

Aus der Klinik für Neurochirurgie,  
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar  
Direktor: Prof. Dr. Joachim Oertel

**Retrospektive Langzeitanalyse der Kranioplastik mittels PMMA  
Schädeldachplastik – Führt die Implantation einer künstlichen  
Schädeldachplastik zu einem besseren Patienten Outcome**

**Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät**

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2023

vorgelegt von: Gerrit Fischbach  
geb. am: 24.03.1988 in Neuwied

**Meiner Familie**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	6
<b>Zusammenfassung</b> .....	7
<b>Summary</b> .....	8
<b>1. Einleitung</b> .....	9
1.1 Trepanation.....	9
1.2 Kranioplastik .....	9
1.3 Geschichtlicher Überblick von Trepanation und Kranioplastik .....	10
1.4 Materialien der Kranioplastik .....	12
1.4.1 Autologer Eigenknochen.....	12
1.4.2 Hydroxylapatit.....	13
1.4.3 Titan- Mesh.....	14
1.4.4 Aluminiumoxid-Keramik .....	15
1.4.5 Polyetheretherketon (PEEK).....	15
1.4.6 Polymethylmethacrylat (PMMA).....	15
1.5 Eigene Zielsetzung.....	17
<b>2. Dekompressive Kraniektomie</b> .....	18
2.1 Indikationen.....	18
2.1.1 Schädel-Hirn-Trauma .....	18
2.1.2 Zerebrovaskuläre Ereignisse .....	18
2.1.3 Weitere Indikationen .....	19
2.2 Durchführung .....	19
2.2.1 Uni-/bilaterale Hemikraniektomie .....	19
2.2.2 Bifrontale Kraniektomie.....	20
<b>3. Material und Methoden</b> .....	21
3.1 Material .....	21
3.1.1 Patientenkollektiv.....	21
3.2 Methode .....	22

3.2.1	Datenerhebung.....	22
3.2.1.1	Präoperative Datenerhebung .....	22
3.2.1.2	Perioperative Datenerhebung.....	22
3.2.1.3	Postoperative Datenerhebung.....	23
3.2.1.4	Follow-up .....	23
3.2.2	Analyse einzelner Faktoren .....	24
3.2.2.1	Grunderkrankung .....	24
3.2.2.2	Zeitliches Intervall zwischen dekompressiver Kraniektomie und Schädeldachplastik.....	24
3.2.2.3	Karnofsky Index .....	25
3.2.2.4	OP-Dauer.....	26
3.2.2.5	Operateur.....	26
3.2.2.6	Liquorleck.....	26
3.2.2.7	Duraersatzmaterial bei dekompressiver Kraniektomie.....	26
3.2.2.8	Ventrikulo-Peritonealer-Shunt .....	27
3.2.2.9	Komplikationen stationär postoperativ.....	27
3.2.2.10	Infektionen/ Komplikationen im Verlauf .....	27
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>28</b>
4.1	Zusammensetzung des Patientenkollektives.....	28
4.2	Komplikationen stationär postoperativ/ Infektionen bzw. Komplikationen im Verlauf .....	28
4.3	Einfluss der OP-Indikationen der dekompressiven Kraniektomie.....	31
4.4	Zeitliches Intervall zwischen dekompressiver Kraniektomie und Schädeldachplastik.....	33
4.5	Einfluss des präoperativen Karnofsky Index.....	33
4.6	OP- Dauer.....	34
4.7	Operateur.....	34
4.8	Liquorleck.....	35
4.9	Duraersatzmaterial bei dekompressiver Kraniektomie.....	36

4.10	Ventrikulo-Peritonealer-Shunt.....	36
<b>5.</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>38</b>
5.1	Allgemein .....	38
5.2	Grunderkrankung .....	40
5.3	Zeitliches Intervall zwischen dekompressiver Kraniektomie und Schädeldachplastik .....	41
5.4	Einfluss des präoperativen Karnofsky Index.....	43
5.5	OP- Dauer.....	44
5.6	Operateur.....	45
5.7	Liquorleck.....	46
5.8	Duraersatzmaterial bei dekompressiver Kraniektomie.....	46
5.9	Ventrikulo-Peritonealer-Shunt .....	48
<b>6.</b>	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>49</b>
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>50</b>
<b>8.</b>	<b>Danksagung</b> .....	<b>57</b>
<b>9.</b>	<b>Lebenslauf</b> .....	<b>58</b>

## Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
CAD	computer assisted design
CCT	craniale Computertomographie
cm	zentimeter
Co. KG	Compagnie Kommanditgesellschaft
CT	Computertomographie
EEG	Elektroenzephalografie
geb.	geboren
HTR	Hard Tissue Replacement
i.e.	id est
IBM®	International Business Machines Corporation
Max.	Maximum
Min.	Minimum
mm	millimeter
MRSA	Methicillin-resistenter Staphylococcus aureus
MRT	Magnetresonanztomographie
OP	Operation
PEEK	Polyetheretherketon
PMMA	Polymethylmethacrylat
SAB	Subarachnoidalblutung
SAP®	Systemanalyse Programmentwicklung
SE	Societas Europaea
SPSS®Statistics	Statistical Package für Social Sciences
u.a.	unter anderem
U.S.	United States
v.Chr.	vor Christus
VP-Shunt	Ventrikulo-Peritonealer-Shunt
z. B.	zum Beispiel

## Zusammenfassung

Seit Jahrhunderten wird versucht herauszufinden, welches Material das geeignetste für die Implantation einer Schädeldachplastik ist. Um lebensbedrohliche intrakranielle Druckerhöhungen, zum Beispiel verursacht durch Traumata, Hirninfarkte oder Blutungen, chirurgisch zu intervenieren, hat sich die dekompressive Kraniektomie als therapeutisches Verfahren bewährt. Es gibt verschiedene Operationsformen der dekompressiven Kraniektomie, die letztlich alle das gemeinsame Ziel der Druckentlastung verfolgen.

Die Implantation der Schädeldachplastik, welche den Folgeeingriff der dekompressiven Kraniektomie darstellt, wird durchgeführt, wenn der klinische Zustand des Patienten sich stabilisiert hat und ein gegebenenfalls vorhandenes Hirnödem abgeschwollen ist. Hierbei wird der entstandene knöcherne Defekt mit verschiedenen Materialien wieder aufgefüllt. In unserer Klinik für Neurochirurgie der Universität des Saarlandes, Homburg-Saar, werden überwiegend Kranioplastiken aus Polymethylmethacrylat implantiert, welche durch die computer assisted design (CAD) – Technik, also durch aufwendige Planung und durch eine 3D-Computertomographie, von der Firma ZimmerBiomet produziert werden.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, prä-, intra- oder postoperative Prädiktoren zu erkennen, die die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von postoperativen Komplikationen bzw. Komplikationen, die erst im Verlauf entstehen, erhöhen. Diese können dann vorzugsweise in der zukünftigen klinischen Routine bedacht und möglichst vermieden werden.

Hierfür wurde eine retrospektive monozentrische Analyse von 197 Fällen durchgeführt, welche im Zeitraum vom 01. Januar 2011 bis zum 31. Dezember 2018 in der Klinik für Neurochirurgie der Universität des Saarlandes, Homburg-Saar, eine Kranioplastik nach einer dekompressiven Kraniektomie erhalten haben.

Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass die computer assisted design – Technik eine vielversprechende Technik darstellt um Kranioplastiken aus Polymethylmethacrylat herzustellen. Diese könnte unterstützend und alternativ in der neurochirurgisch-operativen Behandlung im Bereich der Schädeldachrekonstruktion verwendet werden, jedoch wird auch dies nicht die Endlösung darstellen. Es werden zusätzliche Forschungsreihen notwendig sein, um weiter das Risikoprofil der Kranioplastik zu reduzieren.

## Summary

Retrospective Long-Term Analysis of Cranioplasty Using PMMA Cranioplasty - Does Implantation of Artificial Cranioplasty Lead To Better Patient Outcome.

For centuries, attempts have been made to find out which material is the most suitable for implantation of a cranioplasty. In order to surgically intervene life-threatening intracranial pressure elevations, for example caused by trauma, cerebral infarction or hemorrhage, decompressive craniectomy has proven to be a therapeutic procedure. There are several surgical forms of decompressive craniectomy, all of which ultimately share the common goal of relieving pressure.

The Implantation of cranioplasty, which is the follow-up procedure to decompressive craniectomy, is performed when the patient's clinical condition has stabilized and any existing brain edema has subsided. In this procedure, the resulting bony defect is refilled with various materials. In our Department of Neurosurgery at Saarland University, Homburg-Saar, we mainly implant cranioplasties made of polymethylmethacrylate, which are produced by the computer assisted design (CAD) technique, i.e. by elaborate planning and 3D computer tomography, by the ZimmerBiomet company.

The aim of this work is to identify pre-, intra- or postoperative predictors that increase the probability of the development of postoperative complications or complications that arise only in the course. These can then preferably be considered in future clinical routine and avoided if possible.

For this purpose, a retrospective monocentric analysis of 197 cases that underwent cranioplasty after decompressive craniectomy at the Department of Neurosurgery, Saarland University, Homburg-Saar, from January 01, 2011, to December 31, 2018, was performed.

Overall, it has been demonstrated that the computer assisted design technique is a promising technique to fabricate polymethyl methacrylate cranioplasties. This could be used supportively and alternatively in the neurosurgical-surgical treatment in the field of cranial vault reconstruction, but this will not be the final solution either. Additional series of research will be necessary to further reduce the risk profile of cranioplasty



# 1. Einleitung

## 1.1 Trepanation

Als Trepanation wird der Definition nach das „Operative Verfahren zur Eröffnung fest umschlossener Hohlräume, z. B. knöcherne Eröffnung der Schädelhöhle (Schädeltrepanation) oder der Zahnpulpa, früher auch Eingriff am Auge (Elliott-Trepanation bei Glaukom)“ [66], bezeichnet.

In der Neurochirurgie hat sich dieser Begriff durchgesetzt und beschreibt verschiedene Formen der Schädelöffnung. Zum einen ist dort die Bohrlochtrepanation zu nennen, bei der ein einzelnes Bohrloch in den Schädel gebohrt wird. Zum anderen gibt es die osteoplastische und osteoklastische Trepanation. Gemeinsam ist ihnen die Schädelöffnung mittels Kraniotom und Entfernung von einem Knochendeckel des Schädels; bei der osteoplastischen Trepanation wird der ausgesägte Knochendeckel direkt wieder reimplantiert, bei der osteoklastischen Trepanation (Kraniektomie) erfolgt dieses Vorgehen nicht.

## 1.2 Kranioplastik

Die Versorgung von Schädeldefekten, die chirurgisch rekonstruiert oder wiederhergestellt werden, nennt man Kranioplastik. Dies ist eines der ältesten Operationsverfahren und hat im Laufe der Geschichte einige Revolutionen erlebt. Es werden hohe Ansprüche an die Kranioplastik gestellt, zum einen als Schutz des Gehirns und zum anderen auch an die ästhetische Komponente, die dem Patienten wichtig ist [80]. Durchgeführt wird die Kranioplastik immer häufiger als Folge von Kraniektomien, welche aufgrund verschiedener Indikationen nötig sind [73]. Es gibt heutzutage viele verschiedene Materialien, welche verwendet werden, um einen Schädeldefekt wiederherzustellen.

Untersuchungen zeigten, dass die Deckung des Defektes jedoch nicht nur einen kosmetischen Vorteil mit sich bringt, sondern durchaus neurologische Verbesserungen erzielen kann, wie die Normalisierung von EEG-Veränderungen, Beseitigung von neurologischen Defiziten sowie eine Verbesserung der Kognition und des zerebralen Blutflusses [3,4,6,26,39,40]. Durch die Rekonstruktion können die physiologischen

intrakraniellen Druckverhältnisse wiederhergestellt werden, was zur Folge hat, dass die zerebrale Perfusion optimiert wird und ein Gleichgewicht zwischen Liquorproduktion und Liquorresorption entsteht [56].

### 1.3 Geschichtlicher Überblick von Trepanation und Kranioplastik

In den Andengebieten von Peru und Chile wurden bei archäologischen Entdeckungen auch Schädelkalotten gefunden, die bereits Zeichen einer Trepanation aufzeigten und deren Alter auf 3000 v.Chr. geschätzt wurde [28,55,71,74]. Ob diese nun durch Kriegsverletzungen, Schädel-Hirn-Traumata, religiöse Rituale, primitive medizinische Versuche, Schädelverformungen oder andere Erkrankungen zustande gekommen sind, kann nicht genau belegt werden. Allerdings scheinen die betroffenen Personen trotzdem einige Zeit überlebt zu haben [28,48]. Dies wurde ermöglicht, da meistens eine osteoklastische Trepanation durchgeführt wurde und eine Vielzahl an verschiedenen Materialien (Gold- und Silberplatten, Schalen von Kokosnüssen, Muscheln und sogar Kürbisse) [20,28,55] als Schädelplastik verwendet wurde. In vielen verschiedenen Völkern oder Kontinenten wie Afrika oder Asien wurde der Schädeldefekt so mittels Kranioplastik verschlossen [20].

Einer der ersten schriftlichen Texte über die Trepanation wurde in dem sogenannten Edwin Smith Papyrus im alten Ägypten bereits im Jahre 1600 v. Chr. verfasst [44]. Hippokrates, ein griechischer Arzt der von 460 bis 370 v. Chr. lebte, führte als Erster eine Klassifikation von Schädelverletzungen ein und stellte Überlegungen an, wie diese operativ versorgt werden könnten. Weiterhin machte er sich bereits damals Gedanken über einen erhöhten intrakraniellen Druck [48].

Im frühen 16. Jahrhundert, genauer gesagt im Jahre 1505, wurde durch den Kriegschirurgen Ibrahim bin Abdullah in einem kurzen Kapitel eines chirurgischen Lehrbuches das Verfahren zur Versorgung eines Schädeldefektes mittels Xenograft beschrieben. Dieses Xenograft wurde von Schädeln von Ziegen oder Hunden entnommen. Im Jahr 1565 erfolgte dann durch die italienischen Ärzte Fallopius und Petronius die erste Dokumentation über die Versorgung des Schädels, wenn die Dura mitverletzt wurde. Bei Mitbeteiligung der Dura sollte die Versorgung der Schädeldachplastik nicht mit dem eigenen Knochendeckel erfolgen, sondern mit einem Alternativmaterial wie beispielsweise einer Goldplatte.

1668, also fast 100 Jahre später, berichtete ein Chirurg aus Amsterdam namens Job Janszoon van Meekerender, dass die erste erfolgreiche knöcherne Kranioplastik durchgeführt wurde; in welchem Jahr dies stattgefunden hat, ist nicht genannt. Hierbei wurde einem Patienten aus Moskau ein Schädeldefekt, welcher infolge einer Schwertverletzung entstanden war, durch einen Teil vom Schädelknochen eines toten Hundes wieder aufgefüllt, so dass der Patient überlebte und zudem als geheilt galt [2,74]. Jedoch hatte es zur Folge, dass der Patient exkommuniziert wurde und von ihm verlangt wurde, dass er sein Heimatland verlassen müsse [74,84].

Durch weitere Forschung und Fortschritte der Medizin wurde im 19. Jahrhundert immer mehr Augenmerk auf die autologe Knochendeckung von Schädeldefekten geworfen. So berichtete Walther im Jahr 1821 von der ersten Implantation eines autologen Knochendeckels [87]. Im Jahr 1889 verwendetet Seydel dann zur plastischen Rekonstruktion eines Parietaldefektes Teile der Tibia [80]. Aber auch Rippen, die Scapula, das Os ilium oder das Sternum wurden als Implantat verwendet. Bei den Rippen war jedoch das Problem, dass die Konturen unter der darüberliegenden Hautschicht sehr stark zu erkennen waren [74].

Als Erstbeschreiber der allogenen Schädeldefektdeckung wird Morestin im Jahr 1915 genannt. Er verwendete Knorpelgewebe von Verstorbenen, um die Defekte zu versorgen. Aufgrund der guten Anpassungsfähigkeit und der Resistenz gegenüber Infektionen wurde einige Hoffnung in das Verfahren gesteckt. Es stellte sich allerdings schnell heraus, dass das Material nicht stark genug war und keine ausreichende Kalzifikation eintrat [61].

Durch die vielen Kopfverletzungen im Ersten Weltkrieg wurde der Bedarf an alternativen Materialien immer größer. Gold war zu teuer und bei Silberimplantaten kam es zur Verfärbungen der Haut durch Oxidierung. So wurde auch vereinzelt Platin, Blei oder Aluminium zur Kranioplastik verwendet. Allerdings traten dabei häufig Abstoßungsreaktionen und Intoxikationen bei den Patienten auf, so dass auch diese nicht weiter verwendet wurden [74].

Im Zweiten Weltkrieg wurde dann erstmals von Fulcher im Jahr 1942 Tantal als Kranioplastikmaterial verwendet. Es führte durch seine gute Formbarkeit zu ansprechenden kosmetischen Ergebnissen, doch war es relativ teuer, selten und führte auch aufgrund seiner Kälte-/Wärmeleitfähigkeit bei heißen oder kalten Temperaturen zu Kopfschmerzen [8].

Ein weiterer Fortschritt wurde im Oktober 1940 mit der Implantation von einer Schädelplastik aus Methylmethacrylat durch Zander bei einem Menschen gemacht.

Durch die vorteilhaften Eigenschaften wie Leichtigkeit, Formbarkeit, geringe Kosten, Röntgendurchlässigkeit und fehlende Konduktivität war diese Verwendung eine wahrliche Revolution. Doch war auch die Brüchigkeit dieses Materials bekannt, so dass Galicich und Hovind 1967 ein Edelstahlnetz als Trägermaterial verwendeten und 1989 Malis wegen der besseren Eigenschaften von Titan, ein Titannetz mit einbrachten [74]. Bis heute ist das perfekte Kranioplastikmaterial noch nicht gefunden und es ist weiterhin Gegenstand der Forschung, um den besten biologischen als auch nicht-biologischen Ersatz herzustellen. Ein Augenmerk wird hierbei auch auf Stammzelleexperimente und morphogene Proteine gelegt [4,80].

## 1.4 Materialien der Kranioplastik

Die Anforderungen an das Material, welches für die Defektdeckung verwendet wird, sind folgende: biomechanische Stabilität, geringes Gewicht, Röntgendurchlässigkeit, geringe Kosten, gute Formbarkeit und Bearbeitung, hohe Infektionsresistenz, Förderung der ossären Heilung, Hitze- und Kälteunempfindlichkeit.

Heutzutage werden am häufigsten autologer Eigenknochen, Hydroxylapatit, Titan-Mesh, Polyetheretherketon (PEEK), Aluminiumoxidkeramik und Polymethylmethacrylat (PMMA) verwendet.

### 1.4.1 Autologer Eigenknochen

Während einer dekompressiven Kraniektomie wird ein Knochendeckel, der unterschiedliche Größen aufweisen kann, mobilisiert und entnommen. Dieser Knochendeckel kann entweder bis zu einer späteren Schädelrekonstruktion aufbewahrt werden, oder wegen einer zu starken Fragmentierung/Frakturierung verworfen werden. Für die Lagerung des Schädelfragments gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Wenn der Knochendefekt bzw. die Trepanationsgröße relativ klein ausfällt, kann der entnommene Schädelknochen in den benachbarten subgalealen und epiperiostalen Bereichen des intakten Schädels gelagert werden. Dieses Verfahren wird aber nur noch selten angewendet und hat eher einen historischen Stellenwert.

Weiterhin kann ein entnommener Schädelknochen auch im Subkutangewebe des Patienten gelagert werden. Der Vorteil besteht darin, dass der Knochendeckel immer beim Patienten verweilt und bei einer Verlegung in ein anderes Krankenhaus nicht verloren gehen kann. Dieser kann dann aus dem Bauchraum wieder entfernt werden und steht zur Schädelrekonstruktion zur Verfügung [38]. Allerdings hat man heutzutage auch von dieser Methode Abstand genommen, da das Infektionsrisiko bei einem zusätzlichen operativen Zugang erhöht ist [91].

Die heutige Standardmethode stellt die Kryokonservierung des Schädeldeckels dar. Hierbei wird der Schädeldeckel zum Beispiel mit flüssigem Stickstoff eingefroren, vor der Reimplantation aufgetaut und dann wiedereingesetzt.

Der eigene Knochen bietet die Vorteile, dass er eine hohe Biokompatibilität sowie eine ähnliche Härte und Elastizität zum übrigen Schädel aufweist. Zudem ist er meistens nach der Kraniektomie verfügbar und das Implantat ist kostengünstig.

Nachteilig beim autologen Eigenknochen ist die erhöhte Resorptions- und Infektanfälligkeit. Auch das intraoperative Bearbeiten des Implantats zur perfekten Passgenauigkeit ist limitiert [80].

Eine gute Blutversorgung sowie eine starre Fixation des autologen Implantats ist notwendig, um das Einwachsen zu gewährleisten. Bei größeren Knochendefekten kommt es daher häufig zur Autolyse bzw. Resorption, da die Blutversorgung eingeschränkt ist und es auch relativ lange dauert bis ein knöcherner Umbau stattgefunden hat [29].

Weiterhin muss der kryokonservierte Schädeldeckel gelagert werden, was in manchen Abteilungen/Krankenhäusern logistisch nicht möglich ist.

#### 1.4.2 Hydroxylapatit

Dieses Kranioplastikmaterial wird seit 1970 verwendet und ist ein Kalzium-Phosphat-Gemisch, welches auch im gesunden Knochen gefunden werden kann [74]. In der synthetischen Herstellung ist es vergleichbar mit der von Keramik. Es bietet eine hohe Biokompatibilität und besitzt hohe osteokonduktive und osteoinduktive Eigenschaften. Dies gewährleistet im Gegensatz zu Metallen oder Acryl, dass ein Mitwachsen des Implantats möglich ist und so bekommt die Verwendung eine besondere Rolle bei Kindern mit Schädeldefekten [26]. Hydroxylapatit ist leicht formbar sowie

formbeständig und härtet ohne Hitzeentwicklung aus. Nachteilig wirkt sich die Brüchigkeit, die geringe Zugfestigkeit und die hohe Infektionsrate aus [18,80]. Primär weist Hydroxylapatit eine weiche Konsistenz auf, so dass große Schädeldefekte schwierig anzupassen sind. Deshalb verwendet man in solchen Fällen eine Kombination mit einem Titan-Mesh, um ein kosmetisch ansprechendes Ergebnis und ein besseres Einwachsen des Titan-Meshs zu erreichen.

### 1.4.3 Titan- Mesh

Erstmalig wurde Titan im Zweiten Weltkrieg zur Kranioplastik verwendet. Seit den 80er-Jahren wird es aber erst verstärkt angewendet. Es kann entweder alleine oder in einer Kombination mit verschiedenen anderen Werkstoffen, wie zum Beispiel PMMA oder Hydroxylapatit, eingesetzt werden.

Vorteilhaft ist, dass Titan ein stabiler, gut zu bearbeitender, biokompatibler, korrosionsbeständiger Werkstoff ist. Weiterhin hat Titan eine geringe Gewebereaktion und eine niedrige Infektionsrate [59].

Die Nachteile sind allerdings, dass ein Titan-Mesh recht kostenintensiv ist und bei der Bildgebung Artefakte verursacht. Auch eine gewisse Verformbarkeit bei einem Titan-Mesh ist gegeben.

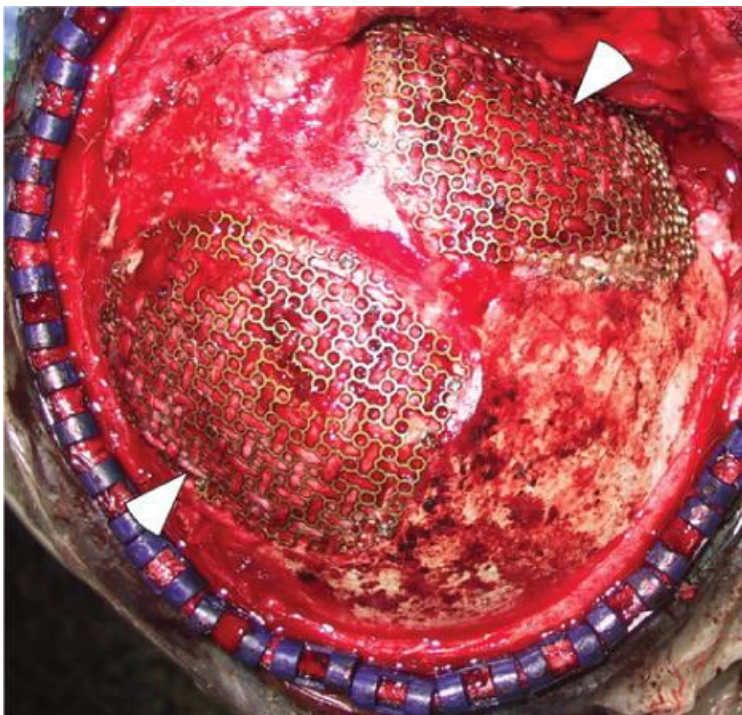


Abbildung 1: Materials used in cranioplasty: a history and analysis : Neurosurgical Focus FOC (2014). [91]

#### 1.4.4 Aluminiumoxid-Keramik

Gegen Ende des 20. Jahrhunderts wurde zunehmend Keramik für eine Kranioplastik verwendet, da es sehr hart und inert ist. Außerdem zeigten sich sowohl wenige Gewebereaktionen als auch postoperative Infektionen [59,74]. Auch die kosmetischen Ergebnisse sind zufriedenstellend, da das Implantat nach einem 3D-Datensatz computerassistent hergestellt wird. So kann das Implantat eine hohe Passgenauigkeit vorweisen, jedoch ist das Herstellungsverfahren mit sehr hohen Kosten verbunden. Zudem neigen die Implantate trotz ihrer Härte zum Zerspringen [80].

#### 1.4.5 Polyetheretherketon (PEEK)

Polyetheretherketon ist ein Polymer, welches semikristallin und strahlendurchlässig ist. In der Bildgebung verursacht es keine Artefakte, ist chemisch inert und lässt sich mittels Dampf oder Gammastrahlen sterilisieren. Ähnlichkeit zum kortikalen Knochen hat es durch seine Stabilität, Elastizität sowie Steifigkeit. Das Material ist durch eine geringe Dichte sehr leicht, aber es ist im Vergleich zu Metallen oder Keramik nicht thermokonduktiv [51,80].

Die kosmetischen Ergebnisse sowie die Passform sind durch die CAD- Herstellung besonders gut.

Allerdings verursacht dieser Prozess auch hohe Kosten. Die PEEK-Implantate zeigen kein Einwachsen in den umgebenden Knochen, weisen jedoch eine gewisse Infektionsrate auf [80].

#### 1.4.6 Polymethylmethacrylat (PMMA)

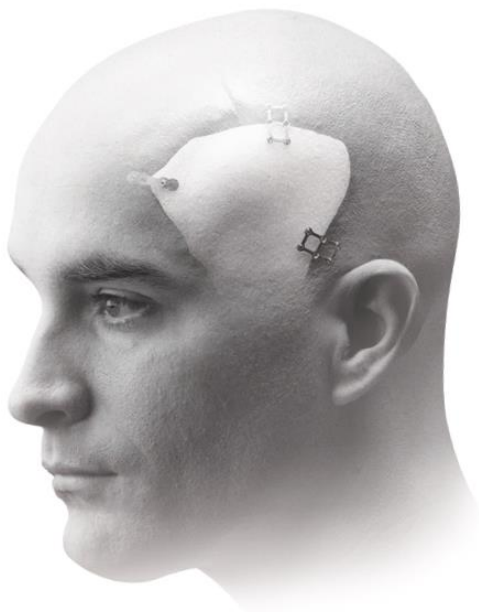
PMMA ist ein leichter, synthetischer, thermoplastischer Kunststoff. Er lässt sich in einem bestimmten Temperaturbereich sehr gut formen. Weiterhin ist er strahlendurchlässig, weist eine hohe Stabilität auf, ist inert und nicht thermokonduktiv. Die Strahlendurchlässigkeit hat Vorteile, so dass man bei einer Angiografie die Hirnarterien oder im CT sowie im MRT das Hirngewebe weiter beurteilen kann. Nachteilig ist allerdings, dass man Brüche des Implantats nicht erkennen kann [33].

Deswegen gibt man Zirkoniumdioxid als Röntgenkontrastmittel dazu. Häufig wird auch ein Antibiotikum wie zum Beispiel Gentamicin dem Kunststoff zugesetzt. Die Fixation am Schädel erfolgt mittels kleiner Titanplättchen.

Das Material weist eine hohe Sprödigkeit auf, was zu einer gesteigerten Brüchigkeit führt und daraus resultierend eine vermehrte Anfälligkeit für Frakturen des PMMA-Implantats bedeutet. Deswegen werden heutzutage häufig Stahl- oder Titan- Meshs mit dem PMMA-Implantat kombiniert [55]. Auch kann es mit autologen Eigenknochen kombiniert werden.

Die Anwendung findet vorwiegend bei Erwachsenen statt, da ein Ein- bzw. Mitwachsen des kindlichen Schädels nicht gegeben ist.

Die kosmetischen Ergebnisse sowie die Passform sind durch die CAD-Herstellung besonders gut.



*Abbildung 2: Kranioplastik – HTR-PMMA (CAD-CAM) Copyright ©2019 Zimmer Biomet Broschüre Produktübersicht Kranioplastik*



## 1.5 Eigene Zielsetzung

Es gibt zahlreiche Materialien, die verwendet werden können um einen Schädeldefekt zu beseitigen. Bei jedem Eingriff, egal welches Material schlussendlich verwendet wird, sind die allgemein gültigen Operationsrisiken wie intra- bzw. postoperative Blutung, Wundheilungsstörung, Wunddehiszenzen oder Infektionen zu nennen. Bei der autologen Kranioplastik sind vor allem zusätzlich noch aseptische Knochendeckelnekrosen und das epidurale Empyem als unerwünschte Komplikationen festzustellen.

Da in unserer Klinik für Neurochirurgie der Universität des Saarlandes überwiegend Kranioplastiken aus Polymethylmethacrylat implantiert werden, welche durch die CAD – Technik, also durch aufwendige Planung und durch ein 3D-CT, von der Firma ZimmerBiomet produziert werden, stellten wir uns die Frage, ob diese Kranioplastiken zu einem besseren Patienten Outcome im Vergleich zu anderen Materialien führen.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, prä-, intra- oder postoperative Prädiktoren zu erkennen, die die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von postoperativen Komplikationen bzw. Komplikationen, die erst im Verlauf entstehen, erhöhen. Diese können dann vorzugsweise in der zukünftigen klinischen Routine bedacht und möglichst vermieden werden

## 2. Dekompressive Kraniektomie

### 2.1 Indikationen

#### 2.1.1 Schädel-Hirn-Trauma

Eine Gewalteinwirkung auf den Schädel, die das Gehirn schädigt, nennt man Schädel-Hirn-Trauma. Unterschieden wird zwischen einer offenen und einer geschlossenen Schädel-Hirn-Verletzung. Gekennzeichnet ist das geschlossene Schädel-Hirn-Trauma durch eine intakte Dura mater. Das offene Schädel-Hirn-Trauma hat dagegen eine Verletzung der Dura mater und so eine direkte Verbindung von Luft- und Liquorraum. Eingeteilt werden kann der Schweregrad eines Schädel-Hirn-Traumas anhand der Glasgow-Coma-Scale.

Grad	Beschreibung	Glasgow-Coma-Scale
Schädel-Hirn-Trauma I	Leichtes Schädel-Hirn-Trauma	13 – 15 Punkte
Schädel-Hirn-Trauma II	Mittleres Schädel-Hirn-Trauma	12 – 9 Punkte
Schädel-Hirn-Trauma III	Schweres Schädel-Hirn-Trauma	8 – 3 Punkte

Tab.1 Einteilung Schädel-Hirn-Trauma; Glasgow-Coma-Scale

#### 2.1.2 Zerebrovaskuläre Ereignisse

Einen Anstieg des intrakraniellen Drucks können u.a. folgende Erkrankungen verursachen:

- Epidurale Blutung
- Subdurale Blutung
- Subarachnoidale Blutung
- Intrazerebrale Blutung
- Zerebrale Ischämie

### 2.1.3 Weitere Indikationen

Als weitere Indikationen für die dekompressive Kraniektomie werden Infektionen, Abszesse und Wundheilungsstörungen angesehen.

## 2.2 Durchführung

Abhängig von der Lokalisation des Schädel-Hirn-Traumas bzw. anderer Indikationen kann die dekompressive Kraniektomie als uni- oder bilaterale Hemikraniektomie sowie bifrontale Kraniektomie durchgeführt werden.

Das vorrangige Ziel ist, dass die vordere sowie mittlere Schädelgrube knöchern entlastet wird und dabei die durale venöse Drainage nicht beschädigt wird [68].

### 2.2.1 Uni-/bilaterale Hemikraniektomie

Eine frontotemporoparietale Knochenentnahme wird bei der uni- oder bilateralen Hemikraniektomie durchgeführt.

Indikationen stellen das schwere Schädel-Hirn-Trauma [27], maligne Media-Infarkte [41] und drohende zerebrale Einklemmung unterschiedlicher Genese [63] dar.

In allgemeiner Intubationsnarkose wird der Eingriff durchgeführt. Die Sicherung des Kopfes erfolgt in der Mayfield-Klemme. Nachdem der Sinus sagittalis superior und der

Sinus transversus markiert sind, wird die Inzision der Haut anterior zum Tragus durchgeführt. Diese führt vom Ohr nach okzipital zur Protuberantia occipitalis, nach cranial bis zum Vertex und endet an der frontalen Haargrenze.

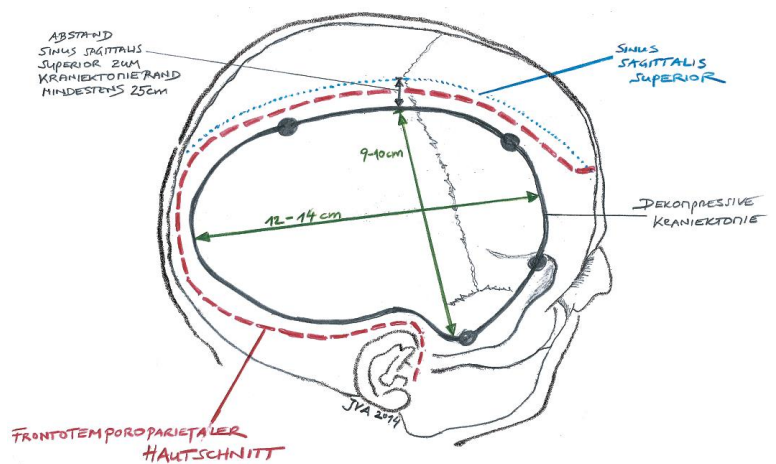


Abbildung 3: Unilaterale Hemikraniektomie © J.-V. Anton

Die circa 1 cm vor dem Tragus verlaufende Arteria temporalis superficialis [81] soll erhalten bleiben. Der Nervus facialis, welcher im Jochbogenbereich vor der Arteria temporalis superficialis liegt [9], soll nicht verletzt werden. Es erfolgt die Abpräparation eines Muskel-Haut-Lappens und auch eines perikraniellen (Galea-Periost) Lappens, um eine Eröffnung des Sinus frontalis schnellstmöglich versorgen zu können. In der Squama temporalis hochparietal sowie hochfrontal und hinter dem Arcus zygomaticus im Os frontale werden Bohrlöcher eingebracht. Die Dura wird epidural vom Knochen abgelöst und es erfolgt die Kraniektomie im Bereich der Bohrlöcher. Ein Abstand von 25 mm zur Mittellinie sollte im Bereich des Sinus sagittalis superior eingehalten werden. Dies beugt eine Anfälligkeit zur Ausbildung eines posttraumatischen Hydrozephalus vor [9]. Um eine zerebrale Herniation über die Schädelkalottenkante zu vermeiden, kann zusätzlich eine knöcherne Abtragung zur mittleren Schädelgrube hin nötig sein [89].

Neun bis zehn Zentimeter sollte der vertikale Durchmesser, also der Boden der mittleren Schädelgrube bis zum Sinus sagittalis superior, betragen und ein Durchmesser von anterior nach posterior sollte im Bereich von 12 und 14 cm liegen [41,83].

Eine sternförmige Eröffnung führt zur Druckentlastung. Die eingebrachte Duraerweiterungsplastik kann eingenäht oder lediglich aufgelegt werden. Anschließend erfolgen das Zurücklegen des Muskel-Haut-Lappens sowie der schichtweise Wundverschluss mittels Nähten.

### 2.2.2 Bifrontale Kraniektomie

Die sich von der vorderen Schädelgrube bis zur Koronarnaht und zum Pterion beidseits erstreckende Knochenentnahme nennt sich bifrontale Kraniektomie [36]. Bei bilateralen frontalen Kontusionen sowie generalisierten Hirnödemen mit medikamentös nicht beherrschbarer Hirndrucksymptomatik wird die bifrontale Kraniektomie durchgeführt [65,68].

Wie auch die uni-/bilaterale Hemikraniektomie wird der Eingriff in allgemeiner Intubationsnarkose durchgeführt. Die Lagerung des Kopfes erfolgt hier allerdings gerade. Vom Tragus rechts nach hochfrontal bis zum Tragus links erstreckt sich die Hautinzision. Auch hier soll die Arteria temporalis superficialis und der Nervus facialis geschont werden. Nach anterior wird die Kopfhaut und auch der Musculus temporalis

abpräpariert, hierbei ist eine Schädigung der Nervi supraorbitales, welche ihre Austrittspunkte durch die Foramina supraorbitales haben, zu vermeiden.

Die Kraniotomie erfolgt dann mittels Kraniotom über die temporal, frontal und koronar angelegten Bohrlöcher. Es können Durahochnähte angelegt werden und daraufhin wird zu beiden Seiten des Sinus sagittalis superior eine Durotomie hochfrontal und anterior durchgeführt. Die halbkreisförmige Eröffnung der Dura erfolgt in der Region der temporal und frontal angelegten Bohrlöcher. Es findet eine Ligierung des Sinus sagittalis superior statt, woraufhin die Falx cerebri in Richtung der vorderen Schädelgrube durchtrennt wird. Hierbei ist auf die Arteriae cerebrales anteriores zu achten und eine Verletzung zu vermeiden. Bifrontal wird das Frontalhirn freigelegt, eine Duraerweiterungsplastik eingenäht und bei etwaiger Verletzung des Sinus frontalis kann dieser mittels Fett und Muskel obliteriert werden.

Es erfolgen das Zurückklappen des Kopfhaut-Muskel-Lappens sowie der schichtweise Wundverschluss mittels Naht.

### **3. Material und Methoden**

#### **3.1 Material**

##### **3.1.1 Patientenkollektiv**

Im Rahmen dieser Dissertationsarbeit wurde eine retrospektive monozentrische Analyse von 177 Patienten, welche im Zeitraum vom 01. Januar 2011 bis zum 31. Dezember 2018 in der Klinik für Neurochirurgie der Universität des Saarlandes eine Kranioplastik nach einer dekompressiven Kraniektomie erhalten haben, durchgeführt.

Die dekompressiven Kraniektomien, welche aufgrund von unterschiedlichen Indikationen durchgeführt wurden, erfolgten nicht alle als Primäroperation in der Klinik für Neurochirurgie der Universität des Saarlandes. Insgesamt wurden auf Grund von Erstimplantations- sowie Revisionsoperationen 197 Fälle generiert. Ausschlusskriterien waren bei dieser Studie nicht vorhanden.

Gegen die Verwendung der klinischen Daten zur Durchführung der Studie bestand von Seiten der Ethikkommission weder berufsrechtliche noch ethische Bedenken und es wurde die Ethik-Nr. 128/9 vergeben.

## 3.2 Methode

### 3.2.1 Datenerhebung

Für die Datenerhebung wurde das klinikintern verwendete Programm SAP® (SAP® Deutschland SE & Co. KG, Walldorf, Deutschland) benutzt. Die verwendeten Dokumente, wie Arztbriefe, Operationsberichte und Befunde der CCT-Untersuchungen sind unabhängig von dieser Studie erstellt und verfasst worden. Mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Microsoft® Excel® 2016 wurden die erhobenen Daten erfasst und anschließend mit SPSS®Statistics (Version 25.0.0.0, IBM® Corporation, Armonk, U.S.) analysiert und graphisch dargestellt.

Die erhobenen Daten wurden anonymisiert und lassen sich in die Abschnitte präoperativ, perioperativ, postoperativ und Follow-up gliedern. Die entscheidenden Parameter sind nachfolgend aufgeführt:

#### 3.2.1.1 Präoperative Datenerhebung

- Alter
- Geschlecht
- OP-Datum Kraniektomie
- OP-Datum Kranioplastik
- Tage zwischen Kraniektomie und Kranioplastik
- Glasgow-Coma-Scale
- Karnofsky-Index
- Grunderkrankung
- Gerinnungsmanagement

#### 3.2.1.2 Perioperative Datenerhebung

- OP-Dauer
- Operateur
- Blutverlust

- Dura-Hochnaht
- Liquorleck
- Redon-Drainage
- Duraersatzmaterial bei dekompressiver Kraniektomie
- Duraersatzmaterial vernäht ja oder nein

### 3.2.1.3 Postoperative Datenerhebung

- CCT Hämatom postoperativ
- CCT Befund
- Hämatomdicke
- Hirnatrophie
- Shunt
- Aufenthaltsdauer
- Komplikationen stationär postoperativ

### 3.2.1.4 Follow-up

- Infektionen/ Komplikationen im Verlauf
- Keim
- Dauer des postoperativen Follow-ups
- Stattgefundene Reha-Maßnahme postoperativ
- Glasgow-Coma-Scale Follow-up
- Karnofsky-Index Follow-up

### 3.2.2 Analyse einzelner Faktoren

Folgende Zusammenhänge wurden untersucht:

#### 3.2.2.1 Grunderkrankung

Die führenden Grunderkrankungen, welche die dekompressive Kraniektomie bedingten, wurden herausgearbeitet und wie folgt gruppiert:

- traumatische Blutung
- spontane Blutung
- Mediainfarkt
- Abszess/Infektion/Wundheilungsstörung
- Sonstiges

Es wurde untersucht, ob die verschiedenen Indikationen einer dekompressiven Kraniektomie Einfluss auf postoperative stationäre Komplikationen und Infektionen im Verlauf haben.

#### 3.2.2.2 Zeitliches Intervall zwischen dekompressiver Kraniektomie und Schädeldachplastik

Das OP-Datum der dekompressiven Kraniektomie und das der Kranioplastik wurde aus den OP-Protokollen herausgesucht und die dazwischenliegenden Tage ermittelt.

Hier wurde die Hypothese aufgestellt, dass der Zeitraum zwischen den beiden Eingriffen einen Einfluss auf postoperative stationäre Komplikationen und Infektionen im weiteren Verlauf hat.



### 3.2.2.3 Karnofsky Index

Die körperliche sowie soziale Aktivität bzw. Aktivitätseinschränkung eines Patienten wird mittels des Karnofsky Index bewertet. Die Beurteilung der Lebensqualität wird mit Werten zwischen 0 % und 100 %, wobei 10 %-Stufen verwendet werden, erfasst. In der Abbildung 3 sind die verschiedenen %-Stufen zu entnehmen.

KARNOFSKY Index in Prozent	
100	Normalzustand, Patient hat keine Beschwerden und keine manifeste Erkrankung
90	Minimale Krankheitssymptome
80	Normale Leistungsfähigkeit mit Anstrengung
70	Eingeschränkte Leistungsfähigkeit, Patient ist arbeitsunfähig, kann sich aber selber versorgen
60	Gelegentlich wird fremde Hilfe benötigt
50	Krankenpflegerische und ärztliche Hilfe nötig, Patient ist nicht dauernd bettlägerig
40	Bettlägeriger Patient , der spezielle Pflege erfordert
30	Schwer kranker Patient, Krankenhauspflege ist notwendig
20	Krankenhauspflege und supportive Maßnahmen sind erforderlich
10	Moribund, Krankheit schreitet schnell fort
0	Tod

Abbildung 4: Fidler-Lehn: KARNOFSKY Index (%)<sup>[25]</sup>

Hier wurde der Zusammenhang untersucht, ob ein geringerer präoperativer Wert im Karnofsky Index zu einer erhöhten Komplikationsrate postoperativ im stationären Verlauf bzw. Infektionen im weiteren Verlauf führt.

#### 3.2.2.4 OP-Dauer

Die OP-Dauer wurde als Zeitspanne zwischen erstem Hautschnitt und der kompletten Hautnaht des Schnittes (Schnitt-Naht-Zeit) definiert. Erhoben wurden die Zeiten aus der Operationsdokumentation.

Untersucht wurde, ob eine längere Exposition des Operationssitus zu erhöhten postoperativen Komplikationen bzw. Komplikationen im weiteren Verlauf geführt hat.

#### 3.2.2.5 Operateur

Hier wurde die Expertise des Operateurs kategorisiert, welche in chirurgische Erfahrung unter sechs Jahren bzw. über sechs Jahren, also Facharztstufe im Fach der Neurochirurgie, unterteilt wurde.

Angenommen wurde, dass die Erfahrung der Operateure eine Auswirkung auf die Entstehungswahrscheinlichkeit von postoperativen Komplikationen bzw. auf Komplikationen im weiteren Verlauf hat.

#### 3.2.2.6 Liquorleck

Berücksichtigt wurde ein intraoperativer Austritt von Liquor, der bei der Präparation der Schädelöffnung und einer stattgefundenen Duraverletzung zustande kam bzw. eine Punktion von subduraler Liquoransammlung, wenn die Hirnmasse über Knochenniveau stand.

Das Auftreten eines Liquoraustritts bzw. eine Punktion von Liquor soll Einfluss auf das Entstehen von postoperativen stationären Komplikationen bzw. Infektionen im Verlauf haben. Um die Fallzahl zu erhöhen, wurden die beiden Gruppen zusammengefasst.

#### 3.2.2.7 Duraersatzmaterial bei dekompressiver Kraniektomie

Für den Duraverschluss im Rahmen der Duraplastik wurden verschiedene Materialien

angewendet. Diese wurden in autologes Material kombiniert mit heterologem bzw. synthetischem Material versus ausschließlich heterologes oder synthetisches Material kategorisiert. Im Speziellen handelt es sich bei dem autologen Material um Galea-Periost, Temporalismuskel oder um eine reine Duranaht. Heterologes Material stellt die Fascia lata vom Rind dar. Als synthetische Materialien wurden vor allem Tachosil, Duragen, Lyoplast oder Gelitta verwendet.

Untersucht wurde, ob es einen signifikanten Unterschied in der Häufigkeit von Komplikationen zwischen den unterschiedlichen Materialien gab.

#### 3.2.2.8 Ventrikulo-Peritonealer-Shunt

Das Vorliegen eines ventrikulo-peritonealen Shunts (VP-Shunt) vor bzw. nach Kranioplastik und das Auftreten einer Komplikation wurden festgestellt. Es wurde die Hypothese erstellt, dass die Patienten, die nach der Kranioplastikimplantation einen VP-Shunt benötigten, vorher einen latenten Hydrozephalus malresorptivus gehabt hatten und dieser daraufhin manifest wurde.

#### 3.2.2.9 Komplikationen stationär postoperativ

Als Komplikationen, die postoperativ im stationären Aufenthalt eingeschlossen wurden, zählen diese, die direkt mit der Implantation vergesellschaftet sind. Dies bedeutet, dass Wundheilungsstörungen, Hämatome, Abszesse, Flüssigkeitsansammlungen unter der Schädeldachplastik, Hydrozephalus malresorptivus, Krampfanfälle oder Nachblutungen berücksichtigt wurden.

#### 3.2.2.10 Infektionen/ Komplikationen im Verlauf

Unter diesem Punkt wurden die Komplikationen bzw. Infektionen nach Entlassung aus dem stationären Aufenthalt zusammengefasst. Hierbei wurden Infektionen, Wundheilungsstörungen, Abszesse, Lockerungen bzw. Dislokationen von Implantaten eingeschlossen.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Zusammensetzung des Patientenkollektives

In der vorliegenden Arbeit wurden die Daten von 197 Patientenfällen, davon waren 77 weiblich (39,2 %) und 120 (60,8 %) männlich, erhoben. Sowohl Erst- als auch nötige Revisionsoperationen gingen als separate Patientenzählungen ein. Das Durchschnittsalter betrug im Patientenkollektiv zum Zeitpunkt der Schädeldachplastik-Implantation  $51,2 \pm 15,2$  Jahre. Das männliche Durchschnittsalter lag bei  $49,5 \pm 15,4$  Jahren und das weibliche bei  $53,7 \pm 14,6$  Jahren.

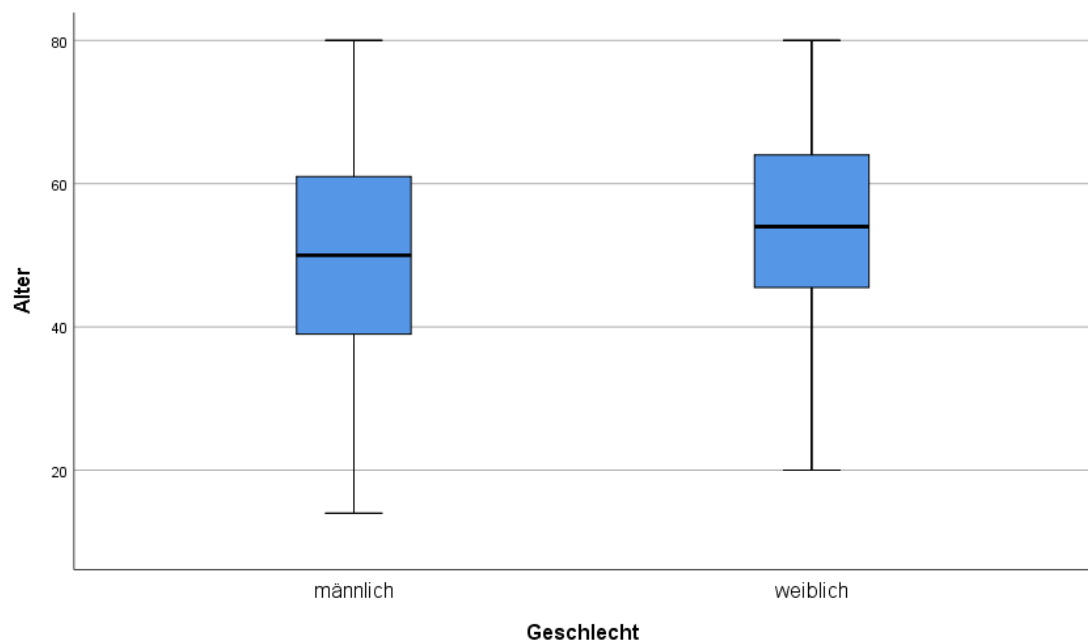


Abbildung 5: Box-Whisker-Plot für das Patientenalter zum Zeitpunkt der Implantation der Kranioplastik unterteilt nach Geschlecht

### 4.2 Komplikationen stationär postoperativ/ Infektionen bzw. Komplikationen im Verlauf

Es zeigte sich, dass sich die direkten postoperativen Komplikationen von denen, die im weiteren Verlauf auftreten, unterscheiden. Auch war nicht jede Komplikation operationsbedürftig.

In 34 Fällen (17,3 %) zeigte sich eine direkte postoperative Komplikation. Im weiteren Verlauf kam es in 51 Fällen (32,1 %) zu Komplikationen. In Tabelle 2 sowie 3 sind die Anzahl der aufgetretenen Komplikationen mit den notwendigen Revisionseingriffen aufgelistet.

- Direkte postoperative Komplikationen

	<u>Anzahl</u>	<u>Nötige Revisionseingriffe</u>
Hämatom/Hygrom	21	14
Wundheilungsstörung	2	2
Hydrocephalus malresorptivus	2	2
Krampfanfall	4	3
Nachblutung	2	2
Aspiration/Vigilanzminderung	2	-
Pneumonie	1	-
<u>Gesamt</u>	34 (17,3 %)	23 (11,7 %)

*Tab.2 Anzahl der aufgetretenen postoperativen Komplikationen mit notwendigen Revisionseingriffen*

- Komplikationen/Infektionen im Verlauf

	<u>Anzahl</u>	<u>Nötige Revisionseingriffe</u>
Hygromzunahme	3	1
Liquor-/Durafistel	3	3
Wundheilungsstörung, Abszess, Wunddehiszenz	26	25
Lockerung/Dislokation Schädelplastik/Schrauben	11	10
Hydrocephalus malresorptivus	3	3
SAB nach Sturz	1	1
Basilaristhrombose	1	-
Krampfanfall/Shuntproblematik	3	-
<u>Gesamt</u>	51 (32,1 %)	44 (27,7 %)

*Tab.3 Anzahl der aufgetretenen Komplikationen/Infektionen im Verlauf mit notwendigen Revisionseingriffen*

Die Gesamtkomplikationsrate beträgt 85 Fälle (43,1 %). In 67 Fällen (34,0 %) kam es zu einem notwendigen Revisionseingriff, welche sich in 23 Fällen (11,7 %) direkt postoperativ und in 44 Fällen (27,7 %) im weiteren Verlauf aufteilen.

### 4.3 Einfluss der OP-Indikationen der dekompressiven Kraniektomie

Insgesamt führten fünf verschiedene Indikationen zu einer dekompressiven Kraniektomie. Die häufigste Indikation stellte die traumatische Blutung mit 85 Patienten (43,1 %) dar. Eine Patientin verstarb intraoperativ. Bei 73 Patienten führte ein Mediainfarkt zur Entlastungskraniektomie. Den kleinsten Anteil stellte die Indikation der spontanen Blutung mit 17 Patienten (8,5 %) dar. Bei einem Patienten (0,5 %) lag eine Kriegsverletzung mittels Metallsplitter vor.

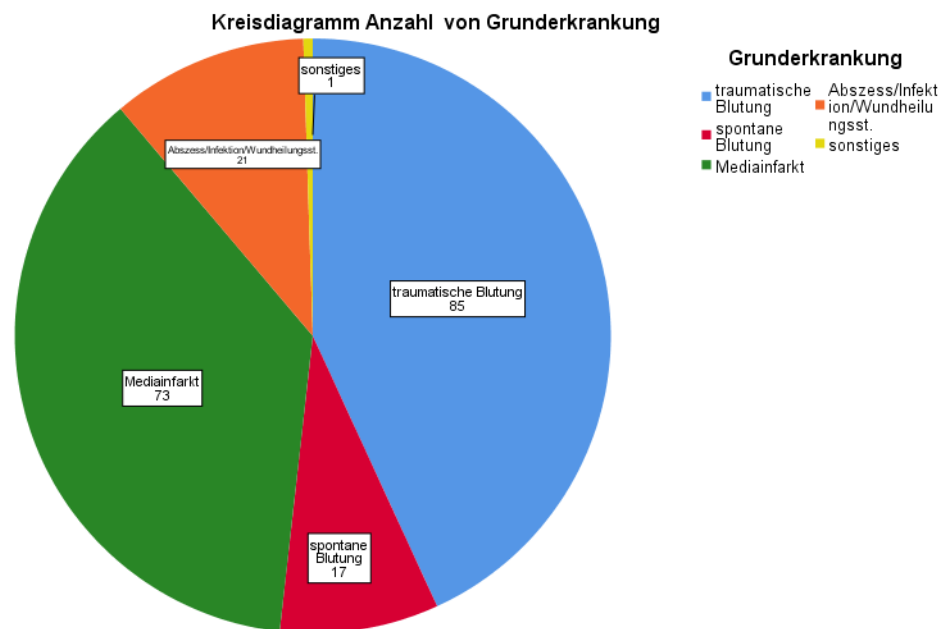


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der Indikation für die dekompressiven Kraniotomie

Eine Auflistung der Anzahl aufgetretener postoperativer Komplikationen zur Grunderkrankung zeigt die unter Tabelle 4 aufgeführte Kreuztabelle.

Bei dem exakten Test nach Fisher zeigte sich mit einem  $p = 0,300$  keine Signifikanz für die basierende Indikation und ein Auftreten einer postoperativen Komplikation. Es gibt allerdings die Tendenz, dass traumatische Blutungen (23,8 %) und Mediainfarkte (15,1 %) eine höhere Komplikationsrate im Vergleich zur spontanen Blutung (5,9 %) haben.

			Komplikation postoperativ stationär		Gesamt	
			nein	ja		
Grund- erkrankung	traumatische Blutung	Anzahl	64	20	84	
		in Prozent	76,20 %	23,80 %	100,00 %	
	spontane Blutung	Anzahl	16	1	17	
		in Prozent	94,10 %	5,90 %	100,00 %	
	Mediainfarkt	Anzahl	62	11	73	
		in Prozent	84,90 %	15,10 %	100,00 %	
	Abszess/Infektion/ Wundheilungsstörung	Anzahl	19	2	21	
		in Prozent	90,50 %	9,50 %	100,00 %	
	sonstiges	Anzahl	1	0	1	
		in Prozent	100,00 %	0,00 %	100,00 %	
	Gesamt		Anzahl	162	34	196
			in Prozent	82,70 %	17,30 %	100,00 %

Tab.4 Kreuztabelle Grunderkrankung \* Komplikation postoperativ stationär

Bei den Infektionen bzw. Komplikationen im Verlauf zeigte sich mit einem  $p = 0,684$  ebenfalls keine Signifikanz. Aber auch hier kann man die Tendenz sehen, dass die Kranioplastiken, die aufgrund von Abszessen, Infektionen oder Wundheilungsstörungen implantiert wurden, eine relativ hohe Komplikationsrate (44,4%) haben. In der nachfolgenden Tabelle ist eine Kreuztabelle der Grunderkrankung zum Parameter Infektion/Komplikation im Verlauf zu sehen.

			Infektion/Komplikation im Verlauf		Gesamt	
			nein	ja		
Grund- erkrankung	traumatische Blutung	Anzahl	45	23	68	
		in Prozent	66,20 %	33,80 %	100,00 %	
	spontane Blutung	Anzahl	10	3	13	
		in Prozent	76,90 %	23,10 %	100,00 %	
	Mediainfarkt	Anzahl	42	17	59	
		in Prozent	71,20 %	28,80 %	100,00 %	
	Abszess/Infektion/ Wundheilungsstörung	Anzahl	10	8	18	
		in Prozent	55,60 %	44,40 %	100,00 %	
	sonstiges	Anzahl	1	0	1	
		in Prozent	100,00 %	0,00 %	100,00 %	
	Gesamt		Anzahl	108	51	159
			in Prozent	67,90 %	32,10 %	100,00 %

Tab.5 Kreuztabelle Grunderkrankung zu Infektion/Komplikation im Verlauf



#### 4.4 Zeitliches Intervall zwischen dekompressiver Kraniektomie und Schädeldachplastik

Bei den 187 vorhandenen Zeitspannen betrug der Median 182 Tage (Minimum 52; Maximum 1197).

Das kürzeste Zeitintervall zwischen Kraniektomie und Implantation der Schädeldachplastik, bei der es zu einer postoperativen stationären Komplikation kam, betrug 54 Tage. Das längste Intervall lag bei 467 Tagen. 157 Tage betrug in dieser betrachteten Kohorte der Median.

Mittels Mann-Whitney-U-Test konnte kein signifikanter Zusammenhang bei dem zeitlichen Intervall zwischen dekompressiver Kraniektomie und der Implantation der Schädeldachplastik mit dem Entstehen einer postoperativen Komplikation festgestellt werden. ( $p = 0,122$ )

Bei Infektionen im weiteren Verlauf betrug das kürzeste Zeitintervall zwischen Kraniektomie und Implantation der Schädeldachplastik 52 und das längste 905 Tage. Hier betrug der Median 173 Tage. Auch hier wurde kein signifikanter Zusammenhang festgestellt ( $p = 0,687$ ).

#### 4.5 Einfluss des präoperativen Karnofsky Index

Vor der operativen Versorgung mittels Schädeldachplastik betrug der Median des präoperativen Karnofsky-Indexes sowohl bei den Patienten, die eine postoperative stationäre Komplikation, als auch bei den Patienten, die im späteren Verlauf eine Infektion/Komplikation entwickelten, 70 % (Min = 20 %; Max = 100 %).

Anhand des unten dargestellten Schaubildes des Mann-Whitney-U-Tests konnte keine Signifikanz für das Auftreten einer postoperativen Komplikation ( $p = 0,768$ ) festgestellt werden. Auch im späteren Verlauf ( $p = 0,555$ ) konnte bei niedrigerem Ausgangswert des Karnofsky-Indexes keine Signifikanz festgestellt werden.

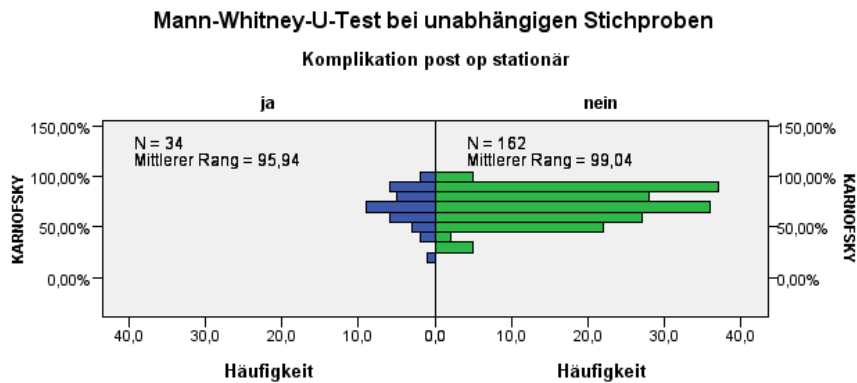


Abbildung 7 Mann-Whitney-U-Test von Karnofsky-Index und Komplikation post op stationär

## 4.6 OP- Dauer

Der mittlere Zeitraum zwischen erster Hautinzision und Hautverschluss lag bei  $96,2 \pm 31,1$  Minuten. Die kürzeste Operation im Patientenkollektiv dauerte 19 Minuten und die längste 222 Minuten.

Von den 196 gültigen Patientendaten entwickelten 34 Patienten (17,3 %) eine postoperative Komplikation. Bei dieser Patientengruppe betrug die Operationsdauer durchschnittlich  $103,1 \pm 35,9$  Minuten. Die kürzeste Operation dauerte 50 Minuten, die längste hatte eine Dauer von 195 Minuten.

Bei 51 Patienten (32,1 %), die im späteren Verlauf eine Komplikation oder Infektion entwickelten, betrug die Schnitt-Naht Zeit  $101,5 \pm 32,7$  Minuten. Hier war die minimalste Operationszeit 47 Minuten und die maximalste 187 Minuten.

Es zeigte sich beim Mann-Whitney-U-Test keine Signifikanz ( $p = 0,345$ ) bei der Rate der postoperativen Komplikationen in Bezug zur Operationsdauer. Auch konnte keine Signifikanz ( $p = 0,141$ ) bei Komplikationen bzw. Infektionen im weiteren Verlauf festgestellt werden.

## 4.7 Operateur

Von den 196 erfolgten Implantationen wurden 140 Operationen (71,1 %) von einem Assistenzarzt und 56 Operationen (28,4 %) von einem Facharzt durchgeführt. Bei den 196 Operationen traten insgesamt 34 (17,3 %) postoperative Komplikationen auf.

Bei 21 Fällen (15 %) kam es bei Assistenzärzten, die unter Aufsicht eines Facharztes operierten, zu einer postoperativen Komplikation und in 39 Fällen (33 %) zu einer Infektion/Komplikation im Verlauf.

Bei den Fachärzten kam es in 13 Fällen (23,2 %) zu einer postoperativen Komplikation und in 12 Fällen (29,2 %) zu einer Infektion/Komplikation im Verlauf.

Von den 63 benötigten Revisionsoperationen wurden primär 46 Operationen (73,0 %) von Assistenzärzten und 17 Operationen (27,0 %) von Fachärzten durchgeführt.

Der Chi – Quadrat Test nach Pearson zeigt, abhängig vom Erfahrungsstand der Operateure, weder eine Signifikanz im Zusammenhang mit postoperativen Komplikationen ( $p= 0,210$ ), noch von Infektionen oder Komplikationen im weiteren Verlauf ( $p= 0,702$ ). Diese Ergebnisse sind in den folgenden beiden Kreuztabellen zur Verdeutlichung dargestellt.

			Komplikation postoperativ stationär		p-Wert
			nein	ja	
Operateur	Assistenzarzt	Anzahl	119	21	0,21
		in Prozent	85,00 %	15,00 %	
	Facharzt	Anzahl	43	13	
		in Prozent	77,00 %	23,00 %	

Tab.6 Kreuztabelle Operateur Facharzt/Assistent \* Komplikation postoperativ stationär

			Infektionen/Komplikation Verlauf		p-Wert
			nein	ja	
Operateur	Assistenzarzt	Anzahl	79	39	0,702
		in Prozent	66,90 %	33,10 %	
	Facharzt	Anzahl	29	12	
		in Prozent	70,70 %	29,30 %	

Tab.7 Kreuztabelle Operateur Facharzt/Assistent \* Infektionen/Komplikation im Verlauf

## 4.8 Liquorleck

Bei 46 Patienten kam es intraoperativ, präparationsbedingt zu einer Duraverletzung und so zur Liquorleckage. Bei 34 Patienten wurde eine Punktion von subduraler Liquoransammlung durchgeführt. Insgesamt entwickelten 19 Patienten, die entweder

eine Duraverletzung oder Abpunktion hatten, postoperativ eine stationäre Komplikation. Bei 23 Patienten trat im weiteren Verlauf eine Komplikation auf. Bei den Komplikationen postoperativ konnte mittels Chi-Quadrat nach Pearson keine Signifikanz nachgewiesen werden ( $p=0,051$ ). Allerdings ist festzustellen, dass es die Tendenz gibt, dass ein vorhandenes Liquorleck oder eine Liquorpunktion zu postoperativen Komplikationen (23,8 %) und hier im Speziellen zu epiduralen Nachblutungen oder Hämatomen sowie Krampfanfällen neigt.

Bei den Komplikationen im Verlauf konnte allerdings im Chi-Quadrat-Test nach Pearson keine Signifikanz ( $p=0,491$ ) festgestellt werden.

#### 4.9 Duraersatzmaterial bei dekompressiver Kraniektomie

Bei 130 Patienten kam die Anwendung von heterologem bzw. synthetischem Material zum Einsatz, bei 25 Patienten wurde die Kombination aus autologem und heterologem/synthetischem Material verwendet.

In der Heterolog-Synthetik-Gruppe traten postoperativ im noch stationären Aufenthalt 26 Komplikationen (20,0 %) auf und bei der kombinierten Gruppe nur bei zwei Patienten (8,0 %).

Im weiteren Verlauf kam es bei der heterologen/synthetischen Gruppe zu 33 Infektionskomplikationen und bei der Kombinationsgruppe zu drei Vorkommnissen.

Es zeigte sich bei dem exakten Test nach Fisher jeweils keine Signifikanz ( $p = 0,254$ ;  $p = 0,119$ ).

#### 4.10 Ventrikulo-Peritonealer-Shunt

Bei dem Patientenkollektiv waren vor der Kranioplastik 27 Patienten (13,7 %) mit einem VP-Shunt versorgt. Postoperativ, sprich nach der Implantation der Kranioplastik, kam es bei 11 Patienten (5,6 %) zu einer Versorgung mit einem VP-Shunt. Hierbei war die größte Gruppe bei den Patienten mit einem Mediainfarkt festzustellen, wie in Tabelle 8 zu sehen ist.

			Shunt			Gesamt	
			keinen	präoperativer	postoperativer		
Grund- erkrankung	traumatische Blutung	Anzahl	63	19	3	85	
		in Prozent	74,10 %	22,40 %	3,50 %	100,00 %	
	spontane Blutung	Anzahl	15	2	0	17	
		in Prozent	88,20 %	11,80 %	0,00 %	100,00 %	
	Mediainfarkt	Anzahl	61	5	7	73	
		in Prozent	83,60 %	6,80 %	9,60 %	100,00 %	
	Abszess/Infektion/ Wundheilungsstörung	Anzahl	19	1	1	21	
		in Prozent	90,50 %	4,80 %	4,80 %	100,00 %	
	sonstiges	Anzahl	1	0	0	1	
		in Prozent	100,00 %	0,00 %	0,00 %	100,00 %	
	Gesamt		Anzahl	159	27	11	197
			in Prozent	80,70 %	13,70 %	5,60 %	100,00 %

Tab.8 Kreuztabelle Grunderkrankung \* Shunt

Von den 27 Patienten, die präoperativ einen VP-Shunt besessen haben, entwickelten sieben Patienten (25,9 %) eine postoperative Komplikation.

Elf Patienten (5,6 %) wurden postoperativ mit einem VP-Shunt versorgt.

Keine Signifikanz konnte beim exakten Test nach Fisher mit  $p = 0,089$  festgestellt werden, jedoch die Tendenz, dass Patienten, die bereits vor der Kranioplastik mittels VP-Shunt versorgt waren, eine höhere postoperative Komplikationsrate für eine epi- oder subdurale Flüssigkeitsansammlung aufzeigten.

Im Verlauf zeigte sich bei sieben Patienten (87,5 %), die postoperativ einen VP-Shunt implantiert bekommen hatten, eine Komplikation bzw. eine Infektion. Auch bei sieben Patienten (33,3 %), die vor der Kranioplastik mittels VP-Shunt versorgt waren, kam es zu Komplikationen bzw. Infektionen. Vier Patienten hatten als Grunderkrankung hier eine traumatische Blutung, zwei Patienten einen Mediainfarkt und ein Patient eine spontane Blutung. Bei drei Patienten kam es zu einer Dislokation der Implantate, bei zwei Patienten musste der VP-Shunt herabgestellt werden, da Kopfschmerzen bzw. ein generalisierter Krampfanfall auftraten. Ein Patient entwickelte eine Wundheilungsstörung und ein weiterer Patient erhielt eine erneute VP-Shunt Anlage. Mit  $p = 0,03$  wird eine Signifikanz angezeigt.

## 5. Diskussion

### 5.1 Allgemein

Um lebensbedrohliche intrakranielle Druckerhöhungen, zum Beispiel verursacht durch Traumata, Hirninfarkte oder Blutungen, chirurgisch zu intervenieren, hat sich die dekompressive Kraniektomie als therapeutisches Verfahren bewährt [24,73,78].

Die Kranioplastik steht als Folgeeingriff zur Verfügung, wenn sich der klinische Zustand des Patienten stabilisiert hat und das Vorhandensein eines Hirnödems durch Abschwellen des Hirns beseitigt wurde. Dieser Folgeeingriff hat nicht nur den Schutz des Gehirns und eine kosmetische Bewandnis als Ziel, sondern kann auch den neurologischen Status des Patienten verbessern [80]. Hier sind beispielsweise die Normalisierung von EEG-Veränderungen, Beseitigung von neurologischen Defiziten sowie eine Verbesserung der Kognition und des zerebralen Blutflusses zu nennen [3,4,6,26,39,40]. Weiterhin können durch die Rekonstruktion die physiologischen intrakraniellen Druckverhältnisse wiederhergestellt werden, was zur Folge hat, dass die zerebrale Perfusion optimiert wird und ein Gleichgewicht zwischen Liquorproduktion und Liquorresorption entsteht [56].

Es gibt heutzutage viele verschiedene Materialien, welche verwendet werden, um einen Schädeldefekt zu versorgen. Zum einen ist da der autologe Knochendeckel, der das häufigste verwendete Implantat zur Deckung eines Defektes ist [31], zum anderen die immer öfter eingesetzten synthetischen Implantatmaterialien wie Hydroxylapatit, Titan-Mesh, PEEK, Aluminiumoxidkeramik und PMMA. Die gute Passform, das Einwachsverhalten und die vor allem niedrigen Kosten sind die besonders zu nennenden Vorteile des autologen Knochendeckels [32]. Nachteilig ist die hohe Anfälligkeit für postoperative Komplikationen wie Infektionen, Wundheilungsstörungen, Abszesse sowie die Autolyse des körpereigenen und von der Blutzufuhr abgesetzten Implantats [23]. Die synthetischen Materialien haben jeweils ihre eigenen Vor- bzw. Nachteile. Wenn Infektionen, Wundheilungsstörungen, eine Autolyse des Kalottenimplantats oder Dislokationen von synthetischen Materialien entstehen, dann sind häufig weitere Eingriffe nötig, die ihre eigenen Komplikationsrisiken bergen und zu verlängerten stationären Aufenthalten führen. So kann es zu einer verzögerten neurologischen Rehabilitation kommen [7,22,88].

Insgesamt ist festzuhalten, dass der Eingriff der Kranioplastik mit einem erhöhten Risikoprofil für Komplikationen vergesellschaftet ist [54,79]. Daher ist es besonders

bedeutend die Komplikationsmöglichkeiten und Entstehungswahrscheinlichkeiten zu eruieren, damit dieses OP-Verfahren sicherer gestaltet werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurde bei 177 Patienten, welche mit notwendigen Revisionseingriffen insgesamt 197 Fälle generierten, eine Kranioplastik mittels Polymethylmethacrylat durchgeführt. Diese wurden durch die CAD-Technik der Firma ZimmerBiomet produziert. Bei einer Patientin kam es intraoperativ zum Exitus letalis bei hypoxischer Hirnschädigung. Eine direkte postoperative Komplikation trat bei 34 Fällen (17,3 %) auf. Im weiteren Verlauf kam es in 51 Fällen (32,1 %) von 159 erhobenen Follow-up-Fällen zu Komplikationen. Der logistische Aufwand für einen ambulanten Besuch kann erhöht sein, so dass vermutet werden kann, dass die nicht erhobenen Follow-ups keine Auffälligkeiten zeigten.

Bei 17 Patienten war die Implantation einer zweiten Kranioplastik nötig. In dieser Gruppe entwickelten drei Patienten (17,6 %) eine direkte postoperative Komplikation (Meningitis inkl. Hydrocephalus malresorptivus, persistierender Vigilanzminderung sowie Bronchialaspirat mit MRSA-Nachweis, subgaleale Flüssigkeitsansammlung) und im weiteren Verlauf kam es bei neun Patienten (69,2 %) zu Komplikationen (6 x Wundheilungsstörung, 3 x Lockerung / Dislokation der Kranioplastik).

In der Gruppe, die eine dritte Kranioplastik implantiert bekamen, trat bei einer (33,3 %) von dreien postoperativ eine Wundheilungsstörung mit koagulase-negative Staphylokokken auf, woraufhin das eingebrachte Implantat explantiert wurde. Im weiteren Verlauf kam es dann zu keinen weiteren Auffälligkeiten.

Die Komplikationsrate wird in der Literatur mit 10 bis 40 % angegeben [15,62]. Bei den monozentrischen, retrospektiven Studien von Coulter et al. von 2014 betrug die Komplikationsrate 40,4 Prozent. Hier wurde bei 139 Patienten ein Titaniumimplantat verwendet, bei 22 Patienten eine Acryl-Schädelplastik und zwei Patienten erhielten ein körpereigenes Implantat [19].

Bei Schwarz et al. von 2016 war die Rate bei 36,3 Prozent. Hier wurde bei 503 Patienten ein autologes Implantat verwendet und bei 128 Patienten ein Knochenersatzmaterial implantiert. Die Ersatzmaterialien waren wie folgt verteilt: 19 Bioverit- Implantate, 27 PEEK- Optima- Implantate und 82 Titanium- Implantate [79]. Lee et al. von 2013 berichteten über eine Komplikationsgesamtrate von 26 % [50]. In der Metaanalyse von Malcom et al. war die mittlere Komplikationsrate 19,5 Prozent, mit einer Streubreite von 3,9 bis 45,8 Prozent [57]. Die Gesamtrate von 17,3 Prozent an postoperativen Komplikationen in der vorliegenden Arbeit entspricht also dem unteren Durchschnitt.

Mit 67 Revisionsoperationen (34,0 %) spiegelt das Ergebnis dieser Arbeit den Durchschnitt anderer Untersuchungen wieder. Nicht jede postoperative Komplikation bzw. Komplikation im Verlauf wie zum Beispiel Pneumonien, epidurale Hygromansammlungen, Wundheilungsstörungen mit konservativer Behandlung oder Krampfanfälle, war also operationsbedürftig.

Schwarz et al. [79] gaben 2016 eine Reoperationsrate bei der Implantation einer Kranioplastik von 36,5 Prozent an, die vorrangig durch Infektionen, Nachblutungen oder Wundheilungsstörungen bedingt sei. Gooch et al. hatten eine Reoperationsrate von 26 Prozent. Auch hier waren Infektionen, Wundheilungsstörungen und intrazerebrale Nachblutungen führend [30].

Mit einer Infektionsrate von 14,1 Prozent in der vorliegenden Untersuchung befindet sie sich im Durchschnitt zu den Literaturangaben. Hier wird die Infektionsrate zwischen 7 und 22 Prozent angegeben [1,23,30,35].

## 5.2 Grunderkrankung

Ein kennzeichnender Zusammenhang zwischen den Grunderkrankungen und postoperativen Komplikationen konnte nicht ermittelt werden. Allerdings war eine Tendenz zu erkennen, dass traumatische Blutungen (23,8 %) und Mediainfarkte (15,1 %) eine höhere Komplikationsrate im Vergleich zur spontanen Blutung (5,9 %) haben. In der Literatur werden in verschiedenen retrospektiven Studien synthetische Materialien mit autologen Knochendeckeln verglichen. Im Falle von traumatischen Indikationen und der Verwendung von körpereigenen Implantaten kann eine erhöhte Infektionsgefahr im Vergleich zu Mediainfarkten oder spontanen Blutungen, festgestellt werden [13,47]. Riordan et al. hatten - ebenfalls wie in der vorliegenden Untersuchung - die größte Untergruppe an Patienten mit einer traumatischen Blutung. Allerdings konnten sie in ihrer Arbeit keine Tendenz bzw. kein erhöhtes Infektionsrisiko feststellen [72].

Zusammenfassend ist zu sagen, dass für das Auftreten von postoperativen Komplikationen kein signifikanter Zusammenhang mit der zur dekompressiven Kraniektomie führenden Ursache hergestellt werden kann [10,47,70,79].

Bei Infektionen oder Komplikationen im Verlauf zeigt sich keine Signifikanz. Bei Patienten, welche aufgrund von Abszessen, Infektionen oder Wundheilungsstörungen



eine Zweitplastik implantiert bekommen haben, zeigt sich auch dann eine erhöhte Gefahr für eine erneute Infektion. Ein Problem der betroffenen Patienten ist, dass sie mehrmals an derselben Stelle operiert wurden und es so zu ausgedünntem Weichteilgewebe, Hauteinziehungen und verminderter Zugfestigkeit der Kopfhaut gekommen ist [70]. Diese Faktoren führen zu einem gesteigerten Risikoprofil für Infektionen bzw. Wundheilungsstörungen, da eine Kranioplastik mit dieser strapazierten Haut wieder bedeckt wird. Darüber hinaus kann es zu einer lokalen Wundinfektion kommen, wenn unbehandelte bzw. resistente Erreger noch in der Hautregion verblieben sind [11,21]. Riordan et al. konnten eine Signifikanz für den Zusammenhang von Wundheilungsstörungen und auftretenden Infektionen herstellen [72]. In einer kleinen pädiatrischen Studie wurde bei Patienten, die keine ausreichende Weichteilabdeckung hatten, vor der Kranioplastik eine Kopfhautgewebeexpansion oder eine acellular dermal matrix augmentation durchgeführt. Hier traten keine Infektionen auf, sodass dies als eine Reduktion des Risikoprofils gedeutet werden kann [53].

### 5.3 Zeitliches Intervall zwischen dekompressiver Kraniektomie und Schädeldachplastik

Über das Zeitintervall zwischen dekompressiver Kraniektomie und der Kranioplastik gibt es kontroverse Diskussionen, ob es Einfluss auf das Patienten-Outcome und die Auftretenswahrscheinlichkeit von postoperativen Komplikationen hat.

In der vorliegenden Untersuchung konnte keine Kausalität für das zeitliche Intervall zwischen den beiden operativen Eingriffen und dem Auftreten von postoperativen Komplikationen ( $p = 0,122$ ) bzw. von Infektionen oder Komplikationen im Verlauf ( $p = 0,687$ ) festgestellt werden. Bei den 187 vorhandenen Zeitspannen betrug der Median 182 Tage (Minimum 52; Maximum 1197).

Quah et al. untersuchten ein Kollektiv von 70 Kranioplastik-Patienten in einer prospektiven Multicenter-Studie im Jahre 2016. Hier stellte sich weder ein Zusammenhang zwischen dem Zeitintervall und dem Entstehen von postoperativen Komplikationen raus, noch ein Zusammenhang von Infektionen oder Komplikationen im Verlauf [67].

In ihrer Metaanalyse von 2016 untersuchten Malcom et al. ebenfalls die Auswirkungen des zeitlichen Intervalls zwischen dekompressiver Kraniektomie und Kranioplastik mit

Blick auf Entstehung von postoperativen Komplikationen wie Infektionen, Reoperationsrate oder Komplikationen im Verlauf. Es wurde zwischen einer frühen Implantation der Kranioplastik mit < 90 Tage und einer späten Implantation mit > 90 Tage unterschieden. Es konnte keine Signifikanz für postoperative Infektionen festgestellt werden, jedoch war die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Hydrocephalus malresorptivus bei einer frühen Kranioplastikimplantation erhöht ( $p= 0.008$ ) und dies besonders in der Subgruppe Schädel-Hirn-Trauma ( $p = 0,05$ ) [57].

In 2011 untersuchten Yadla et. al in einer Metaanalyse die Zeitintervalle zwischen dekompressiver Kraniektomie und Kranioplastik von geringer als drei Monaten und mehr als drei Monaten. Auch hier konnte kein Zusammenhang zwischen früher Implantation und dem Auftreten von postoperativen Infektionen festgestellt werden [91].

Auch Schuss et al. differenzierten ihre Patienten in zwei Gruppen: Bei einer Gruppe wurde die Implantation der Kranioplastik innerhalb von zwei Monaten nach der dekompressiven Kraniektomie durchgeführt und bei der anderen Gruppe später als zwei Monate nach Kraniektomie. Mit einer Komplikationsrate von 25,9 % in der frühen Implantationsgruppe im Vergleich zur späteren Gruppe mit 14,2 % konnte eine signifikante Erhöhung ( $p= 0,04$ ) nachgewiesen werden [76].

Weiterhin untersuchten Schuss et. al ein Jahr später die langfristigen Komplikationen nach Kranioplastik, hier mit besonderem Augenmerk auf die Nekrose des autologen Knochendeckels. Die Einteilung erfolgte gleichermaßen in frühe und späte Implantationsgruppe. Auch hier konnte eine statistische Signifikanz für eine höhere Rate an Knochendeckelnekrosen bei früher Implantation ( $p=0,008$ ) festgestellt werden [77].

Auch Thavarajah et al. nahmen sich der Thematik des Zeitpunktes einer Kranioplastikimplantation nach dekompressiver Kraniektomie an. In ihrer retrospektiven Analyse, die den Zeitraum zwischen 1998 bis 2008 umfasst, wurden insgesamt 82 Kranioplastiken durchgeführt. Die Infektionsrate betrug 11 %. Unterteilt wurden die 82 Kranioplastikeingriffe in vier Gruppen, ausgehend vom Zeitraum zwischen den zwei operativen Eingriffen: erste Gruppe null bis sechs Monate, zweite Gruppe sieben bis zwölf Monate, dritte Gruppe 13-24 Monate und die vierte Gruppe mehr als 24 Monate. Es wurden nur die Fälle analysiert, die schlussendlich zur Explantation der Kranioplastik führten. Die verwendeten Kranioplastikmaterialien waren allogenen oder autolog. Nachgewiesen werden konnte, dass eine Kranioplastik, die mindestens sechs Monate nach der dekompressiven Kraniektomie implantiert

wurde, das Infektionsrisiko begrenzt. Die meisten infektiösen Fälle wies die erste Gruppe mit null bis sechs Monaten auf [84].

Cheng et al. unterteilten ihre untersuchten Patienten in zwei Gruppen. Diese wurden entsprechend dem verwendeten Material der Kranioplastik aufgespalten. Unterschieden wurde autologes und alloplastisches Material. Diese beiden Gruppen wurden zusätzlich in zwei Subgruppen differenziert und zwar in das Zeitintervall der Implantation der Kranioplastik innerhalb 90 Tage nach Kraniektomie und Implantation später als 90 Tage. Sie stellten eine Signifikanz in Bezug auf Zeitintervall und Infektion in der autologen Gruppe fest, allerdings zeigte sich dies nicht in der PMMA-Gruppe. In den Subgruppen wurde keine Signifikanz festgestellt. Ihr Fazit lautete, dass ihre Daten auf eine erhöhte Gefahr für die Auftretenswahrscheinlichkeit von Infektionen bei früher Implantation einer Kranioplastik hinweisen [14].

Bobinski et al. unterteilten ebenfalls ihre untersuchten Patienten in unterschiedliche Gruppen in Bezug auf das verwendete Material. Auf der einen Seite wurde autologer Knochen und auf der anderen Seite PMMA-Plastiken eingesetzt. Sie stellten weiterhin einen Bezug von Komplikationen und dem zeitlichen Intervall zwischen dekompressiver Kraniektomie und der Kranioplastik her. Hier konnten sie aufzeigen, dass häufiger Komplikationen in der Gruppe mit dem replantierten autologen Knochen auftraten. In dieser Gruppe war das zeitliche Intervall der beiden operativen Eingriffe signifikant kürzer ( $p=0,04$ ) und somit ein Prädiktor für das Auftreten von Komplikationen. Allerdings konnte die Forschungsgruppe auch nachweisen, dass ein kürzeres Intervall einen Trend zu weniger Komplikationen aufweist. Zwischen dekompressiver Kraniektomie und Kranioplastik lagen im Mittel in der autologen Gruppe  $3,2 \pm 1,6$  Monate und in der Gruppe der PMMA-Plastik  $4,8 \pm 3,6$  Monate. Das Zeitintervall der gesamten Untersuchungspopulation betrug  $3,8 \pm 2,6$  Monate [7].

## 5.4 Einfluss des präoperativen Karnofsky Index

In der vorliegenden Arbeit konnte kein erhöhter Einfluss auf das Entstehen von Komplikationen oder Infektionen sowohl postoperativ als auch im Verlauf festgestellt werden.

Man kann aber festhalten, dass viele schwerkranke Patienten eingeschlossen wurden, was durch den präoperativen Karnofsky-Score mit Median 70 %, einschließlich Patienten mit einem Score von 20 % oder 30 %, bestätigt wird. Durch die

Implantatversorgung konnte eine Verbesserung im postoperativen Karnofsky-Score erreicht werden, welcher im Median bei 80 % lag. Auch Lindner et al. stellten fest, dass die Patienten postoperativ einen verbesserten Karnofsky-Score aufweisen, dies jedoch nicht signifikant war [54].

Cong et al. teilten in ihrer Untersuchung die Patienten nach traumatischen Schädelverletzungen in drei Gruppen ein und stellten heraus, dass eine signifikante Verbesserung des Karnofsky-Scores eintrat, wenn die Patienten innerhalb von 90 Tagen nach dem Ereignis operativ mittels Kranioplastik versorgt wurden [17].

Rashidi et al. zeigten auf, dass ein hoher Karnofsky-Score ein signifikanter Prädiktor für die Auftretenswahrscheinlichkeit einer aseptischen Bone-Flap Resorption zu sein scheint [69].

## 5.5 OP- Dauer

In der vorliegenden Arbeit betrug die mittlere Schnitt-Naht-Zeit 96,2 Minuten, bei einer Spannweite von 19 Minuten bis 222 Minuten. In beiden Kategorien, sowohl postoperativ als auch im Verlauf, konnte keine Signifikanz für das Auftreten von Komplikationen und der OP- Dauer festgestellt werden.

Auch Matsuno et al. [59] konnten 2006 keinen Zusammenhang zwischen der OP-Dauer und dem Auftreten von Komplikationen feststellen. Hier betrug die durchschnittliche OP-Zeit der Infektionsgruppe 146 Minuten und der infektionsfreien Gruppe 142 Minuten.

Sowohl Sundseth et al. [82] als auch Kim et al. [46] stellten wiederum eine Kausalität bei längeren Operationen und dem Auftreten von Infektionen fest. Bei Kim et. al traten mehr Transplantatinfektionen bei einer OP-Dauer von über 120 Minuten auf.

Lee et al. [49] stellten in ihrer Untersuchung heraus, dass Operationen, die länger als 200 Minuten dauerten, eine erhöhte Infektionsrate bei autologen Schädelplastiken verursachten.

Mukherjee et al. stellten in ihrer Arbeit fest, dass die bifrontale Versorgung mittels Titanplastik länger dauerte und eine erhöhte Komplikationsrate vorherrschte als bei einer unilateralen frontalen Versorgung [60].

Festzuhalten ist, dass unabhängig von der Art des Materials, welches verwendet wird, versucht werden sollte, eine kurze Operationsdauer anzustreben, da so eine mögliche Kontamination der verschiedenen Materialien der Kranioplastik geringgehalten wird.

## 5.6 Operateur

Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen der Erfahrung des Operateurs und dem Auftreten von postoperativen Komplikationen bzw. Infektionen oder Komplikationen bzw. Infektionen im Verlauf festgestellt werden. Die Erfahrung wurde zwischen Facharzt und Assistent in der Weiterbildung unterteilt.

Joswig et al. konnten feststellen, dass sowohl Assistenten in der Weiterbildung, als auch Fachärzte eine ebenso große Auftretenswahrscheinlichkeit für postoperative Komplikationen aufwiesen. Auch der Schweregrad der Komplikationen war in beiden Gruppen vergleichbar. Ebenfalls war in beiden Gruppen die Wahrscheinlichkeit nahezu gleich hoch, dass die Kranioplastik aufgrund von Infektionen entfernt werden musste. Der einzige Unterschied wurde in der mittleren Operationsdauer analysiert. Hier dauerten die Eingriffe bei den Weiterbildungsassistenten länger [43].

Liang et al. analysierten die Komplikationsrate in Bezug auf Weiterbildungsassistenten. Hierbei wurde zwischen selbstständig operierenden Weiterbildungsassistenten, die eine Komplikationsrate von 10 % (1/10) aufwiesen, und die unter Aufsicht eines Facharztes operierenden Weiterbildungsassistenten, die eine Rate von 15 % (3/20) aufwiesen, unterschieden. Auch die Komplikationsrate bei Fachärzten wurde untersucht und mit 6,4 % (5/78) festgestellt [52].

Honeybul und Hol fanden in ihrer retrospektiven Analyse, die Patienten einschloss, die zwischen Anfang 2004 und Mitte 2015 in den beiden großen Unfallkrankenhäusern in Westaustralien eine Kranioplastik erhielten, heraus, dass nach der Umstellung des Operationsverfahrens auf einen einzelnen, leitenden Arzt die Infektionsrate drastisch absank und so eine Reduktion der Morbidität erzielt wurde [35].

Grundsätzlich ist aber zu sagen, dass der Eingriff der Kranioplastik von einem Weiterbildungsassistenten unter Aufsicht sicher durchgeführt werden kann, ohne die Komplikationsrate zu erhöhen oder die postoperativen Ergebnisse des Patienten zu beeinträchtigen.

## 5.7 Liquorleck

In der vorliegenden Arbeit konnten wir feststellen, dass es eine Tendenz zu postoperativen Komplikationen gibt bei vorhandenem Liquorleck oder nach Liquorpunktion (23,8 %) und es hier im Speziellen zu epiduralen Nachblutungen oder Hämatomen sowie Krampfanfällen kommt.

Kim et. al. stellten ebenfalls fest, dass Patienten, die eine subgaleale Flüssigkeitsansammlung vor der Implantationsoperation hatten, die Tendenz zu einem erhöhten postoperativen Infektionsrisiko aufwiesen [46]. Sie vermuteten, dass das Auftreten dieser Flüssigkeitsansammlung mit einer Inzision der Dura mater im Zuge der dekompressiven Kraniektomie vergesellschaftet ist. Hierbei soll ein nicht suffizienter Verschluss der Dura mater Ursache sein; die Dura mater soll, nachdem die Hirnschwellung zurückgegangen ist, erweitert sein und so nicht mehr auf dem Hirngewebe aufliegen, was zur Folge hat, dass es zu einem Übertritt von zerebrospinaler Flüssigkeit in den subgalealen Raum kommen kann [16,46]. Weiterhin beschrieben Kim et al. einen Zusammenhang zwischen der subgalealen Flüssigkeitsansammlung und einer verminderten Vaskularisierung des angrenzenden Gewebes. Diese führe schlussendlich zu einer Hypoxie, wodurch das lokale Immunsystem geschwächt wird [46].

Riordan et al. geben an, dass die Flüssigkeitsansammlung auch ein Keimreservoir darstellt und es so zu einer Ausbreitung der Keime kommen kann, wenn es während der Implantation eröffnet wird. [72]

## 5.8 Duraersatzmaterial bei dekompressiver Kraniektomie

Während der dekompressiven Kraniektomie wird die Dura häufig sternförmig eröffnet und dies führt dann zur Druckentlastung. Um die Bildung von Adhäsionen nach Kraniektomie zu verhindern, verwendeten Kawaguchi et al. als erstes einen Polytetrafluorethylen-Duraersatz [45]. Vakis et al. konnten feststellen, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Duraperforation, die Operationsdauer der Kranioplastik als auch der Blutverlust durch ein Duraersatzmaterial verringert werden konnte [86].

In der vorliegenden Arbeit untersuchten wir, ob das verwendete Duraersatzmaterial bei der dekompressiven Kraniektomie Auswirkungen auf die Komplikationsrate beim

Folgeeingriff der Kranioplastik hat. Hier konnte jedoch keine Signifikanz für eine erhöhte Infektions- oder Komplikationsrate festgestellt werden.

Malliti et al. stellten allerdings in ihrer einjährigen, retrospektiven Arbeit, bei denen eine Duraplastik mit einem Neuropatch (B. Braun, Boulogne, Frankreich) (n = 61) oder einem Perikraniumtransplantat (n = 63) durchgeführt wurde, fest, dass in beiden Gruppen das Risiko für eine Wundinfektion bestand (15 Prozent sowie fünf Prozent), allerdings die Verwendung eines Neuropatches die Rate eines Liquorlecks signifikant steigert [58].

Huang et al. verglichen in ihrer Arbeit zwei Gruppen. Die eine Gruppe (n = 50) wurde mit einem Neuropatch (B. Braun, Boulogne, Frankreich) versorgt und die andere Gruppe (n=85) wurde mit hämostatischen Materialien, einschließlich Gelatineschwämme oder oxidierte Cellulose, die auf die Dura gelegt wurden, versorgt. Sie konnten herausfinden, dass die Verwendung eines Neuropatches nicht die Inzidenz von Infektionen oder hydrodynamischen Komplikationen, einschließlich subduralem Hygrom und Austreten von Liquor cerebrospinalis, nach dekompressiver Kraniektomie oder Kranioplastik bei schweren traumatischen Hirnverletzungen erhöht. Ein extraaxiales Hämatom an der Stelle der Kraniektomie trat jedoch häufiger bei Patienten mit Neuropatch auf und bildete eine Druckläsion im angrenzenden Gehirn [37]. Darüber hinaus geben Huang et al. zu bedenken, dass eine dekompressive Kraniektomie in den meisten Fällen infolge eines Traumas durchgeführt wird. Es gibt mehrere Faktoren, die bei Traumapatienten zu einer höheren Infektionsrate an der Operationsstelle führen können. Häufig ist das OP-Gebiet, aufgrund von Frakturen oder durchdringenden Verletzungen der Kopfhaut, der Weichteile oder der Knochen, kontaminiert.

Azzam et al. durchsuchten systematisch die PubMed-Datenbank für den Zeitraum von 2007 bis 2017, um Studien zu finden, die sich mit einem Duraplastieverfahren beschäftigten. Die klinischen Daten wurden dann in biologische und synthetische Transplantate unterteilt sowie analysiert. Die Allotransplantate wurden am häufigsten bei Dekompressionen von Chiari-Missbildungen verwendet, synthetische Transplantate überwiegend bei Tumorfällen und Xenotransplantate am häufigsten bei der dekompressiven Hemikraniektomie zur Evakuierung akuter subduraler Hämatome. Es konnte eine kumulative Komplikationsrate für Duraersatzmaterialien aller Art von 11 % festgestellt werden. Dabei gab es in der Komplikationsrate zwischen den verschiedenen Materialien keine Unterschiede [5].

Es ist festzuhalten, dass sowohl in der vorliegenden Arbeit, als auch in der Literatur, eine moderate Komplikationsrate vorherrscht. Zukünftige Studien werden weiterhin nötig sein, um Sicherheit und Wirksamkeit von solchen Verfahren zu evaluieren.

## 5.9 Ventrikulo-Peritonealer-Shunt

Liegt ein kommunizierender Hydrocephalus vor, muss ein VP-Shunt angelegt werden. Dieser kann zu einer Hirndrucksenkung führen, neurologische Defizite (wie zum Beispiel eine Halbseitenlähmung sowie eine Aphasie) können abklingen, oder die kognitiven Leistungsfähigkeiten können gesteigert werden [34,42,90].

Es konnte eine erhöhte, aber nicht signifikante Komplikationsrate für eine epi- oder subdurale Flüssigkeitsansammlung bei bereits präoperativ vorhandenem VP-Shunt festgestellt werden. Hier kann die Überlegung angestellt werden, ob man den VP-Shunt zunächst höher einstellt und so den Vakuum-Effekt minimiert.

Auch Chang et al. konnten eine erhöhte Rate, allerdings ebenfalls keine signifikante, bei dem Vorhandensein eines VP-Shunts feststellen. Die postoperative Infektion als Komplikation war in ihrer Untersuchung führend. Sie geben ohne eine nähere Erklärung an, dass sich mit einer kontinuierlichen Liquorableitung mittels Shuntsystem kein signifikant besseres neurologisches Outcome der Patienten zeigte [12].

Schwarz et al. nannten den liegenden VP-Shunt sowie ein junges Alter als signifikanten Risikofaktor für die Entstehung einer Autolyse bei autologer Kranioplastik und empfehlen daher die Verwendung von allogenen Materialien für die Kranioplastik [79].

Tsang et al. stellten als einzigen signifikanten Risikofaktor für eine erhöhte Infektionsrate oder eine Autolyse das Vorhandensein eines VP-Shunts fest [85].

Auch Schuss et al. gaben an, dass Patienten mit einem VP-Shunt eine signifikant höhere Komplikationsrate ( $p=0.007$ ) nach der Kranioplastik aufzeigten als Patienten ohne Shunt. In ihrer Untersuchung war vor allem das Hygrom als Komplikation führend. Als Empfehlung gaben sie an, dass ein programmierbarer VP-Shunt verwendet werden sollte, da die auf den Shunt bezogenen Komplikationen mit einem präoperativ erhöhten Anfangsdruck verringert werden könnten [75].

Piedra et al. machten nur Patienten, die einen VP-Shunt zum Zeitpunkt der Kranioplastik hatten, mit einem höheren Risiko für Komplikationen ausfindig. Hier wurden besonders Hämatomate, Infektionen sowie Knochenresorptionen festgestellt [64].



## 6. Schlussfolgerung

Abschließend bleibt unsererseits zu schlussfolgern, dass die Kranioplastiken aus Polymethylmethacrylat, welche durch die CAD-Technik produziert werden, in der Neurochirurgie ein sicheres Material für die Versorgung von Patienten mit Schädeldefekten darstellen. Die Resultate unserer Untersuchung zeigen, dass PMMA-Schädeldachplastiken keinesfalls nachteilig im Vergleich zum autologen Knochen sind. Die Infektionsraten der verschiedenen Materialien sind annähernd gleich. Auch die auftretenden Komplikationen wie Wundheilungsstörungen, Infektionen oder Abszesse sind ähnlich. Die Autolyse des replantierten Schädelknochens ist natürlich bei einer allogenen Defektdeckung nicht vorhanden.

In der vorliegenden Arbeit konnten wir keine eindeutigen Signifikanzen für unsere untersuchten Parameter und dem Auftreten von postoperativen Komplikationen bzw. Komplikationen/Infektionen im Verlauf feststellen. Es ist aber festzuhalten, dass bei den Parametern Grunderkrankung, hier speziell traumatische Blutungen und Mediainfarkte, VP-Shunt und Liquorleck, Tendenzen mit knapp verfehlter Signifikanz vorhanden sind. So sollte sowohl bei der dekompressiven Kraniektomie als auch bei der Kranioplastik ein besonderes Augenmerk auf den Verschluss der Dura gelegt werden, da ansonsten vor Implantation der Kranioplastik ein subgaleales Ödem bzw. ein postoperatives Hygrom sowie Liquorkissen ein Infektionsrisiko darstellt.

Insgesamt konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die computer assisted design – Technik eine vielversprechende Technik darstellt, um Kranioplastiken aus Polymethylmethacrylat herzustellen. Diese können dann unterstützend und alternativ in der neurochirurgisch-operativen Behandlung im Bereich der Schädeldachrekonstruktion sein. Jedoch kann man auch festhalten, dass dieses Verfahren noch lange nicht die Endlösung darstellen wird. Es werden weitere Forschungsreihen nötig sein, um Prädiktoren für eine Infektion bzw. Komplikation festzustellen und diese dann, egal welches Material letztendlich verwendet wird, beseitigen zu können.

## 7. Literaturverzeichnis

1. Aarabi B, Hesdorffer DC, Ahn ES, Aresco C, Scalea TM, Eisenberg HM (2006) Outcome following decompressive craniectomy for malignant swelling due to severe head injury. *J Neurosurg* 104:469–479
2. Aciduman A, Belen D (2007) The earliest document regarding the history of cranioplasty from the Ottoman era. *Surg Neurol* 68:349–52; discussion 352-3
3. Agner C, Dujovny M, Gaviria M (2002) Neurocognitive Assessment Before and after Cranioplasty. *Acta Neurochir (Wien)* 144:1033–1040
4. Aydin S, Kucukyuruk B, Abuzayed B, Aydin S, Sanus GZ (2011) Cranioplasty: Review of materials and techniques. *J Neurosci Rural Pract* 2:162–167
5. Azzam D, Romiyo P, Nguyen T, Sheppard JP, Alkhalid Y, Lagman C, Prashant GN, Yang I (2018) Dural Repair in Cranial Surgery Is Associated with Moderate Rates of Complications with Both Autologous and Nonautologous Dural Substitutes. *World Neurosurg* 113:244–248
6. Bijlenga P, Zumofen D, Yilmaz H, Creisson E, de Tribolet N (2006) Orthostatic mesodiencephalic dysfunction after decompressive craniectomy. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 78:430–433
7. Bobinski L, Koskinen L-OD, Lindvall P (2013) Complications following cranioplasty using autologous bone or polymethylmethacrylate—Retrospective experience from a single center. *Clin Neurol Neurosurg* 115:1788–1791
8. Bonfield CM, Kumar AR, Gerszten PC (2014) The history of military cranioplasty. *Neurosurg Focus* 36:E18
9. Bonis P, Sturiale CL, Anile C, Gaudino S, Mangiola A, Martucci M, Colosimo C, Rigante L, Pompucci A (2013) Decompressive craniectomy, interhemispheric hygroma and hydrocephalus: A timeline of events? *Clin Neurol Neurosurg* 115:1308–1312
10. Brommeland T, Rydning PN, Pripp AH, Helseth E (2015) Cranioplasty complications and risk factors associated with bone flap resorption. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med* 23:75
11. Bruce JN, Bruce SS (2003) Preservation of bone flaps in patients with postcraniotomy infections. *J Neurosurg* 98:1203–1207
12. Chang V, Hartzfeld P, Langlois M, Mahmood A, Seyfried D (2010) Outcomes of cranial repair after craniectomy: Clinical article. *J Neurosurg* 112:1120–1124
13. Cheng C-H, Lee H-C, Chen C-C, Cho D-Y, Lin H-L (2014) Cryopreservation versus subcutaneous preservation of autologous bone flaps for Cranioplasty: Comparison of the surgical site infection and bone resorption rates. *Clin Neurol Neurosurg* 124:85–89
14. Cheng Y-K, Weng H-H, Yang J-T, Lee M-H, Wang T-C, Chang C-N (2008) Factors affecting graft infection after cranioplasty. *J Clin Neurosci* 15:1115–1119

15. Cho YJ, Kang SH (2017) Review of Cranioplasty after Decompressive Craniectomy. *Korean J Neurotrauma* 13:9–14
16. Choi WH, Moon CT, Koh Y-C, Chun YI, Cho J, Song SW (2013) Galeal Tack-Up Sutures to Prevent Subgaleal Cerebrospinal Fluid Collection. *J Korean Neurosurg Soc* 54:336–339
17. Cong Z, Shao X, Zhang L, Zhao D, Zhou X, Yi C, Shao Y (2016) Early Cranioplasty Improved Rehabilitation in Patients With Traumatic Skull Injuries. *Neurosurg Q* 26:103–108
18. Costantino PD, Chaplin JM, Wolpoe ME, Catalano PJ, Sen C, Bederson JB, Govindaraj S (2000) Applications of fast-setting hydroxyapatite cement: cranioplasty. *Otolaryngol--Head Neck Surg Off J Am Acad Otolaryngol-Head Neck Surg* 123:409–412
19. Coulter IC, Pesic-Smith JD, Cato-Addison WB, Khan SA, Thompson D, Jenkins AJ, Strachan RD, Mukerji N (2014) Routine but risky: A multi-centre analysis of the outcomes of cranioplasty in the Northeast of England. *Acta Neurochir (Wien)* 156:1361–1368
20. COURVILLE CB (1959) Cranioplasty in prehistoric times. *Bull Los Angel Neurol Soc* 24:1–8
21. Cronquist AB, Jakob K, Lai L, Della Latta P, Larson EL (2001) Relationship between Skin Microbial Counts and Surgical Site Infection after Neurosurgery. *Clin Infect Dis* 33:1302–1308
22. De Bonis P, Frassanito P, Mangiola A, Nucci CG, Anile C, Pompucci A (2011) Cranial Repair: How Complicated Is Filling a “Hole”? *J Neurotrauma* 29:1071–1076
23. Dünisch P, Walter J, Sakr Y, Kalff R, Waschke A, Ewald C (2013) Risk factors of aseptic bone resorption: a study after autologous bone flap reinsertion due to decompressive craniotomy. *J Neurosurg* 118:1141–1147
24. El Ahmadih TY, Adel JG, El Tecle NE, Daou MR, Aoun SG, Nanney AD, Bendok BR (2013) Surgical Treatment of Elevated Intracranial Pressure: Decompressive Craniectomy and Intracranial Pressure Monitoring. *Neurosurg Clin N Am* 24:375–391
25. Fidler-Lehn ECOG Leistungsstatus - KARNOFSKY Index (%).
26. Fodstad H, Love JA, Ekstedt J, Fridén H, Liliequist B (1984) Effect of cranioplasty on cerebrospinal fluid hydrodynamics in patients with the syndrome of the trephined. *Acta Neurochir (Wien)* 70:21–30
27. Fourcade O, Fuzier R, Daboussi A, Gigaud M, Trémoulet M, Samii K (2006) Craniectomie décompressive et hypertension intracrânienne. *Ann Fr Anesth Reanim* 25:858–862
28. Gerszten PC, Gerszten E, Allison MJ (1998) Diseases of the Skull in Pre-Columbian South American Mummies. *Neurosurgery* 42:1145–1151
29. Goldstein JA, Paliga JT, Bartlett SP (2013) Cranioplasty: indications and advances. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg* 21:400–409

30. Gooch MR, Gin GE, Kenning TJ, German JW (2009) Complications of cranioplasty following decompressive craniectomy: analysis of 62 cases. *Neurosurg Focus* 26:E9
31. Grossman N, Shemesh-Jan HS, Merkin V, Gideon M, Cohen A (2007) Deep-freeze preservation of cranial bones for future cranioplasty: nine years of experience in Soroka University Medical Center. *Cell Tissue Bank* 8:243–246
32. Hayward RD (1999) Cranioplasty: don't forget the patient's own bone is cheaper than titanium. *Br J Neurosurg* 13:490–491
33. Henry HM, Guerrero C, Moody RA (1976) Cerebrospinal fluid fistula from fractured acrylic cranioplasty plate. Case report. *J Neurosurg* 45:227–228
34. Honeybul S, Janzen C, Kruger K, Ho KM (2013) The impact of cranioplasty on neurological function. *Br J Neurosurg* 27:636–641
35. Honeybul S, Ho KM (2016) Cranioplasty: morbidity and failure. *Br J Neurosurg* 30:523–528
36. Huang X, Wen L (2010) Technical Considerations in Decompressive Craniectomy in the Treatment of Traumatic Brain Injury. *Int J Med Sci* 7:385–390
37. Huang Y-H, Lee T-C, Chen W-F, Wang Y-M (2011) Safety of the Nonabsorbable Dural Substitute in Decompressive Craniectomy for Severe Traumatic Brain Injury. *J Trauma Acute Care Surg* 71:533–537
38. Inamasu J, Kuramae T, Nakatsukasa M (2010) Does Difference in the Storage Method of Bone Flaps After Decompressive Craniectomy Affect the Incidence of Surgical Site Infection After Cranioplasty? Comparison Between Subcutaneous Pocket and Cryopreservation. *J Trauma Acute Care Surg* 68:183–187
39. Isago T, Nozaki M, Kikuchi Y, Honda T, Nakazawa H (2004) Sinking Skin Flap Syndrome: A Case of Improved Cerebral Blood Flow After Cranioplasty. *Ann Plast Surg* 53:288–292
40. Jelcic N, Della Puppa A, Mottaran R, Cecchin D, Manara R, Dam M, Cagnin A (2013) Case series evidence for improvement of executive functions after late cranioplasty. *Brain Inj* 27:1723–1726
41. Johnson RD, Maartens NF, Teddy PJ (2011) Technical aspects of decompressive craniectomy for malignant middle cerebral artery infarction. *J Clin Neurosci Off J Neurosurg Soc Australas* 18:1023–1027
42. Joseph V, Reilly P (2009) Syndrome of the trephined: Case report. *J Neurosurg* 111:650–652
43. Joswig H, Gautschi OP, El Rahal A, Sveikata L, Bartoli A, Hildebrandt G, Schaller K, Stienen MN (2016) Cranioplasty: Is Surgical Education Safe? *World Neurosurg* 91:81–88
44. Kamp M, Tahsim-Oglou Y, Steiger H-J, Hänggi D (2011) Traumatic Brain Injuries in the Ancient Egypt: Insights from the Edwin Smith Papyrus. *Cent Eur Neurosurg* 72:001

45. Kawaguchi T, Hosoda K, Shibata Y, Koyama J (2003) Expanded Polytetrafluoroethylene Membrane for Prevention of Adhesions in Patients Undergoing External Decompression and Subsequent Cranioplasty-Technical Note-. *Neurol Med Chir (Tokyo)* 43:320–324
46. Kim H, Sung SO, Kim SJ, Kim S-R, Park I-S, Jo KW (2013) Analysis of the factors affecting graft infection after cranioplasty. *Acta Neurochir (Wien)* 155:2171–2176
47. Klinger DR, Madden C, Beshay J, White J, Gambrell K, Rickert K (2014) Autologous and Acrylic Cranioplasty: A Review of 10 Years and 258 Cases. *World Neurosurg* 82:e525–e530
48. Kshetry VR, Mindea SA, Batjer HH (2007) The management of cranial injuries in antiquity and beyond. *Neurosurg Focus* 23:E8
49. Lee C-H, Chung YS, Lee SH, Yang H-J, Son Y-J (2012) Analysis of the factors influencing bone graft infection after cranioplasty. *J Trauma Acute Care Surg* 73:255–260
50. Lee L, Ker J, Quah BL, Chou N, Choy D, Yeo TT (2013) A retrospective analysis and review of an institution's experience with the complications of cranioplasty. *Br J Neurosurg* 27:629–635
51. Lethaus B, Safi Y, ter Laak-Poort M, Kloss-Brandstätter A, Banki F, Robbenmenke C, Steinseifer U, Kessler P (2012) Cranioplasty with customized titanium and PEEK implants in a mechanical stress model. *J Neurotrauma* 29:1077–1083
52. Liang W, Xiaofeng Y, Weiguo L, Gang S, Xuesheng Z, Fei C, Gu L (2007) Cranioplasty of Large Cranial Defect at an Early Stage After Decompressive Craniectomy Performed for Severe Head Trauma. *J Craniofac Surg* 18:526–532
53. Lin AY, Kinsella CRJ, Rottgers SA, Smith DM, Grunwaldt LJ, Cooper GM, Losee JE (2012) Custom Porous Polyethylene Implants for Large-scale Pediatric Skull Reconstruction: Early Outcomes. *J Craniofac Surg* 23:67–70
54. Lindner D, Schlothofer-Schumann K, Kern B-C, Marx O, Müns A, Meixensberger J (2017) Cranioplasty using custom-made hydroxyapatite versus titanium: a randomized clinical trial. *J Neurosurg* 126:175–183
55. MacCurdy GG (1923) Human skeletal remains from the highlands of Peru. *Am J Phys Anthropol* 6:217–329
56. Mah JK, Kass RA (2016) The impact of cranioplasty on cerebral blood flow and its correlation with clinical outcome in patients underwent decompressive craniectomy. *Asian J Neurosurg* 11:15–21
57. Malcolm JG, Rindler RS, Chu JK, Grossberg JA, Pradilla G, Ahmad FU (2016) Complications following cranioplasty and relationship to timing: A systematic review and meta-analysis. *J Clin Neurosci* 33:39–51
58. Malliti M, Page P, Gury C, Chomette E, Nataf F, Roux F-X (2004) Comparison of deep wound infection rates using a synthetic dural substitute (neuro-patch) or pericranium graft for dural closure: a clinical review of 1 year. *Neurosurgery* 54:599–603; discussion 603-604

59. Matsuno A, Tanaka H, Iwamuro H, Takanashi S, Miyawaki S, Nakashima M, Nakaguchi H, Nagashima T (2006) Analyses of the factors influencing bone graft infection after delayed cranioplasty. *Acta Neurochir (Wien)* 148:535–40; discussion 540
60. Mukherjee S, Thakur B, Haq I, Hettige S, Martin AJ (2014) Complications of titanium cranioplasty—a retrospective analysis of 174 patients. *Acta Neurochir (Wien)* 156:989–998
61. Munroe AR (1924) The Operation of Cartilage-Cranioplasty. *Can Med Assoc J* 14:47–49
62. N A, G P, A C, A V, G L (2016) Cranioplasty in neurosurgery: is there a way to reduce complications? *J Neurosurg Sci* 64:1–15
63. Pérez-Bovet J, Garcia-Armengol R, Buxó-Pujolràs M, Lorite-Díaz N, Narváez-Martínez Y, Caro-Cardera JL, Rimbau-Muñoz J, Joly-Torta MC, Castellví-Joan M, Martín-Ferrer S (2012) Decompressive craniectomy for encephalitis with brain herniation: case report and review of the literature. *Acta Neurochir (Wien)* 154:1717–1724
64. Piedra MP, Ragel BT, Dogan A, Coppa ND, Delashaw JB (2013) Timing of cranioplasty after decompressive craniectomy for ischemic or hemorrhagic stroke: Clinical article. *J Neurosurg* 118:109–114
65. Polin RS, Shaffrey ME, Bogaev CA, Tisdale N, Germanson T, Bocchicchio B, Jane JA (1997) Decompressive Bifrontal Craniectomy in the Treatment of Severe Refractory Posttraumatic Cerebral Edema. *Neurosurgery* 41:84–94
66. Pschyrembel W (2020) *Pschyrembel Klinisches Wörterbuch*. 268. Auflage edition. De Gruyter
67. Quah BL, Low HL, Wilson MH, Bimpis A, Nga VDW, Lwin S, Zainuddin NH, Wahab NA, Salek MAA (2016) Is There An Optimal Time for Performing Cranioplasties? Results from a Prospective Multinational Study. *World Neurosurg* 94:13–17
68. Quinn TM, Taylor JJ, Magarik JA, Vought E, Kindy MS, Ellegala DB (2011) Decompressive craniectomy: technical note. *Acta Neurol Scand* 123:239–244
69. Rashidi A, Sandalcioglu IE, Luchtman M (2020) Aseptic bone-flap resorption after cranioplasty - incidence and risk factors. *PLOS ONE* 15:e0228009
70. Reddy S, Khalifian S, Flores J, Bellamy J, Manson P, Rodriguez E, Dorafshar A (2014) Clinical Outcomes in Cranioplasty: Risk Factors and Choice of Reconstructive Material. *Plast Reconstr Surg* 133:864–873
71. Rifkinson-Mann S (1988) Cranial Surgery in Ancient Peru. *Neurosurgery* 23:411–416
72. Riordan MA, Simpson VM, Hall WA (2016) Analysis of Factors Contributing to Infections After Cranioplasty: A Single-Institution Retrospective Chart Review. *World Neurosurg* 87:207–213

73. Sahuquillo J, Arıkan F (2006) Decompressive craniectomy for the treatment of refractory high intracranial pressure in traumatic brain injury. *Cochrane Database Syst Rev* CD003983
74. Sanan A, Haines SJ (1997) Repairing holes in the head: a history of cranioplasty. *Neurosurgery* 40:588–603
75. Schuss P, Vatter H, Marquardt G, Imöhl L, Ulrich CT, Seifert V, Güresir E (2011) Cranioplasty after Decompressive Craniectomy: The Effect of Timing on Postoperative Complications. *J Neurotrauma* 29:1090–1095
76. Schuss P, Vatter H, Marquardt G, Imöhl L, Ulrich CT, Seifert V, Güresir E (2012) Cranioplasty after Decompressive Craniectomy: The Effect of Timing on Postoperative Complications. Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USAURL: <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/neu.2011.2176>
77. Schuss P, Vatter H, Oszvald Á, Marquardt G, Imöhl L, Seifert V, Güresir E (2012) Bone Flap Resorption: Risk Factors for the Development of a Long-Term Complication following Cranioplasty after Decompressive Craniectomy. *J Neurotrauma* 30:91–95
78. Schwab S, Steiner T, Aschoff A, Schwarz S, Steiner HH, Jansen O, Hacke W (1998) Early hemicraniectomy in patients with complete middle cerebral artery infarction. *Stroke* 29:1888–1893
79. Schwarz F, Dünisch P, Walter J, Sakr Y, Kalff R, Ewald C (2016) Cranioplasty after decompressive craniectomy: is there a rationale for an initial artificial bone-substitute implant? A single-center experience after 631 procedures. *J Neurosurg* 124:710–715
80. Shah AM, Jung H, Skirboll S (2014) Materials used in cranioplasty: a history and analysis. *Neurosurg Focus* 36:E19
81. Stock AL, Collins HP, Davidson TM (1980) Anatomy of the superficial temporal artery. *Head Neck Surg* 2:466–469
82. Sundseth J, Sundseth A, Berg-Johnsen J, Sorteberg W, Lindegaard K-F (2014) Cranioplasty with autologous cryopreserved bone after decompressive craniectomy. Complications and risk factors for developing surgical site infection. *Acta Neurochir (Wien)* 156:805–811
83. Tagliaferri F, Zani G, Iaccarino C, Ferro S, Ridolfi L, Basaglia N, Hutchinson P, Servadei F (2012) Decompressive craniectomies, facts and fiction: a retrospective analysis of 526 cases. *Acta Neurochir (Wien)* 154:919–926
84. Thavarajah D, Lacy P, Hussien A, Sugar A (2012) The minimum time for cranioplasty insertion from craniectomy is six months to reduce risk of infection-- a case series of 82 patients. *Br J Neurosurg* 26:78–80
85. Tsang AC-O, Hui VK-H, Lui W-M, Leung GK-K (2015) Complications of post-craniectomy cranioplasty: Risk factor analysis and implications for treatment planning. *J Clin Neurosci* 22:834–837

86. Vakis A, Koutentakis D, Karabetsos D, Kalostos G (2006) Use of polytetrafluoroethylene dural substitute as adhesion preventive material during craniectomies. *Clin Neurol Neurosurg* 108:798–802
87. Von Walter PH (1821) Wiedereinheilung der bei der trapanation ausgebohrten knochenscheibe. *J Chir Augen-Heilkd* 2:571
88. Wachter D, Reineke K, Behm T, Rohde V (2013) Cranioplasty after decompressive hemicraniectomy: Underestimated surgery-associated complications? *Clin Neurol Neurosurg* 115:1293–1297
89. Wagner S, Schnippering H, Aschoff A, Koziol JA, Schwab S, Steiner T (2001) Suboptimum hemicraniectomy as a cause of additional cerebral lesions in patients with malignant infarction of the middle cerebral artery. *J Neurosurg* 94:693–696
90. Waziri A, Fusco D, Mayer SA, McKhann GM, Connolly ES (2007) POSTOPERATIVE HYDROCEPHALUS IN PATIENTS UNDERGOING DECOMPRESSIVE HEMICRANIECTOMY FOR ISCHEMIC OR HEMORRHAGIC STROKE. *Neurosurgery* 61:489–494
91. Yadla S, Campbell PG, Chitale R, Maltenfort MG, Jabbour P, Sharan AD (2011) Effect of Early Surgery, Material, and Method of Flap Preservation on Cranioplasty Infections: A Systematic Review. *Neurosurgery* 68:1124–1130



## 8. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen danken, die mich bei der Anfertigung meiner Doktorarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Joachim Oertel, der mir den Zugang zu den klinischen Daten ermöglichte und konkrete Kritik äußerte.

Dr. David Breuskin danke ich für die hervorragende Betreuung und dafür, dass er ein steter Ansprechpartner bei der Durchführung sowie Umsetzung der gesamten Arbeit war.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Frau sowie meiner Mutter von ganzem Herzen bedanken, die mich im Rahmen meines Studiums mit Rat, Anregungen, lieben Worten begleitet und bei zahlreichen Rückschlägen häufig genug aufgebaut haben.

Ein ausdrücklicher Dank geht auch an meinen Bruder sowie Freunde, die nichts mit der Arbeit zu tun hatten, mich aber freundlicherweise immer nach dem Stand der Dinge gefragt haben oder mich vorab schon immer „Herr Doktor“ genannt haben.

Auch so habt ihr dazu beigetragen, dass ich im fernen Homburg immer weiter gemacht habe und nun schlussendlich sowohl das Studium als auch die Doktorarbeit als abgeschlossen ansehen kann.

## **9. Lebenslauf**

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der Dissertation nicht veröffentlicht.

Tag der Promotion: 30.11.2023

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Michael D. Menger

Berichterstatter: Prof. Dr. Joachim Oertel  
Prof. Dr. Tim Pohlemann