemperatuur en is een historisch geaccepteerde en accurate benadering van de werkelijke lichaamstemperatuur. (30) Om te weten of het bot inderdaad overal 37,0 °C is, moet dit voorafgaand aan de meting gecontroleerd worden met behulp van de ingebrachte temperatuursensoren. Er zijn verschillende manieren om voorwerpen te verwarmen, hieronder worden 3 mogelijke oplossingen besproken.

7.3.2 Oplossing #1 - Infraroodlamp

Infraroodlampen worden gebruikt om voorwerpen te verwarmen zonder ermee in contact te komen. Omdat het bot overal even warm moet worden, zullen er meerdere lampen gebruikt moeten worden om rondom het bot een goede warmteverdeling te krijgen. De lampen zullen voorafgaand aan iedere meting individueel afgesteld worden om het bot op de juiste temperatuur te krijgen. Een groot nadeel van deze methode is dat het bot aan alle kanten vrij moet zijn om bestraald te kunnen worden. Ook kost het veel tijd om de lampen iedere meting te kalibreren zodat het bot overal 37,0 °C is.

7.3.3 Oplossing #2 - Verwarmingsmantel

Een verwarmingsmantel kan rond het bot geplaatst worden en zo voor een gelijkmatige verwarming zorgen. Deze kan op elektriciteit werken of met behulp van warm water dat door buisjes stroomt die in de mantel verwerkt zijn. Dergelijke mantels zijn goed geïsoleerd om zo min mogelijk warmte aan de omgeving te verliezen. De mantel kan om de houder of om het bot geplaatst worden. De mantel kan ook in de houder geïntegreerd worden, de houder wordt daarmee de verwarmingsmantel.

7.3.4 Oplossing #3 - Warmtebad

Gebruik maken van een warmtebad is de eenvoudigste manier om de opstelling op 37,0 °C te krijgen en te houden. Het is daarnaast een veel gebruikte methode bij onderzoek. Er kunnen verschillende

vloeistoffen of mengsels van vloeistoffen, oplossingen of gels gekozen worden. Het is echter wel belangrijk dat deze stoffen geen schadelijke effecten op het botweefsel en de meetopstelling hebben. Praktische haalbaarheid is hierbij ook van belang. In Tabel 6 zijn een aantal kandidaat vloeistoffen met hun analyse en beoordeling getoond.

Tabel 6. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van vloeistoffen voor het warmtebad.

Vloeistof	Melk	Minerale olie	Plant aardige olie	Vaseline	Water	Zout Water	Weging
Compatibiliteit	4	5	5	4	3	5	1
Gebruiksgemak	4	2	2	1	5	5	5
Prijs	4	2	4	2	5	5	2
Stabiliteit	2	5	4	4	4	4	3
Warmtegeleiding	4	1	1	2	4	4	4
Genormaliseerde Eindscore	7,9	5,6	5,7	4,9	9,7	10,0	

Om er voor te zorgen dat schommelingen in de omgevingstemperatuur zoveel mogelijk opgevangen worden is een volume van ongeveer 5 liter voldoende. Literatuur toont aan dat er een verschil in mechanische eigenschappen is tussen droog en nat botweefsel. (31) Het gaat dan wel om totale uitdroging, iets waar bij deze tests geen sprake van zal zijn. Daarnaast moet ook met het opvangen en afvoeren van het botafval rekening gehouden worden, dit wordt in Paragraaf 7.5.4 besproken.

7.3.5 Analyse

Om het juiste verwarmingssysteem te kunnen kiezen is het van belang om de aangegeven oplossingen te beoordelen op het wel of niet voldoen aan de eisen en aan die beoordeling een score te hangen om onderlinge vergelijkingen mogelijk te maken. Zie Tabel 7 voor de analyse en beoordelingen.

Tabel 7. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende verwarmingssystemen.

Eisen	Infraroodlamp	Verwarmingsmantel	Warmtebad	Weging
Verwarmen tot een constante lichaamstemperatuur $\pm 0,1$ °C.	2	3	5	2
De thermische en mechanische eigenschappen van het bot mogen niet meer dan 2% veranderen door het verwarmen.	2	4	5	1
Genormaliseerde Eindscore	4,0	6,7	10	

7.4 Oplossingen voor het uitlijnen van het bot

7.4.1 Algemeen

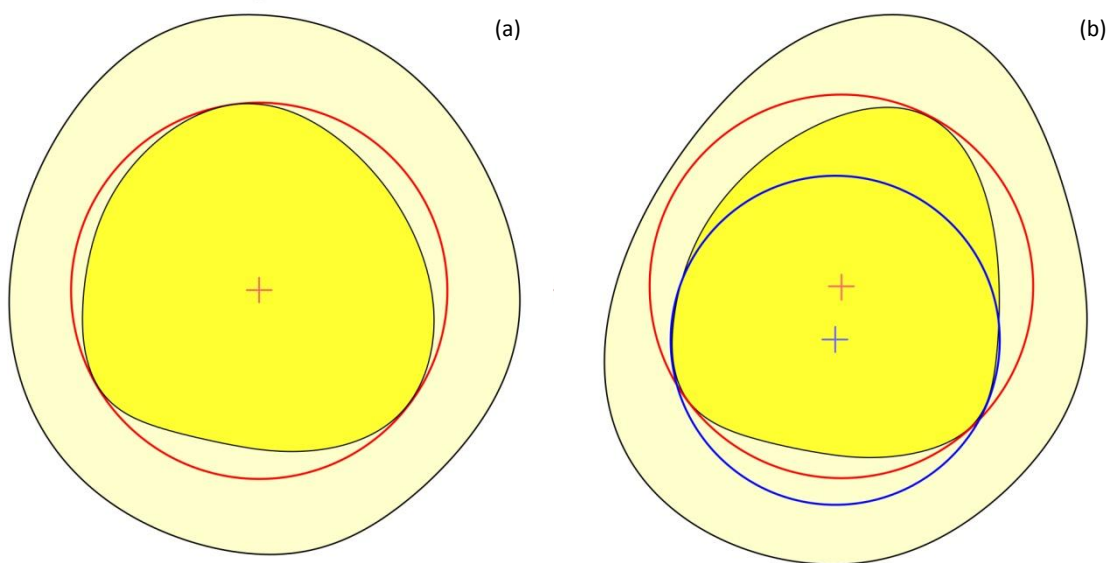
Om het bot op de juiste plek onder de ruimerkop te plaatsen, moeten deze vrij kunnen bewegen ten opzichte van elkaar. Aan deze plaatsing wordt de eis gesteld dat er zich tijdens het ruimen geen beenmerg bevindt tussen de ruimerkop en de temperatuursensoren en dat er geruimd wordt langs de lengteas van de mergholte. Het is van groot belang dat de diameter van de ruimerkop zo gekozen en de ruimer zo uitgelijnd wordt dat er geen sensoren of bevestigingssysteem geraakt kunnen worden tijdens het ruimen. Daarnaast moet er bij het uitlijnen gebruik worden gemaakt van 1 of meerdere referentiepunten die bepaald worden voorafgaand aan het uitlijnen. Er moeten dus

oplossingen gezocht worden voor het nauwkeurig verplaatsen en kantelen van het bot en voor het richten van de verplaatsing en kanteling om een optimale uitlijning te krijgen. Deze oplossingen zijn in twee stukken verdeeld en los van elkaar geanalyseerd en beoordeeld in de volgende paragrafen.

7.4.2 Richten

7.4.2.1 Referentiepunt bepalen

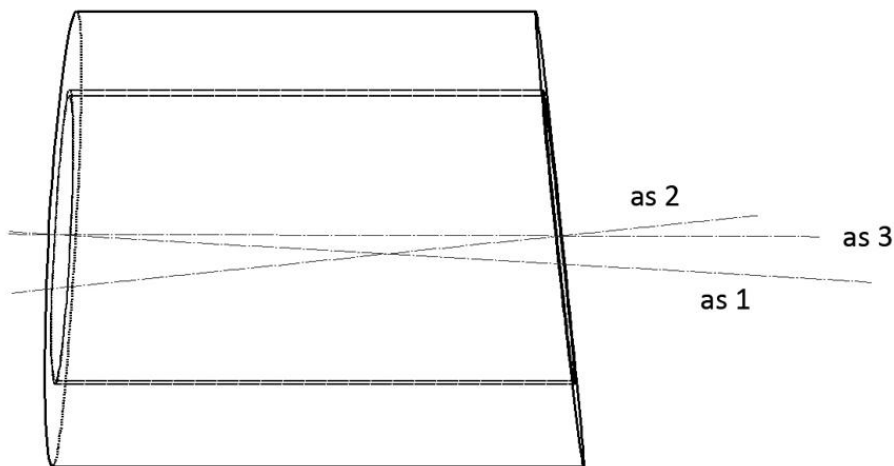
Uitgaande van de eis dat er tussen de temperatuursensoren en de ruimerkop geen beenmerg mag zitten, kan het belangrijkste referentiepunt bepaald worden door het middelpunt op te zoeken van de kleinst mogelijke cirkel op het oppervlak van het bot, waarbuiten zich geen beenmerg meer bevindt. De omtrek van deze cirkel zal dan ook alleen maar corticaal botweefsel raken. Een grafische weergave hiervan is te zien in Figuur 9a, waarbij de rode cirkels de optimale uitlijning aangeven. Met deze methode is de minimale diameter van de ruimerkop gelijk aan de diameter van de cirkel.



Figuur 9. Bepaling van het optimale referentiepunt in (a) en een extreme situatie in (b).

Op deze manier wordt er voor gezorgd dat mergholtes met een niet-cilindrische doorsnede, tenzij deze erg afwijken, toch gebruikt kunnen worden. Bij grote afwijkingen zoals ovale of driehoekige doorsnedes van de mergholte is het ook voldoende de mergholte slechts gedeeltelijk te ruimen. Er blijft dan nog beenmerg over, maar de locatie van de temperatuursensoren kan dan zo worden gekozen dat er alsnog aan de eis wordt voldaan. Dit is in Figuur 9b weergegeven met de blauwe cirkel, waarbij meer dan de helft van het corticale weefsel bruikbaar is.

De bepaling van het referentiepunt zoals hierboven beschreven, is alleen geldig voor de zichtbare oppervlakken, de boven- en onderkant van het bot. Wanneer het oppervlak oneffen is of schuin op de lengteas staat, is het onvoldoende om de as te nemen die loodrecht op het zaagoppervlak staat, dit zou dan niet de echte lengteas zijn van de mergholte. Wanneer aan beide kanten van het bot de optimale ruimdiameter met bijbehorend middelpunt wordt bepaald, vormt de lijn tussen deze twee middelpunten de meest optimale as waarlangs geruimd kan worden. In Figuur 10 is dit zichtbaar gemaakt door de verschillende assen weer te geven.



Figuur 10. Bepaling van de optimale ruimas, waarbij as 3 de meest optimale as is om langs te ruimen.

Omdat het lastig is om te kunnen zien of de ruimerkop op de juiste plek het bot zal ruimen moet deze gericht kunnen worden tijdens het uitlijnen. Daarvoor worden een aantal oplossingen hieronder geanalyseerd en beoordeeld.

7.4.2.2 Oplossing #1 - Laser

Door een laser te plaatsen op de plek van de ruimerkop kan deze de as belichten waarlangs geruimd zal worden. Er kunnen ook meerdere lasers gebruikt worden die parallel of schuin, maar symmetrisch, op de ruimas staan. Er mogen zich echter geen voorwerpen in het pad van de laser bevinden. Er kan ook met een losse laser gewerkt worden, zodat het bot uitgelijnd kan worden zonder onder de ruimer geplaatst te hoeven worden. Van een dergelijke laser moet dan wel bekend zijn hoe de positie zich verhoudt tot de ruimas.

7.4.2.3 Oplossing #2 - Markeringen

Er kan gebruik gemaakt worden van markeringen die aangebracht zijn op het verplaatsingssysteem waarop het bot met houder is bevestigd. Doordat het bevestigingssysteem al is uitgelijnd met de ruimerkop kan de verplaatsing gericht worden met behulp van deze markeringen. Een optimale uitlijning wordt behaald wanneer de markeringen op het bot overeenkomen met de markeringen op het systeem.

7.4.2.4 Oplossing #3 - Op het oog

Door de ruimerkop een klein stukje het gele merg in te duwen voor aanvang van de meting, is het mogelijk om te zien of de ruimerkop het corticale bot voldoende raakt en ook genoeg merg zal verwijderen. Dit is de snelste methode, maar ook de meest onnauwkeurige. Het zal ook van de geometrie van de ruimerkop afhangen of goed te zien valt of deze de juiste diameter heeft en op de juiste plek en onder de juiste hoek het bot zal ruimen.

7.4.2.5 Analyse

Om de juiste uitlijnmethode te kiezen is het van belang om de aangegeven oplossingen te beoordelen op het wel of niet voldoen aan de eisen en aan die beoordeling een score te verbinden om onderlinge vergelijkingen mogelijk te maken. Zie Tabel 8 voor de analyse en beoordelingen.

Tabel 8. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende systemen voor het richten van het bot bij het uitlijnen.

Eisen	Laser	Markeringen	Op het oog	Weging
Het uitlijnen van de ruimerkop moet met een minimale nauwkeurigheid van 0,1 mm gedaan worden.	4	3	1	2
De ruimerkop mag de sensoren niet kunnen raken tijdens het ruimen.	4	4	1	3
Tussen de ruimerkop en de temperatuursensor mag geen beenmerg zitten, slechts corticaal botweefsel.	3	3	1	4
Genormaliseerde Eindscore	10,0	9,5	5,2	

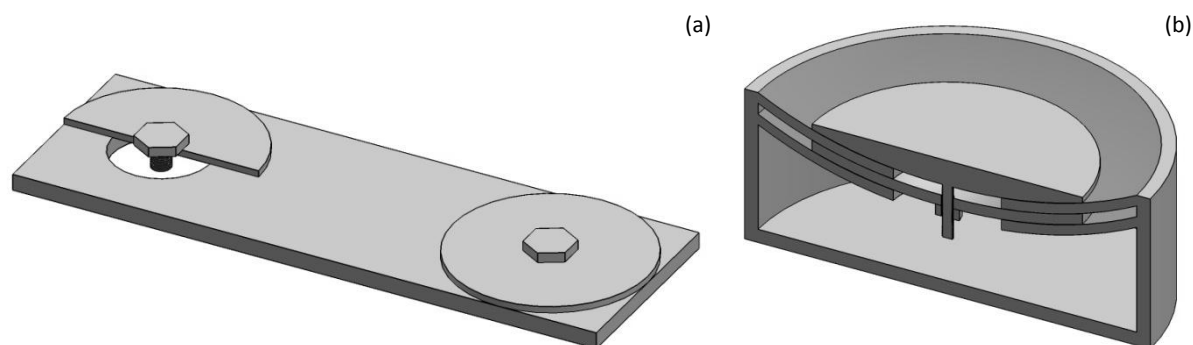
7.4.3 Verplaatsen en kantelen

7.4.3.1 Algemeen

Onderstaande oplossingen voor het verplaatsen en kantelen van het bot bestaan in beide gevallen uit twee losse systemen, 1 voor het verplaatsen en 1 voor het kantelen. Ze zijn ingedeeld naar de mate van nauwkeurigheid en kunnen zo gemakkelijker geanalyseerd en beoordeeld worden. Mocht slechts 1 van de 2 functies uiteindelijk nodig zijn, dan kan de overbodige functie uit het model weggelaten worden omdat deze los van elkaar kunnen functioneren. Wanneer gebruik wordt gemaakt van bevestiging door middel van ingieten, zoals besproken in Paragraaf 7.2.2, dan is het niet nodig om het bot zelf uit te lijnen. Het is dan voldoende om de opstelling eenmalig te kalibreren zodat het middelpunt van de houder samenvalt met het middelpunt van de ruimerkop.

7.4.3.2 Oplossing #1 - Grof

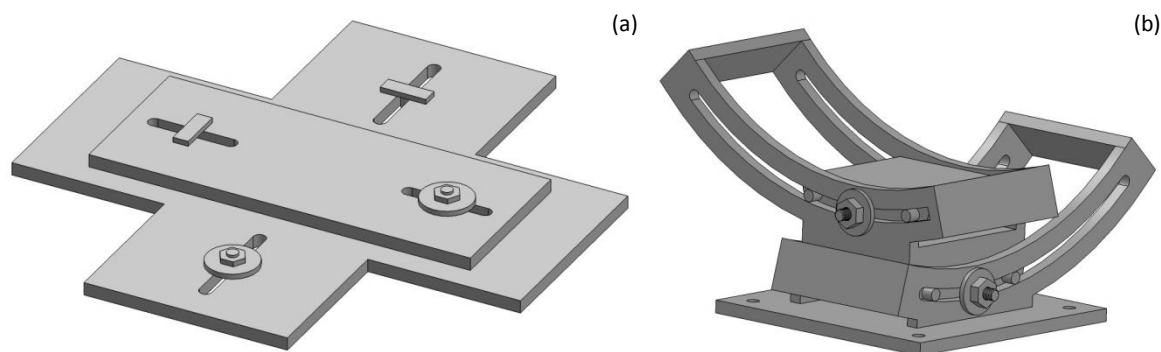
De grove manier is niet in staat om heel nauwkeurig het bot te verplaatsen of kantelen, maar het kost minder handelingen om uit te voeren. Zoals te zien in Figuur 11a gebeurt het vastzetten van het verplaatsingssysteem met 2 bouten die hun kracht uitoefenen op 2 stevige metalen sluitringen. Deze zorgen voor de grip tussen de montageplaat en de metalen onderplaat. Het kantelmechanisme werkt op dezelfde manier, maar bestaat dan uit meerdere kommen die met een enkele bout vastgezet kunnen worden zoals te zien in Figuur 11b.



Figuur 11. De methodes voor grof verplaatsen in (a), gedeeltelijk opengewerkt en voor grof kantelen in (b), opengewerkt.

7.4.3.3 Oplossing #2 - Fijn

De fijne methode, te zien in Figuur 12, is beter bestand tegen het torsiekoppel die de ruimer op het bot uitoefent dan de grove methode, omdat de verschillende onderdelen niet kunnen roteren. Ook hier worden de verschillende onderdelen met bouten vastgezet, simpele handelingen die snel uit te voeren zijn als het bot de juiste positie en hoek heeft gekregen.



Figuur 12. De methodes voor fijn verplaatsen in (a) en fijn kantelen in (b).

7.4.3.4 Analyse

Om de juiste methode te kiezen is het van belang om de aangegeven oplossingen te beoordelen op het wel of niet voldoen aan de eisen en aan die beoordeling een score te verbinden om onderlinge vergelijkingen mogelijk te maken. Omdat het verplaatsen en kantelen van de houder met daarin het bot, ook moet voldoen aan de eisen die gesteld zijn aan het bevestigen van het bot in de meetopstelling, worden die ook meegenomen in de beoordeling van de verschillende oplossingen, te zien in Tabel 9.

Tabel 9. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende systemen om het bot te verplaatsen en te kantelen.

Eisen	Fijn	Grof	Weging
Het uitlijnen van de ruimerkop moet met een minimale nauwkeurigheid van 0,1 mm gedaan worden.	3	2	4
De bevestiging moet een torsiëkoppel van 10 N·m kunnen overdragen.	5	1	5
De bevestiging moet een naar beneden gerichte kracht van 20 N aankunnen.	4	4	3
De bevestigingsmethode moet te combineren zijn met de andere onderdelen van de opstelling.	3	4	2
Het uitlijnen moet in zo min mogelijk handelingen uitgevoerd kunnen worden. (Wens)	5	4	1
Genormaliseerde Eindscore	6,2	10,0	

7.5 Oplossingen voor het opvangen van het ruimafval

7.5.1 Algemeen

Omdat er sprake is van mogelijk besmettingsgevaar bij het gebruik van menselijk weefsel is het belangrijk dat al het ruimafval hygiënisch opgevangen en afgevoerd kan worden. Hier zijn 3 oplossingen voor bedacht die hieronder besproken en geanalyseerd worden.

7.5.2 Oplossing #1 - Afzuiging

Met behulp van een afzuiginstallatie zullen vooral de kleine deeltjes gemakkelijk opgevangen worden. Afhankelijk van de zuigkracht zullen ook de grotere deeltjes meegenomen worden. Het is wellicht noodzakelijk om een hoes om de ruimerkop en het bot te plaatsen voor een optimale afzuiging. Er zal ook voor gezorgd moeten worden dat de kleinste deeltjes niet weer de lucht in geblazen worden door de juiste filters te gebruiken in het afzuigstelsel.

7.5.3 Oplossing #2 - Opvangbak

De opvangbak zal rond het uiteinde van het bot geplaatst worden, daar waar de ruimerkop het bot zal binnendringen. Er kan daarnaast nog een hoes om de ruimer heen geplaatst worden, zodat een grotendeels gesloten systeem ontstaat. Al het afval dat tegen de hoes aan komt valt dan in de opvangbak. Dit voorkomt ook dat er deeltjes door de lucht zullen zweven die anders niet in de opvangbak terecht zouden zijn gekomen. Omdat het een droge techniek is kan het afval gemakkelijk bij elkaar geveegd worden en in een geschikte afvalcontainer verzameld en afgevoerd worden.

7.5.4 Oplossing #3 - Vloeistof

Het gebruik van een vloeistof zorgt er voor dat zowel de grote als de kleine deeltjes die bij het ruimen vrijkomen, opgevangen kunnen worden. De vloeistof kan daarna uit de opvangbak gegoten of gepompt worden, waarna de tank weer opgevuld kan worden met een schone vloeistof. De verwijderde vloeistof kan eventueel nog gefilterd worden om de vaste delen van de vloeistof te scheiden. Eventuele recycling van de vloeistof is mogelijk, maar niet wenselijk met het oog op de hygiëne.

De keuze van de vloeistof moet vooral op gebruiksgemak gebaseerd zijn aangezien er geen verdere eisen aan worden gesteld. Water is voor de hand liggend, zeker omdat corticaal bot hydrofiel is. Olie is ook mogelijk vanwege de hydrofobe eigenschappen van het beenmerg. Wanneer gekozen wordt voor het gebruik van een verwarmingsbad, zoals besproken in Paragraaf 7.3.4, dan kan deze vloeistof ook gebruikt worden als opvangmedium voor het ruimafval.

7.5.5 Analyse

Om de juiste methode te kunnen kiezen waarmee het ruimafval opgevangen kan worden, is het van belang om de aangegeven oplossingen te beoordelen op het wel of niet voldoen aan de eisen en aan die beoordeling een score te verbinden om onderlinge vergelijkingen mogelijk te maken. Zie Tabel 10 voor de analyse en beoordelingen.

Tabel 10. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende opvangsystemen voor het ruimafval.

Eisen	Afzuiging	Opvangbak	Vloeistof	Weging
Het ruimafval moet automatisch en op hygiënische wijze opgevangen kunnen worden.	2	4	5	3
Tijdens de metingen moet duidelijk zijn hoe vol het opslagsysteem is.	3	3	4	1
Het opgevangen ruimafval moet gemakkelijk en op hygiënische wijze uit de meetopstelling verwijderd kunnen worden.	2	3	3	2
Genormaliseerde Eindscore	5,2	8,4	10,0	

7.6 Oplossingen voor het meten van de temperatuur

7.6.1 Algemeen

Er bestaan veel verschillende technieken om temperatuur te meten, de meest logische opties voor dit onderzoek worden hieronder verder besproken.

7.6.2 Oplossing #1 - Infraroodthermometer

Een infraroodthermometer is niet in staat om temperaturen van materialen te meten zolang er geen optisch pad is tussen de thermometer en het materiaal. Binnenin materialen meten is dus alleen

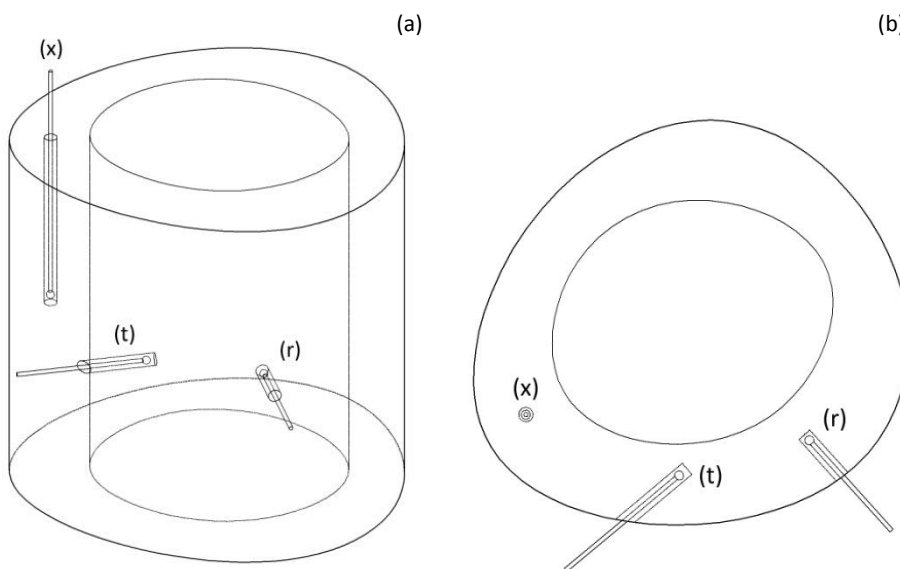
mogelijk wanneer glasvezeldraden in het bot aangebracht worden. De resolutie van zulke metingen blijft beperkt tot gehele graden Celsius. Ook is het kleinste meetbare volume groter dan 0,3 mm³.

7.6.3 Oplossingen #2, 3 en 4 - Thermistor, Thermokoppel en Weerstandsthermometer

De overige drie oplossingen zijn elektrisch van aard en gebaseerd op verschillende werkingsprincipes. Een thermistor bevat een halfgeleider en de weerstandsthermometer bevat een spoel waarvan de weerstand sterk afhankelijk is van de temperatuur. Een thermokoppel produceert een potentiaalverschil die varieert met een veranderende temperatuur.

7.6.4 Plaatsing

Voor alle sensoren geldt dat die op verschillende manieren in het bot geplaatst kunnen worden, maar de meest voor de hand liggende oriëntaties zijn: radiaal, tangentieel en axiaal, zoals te zien in Figuur 13. Door meerdere thermokoppels aan te brengen per botsegment kan het aantal metingen verminderd worden en het bevordert de onderlinge vergelijkbaarheid van de verschillende metingen. Ook zou zo de plaatsing van het thermokoppel in radiale en axiale richting gevarieerd kunnen worden in 1 segment.



Figuur 13. De verschillende mogelijkheden voor het plaatsen van de thermokoppels met het zijaanzicht in (a) en het bovenaanzicht in (b). De richtingen zijn: (r) voor radiaal, (t) voor tangentieel en (x) voor axiaal.

7.6.5 Bevestiging

Bij het bevestigen van de sensoren kan het botweefsel lokaal veranderen onder invloed van druk en temperatuur, ten gevolge van het boren van de gaten waarin de sensoren geplaatst worden. Zeer rustig boren en koelen met een koude zoutoplossing is een optie, maar aangezien het boorgat zeer klein zal zijn, is dit wellicht niet nodig.

De temperatuursensor zal in het gat geplaatst worden, samen met een geleidend medium. Hierdoor is er optimaal contact mogelijk tussen het bot en de sensor. In Tabel 11 is een overzicht te zien van een aantal mogelijke materialen met hun analyse en beoordeling. Het zou ook goed zijn als het geleidende materiaal kan voorkomen dat de sensor kan bewegen in het gat. Als dit niet het geval is kan er ook gebruik worden gemaakt van lijm of een kleine klem in het gat van de sensor.

Tabel 11. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van geleidende materialen voor het bevestigen van de sensoren.

Materiaal	Botcement	Giethars	Legering	Minerale Olie	Zilverpasta	Weging
Compatibiliteit	5	3	4	5	5	2
Gebruiksgemak	3	3	5	5	4	5
Prijs	3	3	2	4	2	4
Stabiliteit	4	4	5	5	5	3
Stevigheid	5	5	2	1	2	1
Warmtegeleiding	2	2	5	1	4	6
Genormaliseerde Eindscore	7,5	7,0	10,0	8,3	9,0	

7.6.6 Analyse

Om de juiste temperatuursensor te kunnen kiezen is het van belang om de aangegeven oplossingen te beoordelen op het wel of niet voldoen aan de eisen en aan die beoordeling een score te verbinden om onderlinge vergelijkingen mogelijk te maken. Zie Tabel 12 voor de analyse en beoordelingen.

Tabel 12. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende temperatuursensoren.

Eisen	Infrarood-thermometer	Thermistor	Thermokoppel	Weerstandsthermometer	Weging
De temperatuur moet gemeten worden binnenin het corticale bot.	1	4	4	4	7
Het volume van het meetpunt mag niet groter zijn dan 0,3 mm ³ .	1	2	5	2	8
De sensor moet een resolutie hebben van 0,1 °C.	1	3	3	5	6
De sensor moet een bereik hebben van 0-150 °C.	5	5	5	5	4
De sensor zelf, de bevestiging en de plaatsing mogen de meting maximaal 2% verstoren.	4	3	4	3	3
Bewerkingen van het bot mogen de thermische en mechanische eigenschappen maximaal 2% veranderen.	5	3	3	3	1
Eventuele gaten moeten met een nauwkeurigheid van 0,1 mm geboord worden.	5	3	3	3	2
De sensor mag niet kunnen bewegen in het bot.	4	4	4	4	5
Genormaliseerde Eindscore	6,0	8,2	10,0	9,0	

7.7 Oplossingen voor het meten van het torsiekoppel

7.7.1 Algemeen

Het torsiekoppel dat gemeten moet worden is het draaimoment dat de ruimerkop uitoefent op het bot. Aangezien het bot via de houder met verschillende onderdelen van de meetopstelling verbonden is, oefent de ruimerkop het torsiekoppel dus ook op al deze onderdelen uit. Het maakt dan ook niet uit of de torsiekoppelsensor direct aan het bot bevestigd wordt of dat deze aan 1 van de onderdelen bevestigd wordt. Het is wel van belang dat alles wat op de torsiekoppelsensor wordt aangesloten vrij kan bewegen, zodat de meting van het torsiekoppel niet verstoord wordt. Waar de sensor uiteindelijk op wordt aangesloten hangt af van de keuzes van de overige onderdelen en zal daarom in Hoofdstuk 8 verder worden besproken.

7.7.2 Oplossing #1 - Analoo

Analoge systemen maken onder andere gebruik van hoekveranderingen of materiaalvervormingen om tijdens achteraf het torsiekoppel te kunnen meten. Hoewel deze systemen niet heel nauwkeurig zijn, zijn ze over het algemeen ongevoelig voor verstoringen zoals trillingen of elektromagnetische velden.

7.7.3 Oplossing #2 - Digitaal

Digitale sensoren zijn direct en continu uit te lezen en hebben een grote nauwkeurigheid. Deze systemen zijn vaak wel duur, maar gaan dan ook lang mee en kunnen later nog voor andere onderzoeken gebruikt worden.

7.7.4 Analyse

Om de juiste torsiekoppelsensor te kunnen kiezen is het van belang om de aangegeven oplossingen te beoordelen op het wel of niet voldoen aan de eisen en aan die beoordeling een score te verbinden om onderlinge vergelijkingen mogelijk te maken. Zie Tabel 13 voor de analyse en beoordelingen.

Tabel 13. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende methodes voor het meten van het torsiekoppel.

Eisen	Analoo	Digitaal	Weging
De sensor moet een resolutie van 0,1 N·m hebben.	2	5	2
De sensor moet een bereik van 0 -10 N·m hebben.	4	4	3
De bevestiging van de sensor moet een torsiekoppel van 10 N·m aankunnen.	4	4	1
Genormaliseerde Eindscore	7,7	10,0	

7.8 Oplossingen voor het overdragen van de meetsignalen

7.8.1 Algemeen

De manier waarop de meetsignalen overgedragen worden hangt af van de sensoren en van de manier waarop de signalen opgeslagen zullen worden. In deze fase vindt er eventueel ook een omschakeling tussen het analoge en/of digitale domein of worden er signalen gefilterd of versterkt.

7.8.2 Oplossing #1 - Analoo

Er zijn twee verschillende soorten analoge meetsignalen, het ene signaal bestaat uit variërende voltages of ampères. Het andere signaal zou het direct aflezen van de temperatuur of het torsiekoppel zijn met behulp van een los uitleesapparaat. Dit laatste zou echter niet de juiste meetfrequentie opleveren die geëist wordt en wordt daarom ook niet geanalyseerd.

7.8.3 Oplossing #2 - Digitaal

De meetsignalen vanuit de sensoren zijn al digitaal of worden er in omgezet vanuit volts of ampères. Er kan gebruik gemaakt worden van een analoo naar digitaal convertor (ADC) om dit te doen. Dat kan een los systeem zijn of een ADC-kaart, ingebouwd in een computer.

7.8.4 Analyse

Om de juiste methode te kunnen kiezen voor het overdragen van de meetsignalen, is het van belang om de aangegeven oplossingen te beoordelen op het wel of niet voldoen aan de eisen en aan die

beoordeling een score te verbinden om onderlinge vergelijkingen mogelijk te maken. Zie Tabel 14 voor de analyse en beoordelingen.

Tabel 14. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende systemen om de meetsignalen over te dragen.

Eisen	Analoog	Digitaal	Weging
De overdracht van de meetsignalen moet aansluiten bij de manier waarop ze opgeslagen moeten worden.	3	5	1
De meetfrequentie bedraagt minimaal 20 metingen per seconde.	4	5	2
Genormaliseerde Eindscore	7,3	10,0	

7.9 Oplossingen voor het vastleggen van de meetsignalen

7.9.1 Algemeen

De ontvangen meetsignalen moeten vastgelegd worden voor later gebruik. De signalen kunnen direct opgeslagen worden, maar ze kunnen ook nog omgezet worden van analoog naar digitaal, van volt naar graden Celsius, etc. Dit moet in overeenstemming zijn met de vorm waarin de signalen ontvangen worden en het uiteindelijke gebruik van de signalen.

7.9.2 Oplossing #1 - Analoog

Het analoog vastleggen van de signalen houdt in dat de meetsignalen als volts, ampères, graden Celsius en/of newtonmeter worden uitgeprint op papier. Deze gegevens kunnen dan later in het model worden ingevoerd, dit zal dan wel handmatig moeten gebeuren.

7.9.3 Oplossing #2 - Digitaal

Digitale opslag houdt in dat de meetsignalen als volts, ampères, graden Celsius en/of newtonmeter op de computer opgeslagen worden. Deze zullen daarna eenvoudig in te voeren zijn in het model, afhankelijk van de gebruikte software en de ontvangen meetsignalen zou een directe koppeling mogelijk moeten zijn zonder eventuele omzetting van de gegevens naar de juiste eenheid.

7.9.4 Beoordeling

Om de juiste opslagmethode voor de meetsignalen te kunnen kiezen is het van belang om de aangegeven oplossingen te beoordelen op het wel of niet voldoen aan de eisen en aan die beoordeling een score te verbinden om onderlinge vergelijkingen mogelijk te maken. Zie Tabel 15 voor de analyse en beoordelingen.

Tabel 15. Geanalyseerde en beoordeelde lijst van de verschillende oplossingen voor het vastleggen van de meetsignalen.

Eisen	Analoog	Digitaal	Weging
De meetsignalen moeten op 1 plaats opgeslagen worden.	3	5	1
De meetsignalen moeten digitaal bewerkt kunnen worden.	1	5	3
De meetsignalen moeten voor langere tijd opgeslagen kunnen worden.	4	5	2
Genormaliseerde Eindscore	4,7	10,0	

7.10 Overige oplossingen

7.10.1 Oorsprong en type van het bot

Omdat de metingen uitgevoerd zullen worden met menselijke pijpbeenderen, kan er gekozen worden uit de volgende botten:

- Het femur
- De tibia
- De humerus
- De ulna

De buitendiameter van de diafyse van een femur is ongeveer 30 mm (6), terwijl die van de ulna slechts 15 mm is. (9) De tibia zit hier tussenin, maar heeft, in tegenstelling tot het femur en de ulna, een driehoekige i.p.v. een cilindrische doorsnede. Dergelijke doorsnedes zijn op dit moment minder goed bruikbaar voor het verifiëren van het model. Nog een voordeel van het femur boven de tibia is dat er meerdere segmenten uit te halen zijn. De ulna heeft een veel kleiner corticale dikte dan het femur, wat de bevestiging van de temperatuursensoren en eventuele schroeven voor bevestiging zal bemoeilijken. De humerus is wat betreft geometrie minder constant over de diafysale-as dan het femur en heeft geen cilindrische doorsnede, maar een elliptische. (32)

7.10.2 Toestand van het bot

Er zijn verschillende manieren om botten te conserveren (33):

- Het bot in vriezen bij -20 °C.
- Een oplossing van formaline gebruiken.
- De Thiel conserveringsmethode gebruiken.
- Een alcohol en glycerine oplossing gebruiken.

De gebruikte manier hangt af van het uiteindelijke gebruik en de beschikbare methodes in de instelling waar de botten geconserveerd worden. Ook moet de conserveringsmethode zodanig gekozen worden dat veranderingen van de mechanische en thermische eigenschappen zo min mogelijk optreden.

Eventuele botaandoeningen kunnen opgespoord worden met behulp van een röntgenanalyse. Dit voorkomt afwijkingen in de meetresultaten en het onnodig gebruik van botmateriaal. Het bot kan ook voorafgaand aan de meting geruimd worden, zodat bekeken kan worden of de mergholte geen ongewenste afwijkingen vertoont.

7.10.3 Gebruik van het bot

Vanuit het model is de eis gesteld dat de ruimbare lengte van het bot minimaal 30 mm is. Kortere stukken verstoren het temperatuursverloop binnen het bot, doordat de uiteinden te dicht op elkaar zitten. Voor de validering van het model kunnen echter wel segmenten met verschillende hoogtes gebruikt worden, afhankelijk van het aangeleverde bot. Het gebruik van te hoge segmenten zou echter onnodig verlies van materiaal betekenen en ook een te grote opstelling vereisen.

Er kunnen meerdere metingen aan een enkel bot uitgevoerd worden door deze meerdere keren te ruimen, waarbij de diameter van de ruimerkop iedere meting groter wordt. En hoewel de mergholte na de eerste ruiming wel leeg is, zal dit weinig effect hebben op de warmteontwikkeling. Wel moet er

bij deze manier van ruimen rekening gehouden worden met de plaatsing van de temperatuursensoren, dit om te voorkomen dat ze geraakt worden tijdens het ruimen. Ook mag de dikte van het corticale weefsel niet teveel afnemen, om een goede bevestiging van het bot te kunnen garanderen.

7.10.4 De gehele opstelling

Voor de onderzoekers is het van groot belang dat zij veilig gebruik kunnen maken van de meetopstelling. De losse onderdelen en de opstelling in zijn geheel moet geanalyseerd worden, zodat onveilige onderdelen opgespoord kunnen worden. Mocht deze onderdelen niet zo aangepast kunnen worden dat ze wel veilig zijn, dan moet er een vervangende oplossing voor gezocht worden.

Onder veiligheid valt bij dit type onderzoek ook hygiëne, zoals al behandeld is in Paragraaf 7.5. Niet alleen het opvangen van het ruimafval moet hygiënisch gebeuren, ook de overige onderdelen die blootgesteld worden aan het ruimafval moeten schoongemaakt kunnen worden. Daarvoor is het nodig dat deze onderdelen gemakkelijk uit de opstelling gehaald kunnen worden. Voor andere onderdelen geldt dit ook wanneer verwacht kan worden dat ze regelmatig onderhouden of vervangen moeten worden.

7.10.5 Metingen verrichten

Er zijn een groot aantal verschillende typen ruimerkoppen die in verschillende diameters geleverd worden. Voor het valideren van het model is het echter niet relevant welke type er gebruikt wordt, zolang de diameter van de ruimerkop maar bekend is als invoerparameter voor het model.

De effecten van de verslechtering van het botweefsel kunnen het beste tegengegaan worden door ieder bot even lang te testen. Er van uitgaande dat de eigenschappen van de botten even snel en op dezelfde manier veranderen, hebben de botten in vergelijking met elkaar de zelfde verandering ondergaan.

Het is van belang dat de meetopstelling al zoveel mogelijk opgewarmd is voordat het bot geplaatst wordt. Dit voorkomt onnodig lange opwarmtijden, welke het botweefsel geen goed zouden doen. Ook de ruimerkop moet voorverwarmd worden om tijdens de metingen geen warmte te onttrekken aan het opwarmende botweefsel. Dit kan simpel gedaan worden door de ruimerkop in een warmwaterbad met een temperatuur van 50 °C te leggen. Bij hogere temperaturen zou de ruimerkop zelf als versturende warmtebron kunnen werken, bij lagere temperaturen zou de ruimerkop alsnog warmte op kunnen nemen.

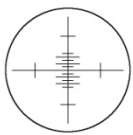
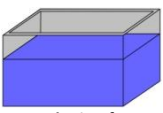
Omdat de ruimerkop tijdens het ruimen met een constante snelheid rond moet draaien, moet dit instelbaar zijn op het ruimsysteem zelf, of anders moet dit mogelijk gemaakt worden met behulp van terugkoppeling van de draaisnelheid naar het ruimsysteem. Datzelfde geldt voor de snelheid waarmee het bot langs de ruimas geruimd moet worden. Daarnaast moet achteraf de kleinste afstand van de temperatuursensoren tot de geruimde mergholte gemeten worden als belangrijke invoerparameter van het model.

Hoofdstuk 8 – Voorlopige meetopstelling

8.1 Morfologisch overzicht gesorteerd

De geanalyseerde en beoordeelde oplossingen uit Hoofdstuk 7 worden samengevoegd tot een voorlopige meetopstelling. Deze oplossingen worden weergegeven in Tabel 16, gesorteerd naar hun individuele scores, waarbij de gearceerde kolom de meest optimale configuratie weergeeft.

Tabel 16. Morfologisch overzicht van de oplossingen per functie, gesorteerd op basis van de analyses en beoordelingen.

Funcities	Voorkeur #1	Voorkeur #2	Voorkeur #3	Voorkeur #4
Bot vasthouden	 Ingieten	 Vastschroeven	 Inklemmen	 Vastlijmen
Bot verwarmen	 Vloeistofbad	 Verwarmingsmantel	 IR-lamp	
- Richten	 Laser	 Markeringen	 Op het oog	
Bot uitlijnen				
- Verplaatsen & Kantelen	 Fijn	 Grof		
Ruimafval opslaan	 Vloeistof	 Opvangbak	 Afzuiging	
Temperatuur meten	 Thermokoppel	 Weerstandsthermometer	 Thermistor	 IR-thermometer
Torsiekoppel meten	011010011110101010 101001011001001010 100100111001111010 101010101010101001 010101010101010101 010110010111011010 011100101001011011 Digitaal	 Analoog		
Signaal versturen	011010011110101010 101001011001001010 100100111001111010 101010101010101001 010101010101010101 010110010111011010 011100101001011011 Digitaal	 Analoog		
Signaal vastleggen	011010011110101010 101001011001001010 100100111001111010 101010101010101001 010101010101010101 010110010111011010 011100101001011011 Digitaal	 Analoog		

De samenhang van de oplossingen binnen de voorlopige meetopstelling wordt in de volgende paragrafen geanalyseerd en eventueel aangepast om tot een optimaal eindresultaat te komen. Het eindresultaat is optimaal wanneer er aan alle eisen voldaan wordt en er ook zo veel mogelijk wensen vervuld worden. Het kan zijn dat niet de beste oplossing voor een bepaalde functie wordt gekozen, maar dat die keuze met het oog op het functioneren van de gehele meetopstelling te verdedigen valt.

8.2 Het bot bevestigen en uitlijnen

8.2.1 Algemeen

Aan de hand van de analyse van de verschillende bevestigingssystemen is gebleken dat het ingieten van het bot met behulp van een metaallegering de beste keuze is. Uit de analyse van de verschillende mogelijke legeringen is gebleken dat de legering met een smeltpunt van 77 °C het beste gietmateriaal is. De eigenschappen van deze legering zijn terug te vinden in bijlage 7, tabel B7-1. Een groot bijkomend voordeel is dat het bot al in de juiste positie en oriëntatie gebracht en gehouden kan worden en met het ingietmiddel zo gefixeerd kan worden. De stap van het uitlijnen kan hierdoor overgeslagen worden wat tijdswinst oplevert. Dat is ook de reden om het vastschroeven van het botsegment niet te kiezen, ondanks de hoge beoordeling. In de vloeibare fase kan de legering ook optimaal contact krijgen met het oneffen botoppervlak. Een groot voordeel van dit type legering is dat het uitzet door de aanwezigheid van het element bismut. Hierdoor oefent de legering zelf een klemkracht uit op het bot en de houder.

De houder zelf wordt in de vloeistofbak geplaatst en op zijn plaats gehouden door middel van pen-en-gatverbindingen. Er zitten aan de giethouder en onder de vloeistofbak magneten die er voor zorgen dat de giethouder niet omhoog kan schieten tijdens het ruimen. De magneten moeten echter niet te sterk zijn, anders kan de houder niet uit de bak gehaald worden zonder extra hulpmiddelen.

8.2.2 Het referentiepunt bepalen

Door schijven met verschillende diameters op het oppervlak van het bot te plaatsen kan bekeken worden bij welke schijf al het beenmerg bedekt is. Iedere schijf heeft een klein gat in het midden waardoor het mogelijk is dit punt op het botoppervlak te markeren. Dit is dan het referentiepunt dat gebruikt wordt voor het uitlijnen. De diameter van de schijf is de diameter van de ruimerkop. De markering van het middelpunt moet duidelijk zichtbaar zijn en blijven, bij voorkeur wordt gebruik gemaakt van een klein deukje of gaatje in het beenmerg.

8.2.3 Het bot plaatsen en uitlijnen

Door nu 1 van deze gaatjes in het bot op de punt in de houder te plaatsen, is deze aan de onderkant automatisch uitgelijnd. Door nu het gaatje in het oppervlak van de andere kant van het bot boven het eerste gaatje te plaatsen wordt de lijn door deze punten gelijk aan de ruimas. De onderkant van het bot wordt op zijn plaats gehouden door de punt in de houder, de bovenkant wordt op zijn plaats gehouden door de 4 stelschroeven in het bovenste deel van de houder. Door de schroeven los of vast te draaien is het mogelijk om het bot te kantelen, tot deze zich in de juiste positie bevindt. Deze positie wordt bepaald door een laser die op het oppervlak schijnt zelf in het midden van de houder is.

8.2.4 Het bot ingieten

Omdat het smeltpunt van de legering 77 °C is, kan deze vooraf gesmolten worden in een warmwaterbad met gedemineraliseerd water bij een temperatuur van 90 °C. Deze temperatuur is hoger dan het smeltpunt van de legering, zodat de legering niet stolt tijdens het gieten, maar pas in de houder. Wanneer de legering in de houder gegoten wordt, komt deze in contact met het bevroren botsegment en zal het binnen 60 seconden geheel uitgehard en bruikbaar zijn.

8.3 Het bot verwarmen en het ruimafval opvangen

Om de juiste omgevingstemperatuur te simuleren, kan er het beste voor gekozen worden om in een vloeistofbad te meten. Door deze op 37,0 °C in te stellen, worden de temperaturen nagebootst zoals die ook in het lichaam zijn. Door het uit te boren botsegment geheel onder vloeistof te plaatsen, zullen alle weefselfragmenten in de vloeistof opgevangen worden. Deze combinatie van oplossingen is dan ook optimaal. Als opvang- en verwarmingsvloeistof kan het beste water worden gekozen omdat dit goedkoop, gemakkelijk en ruim voor handen is. Door natrium chloride aan het water toe te voegen zal de kwaliteit van het botweefsel minder snel afnemen. In de medische wereld is de standaard hoeveelheid 9 gram natrium chloride op een totaal volume van 1 liter oplossing, dit heet een saline oplossing.

Het water kan het gemakkelijkst verwarmd worden met een dompelaar. Dit is een simpel verwarmingselement waaraan een thermostaat gekoppeld moet worden, zodat de temperatuur constant 37,0 °C kan blijven. De keuze van de torsiekoppelsensor schrijft wel voor dat er slechts een beperkt volume gebruikt mag worden om het draagvermogen van de sensor niet te sterk te belasten.

8.4 De temperatuur meten

8.4.1 Algemeen

De beste temperatuursensor is in dit geval het thermokoppel, vooral de kleine afmetingen zijn doorslaggevend geweest in de keuze. Er zal gebruik worden gemaakt van een type K thermokoppel, de meest gangbare variant voor een temperatuursbereik van 0-150 °C.

8.4.2 Plaatsing

Literatuur wijst aan dat axiale plaatsing van een sensor de meest betrouwbare metingen geeft. (34) Deze methode heeft als bijkomend voordeel dat de thermokoppels gemakkelijker geplaatst kunnen worden, omdat radiaal en tangentieel geplaatste sensoren bij het ingieten moeilijker te plaatsen zijn. De locatie langs de lengte as van het bot is niet van belang, zolang deze maar 15 mm van het uiteinde van het corticale botweefsel af zit. De afstand tot de ruimer kan gevarieerd worden en door meerdere thermokoppels per meting aan te brengen scheelt dat weer in het gebruik van bot en het aantal benodigde metingen. Bij ieder segment moet wel de precieze locatie van de sensor genoteerd worden.

Nadat het gat voor het thermokoppel geboord is, wordt een vloeibare metaallegering in het gat ingebracht met behulp van een injectienaald. De eigenschappen van deze legering zijn te vinden in bijlage 7, tabel B7-2. 0,005 ml per gat is voldoende legering om zeker te zijn van een goede thermische geleiding. Hierna wordt het thermokoppel geplaatst, welke aan de bovenkant van het gat

vastgezet wordt met een druppel secondelijm. De thermokoppels kunnen later gemakkelijk verwijderd worden door de secondelijm met aceton of chloroform op te lossen. Ze kunnen ook met het bot en al verwijderd worden om tijd te besparen.

8.5 Het torsiekoppel meten

Er zal gebruik worden gemaakt van een digitale torsiekoppelsensor die aangesloten wordt op de vloeistofbak, waaraan ook alle andere onderdelen bevestigd worden. Dit voorkomt dat de sensor waterdicht aangesloten moet worden op de houder met het bot. Het is geen probleem voor de sensor om het gewicht van de vloeistofbak te dragen, de maximale kracht die op de sensor mag worden uitgeoefend is ongeveer 400 N wat ongeveer een gewicht van 40 kg is. De sensor is ontwikkeld en gebouwd door ATI en het model is de Mini45, te zien in Figuur 14. (35)



Figuur 14. De bovenzijde van een Mini45 torsiekoppelsensor.

8.6 De signalen versturen en opslaan

Het thermokoppel wordt aangesloten op een data-acquisitie systeem. Dit systeem wordt aangesloten op de computer, zodat er constant aan de temperatuur gemeten kan worden, met meerdere thermokoppels tegelijkertijd. De torsiekoppelsensor wordt op dezelfde manier aangesloten, zodat ook daarmee continue metingen gedaan kunnen worden. Beide signalen worden op de computer opgeslagen als functie van de tijd. Bij de validatie van het model worden deze gegevens vergeleken met de gegevens uit de simulatie van het model.

8.7 Overige

8.7.1 Oorsprong en type van het bot

In dit onderzoek ligt de focus op het femur, omdat de uiteindelijk verkregen meetresultaten, vanwege de femorale geometrie, het beste in het model passen. Er zal gebruik gemaakt gaan worden van segmenten met een hoogte van minimaal 3 cm tot maximaal 10 cm uit de diafyse van een menselijk femur. Op die manier kunnen er ongeveer 3 tot 10 bruikbare segmenten uit 1 femur gehaald worden. Variatie in de opbouw en geometrie in individuele botten is onvermijdelijk, maar extremen moeten voorkomen worden om ongewenste of onverwachte effecten uit te sluiten. Om eventuele verschillen later te kunnen verklaren is het noodzakelijk om van de donor het geslacht, de leeftijd, het gewicht, of het de linker of rechter zijde betreft en eventuele bekende ziektes te weten.

Botten met duidelijke sporen van botaandoeningen worden niet gebruikt. Röntgenfoto's van de botten kunnen een indicatie geven voor de aanwezigheid van botaandoeningen.

8.7.2 Toestand van het bot

Invriezen is de beste methode voor het gebruik bij mechanische testen volgens Unger et al. (33) Er zal dan ook gebruik gemaakt worden van vers ingevroren botten om te kunnen garanderen dat de mechanische eigenschappen van het botweefsel niet meer dan de geëiste 2% veranderen. Door een röntgenfoto van alle botten te maken kunnen vooraf afwijkingen aan het weefsel en de mergholte opgespoord worden. Als dit niet mogelijk zou blijken dan moeten de botsegmenten na de meting geïnspecteerd worden op afwijkingen, waarna de meetgegevens alsnog goed- of afgekeurd kunnen worden.

8.7.3 Gebruik van het bot

Het aangeleverde botmateriaal moet minimaal 30 mm hoog zijn, stukken langer dan 60 mm kunnen in 2 of meerdere stukken gezaagd worden om materiaalverlies tegen te gaan. Door ruimerkoppelen met oplopende diameter te gebruiken, 0,5 mm toename in diameter is wat in de praktijk gebruikt wordt en voor de metingen ook prima geschikt is, kan een enkel botsegment meerdere keren gebruikt worden. Bij de plaatsing van de thermokoppels moet daar wel rekening mee gehouden worden.

8.7.4 De gehele opstelling

Voor de meetopstelling worden normale constructiematerialen gebruikt:

- Aluminium giethouder voor optimale warmtegeleiding.
- Neodymium magneten als extra bevestiging van de giethouder.
- Roestvrij staal (RVS) voor alle andere onderdelen.

Daarnaast zijn er nog verbruiksmaterialen:

- Bismut-indium-tin legering als gietmateriaal.
- Gallium-indium-tin legering als geleidend materiaal voor de thermokoppels.
- Water met natrium chloride voor het verwarmingsbad en als opvangmedium voor het ruimaafval.
- Secondelijm om de thermokoppels vast te lijmen.

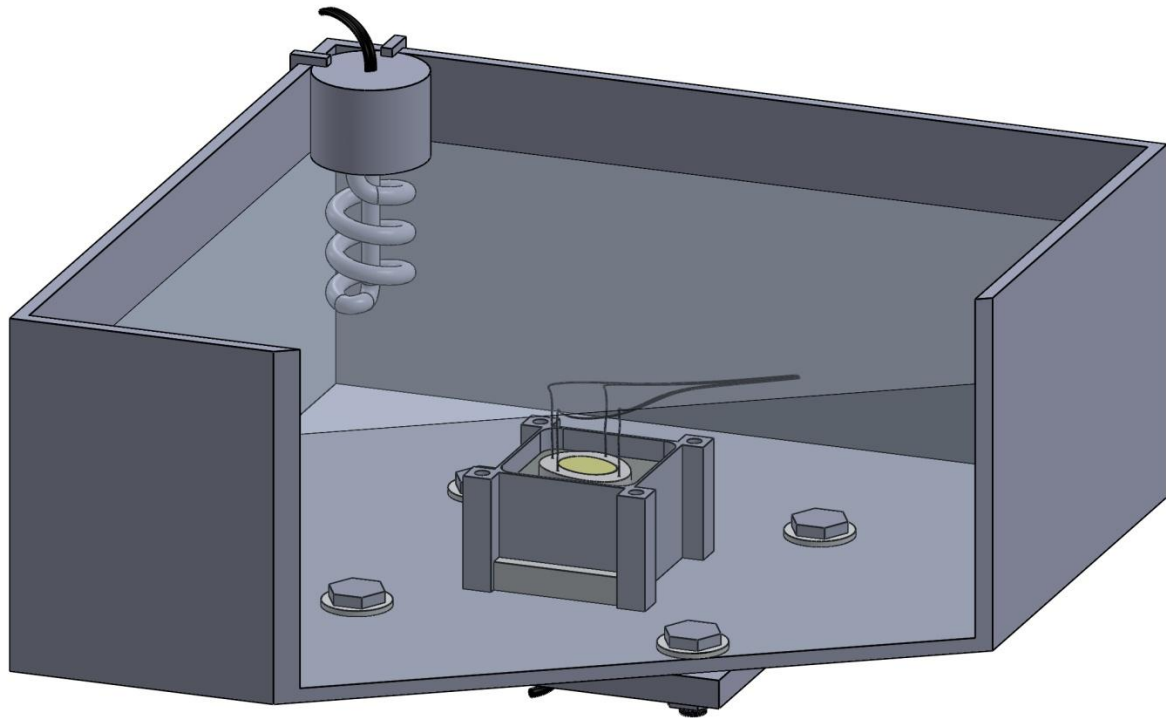
Deze materialen leveren zelf geen gevaar op voor de gebruiker, zolang deze er verstandig mee omgaan. Scherpe hoeken en randen kunnen echter het beste afgerond worden en zware voorwerpen, zoals de waterbak, moeten degelijke handvatten krijgen om goed getild te kunnen worden. Bij het werken met de bismut-indium-tin legering in gesmolten toestand moet beschermende kleding gedragen worden, zodat eventuele rondvliegende druppels geen brandwonden kunnen veroorzaken. Brandgevaarlijke materialen moeten uit de buurt worden gehouden.

Aangezien de gehele opstelling op de torsiekoppelsensor rust, moet deze op een stevige ondergrond gemonteerd worden. Er moet rekening gehouden worden met het zwaartepunt, zodat de opstelling niet om kan vallen tijdens de metingen.

Hoofdstuk 9 – Voorgestelde meetopstelling

9.1 Overzicht

In Figuur 15 is het eindmodel te zien die in de volgende paragrafen verder beschreven en uitgewerkt wordt. De technische tekeningen met afmetingen en doorsnedes zijn te vinden in bijlagen 1-6.

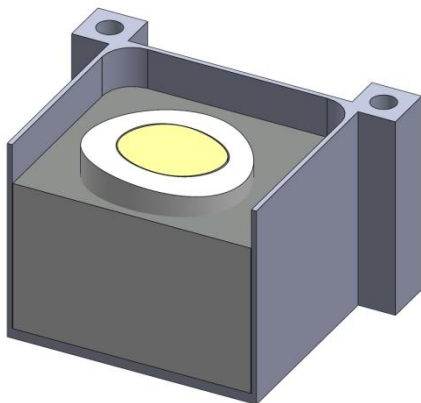


Figuur 15. Het voorgestelde eindmodel, opengewerkt.

De meest relevante onderdelen zijn de giethouder met daarin het ingegoten botsegment en de aangesloten thermokoppels. De giethouder is met magneten en pinnen verbonden aan de vloeistofbak, die op zijn beurt met bouten en plastic ringen, waterdicht aan de montageplaat is bevestigd. De montageplaat zit vast aan de torsiekoppelsensor en het verwarmingselement in de hoek zorgt voor het verwarmen van de vloeistof, de overige onderdelen en het bot.

9.2 Ingegoten Botsegment

Het botsegment kan buiten de vloeistofbak uitgelijnd en ingegoten worden. In Figuur 16 is een botsegment te zien dat ingegoten is in de giethouder.

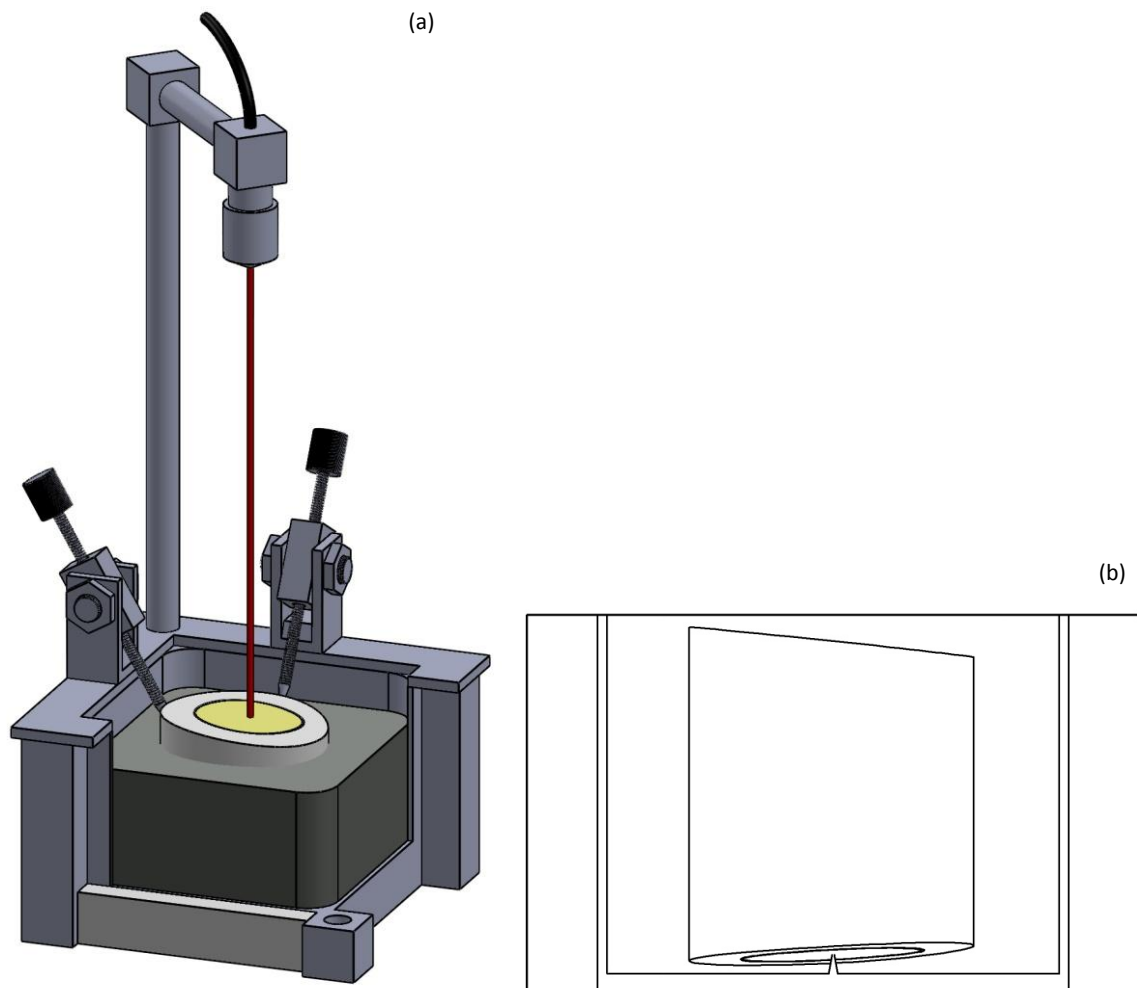


Figuur 16. Een ingegoten botsegment in de giethouder, opengewerkt.

Het bot hoeft niet tot precies aan de bovenrand ingegoten te worden. De afgeronde hoeken zorgen ervoor dat de legering later gemakkelijker verwijderd kan worden als de meting voorbij is.

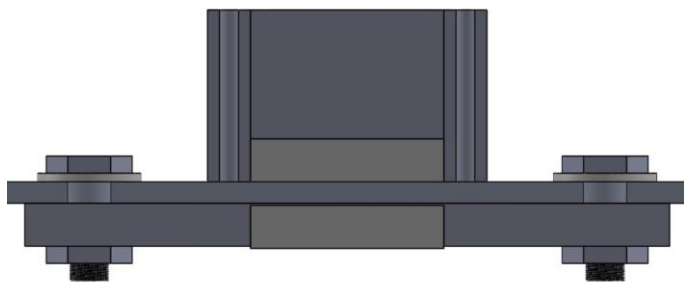
9.3 Uitgelijnd botsegment

In Figuur 17a is een botsegment te zien dat is ingegoten en waarbij het uitlijnsysteem nog op de giethouder is aangesloten. De rode lijn is de laserstraal die gebruikt wordt om het midden van het botsegment op de juiste plek te krijgen. In Figuur 17b is te zien hoe het botsegment balanceert op de punt onderin de giethouder. Deze wordt op zijn plaats en in de juiste oriëntatie gehouden met behulp van de 4 stelschroeven, waarvan er 2 te zien zijn in Figuur 17a. Deze schroeven kunnen gekanteld en in- en uitgeschroefd worden. Zo kunnen zowel korte als lange, maar ook dunne of dikke botten bevestigd worden. De laser en de stelschroeven zijn bevestigd op een kleine montageplaat die aan de giethouder bevestigd kan worden. In Figuur 16 is de giethouder te zien zonder dit systeem.



Figuur 17. Een uitgelijnd en ingegoten botsegment met uitlijnsysteem nog bevestigd op de giethouder, opengewerkt in (a). Het botsegment balanceert op de punt in de giethouder, opengewerkt in (b).

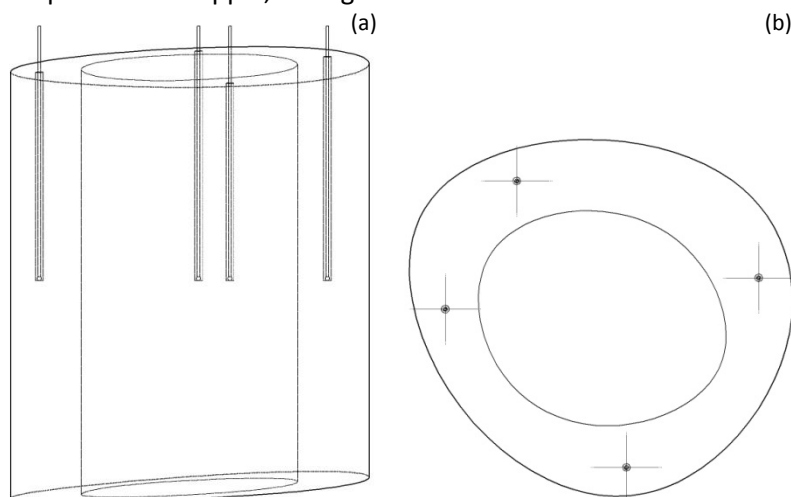
De lichtgrijze balk in Figuur 17a is 1 van de 2 magneten die de giethouder stevig op de bodem van de vloeistofbak moet houden. In Figuur 18 zijn de posities te zien van de magneten ten opzicht van elkaar, waarbij de lichtgrijze balk aan de onderkant de magneet is die in de montageplaat zit en de lichtgrijze balk erboven vast zit aan de giethouder. Ze zijn zo georiënteerd dat de noordpool van de ene magneet de zuidpool van de andere aantrekt.



Figuur 18. De positie van de magneten ten opzichte van elkaar, met de noord- en zuidpolen tegen elkaar.

9.4 Aangebrachte thermokoppels

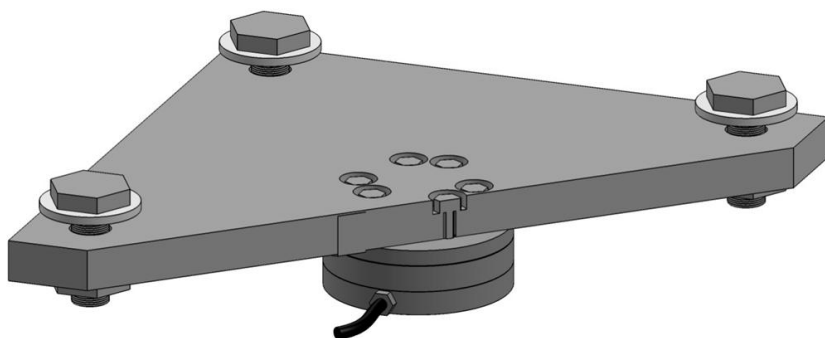
De thermokoppels worden in gaten met een diameter van $0,5 \pm 0,1$ mm geplaatst, samen met de legering die voor optimale warmtegeleiding zal zorgen. De gaten worden geboord nadat de houder in de opstelling geplaatst is. In Figuur 19 is te zien hoe de plaatsing er uiteindelijk uit ziet voor meerdere sensoren. De diepte waarop de thermokoppels zich bevinden kan gevarieerd worden per meting en zelfs per thermokoppel, zolang deze zich minimaal 15mm van het uiteinde van het bot bevinden.



Figuur 19. Plaatsing en bevestiging van het thermokoppel in het corticale deel van het bot. Zijaanzicht in (a) en bovenaanzicht in (b).

9.5 Bevestigde torsiekoppelsensor

In Figuur 20 is onderaan de torsiekoppelsensor te zien die met 6 bouten bevestigd is aan de montageplaat, de overige bouten zijn voor bevestiging aan de vloeistofbak.



Figuur 20. De torsiekoppelsensor, bevestigd aan de montageplaat, met bouten voor de bevestiging aan de vloeistofbak.

Hoofdstuk 10 – Conclusies en discussie

De meetopstelling die in Hoofdstuk 9 is gepresenteerd voldoet aan alle eisen en is daarmee geschikt om ex vivo de temperatuursontwikkeling in het corticale bot tijdens het ruimen van een pijpbeen te meten, zoals omschreven in de ontwerpdoelen in Hoofdstuk 4. Het is ook mogelijk om meerdere metingen tegelijk uit te voeren en door het continue meten van de temperatuur en het torsiekoppel, moet het mogelijk zijn om de bruikbaarheid van het fysische model te kunnen bepalen en de juistheid van de materiaalparameters aan te kunnen tonen. De combinatie van de beste oplossingen maakt deze opstelling ook tot de meest geschikte voor dit type onderzoek.

Verwachte problemen met deze opstelling zullen voornamelijk in de constructiefase voorkomen. De constructie moet stevig genoeg zijn, maar die stevigheid mag de torsiekoppelsensor niet te sterk belasten bij het gebruik van te zwaar of teveel constructiemateriaal. In plaats van RVS zou er daarom ook gekozen kunnen worden voor aluminium of plastic als constructiemateriaal voor sommige onderdelen, ondanks het feit dat deze minder slijtvast zijn.

Het grote voordeel van deze meetopstelling is de universele bevestigingsmethode, namelijk het ingieten van botsegmenten. Hierdoor is het in de toekomst ook mogelijk om met deze meetopstelling andere onderzoeken uit te voeren dan waar die oorspronkelijk voor ontworpen is. Zo kan er gedacht worden aan het testen van anorganische botsubstituten, om zo hun bruikbaarheid te bepalen. Daarnaast kan de temperatuursmeting nog doorlopen nadat de ruimer al gestopt en/of verwijderd is. Hiermee kunnen de thermische eigenschappen van het botsegment beter onderzocht worden. Het testen van verschillende ruimerkoppelen is een voor de hand liggende optie, evenals het ingieten van allerlei andere voorwerpen met oneffen oppervlakken en complexe geometrieën, waar thermisch en mechanisch onderzoek naar gedaan moet worden.

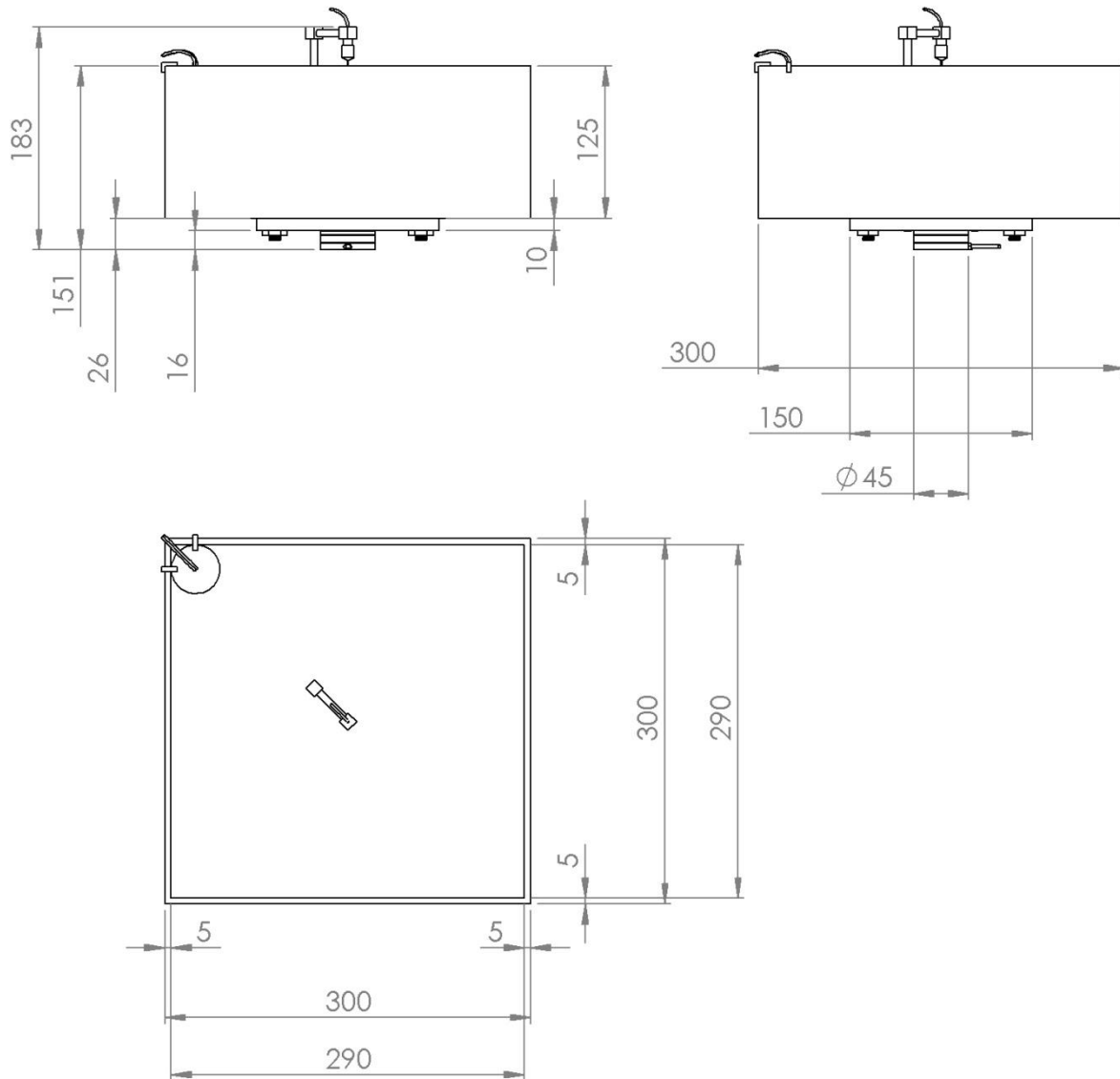
Bronnen

1. **Sharir, A., Barak, M.M. and Shahar, R.** Whole bone mechanisc and mechanical testing. *The Veterinary Journal*. 2008, Vol. 177, 1, pp. 8-17.
2. **Platzer, W.** *Atlas van de anatomie*. 21e editie. Baarn : Sesam, 2008. Vol. I.
3. **Marieb, E.N. and Hoehn, K.** *Human Anatomy & Physiology*. 7e Editie. San Francisco : Pearson, 2007.
4. **Stephenson, P. and Seedhom, B.B.** Modelling femoral curvature in the sagittal plane: a cadaveric study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2001, Vol. 215, 2, pp. 221-228.
5. **Rubin, P.J., et al.** The morphology of the proximal femur: A three-dimensional radiographic analysis. *The Journal Of Bone And Joint Surgery - Series B*. 1992, Vol. 74, 1, pp. 28-32.
6. **Feik, S.A., et al.** Regional Variations in Cortical Modeling in the Femoral Mid-Shaft: Sex and Age Differences. *American Journal of Physical Anthropology*. 2000, Vol. 112, 2, pp. 191-205.
7. **Kizilkanat, E., et al.** Location, number and clinical significance of nutrient foramina in human long bones. *Annals Of Anatomy*. 2007, Vol. 189, 1, pp. 87-95.
8. **Müller, C.A., Green, J. and Südkamp, N.P.** Physical and technical aspects of intramedullary reaming. *Injury*. 2006, Vol. 37, 4, pp. S39-S49.
9. **Windisch, G., et al.** A morphometrical study of the medullary cavity of the ulna referred to intramedullary nailing. *Surgical and Radiologic Anatomy*. 2007, Vol. 29, 1, pp. 47-53.
10. **Cross, A.T.** Gerhard Küntscher: A surgical giant. *AO Dialogue*. December 2001, Vol. 15, 11, pp. 15-16.
11. **Green, J.** History and development of suction-irrigation-reaming. *Injury*. 2010, Vol. 41, 2, pp. S24-S31.
12. **Pfister, U.** Marknagelung nach Aufbohrung. *Orthopäde*. 2010, Vol. 39, 2, pp. 171-181.
13. **Bong, M.R., et al.** Intramedullary Nailing of the Lower Extremity: Biomechanics and Biology. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2007, Vol. 15, 2, pp. 97-106.
14. **Högel, F., et al.** Pulmonary fat embolism after reamed and unreamed nailing of femoral fractures. *Injury*. 2010, Vol. 41, 12, pp. 1317-1322.
15. **Baumgart, F., Kohler, G. en Ochsner, P.E.** The physics of heat generation during reaming of the medullary cavity. *Injury*. 1998, Vol. 29, Supplement 2, pp. 11-25.
16. **Karunakar, M.A., et al.** The Thermal Effects of Intramedullary Reaming. *Journal of Orthopaedic Trauma*. 2004, Vol. 18, 10, pp. 674-679.
17. *A Wireless Temperature Measurement Guid Rod for Internal Bone Fixation Surgery*. **Lam, R.H.W., Li, W.J. and Xi, N.** Taipei : IEEE, 2003. International Conference on Robotics & Automation. pp. 1768-1773.
18. **Leunig, M. and Hertel, R.** Thermal Necorsis after Reaming for Intramedullary Nail Fixation. *The Journal Of Bone and Joint Surgery, British Volume*. 1996, Vols. 78-B, 4, pp. 584-587.
19. **Ochsner, P.E., Baumgart, F. and Kohler, G.** Heat-induced segmental necrosis after reaming of one humeral and two tibial fractures with a narrow medullary canal. *Injury*. Vol. 29, 2, pp. S-B1-S-B10.
20. **Karmani, S.** The thermal properties of bone and the effects of surgical intervention. *Current Orthopaedics*. 2006, Vol. 20, 1, pp. 52-58.
21. **Eriksson, A.R. and Albrektsson, T.** Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: A vital-microscopic study in the rabbit. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1983, Vol. 50, 1, pp. 101-107.
22. **Delloye, C., et al.** Bone allografts - what they can offer and what they cannot. *The Journal Of Bone And Joint Surgery*. 89, 2007, B:57, pp. 4-9.

23. **Pearce, A.I., et al.** Animal models for implant biomaterial research in bone: a review. *European Cells and Materials*. 2007, Vol. 13, pp. 1-10.
24. **Bolder, S.B.T., et al.** Acetabular defect reconstruction with impacted morsellized bone grafts or TCP/HA particles. A study on the mechanical stability of cemented cups in an artificial acetabulum model. *Biomaterials*. 2002, Vol. 23, 3, pp. 659-666.
25. **Kneubuehl, B.P. and Thali, M.J.** The evaluation of a synthetic long bone structure as a substitute for human tissue in gunshot experiments. *Forensic Science International*. 2003, Vol. 138, 1-3, pp. 44-49.
26. **Liebschner, M.A.K.** Biomechanical considerations of animal models used in tissue engineering of bone. *Biomaterials*. 2004, Vol. 25, 9, pp. 1697-1714.
27. **Muschler, G.F., et al.** The Design and Use of Animal Models for Translational Research in Bone Tissue Engineering and Regenerative Medicine. *Tissue Engineering*. 2010, Vol. 16, 1, pp. 123-145.
28. SYNbone anatomical models for education. [Online] Maart 2007. [Cited: Mei 1230, 2012.] http://www.synbone.ch/global/pdf/product_services/Statement_Artificial_vs_Human_Bones.pdf.
29. **Steeves, M., et al.** How pilot-hole size affects bone-screw pullout strength in human cadaveric cancellous bone. *Canadian Journal of Surgery*. 2005, Vol. 48, 3.
30. **Kelly, G.** Body Temperature Variability (Part 1): A Review of the History of Body Temperature and its Variability Due to Site Selection, Biological Rhythms, Fitness, and Aging. *Alternative Medicine Review*. 2006, Vol. 11, 4, pp. 278-293.
31. **Turner, C.H. and Burr, D.B.** Basic Biomechanical Measurements of Bone: A Tutorial. *Bone*. 1993, Vol. 14, 4, pp. 595-608.
32. **Robertson, D.D., et al.** Three-Dimensional Analysis of the Proximal Part of the Humerus: Relevance to Arthroplasty. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2000, Vols. 82-A, 11, pp. 1594-1602.
33. **Unger, S., Blauth, M. and Schmoelz, W.** Effects of three different preservation methods on the mechanical properties of human and bovine cortical bone. *Bone*. 2010, Vol. 47, 6, pp. 1048-1053.
34. **Frölke, J.P.M., et al.** The assessment of cortical heat during intramedullary reaming of long bones. *Injury*. 2001, Vol. 32, 9, pp. 683-688.
35. ATI Force / Torque Sensor: Mini45. [Online] [Cited: Mei 30, 2012.] http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Mini45.

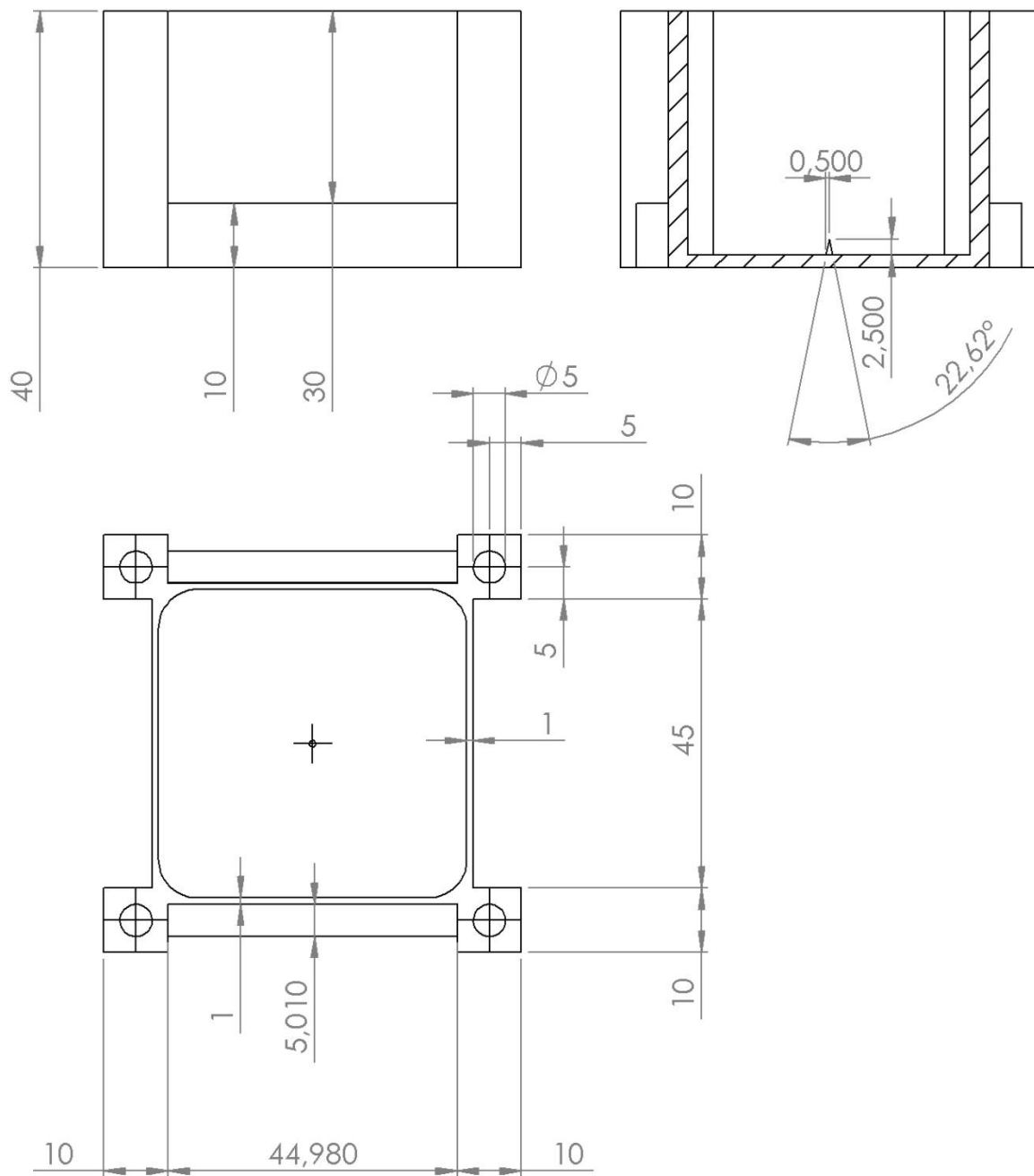
Bijlagen

Bijlage 1. Technische tekeningen van de gehele meetopstelling



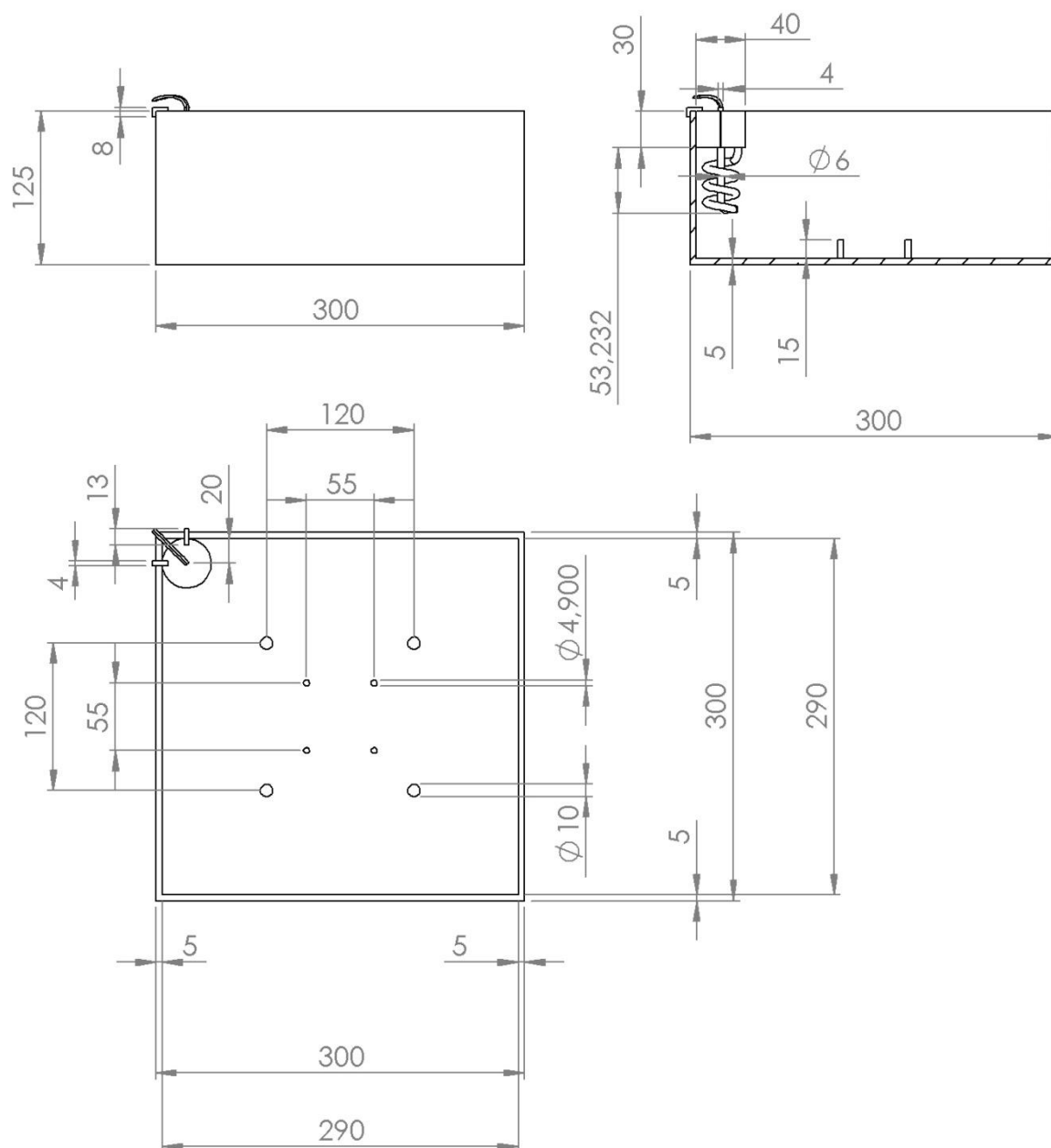
Figuur B1. Technische tekeningen van de gehele meetopstelling, met de klok mee: vooraanzicht, zijaanzicht en bovenaanzicht. Alle maten zijn in millimeter.

Bijlage 2. Technische tekeningen van het bevestigingssysteem



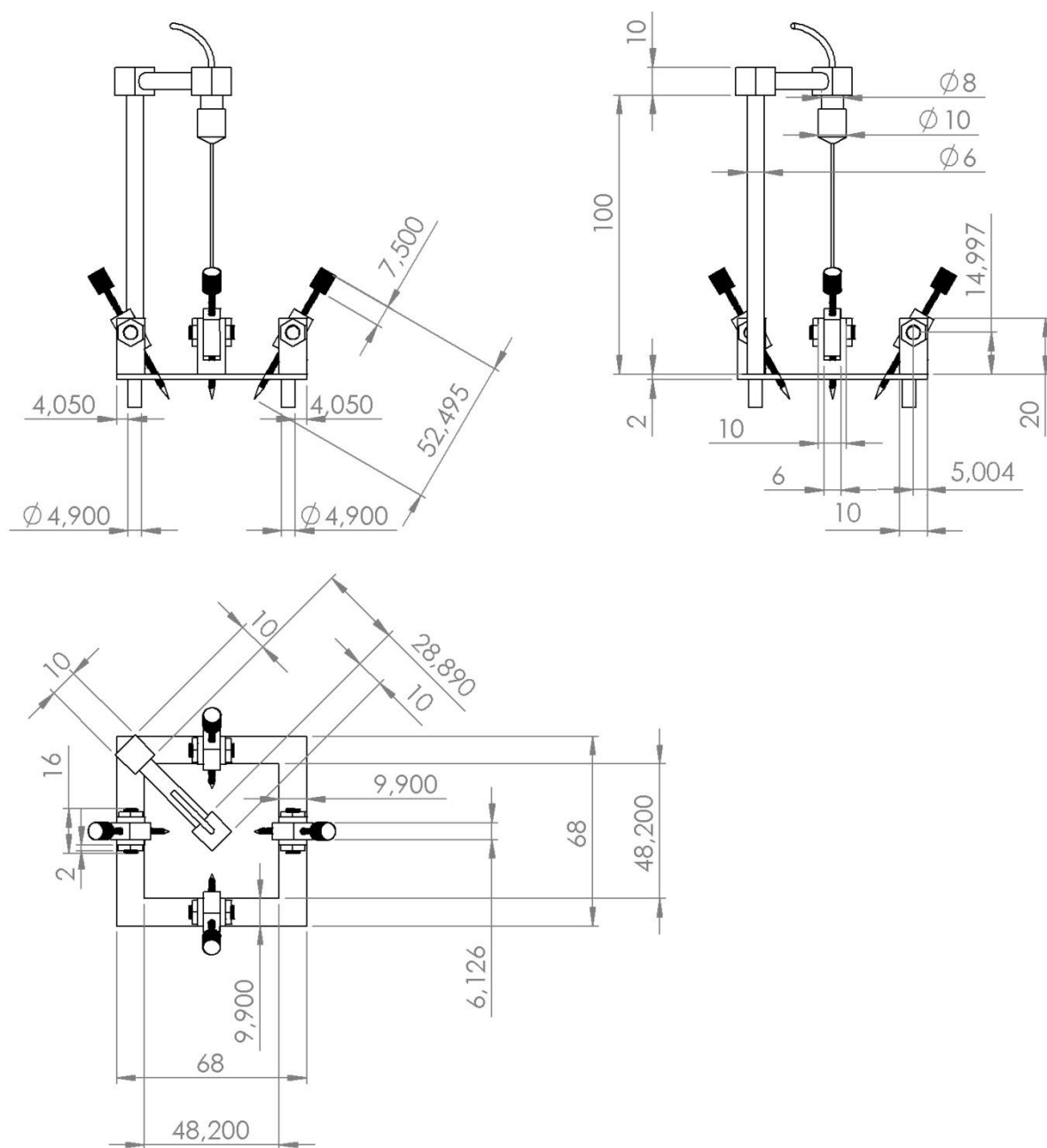
Figuur B2. Technische tekeningen van de giethouder, met de klok mee: vooraanzicht, opengewerkt zijaanzicht en bovenaanzicht. Alle maten zijn in millimeter en alle hoeken zijn in graden.

Bijlage 3. Technische tekeningen van het verwarmingssysteem



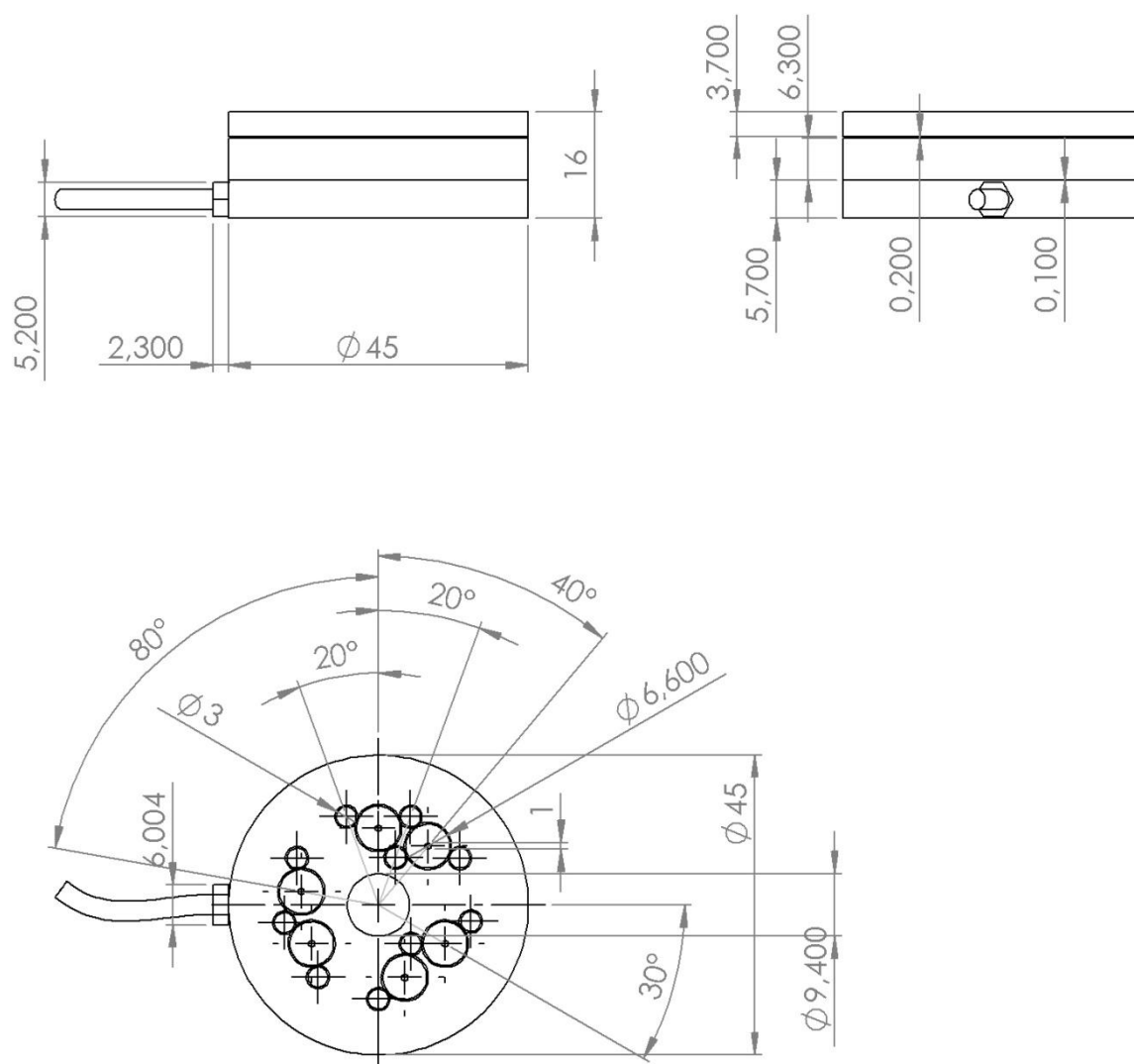
Figuur B3. Technische tekeningen van het verwarmingssysteem, met de klok mee: vooraanzicht, opengewerkt zijaanzicht en bovenaanzicht. Alle maten zijn in millimeter.

Bijlage 4. Technische tekeningen van het uitlijnsysteem



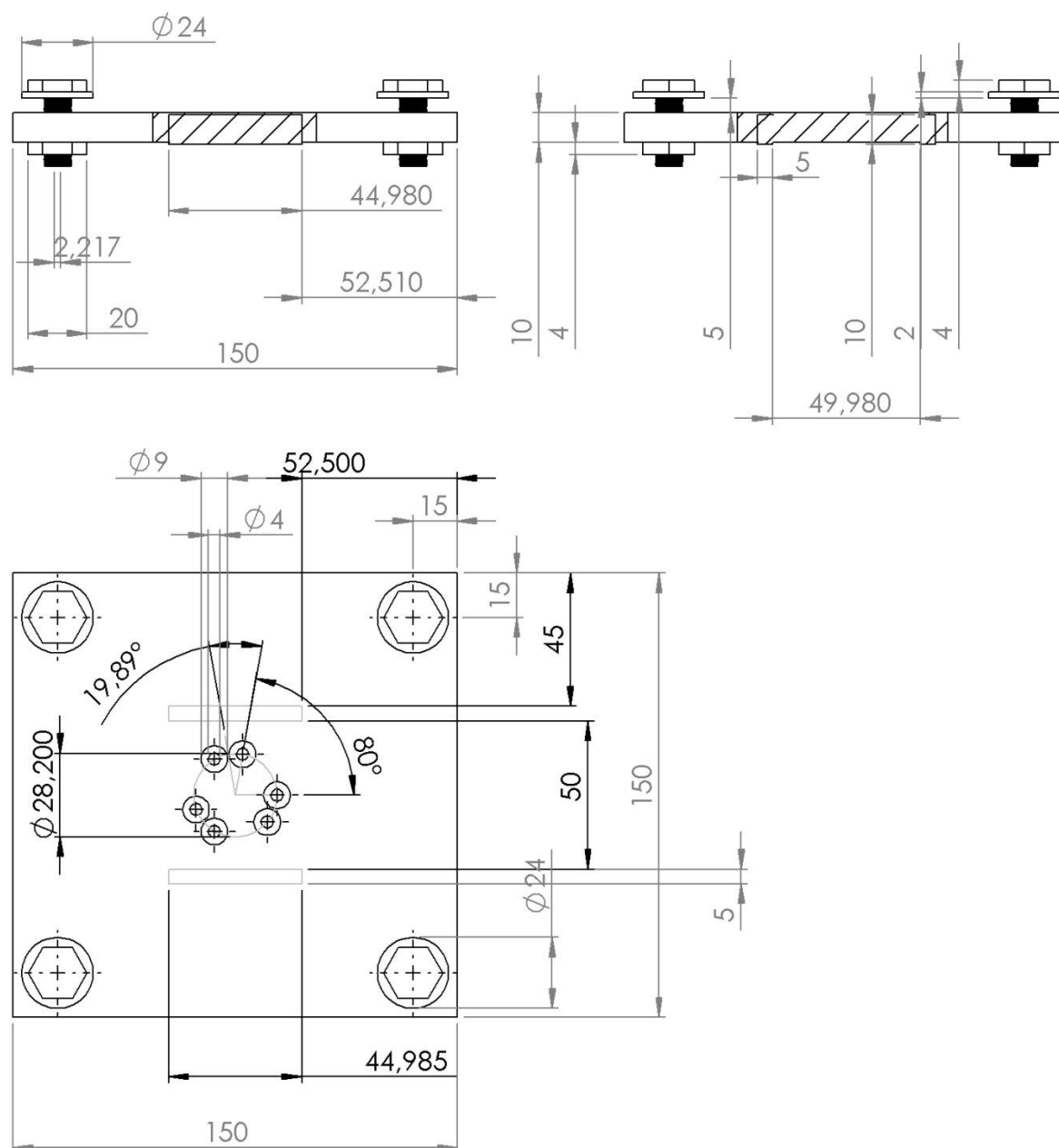
Figuur B4. Technische tekeningen van het uitlijnsysteem, met de klok mee: vooraanzicht, zijaanzicht en bovenaanzicht. Alle maten zijn in millimeter.

Bijlage 5. Technische tekeningen van de torsiekoppelsensor



Figuur B5. Technische tekeningen van de torsiekoppelsensor, met de klok mee: vooraanzicht, zijaanzicht en bovenaanzicht. Alle maten zijn in millimeter en alle hoeken zijn in graden.

Bijlage 6. Technische tekeningen van de montageplaat



Figuur B6. Technische tekeningen van de montageplaat, met de klok mee: vooraanzicht, zijaanzicht deels opengewerkt en bovenaanzicht deels opengewerkt. In het vooraanzicht zijn de magneten met grijs aangegeven, maar zijn niet zichtbaar vanaf boven. Alle maten zijn in millimeter.

Bijlage 7. Eigenschappen van de legeringen

Tabel B7-1. Gietmateriaal voor het bot.

Eigenschappen	Gegevens
Productnaam	LOW174
Smeltpunt	77,4 °C
Samenstelling	Bismut: 57,2% - Indium 24,8% - Tin 18%

Tabel B7-2. Geleidingsmateriaal voor de thermokoppels.

Eigenschappen	Gegevens
Productnaam	Geen
Smeltpunt	10,7 °C
Samenstelling	Gallium: 62,5% - Indium 21,5% - Tin 16%