

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Direktor: Prof. Dr. Dr. Collin Jacobs, M.Sc

„Analyse des palatinalen Knochenangebots in transversaler und sagittaler  
Richtung zur Bestimmung der idealen Implantatinsertion“

Dissertation

Zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin  
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von  
Anela Mekic  
2026

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der  
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. dent. Manuel Nienkemper

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. dent. Alfons Hugger

Meinen Eltern, Ajka und Rasim Hodžić, gewidmet.

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Kathrin Becker, Anela Mekic, Manuel Nienkemper, Katharina Mücke, Lisa Josefine Langer, Anterior Palatal Bone Thickness: A Retrospective Cross-Sectional CBCT Pilot Study in Children and Adolescents. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*

## Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten wurde in der Kieferorthopädie ein großer Fokus auf die Erforschung und Anwendung von Mini-Implantaten gelegt. Diese dienen als Verankerungsmittel für kieferorthopädische Apparaturen [1,2,3]. Das Ziel dieser Studie ist es, einen Leitfaden für das Einsetzen von palatinalen Mini-Implantaten zu entwickeln, der es den Behandlern ermöglicht, das palatinale Knochenniveau von Kindern und Jugendlichen besser zu beurteilen und somit unter anderem den Bedarf an zusätzlichen Röntgenaufnahmen vor der Mini-Implantat Insertion zu verringern. Denn vor allem Kinder und Jugendliche sollten vor vermeidbarer Strahlenbelastung geschützt werden [4]. Obwohl klinische Studien bereits existieren, ist ihre Übertragbarkeit auf jüngere Patienten bislang unklar. Zu Beginn der Pilotstudie musste ein Ethikvotum angefordert werden, um die digitalen Röntgenaufnahmen von zwanzig Patienten aus dem Patientenpool der Heinrich-Heine-Universität verwenden zu können. Das Hauptaugenmerk bei der Auswahl der DVT-Aufnahmen lag auf dem Patientenalter, das zwischen sechs und achtzehn Jahren liegen sollte. Nach der einheitlichen Ausrichtung der DVT-Bilder entlang der Okklusal- und Sagittalebene konnten mediane Schnittbilder erstellt werden. In jedem Patientenfall wurden acht Schnittbilder erzeugt, die an der Verbindungslinie der Eckzahnsitzen beginnen und in einem Abstand von 1,2 Millimeter aufgenommen worden sind. Bei der Einzelbetrachtung der zahlreichen Schnittbilder musste ein einheitlicher Ausgangspunkt, ein Lagepasspunkt, für die Messung der Knochenhöhen gewählt werden. Dafür diente die Ortskodierung, auf der die Sutura Mediana zu liegen kam. Davon ausgehend wurden in einem Abstand von einem Millimeter die Knochenhöhen von der kaudalen Begrenzung nach kranial in einem Winkel von 90 Grad erfasst. Jeder Messwert kann einem zuvor bestimmten Messpunkt zugeordnet werden. Bei allen Studienteilnehmern wurde die Knochenhöhe an 104 Messpunkten ermittelt. Demnach wurden die palatinalen Knochenhöhen abhängig von den variablen Faktoren wie dem Patientenalter und Geschlecht und den festen Faktoren wie der Lage der Messpunkte in der Sagittalen und Transversalen verglichen. In sagittaler Richtung nahm die Knochenhöhe von anterior nach posterior signifikant ab ( $P < 0,001$ ). In transversaler Richtung zeigte sich ein V-förmiges Muster der Knochenhöhe, mit signifikant niedrigeren Werten im Bereich der Sutura und ansteigenden Werten in den paramedianen Abschnitten ( $P < 0,001$ .) Ältere Patienten (13-18 Jahre) wiesen im Vergleich zu den jüngeren höhere Knochenhöhenwerte in den eher posterioren Regionen auf ( $P < 0,001$ ), während männliche Patienten sowohl anterior als auch posterior größere Knochenhöhenwerte aufwiesen ( $P < 0,001$ )[5]. Weitere Studien sind notwendig, um die Entwicklung der palatinalen Knochenhöhe in Bezug auf Geschlecht und Alter während der Wachstumsphase näher zu untersuchen.

## Summary

In recent decades, the field of orthodontics has been intensively involved with the topic of mini-implants. Mini-implants are used as anchorage devices for orthodontic appliances [1,2,3]. The aim of this study is to develop a guideline for the placement of palatal mini-implants that will enable practitioners to better assess the palatal bone level of children and adolescents and thus reduce the need for additional radiographs. Above all, children and adolescents should be protected from avoidable radiation exposure [4]. Although clinical guidelines exist, their applicability to younger patients remains unclear. At the outset, an ethics vote had to be requested as the study was based on three-dimensional digital radiographs of twenty patients drawn from the local patient pool at Heinrich Heine University. The main consideration in the selection of the CBCT images was the patient age, which should be between six and eighteen years. After uniform alignment of the CBCT images along the occlusal and sagittal planes, median sectional images could be obtained. Eight cross-sectional images were generated in each patient case, starting at the junction line of the canine tips and acquired at a distance of 1.2 millimeters. When viewing the numerous sectional images individually, a uniform starting point, a positional control point, had to be selected for measuring the bone heights. For this purpose, the location coding on which the Sutura Mediana came to lie was used. Starting from this point, the bone heights were recorded at a distance of one millimeter from the caudal boundary to the cranial at an angle of ninety degrees. Each measured value can be assigned to a previously determined measuring point. In each case, bone heights were determined at 104 measurement points.

The palatal bone heights were compared based on variable factors such as patient age and gender, and fixed factors like the location of the measurement points in the sagittal and transverse directions. The study results show that the greatest bone availability is in the anterior palate. In the sagittal direction, bone height decreased significantly from anterior to posterior ( $P < 0.001$ ). In the transverse direction, there was a V-shaped pattern of bone height, with significantly lower values in the sutural region and increasing values in the paramedian sections ( $P < 0.001$ ). Older patients (13-18 years) had higher bone height values in the more posterior regions ( $P < 0.001$ ), while male patients had greater bone height values both anteriorly and posteriorly ( $P < 0.001$ )[5]. Further research is warranted to better understand how palatal bone height matures in relation to sex and age during growth.

## **Abkürzungsverzeichnis**

DGKFO	Deutsche Gesellschaft der Kieferorthopädie
DVT	Digitale Volumentomographie
CBCT	Cone Beam Computer Tomography
FRS	Fernröntgenseitenaufnahme
ICC	Intra-Klassen-Korrelation / Intra-Class Correlation
KFO	Kieferorthopädie
RG	Röntgengerät
ULD	Ultra Low Dose
WHO	World Health Organization

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	V
Summary .....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Die Anatomie des Gaumens .....	2
1.2 Das DVT in der Zahnmedizin.....	5
1.3 Orthodontische Mini-Implantate .....	11
1.4 Ziele der Arbeit.....	13
2 Material und Methode.....	15
2.1 Material .....	15
2.1.1 Studienpopulation.....	15
2.1.2 Ethikantrag .....	16
2.2 Methode .....	16
2.2.1 Messgitter.....	16
2.2.2 Ausrichtung der Datensätze .....	19
2.2.3 Messung der Knochenhöhe .....	20
2.2.4 Statistische Analysen .....	21
2.2.5 Darstellung der gemessenen Knochenhöhen .....	23
3 Ergebnisse.....	25
3.1 Studienpopulation .....	25
3.2 Statistische Ergebnisse.....	25
3.3 Gemessene Knochenhöhen .....	25
3.3.1 Palatinale Knochenhöhe in sagittaler Richtung.....	30
3.3.2 Einfluss von Alter und Geschlecht in sagittaler Richtung.....	31
3.3.3 Palatinale Knochenhöhe in transversaler Richtung.....	32
3.4 Der resultierende Knochenverlauf .....	37

4 Diskussion .....	41
4.1 Diskussion der Methode .....	<b>41</b>
4.1.1 Zur Studienpopulation .....	41
4.1.2 Zum Messgitter.....	43
4.1.3 Diskussion der Ausrichtung der Datensätze .....	44
4.2 Diskussion der statistischen Analyse.....	<b>45</b>
4.3 Diskussion der Ergebnisse .....	<b>46</b>
5 Ausblick .....	50
6 Fazit.....	51
7 Literaturverzeichnis .....	52
Anhang .....	61

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Kaudale Ansicht der Maxilla .....	2
Abbildung 2 Kaudale Ansicht des Gaumens mit Weichgewebsstruktur .....	4
Abbildung 3 DVT-Gerät, Technischer Aufbau und Funktionsprinzip der DVT.....	5
Abbildung 4 Orthodontisches Mini-Implantat aus dem Benefit System.....	12
Abbildung 5 Das Messgitter.....	18
Abbildung 6 a) Vollständiger Datensatz b) gefilterter Datensatz .....	19
Abbildung 7 Ausrichtung des Datensatzes .....	19
Abbildung 8 Darstellung der Messung der palatinalen Knochenhöhen innerhalb des Oberkiefers beispielhaft in der fünften horizontalen Schichtebene .....	21
Abbildung 9 Messungen der Knochenhöhen in sagittaler Richtung bei Probanden unterschiedlichen Geschlechts und Alters.....	32
Abbildung 10 Messungen der Knochenhöhen in transversaler Richtung bei Probanden unterschiedlichen Geschlechts und Alters.....	34
Abbildung 11 Dreidimensionale Darstellung des knöchernen Gaumens .....	38
Abbildung 12 Farbcodierte Insertionskarte.....	40

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1 Dosimetrie von kieferorthopädischen diagnostischen FOVs unter Verwendung eines CBCT-Protokolls mit niedriger Dosis .....	10
Tabelle 2 Studienpopulation .....	25
Tabelle 3 Durchschnittliche Knochenhöhen mit Standardabweichung.....	29
Tabelle 4 Post-hoc-Vergleiche der palatinalen Knochenhöhenwerte in sagittaler Richtung .....	31
Tabelle 5 P-Werte für die Post-hoc-Vergleiche in transversaler Richtung .....	33
Tabelle 6 Häufigkeit potenzieller Wurzelkontakte bei einem 13 mm langen orthodontischen Mini-Implantat und entsprechende Odds Ratios.....	36
Tabelle 7 Gepoolte Odds Ratios in transversaler und sagittaler Richtung .....	36

# 1 Einleitung

R. Kanomi hat 1997 die Verwendung von Mini-Implantaten in der Kieferorthopädie erstmals beschrieben [6]. Seither haben orthodontische Mini-Implantate weltweit Anklang gefunden und werden heutzutage standardmäßig verwendet. Sie bilden eine temporäre, skelettale Verankerungsform für orthodontische Apparaturen. Ihre Anwendung finden sie unter anderem in der Therapie des Frontengstandes durch die Distalisierung aller Zähne, zur Retraktion der Frontzähne, zur Distalisierung und Mesialisierung der Molaren sowie zur transversalen Expansion und frühen Klasse-III-Korrektur bei wachsenden Patienten.

Zu den Vorteilen des Einsatzes von orthodontischen Mini-Implantaten gehört die Unabhängigkeit von der Compliance und der aktuellen Bezahnung des Patienten. Aufgrund der Weiterleitung der biomechanischen Kräfte auf den Knochen werden dentale Nebenwirkungen während der Behandlung minimiert [1,2,3].

Die Insertion von Mini-Implantaten richtet sich nach dem Knochenangebot und der Lage von schonungspflichtigen anatomischen Strukturen. Die Digitalisierung der Behandlungsplanung und die computergestützte Anfertigung von orthodontischen Hilfsmitteln wie Insertionsschablonen für das Einsetzen von Mini-Implantaten erlangt immer mehr an Bedeutung [7,8,9]. Insertionsschablonen können entweder mithilfe einer optischen Abformung des Oberkiefers in Kombination mit der Auswertung eines FRS oder mithilfe einer dreidimensionalen Röntgenaufnahme konstruiert werden [9].

Dabei sollte beachtet werden, dass kieferorthopädische Patienten häufig im Jugendalter oder sogar noch jünger sind und daher sehr anfällig für Röntgenstrahlung sind [10,11]. Deshalb muss die Indikation für das Anfertigen von dreidimensionalen Röntgenbildern in diesen Fällen besonders kritisch beurteilt werden [4]. Zudem entstehen für die Verwendung von Bohrschablonen zusätzliche Kosten für die Anfertigung und Nutzung. Hinzu kommt die Tatsache, dass Bohrschablonen als Einwegprodukte konzipiert sind und demnach zu zusätzlichem Abraum beitragen, was Umweltauswirkungen mit sich bringt.

In dieser Studie soll ein Insertionsguide erstellt werden, der anschaulich dazu beitragen soll, dass Behandler den knöchernen Verlauf des Gaumens von Kindern und Jugendlichen besser einschätzen und damit in klinischen Situationen

souverän auch ohne Einsatz von einer Insertionsschablone oder zusätzlichen Röntgenbildern den idealen Insertionspunkt für Mini-Implantate reproduzierbar auffinden. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Analyse der Einflussfaktoren Alter und Geschlecht in Bezug auf das knöcherne Angebot im Gaumenbereich, um alters- und geschlechtsspezifische Unterschiede bei der palatinalen Insertion systematisch zu erfassen und zu bewerten.

## 1.1 Die Anatomie des Gaumens

Der Gaumen ist als Dach der Mundhöhle und Boden der Nasenhöhle definiert. Er unterteilt sich in Hart- und Weichgaumen. Der harte Gaumen trennt die Mundhöhle von den Nasenhöhlen. Dessen knöcherne Basis setzt sich aus Teilen der Maxilla und Teilen des Os Palatinum zusammen. Entwicklungsgeschichtlich bildet sich der Gaumen aus der Fusion der beiden Processi palatini maxillae. Die Sutura mediana und die distal anschließende Sutura interpalatina stellen den Fusionsverlauf dar. Sie verlaufen in der Sagittalen median durch die horizontale Knochenplatte. Die Sutura palatina transversa verläuft transversal auf der Höhe der dritten Molaren und stellt den Fusionsverlauf zwischen Processi palatini und Processi maxillae dar.

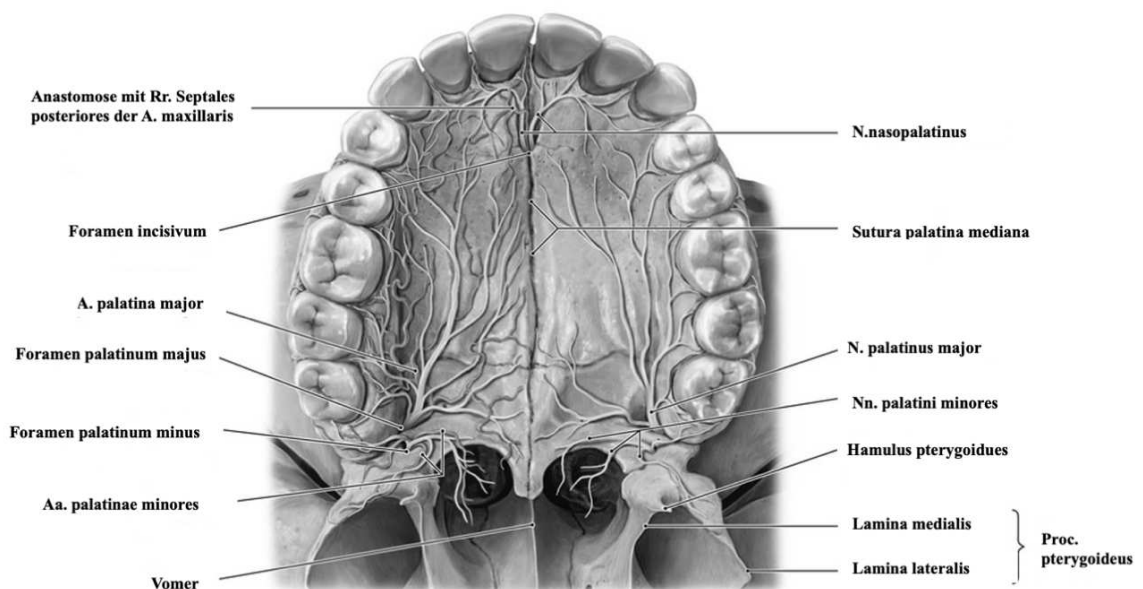


Abbildung 1: **Kaudale Ansicht der Maxilla**

Quelle: mit freundlicher Abdruckgenehmigung des Verlags eRef, Thieme

Die Verbindungskanäle zwischen Mund- und Nasenhöhle, die beidseits der Sutura mediana verlaufen, verschmelzen innerhalb des Knochens zu einem Kanal, dem Canalis incisivum, der als Foramen incisivum nach oral mündet. Durch diesen Kanal verläuft der N. nasopalatinus, der aus dem N. maxillaris stammt und die vordere Gaumenschleimhaut, die sich entlang der Frontzähne anterior der Gaumenfalten erstreckt, sensibel innerviert. Zudem führt der Canalis incisivus einen Endast der Arteria palatina descendens und die Arteria sphenopalatina, die den primären Gaumen arteriell versorgen. Am Übergang des Os Palatinum in den Alveolarfortsatz, distal der dritten Molaren befindet sich beidseits das Foramen Palatinum major, durch welches der Nervus palatinus major und die Arteria palatina descendens die Schleimhaut des harten Gaumens erreichen. Die N. palatini majores sind für die sensible Innervation der restlichen Gaumenschleimhaut verantwortlich. Distal des Foramen Palatinum major liegt das Foramen palatinum minor. Durch dieses Foramen erreichen die Nn. Palatini minores und die Aa. Palatinae minores ihr Innervations- und Versorgungsgebiet, den weichen Gaumen. Die Mundschleimhaut ist hier unbeweglich über Bindegewebsfasern fest mit dem Periost verwachsen. Im ventralen Anteil des Palatum durum befinden sich drei Gaumenfalten, die plicae palatinae. Über dem Foramen incisivum sitzt eine Schleimhauerhebung, die als Papilla incisiva bezeichnet wird. Von der Papilla incisiva geht eine leicht hervortretende Schleimhautleiste, die Raphe palatina, aus. Diese verläuft median des harten Gaumens und verdeutlicht wie die darunterliegende Sutura mediana die Fusionsnaht der beiden Gaumenfortsätze.

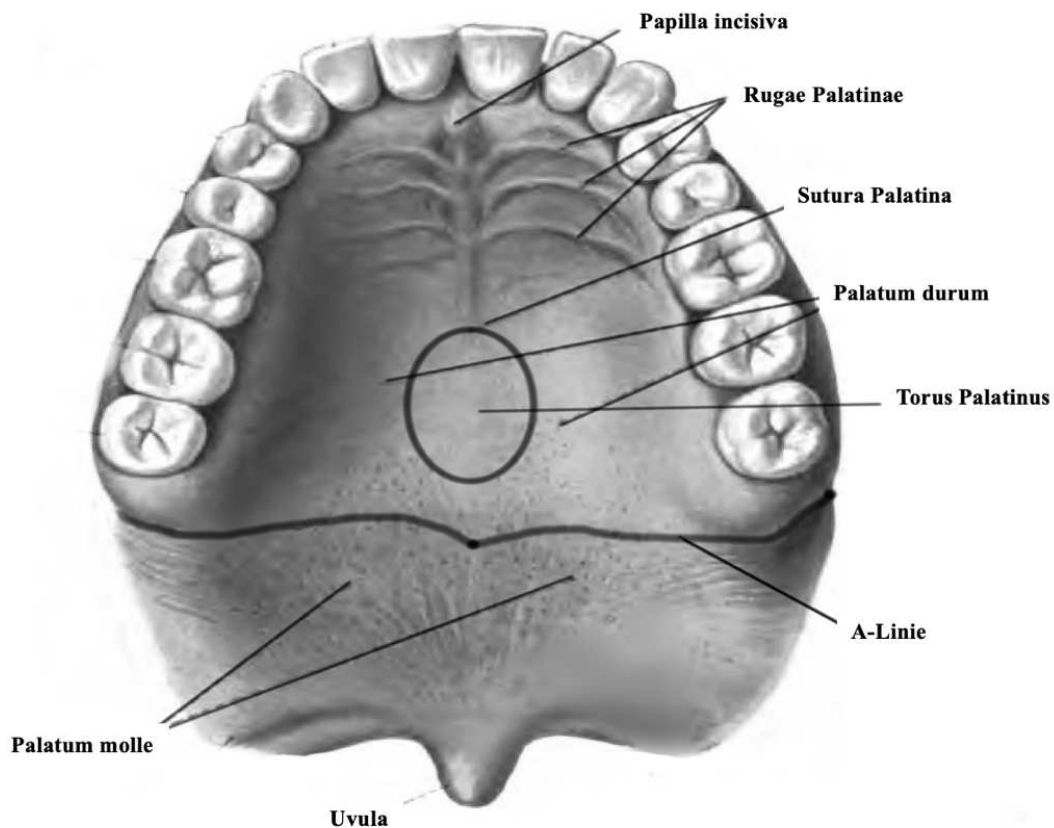


Abbildung 2 **Kaudale Ansicht des Gaumens mit Weichgewebsstruktur**

Quelle: Funktionsorientierte Logopädie; mit freundlicher Abdruckgenehmigung des Verlags Springer

Dem Hartgaumen schließt der Weichgaumen an, der sich makroskopisch in Gaumensegel und Uvula unterteilen lässt. Er bildet den kranialen Rand des Isthmus faucium. Muskeln, Bindegewebe und Schleimhaut sind dessen Bestandteile. Die bindegewebige Grundlage des Gaumensegels ist die Aponeurosis palatina, in die die Gaumenmuskulatur einstrahlt. Zu der Gaumenmuskulatur zählen Musculus levator veli palatini, Musculus tensor veli palatini, Musculus uvulae, Musculus palatopharyngeus und der Musculus palatoglossus. Diese Muskeln bewegen den weichen Gaumen und ermöglichen dadurch den Schluck- und Sprechakt [12-16].

## 1.2 Das DVT in der Zahnmedizin

### Zu den technischen Grundlagen

Die Digitale Volumentomographie ermöglicht durch das Prinzip der Rekonstruktion ein dreidimensionales Bild aus einer Serie von zweidimensionalen Bildern mithilfe von spezifischen Algorithmen zu errechnen. Auf der einen Seite des DVT-Gerätes befindet sich ein Flächensensor und auf der gegenüberliegenden Seite ein Röntgenstrahler, von dem ein kegelförmiger Strahlengang ausgeht (Abbildung 3). Die Apparatur dreht sich um 180 bis 540 Grad um den Kopf des Patienten. Dabei werden aus verschiedenen Winkelpositionen Bilder generiert. Die Aufnahmedauer eines DVTs variiert zwischen 8 bis 20 Sekunden [4, 17].

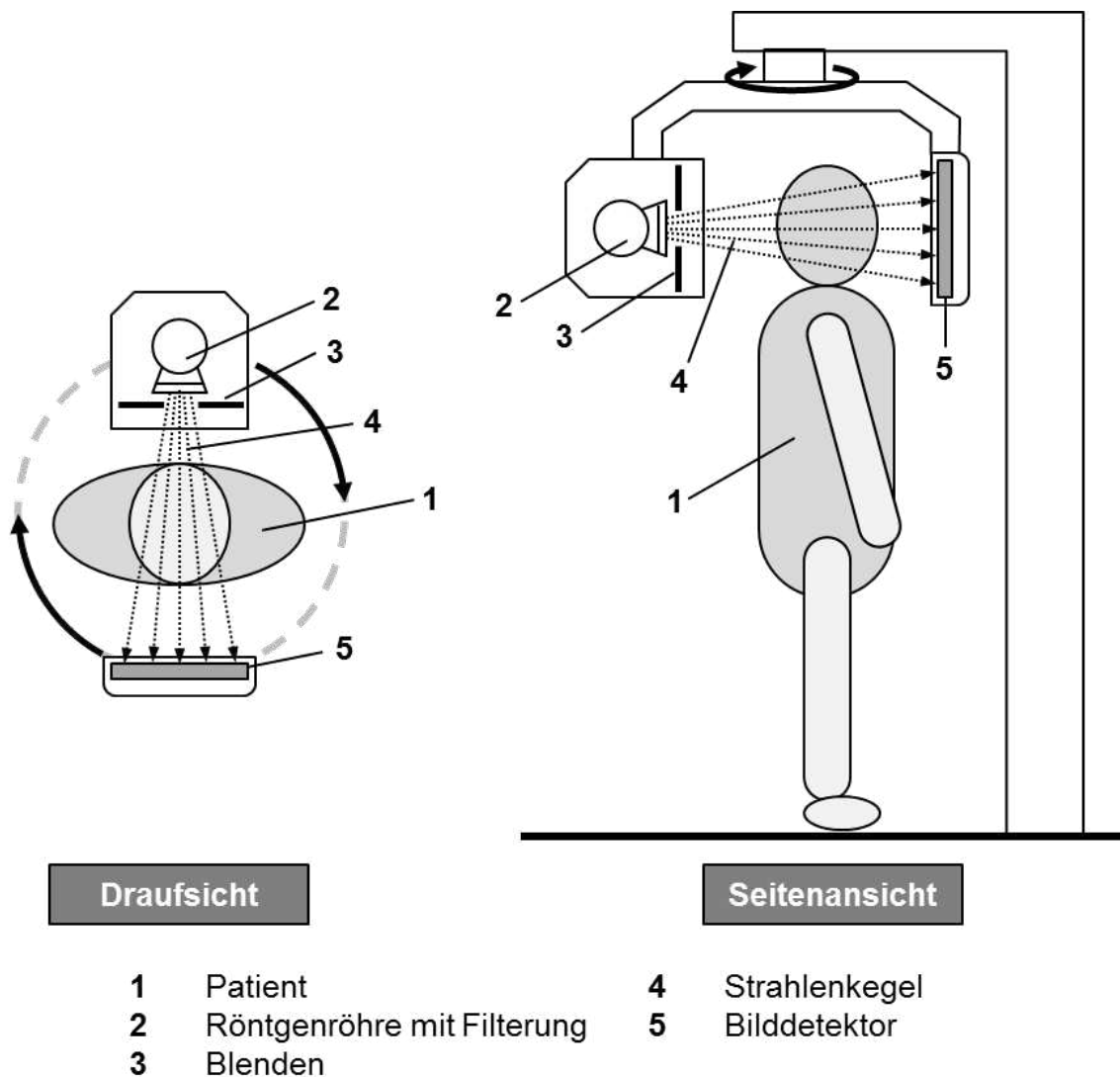


Abbildung 3 DVT-Gerät, Technischer Aufbau und Funktionsprinzip der DVT

Quelle: „Digitale Volumetomographie (DVT)“, mit freundlicher Abdruckgenehmigung der Technischen Hochschule Mittelhessen, <https://www.thm.de/mni/forschung/institute-gruppen/imps/imps-strahlung-information/radiologie/modalitaeten/digitale-volumetomographie-dvt.html>

Die Generation von Bildern basiert wie bereits erwähnt auf dem Prinzip der Rekonstruktion. Das Objekt, in diesem Fall der Kopf, wird in kleine Abschnitte unterteilt, die man als Voxel bezeichnet. Die Röntgenabsorption wird entlang eines Röntgenpfades gemessen und auf die Voxel verteilt. Für jedes Voxel, das auf dem Pfad eines Röntgenstrahles liegt, wird der Masseschwächungskoeffizient bestimmt, der von der Intensität der Ausgangsstrahlung, der Messung der Strahlenintensität nach Durchdringen des Absorbers und der Dicke des Absorbers abhängig ist. Dies lässt sich mit dem Lambert-Beer Gesetz beschreiben:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

I= Intensität nach Durchgang durch die Schichtdicke d (vom Detektor gemessene Intensität)

I<sub>0</sub>=Ausgangsintensität (von der Röntgenröhre emittierte Intensität)

μ=Schwächungskoeffizient

d= Schichtdicke

Da der Masseschwächungskoeffizient eines Voxel aus mehreren Winkeln erfasst wird, erhält man eine Schätzung über die dreidimensionale Form des Objektes. Das Ausmaß der Abschwächung wird durch den Grauwert dargestellt. Die Einteilung der Grauwerten erfolgt in Hounsfield-Einheiten.

Die Qualität des Bildes verbessert sich, wenn die Framerate, also die Anzahl der Einzelaufnahmen, höher und die Datenübertragungsrate niedriger ist. Je schneller der Sensor die Daten liest und speichert, desto schneller kann ein neues Bild generiert werden. Mithilfe einer Betrachtungssoftware lässt sich das dreidimensional konstruierte Bild aus verschiedenen Perspektiven analysieren. Außerdem lassen sich Schnittebene in variablen Schichtdicken generieren [17-20].

## **Zu den Artefakten**

Bei der Betrachtung einer DVT- Aufnahme muss man auf folgende Artefakte achten, die möglicherweise zu einer falschen Befunderhebung führen könnten. Als Artefakte bezeichnet man alle Abbildungen, die nicht der Realität entsprechen.

Dazu zählen vor allem:

- Aufhärtingsartefakte
- Auslöschungsartefakte
- Abtast-/Aliasartefakte
- Partielle Volumeneffekte
- Bewegungsartefakte

Zudem kommen die generelle Bildgebungsartefakte Rauschen, Streuung und lokale Tomographie.

### **Aufhärtingsartefakte**

Aufhärtingsartefakte sind eine, der am häufigsten anzufindenden Artefakte. Sie entstehen, wenn Röntgenstrahlen auf ein Objekt mit hoher Dichtigkeit treffen. Die langwelligere, energieärmere Strahlung wird absorbiert, während die kurzwelligere Strahlung das Objekt durchdringt. Die Detektoren vermessen für den spezifischen Voxelbereich einen höheren Masseschwächungskoeffizienten im Vergleich zu seiner Umgebung. Nach Rekonstruktion wird dieser Bereich der dreidimensionalen Abbildung mit hohen Grauwerten dargestellt. Implantate, Keramik- und Metallkronen, Füllungskomposite und auch Guttapercha können Aufhärtingsobjekte darstellen [4, 19].

### **Auslöschungsartefakte**

Auslöschungsartefakte treten auf, wenn Röntgenstrahlen auf sehr dichte Materie stoßen, welche die Röntgenstrahlung fast komplett absorbiert. Der Detektor kann für diesen Bereich aufgrund des fehlenden oder nur mangelhaften Signals keinen Masseschwächungskoeffizienten berechnen. Bei dem Durchdringen von Goldkronen oder Implantaten kann es zu Auslöschungsartefakten im DVT kommen [19].

### **Abtast-/ Aliasartefakte**

Abtastartefakte entstehen durch die Diskrepanz zwischen endlicher Abtastrate und der kontinuierlichen Struktur des kontinuierlichen Signals. Diese Diskrepanz kommt durch die Einteilung des Objektes in Voxel zustande. Liegt ein sogenanntes „under-sampling“ vor, was bedeutet, dass die Abtastrate zu niedrig ist, liegt ein weiterer Störfaktor für die kontinuierliche Informationsübertragung vor.

Dazu kommt, dass die einzelnen Voxel eine unterschiedliche Menge an Röntgenstrahlen erfahren. Dies liegt an der divergierenden Form der konischen Strahlenquelle. Die quellennahen Voxel werden von mehr Röntgenstrahlen erreicht als die Voxel, die in der Peripherie liegen. Für die quellennahen Bereiche erhält der Sensor dementsprechend mehr Informationen über den Masseschwächungskoeffizienten als für die quellenfernen Bereiche. Durch Maßnahmen wie die richtige Positionierung des Objektes kann das Ausmaß des Artefaktes minimiert werden. Treten Fehler auf, spiegeln sich diese in der Rekonstruktion des Objektes wider [4,19].

### **Partielle Volumeneffekte**

Als Partielle Volumeneffekte bezeichnet man Artefakte, die man vor allem dort wiederfindet, wo sich die Oberfläche bzw. das Volumen des Objektes stark verändert. Die Größe der Voxel ist einheitlich, sodass Bereiche des Objektes möglicherweise nicht vollständig in einem Voxel liegen, oder aber ein Voxel nicht vollständig ausfüllt. Dies führt zu fehlerhaften Berechnungen des Masseschwächungskoeffizienten für die Strukturen. Diese Artefakte stellen sich in der DVT Aufnahme als helle und dunkle Streifen dar [19].

### **Bewegungsartefakte**

Bewegungsartefakte entstehen, wenn sich der Patient während der Aufnahme bewegt. Die Messungen des Masseschwächungskoeffizienten und das Prinzip der Rekonstruktion funktioniert nur bei der Aufnahme von starren Objekten. Bewegungsartefakte zeichnen sich durch Doppelkonturen und unscharfe Bereiche aus [19].

## **Zu den Indikationen in der Kieferorthopädie**

Grundsätzlich ist eine Röntgenaufnahme immer dann indiziert, wenn der gesundheitliche Nutzen für den Patienten größer ist als die möglichen Folgen der Strahlenbelastung. Dies bildet die rechtliche Grundlage für die Anfertigung eines Röntgenbildes und wird als „rechtfertigende Indikation“ bezeichnet. Für Kinder und Jugendliche muss diese Indikation besonders streng gesehen werden, da sie ein erhöhtes Risiko für Folgeschäden durch ionisierende Strahlung aufweisen [4].

Die Stellungnahme der DGKFO über die Indikationen für die Anfertigung einer DVT- Aufnahme im Bereich der Kieferorthopädie bietet dafür eine gute Orientierung. Die Anfertigung ist in komplizierten Fällen indiziert, wenn eine zweidimensionale Aufnahme nicht ausreichend Informationen für die Behandlungsplanung liefert [4]. Dazu gehört die Diagnostik des Zahnbestandes und der Zahnwurzeln, wenn Anomalien oder Dysplasien vorliegen. Zudem kann ein DVT indiziert sein, wenn Zahndurchbruchstörungen einer Differentialdiagnostik bedürfen oder auch bei der Analyse von craniofazialen Fehlbildungen.

Die Strahlenbelastung durch das DVT ist höher als bei konventionellen Röntgenaufnahmen. Die effektive Dosis ist ein Maß für die Strahlenexposition und sollte dem ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Achievable) folgen [4]. Die effektive Dosis unterliegt abhängig von den einzelnen DVT-Geräten erheblichen Schwankungen und liegt zwischen 13 und 1073 mikro Sv.

## **Zu den Geräten, von denen der hier betrachtete Datensatz stammt**

Aus der Westdeutschen Kieferklinik stammt ein Datensatz von zwanzig Aufnahmen. Diese wurden mit dem Orange Pax-Duo 3D und dem DVT-Gerät Romexis 4.6.1.R der Firma Planmeca erstellt. Das Unternehmen Planmeca Oy wurde 1971 von Herrn Heikki Kyöstilä in Helsinki, Finnland, gegründet, wo sich heute der Hauptsitz des Konzernes befindet. Zunächst produzierte das Unternehmen vor allem dentale Behandlungseinheiten. 1986 kam die Produktion von Röntengeräten hinzu [20].

Das ALARA-Prinzip lässt sich mit dem Gerät des Unternehmens gut verwirklichen. Die Einstellung „Ultra low dose“ zusammen mit der Ausblendung der nicht

relevanten Bereiche ermöglicht die dreidimensionale Betrachtung der anatomischen Strukturen mit nur geringer Strahlenbelastung für den Patienten. Um die Qualität der Röntgenbilder, die mit der Einstellung Ultra Low Dose angefertigt wurden, besser einschätzen zu können, wurde in einer Studie, die an der Universität in Helsinki durchgeführt wurde, die effektive Dosis für verschiedenen Aufnahmemuster berechnet und bezüglich der Bildqualität miteinander verglichen [21]. Die Beurteilung der Bildqualität richtet sich dabei nach Rauschverhältnis (contrast to noise ratio (CNR)) und der Informationsübertragung (modulation transfer funktion (MTF)). Die Aufnahmen wurden mit dem Promax Gerät an zwei Phantomköpfen erstellt. Dabei entspricht die Form des ersten Phantomkopfes, der eines zehnjährigen Kindes und die Form des zweiten Phantomkopfes, der eines Erwachsenen.

Der Tabelle kann man die Ergebnisse der Studie entnehmen:

Protokoll	Phantomkopf	Betrachtungsfeld in mm	Effektive Dosis in $\mu\text{Sv}$
ULD low dose	Erwachsener	100x100	12
ULD normal			45
Low dose			60
Normal			189
ULD low dose		200x170	18
ULD normal			51
Low dose			72
Normal			215
ULD low dose	Kind	85x 85	10
ULD normal			36
Low dose			48
Normal			153
ULD low dose		200x 170	15
ULD normal			42
Low dose			74
Normal			175

**Tabelle 1 Dosimetrie von kieferorthopädischen diagnostischen FOVs unter Verwendung eines CBCT-Protokolls mit niedriger Dosis**

Daten extrahiert aus: Dose by phantom type, FOV, and protocol, Ludlow, J. B. & Koivisto, J. Dosimetry of Orthodontic Diagnostic FOVs Using Low Dose CBCT protocol, UNC Dentistry 2015

An den Ergebnissen der Studie kann man erkennen, dass durch die Verwendung des Ultra Low Dose Protokolls eine durchschnittliche Einsparung der effektiven Dosis von 77 Prozent im Vergleich zu der „normalen“ Dosiseinstellung möglich ist. Dabei findet man bei dem Vergleich der Röntgenbilder keinen wesentlichen Unterschied in der Bildqualität, die die klinische Diagnostik einschränken würde. Auch in anderen Studien konnte gezeigt werden, dass die Einstellung ultra low dose eine geraume Dosiseinsparung ermöglicht, ohne dabei die Bildqualität für die genaue Diagnostik zu beeinträchtigen [22-25].

### **1.3 Orthodontische Mini-Implantate**

Orthodontische Mini-Implantate bestehen aus einem Gewinde, einem Implantatstift und einem -kopf. Die Länge der Mini-Implantate beträgt 5 bis 15 Millimeter und der Durchmesser liegt im Bereich zwischen 1 und 2,3 Millimetern. Ein größerer Durchmesser erlaubt eine stärkere Belastung der Mini-Implantate [25].

In der Regel werden Mini-Implantate für kieferorthopädische Anwendungen aus einer Titan-Aluminium-Vanadium-Legierung (Titan Grad V; Ti-6Al-4V) oder aus rostfreiem Stahl (F138) hergestellt. Diese Materialien sind biokompatibel und verfügen über eine mechanische Festigkeit, die nicht nur den Drehmomenten beim Einsetzen und Entfernen, sondern auch den kieferorthopädischen Kräften während der Behandlung standhält [26,27].

In mehreren Studien wurden Mini-Implantate verschiedener Hersteller verglichen [28,29]. Marigo G. et. al. fanden Unterschiede in der Form des Gewindes und des Implantatkörpers. Es gab Unterschiede in der Länge, dem Winkel und der Steigung der Gewinde. Der Implantatkörper der Mini-Implantate unterschied sich im Design, im Konus und in der aktiven Spitze. Alle getesteten Mini-Implantate wiesen nach dem klinischen Gebrauch eine Alteration auf, die sich in einem Verlust der ursprünglichen Farbe, des Glanzes zeigte [28].

Das Gewinde ist anders als bei dentalen Implantaten selbstbohrend und weist eine maschinerte Oberfläche auf. Somit können Mini-Implantate ohne Vorbohrung direkt inseriert und ohne Osteotomie wieder entfernt werden [30]. In manchen Fällen, wie bei der medianen Insertion von palatinalen Mini-Implantaten bei Erwachsenen, kann sich eine Vorbohrung als sinnvoll erweisen. Im Bereich der Sutura Palatina treffen zwei knöcherne Strukturen aufeinander. Die Folge ist,

dass das Mini-Implantat bei der Insertion zwei Kompaktaschichten durchdringen muss. Damit die Insertion erleichtert wird, ist eine Vorbohrung ratsam. Der Gewindeanteil sollte nach der Insertion vollständig im knöchernen Bereich, der Hals der Mini-Implantate im Bereich der festen Mukosa und der Kopf der Mini-Implantate auf der Mukosa zu liegen kommen [3, 26, 31].



Abbildung 4 **Orthodontisches Mini-Implantat aus dem Benefit System**

Quelle: Wilmes B., Benefit-System Handbuch, psm medical Solutions

Die durchschnittliche Erfolgsquote kieferorthopädischer Mini-Implantate liegt nachweislich bei 92,2 Prozent [32]. Dennoch gibt es bekannte Faktoren, die zu einer erhöhten Misserfolgsrate von Mini-Implantaten führen können. Zu diesen Faktoren zählen die Platzierung an Stellen mit beweglicher Schleimhaut [33], die Platzierung an Stellen mit unzureichender Knochenqualität und -quantität [34-37], sowie die mögliche Nähe zu Zahnwurzeln oder Wurzelkontakt [38-40]. Um diese Probleme zu vermeiden, bietet sich die Platzierung von Mini-Implantaten im vorderen Gaumen an, da dort das beste Knochenangebot und dünnes Weichgewebe vorhanden sind und das Risiko einer Beeinträchtigung der Zähne gering ist [41].

Im Vergleich zu median inserierten Mini-Implantaten haben paramediane Mini-Implantate im vorderen Gaumen eine bemerkenswert niedrige Ausfallrate von 2,1 Prozent gezeigt, was auf eine klinisch ausreichende Langzeitstabilität hindeutet [42]. Die Sicherstellung und Aufrechterhaltung der Implantatstabilität sind entscheidende Voraussetzungen für den Erfolg einer kieferorthopädischen Behandlung mit Mini-Implantaten.

Der entscheidende Faktor in der kieferorthopädischen Mechanik ist die Langzeitstabilität der Mini-Implantate. Unmittelbar nach der Insertion hängt die Belastbarkeit von der seiner Primärstabilität ab, die hauptsächlich auf einem mechanischen Phänomen beruht. Während der Einheilungsphase sind Knochenresorption und -apposition für die Entwicklung der Sekundärstabilität verantwortlich, welche wiederum von der lokalen Knochenqualität, -quantität und dem Implantatdesign beeinflusst wird [43].] In der Studie von Nienkemper et al. wurde die Stabilität von kieferorthopädischen Mini-Implantaten während der ersten sechs Wochen nach der Insertion untersucht. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Rückgang der Stabilität insbesondere in der dritten und vierten Woche nach der Insertion. Ab der vierten Woche blieben die Stabilitätswerte weitgehend konstant. Basierend auf diesen Ergebnissen kann empfohlen werden, die kieferorthopädische Apparatur frühestens nach vier Wochen zu aktivieren, um eine ausreichende Stabilität des Mini-Implantats zu gewährleisten. Diese Verzögerung ermöglicht es, die Phase der signifikanten Stabilitätsabnahme zu überwinden und das Risiko eines Implantatverlusts zu minimieren [44].

#### **1.4 Ziele der Arbeit**

Die Grundvoraussetzung für den Erfolg eines palatinal gesetzten Mini-Implantates ist eine ausreichende Knochenhöhe [45,46]. Die palatinale Knochenhöhe ist lageabhängig sehr variabel. Moderne Implantatsysteme bieten die Möglichkeit der genauen Implantatsetzung durch digitale Vorauswahl des Insertionspunktes und die Anfertigung einer Insertionsschablone. Dies erleichtert das präzise Setzen von Mini-Implantaten ungemein. Gerade bei Kindern und Jugendlichen kann das Setzen eines Mini-Implantates Stress auslösen, was eine gute Compliance behindern kann. In diesen Situationen gewinnt man durch die digitale Vorarbeit an Souveränität, was dazu führt, dass der Arbeitsablauf reibungsloser wird und dass trotz klinischer Einflussfaktoren wie der mangelnden Patientencompliance der ideale Insertionspunkt gefunden wird. Dennoch weisen Insertionsschablonen zahlreiche Nachteile auf, weshalb es sinnvoll wäre, deren Einsatz nach Möglichkeit zu vermeiden.

Auch wenn die Anzahl kieferorthopädischer Behandlungen von Erwachsenen in den letzten Jahrzehnten immer größer geworden ist und weiterhin steigt, bildet

die Behandlung von Kindern und Jugendlichen weiterhin den dominanten Anteil in der Kieferorthopädie. Das Robert Koch Institut veröffentlichte im Jahr 2018 ein Journal, in dem es heißt, dass insgesamt 25,8 Prozent der Mädchen und 21,1 Prozent der Jungen im Alter von 13 bis 17 Jahren sich in ständiger kieferorthopädischer Behandlung befanden. Am höchsten war die Inanspruchnahme bei Mädchen im Alter von 13 Jahren (55,0%) und bei Jungen im Alter von 14 Jahren (50,8%) [47].

In der Literatur findet man Studien, in denen das palatinale Knochenangebot anhand von Patienten oder humanen Kadavern im Erwachsenenalter untersucht worden ist [48,49,50]. Ein Grund dafür könnte die strenge Indikationsstellung für Röntgenaufnahmen insbesondere für DVT-Aufnahmen im Kindesalter sein. Da vor allem Kinder und Jugendliche in das Patientenfeld der Kieferorthopädie fallen, legt diese Studie das Hauptaugenmerk auf das Populationsalter, das zwischen sechs bis achtzehn Jahren liegen soll. Die Patienten befinden sich im Wachstum, weshalb Unterschiede zu adulten Kiefern auffallen könnten. Das Ziel dieser Arbeit ist es, nach sorgfältiger Analyse der Kiefer eine Aussage treffen zu können, wo sich die größte palatinale Knochenhöhe bei Patienten im Alter von sechs bis achtzehn Jahren befindet und mögliche Unterschiede zu adulten Kiefern herauszufiltern und einen Leitfaden für Kliniker zu konzipieren.

## **2 Material und Methode**

### **2.1 Material**

#### **2.1.1 Studienpopulation**

In dieser Studie wurden die DVT- Aufnahmen von zwanzig Patienten und Patientinnen im Alter von sechs bis achtzehn Jahren untersucht. Alle Aufnahmen stammen aus der Westdeutschen Kieferklinik. Die DVT- Aufnahmen wurden im Zuge der Behandlung mithilfe von zwei Röntgengeräten, dem Planmeca Romexis 4.6.1.R und dem Pax Duo 3D Gerät in der chirurgischen Abteilung der Klinik durchgeführt.

#### Ein und Ausschlusskriterien

Die Studienteilnehmer für diese Untersuchung wurden ausschließlich in der Westdeutschen Kieferklinik behandelt und befanden sich in einem Altersbereich von sechs bis achtzehn Jahren.

Einschlusskriterien für die Teilnahme an der Studie waren:

- Vorhandensein der ersten Oberkiefermolaren
- Vorhandensein der Milch- oder bleibenden Eckzähne im Oberkiefer
- Verfügbarkeit einer aussagekräftigen DVTs, das aus oralmedizinischen Gründen angefertigt wurde wie zur Beurteilung der Knochenverhältnisse für Mini-Implantate, verlagerte Zähne, Verdacht auf Ankylose, Retention oder Traumata
- Keine kieferorthopädische Behandlung, die die Form des anterioren Gaumens beeinflusst wie eine Gaumennahterweiterung oder maxilläre Protraktion)

Teilnehmer, die unter bestimmte Bedingungen fielen, wurden von der Studie ausgeschlossen. Die Ausschlusskriterien umfassten:

- Pathologische Prozesse im Kiefer wie Tumorleiden, Zysten..
- Kraniofaziale Fehlbildungen wie Lippen-Kiefer-Gaumenspalten, Syndromerkrankungen
- Einbruch der Stützzone und Aufwanderung der ersten Oberkiefermolaren

Diese Kriterien wurden festgelegt, um eine homogene und vergleichbare Gruppe von Studienteilnehmern zu gewährleisten.

### **2.1.2 Ethikantrag**

Für die Durchführung der Studie wurde ein Amendment des Ethikantrages, der unter der Studiennummer 5418 geführt wird, beantragt. Ein positives Votum wurde am 9.03.2020 erteilt. Das positive Votum für den Ursprungsantrag wurde am 31.03.2016 erteilt.

## **2.2 Methode**

### **2.2.1 Messgitter**

Die Abbildung 5 zeigt das Messgitter, das durch transversale und sagittale Ebenen gebildet wird. Das Messgitter spannt sich über den anterioren Gaumen und enthält hundertvier Messpunkte. Die Gitterbegrenzung bildet die erste transversale Referenzebene, die durch die Spitze der Eckzähne verläuft. Wenn nur ein Eckzahn durchgebrochen war oder eine Asymmetrie vorlag, wurde diese Referenzlinie tangential zur Höckerspitze des durchgebrochenen Eckzahns (bzw. zur Höckerspitze des Eckzahns, der keine mesiale oder distale Zahnwanderung aufwies) und senkrecht zur Gaumensutur gelegt. Wenn beide bleibenden Eckzähne noch nicht durchgebrochen waren, wurden die oberen Milch-Eckzähne zur Festlegung der Referenzlinie gemäß der oben beschriebenen Vorgehensweise herangezogen. Patienten mit einem geringen Diastema oder einer moderaten Kippung der oberen Frontzähne wurden in die Pilotstudie eingeschlossen. Patienten wurden jedoch ausgeschlossen, wenn eine mesiale oder distale Eckzahnwanderung diagnostiziert wurde, beispielsweise infolge eines anterioren Platzmangels, einer Protrusion oder Retrusion der Inzisiven oder eines anterioren Diastemas. Zusätzlich wurden Patienten mit kraniofazialen Syndromen oder Spalten ausgeschlossen.

Insgesamt acht transversalen Ebenen verlaufen orthogonal zu der Sutura Mediana und folgen in einem Abstand von sechs beziehungsweise acht Voxel aufeinander. Dies entspricht je nach Auflösungsqualität der DVT-Geräte 1,2 Millimeter. Die erste sagittale Schnittebene verläuft durch die Sutura Mediana. Parallel

dazu verlaufen auf der rechten und linken Gaumenseite sechs weitere Ebenen in einem Abstand von 5 beziehungsweise 6,67 Voxel, was wiederum einem Millimeter entspricht. In der Sagittalen umfasst das Gitter folglich sechs Millimeter pro Kieferhälfte und insgesamt zwölf Millimeter.

Die Messpunkte sind nach der Gaumenseite, der transversalen Referenzebene und dem Abstand zu der Sutura Mediana benannt. Der Buchstabe L oder R zeigt an, ob sich der Messpunkt auf der linken oder rechten Gaumenhälfte befindet. Die nachfolgende Ziffer beschreibt die transversale Schichtebene und die Ziffer nach dem Punkt zeigt an, wie viele Millimeter der Punkt von der Sutura Mediana entfernt ist. Der Beispielpunkt L6.1 läge auf der linken Gaumenseite in der sechsten transversalen Schichtebene einen Millimeter von der Sutura mediana entfernt.

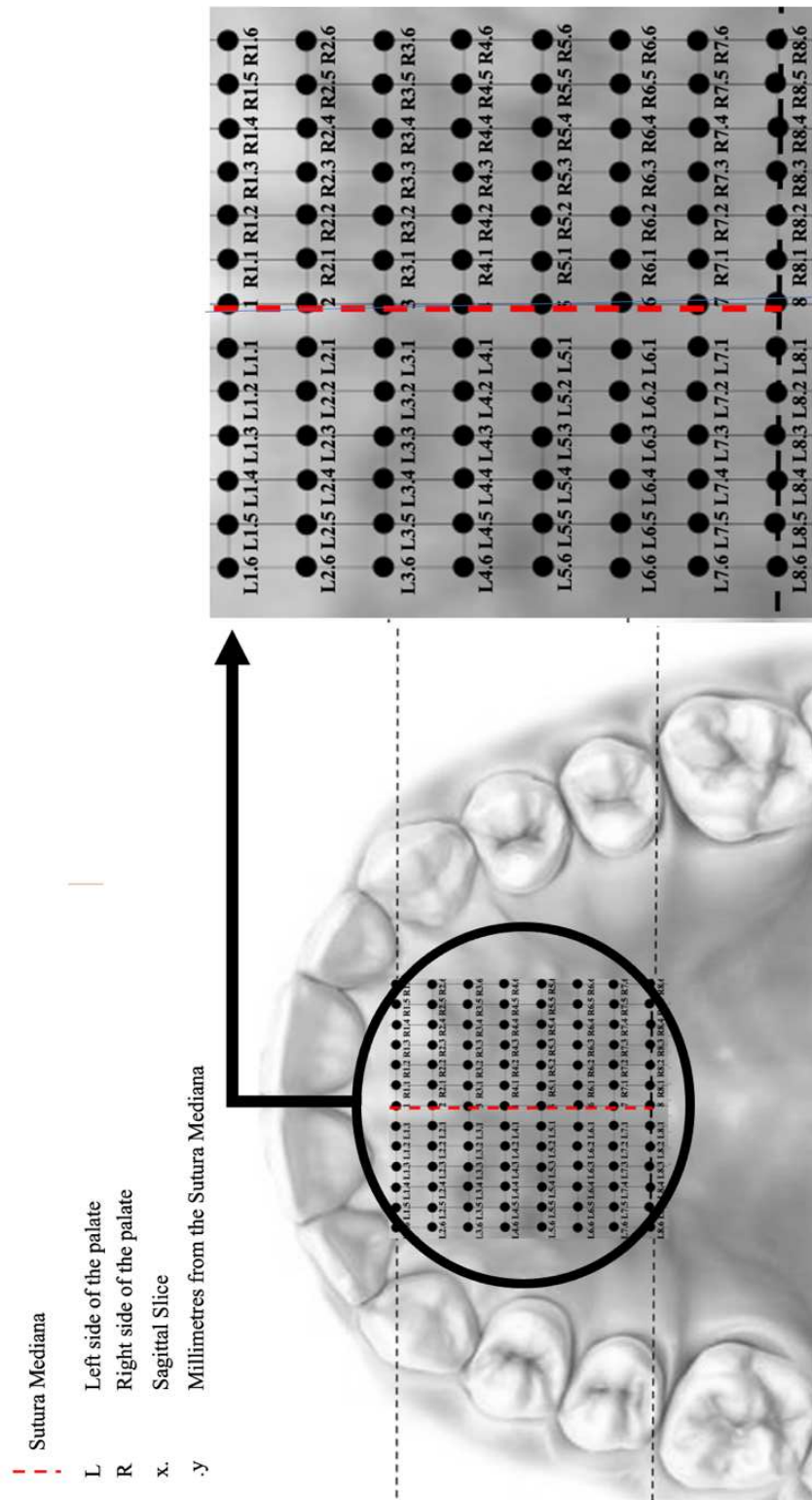


Abbildung 5 Das Messgitter

Quelle: eigene Darstellung

## 2.2.2 Ausrichtung der Datensätze

Die dreidimensionale Ausrichtung der DVT-Aufnahmen erfolgte nach der Median- Sagittal- und Okklusionsebene. Dafür wurden zunächst der Knochen und die Zahnhartsubstanz aus dem Datensatz einer DVT-Aufnahme gefiltert (Abbildung 6). Anschließend wurde der gefilterte Datensatz sichtbar gemacht. Die Sutura Palatina, die Verbindungslinie der Höckerspitzen der ersten bleibenden Molaren im Oberkiefer und die Okklusionsebene dienten als Referenzlinien für die dreidimensionale Ausrichtung des Oberkiefers. Diese Schritte wurden mit der Software AMIRA (Version 2021.1, Thermo Fisher Scientific Inc. Waltham, Massachusetts, United States) durchgeführt und sollen in den nachfolgenden Abbildungen 6 und 7 veranschaulicht werden.

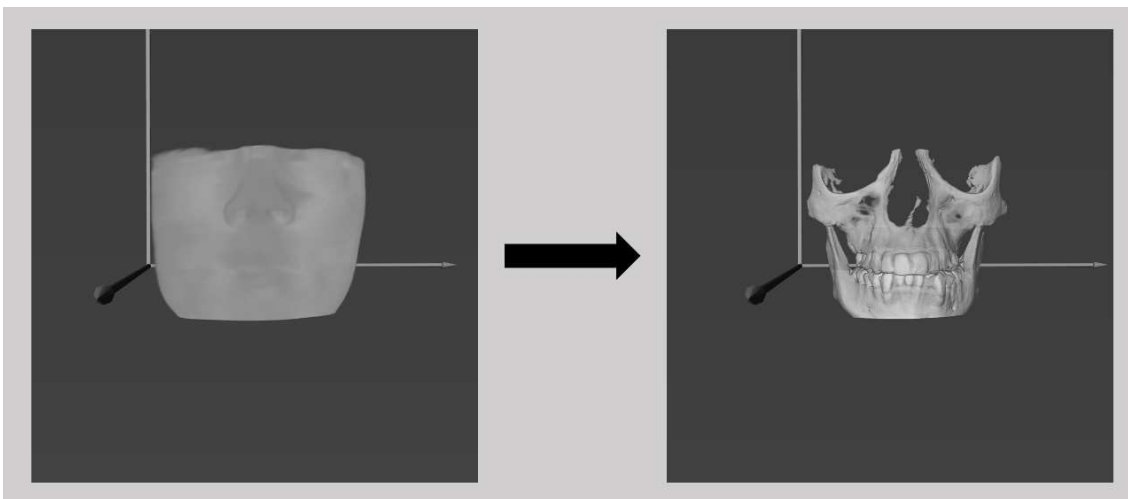


Abbildung 6 a) Vollständiger Datensatz b) gefilterter Datensatz

Quelle: Screenshot AMIRA

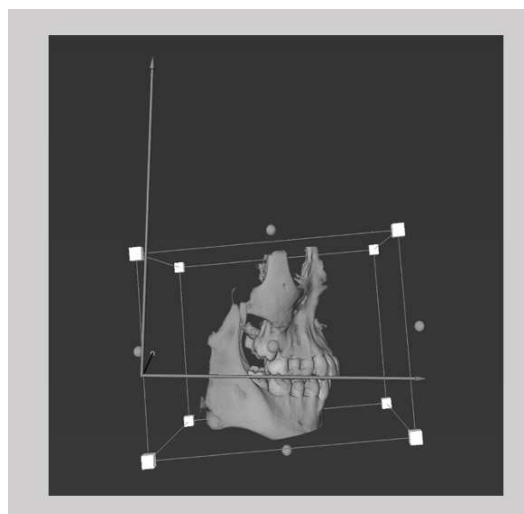


Abbildung 7 Ausrichtung des Datensatzes

Quelle: Screenshot AMIRA

### 2.2.3 Messung der Knochenhöhe

Die Messung der Knochenhöhen erfolgte durch die Erstellung zweidimensionaler transversaler Schichtbilder aus dem dreidimensionalen DVT-Bild des Kiefers. Ein spezifischer Befehl zur Generierung dieser Schichtbilder wurde mithilfe eines zuvor gefilterten Datensatzes in der Software implementiert. Die Ausrichtung der Schnittbilder erfolgte anhand anthropologischer Referenzpunkte. Jedoch enthielt der initial gefilterte Datensatz nicht alle Bildinformationen des gesamten DVT-Schnitts.

Um dieses Problem zu lösen, wurde der Befehl zur Erzeugung zweidimensionaler Schichtbilder auf den gesamten DVT-Datensatz übertragen. Hierdurch entstand eine Schicht, deren Ausrichtung im Voraus festgelegt wurde und nun sämtliche Bildinformationen des gesamten DVT-Satzes dieser Schicht enthielt. Die Umsetzung dieser Schritte erfolgte mithilfe der Software Amira.

Jedes transversale Schichtbild wurde als Tiff-Datei gespeichert und im gleichen Format in der Bildbearbeitungssoftware FIJI (Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., ... Cardona, A. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 676–682. doi:10.1038/nmeth.2019) weiterverarbeitet. Durch die Beibehaltung des Bildformats konnte auch die Skalierung übernommen werden. Die Auflösungsqualität des DVT-Bildes diente als Grundlage für die Messung der Knochenhöhe in FIJI. Die transversalen Messpunkte wurden, gemäß zuvor festgelegtem Messraster, auf der kaudalen Seite des Gaumens im jeweiligen Abstand zur Sutura mediana markiert. Die knöcherne Gaumenhöhe wurde ausgehend vom markierten Messpunkt in einem Winkel von neunzig Grad nach kranial gemessen (Abbildung 8).

Insgesamt wurden 2080 Messungen der Knochenhöhe durchgeführt. Anschließend wurden für jeden Messpunkt ein Durchschnittswert und eine Standardabweichung berechnet. Diese detaillierte Vorgehensweise gewährleistete eine präzise Erfassung und Analyse der Knochenhöhen in der vorliegenden Studie.

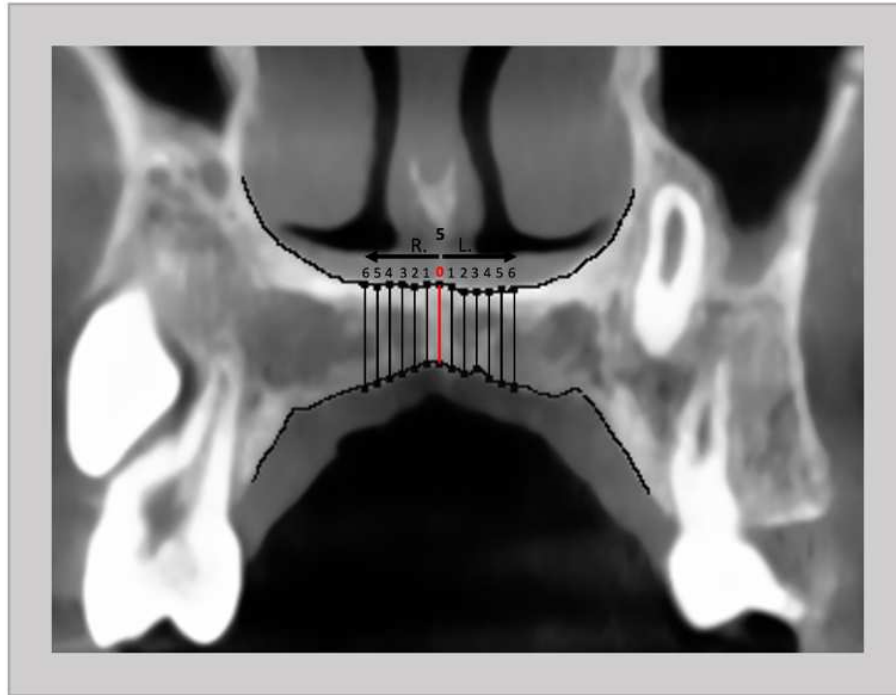


Abbildung 8 **Darstellung der Messung der palatinalen Knochenhöhen innerhalb des Oberkiefers beispielhaft in der fünften horizontalen Schichtebene**

Quelle: eigene Darstellung

An jedem Messpunkt wurde die Häufigkeit potenzieller Wurzelverletzungen nach der simulierten Insertion eines 13 mm langen Implantats erfasst – einer Länge, die beispielsweise bei jüngeren Patienten zur Erzielung einer bikortikalen Verankerung eingesetzt wird. Die Knochenstärke wurde orthogonal zur Okklusionsebene gemessen. Die ermittelte Knochenhöhe diente dabei als Entscheidungsgrundlage, ob ein 13 mm langes Implantat ausreichend Platz findet.

#### **2.2.4 Statistische Analysen**

Die statistische Analyse erfolgte mit der Software R, die speziell für statistische Berechnungen und grafische Darstellungen entwickelt wurde (R Core Team, 2023, <https://www.R-project.org/>). Boxplots wurden erstellt, um die Daten anschaulich darzustellen und erste Einblicke zu geben. Diese Diagramme bieten eine visuelle Übersicht über die Verteilung der Daten, einschließlich der Streuung, Ausreißer und zentralen Tendenzen.

Ein Vergleich wurde zwischen dem Alter der männlichen und weiblichen Teilnehmer durchgeführt. Um mögliche Unterschiede im Alter zwischen den Gruppen festzustellen, wurde der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test verwendet.

Zur Untersuchung der Knochenhöhe an verschiedenen Positionen entlang des Gaumens, sowohl in sagittaler als auch in transversaler Richtung, wurden gemischte lineare Modelle eingesetzt. Diese Modelle berücksichtigen sowohl feste Faktoren (wie die Messpositionen und Variablen) als auch zufällige Faktoren (in diesem Fall die einzelnen Patienten). Dies ermöglichte die Untersuchung von Unterschieden in der Knochenhöhe an verschiedenen Positionen sowie den Einfluss von Alter und Geschlecht der Teilnehmer. Die Altersgruppen wurden in 6–12 Jahre und 13–18 Jahre unterteilt, und die Knochenhöhe wurde als abhängige Variable betrachtet. Zur Überprüfung der Modellannahmen wurde eine visuelle Inspektion der Residuenplots durchgeführt, die keine offensichtlichen Abweichungen von Homoskedastizität oder Normalverteilung zeigte.

Zusätzlich wurden die Daten der sagittalen Positionen 1–4 (anteriore Region) und 5–8 (posteriore Region) jeweils zu zwei Regionen zusammengefasst. Die Knochenhöhen dieser Regionen wurden anschließend zwischen männlichen und weiblichen sowie zwischen jüngeren und älteren Probanden mittels Mann-Whitney-U-Test statistisch verglichen.

Die Signifikanz der Ergebnisse wurde durch P-Werte überprüft, die mithilfe von Likelihood-Ratio-Tests (ANOVA) des vollständigen Modells mit den relevanten Effekten berechnet wurden. Bei signifikanten Ergebnissen, d. h., wenn der P-Wert kleiner als 0,05 ist, wurden geschätzte marginale Mittel als Nachtest verwendet. Die P-Werte wurden dann mit der Tukey-Methode korrigiert, um Fehler durch Mehrfachvergleiche zu vermeiden.

Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der Messungen wurde bei sechs zufällig ausgewählten Patienten die Messung der palatinalen Knochenhöhe nach sechs Monaten wiederholt. Der Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC) wurde berechnet, um die Konsistenz der Messungen über die Zeit zu bewerten. Der gesamte Untersuchungsprozess wurde nach sechs Monaten bei sechs weiteren zufällig

ausgewählten Patienten wiederholt, um die Zuverlässigkeit der Methode zu bestätigen, und der ICC wurde erneut berechnet.

Für jeden Messpunkt wurde die Odds Ratio (OR) berechnet, um das Risiko einer Wurzelverletzung im Rahmen der simulierten Insertion eines 13 mm langen Implantats quantifizierbar zu machen. Dadurch konnte eine punktgenaue Einschätzung erfolgen, ob an der jeweiligen Stelle ein erhöhtes oder vermindertes Risiko für Wurzelkontakt im Vergleich zu anderen Regionen besteht. Zudem wurden die gepoolten Odds Ratios für die horizontale und sagittale Richtung berechnet, um die Risikoverteilung über das gesamte Messgitter zu bewerten.

### **2.2.5 Darstellung der gemessenen Knochenhöhen**

Die erfassten Gaumenhöhen wurden sorgfältig in einer Excel-Tabelle dokumentiert, wobei eine umfassende Datenaufzeichnung erfolgte. Diese Tabelle enthält Informationen zu jedem Patienten, darunter die Patientennummer, das verwendete Röntgengerät, das Geschlecht, das Alter sowie spezifische Angaben zum Messpunkt und die Information, ob schonungspflichtige anatomischer Strukturen auf der Messstrecke lagen. Um einen besseren Überblick über die gewonnenen Daten zu erhalten, wurde für jeden Messpunkt die durchschnittliche und mediane Knochenhöhe ermittelt. Dies wurde für die Gesamtpopulation und für die geschlechterspezifischen Subgruppen durchgeführt.

Für die umfassende Visualisierung der gewonnenen Daten aus den zwanzig DVT-Aufnahmen wurde ein dreidimensionales Diagramm erstellt. Hierbei erfolgte der Export der gemessenen Knochenwerte in Python 3.12 (Van Rossum, G., & Drake Jr, F. L. (1995). Python reference manual. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam) und ihre Integration in eine Matrix. In einem Jupiter Notebook wurde das Skript geschrieben, um ein dreidimensionales Histogramm zu generieren. In dieser Darstellung repräsentiert die z-Komponente die Höhe der Oberfläche, also die Knochenhöhe, während die x- und y-Komponenten die Positionen der Messpunkte darstellen. Die Positionierung der x- und y-Punkte wurde durch das zuvor festgelegte Messraster bestimmt. Um zusätzliche Informationen zu integrieren, erfolgte eine Farbkodierung. Diese Farbgebung wurde

anhand einer Temperaturskala gewählt, um eine klare Unterscheidung zu ermöglichen.

Um die klinische Anwendbarkeit zu optimieren, wurden die Informationen über den anatomischen Knochenverlauf auf das zweidimensionale Bild des Gaumens übertragen. Die Farbe des Kreises gibt Aufschluss darüber, ob dieser Messpunkt für eine Implantation in Betracht gezogen werden kann. Dabei wurden drei verschiedene Farben verwendet, um anzuzeigen, ob an diesem Punkt eine zu schützende anatomische Struktur, wie beispielsweise eine Zahnwurzel, vorhanden ist oder ob die Knochenhöhe in diesem Bereich als hoch oder niedrig einzustufen ist. Diese visuelle Darstellung bietet somit einen schnellen, aber umfassenden Überblick über potenzielle Implantationsorte und die damit verbundenen anatomischen Gegebenheiten, was für den behandelnden Arzt eine wertvolle Entscheidungshilfe darstellen kann.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Studienpopulation

In dieser Studie wurden insgesamt zwanzig Probanden (m/w) eingeschlossen, deren charakteristische Merkmale in Tabelle 2 aufgeführt sind. Weibliche Probanden waren tendenziell älter als männliche, jedoch wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt (Wilcoxon-Test,  $P=0,43$ ).

	Anzahl der Probanden	Alter in Jahren	Mittelwert in Jahren	Median in Jahren	Standardabweichung
Weiblich	8	8-16	12,8	13,5	2,4
Männlich	12	6-18	12,7	12,5	3,1
Gesamt	20	6-18	12,7	13	2,8

Tabelle 2 **Studienpopulation**

Quelle: Eigene Darstellung

### 3.2 Statistische Ergebnisse

Die durchgeführte statistische Analyse offenbarte einen bemerkenswert hohen Intraklassenkorrelationskoeffizienten (ICC) von 0,994 für die wiederholten Messungen. Dieser ICC-Wert deutet auf eine außerordentlich hohe Übereinstimmung zwischen den wiederholten Messungen hin, was die hohe Reliabilität und Konsistenz der erhobenen Daten unterstreichen. Der ICC für den gesamten Arbeitsablauf lag mit 0,863 ebenfalls auf einem sehr guten Niveau, obwohl er im Vergleich zu den wiederholten Messungen etwas niedriger ausfiel. Dies könnte auf einige systematische Unterschiede im gesamten Arbeitsablauf hindeuten, die jedoch insgesamt immer noch als sehr zuverlässig betrachtet werden können.

### 3.3 Gemessene Knochenhöhen

Insgesamt zeigen die Messungen der Knochenhöhe eine erhebliche Variabilität, die von 1,7 mm bis zu 23,7 mm reicht. Der Median der gemessenen Knochenhöhe beträgt 10,0 mm, während der Mittelwert ebenfalls bei 10,0 mm liegt. Die

Standardabweichung beträgt 3,8 mm, was darauf hinweist, dass die Werte in einem gewissen Maß um den Mittelwert streuen. In der folgenden Tabelle 3 kann man die Mittelwerte für die Knochenhöhe für alle 104 Messpunkte entnehmen.

Position	Total, n	Mean (total)	SD (total)	Male, n	Mean (m)	SD (m)	Female, n	Mean (f)	SD (f)
1.0	20	10,52	4,040	12	10,09	4,086	8	11,19	3,777
L1.1	20	11,69	4,039	12	10,10	4,083	8	13,13	3,779
L1.2	20	12,35	4,037	12	11,60	4,080	8	13,49	3,780
L1.3	20	12,62	4,037	12	11,91	4,078	8	13,68	3,783
L1.4	20	12,82	4,037	12	12,07	4,076	8	13,94	3,786
L1.5	20	12,95	4,037	12	12,16	4,074	8	14,14	3,789
L1.6	20	12,04	4,036	12	11,75	4,071	8	12,46	3,792
R1.1	20	11,69	4,036	12	11,00	4,068	8	12,89	3,793
R1.2	20	12,49	4,035	12	11,63	4,065	8	13,78	3,796
R1.3	20	12,86	4,035	12	12,39	4,063	8	13,56	3,799
R1.4	20	13,00	4,036	12	12,50	4,060	8	13,74	3,804
R1.5	20	12,85	4,039	12	12,44	4,058	8	13,46	3,809
R1.6	20	12,53	4,038	12	12,03	4,056	8	13,92	3,812
2.0	20	10,75	4,035	12	10,22	4,052	8	11,54	3,812
L2.1	20	11,84	4,033	12	11,38	4,050	8	12,53	3,812
L2.2	20	12,29	4,033	12	11,56	4,047	8	13,38	3,816
L2.3	20	12,48	4,034	12	11,58	4,045	8	13,81	3,820
L2.4	20	12,53	4,035	12	11,82	4,043	8	13,59	3,824
L2.5	20	12,70	4,037	12	11,96	4,043	8	13,81	3,824
L2.6	20	13,07	4,039	12	12,24	4,039	8	14,30	3,834
R2.1	20	11,49	4,037	12	11,45	4,033	8	12,39	3,837
R2.2	20	12,11	4,036	12	11,45	4,033	8	13,09	3,837
R2.3	20	12,72	4,036	12	12,09	4,030	8	13,69	3,840
R2.4	20	12,92	4,035	12	12,17	4,027	8	14,04	3,843

<b>R2.5</b>	20	12,88	4,036	12	12,23	4,024	8	13,84	3,848
<b>R2.6</b>	20	13,02	4,038	12	12,53	4,022	8	13,74	3,854
<b>3.0</b>	20	9,77	4,035	12	9,46	4,018	8	10,23	3,854
<b>L3.1</b>	20	10,93	4,034	12	10,51	4,016	8	11,56	3,855
<b>L3.2</b>	20	10,91	4,032	12	10,18	4,013	8	12,00	3,929
<b>L3.3</b>	20	11,14	4,032	12	10,31	4,010	8	12,39	3,861
<b>L3.4</b>	20	11,42	4,033	12	10,61	4,007	8	12,64	3,865
<b>L3.5</b>	20	12,02	4,035	12	11,23	4,005	8	13,20	3,870
<b>L3.6</b>	20	12,54	4,036	12	11,65	4,004	8	13,88	3,875
<b>R3.1</b>	20	10,02	4,034	12	9,46	4,000	8	11,08	3,875
<b>R3.2</b>	20	11,04	4,032	12	10,43	3,997	8	11,95	3,877
<b>R3.3</b>	20	11,49	4,031	12	12,41	3,879	8	12,41	3,879
<b>R3.4</b>	20	11,78	4,029	12	11,13	3,990	8	12,74	3,881
<b>R3.5</b>	20	12,06	4,029	12	11,45	3,986	8	12,98	3,885
<b>R3.6</b>	20	12,46	4,030	12	12,03	3,984	8	13,10	3,890
<b>4.0</b>	20	9,30	4,027	12	8,82	3,981	8	10,03	3,890
<b>L4.1</b>	20	10,29	4,026	12	9,61	3,979	8	11,30	3,891
<b>L4.2</b>	20	10,62	4,028	12	9,65	3,976	8	12,08	3,896
<b>L4.3</b>	20	10,79	4,033	12	9,87	3,973	8	12,31	3,905
<b>L4.4</b>	20	10,95	4,037	12	9,91	3,969	8	12,50	3,914
<b>L4.5</b>	20	11,30	4,043	12	10,26	3,966	8	12,86	3,923
<b>L4.6</b>	20	11,82	4,048	12	10,81	3,964	8	13,56	3,932
<b>R4.1</b>	20	9,56	4,045	12	9,36	3,961	8	9,86	3,932
<b>R4.2</b>	20	9,76	4,043	12	9,22	3,957	8	10,56	3,934
<b>R4.3</b>	20	10,32	4,043	12	9,63	3,953	8	11,35	3,938
<b>R4.4</b>	20	10,54	4,040	12	9,92	3,949	8	11,46	3,939
<b>R4.5</b>	20	10,79	4,038	12	10,12	3,946	8	11,79	3,941
<b>R4.6</b>	20	11,20	4,036	12	10,57	3,943	8	12,15	3,944
<b>5.0</b>	20	8,02	4,033	12	8,38	3,939	8	7,59	3,944

L5.1	20	8,58	4,030	12	8,45	3,935	8	8,78	3,944
L5.2	20	8,76	4,026	12	8,50	3,932	8	9,07	3,944
L5.3	20	8,78	4,023	12	8,46	3,928	8	9,27	3,944
L5.4	20	8,82	4,019	12	8,48	3,924	8	9,33	3,944
L5.5	20	9,20	4,016	12	8,64	3,920	8	10,04	3,944
L5.6	20	9,83	4,012	12	9,22	3,917	8	10,74	3,944
R5.1	20	8,28	4,009	12	8,57	3,914	8	7,84	3,943
R5.2	20	8,56	4,006	12	8,54	3,910	8	8,58	3,943
R5.3	20	8,83	4,002	12	8,60	3,906	8	9,18	3,943
R5.4	20	9,06	3,998	12	8,83	3,902	8	9,39	3,943
R5.5	20	9,44	3,994	12	9,18	3,898	8	9,84	3,943
R5.6	20	10,02	3,990	12	9,84	3,895	8	10,23	3,943
6.0	20	7,01	3,988	12	7,62	3,892	8	6,09	3,945
L6.1	20	7,23	3,987	12	7,78	3,890	8	6,41	3,946
L6.2	20	7,16	3,985	12	7,57	3,887	8	6,54	3,948
L6.3	20	7,31	3,982	12	7,40	3,884	8	7,18	3,948
L6.4	20	7,47	3,978	12	7,48	3,880	8	7,45	3,949
L6.5	20	7,94	3,975	12	7,73	3,876	8	8,26	3,949
L6.6	20	8,58	3,972	12	8,18	3,873	8	9,18	3,949
R6.1	20	7,14	3,971	12	7,88	3,872	8	6,05	3,951
R6.2	20	7,16	3,969	12	7,62	3,869	8	6,46	3,952
R6.3	20	7,37	3,966	12	7,64	3,865	8	6,96	3,953
R6.4	20	7,92	3,960	12	8,27	3,862	8	7,40	3,953
R6.5	20	8,37	3,960	12	8,61	3,858	8	8,00	3,954
R6.6	20	8,92	3,956	12	9,04	3,854	8	8,74	3,954
7.0	20	6,22	3,954	12	6,79	3,852	8	5,37	3,955
L7.1	20	6,47	3,952	12	7,03	3,850	8	5,64	3,957
L7.2	20	6,22	3,950	12	6,50	3,847	8	5,83	3,958
L7.3	20	6,38	3,948	12	6,57	3,844	8	6,09	3,960

L7.4	20	6,53	3,946	12	6,44	3,840	8	6,68	3,961
L7.5	20	6,82	3,943	12	6,58	3,837	8	7,18	3,962
L7.6	20	7,41	3,941	12	7,16	3,834	8	7,79	3,962
R7.1	20	6,28	3,940	12	6,18	3,832	8	5,49	3,964
R7.2	20	6,24	3,938	12	6,62	3,830	8	5,66	3,965
R7.3	20	6,53	3,936	12	6,90	3,827	8	5,98	3,967
R7.4	20	6,93	3,934	12	7,33	3,823	8	6,33	3,968
R7.5	20	7,09	3,931	12	7,38	3,819	8	6,66	3,969
R7.6	20	7,57	3,928	12	7,70	3,815	8	7,36	3,969
8.0	20	5,53	3,926	12	5,83	3,813	8	5,09	3,971
L8.1	20	5,50	3,925	12	5,72	3,811	8	5,18	3,973
L8.2	20	5,45	3,924	12	5,58	3,809	8	5,25	3,975
L8.3	20	5,48	3,923	12	5,57	3,806	8	5,36	3,977
L8.4	20	5,64	3,922	12	5,73	3,803	8	5,50	3,980
L8.5	20	5,94	3,921	12	6,02	3,800	8	5,83	3,982
L8.6	20	6,57	3,920	12	6,64	3,798	8	6,46	3,982
R8.1	20	5,49	3,918	12	5,68	3,796	8	5,21	3,984
R8.2	20	5,52	3,918	12	5,77	3,794	8	5,14	3,986
R8.3	20	5,49	3,917	12	5,78	3,791	8	5,06	3,988
R8.4	20	5,70	3,916	12	6,06	3,788	8	5,16	3,990
R8.5	20	6,03	3,914	12	6,45	3,784	8	5,40	3,992
R8.6	20	6,45	3,913	12	6,15	3,823	8	7,14	3,860

Tabelle 3 **Durchschnittliche Knochenhöhen mit Standardabweichung**

Quelle: eigene Darstellung

Eine detaillierte Übersicht über die Mittelwerte der Knochenhöhe sowie die entsprechenden Standardabweichungen für die Altersgruppen von 6 bis 12 Jahren und von 13 bis 18 Jahren, aufgeschlüsselt nach Geschlecht, findet sich in Tabelle 1 der ergänzenden Materialien.

### 3.3.1 Palatinale Knochenhöhe in sagittaler Richtung

Die aggregierte Knochenhöhe in sagittaler Richtung ist in Abbildung 9 dargestellt. Es fällt auf, dass die Knochenhöhen von den anterioren zu den posterioren Messpositionen abnehmen. Bei dieser Analyse wurden signifikante Unterschiede zwischen allen sagittalen Messpositionen festgestellt, mit Ausnahme der Positionen 1 und 2. Die entsprechenden P-Werte, die die statistische Signifikanz dieser Unterschiede belegen, sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Wenn man sich ausschließlich auf die sagittalen Messungen konzentriert, zeigt sich, dass signifikante Unterschiede nur zwischen weiter entfernten Positionen nachgewiesen werden konnten, was in Tabelle 2 der Ergänzungen detailliert dargestellt ist.

Die individuellen Datenpunkte sind in der Abbildung 9 als sogenannte „Jitter Points“ dargestellt, wobei die Größe jedes Punktes das Alter des jeweiligen Probanden angibt. Die Altersgruppen sind zusätzlich farbcodiert, wodurch Unterschiede in der Knochenhöhe zwischen sagittalen Positionen, Geschlechtern und Altersgruppen klar visualisiert werden. Diese Darstellung hebt die Trends der Knochenhöhe in posterioren Positionen sowie in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht hervor und liefert einen umfassenden Überblick über die beobachteten Muster.

position 1	position 2	estimate	SE	df	t.ratio	P-value
position 1	position 2	-0.0195	0.19	2067	-0.103	1.000
position 1	position 3	0.9893	0.19	2067	5.209	<.0001
position 1	position 4	17.889	0.19	2067	9.420	<.0001
position 1	position 5	34.096	0.19	2067	17.954	<.0001
position 1	position 6	46.860	0.19	2067	24.676	<.0001
position 1	position 7	56.669	0.19	2067	29.841	<.0001
position 1	position 8	65.932	0.19	2067	34.718	<.0001
position 2	position 3	10.088	0.19	2067	5.312	<.0001
position 2	position 4	18.085	0.19	2067	9.523	<.0001
position 2	position 5	34.291	0.19	2067	18.057	<.0001
position 2	position 6	47.056	0.19	2067	24.779	<.0001
position 2	position 7	56.864	0.19	2067	29.944	<.0001
position 2	position 8	66.127	0.19	2067	34.821	<.0001

<b>position 3</b>	<b>position 4</b>	0.7996	0.19	2067	4.211	0.0007
<b>position 3</b>	<b>position 5</b>	24.203	0.19	2067	12.745	<.0001
<b>position 3</b>	<b>position 6</b>	36.967	0.19	2067	19.466	<.0001
<b>position 3</b>	<b>position 7</b>	46.776	0.19	2067	24.631	<.0001
<b>position 3</b>	<b>position 8</b>	56.038	0.19	2067	29.509	<.0001
<b>position 4</b>	<b>position 5</b>	16.207	0.19	2067	8.534	<.0001
<b>position 4</b>	<b>position 6</b>	28.971	0.19	2067	15.256	<.0001
<b>position 4</b>	<b>position 7</b>	38.780	0.19	2067	20.421	<.0001
<b>position 4</b>	<b>position 8</b>	48.042	0.19	2067	25.298	<.0001
<b>position 5</b>	<b>position 6</b>	12.765	0.19	2067	6.722	<.0001
<b>position 5</b>	<b>position 7</b>	22.573	0.19	2067	11.887	<.0001
<b>position 5</b>	<b>position 8</b>	31.836	0.19	2067	16.764	<.0001
<b>position 6</b>	<b>position 7</b>	0.9808	0.19	2067	5.165	<.0001
<b>position 6</b>	<b>position 8</b>	19.071	0.19	2067	10.042	<.0001
<b>position 7</b>	<b>position 8</b>	0.9263	0.19	2067	4.878	<.0001

Tabelle 4 **Post-hoc-Vergleiche der palatinalen Knochenhöhenwerte in sagittaler Richtung**

Quelle: eigene Darstellung

### 3.3.2 Einfluss von Alter und Geschlecht in sagittaler Richtung

Das Alter zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Knochenhöhe ( $P=0,08$ ). Allerdings gibt es einen Trend, dass die Knochenhöhe bei älteren Patienten im Alter von 13 bis 18 Jahren im Vergleich zu jüngeren Probanden im Alter von 6 bis 12 Jahren an den posterioren Messpositionen, Positionen 6 bis 8 im Messraster, tendenziell höher ist ( $P=0,33$ ), wie in Abbildung 9 dargestellt.

Beim Vergleich der zusammengefassten Daten für die anterioren (1-4) und posterioren (5-8) Positionen wurde ein signifikanter Unterschied für die posteriore Region festgestellt ( $P < 0,001$ ), während für die anteriore Region kein signifikanter Unterschied beobachtet wurde ( $P = 0,66$ ).

Die durchschnittlichen Knochenhöhenwerte waren bei den männlichen Probanden tendenziell höher als bei den weiblichen ( $P = 0,068$ ). Die gemessenen Knochenhöhen waren bei männlichen Probanden höher (min: 6,40 mm, max: 13,37 mm, Mittelwert: 10,02 mm, Median: 10,52 mm, SD = 2,10 mm) als bei weiblichen Probanden (min: 5,06 mm, max: 14,3 mm, Mittelwert: 9,86 mm, Median: 10,13 mm, SD = 3,14 mm) (Abbildung 9). Nach der Zusammenfassung der Daten für

den anterioren und posterioren Gaumen und dem Vergleich dieser Werte zwischen männlichen und weiblichen Probanden mithilfe des Mann-Whitney-U-Tests konnte sowohl in der posterioren ( $P < 0,001$ ) als auch in der anterioren Region ( $P < 0,001$ ) ein signifikanter Unterschied festgestellt werden, wobei die Werte jeweils bei den männlichen Patienten höher ausfielen.

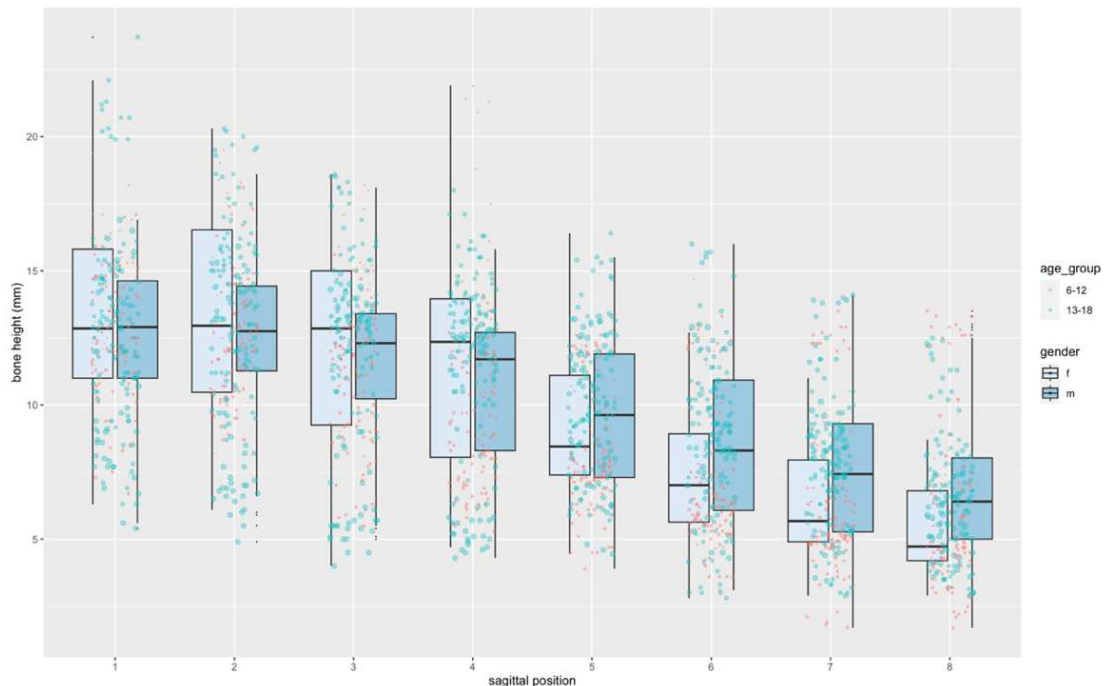


Abbildung 9 Messungen der Knochenhöhen in sagittaler Richtung bei Probanden unterschiedlichen Geschlechts und Alters

Die Abbildung zeigt die Messungen der Knochenhöhe bei männlichen und weiblichen Probanden in sagittaler Richtung. Jitter-Punkte stellen die individuellen Messwerte dar, die Größe der Jitter-Punkte steht für das Alter, und die Altersgruppe ist farblich codiert.

Quelle: eigene Darstellung in R

### 3.3.3 Palatinale Knochenhöhe in transversaler Richtung

In der transversalen Richtung wurde ein signifikanter Anstieg der Knochenhöhe von den medianen zu den paramedianen Regionen festgestellt ( $P < 0,001$ ). Der Post-hoc-Test ergab signifikante Unterschiede zwischen den meisten transversalen Messpositionen. Es wurden jedoch keine Unterschiede in den medianen Bereichen festgestellt, was in Abbildung 10 veranschaulicht wird. Die P-Werte, die die statistische Signifikanz dieser Unterschiede belegen, sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den linken und den entsprechenden rechten Aspekten beobachtet ( $P=0,99$ ). Obwohl die Wechselwirkung zwischen Geschlecht und transversaler Position signifikant war ( $P < 0,001$ ), wurden signifikante Unterschiede nur innerhalb eines Geschlechts für die verschiedenen Messpositionen festgestellt, nicht jedoch zwischen den Geschlechtern ( $P > 0,05$ ). Dies gilt ebenfalls für die Tests, die in Bezug auf die Altersgruppen durchgeführt wurden.

position 1	position 2	estimate	SE	df	t.ratio	P-value
median	p_position1	-0.522	0.311	2066	-1.679	0.6303
median	p_position2	-0.775	0.311	2066	-2.493	0.1622
median	p_position3	-1.017	0.311	2066	-3.272	0.0187
median	p_position4	-1.230	0.311	2066	-3.957	0.0015
median	p_position5	-1.503	0.311	2066	-4.837	<.0001
median	p_position6	-1.857	0.311	2066	-5.976	<.0001
p_position1	p_position2	-0.253	0.254	2066	-0.997	0.9548
p_position1	p_position3	-0.495	0.254	2066	-1.951	0.4467
p_position1	p_position4	-0.708	0.254	2066	-2.790	0.0781
p_position1	p_position5	-0.981	0.254	2066	-3.868	0.0022
p_position1	p_position6	-1.335	0.254	2066	-5.263	<.0001
p_position2	p_position3	-0.242	0.254	2066	-0.954	0.9635
p_position2	p_position4	-0.455	0.254	2066	-1.793	0.5529
p_position2	p_position5	-0.728	0.254	2066	-2.871	0.0627
p_position2	p_position6	-1.082	0.254	2066	-4.266	0.0004
p_position3	p_position4	-0.213	0.254	2066	-0.839	0.9808
p_position3	p_position5	-0.486	0.254	2066	-1.917	0.4691
p_position3	p_position6	-0.840	0.254	2066	-3.312	0.0164
p_position4	p_position5	-0.274	0.254	2066	-1.078	0.9346
p_position4	p_position6	-0.627	0.254	2066	-2.473	0.1698
p_position5	p_position6	-0.354	0.254	2066	-1.395	0.8049

Tabelle 5 **P-Werte für die Post-hoc-Vergleiche in transversaler Richtung**

Quelle: eigene Darstellung



**Abbildung 10 Messungen der Knochenhöhen in transversaler Richtung bei Probanden unterschiedlichen Geschlechts und Alters**

Paramediane und mediane Knochenhöhenwerte für weibliche (f) und männliche (m) Probanden sind in der oberen und unteren Reihe angegeben. Die x-Achse zeigt die sagittale Position der Messungen. Die individuelle Knochenhöhe wird durch Jitter-Punkte dargestellt, und die jeweilige Altersgruppe ist farblich codiert. Quelle: eigene Darstellung in R

Tabelle 6 zeigt die Häufigkeit potenzieller Wurzelkontakte bei einem 13 mm langen orthodontischen Mini-Implantat sowie die entsprechenden Odds Ratios. Die zusammengefassten Odds Ratios aus Tabelle 7 in transversaler Richtung weisen auf ein stetig ansteigendes Risiko für Wurzelkontakt in Richtung der paramedianen Region hin. Im Gegensatz dazu zeigt die Analyse der gepoolten Odds Ratios in sagittaler Richtung einen deutlichen Rückgang des Risikos von anterior nach posterior. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass gemäß den in dieser Studie erhobenen Daten das Risiko einer Wurzelperforation in der paramedianen Zone erhöht ist und in distaler Richtung kontinuierlich abnimmt.

Position	Anzahl potenzieller Wurzelverletzungen	Keine Wurzelverletzung	total	Risiko	odds ratio
1.0	1	19	20	0.05	0.053
2.0	1	19	20	0.05	0.053
3.0	0	20	20	0.00	0.000
4.0	0	20	20	0.00	0.000
L1.1	2	18	20	0.10	0.111
L1.2	7	13	20	0.35	0.538
L1.3	9	11	20	0.45	0.818
L1.4	9	11	20	0.45	0.818
L1.5	9	11	20	0.45	0.818
L1.6	12	8	20	0.60	1.500
L2.1	1	19	20	0.05	0.053
L2.2	4	16	20	0.20	0.250
L2.3	8	12	20	0.40	0.667
L2.4	9	11	20	0.45	0.818
L2.5	9	11	20	0.45	0.818
L2.6	10	10	20	0.50	1.000
L3.1	1	19	20	0.05	0.053
L3.2	5	15	20	0.25	0.333
L3.3	5	15	20	0.25	0.333
L3.4	6	14	20	0.30	0.429
L3.5	7	13	20	0.35	0.538
L3.6	4	16	20	0.20	0.250
L4.1	1	19	20	0.05	0.053
L4.2	2	18	20	0.10	0.111
L4.3	5	15	20	0.25	0.333
L4.4	6	14	20	0.30	0.429
L4.5	7	13	20	0.35	0.538
L4.6	7	13	20	0.35	0.538

R1.1	3	17	20	0.15	0.176
R1.2	6	14	20	0.30	0.429
R1.3	9	11	20	0.45	0.818
R1.4	8	12	20	0.40	0.667
R1.5	10	10	20	0.50	1.000
R1.6	10	10	20	0.50	1.000
R2.1	2	18	20	0.10	0.111
R2.2	3	17	20	0.15	0.176
R2.3	7	14	20	0.35	0.500
R2.4	8	12	20	0.40	0.667
R2.5	9	11	20	0.45	0.818
R2.6	11	9	20	0.55	1.222
R3.1	1	19	20	0.05	0.053
R3.2	2	18	20	0.10	0.111
R3.3	5	15	20	0.25	0.333
R3.4	6	14	20	0.30	0.429
R3.5	8	12	20	0.40	0.667
R3.6	7	13	20	0.35	0.538
R4.1	3	17	20	0.15	0.176
R4.2	4	16	20	0.20	0.250
R4.3	3	17	20	0.15	0.176
R4.4	4	16	20	0.20	0.250
R4.5	4	16	20	0.20	0.250
R4.6	5	15	20	0.25	0.333

**Tabelle 6 Häufigkeit potenzieller Wurzelkontakte bei einem 13 mm langen orthodontischen Mini-Implantat und entsprechende Odds Ratios**

Quelle: Eigene Darstellung

Transversale Position	Gepoolte transversale odds ratio	Sagittale Ebene	Gepoolte sagittale odds ratio
median	0.026	1	0.576
Position 1	0.067	2	0.458
Position 2	0.290	3	0.281
Position 3	0.509	4	0.244
Position 4	0.667		
Position 5	0.667		
Position 6	0.702		

**Tabelle 7 Gepoolte Odds Ratios in transversaler und sagittaler Richtung**

Quelle: Eigene Darstellung

### 3.4 Der resultierende Knochenverlauf

Die Knochenhöhe im Gaumen folgt einem klaren räumlichen Muster, das durch die Berücksichtigung sowohl der sagittalen als auch der transversalen Richtung charakterisiert wurde. In sagittaler Richtung zeigt sich ein kontinuierlicher Abfall der Knochenhöhe von anterioren zu posterioren Positionen im Gaumen. In transversaler Richtung kann ein Muster in Form eines "V" beobachtet werden. Die Knochenhöhe ist an der Sutura palatina mediana am niedrigsten und nimmt zu den seitlichen Aspekten hin kontinuierlich zu.

Um diese räumlichen Muster der Knochenhöhe besser zu veranschaulichen, wurde ein Oberflächendiagramm in Python erstellt (Abbildung 11). Die x- und y-Koordinaten entsprechen dem zuvor definierten Messraster, während die z-Achse die Knochenhöhen repräsentiert. Die Farbkodierung in diesem Diagramm entspricht der Temperaturskala und soll die Unterschiede in den Höhen hervorheben. Innerhalb der y-Achse nimmt die Knochenhöhe unabhängig von der x-Variablen kontinuierlich ab. Längs der Abszisse sind unterschiedliche Knochenhöhen erkennbar. Die Knochenhöhen nehmen zum Ursprung der erfassten x-Werte ab und steigen dann wieder kontinuierlich an. Dieser Verlauf flacht mit zunehmender y-Koordinate ab.

Der Farbverlauf repräsentiert den anatomischen Hartgaumen, in dem sich die vorderen Zahnwurzeln befinden. Daraus wird deutlich, dass die größte Knochenhöhe im anterioren Bereich zu finden ist und nach distal hin kontinuierlich abnimmt. Entlang der Sagittalen ist die Knochenhöhe in der paramedianen Region größer als in der medianen Region, was besonders im vorderen Gaumenbereich sichtbar wird.

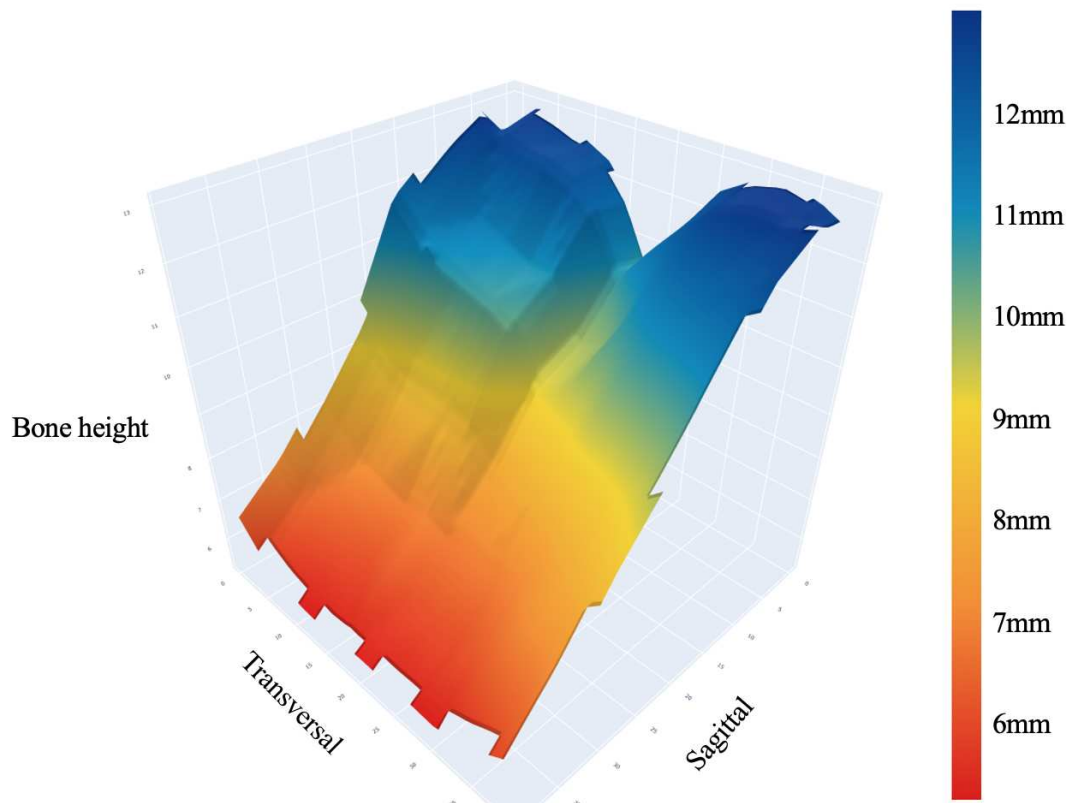


Abbildung 11 **Dreidimensionale Darstellung des knöchernen Gaumens**

Quelle: eigene Darstellung, Graphik erstellt mit Python

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde ein Leitfaden für die Insertion von Mini-Implantaten erstellt, der in Abbildung 12 dargestellt ist. Der Farbverlauf des Oberflächendiagramms wurde auf das palatinale Messgitter übertragen, sodass der Behandler auf den ersten Blick erkennen kann, wie die Knochenhöhen verteilt sind. Die Messpunkte stellen 104 mögliche Insertionspunkte als Kreise dar. Deren Durchmesser repräsentiert die Standardabweichung. Die Darstellung ermöglicht die visuelle Einschätzung der Varianz zwischen den einzelnen Messpunkten, wobei erkennbar wird, dass keine signifikanten Schwankungen in der Standardabweichung zwischen den verschiedenen Punkten auftreten.

Die Farbkodierung der Kreise bietet zusätzliche Informationen über das Vorhandensein von Zahnwurzeln entlang der Messstrecke. Rote Kreise markieren Insertionspunkte, an denen in mindestens 0,05% der Fälle ein Wurzelkontakt detektiert wurde.

Grüne Kreise zeigen an, dass bei keiner der Messungen ein Wurzelkontakt stattfand. Demnach weist die Farbkodierung auf das potenzielle Verletzungsrisiko für Zahnwurzeln bei der Insertion von Mini-Implantaten.

Die Empfehlung zur Eignung von Insertionspunkten für Mini-Implantate erfolgte basierend auf dem Risiko einer Wurzelverletzung sowie der Knochenhöhe in der jeweiligen Region. Drei Symbole wurden verwendet, um die Empfehlung der potenziellen Insertionspunkte darzustellen:

1. **Minus (-):** Ein Minuszeichen zeigt an, dass der Punkt nicht für eine Insertion empfohlen wird. Dies liegt am erhöhten Risiko einer Wurzelverletzung, insbesondere der Frontzahnwurzeln in dieser Region. Das Risiko ist zu hoch, um diesen Punkt sicher für eine Implantation zu verwenden.
2. **Kreis (○):** Ein Kreis kennzeichnet einen potenziell geeigneten Insertionspunkt. An diesem Punkt wurde kein unmittelbares Risiko einer Wurzelverletzung festgestellt. Allerdings kann das Risiko in benachbarten Bereichen hoch sein, sodass eine leichte Abweichung in diese Regionen zu einer Wurzelverletzung führen könnte. Zudem wird dieser Punkt nur eingeschränkt empfohlen, da die Knochenhöhe in dieser Region etwa 7 mm oder weniger beträgt.
3. **Plus (+):** Ein Pluszeichen zeigt an, dass dieser Punkt ein besonders geeigneter Insertionspunkt für Mini-Implantate ist. Es wurde kein Risiko einer Wurzelverletzung festgestellt, und die Knochenhöhe ist in dieser Region ausreichend für eine stabile Implantation. Diese Punkte bieten eine hohe Sicherheit und Eignung für eine Implantation.

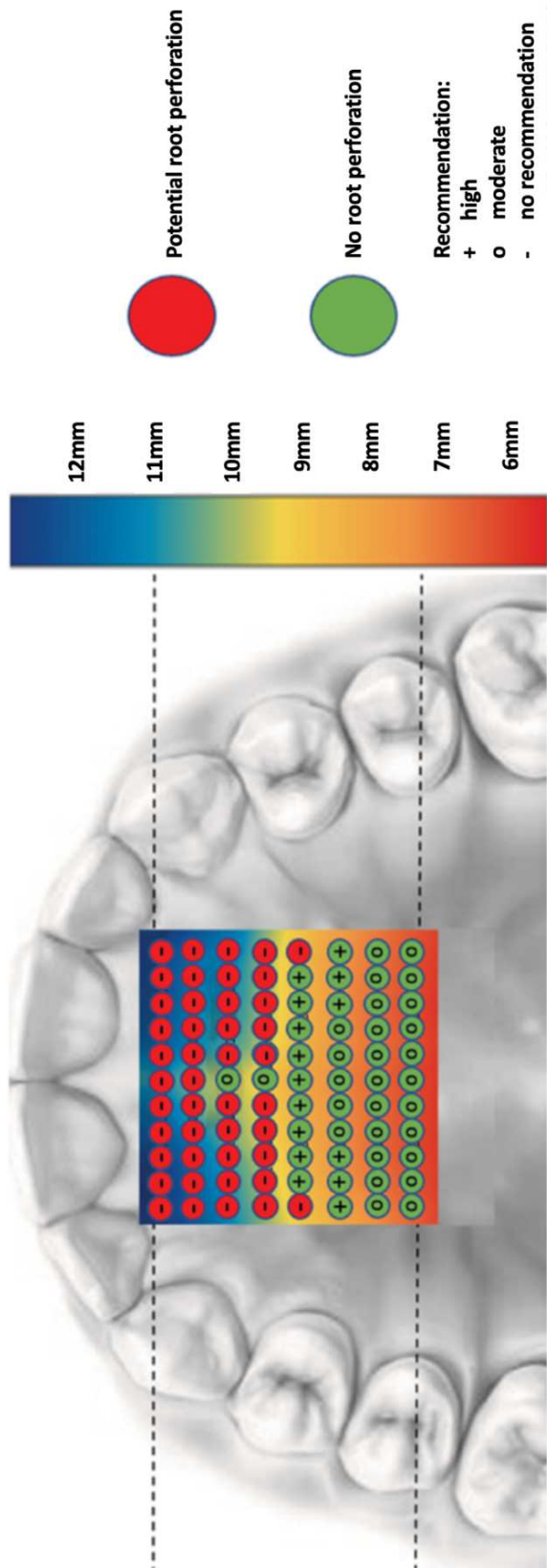


Abbildung 12 **Farbcodierte Insertionskarte**

Quelle:., eigene Darstellung

## **4 Diskussion**

### **4.1 Diskussion der Methode**

#### **4.1.1 Zur Studienpopulation**

Wie zuvor thematisiert haben sich insbesondere in der Wechselgebissphase skelettale Verankerungen in kritischen Verankerungssituationen als äußerst nützlich erwiesen, sei es zur Unterstützung der aktiven Einheit oder zur Vermeidung der Notwendigkeit einer reaktiven Einheit [51].

Bei der umfassenden Literaturrecherche zu Beginn meiner Arbeit wurde jedoch deutlich, dass Studien, die das palatinale Knochenangebot analysierten, größtenteils erwachsene Studienpopulationen einschlossen [45, 50, 52-54, 55]. Angesichts dessen, dass das Hauptaugenmerk in der kieferorthopädischen Praxis vor allem auf dem Kindes- und Jugendalter liegt, wurde das Hauptkriterium für die Auswahl der Studienpopulation auf ein Alter zwischen sechs und achtzehn Jahren festgelegt. Die Alterseinschränkung erschwerte die Patientenauswahl ungemein, denn die Grundlage für die Messung der palatinalen Knochenhöhen bilden dreidimensionale Röntgenbilder und die Indikation für diese Aufnahmen ist vor allem bei Kindern und Jugendlichen trotz des Einsatzes von Geräten mit niedriger Dosis streng limitiert. Zu den potenziellen Indikationen für eine DVT-Aufnahme gehören beispielsweise das Vorhandensein von Pathologien wie kraniofazialen Fehlbildungen, Tumore oder Zysten. Allerdings konnten die Patienten mit einer solchen Pathologie im Gaumenbereich nicht in die Studie aufgenommen werden. Die Einschlusskriterien erforderten das Vorhandensein von Milch- oder bleibenden Eckzähnen sowie der ersten Molaren im Oberkiefer. Diese Kriterien sind von entscheidender Bedeutung, um geeignete Referenzpunkte für die einheitliche Ausrichtung und Knochenanalyse der DVT-Aufnahmen sicherzustellen. Die Wahl dieser Kriterien ermöglicht durch die Auswahl klinisch identifizierbarer Referenzpunkte eine direkte Übertragbarkeit der Studienergebnisse auf den klinischen Alltag.

Eine alternative Herangehensweise könnte darin bestehen, die drei Gaumenfaltpaare als Referenzpunkte zu verwenden. Obwohl die Schleimhautfalten kli-

nisch gut erkennbar sind, sind sie auf Röntgenbildern nicht sichtbar. Die retrospektive Natur der Studie führte zu Herausforderungen bei der Wahl der Rugae Palatinae als Referenzpunkte, da zum damaligen Zeitpunkt keine digitalen Scans des Oberkiefers der Patienten verfügbar waren. Zusätzlich ist bekannt, dass die Rugae Palatinae im Verlauf des Wachstums Positionsveränderungen aufweisen, wodurch sie sich in Fällen von heranwachsenden Patienten nicht als ortsstabile Referenzpunkte qualifizieren [56].

Es wurden ausschließlich radiologische Untersuchungen berücksichtigt, und es wurden keine patientenbasierten Stabilitätsmessungen durchgeführt, um die radiologischen Befunde zu validieren. Darüber hinaus wurde der Anteil kortikalen Knochens nicht separat bewertet, obwohl er maßgeblich zur primären Stabilität beiträgt [57]. Zukünftige Studien sollten untersuchen, ob die Kortikaldicke mit Alter und Wachstum variiert.

Bei der Messung der Knochenhöhen fiel auf, dass die Altersspanne zwischen sechs und achtzehn Jahren recht groß ist, da in dieser Phase der Kiefer die bedeutendsten Umformungen durchläuft. Die Einteilung der Altersgruppen in sechs bis zwölf und dreizehn bis achtzehn Jahre in dieser Studie basiert auf entwicklungsbedingten Veränderungen der palatinalen Knochenmorphologie während des Wachstums. Frühere, auf DVT basierende Analysen haben gezeigt, dass die Dicke des Gaumenknochens von der frühen bis zur späten Phase des Wechselgebisses (etwa im Alter von acht bis zwölf Jahren) signifikant zunimmt, während zwischen der späten Wechselgebissphase und dem Erwachsenenalter keine weiteren signifikanten Unterschiede festgestellt wurden [58]. Dies deutet darauf hin, dass die Struktur des Gaumenknochens etwa ab dem zwölften Lebensjahr in Bezug auf Dicke und Stabilität weitgehend adulte Merkmale aufweist. Die gewählte Einteilung in die Altersgruppen sechs bis zwölf und dreizehn bis achtzehn Jahre stellt somit eine biologisch sinnvolle Differenzierung dar: Die jüngere Gruppe umfasst Kinder in aktiver skelettaler und dentaler Reifung, während die ältere Gruppe Individuen mit bereits stabileren und ausgereifteren palatinalen Strukturen beinhaltet. Diese Gruppierung ermöglicht eine präzisere Beurteilung der Planung palatinaler Mini-Implantate in unterschiedlichen Wachstumsphasen.

In der vorliegenden Analyse zeigten sich im anterioren Gaumen keine Unterschiede zwischen den Altersgruppen, während im posterioren Gaumen bei älteren Probanden höhere Knochenhöhen festgestellt wurden.

Eine Folgestudie könnte im Rahmen einer multizentrischen Zusammenarbeit durchgeführt werden, um die vorliegenden Ergebnisse auf eine breitere Datengrundlage zu stützen und deren Aussagekraft zu erhöhen. Für eine sinnvolle Fortführung dieses Ansatzes wäre jedoch der Zugriff auf eine deutlich größere Anzahl von DVT-Aufnahmen von Kindern und Jugendlichen erforderlich. Wie bereits erwähnt, unterliegen DVT-Aufnahmen bei Kindern strengen Indikationsstellungen, was die Suche nach geeigneten Aufnahmen erschwert. Eine Erweiterung des Ethikantrags könnte hierbei Abhilfe schaffen. Die Möglichkeit, Datenbanken mehrerer Universitätskliniken nach geeigneten Aufnahmen zu durchsuchen, sollte in Betracht gezogen werden. Eine nachfolgende Studie könnte somit in Zusammenarbeit mit anderen Universitätskliniken durchgeführt werden.

#### **4.1.2 Zum Messgitter**

Das Messgitter, das als Grundlage für die Knochenmessungen dient, wird durch Referenzlinien sowohl nach anterior als auch nach posterior begrenzt. Bei der Auswahl der Referenzpunkte lag der Fokus darauf, klinisch leicht identifizierbare Punkte zu wählen, weshalb die Eckzahnspitzen und die Sutura Mediana als geeignete Referenzpunkte ausgewählt wurden. Es ist jedoch zu beachten, dass individuelle Unterschiede in der Zahnposition aufgrund von leichten Platzüberschüssen und Zahnfehlstellungen zu einer gewissen Ungenauigkeit bei der Erstellung eines einheitlich positionierten Messgitters führen können.

Das Ziel des Messgitters besteht darin, möglichst viele Messpunkte zu umfassen, um die ideale Insertionsposition so präzise wie möglich zu beschreiben. In dieser Studie ist das Gitter so konzipiert, dass die Knochenmessung in einem Abstand von einem Millimeter in der Transversalen und 1,2 Millimeter in der Sagittalen erfolgt. Eine transversale Referenzlinie umfasst dabei dreizehn Messpunkte. Im Vergleich dazu wurden in der Studie von Hourfour et al. [59] nur sieben Messpunkte auf einer transversalen Referenzlinie markiert, und es gibt auch andere

Studienmodelle in der Literatur, die deutlich weniger Messpunkte verwenden [53,54].

Die Verwendung des Millimetermaßes ist klinisch gut identifizierbar und ermöglicht eine präzise Erfassung der Knochenhöhen. Die Entscheidung für eine höhere Anzahl von Messpunkten in dieser Studie bietet den Vorteil, dass die Bereiche, die sich als gute Insertionsregionen herausstellen, klarer eingegrenzt werden können. Dies trägt zur Genauigkeit und Aussagekraft der Untersuchung bei.

Die Ausdehnung des Messgitters weist Ähnlichkeiten zu anderen Studien auf. In einigen Fällen erstreckt es sich weiter distal, beginnt also erst posterior der Eckzähne und endet ebenfalls posterior der ersten Molaren [59, 60]. Die Entscheidung, das Messgitter nicht so weit nach posterior zu legen, ergab sich dadurch, dass bereits andere Studien gezeigt haben, dass distal der Molaren nur noch geringe Knochenhöhen zu erwarten sind. Daher wurde der uninteressante Bereich eingespart.

Es ist wichtig anzumerken, dass bei den Messungen innerhalb der ersten transversalen Referenzlinien stets Wurzelkontakte auftraten. In einer weiterführenden Studie könnte in Erwägung gezogen werden, den mesialen Rand der ersten Prämolaren beziehungsweise der ersten Milchmolaren als Referenz für die erste transversale Messgitterlinie zu verwenden. Ein zusätzlicher Vorteil wäre, dass der erste Prämolare früher durchbricht. Eine weitere Überlegung wäre unterschiedliche Messgitter für unterschiedliche Altersgruppen zu konzipieren. Diese methodische Anpassung könnte dazu beitragen, die Aussagekraft der Studie zu stärken und sie besser an die Bedürfnisse unterschiedlicher Altersgruppen anzupassen.

#### **4.1.3 Diskussion der Ausrichtung der Datensätze**

Die palatinale Insertionsregion gilt als sicherste Region, um Mini-Implantate zu befestigen. Die Erfolgsquoten sind vor allem lageabhängig und im Bereich des Gaumens am höchsten [59,60]. Die Kiefer wurden nach der Okklusions- und Medianebene ausgerichtet. In der Literatur wird beschrieben, dass die Insertion sich

an der Okklusionsebene orientiert [3, 59]. Die zweidimensionalen Schnittbilder wurden senkrecht zur Okklusionsebene erfasst.

Die Ergebnisse dieser Studie offenbarten, dass die maximale Knochenhöhe im anterioren Bereich zu finden ist und sich mit zunehmender Distanz nach distal verringert. Vor diesem Hintergrund erscheint eine anteriore Angulation des Mini-Implantats als sinnvoll. Es ist jedoch wichtig, mögliche Herausforderungen zu berücksichtigen, insbesondere das potenzielle Risiko von Verletzungen der Zahnwurzeln. Die vorliegende Studie hat die Häufigkeit solcher Verletzungen für die zu der Okklusionsebene orthogonale Insertion untersucht. Interessant wäre eine erweiterte Untersuchung, die mehrere Winkelausrichtungen, bei verschiedenen Altersgruppen einbezieht. Dies ist insbesondere relevant, da das Risiko von Wurzelperforationen oder Tangierungen stark von der Position der Frontzähne abhängig ist, die während der Wechselgebissphase erhebliche Variationen aufweisen können. Desweiteren wurde das Risiko einer Wurzelverletzung mit einem 13 mm langen Implantat simuliert, während in der klinischen Praxis 7 mm- oder 9 mm-Implantate häufiger verwendet werden. Ein Implantatlänge wurde gewählt, um die Komplexität angesichts der geringen Stichprobengröße zu reduzieren. Ein gegenwärtiges Thema von Interesse bezieht sich auf die Anwendung von CAD/CAM-gefertigten Bohrschablonen, die die Angulation mithilfe von Fernröntgenseitenaufnahmen erfassen. Es könnte untersucht werden, inwieweit die individuellen Schwankungen in der Position der Frontzähne so erheblich sind, dass der Einsatz einer Bohrschablone gerechtfertigt oder gar indiziert sein sollte.

## **4.2 Diskussion der statistischen Analyse**

Es muss angemerkt werden, dass mit der vorliegenden Untersuchung einige Einschränkungen verbunden waren. Die Studie wurde als Pilotstudie konzipiert, da sie ausschließlich von mir als Einzelperson durchgeführt wurde und daher keine Kalibrierung zwischen den Beobachtern möglich war.

Für die vorliegende Untersuchung stand nur eine begrenzte Stichprobengröße aus der Universitätsklinik zur Verfügung. Die Studie war auf heranwachsende Patienten beschränkt und umfasste lediglich 20 Probanden. Die geringe Stichprobengröße begrenzte die statistische Aussagekraft, verhinderte eine Stratifikation nach Alter oder Geschlecht und erschwerte wahrscheinlich den Vergleich

zwischen männlichen und weiblichen Probanden sowie zwischen jüngeren und älteren Gruppen. Folglich bleiben Typ-I- und Typ-II-Fehler möglich, und die Ergebnisse können nicht verallgemeinert werden. Schließlich konnten aufgrund der Pilotcharakteristik der Studie seltene Ereignisse oder unvorhergesehene Interaktionen nicht erfasst werden.

Um die statistische Aussagekraft dieser Studie zu erhöhen, wäre es sinnvoll, die Studienpopulation zu erweitern und gezielt kleinere Subgruppen zu bilden. Die vorliegende Untersuchung ist als Pilotstudie konzipiert und soll erste Hinweise auf relevante Unterschiede zwischen dem wachsenden und dem adulten Kiefer liefern. Gleichzeitig dient sie dazu, eine geeignete Methodik bereitzustellen, auf deren Grundlage weitergehende Studien entwickelt werden können.

### **4.3 Diskussion der Ergebnisse**

Im Gegensatz zu früheren Studien [48,59,61] und wie von [55] angegeben, wurde ein V-förmiges Muster der Knochenhöhe im vorderen Gaumenbereich festgestellt, wobei das größte Knochenangebot in den paramedianen Bereichen zu finden war. Interessanterweise zeigte sich dieses V-förmige Muster bei weiblichen Probanden sowie in der jüngeren Altersgruppe stärker ausgeprägt. Bis zur sagittalen Position 4, die sich an der orthogonalen Projektion der Verbindungslinie zwischen den mesialen Rändern der oberen ersten linken und rechten Prämolaren befindet, wurde bei mehr als 75 Prozent der eingeschlossenen Probanden eine paramediane Knochenhöhe von mehr als acht Millimeter festgestellt, unabhängig von Alter und Geschlecht. Daher wurde diese Region als sicherer Bereich klassifiziert.

Die in dieser Studie berichteten Werte für die mediane und paramediane Knochenhöhe stimmen mit früheren Berichten überein. Chhatwani et al. identifizierten eine maximale mittlere Knochenhöhe von  $9,7 \text{ mm} \pm 2,8 \text{ mm}$ , während Song Hee Oh et al. Knochenhöhen im Bereich von 2,5 bis 10 mm ermittelten und eine mittlere paramediane vordere Knochenhöhe von  $7,7 \text{ mm} \pm 2,31 \text{ mm}$  bei Männern und  $6,45 \text{ mm} \pm 2,09 \text{ mm}$  bei Frauen [48, 55]. Es ist zu beachten, dass die beiden Autoren unterschiedliche ethnische Gruppen in ihren Studien berücksichtigt haben. Ebenso wie in früheren Berichten [55] war die mittlere Knochenhöhe bei

männlichen Probanden höher als bei weiblichen, erreichte jedoch in der vorliegenden Untersuchung keine statistische Signifikanz. Die Knochenhöhe neigte auch dazu, mit zunehmendem Alter zu steigen, wie bereits beschrieben [55].

Es ist wichtig zu beachten, dass die absoluten Messergebnisse von der Ausrichtung des Oberkiefers abhängen und entsprechend variieren können. Ein genauere Vergleich ergibt sich jedoch, wenn relative Unterschiede in der Knochenhöhe im Oberkiefer berücksichtigt werden. Beide erwähnten Studien zeigten deutlich, dass die größte Knochenhöhe im vorderen Gaumenbereich liegt und distal allmählich abnimmt. Diese Beobachtungen stimmen mit den Ergebnissen dieser Studie überein.

Han et al. und Zuh et al. berichteten, dass die palatinale Knochendichte bei Erwachsenen signifikant höher war als bei Jugendlichen [62,63]. Diese Ergebnisse können nicht mit der vorliegenden Studie in Verbindung gebracht werden, da keine Kontrollgruppe von Erwachsenen verfügbar war. Die altersabhängige Entwicklung des Gaumens und der Gaumennaht wurde jedoch von Melsen et al. (1975) beschrieben, die feststellten, dass die Verknöcherung der Naht ein altersabhängiger Prozess ist [64]. Knap et al. verglichen die Breite der Gaumennaht in verschiedenen Altersgruppen und berichteten altersabhängige Veränderungen. Bis zum Alter von 26 Jahren betrug der Prozentsatz der Probanden mit einer geschlossenen medianen Gaumennaht nur 3,11 Prozent [65], was im Einklang mit Berichten von Melsen et al. steht. Neuere Studien bestätigten, dass die Naht bei der Mehrheit der wachsenden Probanden nicht vollständig verknöchert war [66-68]. In der vorliegenden Studie war das Knochenangebot besonders hoch in den vorderen paramedianen Regionen. In früheren Studien wurde daher eine leicht nach vorne gerichtete Angulierung der Mini-Implantate für die paramediane Insertion in der Höhe der ersten Prämolaren oder etwas weiter distal empfohlen [61, 69]. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die Anwendbarkeit dieses Verfahrens. Wie zuvor erwähnt müssten für genauere Empfehlungen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Eine Verletzung der Wurzeln der Schneidezähne stellt bei Insertionen in der paramedianen Region ein realistisches Risiko dar. Wurzelresorptionen können bereits bei einem Abstand von 0,6 mm zur Wurzel auftreten – auch ohne direkten

Kontakt zwischen dem Mini-Implantat und der Zahnwurzel [70]. In den meisten Fällen heilen leichtere Läsionen durch zementale Reparatur aus. Es gibt jedoch auch Berichte über schwerwiegendere Komplikationen, die eine endodontische Behandlung erforderlich machten [71]. Obwohl die Überlagerung eines Scans mit einem FRS bei den meisten Patienten für die Detektion der Frontzahnwurzeln geeignet erscheint, zeigte ein aktueller Bericht, dass mit dieser Methode eine Wurzelverletzung möglicherweise nicht zuverlässig erkannt wird, da ein Mini-Implantat zu nah an den Schneidezahnwurzeln platziert wurde [67].

Auch in der dieser Studie wurde eine Wurzelnähe bis zur Verbindungslinie der mesialen Kontaktpunkte der ersten Prämolaren festgestellt, wobei die Insertion von 13 mm langen Implantaten simuliert wurde. Regionen, in denen mindestens eine Wurzelverletzung simuliert wurde, wurden als risikobehaftet eingestuft; benachbarte Regionen erhielten lediglich eine eingeschränkte Empfehlung. Dieses strenge Bewertungskriterium wurde aufgrund der vergleichsweise geringen Probandenzahl gewählt, um eine konservative und präzise Einschätzung des Wurzelverletzungsrisikos zu gewährleisten. In zukünftigen Studien könnten die mittels FRS als sicher identifizierten Insertionszonen mit DVT-Daten korreliert werden und so zur Verbesserung der klinischen Sicherheit bei der Implantatinsertion beitragen – auch ohne routinemäßigen Einsatz der DVT-Diagnostik.

Ein weiterer entscheidender Aspekt, der bei der Implantation berücksichtigt werden muss, ist die Weichteil Anatomie des Gaumens. Eine der häufigsten Ursachen für den vorzeitigen Verlust von Mini-Implantaten ist eine Schleimhautentzündung, wie im wissenschaftlichen Artikel von Männchen und Schätzle beschrieben [72]. Entzündungen entstehen hauptsächlich aufgrund schlechter Mundhygiene und dem Eindringen durch schwache, nicht keratinisierte Schleimhaut. Vorbeugend sollte die Implantation in keratinisiertem Zahnfleisch erfolgen. Der harte Gaumen ist mit keratinisiertem Zahnfleisch bedeckt. Die Dicke variiert jedoch zwischen den Patienten und den verschiedenen Positionen [55]. Höhere Weichgewebswerte sind klinisch relevant, da sich der koronale Knochen-Implantat-Kontakt nach der Insertion nach apikal verlagert, was den Hebelarm vergrößert und somit die Stabilität der Mini-Implantate beeinträchtigen kann. Obwohl die Implantatinsertion häufig in der Nähe des dritten Paares der Gaumennaht

empfohlen wird, wiesen einige Autoren darauf hin, dass ein größerer Teil des Implantats in der Gingiva landen kann, was sich aufgrund eines verlängerten Hebelarms negativ auf die Belastungsbedingungen auswirkt [73, 74, 75]. Im Gegensatz dazu stellte Song Hee Oh et al., die die Höhe des Weichgewebes des Gaumens mit einem Messraster untersuchten, fest, dass die Weichgewebstdicke nur in der Nähe des Foramen incisivum zunahm, während ab einer Entfernung von vier Millimeter oder mehr von dem Foramen keine signifikanten Unterschiede in der Weichgewebstdicke zwischen medianen und paramedianen Stellen festgestellt wurden, und Werte im Bereich von ein bis zwei Millimetern beobachtet wurden [55].

Es ist anzumerken, dass mit der vorliegenden Pilotstudie mehrere Einschränkungen verbunden waren. Dazu zählt, dass keine Messungen der Weichgewebstdicke durchgeführt worden sind. Darüber hinaus könnte argumentiert werden, dass in der klinischen Praxis kieferorthopädische Implantate häufig senkrecht zur Knochenoberfläche eingesetzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Steilheit der Knochenoberfläche könnten die entsprechenden Ergebnisse jedoch schwer interpretierbar sein. In der vorliegenden Pilotstudie wurde daher versucht, eine 3D-Visualisierung eines typischen Gaumens zu erstellen. Die Studie liefert eine Karte, die sowohl die empfohlenen Regionen als auch Bereiche mit erhöhtem Risiko für Wurzelverletzungen oder unzureichendem Knochenangebot hervorhebt. Eine solche Karte stellt eine praktische Hilfestellung für die klinische Implantation dar.

Darüber hinaus schien die Variation der Knochenhöhe in Abhängigkeit vom Alter nur einen geringen Einfluss auf die posterioren Bereiche zu haben. Angesichts der geringen Fallzahl und der kontinuierlichen Altersverteilung sind weitere Untersuchungen erforderlich, um zu prüfen, ob eine erhöhte Sicherheit mit einer anterioren Platzierung der Implantate bei jüngeren Patienten verbunden ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei wachsenden Patienten eine paramediane Implantation empfehlenswert sein könnte. Zudem sollte die Insertion in der Höhe der ersten Prämolaren erfolgen, die den Bereich des dritten Gaumenfaltenpaares oder etwas weiter distal repräsentiert. Bei nach palatinal geneigten oder nach palatinal gekippten Kronen der oberen Schneidezähne kann

bei begrenztem Knochenangebot eine anterior geneigte Implantation erfolgen. Schließlich sollten Kliniker sorgfältig berücksichtigen, dass die individuelle Knochenhöhe variieren kann. Es ist zu beachten, dass die vorliegende Pilotstudie nicht untersucht hat, ob ein DVT in spezifischen Fällen, wie bei palatinal verschobenen Zähnen, Spalten, geringem Knochenangebot oder erhöhter Weichgewebsdicke, gerechtfertigt sein könnte; für solche Situationen wird in den aktuellen Leitlinien eine strenge Indikationsstellung für DVT empfohlen.

Aufgrund der geringen Stichprobengröße der vorliegenden Pilotstudie sind zukünftige Untersuchungen erforderlich, um die altersabhängige Reifung der palatinalen Knochenhöhe an verschiedenen medianen und paramedianen Positionen in sagittaler und transversaler Richtung weiter zu untersuchen.

## **5 Ausblick**

Zukünftige Studien sollten darauf abzielen, die gewonnenen Erkenntnisse weiter zu validieren und zu erweitern. Eine deutlich größere und idealerweise multizentrische Stichprobe wäre wünschenswert, um eine repräsentativere Datengrundlage zu schaffen und eine aussagekräftige Stratifikation nach Alter, Geschlecht und weiteren Einflussfaktoren zu ermöglichen.

Dabei sollten sowohl mediane als auch paramediane Regionen systematisch in sagittaler und transversaler Richtung analysiert werden, um differenzierte Aussagen über die altersabhängige Entwicklung der Gaumenknochendicke treffen zu können. Die Integration verschiedener Implantatlängen wie sieben, neun und elf Millimeter sowie variabler Insertionswinkel würde eine praxisnähere Bewertung des Wurzelverletzungsrisikos erlauben.

Zudem sollten zukünftige Untersuchungen auch die Dicke des Weichgewebes sowie den kortikalen Knochenanteil erfassen, da beide Parameter entscheidend für die primäre Stabilität orthodontischer Mini-Implantate sind. Ergänzend könnten klinische Stabilitätsmessungen zum Beispiel mittels Resonanzfrequenzanalyse erfolgen, um eine Korrelation zwischen radiologischen Befunden und tatsächlicher Implantatstabilität herzustellen.

Besonders relevant wäre darüber hinaus ein direkter Vergleich zwischen 2D-gestützter Planung (z. B. mit Fernröntgenseitenbild) und 3D-Bildgebung (DVT), um die diagnostische Aussagekraft beider Methoden im Hinblick auf die Vorhersagbarkeit sicherer Insertionszonen besser einordnen zu können.

Langfristig könnten diese Untersuchungen zur Entwicklung evidenzbasierter Leitlinien für die Planung und Insertion orthodontischer Mini-Implantate bei wachsenden Patienten beitragen und somit sowohl die Sicherheit als auch die klinische Erfolgsrate steigern.

## **6 Fazit**

Im Rahmen ihrer Limitationen (geringe Stichprobengröße von nur 20 Probanden, eingeschränkte Generalisierbarkeit und begrenzter Untersuchungsumfang) zeigte die vorliegende Pilotstudie ein V-förmiges Muster im anterioren Gaumenbereich bei wachsenden Patienten. Jüngere Patienten neigten zu einem ausgeprägteren V-förmigen Knochenhöhenmuster im anterioren Gaumenbereich. Dieses V-förmige Muster war auch bei weiblichen Patienten stärker ausgeprägt, während die Gesamtknochenhöhe bei männlichen Patienten höher war.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei jüngeren Patienten eine paramediane Insertion leicht hinter der Verbindungslinie zwischen dem mesialen Rand der ersten Prämolaren bzw. der dritten Rugae-Paare empfehlenswert sein könnte. Besonders im anterioren Bereich wurde eine höhere Odds Ratio für Wurzelverletzungen beobachtet, was darauf hinweist, dass in diesen Regionen die Anfertigung einer dreidimensionalen Röntgenaufnahme vorteilhaft sein könnte – insbesondere dann, wenn eine Überlagerung mit dem Fernröntgenseitenbild keine eindeutige Aussage zulässt.

Aufgrund der geringen Fallzahl dieser Studie sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die altersabhängige Reifung der palatinalen Knochenstruktur in medianer und paramedianer Lage sowie in sagittaler und transversaler Richtung besser zu verstehen.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Becker, K., Wilmes, B., Grandjean, C., Vasudavan, S. & Drescher, D. (2018). Skeletally anchored mesialization of molars using digitized casts and two surface-matching approaches: Analysis of treatment effects. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 79(1), 11–18. <https://doi.org/10.1007/s00056-017-0108-y>
2. Berens, A. & Wiechmann, D. (2006). Mini- und Mikroschrauben als skelettale Verankerung in der Kieferorthopädie. Optimierung des klinischen Vorgehens. *Kieferorthopädie*, 20(3), 167–174.
3. Wilmes, B. (2007). Insertion von Minischrauben. In B. Ludwig (Hrsg.), *Mini-Implantate in der Kieferorthopädie. Innovative Verankerungskonzepte* (S. 89–120). Berlin: Quintessenz.
4. ARö, DGZMK (2022). Dentale digitale Volumentomographie (Langversion 3.0). AWMF Registernummer: 083-005. Verfügbar unter: <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/083-005.html> [Zugriff am 15.10.2024]
5. Becker, K., Mekic, A., Nienkemper, M., Drescher, D. & Langer, L.J. (2026). Anterior palatal bone thickness: A retrospective cross-sectional CBCT pilot study in children and adolescents. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* [in Vorbereitung].
6. Kanomi, R. (1997). Mini-implant for orthodontic anchorage. *Journal of Clinical Orthodontics*, 31(11), 763–767.
7. Cunha, T.M.A.D., Barbosa, I.D.S. & Palma, K.K. (2021). Orthodontic digital workflow: devices and clinical applications. *Dental Press Journal of Orthodontics*, 26(6). <https://doi.org/10.1590/2177-6709.26.6.e21spe6>

8. Cassetta, M., Altieri, F., Di Giorgio, R. & Barbato, E. (2018). Palatal orthodontic miniscrew insertion using a CAD-CAM surgical guide: description of a technique. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 47(9), 1195–1198. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2018.03.018>
9. Willmann, J.W.B. & Drescher, D. (2019). Digitale Mini-implantat getragene Suprakonstruktionen – Design und Workflows. *Journal of Comprehensive Dentofacial Orthopedics and Orthopedics (COO)*, 16–20.
10. Kuwert, T. (2007). *Nuklearmedizin* (1. Auflage). Stuttgart: Thieme. ISBN 978-3-131-18504-4.
11. Gruben, C. et al. (2008). *Grundkurs Strahlenschutz*. Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-75849-5.
12. Lüllmann-Rauch, R. (2006). *Histologie* (2. Auflage). Stuttgart: Thieme. ISBN 3-131-29242-3
13. Aumüller, G., Aumüller, T. & Krol, B. (2006). *Duale Reihe Anatomie* (1. Auflage). Stuttgart: Thieme. ISBN 978-3-131-36041-0.
14. Behrends, A., Krol, B. & Weiglein, A. (2009). *Duale Reihe Physiologie* (1. Auflage). Stuttgart: Thieme. ISBN 978-3-131-38411-9.
15. Bommas-Ebert, M., Lang, C. & Krol, B. (2006). *Kurzlehrbuch Anatomie und Embryologie* (2. Auflage). Stuttgart: Thieme. ISBN 978-3-131-35532-4.
16. Schwenzer, N. & Ehrenfeld, M. (2002). *Spezielle Chirurgie 2: Zahn-, Mund-, Kieferheilkunde* (3. Auflage). Stuttgart: Georg Thieme Verlag, S. 195 ff.
17. Müller, O. (2018). *Digitale Volumetomografie in der Zahnheilkunde: DVT-Fachkundewissen von A-Z*. Spitta GmbH, S. 44–50

18. Meiners, H. (1981). Röntgenphysik und Strahlenschutz für Zahnmediziner: Eine Einführung für Studium und Praxis. München: Hanser, S. 71–75.
19. Schulze, R., Heil, U., Gross, D., Bruellmann, D.D., Dranischnikow, E., Schwanecke, U. & Schoemer, E. (2011). Artefacts in CBCT: a review. *Dentomaxillofacial Radiology*, 40(5), 265–273. <https://doi.org/10.1259/dmfr/30642039>
20. Korlin, H. & Kyöstilä, H. (2021). 50 Jahre als Impulsgeber für die Zahnmedizin. Official Planmeca website. Verfügbar unter: <https://www.planmeca.com/de/nachrichten-und-veranstaltungen/nachrichten/heikki-kyostila--50-jahre-als-impulsgeber-fur-die-zahnmedizin/> [Zugriff am 02.07.2022].
21. Ludlow, J.B. & Koivisto, J. (2015). Dosimetry of orthodontic diagnostic FOVs using low dose CBCT protocol. UNC Dentistry. Verfügbar unter: <https://www.planmeca.com/ULD-poster> [Zugriff am 02.07.2022].
22. Ihlis RL, Kadesjö N, Tsilingaridis G, Benchimol D, Shi XQ. Image quality assessment of low-dose protocols in cone beam computed tomography of the anterior maxilla. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*. 2022;133(4):483–91.
23. Liljeholm, R., Kadesjö, N., Benchimol, D., Hellén-Halme, K. & Xie-Qi, S. (2017). Cone-beam computed tomography with ultra-low dose protocols for pre-implant radiographic assessment: An in vitro study. *European Journal of Oral Implantology*, 10(3), 351–359.
24. Chen, M., Stratis, A., Coucke, W., Codari, M., Politis, C. & Jacobs, R. (2016). As low dose as sufficient quality: Optimization of cone-beam computed tomographic scanning protocol for tooth autotransplantation planning and follow-up in children. *Journal of Endodontics*, 43(2).

25. Yeung, A.W.K., Harper, B., Zhang, C., Neelakantan, P. & Bornstein, M.M. (2020). Do different cone beam computed tomography exposure protocols influence subjective image quality prior to and after root canal treatment? *Clinical Oral Investigations*, 25, 2119–2127.
26. Wilmes, B., Drescher, D. & Nienkemper, M. (2009). A miniplate system for improved stability of skeletal anchorage. *Journal of Clinical Orthodontics*, 43(8), 494–501.
27. Sebbar, M., Bourzgui, F., Aazzab, B. & Elquars, F. (2011). Anchorage miniscrews: a surface characterization study using optical microscopy. *International Orthodontics*, 9, 325–338.
28. Marigo, G., Elias, C.N. & Marigo, M. (2016). Surface analysis of 2 orthodontic mini-implants after clinical use. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 150(1), 89–97.
29. Wilmes, B., Ottenstreuer, S., Su, Y.Y. & Drescher, D. (2008). Impact of implant design on primary stability of orthodontic mini-implants. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 69(1), 42–50.
30. Nienkemper, M., Pauls, A., Ludwig, B. & Drescher, D. (2015). Stability of paramedian inserted palatal mini-implants at the initial healing period: a controlled clinical study. *Clinical Oral Implants Research*, 26(8), 870–875.
31. Wilmes B, Willmann J, Stocker B, Drescher D. Mini-Implantate zur kieferorthopädischen Verankerung in anterioren Gaumen, mediane vs. paramediane Insertion. *Thieme*. 2015;47:243–8.
32. Mei, L., Huang, J., Li, D. & Zhang, H. (2023). Success rate and factors affecting the clinical success of orthodontic miniscrews: A systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*, 23, 680.

33. Topouzelis, N. & Tsaousoglou, P. (2012). Clinical factors correlated with the success rate of miniscrews in orthodontic treatment. *International Journal of Oral Science*, 4, 38–44.
34. Homolka, P., Beer, A., Birkfellner, W., Nowotny, R., Gahleitner, A., Tschabitscher, M. et al. (2002). Bone mineral density measurement with dental quantitative CT prior to dental implant placement in cadaver mandibles: pilot study. *Radiology*, 224, 247–252.
35. Miyamoto, I., Tsuboi, Y., Wada, E., Suwa, H. & Iizuka, T. (2005). Influence of cortical bone thickness and implant length on implant stability at the time of surgery—clinical, prospective, biomechanical, and imaging study. *Bone*, 37, 776–780.
36. Wilmes B, Drescher D. Impact of bone quality, implant type, and implantation site preparation on insertion torques of mini-implants used for orthodontic anchorage. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2011;40:697–703.
37. Wilmes B, Rademacher C, Olthoff G, Drescher D. Parameters affecting primary stability of orthodontic mini-implants. *J Orofac Orthop*. 2006;67:162–74.
38. Miyawaki S, Koyama I, Inoue M, Mishima K, Sugahara T, Takano-Yamamoto T. Factors associated with the stability of titanium screws placed in the posterior region for orthodontic anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2003;124:373–378
39. Chen YH, Chang HH, Chen YJ, Lee D, Chiang HH, Yao CC. Root contact during insertion of miniscrews for orthodontic anchorage increases the failure rate: an animal study. *Clin Oral Implants Res*. 2008;19:99–106.
40. Kuroda, S., Yamada, K., Deguchi, T., Hashimoto, T., Kyung, H.M. & Takano-Yamamoto, T. (2007). Root proximity is a major factor for screw

failure in orthodontic anchorage. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 131(4 Suppl), S68–S73.  
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.06.017>

41. Ludwig B, Glasl B, Bowman SJ, Wilmes B, Kinzinger GS, Lisson JA. Anatomical guidelines for miniscrew insertion: palatal sites. *J Clin Orthod*. 2011;45:433–41; quiz 467.
42. Karagkiolidou A, Ludwig B, Pazera P, Gkantidis N, Pandis N, Katsaros C. Survival of palatal miniscrews used for orthodontic appliance anchorage: a retrospective cohort study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2013;143:767–72.
43. Guler AU, Sumer M, Duran I, Sandikci EO, Telcioglu NT. Resonance frequency analysis of 208 Straumann dental implants during the healing period. *J Oral Implantol*. 2013;39:161–167.
44. Nienkemper, M., Wilmes, B., Pauls, A. & Drescher, D. (2014). Mini-implant stability at the initial healing period: a clinical pilot study. *Angle Orthodontist*, 84(1), 127–133. <https://doi.org/10.2319/040813-271.1>
45. Möhlhenrich SC, Heussen N, Winterhalder P, Prescher A, Hölzle F, Modabber A, Wolf M, Kniha K. Predicting primary stability of orthodontic mini-implants, according to position, screw size, and bone quality, in the maxilla of aged patients: a cadaveric study. *Eur J Oral Sci*. 2019;127(5):462–71.
46. Pan, C.Y., Chou, S.T., Tseng, Y.C., Yang, Y.H., Wu, C.Y., Lan, T.H., Liu, P.H. & Chang, H.P. (2012). Influence of different implant materials on the primary stability of orthodontic mini-implants. *Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 28(12), 673–678.

47. Seeling, S. & Prütz, F. (2018). Inanspruchnahme kieferorthopädischer Behandlung durch Kinder und Jugendliche in Deutschland – Querschnittergebnisse aus KiGGS Welle 2 und Trends. *Journal of Health Monitoring*, 3(4). Robert Koch-Institut, Berlin.
48. Chhatwani S, Rose-Zierau V, Haddad B, Almuzian M, Kirschneck C, Danesh G. Three-dimensional quantitative assessment of palatal bone height for insertion of orthodontic implants - a retrospective CBCT study. *Head Face Med*. 2019;15(1):9.
49. Chen W, Zhang K, Liu D. Palatal bone thickness at the implantation area of maxillary skeletal expander in adult patients with skeletal Class III malocclusion: a cone-beam computed tomography study. *BMC Oral Health*. 2021;21(1):144.
50. Siddiqi, A., Kieser, J.A., De Silva, R.K., McNaughton, A., Zafar, S. & Duncan, W.J. (2013). Trabecular bone microarchitecture in the median palate and maxillary premolar alveolar sites of edentulous elderly cadavers. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 71(11)
51. Proffit WR, Fields HW, Sarver D. Contemporary orthodontics. St Louis, MO: Mosby Elsevier; 2012.
52. Nakahara K, Matsunaga S, Abe S, Tamatsu Y, Kageyama I, Hashimoto M, Ide Y. Evaluation of the palatal bone for placement of orthodontic mini-implants in Japanese adults. *Cranio*. 2012;30(1):72–9.
53. Kalra S, Tripathi T, Rai P, Kanase A. Evaluation of orthodontic mini-implant placement: a CBCT study. *Prog Orthod*. 2014;15(1):61.
54. Bonangi, R., Kamath, G., Srivathsa, H.S. & Babshet, M. (2018). Utility of CBCT for the measurement of palatal bone thickness. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*, 119(3), 196–198.

55. Oh SH, Lee SR, Choi JY, Kim SH, Hwang EH, Nelson G. Quantitative cone-beam computed tomography evaluation of hard and soft tissue thicknesses in the midpalatal suture region to facilitate orthodontic mini-implant placement. *Korean J Orthod.* 2021;51(4):260–269.
56. Almeida MA, Phillips C, Kula K, Tulloch C. Stability of the palatal rugae as landmarks for analysis of dental casts. *Angle Orthod.* 1995;65(1):43–48.
57. Nienkemper M, Wilmes B, Panayotidis A, Pauls A, Golubovic V, Schwarz F, Drescher D. Measurement of mini-implant stability using resonance frequency analysis. *Angle Orthod.* 2013 Mar;83(2):230-8.
58. Schubert, H., Matta, R., Seidel, A. et al. Three-dimensional digital imaging analysis of the palatal bone thickness for orthodontic mini-implant insertion – determination of the safe zone and angulation. *BMC Oral Health* 24, 1448 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05229-y>
59. Hourfar J, Ludwig B, Bister D, Braun A, Kanavakis G. The most distal palatal ruga for placement of orthodontic mini-implants. *Eur J Orthod.* 2015;37(4):373–8.
60. Hourfar J, Bister D, Kanavakis G, Lisson JA, Ludwig B. Influence of interradicular and palatal placement of orthodontic mini-implants on the success (survival) rate. *Head Face Med.* 2017;13(1):14.
61. Becker, K., Unland, J., Wilmes, B., Tarraf, N.E. & Drescher, D. (2019). Is there an ideal insertion angle and position for orthodontic mini-implants in the anterior palate? A CBCT study in humans. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 156(3), 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2018.09.019>

62. Zuh, A., et al. (2024). Mapping optimal orthodontic implant sites in the palate using cone-beam computed tomography. *Frontiers in Oral Health, Section Oral and Maxillofacial Surgery*, 5, October 2024.
63. Han, S., Bayome, M., Lee, J., Lee, Y.-J., Song, H. & Kook, Y.-A. (2012). Evaluation of palatal bone density in adults and adolescents for application of skeletal anchorage devices. *The Angle Orthodontist*, 82(4), 625–631.
64. Melsen B. Palatal growth studied on human autopsy material. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1975;68:42-54. doi:10.1016/0002-9416(75)90158-X.
65. Knaup B, Yildizhan F, Wehrbein H. Age-related changes in the midpalatal suture: A histomorphometric study. *J Orofac Orthop.* 2004;65(6):467–74.
66. Revelo B, Fishman LS. Maturational evaluation of ossification of the midpalatal suture. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1994;105(3):288–92.
67. Samra DA, Hadad R. Skeletal age-related changes of midpalatal suture densities in skeletal maxillary constriction patients: CBCT study. *J Contemp Dent Pract.* 2018;19(10):1260–6.
68. Jimenez-Valdivia LM, Malpartida-Carrillo V, Rodríguez-Cárdenas YA, Dias-Da Silveira HL, Arriola-Guillén LE. Midpalatal suture maturation stage assessment in adolescents and young adults using cone-beam computed tomography. *Prog Orthod.* 2019;20(1):38.
69. Nienkemper M, Ludwig B. Risk of root damage after using lateral cephalogram and intraoral scan for guided insertion of palatal miniscrews. *Head Face Med.* 2022;18(1):1–6.
70. Maino BG, et al. Root damage and repair after contact with miniscrews. *J Clin Orthod.* 2007;41(12):762-766; quiz 750.

71. Er K, et al. Root canal treatment of a periradicular lesion caused by unintentional root damage after orthodontic miniscrew placement: a case report. *Int Endod J.* 2011;44(12):1170-1175.
72. Männchen R, Schätzle M. Indikation unterschiedlicher skelettaler Verankerungssysteme unter Berücksichtigung ihrer Misserfolgsraten und Risikofaktoren. *Informationen aus Orthodontie & Kieferorthopädie.* 2011;43(02):111–22.
73. Wilmes B, Ludwig B, Vasudavan S, Nienkemper M, Drescher D. The T-Zone: Median vs. Paramedian Insertion of Palatal Mini Implants. *J Clin Orthod.* 2016;50(9):545–60.
74. Luzi C, Verna C, Melsen B. A prospective clinical investigation of the failure rate of immediately loaded mini-implants used for orthodontic anchorage. *Prog Orthod.* 2007;8(1):192–201.
75. Nienkemper M, Santel N, Hönscheid R, Drescher D. Orthodontic mini-implant stability at different insertion depths : Sensitivity of three stability measurement methods. *J Orofac Orthop.* 2016 Jul;77(4):296-303. English. doi: 10.1007/s00056-016-0036-2. Epub 2016 Jun 7. PMID: 27272055.

Sagittal position	Transversal position	Age group	Gender	Mean (mm)	Std. deviation (mm)
1	L6	6-12	f	12.93	3.55
1	L6	6-12	m	14.22	2.43
1	L6	13-18	f	12.18	2.81
1	L6	13-18	m	10.95	3.59
1	L5	6-12	f	14.77	2.30
1	L5	6-12	m	13.48	2.03
1	L5	13-18	f	13.76	4.24
1	L5	13-18	m	12.50	3.59

1	L4	6-12	f	14.60	2.26
1	L4	6-12	m	12.95	1.56
1	L4	13-18	f	13.54	4.52
1	L4	13-18	m	12.85	3.37
1	L3	6-12	f	14.60	1.97
1	L3	6-12	m	12.57	1.13
1	L3	13-18	f	13.12	4.57
1	L3	13-18	m	12.92	3.10
1	L2	6-12	f	13.80	2.17
1	L2	6-12	m	12.53	1.61
1	L2	13-18	f	13.26	4.55
1	L2	13-18	m	12.34	2.92
1	L1	6-12	f	13.13	3.25
1	L1	6-12	m	11.30	1.99
1	L1	13-18	f	13.12	4.41
1	L1	13-18	m	11.82	1.64
1	S	6-12	f	8.87	2.43
1	S	6-12	m	10.97	2.13
1	S	13-18	f	12.58	4.50
1	S	13-18	m	10.86	1.95
1	R1	6-12	f	13.73	1.72
1	R1	6-12	m	11.77	2.51
1	R1	13-18	f	12.60	5.25
1	R1	13-18	m	11.90	2.04
1	R2	6-12	f	14.90	2.10
1	R2	6-12	m	12.20	2.46
1	R2	13-18	f	13.10	5.05
1	R2	13-18	m	12.72	2.54
1	R3	6-12	f	15.43	2.72
1	R3	6-12	m	12.92	1.92
1	R3	13-18	f	12.44	5.31
1	R3	13-18	m	13.53	3.11
1	R4	6-12	f	15.77	3.23
1	R4	6-12	m	13.15	1.88
1	R4	13-18	f	12.52	5.59
1	R4	13-18	m	13.52	3.16
1	R5	6-12	f	14.93	3.89
1	R5	6-12	m	13.22	1.94
1	R5	13-18	f	12.58	5.93
1	R5	13-18	m	13.33	3.35
1	R6	6-12	f	13.73	3.04
1	R6	6-12	m	13.82	1.95
1	R6	13-18	f	13.02	6.57
1	R6	13-18	m	11.90	3.70
2	L6	6-12	f	15.07	3.58

2	L6	6-12	m	13.42	2.23
2	L6	13-18	f	13.84	4.48
2	L6	13-18	m	12.73	4.37
2	L5	6-12	f	14.67	3.52
2	L5	6-12	m	12.82	2.22
2	L5	13-18	f	13.30	4.08
2	L5	13-18	m	12.77	3.83
2	L4	6-12	f	14.57	3.40
2	L4	6-12	m	12.25	1.76
2	L4	13-18	f	13.00	4.32
2	L4	13-18	m	13.05	3.90
2	L3	6-12	f	15.37	3.52
2	L3	6-12	m	11.93	1.40
2	L3	13-18	f	12.88	4.60
2	L3	13-18	m	12.90	3.39
2	L2	6-12	f	15.13	4.06
2	L2	6-12	m	12.20	1.72
2	L2	13-18	f	12.34	4.66
2	L2	13-18	m	12.59	3.36
2	L1	6-12	f	13.43	3.49
2	L1	6-12	m	11.60	1.13
2	L1	13-18	f	11.98	4.66
2	L1	13-18	m	12.82	3.20
2	S	6-12	f	10.80	3.29
2	S	6-12	m	11.17	1.69
2	S	13-18	f	11.98	4.17
2	S	13-18	m	10.93	2.62
2	R1	6-12	f	12.53	2.07
2	R1	6-12	m	11.50	1.63
2	R1	13-18	f	12.30	4.22
2	R1	13-18	m	11.93	3.04
2	R2	6-12	f	13.50	2.93
2	R2	6-12	m	11.87	1.61
2	R2	13-18	f	12.84	4.53
2	R2	13-18	m	12.70	3.30
2	R3	6-12	f	14.53	3.32
2	R3	6-12	m	12.43	1.54
2	R3	13-18	f	13.18	4.63
2	R3	13-18	m	13.38	3.32
2	R4	6-12	f	14.77	3.53
2	R4	6-12	m	12.65	1.74
2	R4	13-18	f	13.60	4.67
2	R4	13-18	m	13.35	3.66
2	R5	6-12	f	15.17	4.12
2	R5	6-12	m	12.67	1.87

2	R5	13-18	f	13.04	4.93
2	R5	13-18	m	13.47	3.61
2	R6	6-12	f	15.17	4.04
2	R6	6-12	m	13.10	1.88
2	R6	13-18	f	12.88	4.84
2	R6	13-18	m	13.63	4.42
3	L6	6-12	f	13.77	4.40
3	L6	6-12	m	12.08	2.57
3	L6	13-18	f	13.94	3.57
3	L6	13-18	m	12.88	3.90
3	L5	6-12	f	13.40	4.67
3	L5	6-12	m	11.57	2.78
3	L5	13-18	f	13.08	3.54
3	L5	13-18	m	12.55	3.61
3	L4	6-12	f	13.23	4.61
3	L4	6-12	m	10.92	2.80
3	L4	13-18	f	12.28	3.83
3	L4	13-18	m	11.97	3.11
3	L3	6-12	f	12.83	4.25
3	L3	6-12	m	10.69	2.57
3	L3	13-18	f	12.12	4.09
3	L3	13-18	m	11.60	3.04
3	L2	6-12	f	12.73	3.93
3	L2	6-12	m	10.75	2.63
3	L2	13-18	f	11.56	4.15
3	L2	13-18	m	11.28	2.95
3	L1	6-12	f	12.50	4.16
3	L1	6-12	m	10.80	2.25
3	L1	13-18	f	11.00	4.31
3	L1	13-18	m	11.88	3.37
3	S	6-12	f	9.60	2.86
3	S	6-12	m	10.77	1.82
3	S	13-18	f	10.60	4.19
3	S	13-18	m	9.82	2.80
3	R1	6-12	f	11.23	2.45
3	R1	6-12	m	10.30	2.61
3	R1	13-18	f	10.98	4.56
3	R1	13-18	m	10.28	3.20
3	R2	6-12	f	12.33	3.13
3	R2	6-12	m	10.35	2.57
3	R2	13-18	f	11.72	4.58
3	R2	13-18	m	12.17	3.95
3	R3	6-12	f	13.13	3.50
3	R3	6-12	m	10.73	2.40
3	R3	13-18	f	11.98	4.40

3	R3	13-18	m	12.67	3.81
3	R4	6-12	f	13.60	3.73
3	R4	6-12	m	11.23	2.42
3	R4	13-18	f	12.22	4.36
3	R4	13-18	m	12.70	3.74
3	R5	6-12	f	13.90	3.86
3	R5	6-12	m	11.58	2.38
3	R5	13-18	f	12.42	4.43
3	R5	13-18	m	12.98	3.88
3	R6	6-12	f	13.73	4.45
3	R6	6-12	m	12.22	2.26
3	R6	13-18	f	12.72	4.11
3	R6	13-18	m	13.50	4.13
4	L6	6-12	f	14.13	6.60
4	L6	6-12	m	10.95	2.44
4	L6	13-18	f	12.98	3.50
4	L6	13-18	m	12.33	4.21
4	L5	6-12	f	13.80	7.21
4	L5	6-12	m	10.32	2.67
4	L5	13-18	f	12.30	3.49
4	L5	13-18	m	11.87	3.55
4	L4	6-12	f	13.57	7.05
4	L4	6-12	m	9.75	2.72
4	L4	13-18	f	11.86	3.55
4	L4	13-18	m	11.73	3.45
4	L3	6-12	f	13.27	6.95
4	L3	6-12	m	9.40	2.49
4	L3	13-18	f	11.74	3.99
4	L3	13-18	m	11.82	3.28
4	L2	6-12	f	13.03	6.01
4	L2	6-12	m	9.02	2.28
4	L2	13-18	f	11.50	4.05
4	L2	13-18	m	11.95	3.74
4	L1	6-12	f	11.83	4.73
4	L1	6-12	m	9.17	2.48
4	L1	13-18	f	10.98	3.91
4	L1	13-18	m	11.72	3.77
4	S	6-12	f	10.30	3.65
4	S	6-12	m	9.30	2.39
4	S	13-18	f	9.86	3.75
4	S	13-18	m	10.00	3.39
4	R1	6-12	f	9.47	3.48
4	R1	6-12	m	9.32	2.31
4	R1	13-18	f	10.10	3.55
4	R1	13-18	m	11.07	3.19

4	R2	6-12	f	10.53	4.15
4	R2	6-12	m	9.08	2.35
4	R2	13-18	f	10.58	3.86
4	R2	13-18	m	11.02	2.79
4	R3	6-12	f	12.20	5.46
4	R3	6-12	m	9.53	2.74
4	R3	13-18	f	10.84	4.16
4	R3	13-18	m	11.38	2.92
4	R4	6-12	f	11.83	4.12
4	R4	6-12	m	9.85	2.78
4	R4	13-18	f	11.24	4.12
4	R4	13-18	m	11.65	2.85
4	R5	6-12	f	11.87	4.02
4	R5	6-12	m	10.20	2.55
4	R5	13-18	f	11.74	4.21
4	R5	13-18	m	11.70	3.21
4	R6	6-12	f	12.27	4.25
4	R6	6-12	m	10.71	1.96
4	R6	13-18	f	12.08	4.43
4	R6	13-18	m	12.10	3.68
5	L6	6-12	f	9.13	1.02
5	L6	6-12	m	9.55	2.94
5	L6	13-18	f	11.70	2.89
5	L6	13-18	m	10.56	3.16
5	L5	6-12	f	8.90	1.59
5	L5	6-12	m	9.03	3.12
5	L5	13-18	f	10.72	2.60
5	L5	13-18	m	9.92	3.23
5	L4	6-12	f	8.57	1.72
5	L4	6-12	m	8.67	3.20
5	L4	13-18	f	9.78	2.48
5	L4	13-18	m	9.97	2.79
5	L3	6-12	f	9.28	2.53
5	L3	6-12	m	8.35	2.87
5	L3	13-18	f	9.26	2.07
5	L3	13-18	m	10.24	2.30
5	L2	6-12	f	9.18	2.48
5	L2	6-12	m	8.38	2.55
5	L2	13-18	f	9.00	2.41
5	L2	13-18	m	10.27	2.36
5	L1	6-12	f	9.05	2.05
5	L1	6-12	m	8.63	2.68
5	L1	13-18	f	8.61	2.39
5	L1	13-18	m	9.94	2.33
5	S	6-12	f	7.92	0.70

5	S	6-12	m	8.80	2.69
5	S	13-18	f	7.39	2.16
5	S	13-18	m	9.63	2.46
5	R1	6-12	f	7.63	1.27
5	R1	6-12	m	8.63	2.79
5	R1	13-18	f	7.96	1.98
5	R1	13-18	m	10.17	2.84
5	R2	6-12	f	8.37	2.02
5	R2	6-12	m	8.52	2.75
5	R2	13-18	f	8.70	2.61
5	R2	13-18	m	10.24	3.25
5	R3	6-12	f	8.80	1.82
5	R3	6-12	m	8.52	2.94
5	R3	13-18	f	9.41	2.98
5	R3	13-18	m	10.35	3.09
5	R4	6-12	f	8.10	0.61
5	R4	6-12	m	8.72	3.08
5	R4	13-18	f	10.17	3.21
5	R4	13-18	m	10.62	2.75
5	R5	6-12	f	8.37	0.72
5	R5	6-12	m	8.93	3.09
5	R5	13-18	f	10.72	3.27
5	R5	13-18	m	11.08	2.45
5	R6	6-12	f	8.87	0.90
5	R6	6-12	m	9.42	2.73
5	R6	13-18	f	11.12	3.46
5	R6	13-18	m	11.93	2.13
6	L6	6-12	f	7.77	1.39
6	L6	6-12	m	8.38	3.64
6	L6	13-18	f	10.02	2.30
6	L6	13-18	m	9.63	1.93
6	L5	6-12	f	6.92	1.03
6	L5	6-12	m	7.93	3.56
6	L5	13-18	f	9.06	2.41
6	L5	13-18	m	9.20	2.14
6	L4	6-12	f	6.24	0.65
6	L4	6-12	m	7.62	3.39
6	L4	13-18	f	8.17	2.93
6	L4	13-18	m	9.02	2.17
6	L3	6-12	f	6.26	0.92
6	L3	6-12	m	7.52	3.17
6	L3	13-18	f	7.74	3.23
6	L3	13-18	m	8.95	2.46
6	L2	6-12	f	5.50	0.36
6	L2	6-12	m	7.68	3.01

6	L2	13-18	f	7.16	3.01
6	L2	13-18	m	9.12	3.33
6	L1	6-12	f	5.42	0.78
6	L1	6-12	m	8.23	3.17
6	L1	13-18	f	7.00	2.91
6	L1	13-18	m	8.98	3.64
6	S	6-12	f	5.07	0.61
6	S	6-12	m	8.37	3.27
6	S	13-18	f	6.70	2.84
6	S	13-18	m	8.54	3.46
6	R1	6-12	f	5.36	0.58
6	R1	6-12	m	8.73	3.98
6	R1	13-18	f	6.46	2.74
6	R1	13-18	m	8.68	4.24
6	R2	6-12	f	5.86	0.51
6	R2	6-12	m	7.68	2.97
6	R2	13-18	f	6.84	2.90
6	R2	13-18	m	9.23	4.00
6	R3	6-12	f	6.22	0.23
6	R3	6-12	m	7.47	3.30
6	R3	13-18	f	7.41	2.65
6	R3	13-18	m	9.48	3.31
6	R4	6-12	f	6.44	0.24
6	R4	6-12	m	7.65	3.44
6	R4	13-18	f	7.97	2.27
6	R4	13-18	m	10.56	2.78
6	R5	6-12	f	7.31	0.19
6	R5	6-12	m	8.10	3.32
6	R5	13-18	f	8.42	2.27
6	R5	13-18	m	10.80	2.55
6	R6	6-12	f	8.08	0.79
6	R6	6-12	m	8.50	3.18
6	R6	13-18	f	9.14	2.34
6	R6	13-18	m	11.25	2.28
7	L6	6-12	f	6.23	1.20
7	L6	6-12	m	7.02	4.31
7	L6	13-18	f	8.72	1.97
7	L6	13-18	m	8.96	1.91
7	L5	6-12	f	5.72	0.59
7	L5	6-12	m	6.57	4.05
7	L5	13-18	f	8.05	1.78
7	L5	13-18	m	8.26	2.11
7	L4	6-12	f	5.17	0.12
7	L4	6-12	m	6.48	3.85
7	L4	13-18	f	7.58	2.00

7	L4	13-18	m	8.06	2.01
7	L3	6-12	f	4.90	0.10
7	L3	6-12	m	6.75	3.31
7	L3	13-18	f	6.81	2.36
7	L3	13-18	m	8.06	2.25
7	L2	6-12	f	4.62	0.28
7	L2	6-12	m	7.22	2.91
7	L2	13-18	f	6.55	2.39
7	L2	13-18	m	7.90	2.78
7	L1	6-12	f	4.88	0.16
7	L1	6-12	m	7.78	2.72
7	L1	13-18	f	6.09	2.67
7	L1	13-18	m	7.94	3.13
7	S	6-12	f	4.82	0.14
7	S	6-12	m	7.85	2.81
7	S	13-18	f	5.70	2.63
7	S	13-18	m	7.40	3.23
7	R1	6-12	f	4.75	0.53
7	R1	6-12	m	7.58	3.09
7	R1	13-18	f	5.93	2.57
7	R1	13-18	m	7.70	3.81
7	R2	6-12	f	4.87	0.40
7	R2	6-12	m	7.07	3.07
7	R2	13-18	f	6.13	2.16
7	R2	13-18	m	7.84	3.54
7	R3	6-12	f	4.92	0.28
7	R3	6-12	m	6.78	3.14
7	R3	13-18	f	6.62	1.72
7	R3	13-18	m	8.68	2.92
7	R4	6-12	f	5.13	0.35
7	R4	6-12	m	6.83	3.14
7	R4	13-18	f	7.05	1.57
7	R4	13-18	m	9.48	2.26
7	R5	6-12	f	5.53	0.45
7	R5	6-12	m	6.88	3.51
7	R5	13-18	f	7.33	1.69
7	R5	13-18	m	9.54	2.53
7	R6	6-12	f	6.13	0.72
7	R6	6-12	m	7.20	3.65
7	R6	13-18	f	8.10	1.94
7	R6	13-18	m	9.87	2.64
8	L6	6-12	f	5.00	0.79
8	L6	6-12	m	7.12	4.42
8	L6	13-18	f	7.34	1.41
8	L6	13-18	m	7.83	1.76

8	L5	6-12	f	4.37	0.47
8	L5	6-12	m	6.67	4.56
8	L5	13-18	f	6.70	1.30
8	L5	13-18	m	7.03	1.51
8	L4	6-12	f	4.22	0.56
8	L4	6-12	m	6.45	4.18
8	L4	13-18	f	6.27	1.45
8	L4	13-18	m	6.68	1.84
8	L3	6-12	f	4.17	0.65
8	L3	6-12	m	6.52	3.82
8	L3	13-18	f	6.07	1.79
8	L3	13-18	m	6.29	2.15
8	L2	6-12	f	4.28	0.33
8	L2	6-12	m	6.66	3.30
8	L2	13-18	f	5.83	1.92
8	L2	13-18	m	6.17	2.49
8	L1	6-12	f	4.40	0.17
8	L1	6-12	m	7.03	3.02
8	L1	13-18	f	5.64	2.27
8	L1	13-18	m	6.07	3.37
8	S	6-12	f	4.37	0.49
8	S	6-12	m	7.33	3.04
8	S	13-18	f	5.52	2.47
8	S	13-18	m	5.99	3.15
8	R1	6-12	f	4.52	0.28
8	R1	6-12	m	7.23	3.22
8	R1	13-18	f	5.62	2.01
8	R1	13-18	m	5.79	3.12
8	R2	6-12	f	4.47	0.21
8	R2	6-12	m	6.83	3.13
8	R2	13-18	f	5.55	1.95
8	R2	13-18	m	6.37	2.64
8	R3	6-12	f	4.23	0.45
8	R3	6-12	m	6.55	3.42
8	R3	13-18	f	5.56	1.80
8	R3	13-18	m	6.67	2.82
8	R4	6-12	f	4.23	0.38
8	R4	6-12	m	6.48	3.37
8	R4	13-18	f	5.72	1.65
8	R4	13-18	m	7.30	2.66
8	R5	6-12	f	4.33	0.38
8	R5	6-12	m	6.57	3.44
8	R5	13-18	f	6.04	1.57
8	R5	13-18	m	8.00	2.46
8	R6	6-12	f	4.68	0.43

8	R6	6-12	m	6.91	3.46
8	R6	13-18	f	6.47	1.42
8	R6	13-18	m	8.53	2.53

Ergänzungstabelle 1: Die Tabelle zeigt die mittlere Knochenhöhe (mm) und die Standardabweichung (mm) an den gemessenen Stellen für jedes Geschlecht (m/w) und die beiden Altersgruppen (6-12 / 13-18 Jahre). L1-6 bezieht sich auf die Messungen an den Rasterpunkten 1-6 auf der linken Seite, während R1-6 die Messungen an den Rasterpunkten 1-6 auf der rechten Seite darstellt. S steht für die Messungen an der Naht.

Comparison	Estimate	SE	DF	t.ratio	P-value
sag_position1 - sag_position2	-0.22	0.64	147.37	-0.34	1.00
sag_position1 - sag_position3	0.76	0.64	147.37	1.18	0.94
sag_position1 - sag_position4	1.22	0.64	147.37	1.90	0.55
sag_position1 - sag_position5	2.46	0.64	147.37	3.82	0.00
sag_position1 - sag_position6	3.51	0.64	147.37	5.46	0.00
sag_position1 - sag_position7	4.30	0.64	147.37	6.68	0.00
sag_position1 - sag_position8	4.99	0.64	147.37	7.76	0.00
sag_position2 - sag_position3	0.98	0.64	147.37	1.52	0.79
sag_position2 - sag_position4	1.45	0.64	147.37	2.24	0.33
sag_position2 - sag_position5	2.68	0.64	147.37	4.16	0.00
sag_position2 - sag_position6	3.74	0.64	147.37	5.80	0.00
sag_position2 - sag_position7	4.52	0.64	147.37	7.02	0.00
sag_position2 - sag_position8	5.22	0.64	147.37	8.10	0.00
sag_position3 - sag_position4	0.47	0.64	147.37	0.72	1.00
sag_position3 - sag_position5	1.70	0.64	147.37	2.64	0.15
sag_position3 - sag_position6	2.76	0.64	147.37	4.28	0.00
sag_position3 - sag_position7	3.54	0.64	147.37	5.50	0.00
sag_position3 - sag_position8	4.24	0.64	147.37	6.58	0.00
sag_position4 - sag_position5	1.24	0.64	147.37	1.92	0.54
sag_position4 - sag_position6	2.29	0.64	147.37	3.56	0.01
sag_position4 - sag_position7	3.08	0.64	147.37	4.78	0.00
sag_position4 - sag_position8	3.77	0.64	147.37	5.86	0.00
sag_position5 - sag_position6	1.06	0.64	147.37	1.64	0.73
sag_position5 - sag_position7	1.84	0.64	147.37	2.86	0.09
sag_position5 - sag_position8	2.53	0.64	147.37	3.93	0.00
sag_position6 - sag_position7	0.79	0.64	147.37	1.22	0.92
sag_position6 - sag_position8	1.48	0.64	147.37	2.30	0.30
sag_position7 - sag_position8	0.69	0.64	147.37	1.08	0.96

Ergänzungstabelle 2: In sagittaler Richtung wurden signifikante Unterschiede in weiter entfernten Positionen beobachtet. Der Vergleichsmaßstab zeigt die jeweiligen Vergleiche, während DF die Freiheitsgrade des Post-hoc-Tests angibt; der P-Wert ist in der rechten Spalte angegeben.

