

**Aus dem Universitätsklinikum Münster
Poliklinik für Kieferorthopädie
- Direktorin: Univ. Prof. Dr. med. dent. Ulrike Ehmer -**

**Zur kiefergelenkfunktionsabhängigen Knochendicke
zwischen Fossa mandibularis des Os temporale und
der Fossa cranii media**

Inaugural – Dissertation

zur

Erlangung des doctor medicinae dentium

der Medizinischen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von

Arndt, Christian Jochen

aus Dortmund

2008

**Gedruckt mit der Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster**

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Volker Arolt

1. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. med. dent. Thomas Stamm

2. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. H.-P. Wiesmann

Tag der mündlichen Prüfung: 26.09.2008

Aus dem Universitätsklinikum Münster
Poliklinik für Kieferorthopädie
- Direktorin: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Ulrike Ehmer -

Referent: Priv.-Doz. Dr. med. dent. Thomas Stamm

Koreferent: Priv.-Doz. Dr. H.-P. Wiesmann

ZUSAMMENFASSUNG

Zur kiefergelenkfunktionsabhängigen Knochendicke zwischen Fossa mandibularis des Os temporale und der Fossa cranii media

Arndt, Christian

Das Kiefergelenk (Articulatio temporomandibularis) nimmt aufgrund seiner speziellen Morphologie eine besondere Stellung unter den Gelenken ein. Für alle Disziplinen der Zahnheilkunde ist es von großem Interesse, wie sich das Gelenk auf funktionelle Einflüsse hin verhält. Stellvertretend für die Adaptationsvorgänge des Gelenkes wird die Knochendicke zwischen Fossa mandibularis und der Fossa cranii media vermessen und auf Abhängigkeiten überprüft. Anhand der frei zugänglichen Bildbearbeitungssoftware ImageJ wurde eine Methode entwickelt, mit der sich das Dach der Fossa mandibularis an seiner dünnsten Stelle (roofthickness) anhand von Computertomographie-Datensätzen lokalisieren und vermessen lässt. Regeln wurden aufgestellt um ein konstantes Verfahren zu ermöglichen. Das Patientenkollektiv enthielt 219 männliche und 232 weibliche Gelenke. Diese wurden je nach Befund in drei Gruppen eingeteilt. 49 Gelenke zeigten resorptive Veränderungen und wurden der Gruppe „resorption“ zugeteilt. Sklerosierungen traten bei 20 Gelenken auf. Sie bildeten die Befundgruppe „sclerosis“. Den beiden genannten Gruppen wurde die Kontrollgruppe „control“ mit 382 Gelenken gegenübergestellt. Sie zeigten keinerlei pathologische Kiefergelenksveränderungen. Die Reliabilität der Z-Project Methode wurde durch einen Intra- und Interobserver anhand von 20 zufällig ausgewählten Gelenken überprüft. Die intraindividuelle Reproduktion betrug 93,7%, die interindividuelle Reproduktion 91,6%. Zur roofthickness konnte eine signifikante Abhängigkeit von der Gelenkseite herausgestellt werden. Abhängigkeiten zwischen dem Alter, dem Geschlecht und den Befundgruppen konnten nicht nachgewiesen werden. Die durchschnittliche roofthickness der Studie beträgt $3,2 \text{ mm} \pm 1,5$. Das Werteintervall erstreckt sich von 0 mm bis 8,5 mm. Zusätzlich wurden Gelenke mit Lufteinschlüssen innerhalb des Daches der Fossa mandibularis, über deren Ätiologie in verschiedenen Arbeiten spekuliert wird, in vier Gruppen „none“, „poor“, „moderate“, und „considerable“ nach dem Ausmaß ihrer Pneumatisierungen eingeteilt.

Aus den ausgewerteten Daten lassen sich nachstehende Schlussfolgerungen ziehen: Die Z-Project Methode hat sich als ein sehr reliables Verfahren zur Ermittlung der roofthickness bewährt. Eine Ermittlung absoluter Werte ist mit dieser Methode jedoch nicht möglich. Sie müssen zunächst relativ interpretiert und dann in Verbindung mit der Literatur ausgewertet werden. Zur roofthickness in Verbindung mit dem Alter, dem Geschlecht und der Befundgruppen konnten die Ergebnisse vorausgegangener Studien untermauert werden. Neue Erkenntnisse ergaben sich zur Abhängigkeit der roofthickness von der Gelenkseite. Zudem konnte tendenziell gezeigt werden, dass das Kiefergelenk auf funktionelle Einflüsse mit der Bildung von pneumatisiertem Knochen reagiert.

Tag der mündlichen Prüfung: 26.09.2008

Für meine Familie.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1 Kiefergelenk | 1 |
| 1.1.1 Morphologie und Topographie des Kiefergelenkes | 1 |
| 1.1.2 Mechanik des Kiefergelenkes | 3 |
| 1.1.3 Anpassungsvorgänge im Kiefergelenk | 6 |
| 1.1.3.1 Wachstumsverhalten des Kondylus | 6 |
| 1.1.3.2 Ursachen des Wachstumsverhaltens | 9 |
| 1.2 Computertomographie | 12 |
| 1.3 Das Dach der Fossa mandibularis | 15 |
| 1.3.1 Die Dicke des Fossadaches | 16 |
| 1.3.1.1 Methoden zur Vermessung des Fossadaches | 17 |
| 1.3.2 Lufteinschlüsse im Fossadach | 18 |
| 1.4 Ziel der Studie | 21 |
| 2. Material und Methode | 23 |
| 2.1 Datenerhebung und Auswertung | 23 |
| 2.2 Patientengut | 24 |
| 2.2.1 Patienteneinteilung | 25 |
| 2.2.1.1 Kontrollgruppe | 26 |
| 2.2.1.2 Resorptionen | 27 |
| 2.2.1.3 Sklerosierungen | 28 |
| 2.3 Ermittlung der dünnsten Knochenstärke des Fossadaches | 29 |
| 2.3.1 Durchführungsprotokoll | 30 |
| 2.3.1.1 Z-Project-Methode | 30 |
| 2.3.1.2 Regeln zur Z-Project-Methode | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.2 Manuelle Methode | 45 |
| 2.4 Evaluierung von Lufteinschlüssen im Fossadach | 48 |
| 2.5 Reproduktion der Z-Project-Methode | 51 |
| 2.6 Statistik | 51 |
| 3. Ergebnisse | 54 |
| 3.1 Häufigkeiten des Patientenguts | 54 |
| 3.2 Roofthickness in der Kontrollgruppe | 55 |
| 3.2.1 Geschlecht | 55 |
| 3.2.2 Alter | 56 |
| 3.2.3 Gelenkseite | 58 |
| 3.3 Roofthickness der Befundgruppen | 59 |
| 3.4 Quantitäten der Lufteinschlüsse im Dach der Fossa | 60 |
| 3.5 Reproduktion der Z-Project-Methode | 62 |
| 4. Diskussion | 64 |
| 4.1 Evaluation der Z-Project-Methode | 64 |
| 4.2 Mittelwerte der roofthickness (Kontrollgruppe) | 65 |
| 4.3 Abhängigkeiten der roofthickness | 69 |
| 4.3.1 Alter und Geschlecht (Kontrollgruppe) | 69 |
| 4.3.2 Gelenkseite (Kontrollgruppe) | 69 |
| 4.3.3 Resorptionen und Sklerosierungen | 70 |
| 4.4 Vorkommen von Lufteinschlüssen | 72 |
| 4.5 Schlussfolgerung | 72 |
| 5. Zusammenfassung | 74 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 6. Literaturverzeichnis | 76 |
| 7. Abbildungsverzeichnis | 82 |
| 8. Tabellenverzeichnis | 87 |
| 9. Anhang | 88 |
| 9.1 Danksagung | 88 |
| 9.2 Lebenslauf | 89 |

1. Einleitung

1.1 Kiefergelenk

1.1.1 Morphologie und Topographie des Kiefergelenkes

Das Kiefergelenk (*Articulatio temporomandibularis*) ist die gelenkige Verbindung des Unterkiefers mit der Schädelbasis. Auf dieses Gelenk wirken zwischen 50-80 kp ein. Es ist daher das Gelenk, das im menschlichen Körper der größten Belastung ausgesetzt ist. Die Gelenkflächen, die *Facies articularis*, werden gebildet aus dem walzenartigen Gelenkskopf, dem *Caput mandibulae*, der sich am Ende des *Processus condylaris* befindet, der *Fossa mandibularis* des *pars squamosa* (*Os temporale*) und dem, nach ventral liegenden, im Querschnitt dornartigen *Tuberculum articulare*. Die gesamte *Facies articularis* ist mit faserigem Knorpel überzogen. Die beiden Gelenkköpfe sind so angeordnet, dass sie in ihrer Verlängerung einen nach ventral, offenen Winkel von circa 150° ergeben. Im Sagittalschnitt, bildet die Gelenkfläche aus *Fossa mandibularis* und *Tuberculum articulare* eine S-förmige Gelenkbahn.

Das Kiefergelenk wird nach dorsal durch eine dünne Knochenlamelle des *Os tympanicum* vom äußeren Gehörgang (*Meatus acusticus externus*) separiert. In diesem Bereich verlaufen die *Arteria temporalis superficialis* sowie der *Nervus auriculotemporalis*, des *Nervus trigeminus* benachbart zum Kiefergelenk. Medial zieht sich die *Fissura petrotympanica* mit den *Chorda tympani* entlang. Nach cranial wird das Gelenk durch ein dünnes Knochendach von der mittleren Schädelgrube und somit vom Gehirn getrennt.

Die hohe Bewegungsfreiheit dieses Gelenks ist durch das unausgeglichene Größenverhältnis zwischen Gelenkspfanne und Gelenkskopf von circa drei zu

1. Einleitung

eins zu erklären. Die daraus entstehende Inkongruenz wird durch eine gelartige Struktur, dem Diskus articularis ausgeglichen. Er teilt den Gelenkraum somit in einen oberen und in einen unteren Gelenkspalt auf. Der ovoid gestaltete Diskus besteht zu seinem Großteil aus straffem Bindegewebe und enthält keinerlei Gefäße. Im Bereich der Randzonen findet man zudem Knorpelanteile, im Besonderen dort, wo er dem Kondylus in Ruhelage direkt aufliegt.

Dorsal liegt dem Diskus die bilaminäre Zone an. Sie besteht aus lockerem, gefäß- und nervenreichem Bindegewebe. Unter anderem beschränkt sie die obere sowie die untere Gelenkkammer und wird als hinterer Teil der unten erwähnten Kapsel gesehen.

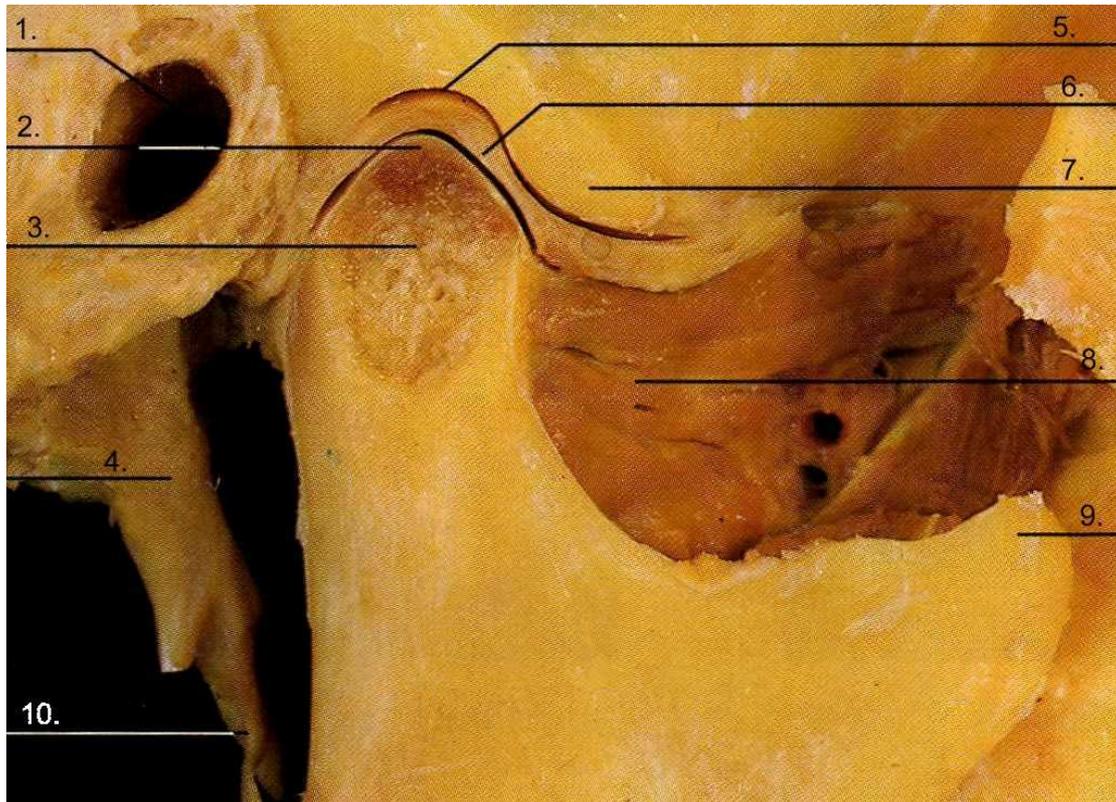


Abbildung 1.1: Sagittalschnitt durch ein präpariertes Kiefergelenk [40]

(1. Meatus acusticus externus; 2. Cartilago articularis proc. Condylaris; 3. Proc. Condylaris mandibulae; 4. Proc. Styloideus; 5. Fossa mandibularis; 6. Discus articularis; 7. Tuberculum articulare; 8. Os zygomaticum; 9. Proc. Coronoideus; 10. Lig. Stylomandibulare).

Das Gelenk wird von einer sehr lockeren trichterförmigen Kapsel umgeben, die dem Kondylus seine hohe Beweglichkeit bewahrt. Sie zieht vom Rand der Fossa mandibularis nach kaudal bis zum Unterkieferhals. Nach ventral umgibt sie das Tuberculum articulare. Des Weiteren setzt sie am Diskus an und teilt somit zusammen mit ihm die diskotemporale von der diskomandibulären Kammer ab. In diesen Kammern befindet sich Gelenkflüssigkeit, die Synovia. Sie wird vom Stratum synoviale der Kapsel produziert und dient der Vitalerhaltung der Gelenkstrukturen. Weiter verstärkt wird das Kiefergelenk durch das Ligamentum laterale, das Lig. sphenoidale und das Lig. stylomandibulare. Arteriell wird das Kiefergelenk durch die A. auricularis profunda versorgt. Sie entspringt aus der A. maxillaris. Das venöse Blut wird über die V. articulares in die V. retromandibularis abgeleitet. Das Kiefergelenk ist außerordentlich gut innerviert. Sensible Nervenäste entspringen den N. auriculotemporalis, dem N. massetericus, den N. temporalis profundus posterior und dem N. facialis [43, 47, 55].

1.1.2 Mechanik des Kiefergelenkes

Wie bereits erwähnt, teilt der Diskus den Gelenkraum in ein oberes, diskotemporales und ein unteres, diskomandibuläres Gelenk auf. Dem Unterkiefer werden durch das obere Gelenk Gleitbewegungen und durch das untere Gelenk Scharnierbewegungen erlaubt.

Es ergeben sich insgesamt drei Bewegungsmöglichkeiten:

1. Öffnungs- und Schließbewegungen (Abduktion und Adduktion)
2. Vor- und Zurückschieben (Protrusion und Retrusion)
3. Seitwärtsbewegungen (Medio- und Laterotrusion)

Für die Abduktionsbewegungen sind der Musculus pterygoideus lateralis und die Mundbodenmuskulatur bei festgestelltem Zungenbein relevant. Die

1. Einleitung

Adduktion wird durch den M. masseter, den M. temporalis und den M. pterygoideus medialis bewirkt. Soll der Unterkiefer protrudiert werden, kontrahieren die Muskelfasern des M. ptyerigoideus lateralis sowie unterstützend die oberflächlichen Anteile des M. masseter und des M. ptyerigoideus medialis. Kontrahiert der M. ptyerigoideus lateralis einseitig, weicht der Unterkiefer zur Gegenseite ab. Retrudiert wird der Unterkiefer durch die Kontraktion der hinteren Anteile des M. temporalis und durch die Kontraktion der Mundbodenmuskulatur.

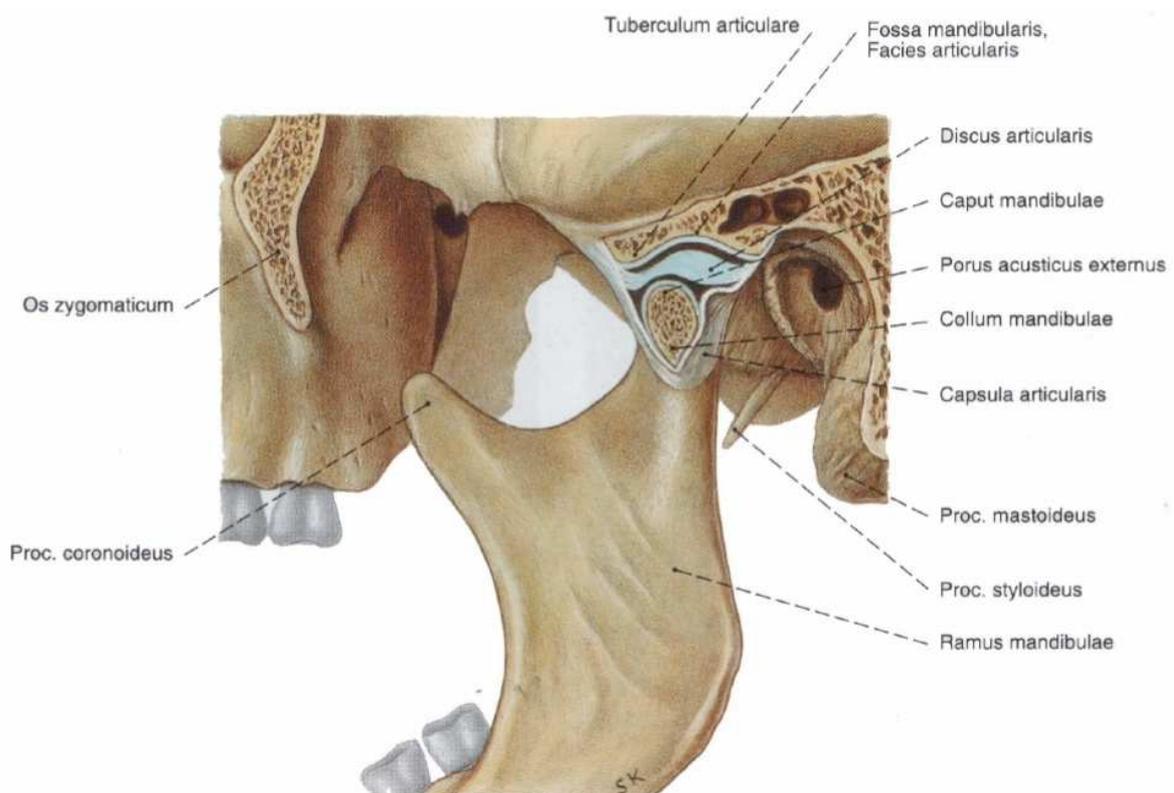


Abbildung 1.2: Sagittalschnitt durch ein geöffnetes Kiefergelenk [47].

Die Öffnungsbewegung des Unterkiefers erfolgt initial durch eine reine Scharnierbewegung. Ab einer Schneidekantendistanz von durchschnittlich 15mm kommt zu der Rotationsbewegung um die Kondylenachse eine Protrusionsbewegung hinzu. Diese Bewegungen werden ohne Artikulation ausgeführt, wohingegen bei Protrusions-, Retrusions- und Seitwärtsbewegungen die Zahnreihen die Unterkieferbewegungen führen. Das Kiefergelenk gilt als ein multifaktorielles System. Dabei sind die Anatomie der Gelenk-

1. Einleitung

flächen, die Gebissituation, und die Kaumusculatur von größter Bedeutung. Liegt eine Störung innerhalb dieser Teilbereiche vor, so kann es zu Funktionsstörungen des gesamten Kauorgans kommen [43, 44, 55].

1.1.3 Anpassungsvorgänge im Kiefergelenk

Die postnatale Entwicklung des Unterkiefers ist in der Regel mit dem 20. Lebensjahr abgeschlossen. Dabei stoppt das transversale Wachstum des Kiefers zuerst im Alter von 10-12 Jahren, gefolgt vom sagittalen Wachstum mit 12-14 Jahren. Das vertikale Wachstum kann in Ausnahmefällen sogar das 20. Lebensjahr überschreiten. Das Kiefergelenk unterliegt jedoch auch nach dem Abschluss des Unterkieferwachstums, durch eine Vielzahl von funktionellen, parafunktionellen oder auch traumatischen Faktoren zahlreichen Adaptationsvorgängen. Diese Adaptationsvorgänge können sich zum Beispiel in ihrer progressiven Form (modeling) durch Neubildung von Bindegewebe oder kompensatorisch durch eine muskuläre Reaktion äußern. Sind die Einflüsse auf das Kiefergelenk zu stark oder ist die Adaptationsfähigkeit herabgesetzt, kommt es zu regressiven Adaptationen (remodeling) oder Dekompensationen. Diese äußern sich meist in Form von Destruktionen und Schmerz. Generell ist zu sagen, dass mit dem Alter die Adaptationsfähigkeit des Kiefergelenkes abnimmt, und dass Adaptationsvorgänge nach Wachstumsabschluss vorwiegend regressiv sind.

Speziell im Hinblick auf Stellungsanomalien von Zähnen bzw. fehlende Zähne und Kieferdysgnathien wurden reaktive Umbauvorgänge im Bereich des Kiefergelenks dokumentiert [16, 32, 43, 55].

1.1.3.1 Wachstumsverhalten des Kondylus

Im Rahmen von kieferorthopädischen Therapien beschäftigt sich die Wissenschaft unter anderem mit dem Wachstum der Fossa mandibularis und dem in ihr liegenden Kondylus.

Es wurde in mehreren unabhängigen Studien an Menschen und Tieren versucht, das Wachstumsverhalten des Kiefergelenks durch die Therapie mit

kieferorthopädischen Geräten (Herbst und Twin-Block) zu beeinflussen. Diese Geräte werden in der Praxis dazu verwendet, eine mandibuläre Retrognathie durch gezielte Wachstumsstimulation zu korrigieren.

Verschiedene Studien zu diesem Thema besagen, dass sich die Wachstumsrichtung des Kondylus bei Patienten, die kein Herbstscharnier tragen, hauptsächlich nach superior und marginal nach posterior richtet. Patienten, die in Studien ein Herbstscharnier getragen haben, zeigten ein generell erhöhtes Kondyluswachstum, wobei sich das Wachstum vor allem nach posterior orientierte [37, 42]. Im Anschluss an die Therapie konnte dieses Wachstumsverhalten nur noch in abgeschwächter Form beobachtet werden [42, 53]. Statistisch gesehen, kommt demnach das durch das Herbstscharnier geförderte Kondyluswachstum ein dreiviertel Jahr nach Therapieabschluss zum Stillstand und nimmt wieder die prätherapeutische Richtung und das prätherapeutische Ausmaß an [6, 35, 36, 37].

Nach Meinung der Autoren lässt sich daraus schließen, dass das Kondyluswachstum nur temporär durch die kieferorthopädische Behandlung mit einem Herbstscharnier oder Twin-Block in eine superiore und posteriore Richtung stimuliert werden kann. Folglich wird der Effekt dieser kieferorthopädischen Geräte für Langzeittherapien durch die Autoren in Frage gestellt. [42, 53, 37, 6, 18].

In weiterführenden Studien wird angeführt, dass das kondyläre Wachstumspotential vom Alter abhängig ist [9, 28, 53, 57]. Auf der einen Seite konnte nachgewiesen werden, dass das Wachstum bei erwachsenen Versuchstieren ein deutlich geringeres Ausmaß annimmt als vergleichsweise das der heranwachsenden Tiere [17, 30]. Andere Studien bestätigen dies nicht. Sie besagen, dass die Behandlung mit einem Herbstscharnier durchaus noch nach abgeschlossenem Wachstum effizient ist [12, 31, 40].

1. Einleitung

Über den Aufbau des Kondylus (Abb. 1.3) kann man das Kondyluswachstum veranschaulichen. Die Artikulationsfläche des Kondylus ist mit einem gering durchbluteten, zellreichen Bindegewebe überzogen. Direkt darunter findet man die Proliferationszone, bestehend aus praechondroblastischen Zellen die sich nach und nach zu Chondroblasten differenzieren. Diese Zone ist für die Ernährung und die Bildung des Knorpels von großer Bedeutung. Es folgt die Schicht des heranreifenden Knorpels. Sie besteht aus ungeordneten Chondroblasten und hypertrophierten Zellen, deren Matrix zunehmend kalzifiziert. Eine Schicht tiefer wird die enchondrale Ossifikation vollendet. Knorpelige Bestandteile werden resorbiert und durch knöcherne ersetzt.

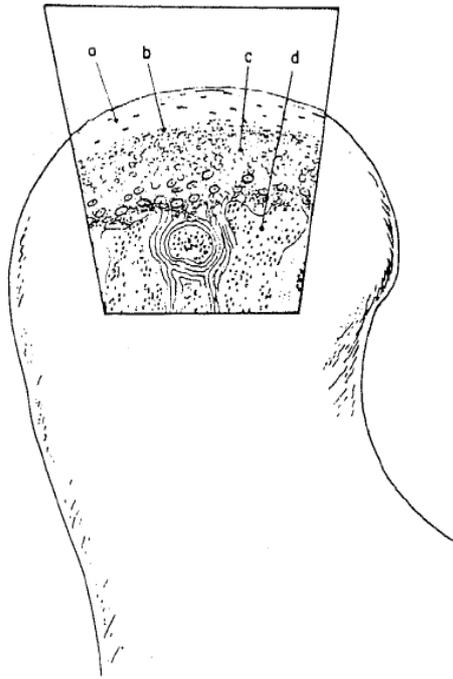


Abbildung 1.3: Skizze des histologischen Aufbaus eines Kondylus. a=Artikulationsfläche aus zellreichem Bindegewebe; b=Schicht mit praechondroblastischen Zellen; c=Schicht des reifenden Knorpels; d=endochondraler Knochen [10].

1.1.3.2 Ursachen des Wachstumsverhaltens

Die Ursachen des kondylären Wachstumsverhaltens werden mit unterschiedlichen Erklärungen diskutiert. VOUDOURIS betrachtet in seiner Veröffentlichung verschiedene Hypothesen. Er untersucht, wie es unter kieferorthopädischer Therapie mit einem Herbst- oder Twin-Block zu Modifikationen im Bereich des Kiefergelenks kommt [52].

MASSLER behauptet im Jahre 1944 originär, dass das Kondyluswachstum strengen genetischen Faktoren unterliegt und mit dem Wachstum einer Epiphyse zu vergleichen ist [52]. Das hieße aber auch, dass Modifikationen nach Wachstumsabschluss nicht mehr möglich seien und somit die Effizienz kieferorthopädischer Behandlung zu diesem Zeitpunkt in Frage gestellt würde. MCNAMARA und BRYAN verwerfen in ihrer Arbeit diese Hypothese [29].

Eine zweite Hypothese, die vor allem von PETROVIC [39] und MCNAMARA [28] vorangetrieben wurde, orientiert sich an der Kaumuskulatur. Die Kaumuskulatur, die mit der Gelenkregion verbunden ist, soll demnach das Kondyluswachstum beeinflussen. Die Autoren diskutieren mehrfach eine Hyperaktivität des *Musculus pterygoideus lateralis* [34, 45, 46, 49, 56].

In den fünfziger Jahren vermutete REES, dass verschiedene Kaumuskeln direkte Ansätze am Kondylenkopf und am Diskus haben und somit direkt auf den Kondylus einwirken können. Seine Vermutungen konnten jedoch durch Autopsiematerial nicht verifiziert werden. Man wies lediglich Verbindungen zur vorderen Kapsel und zum Diskus nach [52].

Andere Untersuchungen ergaben konträr, dass das kondyläre Wachstum nicht mit einer gesteigerten, sondern mit einer verringerten Kaumuskulaturaktivität korreliert [24, 46, 56]. Auch WHETTEN konnte in seiner Arbeit keinen signifikanten Wachstumsunterschied des Kondylus zwischen Gelenken mit resizier-

tem Musculus pterygoideus lateralis und den Gelenken der Kontrollgruppe nachweisen [56].

Die „functional matrix theory“, macht das umliegende Weichgewebe und nicht den Knochen selber für sein Wachstum verantwortlich [52].

Demnach soll ein direkter Zusammenhang zwischen dem Wachstum des Weichgewebes und dem Wachstum des Kondylus existieren [7, 52]. Jedoch konnte auch auf Grundlage dieser Theorie nicht exakt erklärt werden, wie es zur Wachstumsstimulation des Kondylus kommt.

VOUDOURIS unterstützt die „growth relativity“ von ENDOW und HANS [10], die besagt, dass mandibuläres Wachstum durch eine Fusion aus funktionalen Faktoren, regionalen Kräften und extrakondylären Signalen gesteuert wird. Dadurch werden fingerartige Neuformationen von Knochen im Bereich der Fossa und des Kondylus initiiert, die in ihrer Richtung und in ihrem Ausmaß relativ zu der kieferorthopädischen Vorverlagerung des Kondylus stehen [52].

Für die Knochenapposition sind zusammengefaßt hauptsächlich drei Stimuli verantwortlich:

1. Die anteriore Verlagerung des Unterkiefers.
2. Die Dehnung des viskoelastischen Gewebes.
3. Die Transduktion der Kräfte über die Knorpelschicht in den Gelenkkopf.

Die anteriore Verlagerung des Kondylus verursacht daher direkt die knorpelige Auskleidung der Fossa und regt sie zur lokalen Kalzifizierung an. Das am Diskus und am Kondylus inserierende retrodiskale Gewebe wird durch die Verlagerung des Unterkiefers gedehnt, wobei diese Dehnung einen gesteigerten Nährstoffeinstrom in den Knochen und damit Neustrukturierungen des Knochens bewirkt werden [52].

1. Einleitung

Mikroskopische Untersuchungen zeigten direkte Verbindungen zwischen dem viskoelastischen Gewebe, dem Knorpelüberzug des Kondylus und dem Diskus, deren Kommunikation damit ermöglicht ist [52].

1.2 Computertomographie

Die Computertomographie generiert ein dreidimensionales Gebilde aus zweidimensionalen Schichtbildern, die aus verschiedenen Richtungen aufgenommen wurden. Sie bedient sich dabei der herkömmlichen Röntgenstrahlung, die im Jahre 1895 von Wilhelm Conrad Röntgen entwickelt und erstmals an der Hand seiner Frau angewendet wurde.

Die Entwicklung der Computertomographie ist auf die Physiker Allen M. Cormack und den Elektrotechniker Godfrey Hounsfield zurückzuführen, die diese Aufnahmetechnik im Jahre 1971 erstmals an einem Menschen erproben. Im Jahre 1979 wurden sie dafür mit dem Nobelpreis der Medizin ausgezeichnet.



Abbildung 1.4: Hounsfield neben einem Computertomographen der ersten Generation.



Abbildung 1.5: Moderner Computertomograph der Firma designafairs.

Das Verfahren der Computertomographie beruht auf der Messung von Strahlungsabsorptionen. Es wird eine Materie mit bekannter Intensität bestrahlt und am Ende des Strahlengangs registriert wie viel von der Ausgangsintensität noch vorhanden ist. Die Absorption steigt dabei proportional zur Dichte und Dicke der bestrahlten Materie. Aus der Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsintensität lässt sich ein Schwächungskoeffizient μ ermitteln, der computergesteuert logarithmiert, digitalisiert und durch die dazugehörigen Grauwerte dargestellt wird. Je mehr Strahlenenergie von dem bestrahlten Körper absorbiert und folglich weniger Energie nach Durchdringung registriert wird, desto heller wird der Körper auf dem CT-Bild wiedergegeben. Körper dagegen, die eine besonders geringe Dichte haben, werden durch dunkle Graustufen repräsentiert. Angegeben werden diese Graustufen in Hounsfield-Einheiten, die sich auf der Hounsfield-Skala wieder finden. Je nach CT-Hersteller werden diese Einheiten auf die einzelnen Gewebe justiert.

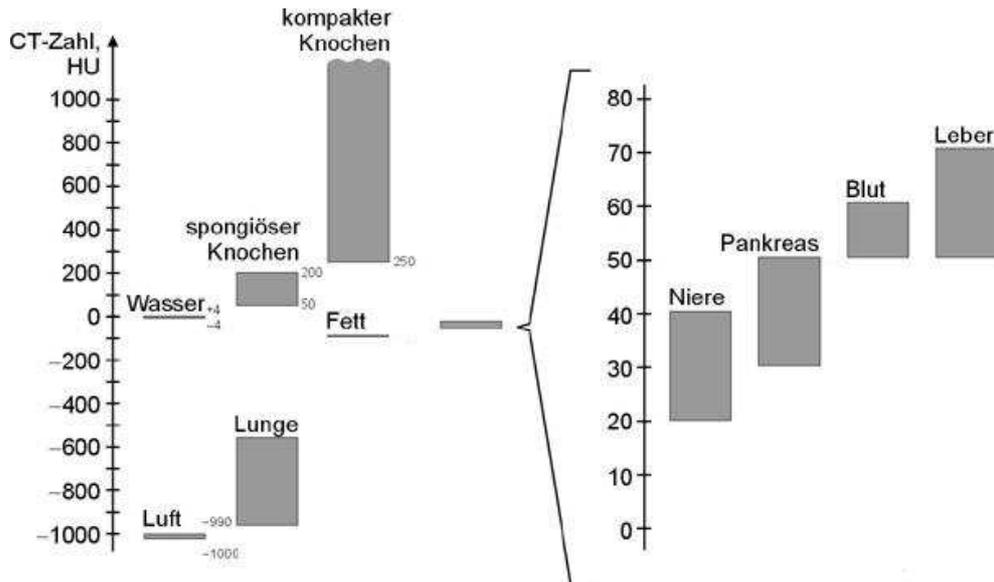


Abbildung 1.6: Diagramm zur Darstellung einzelner Gewebe und ihrer zugehörigen Hounsfield-Unit.

Am häufigsten ist die Skala so geeicht, dass reine Luft bei -1000 Hounsfield-Einheiten, Wasser bei null und kompaktes Knochengewebe bei mehr als 1000 Einheiten liegt. Nach unten ist die Skala bei -1024 begrenzt, nach oben hin ist sie offen. Die Hounsfield-Skala errechnet sich aus folgender Formel. Die CT-Zahl beschreibt dabei den Wert der Hounsfield-Unit (HU) des untersuchten Gewebes.

$$[CT - Zahl] (\mu_{\text{Gewebe}}) := \frac{\mu_{\text{Gewebe}} - \mu_{\text{Wasser}}}{\mu_{\text{Wasser}}} \cdot 1000$$

[5, 25, 26, 38]

1.3 Das Dach der Fossa mandibularis

Bis vor zehn Jahren wurde dem Dach der Fossa mandibularis eher selten Aufmerksamkeit geschenkt. Begegnungen hatte man mit dieser Struktur lediglich bei Luxationen des Kondylus in die mittlere Schädelgrube oder bei Rekonstruktionen von Kiefergelenken. Seit einiger Zeit ist man sich jedoch bewusst geworden, dass es für den Erfolg von kieferorthopädischen Therapien und chirurgischen Eingriffen im Bereich des Kiefergelenks unerlässlich ist, die Reaktionen der Fossa auf funktionelle Reize hin zu untersuchen. So werden bisher enge Zusammenhänge zwischen Diskusperforationen, Diskusverlagerungen, Osteoarthritis und Gelenkergüssen mit den Umbauvorgängen im Bereich des Fossadaches diskutiert [21, 27, 50].

BARRON beschäftigt sich in seinen Arbeiten über Dislokationen des Kondylus in die mittlere Schädelgrube und sucht nach Zusammenhängen mit dem Fossadach [1, 2]. Es ist bemerkenswert, dass Frauen doppelt so oft an dieser Form von Dislokation leiden, wie Männer.

Luft einschüsse innerhalb des Fossadaches bilden einen weiteren Ansatzpunkt für Forschungen. Sie werden auf Computertomographiebildern gehäuft beobachtet, wobei ihre Ätiologie bisher noch ungeklärt ist.

1.3.1 Die Dicke des Fossadaches

Bisher wurde nur in einer Arbeit die Dicke des Knochendaches in Abhängigkeit vom Alter und vom Geschlecht untersucht. Dazu wurden mit Hilfe eines digitalen Mikrometers die Fossadächer von 49 Verstorbenen an ihrer dünnsten Stelle vermessen. Das Patientengut verteilte sich nahezu gleichmäßig auf Männer und Frauen deren Alter zwischen 50 und 96 Jahren lag, wobei das Durchschnittsalter 73,8 Jahre betrug. Die aus der Studie gewonnenen Ergebnisse konnten keine Korrelation zwischen dem Geschlecht bzw. dem Alter mit der Fossadicke zeigen [20].

In weiteren Autopsiestudien konnte nachgewiesen werden, dass das Dach bei Gelenken mit Diskusperforationen und nach vollständiger Diskusentfernung [13] signifikant dicker ist, als das bei gesunden Gelenken [21]. Auch hierbei wurden die Messungen manuell mit einem Micrometer durchgeführt.

Die aktuellste Studie zu diesem Thema wurde mit Hilfe der Computertomographie durchgeführt. Diese Studie besagt, dass die Dickenzunahme neben oben genannten Faktoren auch von einem Gelenkerguss beeinflusst werden kann. Bei Patienten mit Ergüssen im Kiefergelenk wurden signifikant dickere Fossadächer gefunden, als bei Patienten ohne Gelenkergüssen [27]. Des Weiteren stützt diese Studie vorausgegangene, die besagten, dass Diskusdeformationen im Gegensatz zu Diskusperforationen nicht mit der Roofthickness korrelieren. Entgegen seiner im Jahre 2001 veröffentlichten Autopsiestudie [21] konnte HONDA in dieser CT Studie [27] keine signifikanten Veränderungen der Knochendicke zwischen osteoarthritischen Gelenken und nicht osteoarthritischen Gelenken finden.

1.3.1.1 Methoden zur Vermessung des Fossadaches

Das Knochendach der Fossa mandibularis wurde bisher mit unterschiedlichen Methoden vermessen. Jedoch wurde übereinstimmend die dünnste Stelle des Knochendaches für die Messungen präferiert. Dieser Bereich ist leicht zu reproduzieren und kann somit für den Vergleich zwischen Gelenken in unterschiedlichsten Studiengruppen verwendet werden.

Kazuya Honda von der Nihon University School of Dentistry hat sich bisher wohl am intensivsten mit der Vermessung des Knochendaches auseinandergesetzt.

HONDA benutzte im Jahre 2000 erstmals das „limited cone-beam X-ray CT 3DX multi-image mirco-CT“, um das Knochendach darzustellen und zu vermessen [19]. Mit Hilfe eines 360° Scans werden zweidimensionale Abbilder erstellt und unter 8bits auf einem elektronischen Datenträger abgespeichert. Die Schicht mit der dünnsten Knochenstelle wurde von einem Observer ausgewählt und durch ein 3DX-image Programm vermessen. Die Strahlenbelastung konnte bei diesem Verfahren gegenüber den konventionellen Computertomographen verringert werden. Um dieses Verfahren zu evaluieren, verglich HONDA die 3DX-Methode an 21 entnommenen Kiefergelenken mit der Messung über ein per Hand verwendetes digitales Micrometer.



Abbildung 1.7: Das von HONDA benutzte Micrometer zur Vermessung des Fossadaches [19].

Da keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Methoden nachzuweisen waren, erwies sich das 3DX-Verfahren als praktikabel. Weiterhin sind Studien bekannt, die sich der herkömmlichen Computertomographie bedienen [27, 50]. Hinzu kommen weitere Autopsiestudien, die mit Hilfe von Schieblehren die dünnste Stelle im Knochen aufgesucht und vermessen haben [19, 20, 21].

1.3.2 Lufteinschlüsse im Fossadach

Auf Computertomographiebildern stellen sich im Bereich des Daches der Fossa mandibularis häufig von Knochensubstanz abgeschlossene Lufträume dar. Einige Autoren vermuten, dass diese Hohlräume in einer Relation zum Kiefergelenk stehen [15]. Weshalb diese mit Luft gefüllten Hohlräume entstehen konnte bisher noch nicht eruiert werden. Manche vermuten, dass sie von Geburt an angelegt sind und durch Resorptionsvorgänge vergrößert werden [51].

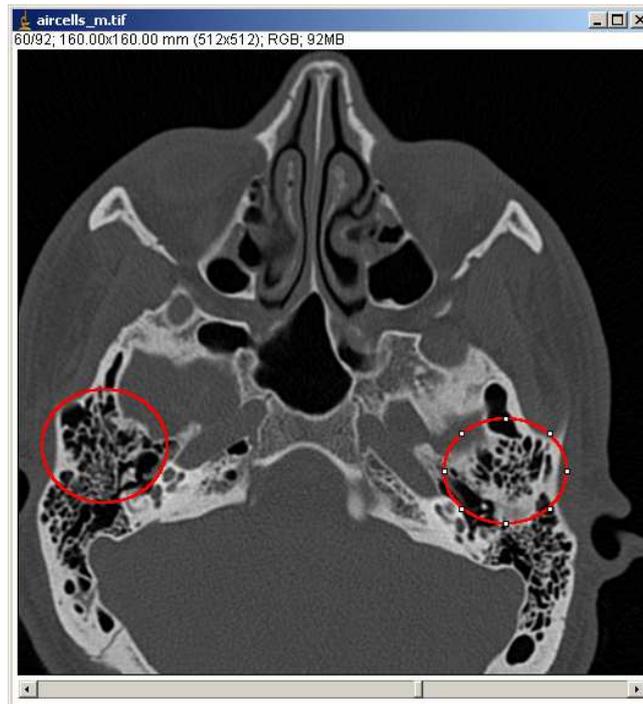


Abbildung 1.8: Transversaler Schnitt durch den Kopf eines Patienten mit Lufteingüssen auf Höhe des Daches der Fossa mandibularis.

Andere Überlegungen bringen eine Adaptationsreaktion der Fossa mit den Lufteingüssen in Verbindung. STAMM [48] beschreibt, dass sich die Dicke des Fossadaches an die Stellung des Kondylus adaptiert. Wird der Kondylus zum Beispiel durch eine kieferorthopädische Apparatur aus seiner Fossa gezogen, so soll das Dach der Fossa nachkommen und seine Dicke vergrößern. Dass Umbauvorgänge im Bereich der Fossa aufgrund von Kondylusverlagerungen stattfinden, wurde in Kapitel 1.3.1 bereits aufgezeigt. Im Rahmen dieser adaptiven Umbauvorgänge könnte es sein, dass bei überschießendem Wachstum keine homogene, solide Knochensubstanz, sondern vorerst aus Zeitersparnis nur ein Leitgerüst aus Knochen gebildet würde, in dem nichtknöcherne Areale eingebettet sind.

Die so genannten „Aircells“ werden als Ausbreitungswege pathogener Prozesse und als Prädilektionsstellen sowie Indiz für Schädelbasisbrüche diskutiert [3, 11, 15].

1. Einleitung

Differentialdiagnostisch sind diese Lufteinschlüsse nur schwer von Pseudozysten und Tumoren zu unterscheiden und bedürfen auch deswegen näherer Untersuchungen [15].

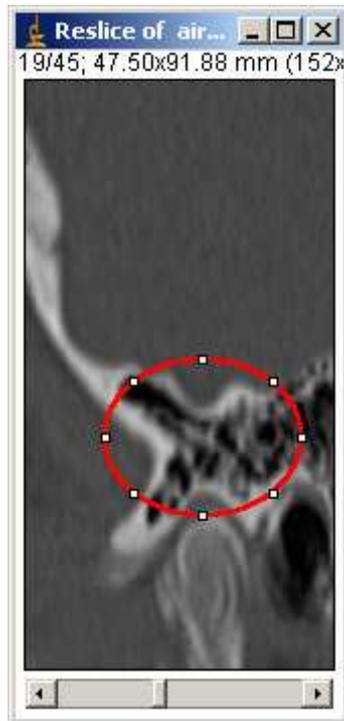


Abbildung 1.9: Sagittalschnitt durch ein Kiefergelenk mit Lufteinschlüssen im Dach der Fossa mandibularis.

1.4 Ziel der Studie

Wie oben beschrieben, scheint das Kiefergelenk starken funktionellen Umbauvorgängen zu unterliegen. Ebenso konnte schon in vereinzelt Studien gezeigt werden, dass sich auch die Dicke des Knochendaches der Fossa mandibularis auf gewisse Reize hin verändert. Die themenspezifische Literatur wird von HONDA dominiert. Er verwendete und bewertete mehrere unterschiedliche Methoden zum Auffinden und Vermessen der knöchernen Struktur, suchte aber auch nach Faktoren, die das Knochendach beeinflussen können.

Signifikant sicher ist, dass die Umbauvorgänge innerhalb des Kiefergelenkes bei der Therapie und der Diagnostik von Dysgnathien, sowie von Patienten mit craniomandibulären Dysfunktionen (CMD) und Traumata eine entscheidende Rolle spielen.

Die Intention der vorliegenden Arbeit ist es, weitere funktionelle Faktoren aufzufinden, die die Dicke des Daches der Fossa mandibularis beeinflussen und vorhandene Ergebnisse mit eigenen zu vergleichen. Folgende Fragen werden fokussiert:

1. Ist die Dicke des Fossadaches geschlechtsspezifisch?
2. Besteht ein Zusammenhang zwischen der Gelenkseite und der Dicke des Fossadaches?
3. Korreliert das Alter der Patienten mit der Dicke des Fossadaches?
4. Bestehen Abhängigkeiten zwischen Sklerosierungen bzw. Resorptionen des Kondylus und der Dicke des Fossadaches?
5. Stehen Pneumatisierungen innerhalb des Fossadaches im Zusammenhang mit der Adaptationsfähigkeit der Fossa?

1. Einleitung

Parallel dazu sollte anhand des Softwareprogramms „ImageJ“ eine frei zugängliche und leicht zu reproduzierende Methode entwickelt werden, mit der man die dünnste Stelle des Fossadaches aufsuchen und vermessen kann.

2. Material und Methode

2.1 Datenerhebung und Auswertung

Die Daten für die Studie wurden dem „PACS“ (Picture Archiving and Communication System) der Radiologischen Abteilung des Universitätsklinikum Münster entnommen. Anfertigt wurden die CT-Aufnahmen mit Hilfe von Spiraltomographen der Hersteller Philipps und Siemens. Die Tomographen arbeiteten dabei mit einer Spannung von 120 kV und einer Stromstärke von 170 mAs. Indem man in der PACS-Software den Filter auf „CT Angio“ bzw. „CT Head“ einstellt, kann man die für die Studie relevanten Aufnahmen direkt herausfiltern. Für die Datenauswahl war es wichtig, auf die Vollständigkeit des Schädels und auf eine ausgeglichene Altersstruktur zu achten.

Alle verwendeten Daten entsprechen dem DICOM-Standard (Digital Imaging and Communication in Medicin), der es ermöglicht, die Daten herstellerunabhängig auszuwerten und die Bilder mit zusätzlichen Informationen etwa über Patient und Aufnahmetechnik zu versehen. Die Schichtdicke der CT-Aufnahmen der Studie lag zwischen 1,0 mm und 1,3 mm. Ausgewählte Daten wurden für jeden Patienten auf eine eigene CD-ROM gebrannt und archiviert.

Die Software ImageJ 1.35s diente der Auswertung. ImageJ ist ein plattformunabhängiges Java-Programm, das gemeinfrei ist und kostenlos von der ImageJ-Homepage (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>) herunter geladen werden kann. Ebenso kann über diese Seite auf ein zahlreiches Angebot an frei zugänglichen Plugins zugegriffen werden, die die Anwendungsmöglichkeiten dieses Programms erweitern.

2.2 Patientengut

Die Altersverteilung der Patientengelenke ergibt sich aus dem Balkendiagramm (Abb. 2.1). Das durchschnittliche Alter beträgt 47 Jahre.

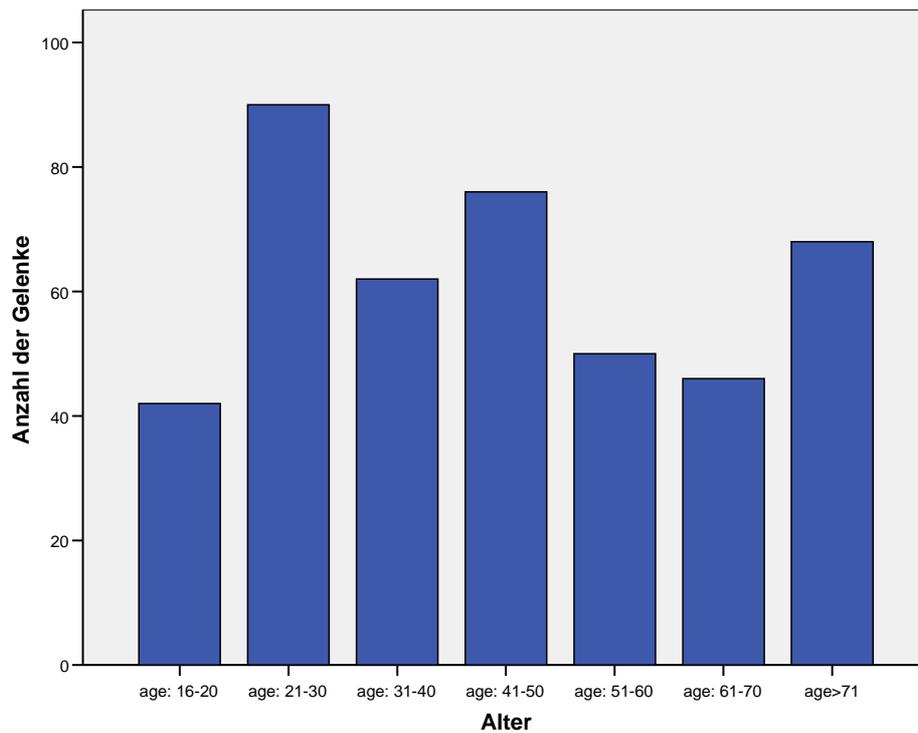


Abbildung 2.1: Das Balkendiagramm stellt die Altersverteilung aller untersuchten Gelenke grafisch dar.

2.2.1 Patienteneinteilung

Die Patienten wurden nach CT-Bild Befund und nach Akteneinträgen der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikum Münster in vier unterschiedliche Gruppen eingeteilt:

1. *jaws open (control group)*
2. *jaws closed (control group)*
3. *resorptions*
4. *sclerosis*

2.2.1.1 Kontrollgruppe

Beide Kontrollgruppen zeigen keine pathologischen Veränderungen im Kiefergelenk. Da sich jedoch das Gelenkspaltvolumen, das in einer Parallelarbeit beschrieben wird, durch die Verlagerung des Kondylus beim Öffnen des Kiefers vergrößert, musste die Kontrollgruppe gesplittet werden. Weil die Kieferstellung in Bezug auf Werte der vorliegenden Arbeit keinen Einfluss nimmt, wird die Kontrollgruppe im Folgenden zusammengelegt.

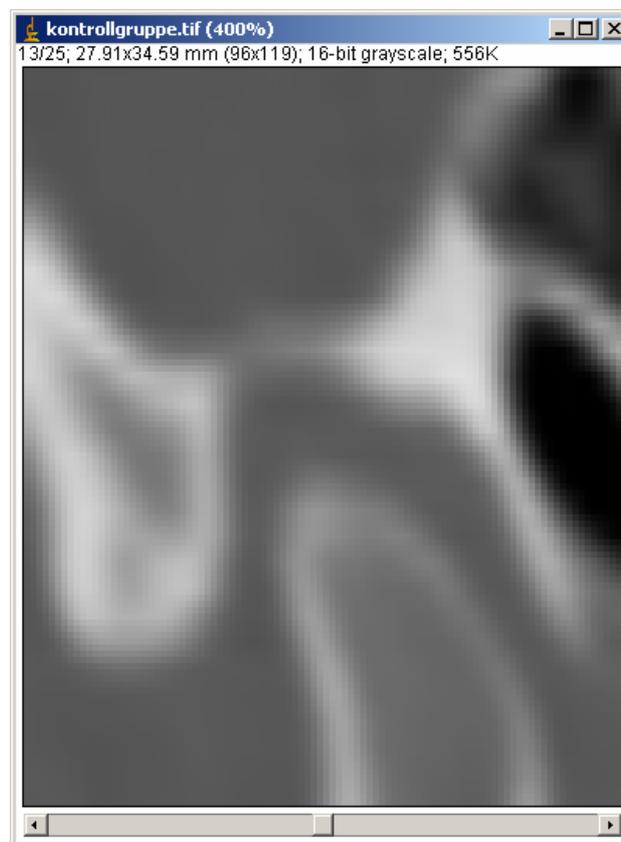


Abbildung 2.2: Gelenk der Kontrollgruppe ohne pathologische Veränderungen.

2.2.1.2 Resorptionen

Resorptionen werden in dieser Studie als Gelenke definiert, deren Kondylus-Fossa Relation aus pathologischen Gründen abnimmt. Daher gelten nicht nur Gelenke zu den Resorptionen, bei denen der Kondylus an Substanz verliert, sondern auch Gelenke, in denen der Kondylus aus pathologischen Gründen teilweise aus der Fossa getreten ist. Auch in diesem Falle verändert sich die Relation zwischen Kondylus und Fossa zu Gunsten der Gelenkgrube.



Abbildung 2.3: Sagittalschnitt eines Resorptionsgelenks. Die Lamina Dura ist teilweise unterbrochen und der Kondylenkopf erscheint aufgelöst.

2.2.1.3 Sklerosierungen

Sklerosierungen sind unserer Definition nach Gelenke, deren Kondylus-Fossa Relation auf Grund von pathologischen Veränderungen zunehmen. Im Gegensatz zu den Resorptionen kann dies nur durch ein Wachstum des Kondylus entstehen.

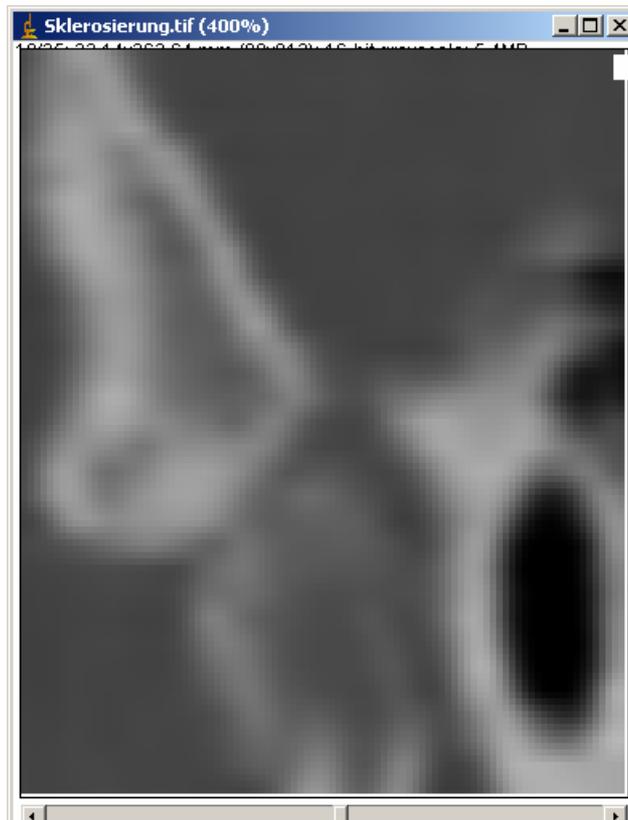


Abbildung 2.4: Sagittalschnitt eines sklerosierten Gelenks. Der Gelenkspalt ist deutlich verkleinert. Der Kondylus stellt sich blasig dar.

2.3 Ermittlung der dünnsten Knochenstärke des Fossadaches

Im Rahmen dieser Studie wurde auf einen Datensatz zurückgegriffen, der durch ein Verfahren modifiziert wurde, das eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit gewährleistet. Dieses Verfahren ist Teil einer Studie, die sich mit der Reproduzierbarkeit von so genannten landmarks befasst.

Unter einem landmark versteht man einen anatomischen Punkt, der exakt beschrieben werden kann und sich in Strukturen mit einer hohen Präzision darstellen und markieren lässt. So kommen vor Allem knöcherne Strukturen in Frage. Lassen sich diese landmarks in unterschiedlichen Individuen in einer Kontinuität feststellen, so werden sie als homologe landmarks bezeichnet.

Für die Studie wurden drei landmarks ausgewählt, über die eine im dreidimensionalen Raum eindeutig reproduzierbare Ebene festgelegt werden konnte. Der CT-Datensatz wurde anschließend mit Hilfe des ImageJ PlugIn TMJ_Rotation im dreidimensionalen Raum rotiert, sodass alle drei festgelegten landmarks innerhalb einer Schichtebene lagen. Dieser rotierte Datensatz wird als Ursprungsdatei der „Z-Project“ Methode verwendet. Für eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens wird auf die Dissertation von FLEUTER [22] verwiesen.

Im folgenden Abschnitt werden zwei Methoden präsentiert, wie man das Dach der Fossa mandibularis an seiner dünnsten Stelle aufsuchen und vermessen kann.

Die einzelnen Gelenke wurden zunächst mit der „Z-Project“ Methode untersucht. Da sich Ungenauigkeiten in der „Z-Project“ Methode bei Luft einschlüssen ergeben hatten, wurden alle Ergebnisse von Gelenken mit Luft einschlüssen durch eine „manuelle Methode“ überprüft und gegebenenfalls korrigiert.

2.3.1 Durchführungsprotokoll

2.3.1.1 Z-Project-Methode

Die Z-Project-Methode wird in elf Arbeitsschritten durchgeführt, die nachfolgend detailliert beschrieben werden:

Arbeitsschritt 1

Nach dem Starten des Bildbearbeitungsprogramm ImageJ wird der, nach dem von FLEUTER [22] beschriebenen Verfahren, vollständig rotierte Stack geöffnet.

(File → Open → „name_vorname_kglpr1r2r3“).



Abbildung 2.5: Ausgangsstack.

Arbeitsschritt 2

Für die Messung der roofthickness wird ein weiterer Ordner „*torfm*“, der für thickness of the roof of the fossa mandibularis steht, in den jeweiligen

Patientenverzeichnissen angelegt und der Datensatz zunächst unverändert in diesem Ordner abgespeichert.

(**File** → **save as** → **Zip** → den Ordner „*torfm*“ erstellen und die Datei in dem neuen Ordner als „*name_vorname_kglpr1r2r3*“ abspeichern.)

Arbeitsschritt 3

Im dritten Arbeitsschritt wird eine Grundebene aufgesucht. Es handelt sich hierbei um die Schicht des Stacks, die als erste oberhalb des Kondylus liegt. Darunter gelegene Schichten werden aus dem Stack entfernt. Der Benutzer nutzt dabei das PlugIn „Silce Remover“, das ihn auffordert, das gewollte Schichtenintervall anzugeben. Als erste Schicht wird die zuvor lokalisierte Grundebene angegeben. Für die obere Intervallgrenze ist es von Nöten, dass das knöcherne Dach der Fossa mandibularis noch innerhalb des Intervalls liegt.

(**Plugin** → **Slice Remover** → dann die Schichten eingeben, die herausgeschnitten werden sollen. Anschließend wird dem Dateinamen ein „*w*“ für wegschneiden hinzugefügt und abgespeichert. → **File** → **Save As** → **Zip** → „*name_vorname_kglpr1r2r3w*“).



Abbildung 2.6: Verkürzter Stack mit allen Schichten, die oberhalb des Kondylus liegen.

Arbeitsschritt 4

Die Schichten unterhalb der Grundebene müssen, wie unten beschrieben, für den folgenden Arbeitsschritt entfernt werden. Das tool „Z-Project“ projiziert alle übereinander liegenden Grauwerte der einzelnen Schichten des Stacks in eine gemeinsame Schicht. Pixel, denen in der Projektion helle Grauwerte zugeordnet werden, stehen für eine strahlendichte Materie des vom Pixel in kaudocranialer Richtung eingenommen Bereiches. Analog wird strahlendurchlässige Materie durch dunklere Graustufen repräsentiert.

(Image → Stacks → Z – Project → alle Schichten auswählen und Projection Type auf Max Intensity stellen. → File → Save As → Zip → „zprojection of name_vorname_kglpr1r2r3w“).



Abbildung 2.7: Summation aller Graustufen der einzelnen Schichten zu einem Bild nach Anwendung des „Z-Project“ Tools.

Arbeitsschritt 5

Im folgenden Schritt muss der Bereich mit dem dunkelsten Grauwert im Z-Project-Bild aufgefunden werden. Dieser Bereich steht, wie unter Arbeitsschritt 4 erklärt, für die geringste Strahlendichte und somit für die dünnste Knochenstärke im Bereich des Fossadaches. Würde man den strahlendichten Kondylus im Stack belassen, wäre die Projektion verfälscht. Die Lokalisation des Pixels mit dem dunkelsten Grauwert erfolgt mit dem tool „Threshold“. Mit dessen Hilfe lässt sich ein Schwellenwert für Graustufen definieren. Unterhalb dieser Schwelle liegende Graustufen werden farblich hervorgerufen. Bildbereiche mit Grauwerten oberhalb dieser Schwelle bleiben unverändert.

Mit dem Tool „*Polygon selections*“ wird die Gelenkkammer durch ein Polygon manuell umrandet (siehe Abb. 2.8), um das für die Messung der roofthickness relevante Gebiet vorher einzugrenzen. Da die Gelenkkammer in dem Z-Project-Fenster nicht zu lokalisieren ist, wird stellvertretend die Datei „*name_vorname_kglpr1r2r3w*“ aufgerufen, die kaudalste Schicht des Stacks (Grundebene) ausgewählt und nachher auf das Z-Project-Fenster transferiert.

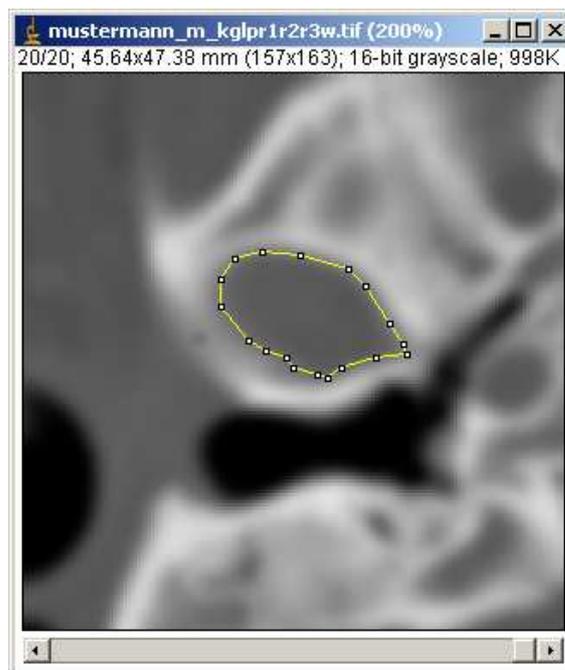


Abbildung 2.8: Mit dem Tool „*Polygon selections*“ umrandete Gelenkkammer.

Luft einschlüsse dürfen in keiner der Schichten innerhalb der Markierung liegen und müssen wie in Abb. 2.9 dargestellt ausgeschlossen werden, indem einzelne Eckpunkte des Vielecks versetzt werden. Auch sie würden, äquivalent zu dem Beispiel des Kondylus, zu einer Verfälschung des Ergebnisses führen. Im Unterschied zum Kondylus würde jedoch ein Belassen der Luft einschlüsse nicht zu einem zu hellen, sondern aufgrund der niedrigen Strahlenabsorption zu einem zu dunklen Grauwert führen. Die Markierung durch das Tool „Polygon selections“ kann wie folgt auf das Z-Project-Fenster transferiert werden.

(Edit → Selection → Restore Selection)

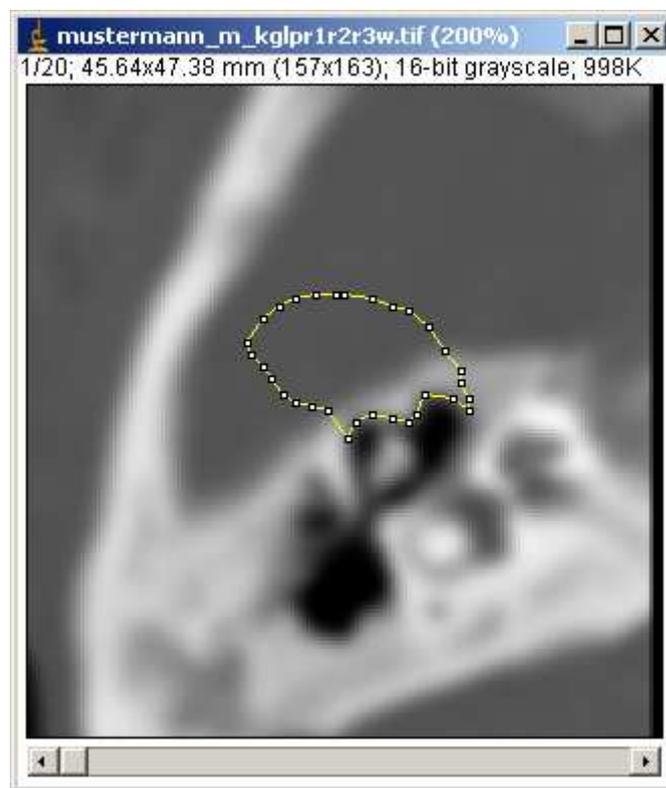


Abbildung 2.9: Luft einschlüsse, die zu einer Verfälschung der Z-Project-Methode führen, werden von der Markierung des Gelenksspaltes ausgenommen.

Arbeitsschritt 6

Innerhalb des markierten Gelenkspaltes sucht man nun mit dem „Treshold“ die Stelle mit den geringsten Grauwerten auf.

(Image → Adjust → Threshold)

Es müssen zunächst beide Steuerleisten des Thresholds nach links auf ihren Ursprung geschoben werden. Durch die Variation der Steuerleisten lässt sich ein Intervall von Grauwerten anfärben. Der minimale Grauwert wird durch die obere Steuerleiste definiert. Durch die untere lässt sich der maximale Grauwert festlegen. Es ist hierbei irrelevant, welchen Grauwert der Ursprung annimmt. Er unterliegt zwischen den einzelnen Z-Project-Bildern einer Variabilität. Nachdem der minimale und der maximale Wert auf den Ursprung gelegt wurden, erhöht man den maximalen Grauwert sukzessiv über die untere Steuerleiste bis im Bereich der markierten Gelenkkammer ein gefärbter Pixelbereich erscheint. Diese Stelle soll im nächsten Schritt durch Koordinaten eindeutig festgelegt werden. Dazu wird mit Hilfe des tools „point selection“ der angefärbte Bereich punktuell markiert und durch folgenden Befehl vermessen:

(Analyze → Measure)

Ein Fenster „Results“ aus dem man den x- und y-Wert der gesuchten Koordinate entnimmt wird automatisch geöffnet.

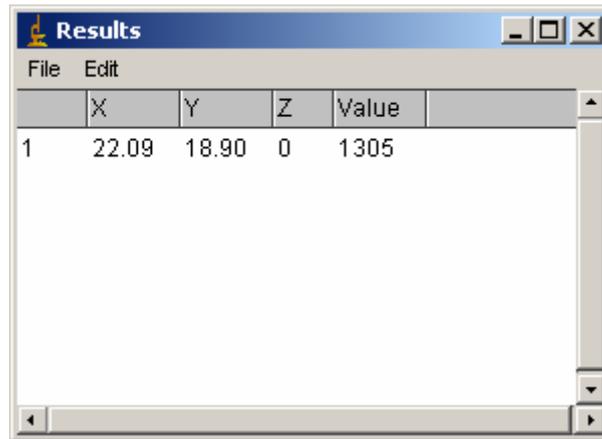


Abbildung 2.10: Diesem „results-Fenster“ werden die Koordinaten des punktuell markierten Bereiches entnommen.

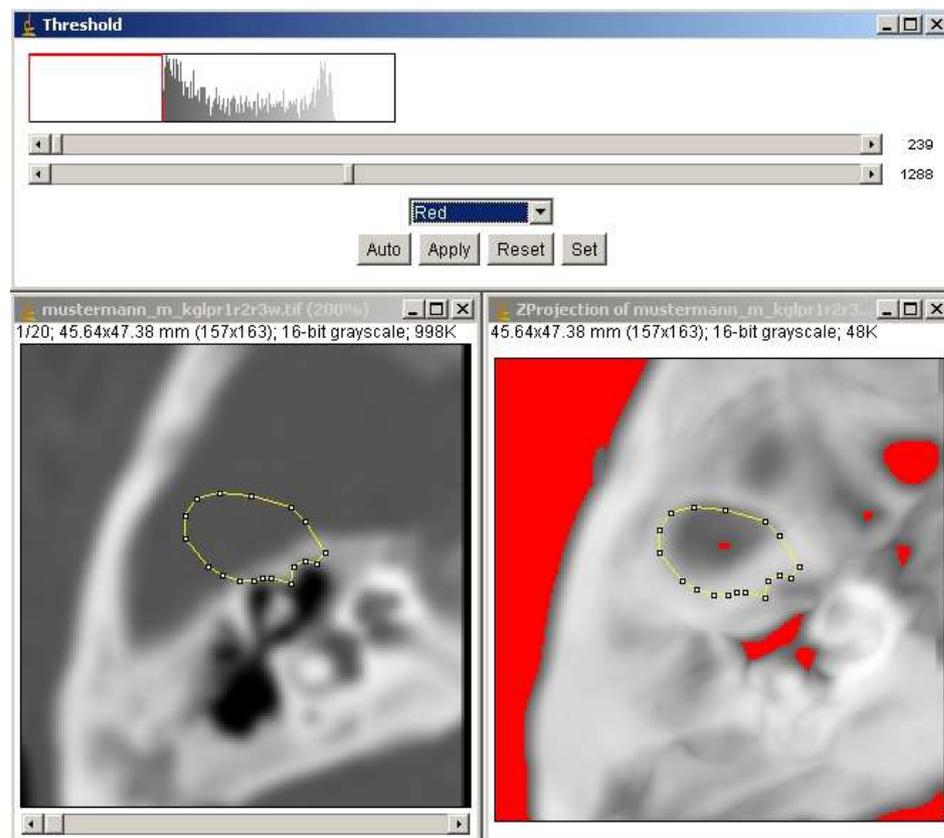


Abbildung 2.11: Oben sieht man die zwei Steuerleisten des „Thresholds“. Dabei muss die obere Steuerleiste immer ganz links stehen und die untere soweit von links nach rechts geschoben werden, bis in dem Bild rechts unten ein roter Pixel innerhalb der Markierung auftaucht. Das Bild unten links zeigt, wie Lufteinschlüsse von der Markierung ausgeschlossen werden.

Arbeitsschritt 7

Um einen Sagittalschnitt zu erhalten, auf dem das Dach der Fossa mandibularis seine geringste Dicke aufweist, müssen noch weitere Schritte vollzogen werden.

Man öffnet wieder die Ausgangsdatei „*name_vorname_kglpr1r2r3*“ und zieht mit dem Tool „*straight line selections*“ eine vertikale Linie von Bildgrenze zu Bildgrenze. Dabei ist es wichtig, dass die Linie exakt, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, an den Bildrändern abschließt und nicht vorher endet. Wird die Markierungslinie zu kurz gewählt, so würden die zuvor ermittelten Koordinaten ihre Gültigkeit verlieren. Die Markierungslinie wird ausschließlich horizontal verschoben, bis sie auf dem unter Arbeitsschritt 6 eruierten x-Wert liegt. Der x-Wert, auf dem sich die Markierungslinie gegenwärtig befindet, kann aus dem ImageJ Hauptfenster entnommen werden (Abb. 2.13).

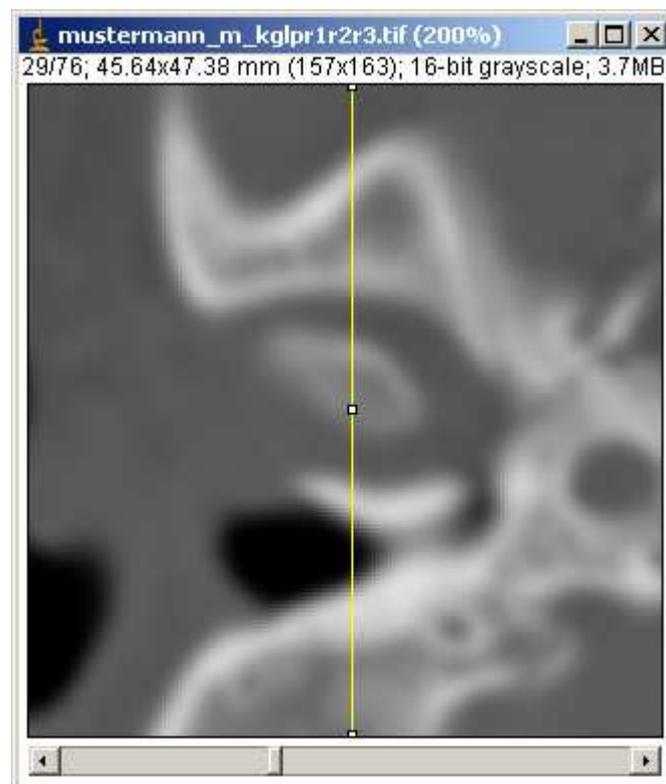


Abbildung 2.12: Ausgangsstack mit vertikaler Markierung für die Herstellung eines Reslice.

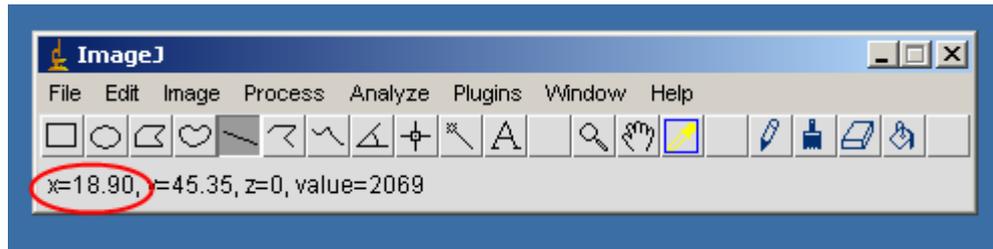


Abbildung 2.13: Aus dem ImageJ Hauptfenster kann der x-Wert, auf dem sich die Makierungslinie aus Abb. 2.12 befindet, abgelesen werden.

Arbeitsschritt 8

Um den sagittalen Schnitt des linear, markierten Bereiches zu generieren, verwendet man das tool „Reslice“.

(Image → Stacks → Reslice)

Der „Reslice“ rekonstruiert orthogonale Schichten eines zuvor im CT-Bild ausgewählten Bereiches. Benutzt man wie in unserem Falle zur Auswahl das tool „straight line selections“, so erhält man demnach eine Abbildung, die orthogonal zu der Markierung steht und in ihrer Ausdehnung der Markierung entspricht. Verwendet man zur Markierung das tool „rectangular selections“, so würde man nach durchgeführtem Reslice nicht nur eine orthogonale Schicht erhalten, sondern einen Stack aus mehreren orthogonalen Schnitten.

Der rotierte Datensatz wird unter dem Dateinamen „reslice of name_vorname_kglpr1r2r3“ abgespeichert.

(File → Save As → Zip → „reslice of name_vorname_kglpr1r2r3“).

Arbeitsschritt 9

Man öffnet die Datei „*reslice of name_vorname_kglpr1r2r3*“, um in der erstellten sagittalen Abbildung die dünnste Knochenstärke mit Hilfe der unter Arbeitsschritt 6 ermittelten Koordinaten ausfindig zu machen.

Da sich die Abbildung in einer anderen Raumebene befindet, sucht man nun auf der x-Achse den Wert der y-Koordinate auf. Man zieht dazu erneut mit dem tool „straight line selection“ eine Linie, deren Ausdehnung in diesem Fall frei gewählt werden darf. Die Linie variiert man nun so lange auf der x-Achse bis der y-Wert aus Arbeitsschritt 6 erreicht wird. Die Position kann dabei wieder, wie in Abbildung 2.13 dargestellt, dem ImageJ – Fenster entnommen werden.

Methodisch bedingt, kann die Linie nur näherungsweise den gesuchten Bereich angeben. Ausschlaggebend ist, was durch den später verwendeten „*Threshold*“ dargestellt wird.

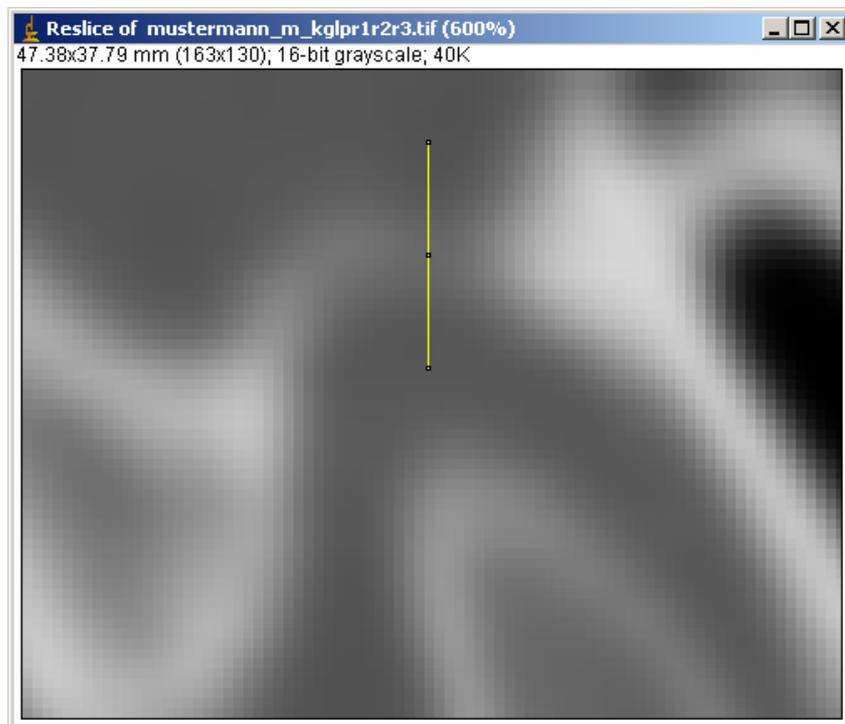


Abbildung 2.14: Sagittaler Reslice des in Abb. 2.12 markierten Bereiches. Die gelbe Linie dient zum Auffinden der gesuchten y-Koordinate.

Arbeitsschritt 10

Nach unserer Definition sind alle Strukturen mit einem Grauwert über 1224 HU knöchern. So wird durch das Festlegen eines Grauwerteintervalls von 0 – 1224 HU nach Definition jede nicht knöcherne Struktur durch den Treshold angefärbt.

(Image → Adjust → Threshold → set → In die obere Spalte trägt man den Wert 0 und in die untere den Wert 1224 ein).

Die kürzest mögliche Verbindung zwischen den angefärbten, nicht knöchernen Geweben stellt die gesuchte Stelle des Knochendaches dar. Es muss also nun manuell nach der kürzesten Strecke zwischen den angefärbten Gewebegrenzen gesucht werden. Die Strecke muss dabei nicht unbedingt orthogonal, wie in Abb. 2.15, sondern kann auch diagonal verlaufen.

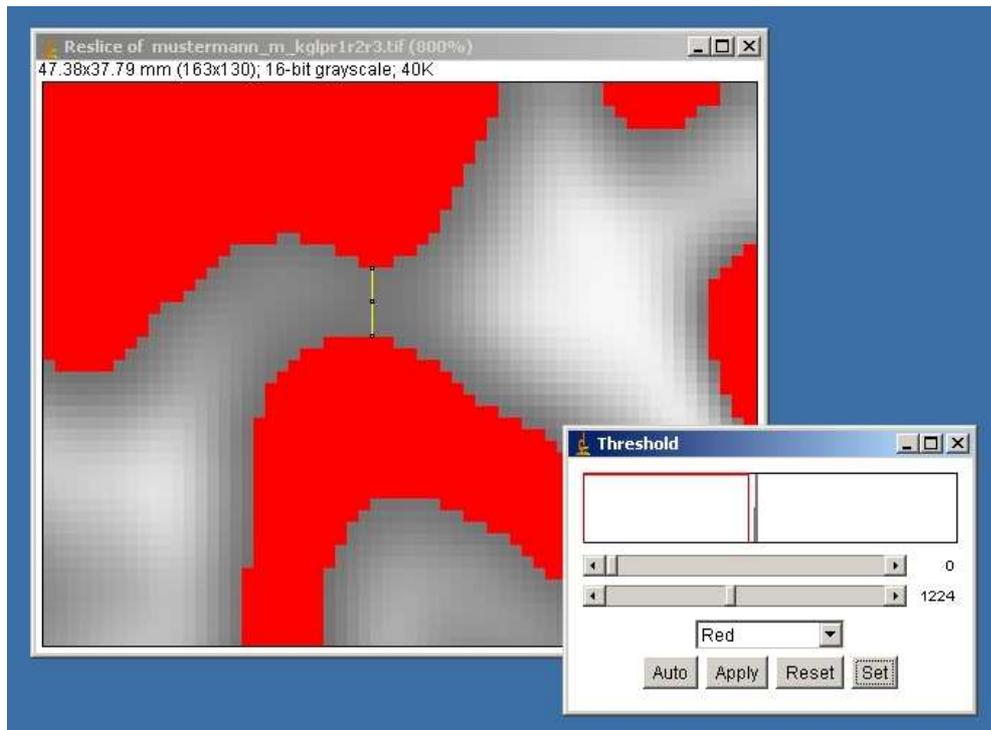


Abbildung 2.15: Links erkennt man die Verbindung der kürzesten Strecke; Rechts ist der Threshold mit der für Knochen eingestellten Grenzwelle abgebildet.

Arbeitsschritt 11

Hat man den geringsten Abstand optisch lokalisiert, verbindet man die Grenzbereiche mit dem Tool „*straight line selection*“ und lässt die Streckenlänge bestimmen. Der Wert kann aus dem Fenster „Results“ entnommen werden.

(Analyze → Measure)

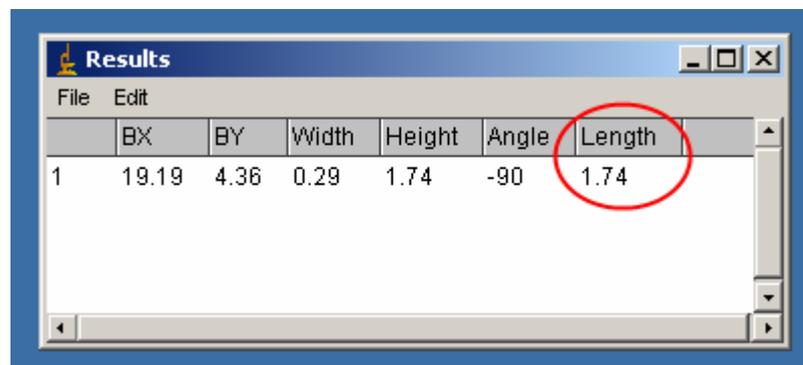


Abbildung 2.16: Fenster, aus dem man die gesuchte Streckenlänge unter „Length“ ablesen kann.

Nach abgeschlossener Arbeit muss der Ordner „*torfm*“ folgende acht Dateien enthalten:

Mustermann_m_kglpr1r2r3

Mustermann_m_kgrpr1r2r3

Mustermann_m_kglpr1r2r3w

Mustermann_m_kgrpr1r2r3w

Zprojection of Mustermann_m_kglpr1r2r3w

Zprojection of Mustermann_m_kgrpr1r2r3w

Reslice of Mustermann_m_kglpr1r2r3

Reslice of Mustermann_m_kgrpr1r2r3

2.3.1.2 Regeln zur Z-Project-Methode

Bei einer Anzahl der Patienten-Stacks kann die Z-Project-Methode nicht ohne weiteres angewendet werden. Wie aus Abb. 2.17 ersichtlich, werden durch den Threshold, mit dem von uns definierten Grauwerteintervall (0-1224 HU) nicht alle nichtknöchernen Gewebe angefärbt. Anteile der Gelenkkammer blieben unmarkiert, obwohl sie wesentlich keine knöchernen Strukturen sind. Um solche Ausnahmen trotzdem mit in die Studie einzubeziehen, wurden Regeln konzipiert. Bei konstanter Anwendung dieser Regeln bleibt jede Auswertung reproduzierbar und somit auch vergleichbar.

1. Ist der Kondylus wie in Abb. 2.17 nicht vollständig von der Threshold-Markierung umrandet und liegt die orthogonale Linie auf der x-Achse mit dem ehemaligen Wert der y-Koordinate innerhalb der Markierung, wird weiterhin die kürzeste Strecke gemessen.

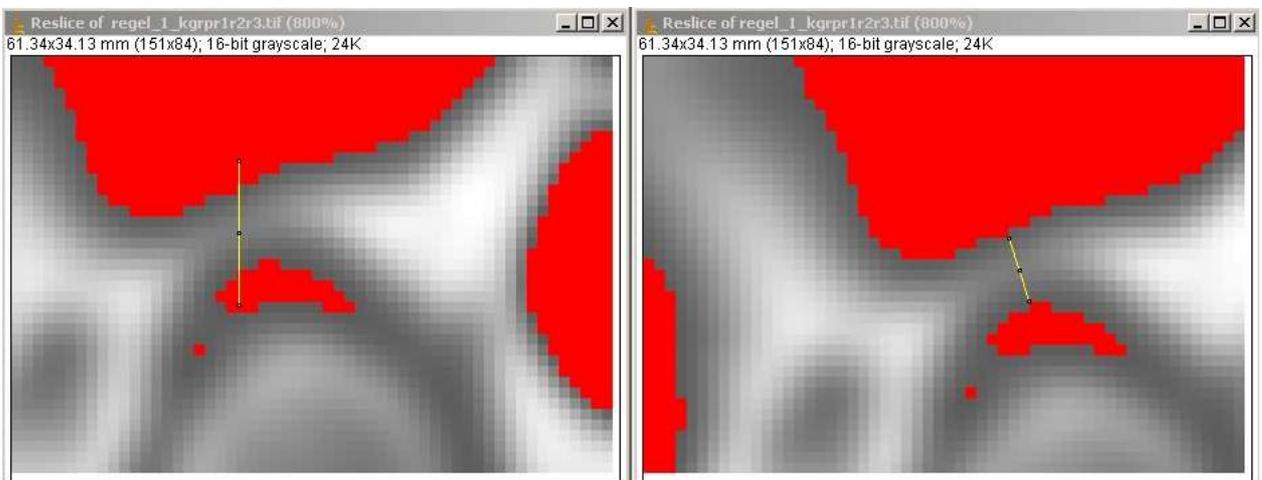


Abbildung 2.17: Links: Die Markierung des „Thresholds“ verläuft nicht kontinuierlich um den Kondylus. Die orthogonale Linie liegt im Bereich der gegenüberliegenden Thresholdmarkierungen.

Rechts: Markierung der kürzesten Strecke durch „straight line selections“.

2. Liegt die lineare Markierung des „straight line selection“ jedoch wie in Abb. 2.18 außerhalb von gegenüberliegenden Markierungsgrenzen des „Thresholds“, weicht man von dem üblichen Protokoll ab und fährt wie folgt fort: Die lineare Markierung muss wiederum auf dem korrekten y-Koordinatenwert positioniert werden. Das obere Ende der Strecke wird anschließend ausnahmslos in vertikaler Richtung verschoben, bis es am Grenzpunkt der Threshold-Markierungsgrenze liegt. Das Grauwerteintervall des „Threshold“ wird nun sukzessiv erweitert, indem der maximale Grauwert erhöht wird. Dazu wird die untere Steuerleiste des „Thresholds“ schrittweise weiter nach rechts geführt bis sowohl die obere als auch die untere Markierungsgrenze des „Thresholds“ die x-Koordinate erreicht hat, auf dem sich die Markierungslinie befindet (siehe Abb. 2.19). Im Anschluss wird erneut die kürzest mögliche Strecke durch Variation des unteren Streckenursprungs aufgesucht und vermessen. Die Position des oberen Ursprungs der Strecke darf nicht mehr verschoben werden.

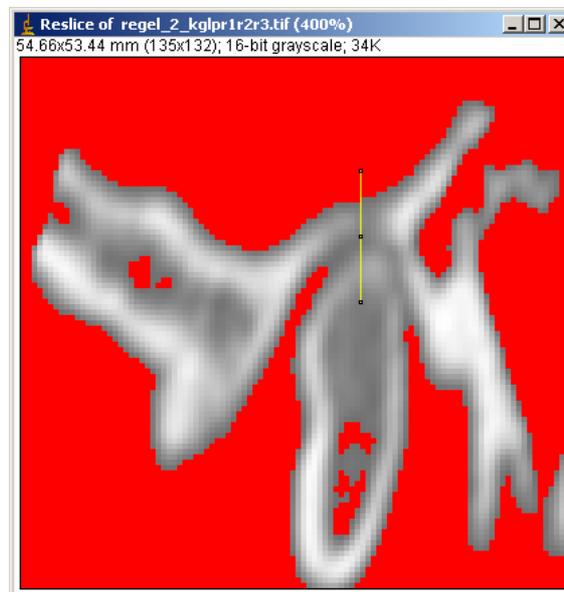


Abbildung 2.18: Es ist deutlich zu erkennen, dass die Markierung, die den Gelenkspalt symbolisiert, noch nicht die gelbe Linie erreicht hat.

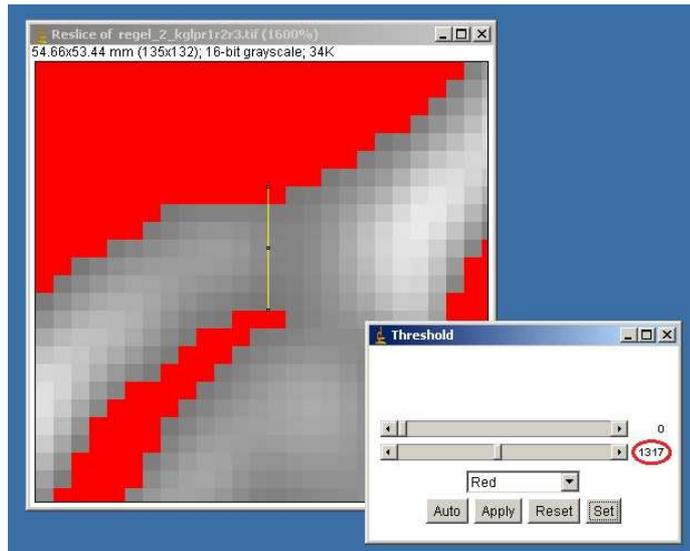


Abbildung 2.19: Die untere Steuerleiste des Thresholds wurde über den Normalwert 1224 hinaus erhöht bis die Markierung des Gelenkspaltes die x-Koordinate der Markierungslinie erreicht hat. Die kürzeste Strecke wurde durch Variation des unteren Streckenendes markiert, wobei die Position des oberen Streckenendes erhalten bleibt.

2.3.2 Manuelle Methode

Um die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Methode zu überprüfen, kann man auch die dünnste Knochenstärke des Dachs der Fossa mandibularis manuell bestimmen. Die manuelle Bestimmung erfolgt in zwei Arbeitsschritten, die nachfolgend beschrieben werden.

Arbeitsschritt 1

Man greift identisch zur Z-Project-Methode auf die Ausgangsdatei im Ordner „gelenke“ zurück.

(File → Open → „name_vorname_kglpr1r2r3“)

Das gesamte Bild muss mit Hilfe des Tools „rectangular selections“ markiert und ein Reslice des markierten Bereiches angefertigt werden. **(Image → Stacks → Reslice)**



Abbildung 2.20: Das Bild ist hier mit dem Tool „rectangular selections“ großzügig markiert.

2. Material und Methode

Man erhält einen sagittalen Stack, der dieses Mal aus mehreren Schichten besteht. Es ist sinnvoll, diesen Stack einmal komplett durchzuscrollen. So kann eine optische Eingrenzung vorgenommen werden, in welchen Schichten die dünnste Knochenstärke des Fossadaches liegt.

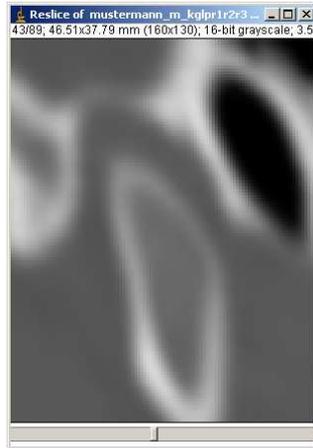


Abbildung 2.21: Sagittale Darstellung des Gelenks zur optischen Eingrenzung.

Arbeitsschritt 2

Aus Übersichtsgründen sollte erst dann der „Threshold“ aktiviert werden, um endgültig die Schicht zu finden, in der die roten Markierungsgrenzen den geringsten Abstand voneinander haben. Das weitere Verfahren ist mit den Punkten 9-11 der Z-Project-Methode identisch.

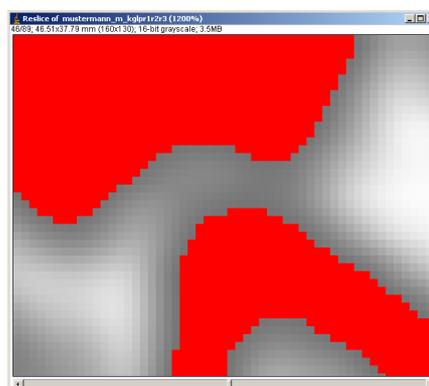


Abbildung 2.22: Der rot eingefärbte Bereich stellt alle nichtknöchernen Anteile des Gelenks dar.

2.4 Evaluierung von Lufteinschlüssen im Fossadach

Zur Verifizierung von Lufteinschlüssen innerhalb des Fossadaches wurde der Stack manuell durchgescrollt. Das Ausmaß der Pneumatisierungen wurde subjektiv von einem Observer in vier aufsteigende Kategorien „none“, „poor“, „moderate“ und „considerable“ eingeteilt.

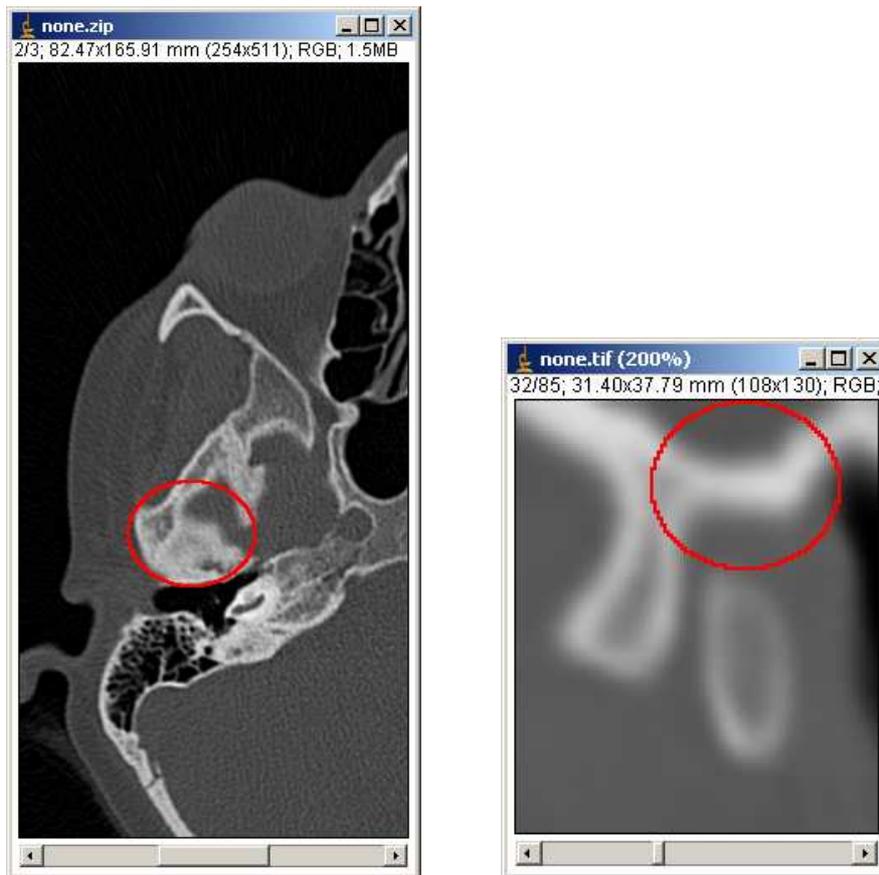


Abbildung 2.23: Transversaler (links) und sagittaler (rechts) Schnitt eines Gelenkes ohne Lufteinschlüsse.

2. Material und Methode

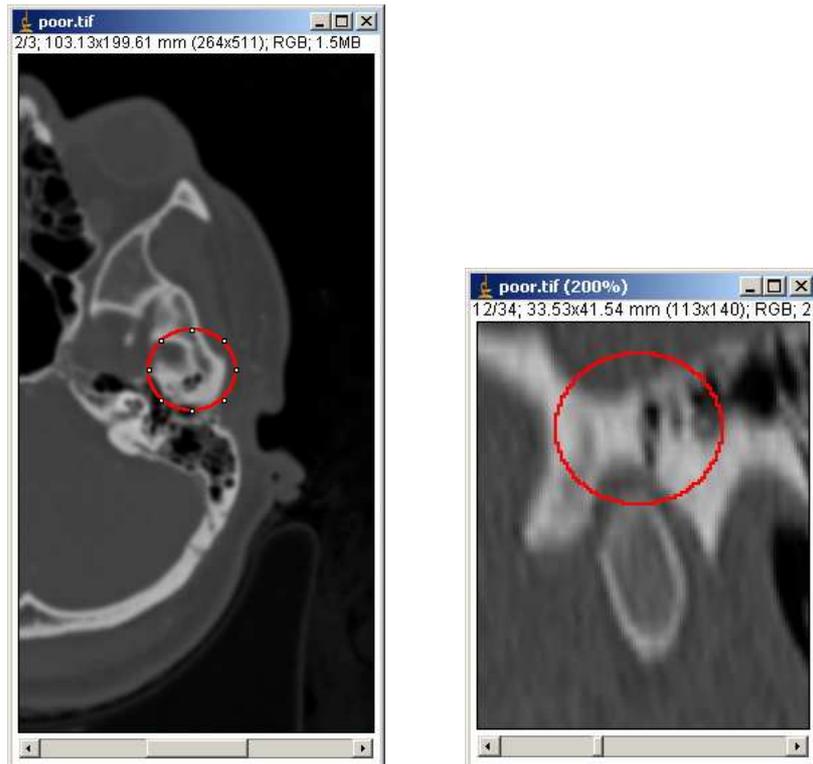


Abbildung 2.24: Transversaler (links) und sagittaler (rechts) Schnitt eines Gelenkes mit wenigen Lufteinschlüssen.

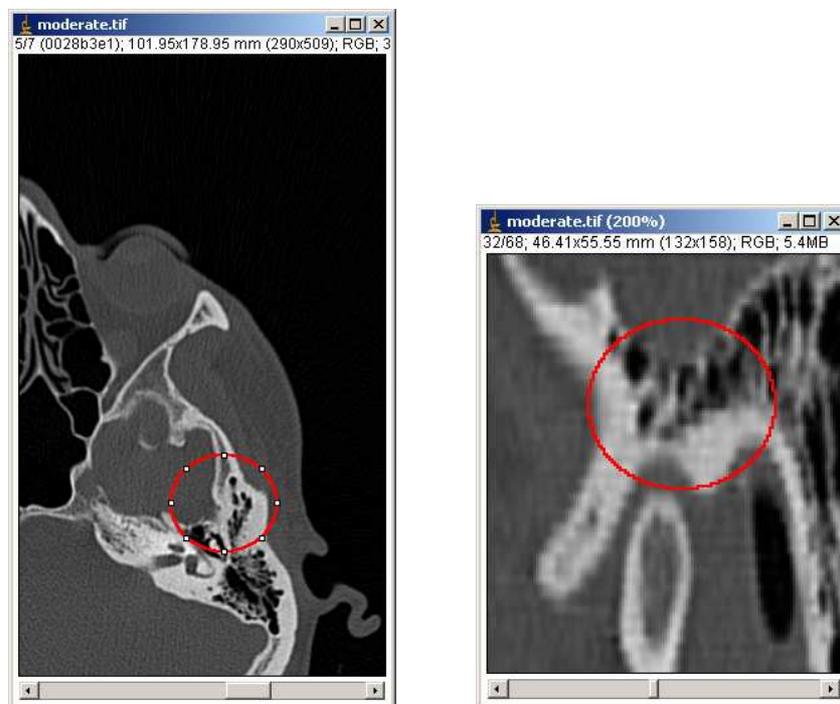


Abbildung 2.25: Transversaler (links) und sagittaler (rechts) Schnitt eines Gelenkes mit mäßigen Lufteinschlüssen.

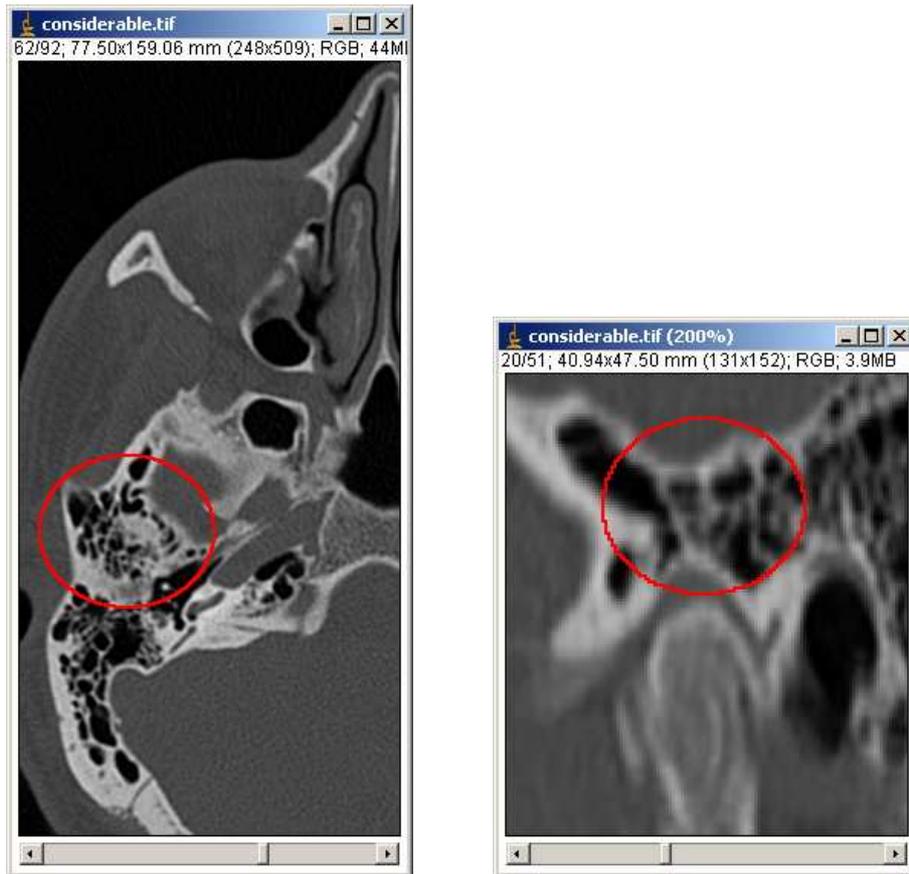


Abbildung 2.26: Transversaler (links) und sagittaler (rechts) Schnitt eines Gelenkes mit umfangreichen Lufteinschlüssen.

2.5 Reproduktion der Z-Project-Methode

Die intra- und interindividuelle Reproduzierbarkeit der Z-Project Methode wurde anhand von 20 Gelenken durchgeführt. Diese wurden aus dem Patientengut durch einen Zufallsgenerator ausgewählt. Die intraindividuelle Reproduzierbarkeit ergibt sich aus einer ersten Messung und einer zeitlich, versetzten, zweiten Messung des gleichen Observers. Zum Erhalt der interindividuellen Reproduzierbarkeit werden die von zwei unabhängigen Observern ermittelten Messungen verglichen.

2.6 Statistik

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für medizinische Informatik und Biomathematik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster anhand des Statistikprogramms SPSS für Microsoft Windows 14.0.1 (SPSS Inc. Chicago, Illinois, USA). Zur Auswertung wurden verschiedene Verfahren benutzt, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Signifikanz

Die Signifikanz beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass Unterschiede oder Zusammenhänge durch Zufall entstanden sind. Je geringer die Signifikanz ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Unterschiede oder Zusammenhänge nicht durch Zufall entstanden sind. Durch so genannte Signifikanztests lässt sich das Signifikanzniveau p ermitteln und die Irrtumswahrscheinlichkeit abschätzen. Es werden vier verschiedene Signifikanzniveaus angegeben:

nicht signifikant = $p > 0,05$

signifikant = $p < 0,05$

hoch signifikant = $p < 0,01$

höchst signifikant = $p < 0,001$

Mann-Whitney-U-Test

Der Mann-Whitney-U-Test ist ein nichtparametrischer Test für unverbundene Stichproben. Dieser Test wird auch als Homogenitätstest bezeichnet. Er gibt an, wie hoch die Signifikanz der Übereinstimmung zweier unabhängiger Variablen zu einer gemeinsamen Grundgesamtheit ist.

In dieser Arbeit wurde der Mann-Whitney-U-Test dazu verwendet, die Abhängigkeiten der roofthickness innerhalb der Kontrollgruppe von folgenden Variablen zu testen:

1. Geschlecht (Kapitel 3.2.1)
2. Gelenkseite (Kapitel 3.2.3)
3. Befundgruppen (Kapitel 3.3)

Korrelationskoeffizient

Der Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson gibt den Grad des linearen Zusammenhangs zweier Variablen an. Er kann Werte zwischen +1 und -1 annehmen. Beträgt er +1, dann besteht ein vollständig positiver linearer Zusammenhang. Bei -1 ein vollständig negativer. Je näher der Wert an 0 liegt, desto geringer ist der lineare Zusammenhang zwischen den Variablen. Zur Errechnung des Korrelationskoeffizienten wurde der Kendall-Tau-b-Test angewendet. Anhand dessen wurde die Reliabilität der Z-Project-Methode überprüft. Dazu wird der Korrelationskoeffizient zwischen den Messungen der roofthickness eines Interobservers und eines Intraobservers ermittelt. Je höher dabei der Korrelationkoeffizient ist, desto größer ist die Reliabilität der untersuchten Methode.

Box-Whisker-Plot

Ein Boxplot ist eine grafische Darstellung, die fünf Werte auf einen Blick darstellt (z.B. Abb. 3.1). Dazu gehören der Median, zwei Quartile und die zwei Extremwerte. Die Quartile zusammen werden auch als Box bezeichnet. Die Box enthält 50 % der Daten und soll die Streuung verdeutlichen. In ihr ist der Median eingezeichnet. Die äußeren Quartilgrenzen halbieren jeweils wieder die obere und untere Hälfte der Stichprobe.

Die dünneren äußersten Striche geben den oberen und unteren Extremwert an, die noch nicht als Ausreißerwerte bewertet werden. Die Strecken zwischen den Extremwerten und den Quartilgrenzen werden „Whisker“ genannt.

Median

In einer geordneten Stichprobe mit einer ungeraden Zahl von Werten ist der Median der Wert, der genau in der Mitte der Anzahl aller Werte liegt. Bei einer geraden Anzahl, gibt es demnach zwei Mediane. Der Vorteil des Median gegenüber dem Mittelwert ist, dass er stabiler gegenüber Ausreißerwerten ist.

Arithmetische Mittel (Mittelwert)

Der Mittelwert ist die Summe aller Messwerte, dividiert durch ihre Anzahl. Extreme Ausreißerwerte beeinflussen ihn stark.

[4, 23]

3. Ergebnisse

3.1 Häufigkeiten des Patientenguts

Die Häufigkeiten sind gemäß Tabelle 1 verteilt. Die Kontrollgruppe repräsentiert mit 382 Gelenken die größte Gruppe, die sich zu 52,9% in männliche und zu 47,1% in weibliche Gelenke aufteilt. Es gab 49 Resorptionen, die zu 26,5% männliche und zu 73,5% weibliche Gelenke betrafen. Sklerosierungen des Kondylus wurden bei insgesamt 20 Gelenken befundet, davon 16 weibliche, demnach viermal mehr als männliche Gelenke.

Tabelle 1

Häufigkeiten der Gelenke

| contr1 | | | | sex | | Gesamt |
|---------------|--------|-------|------------------|-------|-------|--------|
| | | | | m | f | |
| control group | side | right | Anzahl | 101 | 90 | 191 |
| | | | % der Gesamtzahl | 26,4% | 23,6% | 50,0% |
| | | left | Anzahl | 101 | 90 | 191 |
| | | | % der Gesamtzahl | 26,4% | 23,6% | 50,0% |
| | Gesamt | | Anzahl | 202 | 180 | 382 |
| | | | % der Gesamtzahl | 52,9% | 47,1% | 100,0% |
| resorption | side | right | Anzahl | 6 | 18 | 24 |
| | | | % der Gesamtzahl | 12,2% | 36,7% | 49,0% |
| | | left | Anzahl | 7 | 18 | 25 |
| | | | % der Gesamtzahl | 14,3% | 36,7% | 51,0% |
| | Gesamt | | Anzahl | 13 | 36 | 49 |
| | | | % der Gesamtzahl | 26,5% | 73,5% | 100,0% |
| sclerosis | side | right | Anzahl | 2 | 9 | 11 |
| | | | % der Gesamtzahl | 10,0% | 45,0% | 55,0% |
| | | left | Anzahl | 2 | 7 | 9 |
| | | | % der Gesamtzahl | 10,0% | 35,0% | 45,0% |
| | Gesamt | | Anzahl | 4 | 16 | 20 |
| | | | % der Gesamtzahl | 20,0% | 80,0% | 100,0% |

3.2 Roofthickness in der Kontrollgruppe

3.2.1 Geschlecht

Die Tabelle 2 zeigt, dass 197 männliche und 168 weibliche Gelenke in die Auswertungen einbezogen werden konnten. Bei Männern beträgt die mittlere roofthickness $3,2 \pm 1,5$ mm, bei Frauen $3,1 \pm 1,4$ mm. Es besteht kein signifikanter Unterschied in der roofthickness zwischen Männern und Frauen ($p > 0,05$).

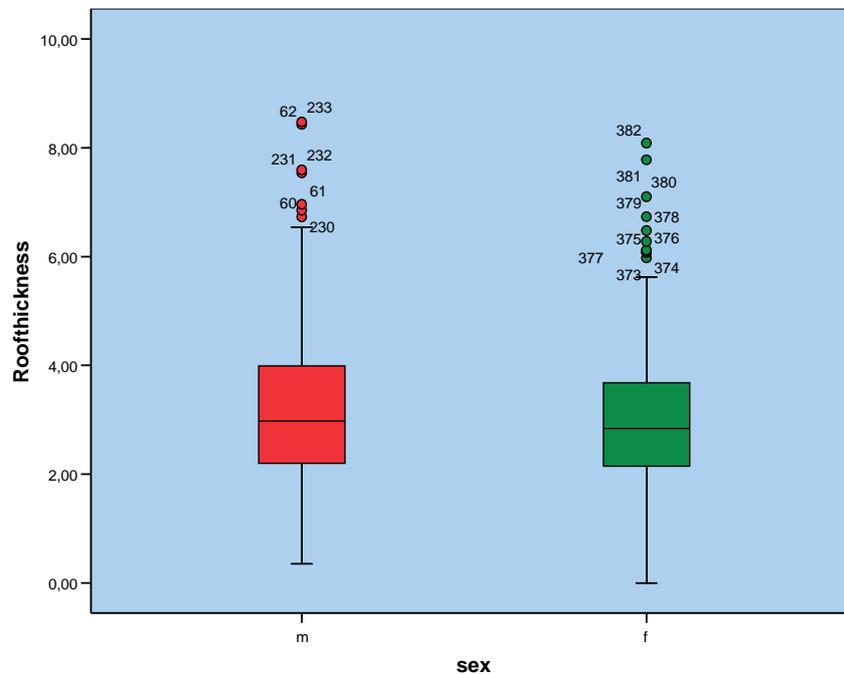


Abbildung 3.1: Gegenüberstellung der roofthickness in Abhängigkeit vom Geschlecht mittels eines Boxplots. Es kann kein signifikanter Unterschied herausgestellt werden.

Tabelle 2

Deskriptive Statistik der Roofthickness

R_thick

| sex | N | Mittelwert | Standardabweichung | Median | Minimum | Maximum |
|-----------|-----|------------|--------------------|--------|---------|---------|
| m | 197 | 3,2 | 1,5 | 3,0 | ,4 | 8,5 |
| f | 168 | 3,1 | 1,4 | 2,8 | ,0 | 8,1 |
| Insgesamt | 365 | 3,2 | 1,5 | 2,9 | ,0 | 8,5 |

3.2.2 Alter

Die nachfolgenden Diagramme (Abb. 3.2 und 3.3) zeigen die lineare Kurvenanpassung zwischen dem Alter und der roofthickness. Man erkennt sowohl bei Männern, als auch bei Frauen einen marginalen Anstieg. Die Steigung der Geraden beträgt bei Männern 0,006 und bei Frauen 0,13. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt bei Männern 5% und bei Frauen 24%.

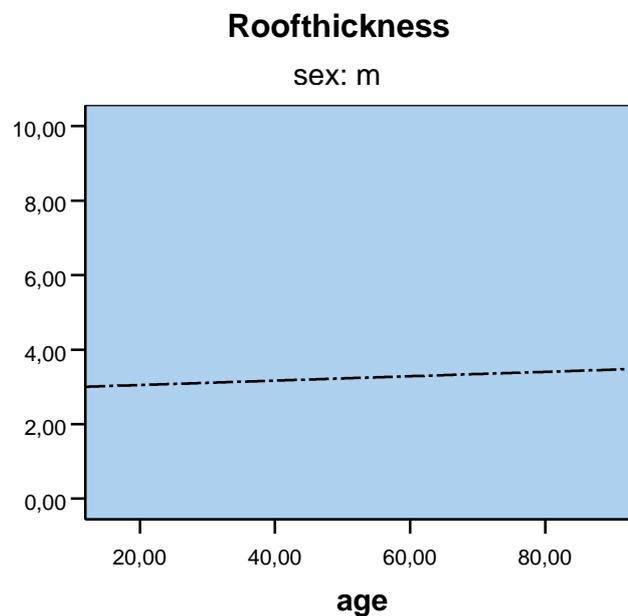


Abbildung 3.2: Lineare Darstellung der Abhängigkeit zwischen der roofthickness von dem Alter bei Männern. Die schwache Steigung lässt auf keine signifikante Korrelation zwischen den beiden Variablen schließen.

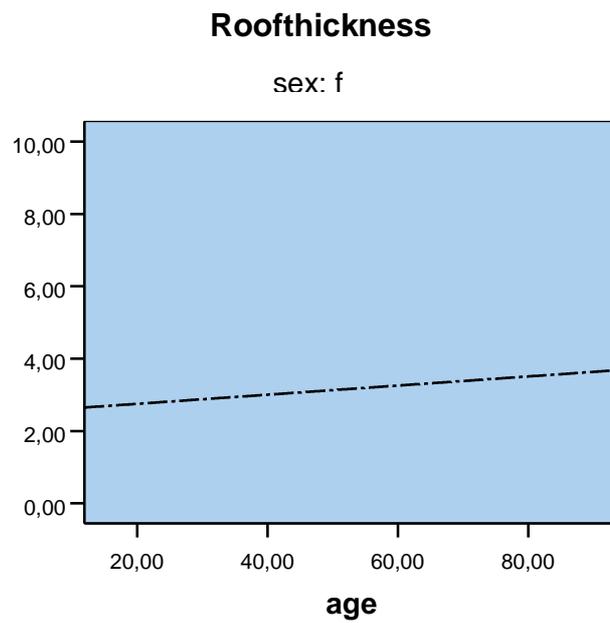


Abbildung 3.3: Lineare Darstellung der Abhängigkeit zwischen der roofthickness und dem Alter bei Frauen. Auch hier weist der schwache Steigungsgrad auf keine signifikante Korrelation zwischen den beiden Variablen hin.

3.2.3 Gelenkseite

Bei 191 rechten Gelenken konnte eine mittlere roofthickness von 3,0 mm festgestellt werden. Das Minimum beträgt 0,4 mm und das Maximum 7,1 mm. Das arithmetische Mittel der linken 191 Gelenke liegt bei 3,4 mm. Das Werteintervall erstreckt sich über eine roofthickness von 0 mm bis zu 8,5 mm. Der „Man-Whitney-U-Test“ ergab, dass es einen signifikanten Unterschied ($p=0,01$) zwischen den Gelenkseiten gibt.

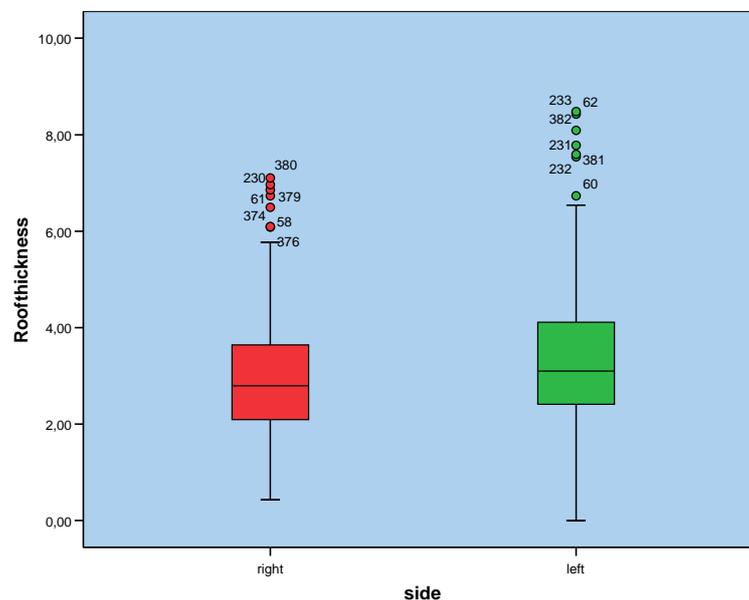


Abbildung 3.4: Gegenüberstellung der roofthickness in Abhängigkeit von der Gelenkseite mittels eines Boxplots. Es konnte ein hoch signifikanter Unterschied ($p=0,01$) herausgestellt werden.

3.3 Roofthickness der Befundgruppen

Bei Gegenüberstellung der Gruppen Sklerosierungen- und Resorptionen mit der Kontrollgruppe ergaben sich zur roofthickness folgende Mittelwerte. Die Kontrollgruppe besitzt mit 3,2 mm den größten Mittelwert; gefolgt von der Gruppe der Sklerosierungen mit 2,9 mm. Das kleinste arithmetische Mittel besitzen die Resorptionen mit 2,7 mm. Über den „Man-Whitney-U-Test“ konnte lediglich ein signifikanter Unterschied ($p=0,004$) zwischen der Kontrollgruppe und den Resorptionen festgestellt werden.

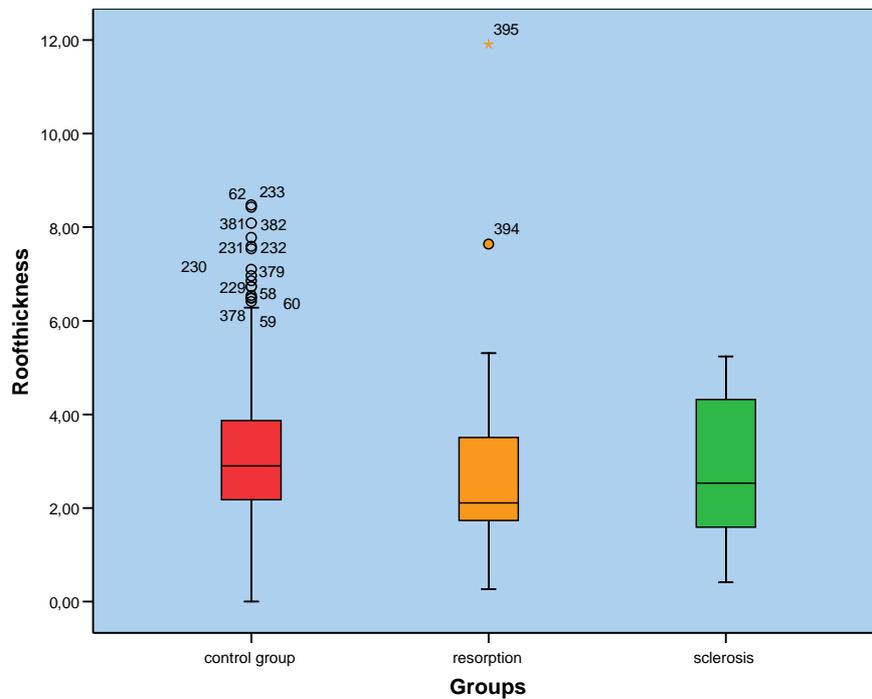


Abbildung 3.5: Gegenüberstellung der roofthickness in Abhängigkeit von der Gruppeneinteilung mittels eines Boxplots. Es konnte ein signifikanter Unterschied ($p=0,004$) zwischen der Gruppe „control group“ und der Gruppe „resorption“ herausgestellt werden. Alle anderen Kombinationen wiesen keine signifikanten Unterschiede auf.

3.4 Quantitäten der Lufteinschlüsse im Dach der Fossa

Lufteinschlüsse im Dach der Fossa mandibularis konnten bei 47,5 % von 451 Gelenken beobachtet werden. Davon wurden 16,2% mit „poor“ (wenige Pneumatisierungen), 18,6% mit „moderate“ (mäßige Pneumatisierungen) und 12,6% mit „considerable“ (umfangreiche Pneumatisierungen) bewertet.

In der Kontrollgruppe waren in 52,1% der 328 Fälle keine Pneumatisierungen zu erkennen. Die restlichen Gelenke teilten sich zu 16% in „poor“, zu 18,3% in „moderate“ und zu 13,6% in „considerable“ auf. Die Gelenke mit Resorptionen enthalten zu 53,1% keine, zu 16,3% wenige, zu 20,4% mäßige und zu 10,2% umfangreiche Lufteinschlüsse im Fossadach. Gelenke mit Sklerosierungen enthalten zu 60% keine, zu 20% wenige, zu 20% mäßige Lufteinschlüsse. Mit „considerable“ wurde keines der 20 sklerosierten Gelenke bewertet.

Tabelle 3

Häufigkeiten der Lufteinschlüsse

| | | | air (air cells) | | | | Gesamt |
|----------|-----------------|----------------|-----------------|-------|----------|--------------|--------|
| | | | none | poor | moderate | considerable | |
| Code_cat | Kontrollgruppe | Anzahl | 199 | 61 | 70 | 52 | 382 |
| | | % von Code_cat | 52,1% | 16,0% | 18,3% | 13,6% | 100,0% |
| Code_cat | Resorptionen | Anzahl | 26 | 8 | 10 | 5 | 49 |
| | | % von Code_cat | 53,1% | 16,3% | 20,4% | 10,2% | 100,0% |
| Code_cat | Sklerosierungen | Anzahl | 12 | 4 | 4 | 0 | 20 |
| | | % von Code_cat | 60,0% | 20,0% | 20,0% | ,0% | 100,0% |
| Gesamt | | Anzahl | 237 | 73 | 84 | 57 | 451 |
| | | % von Code_cat | 52,5% | 16,2% | 18,6% | 12,6% | 100,0% |

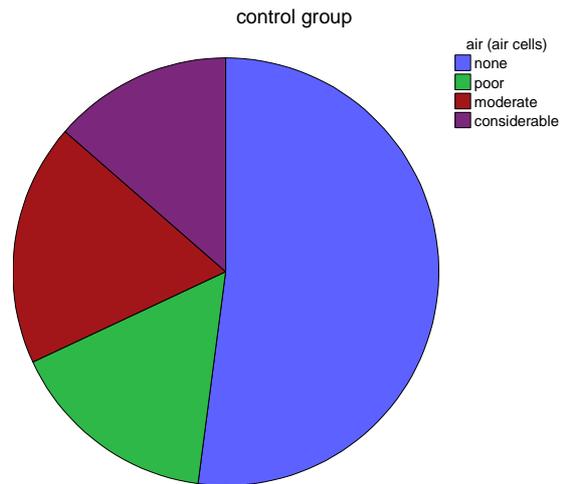


Abbildung 3.6: Pneumatisationsgrade innerhalb der Kontrollgruppe.

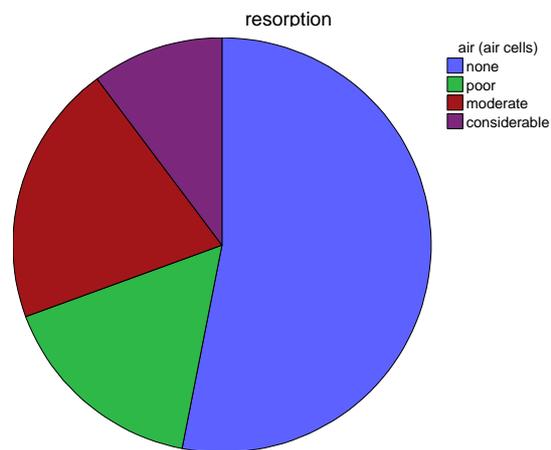


Abbildung 3.7: Pneumatisationsgrade innerhalb der Resorptionsgelenke.

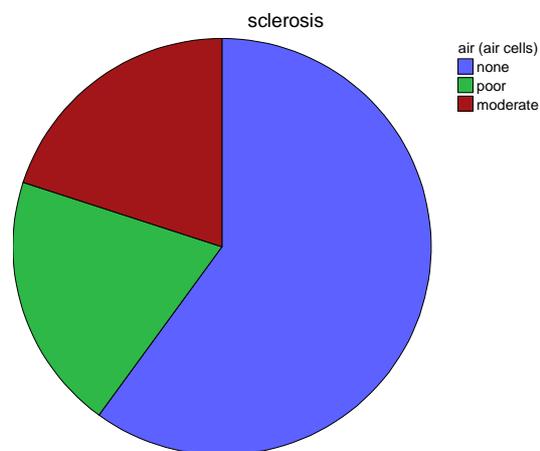


Abbildung 3.8: Pneumatisationsgrade innerhalb der sklerosierten Gelenke.

3.5 Reproduktion der Z-Project-Methode

Die Reliabilität der Z-Project Methode wurde durch den „Kendall-Tau-b-Test“ überprüft. Getestet wurde die intra- und interindividuelle Reproduzierbarkeit. Der Umfang der Reproduktion betrug 20 Gelenke. Der Korrelationskoeffizient für die intraindividuelle Reproduzierbarkeit betrug 93,7 % (vgl. Tab. 4). Er errechnet sich aus einer ersten Messung (roofthickness 1) und der um sechs Monate versetzten zweiten Messung des gleichen Observers (roofthrep.). Der Korrelationskoeffizient zum Erhalt der interindividuellen Reproduzierbarkeit ergibt sich aus den unabhängigen Messungen zweier unterschiedlicher Observer (roofthickness 1 & roofthrep2). Dieser beträgt 91,6% (vgl. Tab.5).

Tabelle 4

Reproduktion der Z-Project-Methode (Intraobserver)

| | | | roof thickness 1 | roofthrep |
|---------------|------------------|-------------------------|------------------|-----------|
| Kendall-Tau-b | roof thickness 1 | Korrelationskoeffizient | 1,000 | ,937** |
| | | Sig. (2-seitig) | . | ,000 |
| | | N | 403 | 20 |
| | roofthrep | Korrelationskoeffizient | ,937** | 1,000 |
| | | Sig. (2-seitig) | ,000 | . |
| | | N | 20 | 20 |

** Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Tabelle 5

Reproduktion der Z-Project-Methode (Interobserver)

| | | | roof thickness 1 | roofthrep2 |
|---------------|------------------|-------------------------|------------------|------------|
| Kendall-Tau-b | roof thickness 1 | Korrelationskoeffizient | 1,000 | ,916** |
| | | Sig. (2-seitig) | . | ,000 |
| | | N | 403 | 20 |
| | roofthrep2 | Korrelationskoeffizient | ,916** | 1,000 |
| | | Sig. (2-seitig) | ,000 | . |
| | | N | 20 | 20 |

** Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

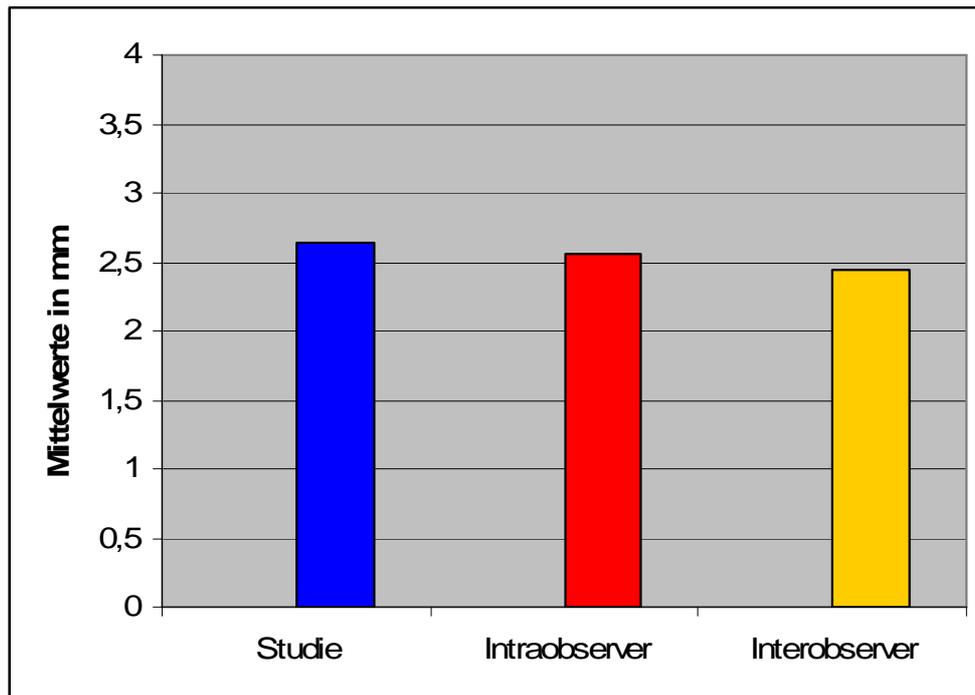


Abbildung 3.9: Grafische Darstellung der durchschnittlichen roofthickness resultierend aus den Messungen der Studie, des Intraobservers und des Interobservers.

Der Mittelwert der Studienmessung lag bei 2,64mm. Das arithmetische Mittel der Reproduktion durch den Intraobserver betrug 2,55mm. Die Reproduktion der Z-Project-Methode durch den Interobserver betrug im Durchschnitt 2,45mm.

4. Diskussion

Bisher sind nur wenige Studien zu finden, die sich mit der Dicke des Daches der Fossa mandibularis beschäftigt haben. Nachfolgend werden die Validität der Z-Project-Methode und die durch sie erhaltenen Ergebnisse bezüglich der roofthickness mit der vorhandenen Literatur diskutiert. Da die Messwerte der einzelnen Studien nicht auf derselben Untersuchungsmethode basieren, sind die absoluten Werte nur bedingt miteinander in Zusammenhang zu setzen (vgl. Tabelle 6). Werden jedoch die jeweiligen Methoden mit ihren Regeln konstant eingehalten, können die daraus gewonnenen Daten innerhalb einer Studie in Relation gesetzt werden. Daraus gewonnene Aussagen lassen sich dann wiederum mit der vorliegenden Literatur diskutieren.

4.1 Evaluation der Z-Project-Methode

Die Z-Project-Methode ermöglicht, die roofthickness der Kiefergelenke über CT-Bilder auf eine schnelle und kostengünstige Weise zu vermessen. Die Reliabilität der Methode wurde durch einen Intra- und Interobserver überprüft und erwies sich als sehr hoch. Der Kendall-Tau-b-Test errechnete für den Intraobserver einen Korrelationskoeffizienten von 93,7%, der Interobserver kam auf 91,6%.

Anhand eines Durchführungsprotokolls (vgl. Kapitel 2.3.1) wird die Methode Schritt für Schritt erklärt und eine methodengerechte Anwendung gewährleistet. Somit ist es möglich, die bestehende Datenbank mit einer hohen Konstanz auch durch weitere Observer zu vergrößern und Aussagen zur roofthickness weiter zu präzisieren.

4.2 Mittelwerte der roofthickness (Kontrollgruppe)

Tabelle 6

| Studie | Mittelwert | Standartabweichung | Methode | untersuchte Gelenke |
|---------------|-------------------|---------------------------|-------------------|----------------------------|
| Honda I | 1,37mm | 0,72mm | Schieblehre | 42 |
| Honda II | 1,22mm | 0,63mm | Computertomograph | 42 |
| Honda III | 0,6mm | 0,25mm | Schieblehre | 61 |
| Tsuruta | 0,7mm | 0,12mm | Computertomograph | 24 |
| Matsumoto | 0,85mm | 0,31mm | Computertomograph | 70 |
| Greene | 0,9mm | k.A. | Schieblehre | 10 |
| Studie MS | 3,16mm | 1,5mm | Computertomograph | 365 |

Für die roofthickness ergibt die Mittelwertberechnung aus den 365 untersuchten Gelenken, die keinen Anhalt für eine Pathologie gaben, einen Wert von $3,16 \pm 1,5$ mm. In der Literatur findet man variable Angaben zu diesem Wert. HONDA, dessen Studie anhand von acht männlichen und 13 weiblichen Körperspendern durchgeführt wurde, gibt einen Mittelwert von $1,37 \pm 0,72$ mm bei einem Wertebereich von 0,55 - 3,7 mm an. Diese Werte basieren auf der Ermittlung durch eine digitale Schieblehre (Abb.1.7). In einer Reevaluation durch das 3DX System, wurden dieselben Patienten ein zweites Mal vermessen. Aus dieser Messung ergab sich ein Mittelwert von $1,22 \pm 0,63$ mm bei einem Wertebereich von 0,51 – 3 mm [19]. In einer weiteren Studie vermaß HONDA 30 männliche und 31 weibliche Gelenke erneut mit einer digitalen Schieblehre. Er ermittelte hierbei eine mittlere roofthickness von $0,6 \pm 0,25$ mm (Wertebereich: 0,2 – 1,5 mm) [21]. TSURUTA [50] ermittelte durch einen Computertomographen aus einem Patientenfundus von 24 Gelenken eine mittlere roofthickness von $0,7 \pm 0,12$ mm. MATSUMOTO [27] verwendete in einer Studie das 3DX System, das schon zuvor HONDA benutzte. Er gibt einen Mittelwert von $0,85 \pm 0,31$ mm an. Die Untersuchungen von GREENE [14] ergaben durchschnittlich 0,9 mm bei einem Werteintervall von 0,5 mm bis 1,5 mm.

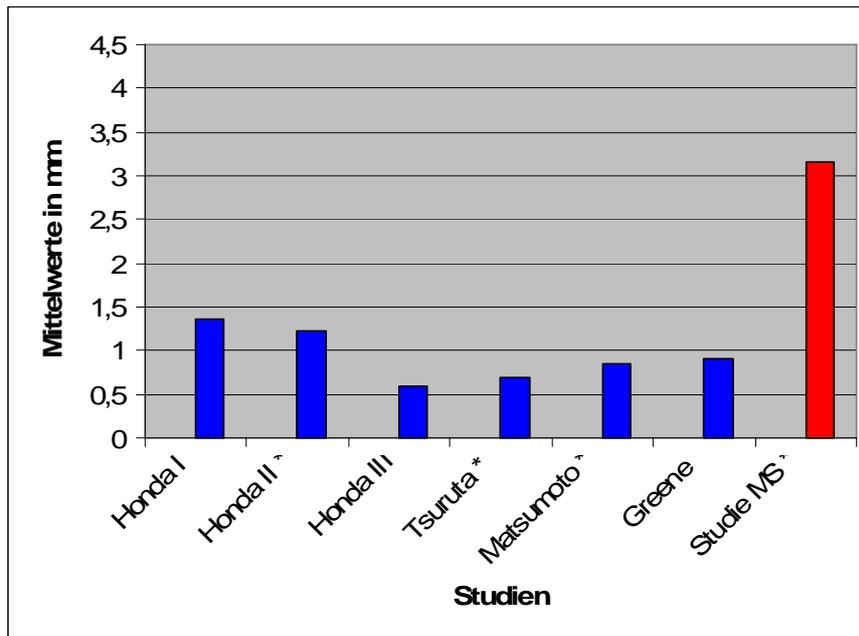


Abbildung 4.1: Vergleich der in sieben unabhängigen Studien durchschnittlich gemessenen roofthickness. Mit einem Sternchen wurden Studien gekennzeichnet, die mit einem Computertomographen gearbeitet haben.

Der Mittelwert dieser Arbeit liegt mit $3,16 \pm 1,5$ mm deutlich über den Werten der Literatur. Gründe für diese Abweichung sind vor Allem durch die eigens konzipierten Regeln (Kapitel 2.3.1.2) zu erklären. Anhand eines Beispiels soll aufgezeigt werden, wie es zu dieser systematischen Abweichung kommt.

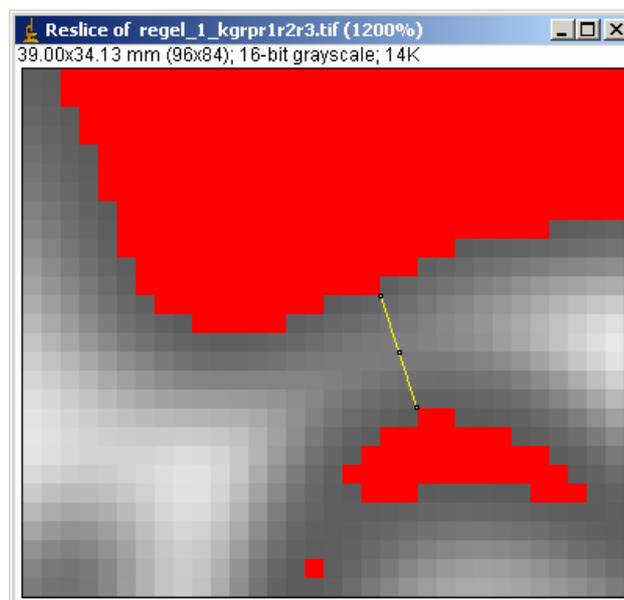


Abbildung 4.2: Die Ausdehnung der kürzesten Strecke zwischen den Tresholdmarkierungen beträgt bei einer HU von 1224 2,55 mm.

In Abb. 4.2 erkennt man, dass der Gelenkspalt zwischen Kondylus und dem knöchernen Fossadach nur unvollständig von dem Threshold markiert wurde. Der maximal markierte Grauwert beträgt in dieser Abbildung 1224 HU und sollte demnach alle nichtknöchernen Strukturen anfärben. Da dies in Abb. 4.2 mit dem Gelenkspalt offensichtlich nicht geschehen ist, wird auf eine Regel zurückgegriffen. Nach Regel 1 (Kapitel 2.3.1.2) wird die kürzeste Strecke zwischen den Markierungsgrenzen gemessen, wenn die Linie der „*straight line selection*“ in der ihr durch die Koordinaten vorgegeben Ausrichtung innerhalb der Thresholdmarkierung liegt. Dabei bleiben die Einstellungen des Thresholds unverändert. Die roofthickness beträgt in diesem Falle 2,55mm. Zum Vergleich soll präsentiert werden, wie sich die roofthickness verändert, wenn man den maximalen Grauwert des Thresholds bis zu dem Wert erhöht, bei dem der nicht knöcherne Gelenkspalt vollständig angefärbt wird (Abb. 4.3). Die roofthickness wäre hierbei mit einer Ausdehnung von 1,2mm nur halb so groß.

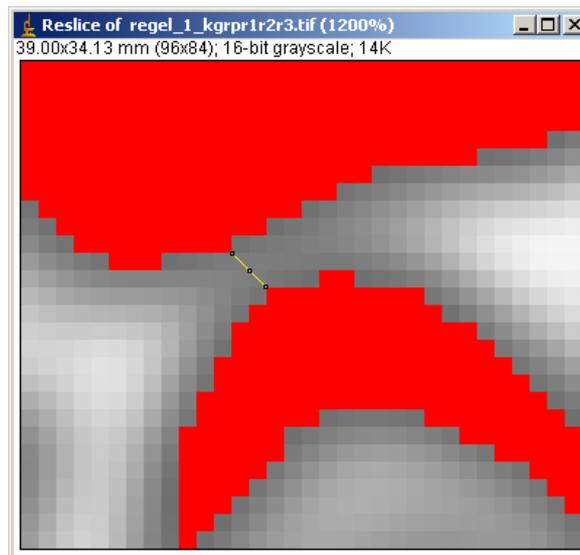


Abbildung 4.3: Die HU wurden sukzessiv erhöht bis der Gelenkspalt vollständig angefärbt ist. Die Ausdehnung der kürzesten Strecke zwischen den Markierungen beträgt jetzt 1,2 mm.

Diese Störfaktoren für die absoluten Werte der roofthickness konnten akzeptiert werden, weil für diese Studie die Reproduzierbarkeit von vorrangiger Bedeutung war. Es konnte mit Hilfe der Regeln der größte Patientenfundus aller themenverwandten Studien untersucht werden. Die stringente Methoden-

4. Diskussion

konstanz ermöglichte ferner, dass die Ergebnisse innerhalb der Studie miteinander vergleichbar sind. Nach studieninterner Ausarbeitung konnten die daraus gewonnenen Erkenntnisse mit der Literatur diskutiert werden.

Abweichungen in der absoluten rooffthickness zwischen Auswertungen durch Computertomographen und den direkten Messungen am Knochen durch Schieblehren, wie sie HONDA beschreiben konnte [19], resultieren insbesondere aus dem „Partial-Volumen-Effekt“. Er ergibt sich bei Übergängen zwischen einzelnen Geweben und bei Läsionen, die kleiner sind als die Schichtdicke des CT-Bildes. Um den unerwünschten Effekt zu minimieren, sollte man die Schichtdicke des Bildes minimieren [25].

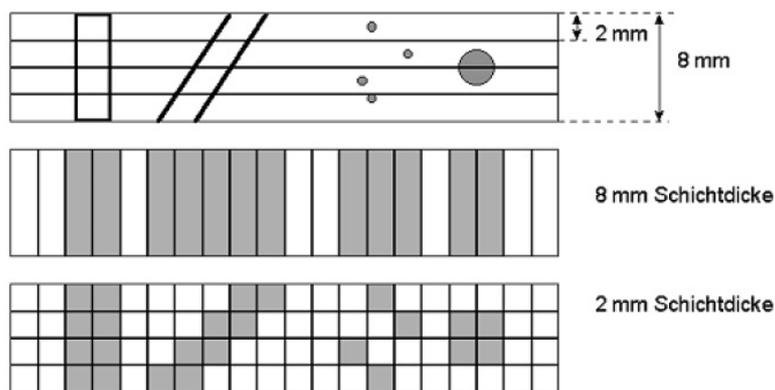


Abbildung 4.4: Grafische Darstellung des Partial-Volumen-Effekts. Die erste Reihe zeigt das Originalobjekt. In der zweiten und dritten Reihe werden die Darstellungen des Objektes über das CT-Bild bei 8mm bzw. 2mm Schichtdicke dargestellt.

4.3 Abhängigkeiten der roofthickness

4.3.1 Alter und Geschlecht (Kontrollgruppe)

Bisher wurde nur in einer weiteren Arbeit [20] die roofthickness in Abhängigkeit vom Alter und vom Geschlecht untersucht. Dazu wurden 49 Fossadächer von 85 Verstorbenen ausgewählt und mit Hilfe eines digitalen Mikrometers an ihrer dünnsten Stelle vermessen. Das Patientengut verteilte sich nahezu gleichmäßig auf Männer und Frauen. Das Alter lag zwischen 50 und 96 Jahren, wobei das Durchschnittsalter 73,8 Jahre betrug. Die aus der Studie gewonnenen Ergebnisse konnten keine Korrelation zwischen Geschlecht und Alter mit der roofthickness zeigen [20].

In der vorliegenden Studie konnte mit 365 untersuchten Gelenken ein deutlich größeres Patientengut und ein erweiterter Altersbereich (16-80 Jahre) ausgewertet werden auf. Die Ergebnisse der Studie HONDAS, die keine signifikanten Korrelationen zwischen dem Alter und dem Geschlecht ergeben hatte, konnten durch die vorliegende Studie bestätigt und erweitert werden.

4.3.2 Gelenkseite (Kontrollgruppe)

In der Literatur wurde bisher nicht beschrieben, ob es Unterschiede der roofthickness zwischen den Gelenkseiten gibt. Unsere Ergebnisse besagen, dass das arithmetische Mittel der Gesamtheit der linken Gelenke hoch signifikant ($p = 0,01$) über dem der Gesamtheit der rechten Gelenke liegt. Über Gründe für diesen hoch signifikanten Unterschied kann nur spekuliert werden. Eventuell gibt es einen Zusammenhang zwischen der roofthickness und der bevorzugten Kauseite der Patienten. Als Kauschlaufe bezeichnet man den Weg, den ein unterer Arbeitshöcker während des Kauaktes vollzieht. Dreidimensional betrachtet gleitet der Höcker zuerst leicht nach medial, schwingt dann nach

lateral distal um dann wieder in die antagonistische Fossa gezogen zu werden. Damit es zu der beschriebenen lateralen Versetzung des Unterkiefers zur Arbeitsseite kommen kann, muss der Musculus pterygoideus lateralis der Gegenseite kontrahieren. Durch die Kontraktion wird der Kondylus der Balanceseite vorverlagert und auch das viskoelastische Gewebe gedehnt. In Anlehnung daran soll auf die in Kapitel 1.1.3.2 beschriebene „growth relativity Theorie“ verwiesen werden, die die Vorverlagerung und die Dehnung des viskoelastischen Gewebes als die Hauptstimuli für Knochenapposition im Bereich des Kondylus und der Fossa angibt [52]. Folglich ist es anzunehmen, dass auch der Kauakt einen funktionellen Faktor für das Wachstum der Fossa mandibularis und damit auch auf die roofthickness darstellt. Um dies weiter zu verifizieren, könnte man in nachfolgenden Studien versuchen, die bevorzugte Kauseite über Abrasionsgrade der Zahnreihen zu lokalisieren und sie in Verbindung mit der roofthickness zu stellen.

4.3.3 Resorptionen und Sklerosierungen

Unsere Studie ergibt für die Studiengruppe „resorption“ die kleinste mittlere roofthickness. Dies jedoch ist konträr zur der Schlussfolgerungen, die sich aus der „growth relativity“ ableiten lässt (vgl. Kapitel 1.3.2). Die „growth relativity“ besagt, dass sich das Wachstum der Fossa relativ zu der Verlagerung des Kondylus verhält und dass nach Änderung der Kondylus-Fossa-Relation, beide Komponenten bestrebt sind, ihr physiologisches Ausmaß wieder anzunehmen [52]. In der dazugehörigen Studie von VOUDOURIS wurde der Kondylus mit Hilfe von kieferorthopädischen Geräten aus der Fossa herausgezogen. So gesehen wurde also der Anteil des Kondylus innerhalb der Gelenkgrube verkleinert und die physiologische Kondylus-Fossa-Relation beeinflusst. Ebenso wird die Relation verändert bei Sklerosierungen und Resorptionen, die eine relative Massenzunahme (Sklerosierungen) bzw. relative Massenabnahme (Resorptionen) des Kondylus mit sich ziehen.

Folglich erwartet man nach der „growth relativity“ eine Knochenapposition der Fossadächer bei resorbierten beziehungsweise Knochenresorptionen bei sklerosierten Kondylen.

Dass diese Hypothese anhand unserer Daten nicht bestätigt werden konnte, liegt wahrscheinlich zu einem Großteil an unserer eigenen Definition für „resorption“ und „sclerosis“ (Kapitel 2.2.1.2 bzw. 2.2.1.3). Wir orientierten uns bei der Definition nicht an dem Krankheitsbild, sondern an der Kondylus-Fossa-Relation. Somit gibt es Fälle, die mit „resorption“ bezeichnet wurden, obwohl sie einen stark sklerosierten Kondylus zeigen, der aber aus der Fossa herausgewandert ist und somit die Kondylus-Fossa-Relation trotzdem verkleinert hat. Ein extremes Beispiel für diesen methodischen Fehler wird in Abbildung 4.5 präsentiert. Es zeigt sich ein außergewöhnlich stark vergrößerter Kondylus, der sich weit von seiner physiologischen Fossaposition nach kaudal und anterior des Tuberculum articulare positioniert hat.



Abbildung 4.5: Der Kondylus ist unphysiologisch außerhalb seiner Fossa positioniert. Daher nimmt trotz des hyperplastischen Kondylus die Kondylus-Fossa Relation ab.

4.4 Vorkommen von Lufteinschlüssen

Aus unseren Ergebnissen ist zu folgern, dass nahezu die Hälfte der von uns bewerteten Gelenke Pneumatisierungen im Dach der Fossa mandibularis enthielten. Bezogen auf die einzelnen Pneumatisierungsgrade verhielten sich die Kontrollgruppe und die Gruppe der Resorptionen ähnlich. In der Gruppe der Sklerosierungen waren insgesamt weniger Pneumatisierungen zu betrachten. Diese Ergebnisse korrelieren mit den Aussagen von STAMM [48]. Er behauptet, dass die Fossa in der Lage ist, relativ zeitnah auf Änderungen der physiologischen Kondylus-Fossa-Relation durch Knochenneubildungen bzw. Knochenresorptionen zu reagieren. Deshalb modelliert der Knochen als Reaktion auf eine Kondylusresorption zunächst primär ein Leitgerüst, in das nicht kalzifizierte Bereiche mit eingeschlossen werden. Im Umkehrschluss muss das Gelenk auf einen sklerosierten Kondylus mit einer Resorption der Gelenkpfanne reagieren. Die Knochenstruktur zwischen Fossa mandibularis und Fossa cranii media wird dabei zunehmend dünner und Pneumatisierungen müssen durch Hartsubstanz zur Stabilisierung ersetzt werden.

4.5 Schlussfolgerung

Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass die Z-Projekt-Methode zur Erlangung der roofthickness eine reliable und einfache Methode ist. Dennoch sollte sie nicht zur Ermittlung absoluter Werte für die roofthickness angewendet werden. Die ermittelten Werte sollten vielmehr relativ gesehen und in Verbindung mit der Literatur ausgewertet werden. Der große Vorteil dieser Methode ist, dass man sich aus Archiven jeglicher CT-Aufnahmen bedienen kann, die das Kiefergelenk darstellen. Somit ist es möglich, ein umfangreiches und ausgeglichenes Patientenkollektiv zu untersuchen. Dies scheint von besonderer Bedeutung zu sein, da sich bisher nur wenige Studien mit geringen Patientenzahlen dem Thema der roofthickness angenommen haben.

Ergebnisse dieser Studie können vor allem die vorhandene Literatur in ihren Aussagen stützen und Tendenzen in neuen Untersuchungsgebieten aufzeigen. Um diese Tendenzen, besonders denen im Bereich der gelenksseitenabhängigen roofthickness und der funktionsabhängigen Pneumatisation innerhalb des Kiefergelenkes, weiter zu verifizieren, sollten diese Themen in folgenden Studien aufgegriffen und mit Hilfe neuer Methoden untersucht werden.

5. Zusammenfassung

Das Kiefergelenk (*Articulatio temporomandibularis*) nimmt aufgrund seiner speziellen Morphologie eine besondere Stellung unter den Gelenken ein. Für alle Disziplinen der Zahnheilkunde ist es von großem Interesse, wie sich das Gelenk auf funktionelle Einflüsse hin verhält. Stellvertretend für die Adaptationsvorgänge des Gelenkes wird die Knochendicke zwischen *Fossa mandibularis* und der *Fossa cranii media* vermessen und auf Abhängigkeiten überprüft.

Anhand der frei zugänglichen Bildbearbeitungssoftware ImageJ wurde eine Methode entwickelt mit der sich das Dach der *Fossa mandibularis* an seiner dünnsten Stelle (*roofthickness*) anhand von Computertomographie-Datensätzen lokalisieren und vermessen lässt. Regeln wurden aufgestellt um ein konstantes Verfahren zu ermöglichen.

Das Patientenkollektiv enthielt 219 männliche und 232 weibliche Gelenke. Diese wurden je nach Befund in drei Gruppen eingeteilt. 49 Gelenke zeigten resorptive Veränderungen und wurden der Gruppe „resorption“ zugeteilt. Sklerosierungen traten bei 20 Gelenken auf. Sie bildeten die Befundgruppe „sclerosis“. Den beiden genannten Gruppen wurde die Kontrollgruppe „control“ mit 382 Gelenken gegenübergestellt. Sie zeigten keinerlei pathologische Kiefergelenksveränderungen.

Die Reliabilität der Z-Project Methode wurde durch einen Intra- und Interobserver anhand von 20 zufällig ausgewählten Gelenken überprüft. Die intraindividuelle Reproduktion ergab 93,7%. Die interindividuelle Reproduktion 91,6%.

Bezüglich der *roofthickness* konnte eine signifikante Abhängigkeit von der Gelenkseite herausgestellt werden. Abhängigkeiten zwischen dem Alter, dem Geschlecht und den Befundgruppen konnten nicht nachgewiesen werden. Die

durchschnittliche roofthickness der Studie beträgt $3,2 \text{ mm} \pm 1,5$. Das Wertintervall erstreckt sich von 0 mm bis 8,5 mm.

Zusätzlich wurden Gelenke mit Lufteinschlüssen innerhalb des Daches der Fossa mandibularis, über deren Ätiologie in verschiedenen Arbeiten spekuliert wird, in vier Gruppen „none“, „poor“, „moderate“, und „considerable“ nach dem Ausmaß ihrer Pneumatisierungen eingeteilt.

Aus den ausgewerteten Daten lassen sich nachstehende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Z-Project Methode hat sich als ein sehr reliables Verfahren zur Ermittlung der roofthickness bewährt.
- Eine Ermittlung absoluter Werte ist mit dieser Methode jedoch nicht möglich. Sie müssen zunächst relativ interpretiert und dann in Verbindung mit der Literatur ausgewertet werden.
- Zur roofthickness in Verbindung mit dem Alter, dem Geschlecht und der Befundgruppen konnten die Ergebnisse vorausgegangener Studien untermauert werden. Bezüglich der Abhängigkeit der roofthickness von der Gelenkseite konnte eine bisher nicht entdeckte Feststellung gemacht werden.
- Zudem konnte tendenziell gezeigt werden, dass das Kiefergelenk auf funktionelle Einflüsse mit der Bildung von pneumatisierten Knochen reagiert.

6. Literaturverzeichnis

1. Barron RP, Kainulainen VT, Gusenbauer AW, Hollenberg R, Sandor GK: Management of traumatic dislocation of the mandibular condyle into the middle cranial fossa. *J Can Dent Assoc* 2002; 68:676-680.
2. Barron RP, Kainulainen VT, Gusenbauer AW, Hollenberg R, Sandor GK: Fracture of glenoid fossa and traumatic dislocation of mandibular condyle into middle cranial fossa. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2002; 93:640-642.
3. Betz BW, Wiener MD: Air in the temporomandibular joint fossa: CT sign of temporal bone fracture. *Radiology* 1991; 180:463-466.
4. Brosius F: SPSS für Dummies. 1. Aufl ed. Weinheim, Bergstr: Wiley-Vch, 2007.
5. Bücheler E, Götttsche T: Einführung in die Radiologie : Diagnostik und Interventionen ; 116 Tabellen. 11., völlig überarb. und erw. Aufl ed. Stuttgart u.a.: Thieme, 2006.
6. Buschang PH, Santos-Pinto A: Condylar growth and glenoid fossa displacement during childhood and adolescence. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1998; 113:437-442.
7. Chuang SY: The relationship between masticatory function and craniofacial morphology. *Gaoxiong Yi Xue Ke Xue Za Zhi* 1995; 11:458-469.
8. de Leeuw R, Boering G, Stegenga B, de Bont LG: Temporomandibular joint osteoarthritis: clinical and radiographic characteristics 30 years after nonsurgical treatment: a preliminary report. *Cranio* 1993; 11:15-24.
9. Elgoyhen JC, Moyers RE, McNamara JA, Jr, Riolo ML: Craniofacial adaptation of protrusive function in young rhesus monkeys. *Am J Orthod* 1972; 62:469-480.
10. Enlow DH, Hans MG: Essentials of facial growth. Philadelphia u.a.: Saunders, 1996.
11. Faerber TH, Ennis RL, Allen GA: Temporomandibular joint ankylosis following mastoiditis: report of a case. *J Oral Maxillofac Surg* 1990; 48:866-870.

12. Franchi L, Baccetti T, McNamara JA,Jr: Treatment and posttreatment effects of acrylic splint Herbst appliance therapy. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999; 115:429-438.
13. Fuchihata H, International Congress of Dento-Maxillo-Facial Radiology: Oral and maxillofacial radiology today : proceedings of the 12th International Congress of Dentomaxillofacial Radiology, Osaka, Japan, June 26 - July 1, 1999. 11991st ed. Amsterdam u.a.: Elsevier, 2000.
14. Greene MW, Hackney FL, Van Sickels JE: Arthroscopy of the temporomandibular joint: an anatomic perspective. *J Oral Maxillofac Surg* 1989; 47:386-389.
15. Groell R, Fleischmann B: The pneumatic spaces of the temporal bone: relationship to the temporomandibular joint. *Dentomaxillofac Radiol* 1999; 28:69-72.
16. Hinton RJ, Carlson DS (1997) Effect of function on growth and remodeling of the temporomandibular joint. In: Mc Neill C (ed.) *Science and practice of occlusion* Quintessence, Chicago, pp. 95-110.
17. Hinton RJ, McNamara JA,Jr: Temporal bone adaptations in response to protrusive function in juvenile and young adult rhesus monkeys (*Macaca mulatta*). *Eur J Orthod* 1984; 6:155-174.
18. Hiyama S, Ono PT, Ishiwata Y, Kuroda T, McNamara JA,Jr: Neuromuscular and skeletal adaptations following mandibular forward positioning induced by the Herbst appliance. *Angle Orthod* 2000; 70:442-453.
19. Honda K, Arai Y, Kashima M, et al: Evaluation of the usefulness of the limited cone-beam CT (3DX) in the assessment of the thickness of the roof of the glenoid fossa of the temporomandibular joint. *Dentomaxillofac Radiol* 2004; 33:391-395.
20. Honda K, Kawashima S, Kashima M, Sawada K, Shinoda K, Sugisaki M: Relationship between sex, age, and the minimum thickness of the roof of the glenoid fossa in normal temporomandibular joints. *Clin Anat* 2005; 18:23-26.

6. Literaturverzeichnis

21. Honda K, Larheim TA, Sano T, Hashimoto K, Shinoda K, Westesson PL: Thickening of the glenoid fossa in osteoarthritis of the temporomandibular joint. An autopsy study. *Dentomaxillofac Radiol* 2001; 30:10-13.
22. http://miami.uni-muenster.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-2983/diss_fleuter.pdf
23. http://www.statsdirect.com/help/nonparametric_methods/mwt.htm
24. Ingervall B, Bitsanis E: Function of masticatory muscles during the initial phase of activator treatment. *Eur J Orthod* 1986; 8:172-184.
25. Laubenberger T, Laubenberger J: Technik der medizinischen Radiologie : Diagnostik, Strahlentherapie, Strahlenschutz ; für Ärzte, Medizinstudenten und MTRA ; mit Anleitung zur Strahlenschutzbelehrung in der Röntgendiagnostik ; [mit 98 Tabellen]. 6., völlig überarb. Aufl ed. Köln: Dt. Ärzte-Verl., 1994.
26. Link TM, Heppe A, Meier N: Physikalische und technische Grundlagen der Radiologie : Fragen und Antworten ; mit 12 Tabellen. 2., erw. und aktualisierte Aufl ed. Berlin u.a.: Springer, 1998.
27. Matsumoto K, Honda K, Sawada K, Tomita T, Araki M, Kakehashi Y: The thickness of the roof of the glenoid fossa in the temporomandibular joint: relationship to the MRI findings. *Dentomaxillofac Radiol* 2006; 35:357-364.
28. McNamara JA,Jr: Neuromuscular and skeletal adaptations to altered function in the orofacial region. *Am J Orthod* 1973; 64:578-606.
29. McNamara JA,Jr, Bryan FA: Long-term mandibular adaptations to protrusive function: an experimental study in *Macaca mulatta*. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1987; 92:98-108.
30. McNamara JA,Jr, Bryan FA: Long-term mandibular adaptations to protrusive function: an experimental study in *Macaca mulatta*. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1987; 92:98-108.

31. Mills CM, McCulloch KJ: Posttreatment changes after successful correction of Class II malocclusions with the twin block appliance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2000; 118:24-33.
32. Moffet BC, Johnson LC, McCabe JB, Askew HC (1964) Articular remodeling in the adult human temporomandibular joint. *Am J Anat.* 115: 119-142.
33. Moll K, Moll M: Anatomie : Kurzlehrbuch zum Gegenstandskatalog ; [neuer GK, GK 1]. 17., überarb. Aufl ed. München u.a.: Urban & Fischer, 2003.
34. Murray GM, Orfanos T, Chan JY, Wanigaratne K, Klineberg IJ: Electromyographic activity of the human lateral pterygoid muscle during contralateral and protrusive jaw movements. *Arch Oral Biol* 1999; 44:269-285.
35. Pancherz H: The nature of Class II relapse after Herbst appliance treatment: a cephalometric long-term investigation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991; 100:220-233.
36. Pancherz H, Fischer S: Amount and direction of temporomandibular joint growth changes in Herbst treatment: a cephalometric long-term investigation. *Angle Orthod* 2003; 73:493-501.
37. Pancherz H, Littmann C: Morphology and position of mandible in Herbst treatment. Cephalometric analysis of changes to end of growth period. *Inf Orthod Kieferorthop* 1989; 21:493-513.
38. Pasler FA: Zahnärztliche Radiologie. 4., unveränd. Aufl ed. Stuttgart: Thieme, 2003.
39. Petrovic A: Control of postnatal growth of secondary cartilages of the mandible by mechanisms regulating occlusion. Cybernetic model. *Trans Eur Orthod Soc* 1974; 69-75.
40. Rohen JW, Yokochi C, Lütjen-Drecoll E: Anatomie des Menschen : fotografischer Atlas der systematischen und topografischen Anatomie. Sonderausg., 5., Neubearb. Aufl ed. Stuttgart u.a.: Schattauer, 2002.

6. Literaturverzeichnis

41. Ruf S, Pancherz H: Temporomandibular joint remodeling in adolescents and young adults during Herbst treatment: A prospective longitudinal magnetic resonance imaging and cephalometric radiographic investigation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999; 115:607-618.
42. Ruf S, Pancherz H: Temporomandibular joint growth adaptation in Herbst treatment: a prospective magnetic resonance imaging and cephalometric roentgenographic study. *Eur J Orthod* 1998; 20:375-388.
43. Schiebler TH, Arnold G: Anatomie : Zytologie, Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie des Menschen ; mit 119 Tabellen. 8. Aufl., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl ed. Berlin u.a.: Springer, 2003.
44. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Rude J, Voll M: Kopf und Neuroanatomie : 72 Tabellen. 3Stuttgart u.a.: Thieme, 2006.
45. Sessle BJ, Gurza SC: Jaw movement-related activity and reflexly induced changes in the lateral pterygoid muscle of the monkey *Macaca fascicularis*. *Arch Oral Biol* 1982; 27:167-173.
46. Sessle BJ, Woodside DG, Bourque P, et al: Effect of functional appliances on jaw muscle activity. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990; 98:222-230.
47. Sobotta J, Putz R, Pabst R: Atlas der Anatomie des Menschen : 2006, .
48. Stamm T , Beiträge zur Prozessqualität in der Planung orthognather und kraniofazialer Chirurgie: Gelenkposition und virtuelle Operation. Habilitationsschrift Münster, 2004.
49. Stutzmann JJ, Petrovic AG: Role of the lateral pterygoid muscle and meniscotemporomandibular frenum in spontaneous growth of the mandible and in growth stimulated by the postural hyperpropulsor. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1990; 97:381-392.
50. Tsuruta A, Yamada K, Hanada K, et al: Thickness of the roof of the glenoid fossa and condylar bone change: a CT study. *Dentomaxillofac Radiol* 2003; 32:217-221.

6. Literaturverzeichnis

51. Virapongse C, Sarwar M, Bhimani S, Sasaki C, Shapiro R: Computed tomography of temporal bone pneumatization: 1. Normal pattern and morphology. *AJR Am J Roentgenol* 1985; 145:473-481.
52. Voudouris JC, Kuftinec MM: Improved clinical use of Twin-block and Herbst as a result of radiating viscoelastic tissue forces on the condyle and fossa in treatment and long-term retention: growth relativity. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2000; 117:247-266.
53. Voudouris JC, Woodside DG, Altuna G, et al: Condyle-fossa modifications and muscle interactions during Herbst treatment, Part 2. Results and conclusions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124:13-29.
54. Voudouris JC, Woodside DG, Altuna G, Kuftinec MM, Angelopoulos G, Bourque PJ: Condyle-fossa modifications and muscle interactions during herbst treatment, part 1. New technological methods. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 123:604-613.
55. Waldeyer AJ, Fanghänel J: *Anatomie des Menschen*. 17., völlig überarb. Aufl. ed. Berlin u.a.: de Gruyter, 2003.
56. Whetten LL, Johnston LE,Jr: The control of condylar growth: an experimental evaluation of the role of the lateral pterygoid muscle. *Am J Orthod* 1985; 88:181-190.
57. Woodside DG, Altuna G, Harvold E, Herbert M, Metaxas A: Primate experiments in malocclusion and bone induction. *Am J Orthod* 1983; 83:460-468.

7. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1.1: Sagittalschnitt durch ein präpariertes Kiefergelenk [40] | 2 |
| Abbildung 1.2: Sagittalschnitt durch ein geöffnetes Kiefergelenk [47]..... | 4 |
| Abbildung 1.3: Skizze des histologischen Aufbaus eines Kondylus. a=Artikulationsfläche aus zellreichem Bindegewebe; b=Schicht mit praechondroblastischen Zellen; c=Schicht des reifenden Knorpels; d=endochondraler Knochen [10]..... | 8 |
| Abbildung 1.4: Hounsfield neben einem Computertomographen der ersten Generation..... | 12 |
| Abbildung 1.5: Moderner Computertomograph der Firma designafairs..... | 13 |
| Abbildung 1.6: Diagramm zur Darstellung einzelner Gewebe und ihrer zugehörigen Hounsfield-Unit..... | 14 |
| Abbildung 1.7: Das von HONDA benutzte Mircometer zur Vermessung des Fossadaches [19]..... | 18 |
| Abbildung 1.8: Transversaler Schnitt durch den Kopf eines Patienten mit Luft einschlüssen auf Höhe des Dachs der Fossa mandibularis. | 19 |
| Abbildung 1.9: Sagittalschnitt durch ein Kiefergelenk mit Luft einschlüssen im Dach der Fossa mandibularis..... | 20 |
| Abbildung 2.1: Das Balkendiagramm stellt die Altersverteilung aller untersuchten Gelenke grafisch dar..... | 24 |
| Abbildung 2.2: Gelenk der Kontrollgruppe ohne pathologische Veränderungen. | 26 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 2.3: Sagittalschnitt eines Resorptionsgelenks. Die Lamina Dura ist teilweise unterbrochen und der Kondylenkopf erscheint aufgelöst..... | 27 |
| Abbildung 2.4: Sagittalschnitt eines sklerosierten Gelenks. Der Gelenkspalt ist deutlich verkleinert. Der Kondylus stellt sich blasig dar..... | 28 |
| Abbildung 2.5: Ausgangsstack..... | 30 |
| Abbildung 2.6: Verkürzter Stack mit allen Schichten, die oberhalb des Kondylus liegen..... | 32 |
| Abbildung 2.7: Summation aller Graustufen der einzelnen Schichten zu einem Bild nach Anwendung des Z-Project Tools..... | 33 |
| Abbildung 2.8: Mit dem Tool „Polygon selections“ umrandete Gelenkkammer. | 34 |
| Abbildung 2.9: Lufteinschlüsse, die zu einer Verfälschung der Z-Project-Methode führen, werden von der Markierung des Gelenkspaltes ausgenommen..... | 35 |
| Abbildung 2.10: Aus diesem Fenster werden die Koordinaten entnommen. | 37 |
| Abbildung 2.11: Oben sieht man die zwei Steuerleisten des „Thresholds“. Dabei muss die obere Steuerleiste immer ganz links stehen und die untere soweit von links nach rechts geschoben werden, bis in dem Bild rechts unten ein roter Pixel innerhalb der Markierung auftaucht. Das Bild unten links zeigt, wie Lufteinschlüsse von der Markierung ausgeschlossen werden..... | 37 |
| Abbildung 2.12: Ausgangsstack mit vertikaler Markierung für die Herstellung eines Reslice..... | 38 |
| Abbildung 2.13: Aus dem ImageJ Hauptfenster kann der x-Wert, auf dem sich die Markierungslinie aus Abb. 2.11 befindet, abgelesen werden..... | 39 |

Abbildung 2.14: Sagittaler Reslice des in Abb. 2.12 markierten Bereiches. Die gelbe Line dient zum Auffinden der gesuchten y-Koordinate. 40

Abbildung 2.15: Links erkennt man die Verbindung der kürzesten Strecke; rechts ist der Threshold mit der für Knochen eingestellten Grenzwelle abgebildet..... 41

Abbildung 2.16: Fenster, aus dem man die gesuchte Streckenlänge unter „Length“ ablesen kann..... 42

Abbildung 2.18: Es ist deutlich zu erkennen, dass die Markierung, die den Gelenkspalt symbolisiert, noch nicht die gelbe Line erreicht hat. 44

Abbildung 2.19: Die untere Steuerleiste des Thresholds wurde über den Normalwert 1224 hinaus erhöht bis die Markierung des Gelenkspaltes die x-Koordinate der Markierungslinie erreicht hat. Die kürzeste Strecke wurde durch Variation des unteren Streckenendes markiert, wobei die Position des oberen Streckenendes erhalten bleibt. 45

Abbildung 2.20: Das Bild ist hier mit dem Tool „rectangular selections“ großzügig markiert. 46

Abbildung 2.21: Sagittale Darstellung des Gelenks zur optischen Eingrenzung. 47

Abbildung 2.22: Der rot eingefärbte Bereich stellt alle nichtknöchernen Anteile des Gelenks dar. 47

Abbildung 2.23: Transversaler (links) und sagittaler (rechts) Schnitt eines Gelenkes ohne Lufteinschlüssen..... 48

Abbildung 2.24: Transversaler (links) und sagittaler (rechts) Schnitt eines Gelenkes mit wenigen Lufteinschlüssen. 49

Abbildung 2.25: Transversaler (links) und sagittaler (rechts) Schnitt eines Gelenkes mit mäßigen Lufteinschlüssen..... 49

Abbildung 2.26: Transversaler (links) und sagittaler (rechts) Schnitt eines Gelenkes mit umfangreichen Lufteinschlüssen. 50

Abbildung 3.1: Gegenüberstellung der Roofthickness in Abhängigkeit vom Geschlecht mittels eines Boxplots. Es kann kein signifikanter Unterschied herausgestellt werden. 55

Abbildung 3.2: Lineare Darstellung der Abhängigkeit zwischen der Roofthickness von dem Alter bei Männern. Der nur schwache Grad an Steigung lässt auf keine signifikante Korrelation zwischen den beiden Variablen schließen..... 56

Abbildung 3.3: Lineare Darstellung der Abhängigkeit zwischen der Roofthickness und dem Alter bei Frauen. Auch hier weist der schwache Steigungsgrad auf keine signifikante Korrelation zwischen den beiden Variablen hin. 57

Abbildung 3.4: Gegenüberstellung der Roofthickness in Abhängigkeit von der Gelenkseite mittels eines Boxplots. Es konnte ein hoch signifikanter Unterschied ($p=0,01$) herausgestellt werden..... 58

Abbildung 3.5: Gegenüberstellung der Roofthickness in Abhängigkeit von der Gruppeneinteilung mittels eines Boxplots. Es konnte ein signifikanter Unterschied ($p=0,004$) zwischen der Gruppe „control group“ und der Gruppe „resorption“ herausgestellt werden. Alle anderen Kombinationen wiesen keine signifikanten Unterschiede auf. 59

Abbildung 3.6: Pneumatisationsgrade innerhalb der Kontrollgruppe..... 61

Abbildung 3.7: Pneumatisationsgrade innerhalb der Resorptionsgelenke. 61

Abbildung 3.8: Pneumatisationsgrade innerhalb der sklerosierten Gelenke. ... 61

Abbildung 3.9: Grafische Darstellung der durchschnittlichen Roofthickness resultierend aus den Messungen der Studie, des Intraobservers und des Interobservers. 63

Abbildung 4.1: Vergleich der in sieben unabhängigen Studien durchschnittlich gemessenen roofthickness. Mit einem Sternchen wurden Studien gekennzeichnet, die zur Messung sich eines Computertomographen bedienen. 66

Abbildung 4.2: Die Ausdehnung der kürzesten Strecke zwischen den Tresholdmarkierungen beträgt bei einer HU von 1224 2,55 mm..... 66

Abbildung 4.3: Die HU wurden sukzessiv erhöht, der Gelenkspalt vollständig angefärbt wurde. Die Ausdehnung der kürzesten Strecke zwischen den Markierungen beträgt jetzt 1,2 mm..... 67

Abbildung 4.4: Grafische Darstellung des Partialen-Volumen-Effekts. Die erste Reihe zeigt das Originalobjekt. In der zweiten und dritten Reihe werden die Darstellungen des Objektes über das CT-Bild bei 8mm bzw. 2mm Schichtdicke dargestellt..... 68

Abbildung 4.5: Der Kondylus ist in einer unphysiologisch außerhalb seiner Fossa positioniert. Daher nimmt trotz des hyperplastischen Kondylus die Kondylus-Fossa Relation ab..... 71

8. Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Häufigkeiten der Gelenke | 54 |
| Tabelle 2: Deskriptive Statistik der Roofthickness | 56 |
| Tabelle 3: Häufigkeiten der Lufteinschlüsse | 60 |
| Tabelle 4: Reproduktion der Z-Project-Methode (Intraobserver) | 62 |
| Tabelle 5: Reproduktion der Z-Project-Methode (Interobserver) | 62 |
| Tabelle 6: Vergleich der Studien zur roofthickness..... | 65 |

9. Anhang

9.1 Danksagung

Für die freundliche Überlassung des Themas dieser Arbeit und die zahlreichen Anregungen möchte ich mich bei Herrn Priv. Doz. Dr. Thomas Stamm bedanken.

Ein weiterer Dank gilt Frau Dr. Osada und Herrn Dr. Meier für Hilfestellungen im Bereich der Statistik und der medizinischen Physik.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich im Studium und während der Dissertation sehr unterstützt hat.

9.2 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Arndt, Christian

Geburtsdatum: 04.05.1983

Geburtsort: Dortmund

Familienstand: ledig

Staatsangehörigkeit: deutsch

Schullaufbahn

1989 – 1993 Schubert-Grundschule Dortmund

1993 – 2002 Max-Planck-Gymnasium Dortmund

06/2002 Erwerb der Allgemeinen Hochschulreife

Studienlaufbahn

10/2002 Beginn des Zahnmedizinstudiums an der
Westfälischen Wilhelms Universität Münster

09/2003 Naturwissenschaftliche Vorprüfung

03/2005 Zahnärztliche Vorprüfung

12/2007 Zahnärztliche Prüfung

Münster, den 14.12.2007