

Aus dem Institut für 3D-Dentalradiologie - MESANTIS Berlin

DISSERTATION

Untersuchung zum Knochenangebot im palatinalen Seitenzahnbereich mittels digitaler Volumentomographie

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Nicolaus Koch

aus Hannover

Datum der Promotion: 05.12.2014

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	3
1. Einleitung	4
1.1. Anatomie des Gaumens und des Alveolarknochens im Oberkiefer	5
1.2. Skelettale Verankerung in der Kieferorthopädie	10
1.2.1. Historische Entwicklung der skelettalen Verankerung	10
1.2.2. Gaumenimplantate	12
1.2.3. Mini-Pins	12
1.2.4. Insertionsorte zur Platzierung der Mini-Pins und Gaumenimplantate	14
1.3. Röntgendiagnostik für die Insertionsplanung von Gaumen- implantaten und Mini-Pins	16
2. Fragestellung	20
3. Material und Methoden	21
3.1. Allgemeine Material und Methoden	21
3.1.1. Patientengut	21
3.1.2. DVT-Aufnahmen	22
3.1.3. Auswertungssoftware und Auswertungsmonitor	24
3.1.4. Statistische Auswertung	24
3.1.5. Allgemeine Vorgehensweise bei den Messungen	27
3.2. Spezielle Methoden	30
3.2.1. Knochenangebot in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze	30
3.2.2. Vergleich des Knochenangebots zwischen den ersten und zweiten Prämolaren im Oberkiefer	31
3.2.3. Vergleich des Knochenangebots zwischen den zweiten Prämolaren und ersten Molaren im Oberkiefer	32
3.2.4. Vergleich des Knochenangebots zwischen rechter und linker Kieferhälfte	33
3.2.5. Vergleich des Knochenangebots zwischen den Geschlechtern	33

3.2.6. Vergleich des Knochenangebots zwischen verschiedenen Altersgruppen	34
4. Ergebnisse	35
4.1. Allgemeine Statistik	35
4.1.1. Test auf Normalverteilung der Daten	35
4.1.2. Berechnung des Methodenfehlers	35
4.2. Auswertung der Hypothesen	36
4.2.1. Knochenangebot in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze	36
4.2.2. Vergleich des Knochenangebots zwischen den ersten und zweiten Prämolaren im Oberkiefer	41
4.2.3. Vergleich des Knochenangebots zwischen den zweiten Prämolaren und ersten Molaren im Oberkiefer	43
4.2.4. Vergleich des Knochenangebots zwischen rechter und linker Kieferhälfte	45
4.2.5. Vergleich des Knochenangebots zwischen den Geschlechtern	48
4.2.6. Vergleich des Knochenangebots zwischen verschiedenen Altersgruppen	50
5. Diskussion	57
5.1. Diskussion der Methode	57
5.2. Diskussion der Hypothesen	58
5.2.1. Knochenangebot in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze	58
5.2.2. Vergleich des Knochenangebots zwischen den ersten und zweiten Prämolaren im Oberkiefer	60
5.2.3. Vergleich des Knochenangebots zwischen den zweiten Prämolaren und ersten Molaren im Oberkiefer	61
5.2.4. Vergleich des Knochenangebots zwischen rechter und linker Kieferhälfte	62
5.2.5. Vergleich des Knochenangebots zwischen den Geschlechtern	62
5.2.6. Vergleich des Knochenangebots zwischen verschiedenen Altersgruppen	63
5.2. Allgemeine Diskussion und Schlussfolgerung	64

6. Literaturverzeichnis	71
7. Anhang	79
7.1. Tabellenverzeichnis	79
7.2. Abbildungsverzeichnis	80
7.3. Danksagung	82
7.4. Lebenslauf	83
7.5. Eidesstattliche Erklärung	84
7.6. Anteilserklärung an etwaigen erfolgten Publikationen	85

Zusammenfassung

Die maximale Verankerung mit Mini-Pins und Gaumenimplantaten erleichtert es dem Kieferorthopäden wesentlich, Zahnbewegungen auszuführen ohne unerwünschte Zahnbewegungen zu befürchten. Für die hierzu verwendeten Schrauben oder Implantate wird jedoch ausreichend Knochen benötigt, um eine sichere Verankerung zu gewährleisten und eine Verletzung anatomischer Strukturen auszuschließen.

Ziel dieser Studie war es, den Alveolar- und Gaumenknochen auf Höhe der Prämolaren und ersten Molaren zu messen, um möglicherweise neue Insertionsorte für Mini-Pins zu entdecken. Außerdem sollten mögliche Unterschiede im Knochenangebot in Abhängigkeit von Alter, Geschlecht und der Gaumenseite untersucht werden. Zusätzlich wurden Studien der letzten Jahre, die ebenfalls das Knochenangebot an unterschiedlichen Regionen im Gaumen vermessen haben, verglichen. Auf der Basis dieser Studien und der eigenen Arbeit wurde daraufhin eine Empfehlung ausgesprochen, an welchen Regionen im Oberkiefer Mini-Pins und Gaumenimplantate inseriert werden können.

Hierzu wurden Digitale Volumentomographien (DVT) von 140 Patienten an jeweils 30 definierten Koordinaten vermessen. Es wurde an den Prämolaren sowie den ersten Molaren bei 13, 16, 19, 21 und 23 mm Entfernung zur palatinalen Kronenspitze gemessen. Ausschlusskriterien bildeten Syndrome oder Lippen-Kiefer-Gaumenspalten. Die Patienten wurden in 4 Gruppen aufgeteilt (12-15 Jahre männlich, 12-15 Jahre weiblich und 15-29 Jahre männlich, 15-29 Jahre weiblich). Insgesamt ergaben sich daraus 4200 Messungen, die zur Auswertung der a priori aufgestellten Hypothesen über das Knochenangebot herangezogen werden konnten.

Die Region mit dem größten Knochenangebot befand sich an den ersten Prämolaren bei einem Abstand von 21 und 23 mm von der palatinalen Kronenspitze. Das Geschlecht und die Gaumenseite hatten keinen Einfluss auf das Knochenangebot. Im Gegensatz dazu war das Alter entscheidend für die Menge an Knochen. Die jüngeren Patienten wiesen mehr Knochen auf als die älteren Patienten.

Auf den gesamten Gaumen bezogen wiesen die Region zwischen den Wurzeln und der Bereich des anterioren Gaumens das größte Knochenangebot für Mini-Pins und kieferorthopädische Implantate auf. Insgesamt war jedoch festzustellen, dass das Knochenangebot an den einzelnen Koordinaten in allen Studien sehr inkonstant war. Als Fazit dieser Studie lässt sich somit feststellen, dass vor der Insertion eines Mini-Pins oder eines Gaumenimplantats unbedingt ein diagnostisches dreidimensionales Röntgenbild angefertigt werden sollte.

Abstract

The maximum anchorage with mini - pins and palatal implants makes it easier for the orthodontist to carry out tooth movement without fear of unwanted side effects. However, sufficient bone is required to ensure a secure anchoring and to prevent anatomical structures from damage caused by the screws or implants used.

The aim of this study was to measure the alveolar and palatal bone at the level of the premolars and first molars to possibly discover new insertion sites for mini pins. In addition, possible differences in bone volume regarding age, gender or palate side were investigated. Furthermore, recent studies, which also measured the bone quantity at different regions on the palate, were compared. On the basis of these studies and our own results, a recommendation regarding safe sites for implantation of Mini-Pins and palate implants is presented.

For this purpose, digital volume tomographies (DVT) of 140 patients were measured at 30 defined coordinates. Specifically, measurements were conducted on the premolars and the first molars at 13, 16, 19, 21 and 23 mm distance to the palatal crown tip. Exclusion criteria were syndromes or craniofacial deformities. The patients were divided into 4 groups (12-15 years male, 12-15 years female, 15-29 years male, 15-29 years female). Overall, 4200 measurements were accomplished to evaluate the a priori defined hypotheses on bone quantity.

The region with the thickest bone was located at the first premolars at a distance of 21 and 23 mm to the palatal crown tip. Neither sex nor palate side had any effect on bone quantity. In contrast, age was crucial to the amount of bone. Younger patients possessed more bone than older patients.

Based on the entire palate and including all relevant studies the region between the roots and the area of the anterior palate showed the largest amount of bone for Mini-Pins and orthodontic implants.

However, it needs to be mentioned that generally the bone at each coordinate in all studies was very inconstant. Finally, on the basis of this study it can be concluded that diagnostic with a three-dimensional X-ray is a necessary prerequisite before the insertion of mini-pins or palate implants can be securely conducted.

1. Einleitung

Der Begriff „Verankerung“ wurde bereits 1907 von Angle in die Kieferorthopädie eingeführt. Er beschrieb den Gegensatz und das notwendige Gleichgewicht zwischen Wirkung und Gegenwirkung bei der Bewegung von einzelnen Zähnen oder Zahngruppen und argumentierte: „[...] dass der Widerstand der Verankerung größer als der des zu bewegenden Zahnes sein muss. Die idealste Verankerung wäre natürlich eine unbewegliche Basis.“ (Angle 1907). Proffit definierte die Verankerung später als den „Widerstand gegenüber unerwünschten Zahnbewegungen“ (Proffit W 1993). Als Verankerung kann demnach jeder Widerstand bezeichnet werden, der gegenüber unerwünschten Zahnbewegungen aufgebracht wird, unabhängig davon, ob es sich um Zahngruppen, einzelne Zähne oder andere Strukturen handelt (Sander 2011).

Es können eine minimale, eine mittlere und eine maximale Verankerung unterschieden werden. Die minimale Verankerung beschreibt eine Situation, in der eine Zahnlücke von hinten nach vorne geschlossen wird, die sogenannte Molarenprotraktion. Bei der mittleren Verankerung findet ein reziproker Lückenschluss statt und die maximale Verankerung beschreibt die Frontzahnretraktion, den Lückenschluss von vorne nach hinten (Ludwig et al. 2008). Allerdings kommt es bei jeder dieser Verankerungsmöglichkeiten zu ungewünschten Bewegungen der Verankerungszähne.

In den letzten Jahren wurde eine vierte Art der Verankerung in die Kieferorthopädie eingeführt, die absolute Verankerung. Bei dieser kann nun ein Teil, beispielsweise ein Frontzahnsegment oder ein Seitenzahnsegment, komplett stationär verankert werden ohne Bewegungen zuzulassen (Baumgaertel 2011).

Um eine gewünschte Verankerung zu erreichen stehen verschiedene Verankerungsmöglichkeiten und Hilfsmittel zur Verfügung. Diese können in intraorale und extraorale Verankerungen untergliedert werden.

Extraorale Verankerungshilfen, wie z.B. der Headgear oder die Delaire Maske haben nur eine sehr geringe Compliance auf Grund von funktionalem sowie sozialem Diskomfort (Diedrich 1993, Nanda and Kierl 1992, Sergl et al. 2000).

Im Gegensatz dazu wird bei intraoralen Verankerungshilfen keine Kooperation seitens der Patienten benötigt. Den meisten intraoralen Hilfsmitteln, wie der

Nance-Apparatur, den Verankerungsbiegungen (z.B. Tip-back und -forward), den Verankerungen im Gegenkiefer (z.B. Gummizüge und Einbisse), dem Transpalatinalbogen oder der Verankerung über Weichteilen (z.B. Lipbumper) kann allerdings häufig nur ein mittlerer sagittaler Verankerungswert beigemessen werden (Diedrich 1993). Darüber hinaus führt die intraorale Methode in den meisten Fällen zu einem Verankerungsverlust (Feldmann and Bondemark 2008, Geron et al. 2003).

Seit kurzem hat man durch den Einsatz von verschiedenen skelettalen Verankerungen wie zum Beispiel Zahnimplantaten, Onplants, Mini-Plates, Gaumenimplantaten sowie Mini-Pins auch die Möglichkeit der absoluten Verankerung. In der Kieferorthopädie werden hauptsächlich die Gaumenimplantate und die Mini-Pins (auch Mini-Schrauben genannt) eingesetzt. Der Unterschied zwischen Mini-Pins und Implantaten liegt darin, dass die Pins nicht osseointegrieren. Stattdessen kommt es zu einer Anlagerung von Knochen an der Oberfläche der Pins und somit zu einer makroretentiven Verankerung (Bumann 2006).

Die wichtigsten Voraussetzungen für die erfolgreiche Insertion eines Mini-Pins sind ein quantitativ und qualitativ ausreichendes Knochenangebot. Außerdem dürfen keine umliegenden sensiblen Strukturen verletzt werden. Um dies zu berücksichtigen sollten mindestens 5 mm Knochenangebot für die Insertion von Mini-Pins und 4 mm Knochenangebot für die Insertion von Gaumenimplantaten vorhanden sein (Winsauer et al. 2012, Kang et al. 2007).

Aufgrund der Wichtigkeit der Knochendicke für die Insertion von Mini-Pins und Gaumenimplantaten wurde das Knochenangebot an den meisten Insertionsstellen bereits untersucht (siehe Abschnitt 1.2.). Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Knochenangebot im Gaumen auf Höhe der ersten und zweiten Prämolaren und der ersten Molaren.

1.1. Anatomie des Gaumens und des Alveolarknochens im Oberkiefer

Der Gaumen (Palatum) bildet das Dach der Mundhöhle (Cavitas oris) und den Boden der Nasenhöhle (Cavitas nasalis) und grenzt diese beiden Strukturen

voneinander ab. Er kann anatomisch in zwei Teile untergliedert werden. Den vorderen Teil bildet der harte Gaumen (Palatum durum) während der hintere Teil aus dem weichen Gaumen (Palatum molle) besteht (siehe Abb. 1) (Paulsen and Waschke 2010).

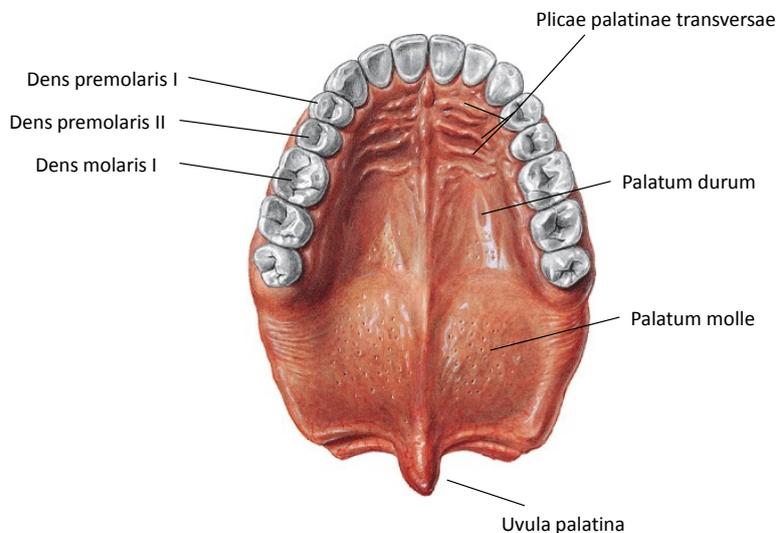


Abb. 1: Der Gaumen (Palatum).
Übernommen von Paulsen and Waschke 2010, modifiziert.

Der harte Gaumen bietet dank seines knöchernen Grundgerüsts und seiner nicht verschiebbaren Schleimhaut eine potentiell verlässliche und stabile Insertionsstelle für Implantate (Deguchi et al. 2006, Farnsworth et al. 2011, Han et al. 2012, Kang et al. 2007, King et al. 2007, Lai et al. 2010).

Im Gegensatz dazu kann der weiche Gaumen nicht als Implantationsort dienen, da er keine knöchernen Strukturen sondern größtenteils Muskeln aufweist. Aus diesem Grund wird im Weiteren nur auf die Anatomie des harten Gaumens eingegangen.

Der harte Gaumen umfasst den Zwischenkieferknochen (Os incisivum), die Gaumenfortsätze des Oberkiefers (Maxilla) und das Gaumenbein (Os palatinum). Etwa in Höhe der dritten Molaren geht er in den weichen Gaumen über (Aumüller 2007). Das knöcherne Gaumenbein bildet das Grundgerüst des harten Gaumens und besteht aus zwei, jeweils paarig angelegten, Knochen. Die anterioren zwei Drittel, von den Schneidezähnen bis zu den zweiten Molaren, werden aus den Gaumenfortsätzen (Processus palatinus maxillae dexter et sinister) des Oberkiefers gebildet (siehe Abb. 2).

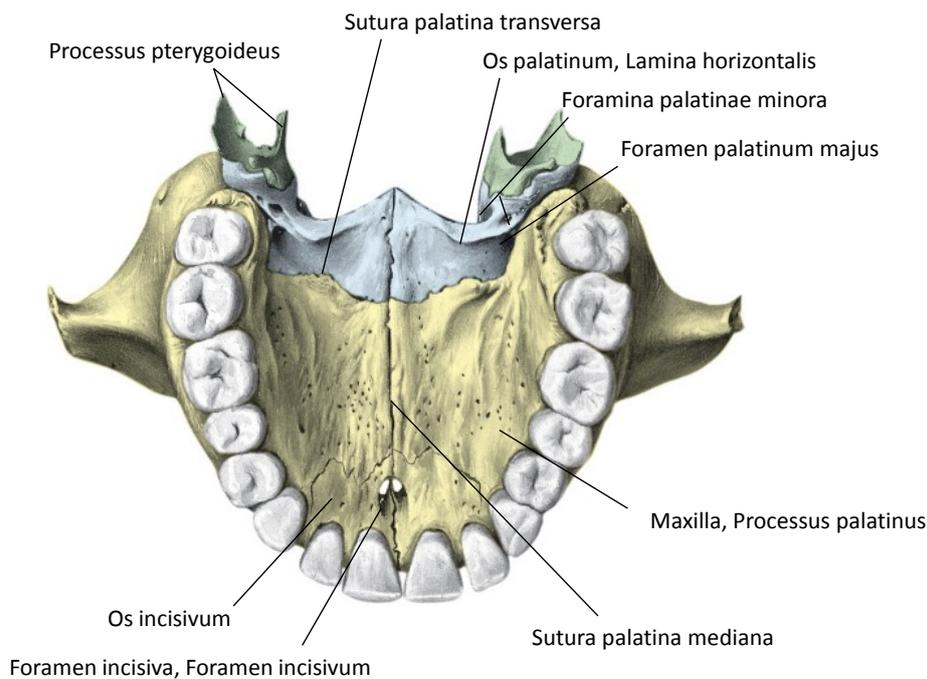


Abb. 2: Der harte Gaumen (Palatum durum).
 Übernommen von Paulsen and Waschke 2010, modifiziert.

Das letzte Drittel hingegen besteht aus der horizontalen Platte (Lamina horizontalis ossis palatini dexter et sinister). Hier befindet sich das Foramen palatinum majus, indem der Canalis palatinus major in die Mundhöhle mündet und durch den die Arteria palatina major und der Nervus palatinus major treten. Direkt dahinter gelegen befinden sich meist die Foramina palatina minora, durch welche die Arteriae palatinae minores und die Nervi palatini minores treten (Samandari and Mai 1995) (Abb. 2). In diesem Bereich gibt es keine Untersuchungen zum Knochenangebot und es werden keine Implantate oder Mini-Pins gesetzt, da die soeben beschriebenen Gefäße noch relativ groß sind und die Gefahr einer Verletzung zu hoch ist. Außerdem ist der Ort nicht sehr relevant für die angestrebten Verankerungsziele.

Das Gaumenbein wird durch eine sagittale Gaumennaht (Sutura palatina mediana) und eine transversale Gaumennaht (Sutura palatina transversa) in vier Quadranten aufgeteilt. Die Sutura palatina mediana verläuft von der Spina nasalis posterior bis zum Foramen incisivum. Das unpaarige Foramen incisivum, in dem die beiden Canales incisivi verlaufen, verbindet die Mundhöhle mit der

Nasenhöhle. Es ist außerdem die Durchtrittsstelle der Arteria nasopalatina und des Nervus nasopalatinus (Samandari and Mai 1995).

Die Nasenhöhle und die Canales incisivi sind begrenzende Strukturen für die Insertion eines Mini-Pins oder eines Gaumenimplantats in dieser Region. Der Nervus nasopalatinus und die Arteria nasopalatina dürfen ebenso wie die Schleimhaut der Cavitas nasalis nicht verletzt werden. Das Foramen incisivum und die Sutura palatina mediana stellen in vielen Studien genutzte radiologische Orientierungshilfen dar (Gracco et al. 2008, Kang et al. 2007, King et al. 2007, Taghizadeh 2010).

Die Schleimhaut (Mukosa) des harten Gaumens besteht aus transversalen Leisten (Rugae transversae). Sie ist nicht verschiebbar mit der Knochenhaut (Periost) verwachsen. Besonders stark ist diese Fixierung im Bereich der sagittalen Gaumennaht. Die Schleimhaut des Gaumens erstreckt sich insgesamt vom harten Gaumen weiter über eine Sehnenplatte (Aponeurosis palatina) bis zu einem Knochenvorsprung des weichen Gaumens, dem Hamulus pterygoideus (Samandari and Mai 1995).

Die Dicke der Schleimhaut nimmt von der Papilla incisiva (PI) entlang der Sutura palatina mediana erst zu (von ca. 2,0 mm auf 2,9 mm), allerdings ist sie ab ca. 8 mm hinter der PI gleichbleibend ca. 1 mm dick. Von der Schmelz-Zement-Grenze (SZG) ausgehend in Richtung apikal nimmt die Schleimhautdicke erst zu bevor sie dann wieder abnimmt. Die Schleimhaut ist zwischen dem ersten und zweiten Molaren deutlich dicker, als zwischen dem ersten und zweiten Prämolaren. Eine dünne Mukosa ist von Vorteil, da sie sich weniger leicht entzündet und die Hebelwirkung auf die Schraube geringer ist (Kim et al. 2006).

Der harte Gaumen wird nach kaudal von dem bogenförmigen Alveolarfortsatz überragt (siehe Abb. 3). Er beinhaltet die Zahnfächer (Alveoli dentales), in denen die Wurzeln der Zähne liegen und dient ihrer Verankerung (Paulsen and Waschke 2010, Samandari and Mai 1995). Die Anatomie des Alveolarfortsatzes ist zahnabhängig, das heißt, sie ist funktionell geprägt und kann je nach Bezahnung in ihrer Gestalt erheblich variieren. So beginnt die Entstehung des Alveolarfortsatzes mit der Bildung und dem Wachstum der Zähne und die Rückbildung oder Atrophie des Alveolarfortsatzes folgt auf einen Verlust derselben.

Prinzipiell können drei verschiedene Strukturen unterschieden werden: der eigentliche Alveolarknochen (Lamina cribriformis), die dem Knochen direkt anliegende Spongiosa und die äußere Kompakta (siehe Abb. 3).

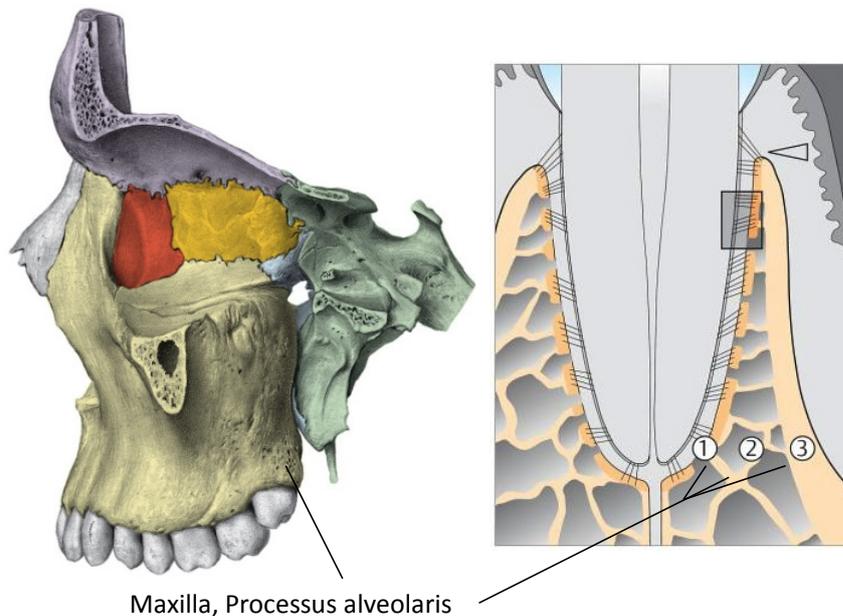


Abb. 3: Der Alveolarfortsatz (Processus alveolaris) (links) und seine Bestandteile (rechts): der Alveolarknochen (1), die Spongiosa (2) und die Kompakta (3).
Übernommen von Paulsen and Waschke 2010, modifiziert (links) und Wolf et al. 2004 (rechts).

Am kranialen Ende des Knochens verschwindet die Spongiosa und der Knochen vereinigt sich mit der Kompakta. Dabei wird der oft sehr dünne alveoläre Knochenkamm gebildet. Die Versorgung mit Arterien und die Innervation erfolgt innerhalb von Volkmann-Kanälen, welche den Alveolarknochen in großer Zahl durchsetzen (Wolf et al. 2004).

Der Alveolarknochen eignet sich gut für die Insertion von Implantaten (Baumgaertel 2011, Fenner et al. 2009, Fayed et al. 2010, Poggio et al. 2006), auch dann, wenn die Atrophie dieses Knochens schon weit fortgeschritten ist (Kellinger 2010). Auch die Dicke der Kompakta ist von Bedeutung für die Insertion von Mini-Pins, da sie u.a. der Primärstabilität dient (Kim et al. 2006, Ono et al. 2008).

Die Zahnwurzeln stellen in vielen Studien einen limitierenden Faktor für die Insertion von Mini-Pins und Gaumenimplantaten dar, da sie nicht verletzt werden dürfen (Fayed et al. 2010, King et al. 2007, Poggio et al. 2006).

1.2. Skelettale Verankerung in der Kieferorthopädie

Die skelettale Verankerung findet in den letzten Jahren in der Kieferorthopädie immer mehr Anwendung. Das ist darin begründet, dass immer mehr erwachsene Patienten aufgrund parodontaler Erkrankungen und fehlender Zähne schlechte dentale Verankerungsmöglichkeiten aufweisen. Außerdem gibt die skelettale Verankerung eine bessere Kontrolle in jeder der drei Dimensionen (Leung et al. 2008). Weitere große Vorteile der skelettalen Verankerung sind das erweiterte Behandlungsspektrum sowie die Verbesserung und Effizienz einzelner Behandlungen (Jong Suk Lee et al. 2007). Außerdem ist der Erfolg dieser Methode nicht länger von der Compliance des Patienten abhängig.

1.2.1. Historische Entwicklung der skelettalen Verankerung

Die ersten Versuche, das Problem der Verankerung durch skelettale Verankerung zu beheben, wurden 1945 von Gainsforth und Higley durchgeführt. In einem Experiment an Hunden stellten sie jedoch eine zu hohe Verlustrate fest, die sie hauptsächlich auf den Kontakt mit Mikroorganismen und Flüssigkeiten der Mundhöhle in Verbindung brachten (Gainsforth 1945). Erst 1969 wurden Implantate von Branemark in die Zahnmedizin eingeführt und ihr Langzeiterfolg belegt (Branemark 1969). Nachdem man Implantate zu Anfang nur prothetisch einsetzte, wurden sie seit 1978 auch erfolgreich auf ihre Tauglichkeit zur kieferorthopädischen Verankerung in Tierexperimenten getestet (Roberts et al. 1984, Sherman 1978, Smalley et al. 1988, Turley et al. 1980, Turley et al. 1988).

Im Jahre 1990 stellten Roberts et al. einen Fall vor, in dem sie ein prothetisches Implantat in die Retromolarregion eines Erwachsenen implantierten. Mit dieser Methode konnten sie den zweiten und dritten Molaren erfolgreich mesialisieren (Abb. 4, Roberts et al. 1990).



Abb. 4: Implantat zur absoluten Verankerung in der Retromolarregion
Übernommen von Roberts et al. 1990

Die Implantate waren zu diesem Zeitpunkt speziell für den prothetischen Gebrauch entwickelt worden und somit nur an der Retromolarregion und in Zahn-
lücken einsetzbar (Roberts et al. 1990).

Eines der ersten Gaumenimplantate, die für die Kieferorthopädie entwickelt wurden, ist das Straumann® Orthosystem (Institute Straumann, Waldenburg/
Switzerland). Es wurde 1996 von Wehrbein et al. vorgestellt. Zu diesem Zeitpunkt betrug der Durchmesser 3,3 mm und das Implantat war 4 oder 6 mm lang. Die Implantation erfolgte im medianen Gaumen (siehe Abb. 5) (Wehrbein et al. 1996a, Wehrbein et al. 1996b).

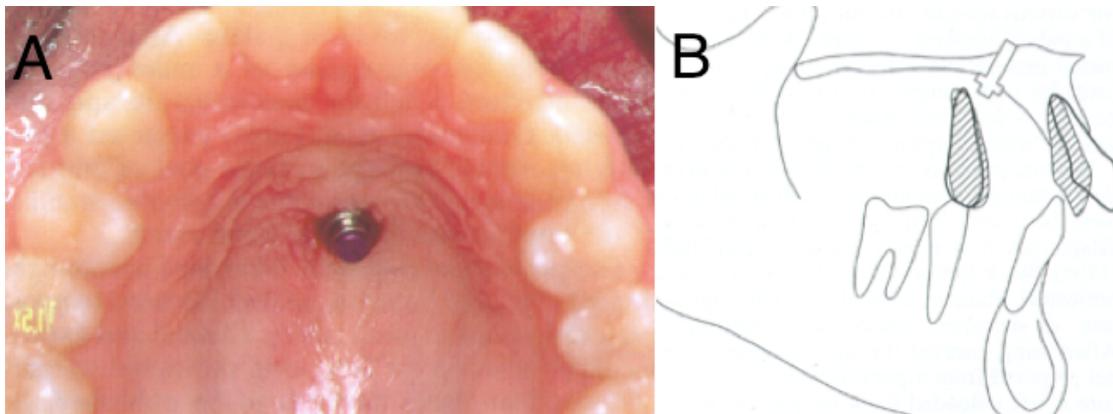


Abb. 5: Palatinales Gaumenimplantat
A: Ein Orthoimplantat in Situ.
B: Eine schematische Darstellung des palatinalen Gaumenimplantats.
Übernommen von Wehrbein et al. 1996b

1.2.2. Gaumenimplantate

Die 2. Generation dieser Implantate besaß eine Länge von 4,2 mm während zwei verschiedene Durchmesser, 4,8 und 4,1 mm, angeboten wurden. Somit scheint der größere Durchmesser bei gleichbleibend langem oder sogar kürzerem Implantat zu einer höheren Erfolgsrate zu führen.

Der eingeschraubte Teil des Implantats hat eine SLA Oberfläche (Sand-blasted, Large grit, Acis-etched). Diese optimiert die Eigenschaften zur Osseointegration des Implantats. Weitere Bestandteile der Implantate sind ein transmukosaler Teil und ein Verankerungselement zum Befestigen der kieferorthopädischen Apparaturen (siehe Abb. 6A) (Jung et al. 2009, Grüner and Lietz 2008).

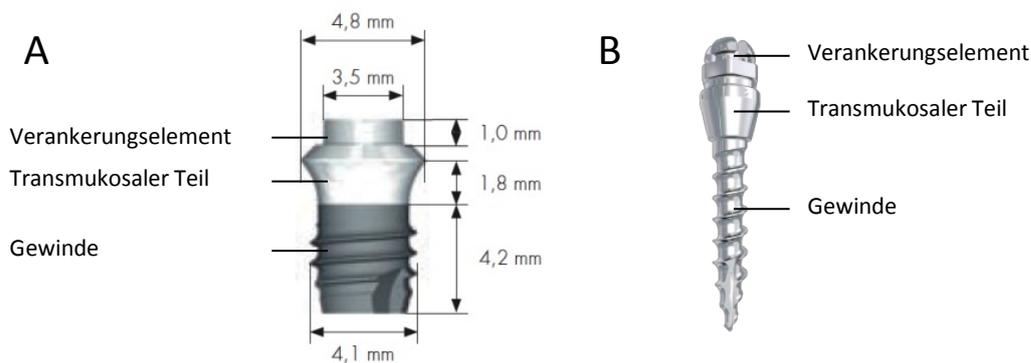


Abb. 6: Darstellung von Gaumenimplantat (A) und Mini-Pin (B)
Die Bestandteile von Gaumenimplantaten und Mini-Pins sind ein Verankerungselement, ein transmukosaler Teil und ein Gewinde.
A: Straumann® Orthosystem Gaumenimplantat
B: Mini-Pin tomas® der Firma Dentaurum, Ispringen, Deutschland

Aufgrund der langen Einheilzeit von ca. 12 Wochen (Jung et al. 2009, Roberts et al. 1990), der kostenintensiven, unkomfortablen Behandlung, der invasiven chirurgischen Eingriffe bei Ex- sowie Implantation der Implantate und der durch das Wachstum begrenzten Einsetzbarkeit (erst ab 16 Jahre möglich) gibt es trotz der guten Ergebnisse eine Alternative in Form von Mini-Pins (Jong Suk Lee et al. 2007).

1.2.3. Mini-Pins

Die Mini-Pins sind kleine Schrauben, die zur skelettalen Verankerung genutzt werden. Sie wurden Anfang der achtziger Jahre erstmals erfolgreich für kieferorthopädische Zwecke genutzt (Creekmore and Eklund 1983). Sie osseointe-

grieren nicht, sondern halten dank der Anlagerung von Knochen und der makroretentiven Form der Schraube (Bumann 2006). Diese Mini-Pins sind sofort belastbar und verkürzen somit die Behandlungszeit. Ihre Verlustrate ist sehr niedrig (Baumgaertel et al. 2008, Bumann 2006).

Ein Mini-Pin besteht aus einem Kopf (Verankerungselement), einem Gingivakragen (transmukosaler Teil) und einem Gewinde (Grüner and Lietz 2008). Die heutzutage genutzten Gewinde der Mini-Pins weisen einen Durchmesser von 1,2 - 2,3 mm und eine Länge von 4 - 15 mm auf. Der Gingivakragen ist ca. 2 mm lang.

Alle Mini-Pins bestehen aus einer Titanlegierung. Das Kopfdesign ist bei den verschiedenen Herstellern unterschiedlich und wird für die entsprechenden Anforderungen gewählt. Die kurzen tomas-pins werden in Abb. 6B gezeigt. Ihr Gewinde ist 6 mm lang und hat einen Durchmesser von 1,6 mm (Grüner and Lietz 2008).

Mini-Pins lassen sich auch anhand ihrer Gewindeart (nicht-selbstschneidend, selbstschneidend oder selbstbohrend) unterscheiden. Nichtselbstschneidende Pins werden von den gängigen Herstellern nicht mehr angeboten (Baumgaertel et al. 2008). Sie benötigen eine Vorbohrung und anschließend ein Vorschrauben. Selbstschneidende Pins benötigen ebenfalls eine Vorbohrung. Auf das Vorschrauben wird jedoch verzichtet. Sie werden in Bereichen mit geringerer Kortikalisdicke eingesetzt und bieten den Vorteil, in diesen Bereichen die Stabilität zu erhöhen. Bei selbstbohrenden Pins ist keine Vorbohrung nötig. Sie haben daher den Vorteil, dass die Gefahren einer Bohrung, wie z.B. das Überhitzen des Knochens, vermieden werden können. Zusätzlich verfügen sie über eine noch höhere Stabilität (Sowden and Schmitz 2002). Andererseits kann die selbstbohrende Schraube leichter brechen, wenn sie durch die Kortikalis geschraubt wird. Die Vorteile der selbstschneidenden und selbstbohrenden Pins könnten vereint werden, wenn nur die Kortikalis vorgebohrt und anschließend ein selbstbohrender Pin eingesetzt würde (Baumgaertel et al. 2008).

1.2.4. Insertionsorte zur Platzierung der Mini-Pins und Gaumenimplantate

Es gibt einige mögliche Insertionsorte zur Platzierung der Mini-Pins. Mögliche Bereiche im Oberkiefer sind: der harte Gaumen (*Palatum durum*), die Region unterhalb der *Spina nasalis anterior*, der Alveolarkamm (*Processus alveolaris*), die Retromolarregion (*Regio retromolare*) und die Jochbein-Alveolar-Leiste (*Processus zygomaticus*). Im Unterkiefer kommen der Alveolarkamm, die Retromolarregion und die Symphyse in Betracht (Hernandez et al. 2008). Die Implantate werden hingegen nur in den anterioren Gaumen und entlang der *Sutura palatina* gesetzt.

Es sollte darauf geachtet werden, die Pins und Implantate in die keratinisierte Gingiva zu inserieren und auf Regionen nahe der Wangen- oder Lippenbändchen zu verzichten. Außerdem muss auf die Venen, Arterien, Zahnwurzeln, die Kieferhöhlen, die Nasenhöhle, das Foramen mentale, das Foramen incisivum und den *Canalis mandibularis* geachtet werden (Baumgaertel et al. 2008). Insbesondere ein ausreichender Abstand zu den Zahnwurzeln spielt eine gewichtige Rolle bei der erfolgreichen Behandlung mit Mini-Pins (Fayed et al. 2010, Kuroda et al. 2007, Kyung 2004, Poggio et al. 2006, Watanabe et al. 2013).

Gaumenimplantate werden fast ausschließlich, und Mini-Pins in einigen Fällen, in den Gaumen inseriert. Aus diesem Grund ist auch das Knochenangebot am Gaumen das Ziel vieler Studien. Uneinig ist man sich jedoch, welcher Bereich im Gaumen am meisten Knochen bietet und somit der sicherste Platz für die Insertion von Mini-Pins und Gaumenimplantaten ist.

Einige Autoren schlagen die *Sutura palatina mediana* als Insertionsort vor, aufgrund der guten Knochenqualität und des konstanten Knochenangebots (Henriksen et al. 2003, Stockmann et al. 2009, Wilmes et al. 2009, Wehrbein et al. 1996a, Wehrbein et al. 1996b). Neben der *Sutura mediana* wird auch der anteriore Gaumen von einigen Autoren empfohlen (Kang et al. 2007, Lai et al. 2010). Auch Gahleitner und Kollegen befürworteten sowohl die paramediane als auch die median sagittale Region (Gahleitner et al. 2004). Gracco et al. empfahlen den vorderen Gaumen, gaben aber gleichzeitig an, dass auch der hintere Gaumen Möglichkeiten zur Platzierung von kürzeren Schrauben bieten würde (Gracco et al. 2008).

Andere Ergebnisse wurden in einer sehr großen Studie mit 431 Patienten gefunden (Holm 2013). Aufgrund der Resultate empfiehlt Holm den vorderen Gaumen und rät von der Region nahe der Gaumennaht ab. Bernhart et al. empfehlen die Region 6 - 9 mm distal des Foramen incisivum (FI) und 3 – 6 mm lateral der Sutura palatina (Bernhart et al. 2000). Andere Autoren geben den Bereich 4 mm distal des FI und 3 mm lateral der Sutura als den sichersten Insertionsort an (King et al. 2007). Taghizadeh empfiehlt den vorderen Gaumen, insbesondere 9 mm lateral der Sutura mediana auf Höhe der ersten Prämolaren (Taghizadeh 2010).

Es wird außerdem zu bedenken gegeben, dass die Sutura mediana als Wachstumszentrum von sich im Wachstum befindlichen Patienten nicht genutzt werden kann und stattdessen auf die paramedianen Regionen verwiesen (Asscherickx et al. 2005).

Poggio et al. empfehlen den interradiikulären Knochen. Insbesondere die anteriore, apikale interradiikuläre Region weist ein hohes Knochenangebot auf (Poggio et al. 2006, Fayed et al. 2010).

Winsauer et al. und Ludwig et al. haben kürzlich Übersichtsarbeiten veröffentlicht, in denen sie Gaumenabbildungen mit sicheren und unsicheren Orten für die Insertion von Mini-Pins bzw. Implantaten darstellten (Ludwig et al. 2011, Winsauer et al. 2012). Ihre Ergebnisse wiesen große Unterschiede auf. Ludwig et al. markierten die Region um die Sutura palatina mediana ab ca. 3 mm posterior des FI, ca. 3 - 6 mm posterior des FI und bis 9 mm lateral sowie den interdentalen Bereich zwischen dem ersten Molaren und zweiten Prämolaren als sicherste Regionen (Ludwig et al. 2011). Dagegen markierten Winsauer et al. einen Schuhabdruck-ähnlichen Bereich, der nahe der Sutura palatina mediana auf Höhe des Kontaktpunktes von Eckzahn und erstem Prämolaren beginnt und sich nach posterior/lateral bis zum Kontaktpunkt der zweiten Prämolaren und ersten Molaren erstreckt (Winsauer et al. 2012). Auch Kang et al. fertigten schon eine ähnlich Skizze an, allerdings benutzten sie zur Erstellung ausschließlich die Ergebnisse ihrer eigenen Studie (Kang et al. 2007). Laut ihrer Abbildung ist im anterioren Bereich und entlang der Sutura palatina genug Knochen für die Insertion von Gaumenimplantaten vorhanden.

Die oben genannten Studien zeigen, dass es große Unterschiede in den Empfehlungen für die Insertionsorte von Mini-Pins gibt. Auch die interindividuellen Unterschiede sind in allen Studien sehr groß. Somit wurde bis heute kein Bereich im Kiefer gefunden, der eine konstante Menge an Knochenangebot aufweisen und so ein sicheres Einsetzen von Mini-Pins garantieren würde.

In dieser Studie wurde das Knochenangebot an weiteren möglichen Insertionsstellen überprüft, um möglicherweise eine Stelle zu finden, in der Mini-Pins sicher und konstant implantiert werden können. Hierzu wurden der Bereich der Prämolaren sowie der Bereich der ersten Molaren vermessen (siehe Abschnitt 2).

1.3. Röntgendiagnostik für die Insertionsplanung von Gaumenimplantaten und Mini-Pins

Vor der Insertion von Mini-Pins sollte mittels bildgebender Verfahren ein ausreichendes sowie qualitativ hinreichendes Knochenangebot an der Insertionsstelle überprüft und eine Verletzung wichtiger Strukturen ausgeschlossen werden (Baumgaertel 2011). Das Fernröntgen-Seitenbild (FRS), die Computertomographie (CT) und die digitale Volumetomographie (DVT) stellen solche auf Röntgenstrahlen basierenden bildgebenden Diagnostikmöglichkeiten mit Anwendung in der Zahnmedizin dar.

Mit Hilfe des FRS lassen sich die Zähne des Ober- und Unterkiefers, das Kieferskelett und auch Weichteile abbilden (Nötzel and Schulz 2009). Anhand dieser Bilder können geometrische Messungen der inneren und äußeren Strukturen des Kopfes durchgeführt werden (Kephalometrie), um die Merkmale des Kopfes auf morphologischer Ebene durch Zahlenwerte zu beschreiben (Diedrich 2000).

Ein großer Nachteil der FRS besteht darin, dass ein dreidimensionales Objekt auf einen zweidimensionalen Film abgebildet wird. Die durchleuchteten Strukturen werden aus diesem Grund als Überlagerungsbilder dargestellt, woraus eine geringe Auflösung insbesondere für Weichteilkontraste resultiert (Flohr 2011).

Eine Alternative zu der klassischen Röntgenmethodik, die dem FRS zu Grunde liegt, stellt die Computertomographie (CT) dar. Der große Vorteil dieser neuen

computergestützten Röntgenmethode besteht darin, dreidimensionale Röntgenbilder zu erhalten und damit auch Strukturen mit geringen Dichteunterschieden (z.B. verschiedene Weichgewebe) überlagerungsfrei und deutlich darstellen zu können. Das Prinzip der CT besteht darin, dass die Röntgenröhre und Detektoren (bzw. nur die Röhre bei ortsständigem Detektor) um den Patienten rotieren (siehe Abb. 7). Gleichzeitig werden dabei von einer zu untersuchenden Schicht verschiedene Projektionen mit einem Fächerstrahl erzeugt (Düker and Schulze 2003). Die Größe des Strahlkegels ist dabei ausreichend, um den gesamten Patientenquerschnitt zu durchleuchten. Dies liefert transversale (axiale) Schnittbilder mit vielen eindimensionalen Röntgenabsorptionsprofilen, die mit Hilfe eines Computers zu einer dreidimensionalen Darstellung rekonstruiert werden können (Flohr 2011).

Der größte Nachteil der Computertomographie ist die von ihr ausgehende hohe Strahlenbelastung. Auch im Vergleich zu klassischen Röntgenaufnahmen ist die Strahlenexposition bei einem CT der gleichen Körperregion höher (Jäkel and Karger 2011).

Eine strahlenärmere Methode zur Erstellung dreidimensionaler Röntgenbilder stellt die digitale Volumentomographie (englisch Cone Beam Computed Tomography, CBCT) (Arai et al. 1999, Mozzo et al. 1998) dar.

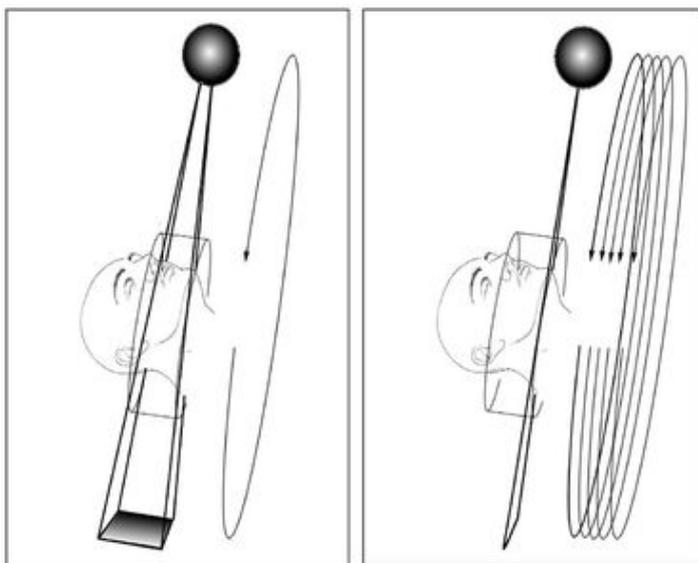


Abb. 7: Darstellung der Funktionsweisen der digitalen Volumentomographie (DVT, links) und der Computertomographie (CT, rechts).
Übernommen von Bumann 2008

Im Gegensatz zum CT wird bei der DVT ein kegel- oder pyramidenförmiger Strahl eingesetzt und damit die Exposition des gesamten zu untersuchenden Volumens sichergestellt (siehe Abb. 7). So wird nur eine einzige Rotation benötigt, um ein bestimmtes anatomisches Volumen zu erfassen. Zudem werden die Röntgenstrahlen bei der DVT nicht kontinuierlich abgegeben, sondern in einzelnen Pulsen appliziert. Daraus resultiert eine 2-dimensionale Absorptionsmatrix, die mit Hilfe eines Bildverstärkers oder Flachdetektors in ein kugelförmiges, bzw. zylinderförmiges Volumen rekonstruiert werden kann (primäre Rekonstruktion).

Der entstehende Primärdatensatz ist aus einzelnen Schichten aufgebaut, welche wiederum aus Datenpunkten, sogenannten Voxeln (englisch volumetric pixel), bestehen.

Anschließend kann eine Sekundärrekonstruktion angefertigt werden, die z.B. zur Darstellung des anatomischen Volumens in verschiedenen Ebenen (sagittal, koronal, transversal) oder zur Bildoptimierung (z.B. Kontrast- und Helligkeitsoptimierung) herangezogen werden kann (Düker and Schulze 2003).

In der Zahnmedizin werden diese drei Röntgenmethoden u.a. für präkieferorthopädische Diagnosen, Verlaufskontrollen und abschließende Untersuchungen genutzt (Bumann 2008, Jung et al. 2011). Welche dieser Röntgenmethoden am besten für die Insertionsplanung eines Mini-Pins oder eines Gaumenimplantats geeignet ist, wird kontrovers diskutiert (Crismani et al. 2005, Jung et al. 2011, Jung et al. 2012). Die wesentlichen Abwägungen sind auf der einen Seite der Mehrnutzen einer 3D Aufnahme und auf der anderen Seite die Strahlung, die der Patient während einer bestimmten Röntgenaufnahme ausgesetzt ist. Das wird unter „ALARA“ (engl. „as low as reasonable achievable“) zusammengefasst und heißt frei übersetzt „so gering wie möglich, so viel wie nötig“ (Silva et al. 2008). Die effektive Dosis einer FRS-Aufnahme liegt bei 10,4 Mikrosievert (μSv). Die einer DVT-Aufnahme liegt bei 61,4 μSv und die eines Mehrschicht CTs bei 429 μSv (Silva et al. 2008). Homolka et al. beschreiben ein „dental low-dose CT“, das deutlich weniger strahlenbelastend ist. Bei einer Aufnahme des Oberkiefers soll die effektive Dosis bei nur 22 μSv liegen (Homolka et al. 2001).

Tab. 1: Effektive Dosen (μSv) für einige Röntgenmethoden
(Homolka et al. 2001 und Silva et al. 2008)

Gerät	Effektive Dosis (μSv)
FRS	10,4
DVT (i-CAT)	61,1
Mehrschicht CT	429,7
Low-dose dental CT	Maxilla: 22-44 Mandibula: 123-245
OPTG	10,4

Um Knochen an gezielten Punkten im Gaumen zu vermessen zu können, ist eine dreidimensionale Ansicht unumgänglich. Es gibt sehr viele Autoren, die ein DVT nutzten, um das Knochenangebot im Oberkiefer zu vermessen. Alle betrachteten das DVT als sehr gute Methode mit hervorragender Genauigkeit und Reproduzierbarkeit (Baumgaertel 2009b, Gracco et al. 2008, Lai et al. 2010, Holm 2013, Fayed et al. 2010, Poggio et al. 2006).

Demgegenüber wurden auch einige wissenschaftliche Arbeiten bezüglich des Knochenangebots im Oberkiefer veröffentlicht, bei denen Computertomographien ausgewertet wurden (Bernhart et al. 2000, Gahleitner et al. 2004, King et al. 2007, Kang et al. 2007, Moon et al. 2010). FRS-Röntgenbilder wurden lediglich für klinische Studien herangezogen (Crismani et al. 2005, Jung et al. 2011, Jung et al. 2012).

Einige Autoren sind der Meinung, dass das FRS zur Implantatplanung ausreichend Informationen bezüglich des Knochenangebots bieten würde (Jung et al. 2011, Wehrbein et al. 1999a). Die meisten Autoren empfehlen allerdings ein 3D-Röntgenbild als Mittel der Wahl, um einen geeigneten Insertionsort für einen Mini-Pin oder ein Gaumenimplantat im Oberkiefer zu finden (Baumgaertel 2009b, Bernhart et al. 2000, Fayed et al. 2010, Gahleitner et al. 2004, Gracco et al. 2008, Holm 2013, Jung et al. 2012, King et al. 2007, Kang et al. 2007, Lai et al. 2010, Moon et al. 2010, Poggio et al. 2006).

2. Fragestellung

Minischrauben stellen eine sehr effiziente, neue Variante der Verankerung im Rahmen der kieferorthopädischen Zahnbewegung dar. Viele kürzlich erschienene Studien untersuchten die optimale Länge und den optimalen Umfang der Pins sowie die Überlebensrate und die Tragkraft. Außerdem wurde ermittelt, an welchen Stellen im Ober- und Unterkiefer ein ausreichendes Knochenangebot für die Implantation der Pins erwartet werden kann (siehe Abschnitt 1.2.).

Da ein ausreichendes Knochenangebot zwingend für die Implantation ist, wurde dieses an den meisten möglichen Insertionsstellen bereits vermessen. Dabei wurden jedoch kaum Bereiche im Oberkiefer ermittelt, an denen eine sichere Insertion von Implantaten und Pins gewährleistet wäre. Außerdem war in allen Studien die interindividuelle Standardabweichung sehr groß (siehe Abschnitt 1.2.). Da ein sicherer Bereich von großem praktischem Vorteil wäre, wird in dieser Arbeit einer der letzten noch nicht untersuchten Bereiche vermessen, um keine der potentiell möglichen Stellen zu übersehen.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Knochen im Gaumen auf Höhe der Wurzeln der Prämolaren und ersten Molaren zu vermessen. Außerdem soll ermittelt werden, ab welcher Höhe Minischrauben in diesem Bereich von palatinal komplikationslos in den Alveolarfortsatz gesetzt werden können. Darüber hinaus sollen insbesondere folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Das palatinale Knochenangebot auf Höhe der Prämolaren und Molaren nimmt von koronal nach apikal zu.
2. Das Knochenangebot im Bereich der ersten Prämolaren ist größer als das Knochenangebot im Bereich der zweiten Prämolaren.
3. Das Knochenangebot im Bereich der zweiten Prämolaren ist größer als das Knochenangebot im Bereich der ersten Molaren.
4. Es gibt keinen Unterschied zwischen dem Knochenangebot in der rechten und linken Kieferhälfte.
5. Männliche Patienten bieten mehr Knochendicke als weibliche Patienten.
6. Das Knochenangebot bei älteren Patienten (16-30 Jahre) ist größer als das Knochenangebot bei jüngeren Patienten (12-15 Jahre).

3. Material und Methoden

3.1. Allgemeine Material und Methoden

3.1.1. Patientengut

Die Überprüfung der Hypothesen erfolgte durch spezifische Messungen an anonymisierten DVT-Datensätzen von 140 Patienten. Das Alter der 140 Patienten lag zwischen 12 und 29 Jahren und betrug im Mittel 16,91 Jahre (Tab. 2).

Tab. 2: Darstellung der Alters- und Geschlechterverteilung der untersuchten Patienten

	Anzahl (n)	Alter	Mittelwert	SD
Männlich	71	12 bis 29	17,23	4,81
Weiblich	69	12 bis 25	16,59	3,64
Gesamt	140	12 bis 29	16,91	4,27

Die 71 männlichen und 69 weiblichen Patienten wurden in zwei Altersgruppen (12 bis 15 Jahre und 16 bis 30 Jahre) unterteilt. In Abhängigkeit von Geschlecht (Zahl 1 oder 2) und Altersgruppe (Buchstabe A oder B) wurden vier Gruppenbezeichnungen eingeführt (Tab. 3).

Gruppe 1A: männliche Patienten der Altersgruppe 12-15 Jahre

Gruppe 1B: männliche Patienten der Altersgruppe 16-30 Jahre

Gruppe 2A: weibliche Patienten der Altersgruppe 12-15 Jahre

Gruppe 2B: weibliche Patienten der Altersgruppe 16-30 Jahre

Tab. 3: Darstellung der Alters- und Geschlechterverteilung der untersuchten Altersgruppen

	Anzahl (n)	Alter	Mittelwert	SD
Gruppe 1A	35	12 bis 15	13,43	0,98
Gruppe 1B	36	16 bis 29	20,92	4,12
Gruppe 2A	35	12 bis 15	13,83	1,1
Gruppe 2B	34	16 bis 25	19,44	3,11

3.1.2. DVT-Aufnahmen

Sämtliche Datensätze stammten aus dem Langzeitarchiv des nationalen 3D-Röntgennetzwerkes MESANTIS® (Standorte: Berlin, Hamburg, Heilbronn, Leonberg, Mayen, München und Wiesbaden). Für die Selektion der 140 Datensätze aus insgesamt mehr als 15.000 archivierten Datensätzen wurden vorab spezifische Selektionskriterien festgelegt:

- Es durften keine Syndrome vorliegen
- Es durften keine craniofacialen Missbildungen vorliegen
- Das Alter der Patienten musste zum Zeitpunkt der Aufnahme zwischen 12 und 30 Jahren liegen
- Im Oberkiefer mussten alle Zähne mit Ausnahme der Weisheitszähne angelegt sein
- Die zu vermessenden Zähne mussten vollständig durchgebrochen sein und die Okklusionsebene erreicht haben
- Die Wurzeln der Prämolaren und Molaren durften im Oberkiefer im Bereich der Wurzelspitze nicht stark abgeknickt sein
- Die Auflösung der DVT-Aufnahmen durfte nicht niedriger als 0,3 mm Voxelgröße sein

Für jede DVT-Aufnahme bestand entweder vor oder während einer kieferorthopädischen Behandlung eine rechtfertigende Indikation zur Anfertigung einer dentalen Volumentomographie nach der S1-Leitlinie der DGZMK. Die jeweils individuell rechtfertigende Indikation wurde von einem/r fachkundigen Zahnarzt/-ärztin gestellt.

Alle Aufnahmen wurden entweder mit dem DVT-Gerät „i-CAT classic“ (Imaging Sciences International, Inc., Hatfield, USA) oder der Sonderedition MESANTIS® *line* (Imaging Sciences International, Inc., Hatfield, USA) angefertigt. Details zu den technischen Angaben sind in Tab. 4 dargestellt.

Tab. 4: Technische Daten der vorhandenen DVT-Geräte
Abkürzungen: D=Durchmesser, H=Höhe, B=Breite, kV=Kilovolt, mA=Milliampere

	iCAT classic	MESANTIS® <i>line</i>
Bilddetektor	Flachfeld, amorphes Silizium (ablesbarer Bereich) 23,8 cm × 19,2 cm (B × H)	Flachfeld, amorphes Silizium (erfassbarer Bereich) 23,8 cm × 19,2 cm (B × H)
Voxelgröße	0,3 mm oder 0,25	0,3 mm oder 0,25
Graustufen	12 Bit	14 Bit
Bilderfassung	Einzelrotation um 360° (max.)	Einzelrotation um 360° (max.)
Bilderfassungsdauer	20 oder 10 Sekunden	26,9 oder 8,9 Sekunden
Sichtfeld (Field of View)	16 cm x 13 cm (D × H)	16,5 cm × 13,5 cm (D × H)
Röntgenröhrenspannung	120 kV	120 kV
Stromstärke	3 - 8 mA	3 - 7 mA

Beide DVT-Geräte generierten DICOM Datensätze, die mit Hilfe einer speziellen Auswertungssoftware für die weiteren Vermessungen verwendet werden konnten. Sämtliche Patienten wurden vertikal nach der Okklusionsebene im DVT-Gerät ausgerichtet. Die sagittale Orientierung richtete sich nach der Erfassung der Nasenspitze und der Referenzpunkte „Porion rechts und links“.

3.1.3. Auswertungssoftware und Auswertungsmonitor

Die vorhandenen DICOM Daten wurden mit der Bildgebungssoftware von InVivo (Version 5, Anatomage, San Jose, USA) in 3-D-Grafiken generiert. In InVivo 5 wurden Cross Sections (= zweidimensionale Schnittebene, die sich an einem zuvor definierten Zahnbogen orientiert) erstellt, an denen anschließend verschiedene Messungen vorgenommen wurden (ICAT-Brochure 2011).

Die Tomographien wurden an einem Desktop PC mit dem Betriebssystem Windows XP Professional ausgewertet. Der Monitor war ein EIZO RadiForce R31 (Fa. Avnet Technology Solutions GmbH, Nettetal, Germany). Dieser hatte eine Auflösung von 3 Megapixeln und 1536 x 2048 Bildpunkten. Das Kontrastverhältnis betrug 400:1 und die Helligkeit/Leuchtdichte 400cd/m^2 (Candela/Quadratmeter). Die Farbwiedergabe wurde durch einen 10-Bit-Look-Up-Table (LUT) gesteuert.

Diese Abbildungseigenschaften ermöglichten die Einrichtung von DIN 6868-57-konformen Bildwiedergabesituationen für die Anwendungskategorie B. Für die Monitore erfolgte tägliche eine Konstanzprüfung nach der Qualitätssicherungsrichtlinie (radiforce.de/pool/spec/R31/2_de_R31.pdf).

3.1.4. Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung wurde die Software SPSS (SPSS inc.TM, Version IBM SPSS statistics 21) verwendet. Es wurden insgesamt 140 DVT-Datensätze an jeweils 30 verschiedenen Koordinaten mit Hilfe von InVivo 5 vermessen. Daraus resultierten insgesamt 4200 Einzelmessungen. Die Messungen wurden in die vier bekannten Gruppen aufgeteilt (siehe Tab. 3).

Um den intraindividuellen Methodenfehler der Messungen zu berechnen, wurde bei 15 Patienten die Datenerhebung nach 3 Wochen ein zweites Mal vorgenommen. Anhand dieser Messungen wurde der Methodenfehler nach Dahlberg, sowie der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston bestimmt.

Für jede der vier Gruppen sowie auch für die Gesamtheit aller Patienten wurden folgende Werte der deskriptiven Statistik ermittelt:

- Mediane
- Mittelwerte
- Standardabweichungen
- Minima
- Maxima
- Spannweiten
- Varianzen

Die Messergebnisse wurden mit dem Kolmogorov-Smirnoff-Test auf Normalverteilung getestet. Da der Test ergab, dass die Daten nicht normalverteilt waren, wurden nicht-parametrische Test für die Hypothesenprüfung angewandt. Vor der Durchführung dieser Tests wurde ein Signifikanzniveau festgelegt.

Das Signifikanzniveau wurde auf $p = 0.05$ (5%) festgelegt (King et al. 2007, Lai et al. 2010). Dieser Wert bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, die Ergebnisse durch Zufall erhalten zu haben, bei 5% liegt. In Bezug auf die Nullhypothesen heißt es, dass die Wahrscheinlichkeit, diese zu Recht abzulehnen, bei 95% liegt.

Zur Prüfung der Hypothesen 1 bis 4 wurde der Wilcoxon-Test benutzt und für die Hypothesen 5 und 6 wurde der Mann-Whitney-U-Test gerechnet.

Wilcoxon-Test

Bei dem Wilcoxon-Test werden zwei gepaarte Stichproben in ihrer zentralen Tendenz verglichen. Er basiert auf der Differenz zweier Messwerte aus den zwei miteinander zu vergleichenden Gruppen. Diese Differenzen werden anschließend in eine Rangfolge gebracht. Anhand der Anzahl positiver bzw. negativer Ränge innerhalb der jeweiligen Gruppe kann so gegebenenfalls die Richtung des signifikanten Ergebnisses bestimmt werden.

Mann-Whitney-U-Test

Es werden zwei unabhängige Stichproben und deren zentrale Tendenz miteinander verglichen. Zuerst wird eine Rangfolge aus beiden unabhängigen Gruppen gemeinsam gebildet. Nun werden die einzelnen Gruppen und ihre zugeordneten Ränge miteinander verglichen. Sind die summierten Ränge der Gruppen ähnlich wird die Nullhypothese angenommen.

Methodenfehler-Berechnung

Um den Methodenfehler zu bestimmen, wurden die Messungen bei den Röntgenbildern von 15 Patienten in einem Abstand von mindestens sieben Tagen erneut durchgeführt. Daraufhin wurde die Genauigkeit der Methode mittels des Methodenfehlers nach Dahlberg, sowie des Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston überprüft. Zur Überprüfung eines systematischen Fehlers wurde ein gepaarter t-Test durchgeführt, da beide Tests einen solchen Ausschluss voraussetzen.

Gepaarter t-Test

Mit dem gepaarten t-Test wurde ein systematischer Fehler in der Gruppe der Doppelmessungen ausgeschlossen. Ähnlich wie der oben beschriebene Wilcoxon-Test beruht er auf der Differenz zweier Messwertpaare. Ein systematischer Fehler besteht, wenn alle Ergebnisse in dieselbe Richtung abweichen. Die Wahl ungenauer Referenzpunkte kann beispielweise zu einem systematischen Fehler führen.

Methodenfehler nach Dahlberg

Der Methodenfehler nach Dahlberg ist eine gängige Methode zur Untersuchung der Verlässlichkeit einer Methode.

$$\text{Formel: } D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{2N}}$$

Abkürzungen: D – Methodenfehler, d – Differenz, N – Anzahl der Messungen

Bei einem Wert < 1 geht man von einer ausreichenden Messgenauigkeit aus (Dahlberg 1940). Allerdings haben Ausreißer einen großen Einfluss auf das Ergebnis.

Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston

Der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston baut auf dem Dahlbergfehler auf und setzt den Methodenfehler mit der Varianz ins Verhältnis. Der Methodenfehler hat bei einer geringeren Streuung größere Auswirkung als bei großer Streuung.

$$\text{Formel: } R = 1 - \frac{\delta^2}{S^2}$$

Abkürzungen: R – Zuverlässigkeitskoeffizient, δ – Methodenfehler, S - Gesamtvarianz

3.1.5. Allgemeine Vorgehensweise bei den Messungen

In diesem Abschnitt wird die genaue Vorgehensweise der angewandten Methodik beschrieben.

Zu Beginn jeder Messung wurde eine DVT-Aufnahme im Programm InVivo 5 geöffnet. In dem Startfenster wurde die Auflösung (Voxel) abgelesen. Anschließend wurde der Menüpunkt „Arch Sections“ angewählt, indem eine Cross-Section, eine Horizontalebene sowie eine Panorama Aufnahme dargestellt waren (Abb. 1). Hier konnten auch die Parameter Weite (40 mm), Dicke (0 mm), und Intervall (0,25 mm) für die Cross-Sections festgelegt werden.

Die Cross-Section ist ein Schnitt, der sich an einem vorgegebenen Zahnbogen orientiert, und immer im rechten Winkel auf den vorgegebenen Zahnbogen trifft. Die Ebene wird mit der grünen Linie in Abb. 8 und Abb. 9 dargestellt.

Unter der Anwendung „Arch-Spline“ wurde der für die Cross Section wichtige Zahnbogen im Oberkiefer wie folgt festgelegt. In der Axialebene wurde die Trifurkation des zweiten Molaren aufgesucht, bei der sich die palatinale Wurzel abzeichnete. Innerhalb dieser Ebene dienten als Referenzpunkte jeweils die Wurzel der Zähne 17, 15, 13, 23, 25 und 27, wobei im Falle einer Mehrwurzeligkeit die palatinale Wurzel als Referenzpunkt festgelegt wurde. Ein weiterer Referenzpunkt wurde zwischen den Zähnen 11 und 21 gewählt.

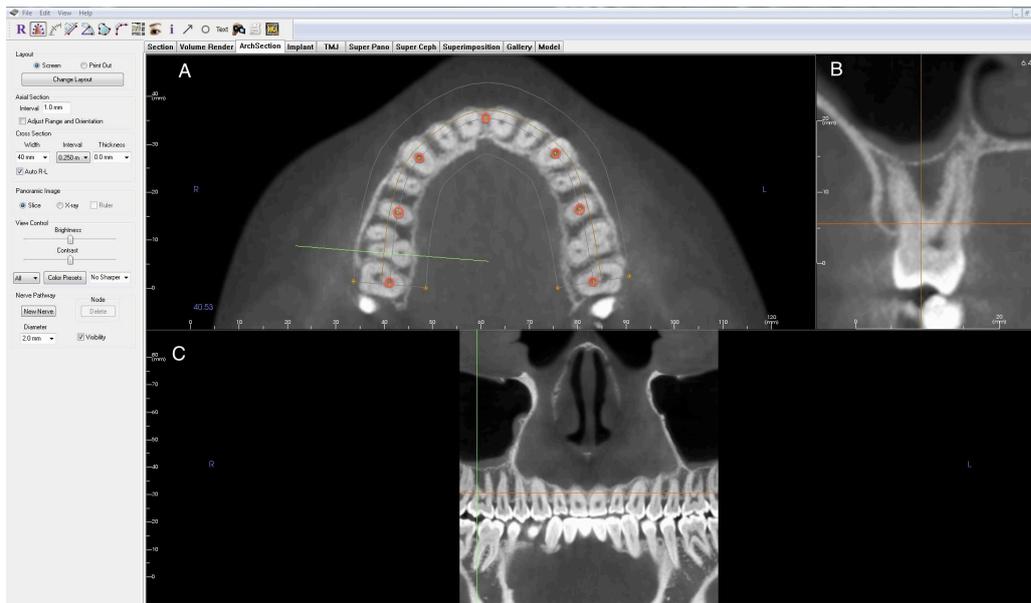


Abb. 8: Anpassen des Zahnbogens
 Dargestellt wird die Festlegung des Zahnbogens.
 A: Horizontalebene. Die Referenzpunkte sind durch eine rote Umrandung gekennzeichnet. Die grüne Linie zeigt die Cross-Section.
 B: Cross-Section. Die horizontale rote Linie zeigt die Horizontalebene. Sie liegt in der Trifurkation.
 C: Panorama Aufnahme. Die grüne Linie zeigt die Cross-Section, die rote Linie zeigt den Axial-Schnitt.

Anschließend wurde die Cross-Section (oben rechts) vergrößert und dort mit Hilfe der „Angle Measurement“-Funktion die Knochendicke gemessen. Von der palatinalen Kronenspitze aus wurden 5 Strecken der Längen 13, 16, 19, 21 und 23 mm bis zum knöchernen Gaumen vermessen. Ausgehend von jedem dieser 5 Schnittpunkte auf dem Gaumen wurde in einem 90° Winkel die Knochendicke ermittelt (Abb. 10).

Die Werte und Intervalle der Streckenlängen wurden so gewählt, da sie sich in einer kleinen Vorstudie als günstig erwiesen hatten. Bei den Koordinaten 13 und 16 mm waren keine großen Veränderungen in Bezug auf das Knochenangebot zu erwarten. Ab einem Abstand von 19 mm bestand die Möglichkeit, das Ende der Wurzel zu überschreiten. Somit wurde dann das Intervall von 3 auf 2 mm verringert.

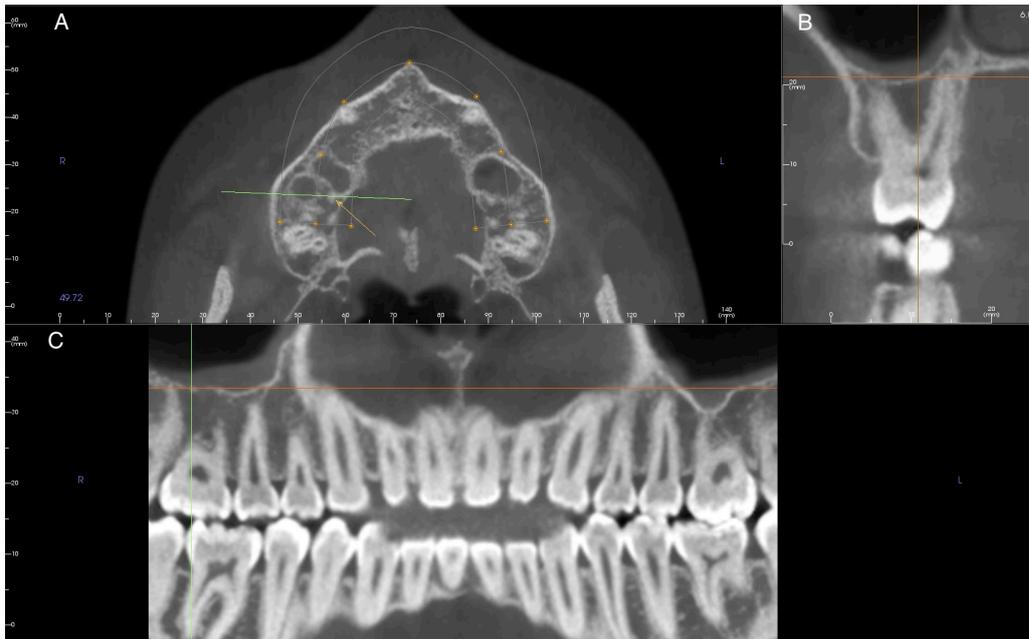


Abb. 9: Auswahl der Cross Section

An dieser Darstellung wurde die Auswahl für die Cross-Section getroffen. Es wurde diejenige Cross Section ausgewählt, in der die palatinale Wurzelspitze sichtbar war.

A: Axialschnitt. Der Pfeil markiert die palatinale Wurzelspitze des Zahns 16. Die grüne Linie zeigt die Cross-Section.

B: Cross-Section. Die rote Linie tangiert die palatinale Wurzelspitze und entspricht dem Axial-Schnitt.

C: Panorama-Aufnahme. Die grüne Linie zeigt die Cross-Section, die rote Linie zeigt den Axial-Schnitt.



Abb. 10: Messung der Koordinate 15_13

Beispielhaft für die Koordinate 15_13 wird der Ablauf einer Messung dargestellt. Von der palatinalen Kronenspitze ausgehend wurden 13 mm bis zum Knochen gemessen. Von dort aus wurde in einem Winkel von 90° solange gemessen, bis der Gaumenknochen erreicht wurde.

An jedem der 6 Zähne wurden 5 Messungen vorgenommen, wodurch insgesamt 30 Koordinaten pro Patient entstanden (Tab. 5).

Tab. 5: Koordinaten der Messungen

Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)	Zahn					
	16	15	14	24	25	26
13	16_13	15_13	14_13	24_13	25_13	26_13
16	16_16	15_16	14_16	24_16	25_16	26_16
19	16_19	15_19	14_19	24_19	25_19	26_19
21	16_21	15_21	14_21	24_21	25_21	26_21
23	16_23	15_23	14_23	24_23	25_23	26_23

3.2. Spezielle Methoden

3.2.1. Knochenangebot in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze

Es wurde erwartet, dass das Knochenangebot mit der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze, d.h. von koronal nach apikal, zunimmt. Die Nullhypothese lautete, dass das Knochenangebot gleich ist, unabhängig davon, in welcher Entfernung es zur palatinalen Kronenspitze gemessen wurde. Um diese These zu überprüfen, wurde der Wilcoxon-Test angewandt. In einem ersten Schritt wurde der Median des Knochenangebots aller Zähne an den unterschiedlichen Entfernungen zur palatinalen Kronenspitze verglichen. Folgende Medianwerte wurden überprüft:

1. Median von 14, 24, 15, 25, 16, 26_13 mit
Median von 14, 24, 15, 25, 16, 26_16
2. Median von 14, 24, 15, 25, 16, 26_16 mit
Median von 14, 24, 15, 25, 16, 26_19

3. Median von 14, 24, 15, 25, 16, 26_19 mit
Median von 14, 24, 15, 25, 16, 26_21

4. Median von 14, 24, 15, 25, 16, 26_21 mit
Median von 14, 24, 15, 25, 16, 26_23

Dieser Vergleich wurde auch für jeden Zahn einzeln durchgeführt. Demnach wurde das Knochenangebot an folgenden Paaren miteinander verglichen:

1. 16_13 mit 16_16
2. 16_16 mit 16_19
3. 16_19 mit 16_21
4. 16_21 mit 16_23

Das Knochenangebot an den übrigen Zähnen (26, 14, 24, 15, 25) aller Patienten wurde analog hierzu getestet.

Die gesamten 4200 Messwerte wurden in die Rechnung mit einbezogen.

3.2.2. Vergleich des Knochenangebots zwischen den ersten und zweiten Prämolaren im Oberkiefer

Es wurde vermutet, dass das Knochenangebot im Bereich der ersten Prämolaren größer ist, als das Knochenangebot an den zweiten Prämolaren. Die Nullhypothese hingegen lautete, dass es keinen Unterschied im Knochenangebot an den ersten und zweiten Prämolaren geben würde. Diese These wurde mit dem Wilcoxon-Test überprüft.

Die Daten aller 140 Patienten wurden genutzt. Der Median des Knochenangebots an den ersten Prämolaren (14, 24) wurde mit dem Median des Knochenangebots an den zweiten Prämolaren (15, 25) verglichen. Dies wurde einzeln für die unterschiedlichen Entfernungen zur palatinalen Kronenspitze durchgeführt.

Folgende Paare wurden demnach miteinander verglichen:

1. Median von 14, 24_13 mit 15, 25_13
2. Median von 14, 24_16 mit 15, 25_16
3. Median von 14, 24_19 mit 15, 25_19
4. Median von 14, 24_21 mit 15, 25_21
5. Median von 14, 24_23 mit 15, 25_23

Diese Berechnungen wurden in einem nächsten Schritt auch für beide Kieferhälften getrennt durchgeführt, d.h. Zahn 14 wurde wie oben beschrieben mit Zahn 15 und Zahn 24 mit Zahn 25 verglichen.

3.2.3. Vergleich des Knochenangebots zwischen den zweiten Prämolaren und ersten Molaren im Oberkiefer

Die Hypothese lautete, dass das Knochenangebot an den zweiten Prämolaren größer ist, als das Knochenangebot an den ersten Molaren. Die Nullhypothese lautete, dass es keinen Unterschied im Knochenangebot der zweiten Prämolaren und ersten Molaren geben würde. Für die Überprüfung der Nullhypothese wurde wieder der Wilcoxon-Test angewandt. Das Knochenangebot an dem zweiten Prämolaren wurde mit dem Knochenangebot an dem ersten Molar analog zu dem Vorgehen in Abschnitt 3.2.2 verglichen. Folgende Paare wurden demnach untersucht:

1. Median von 15, 25_13 mit 16, 26_13
2. Median von 15, 25_16 mit 16, 26_16
3. Median von 15, 25_19 mit 16, 26_19
4. Median von 15, 25_21 mit 16, 26_21
5. Median von 15, 25_23 mit 16, 26_23

Diese Berechnungen wurden ebenfalls für beide Kieferhälften getrennt durchgeführt, d.h. das Knochenangebot an Zahn 15 wurde mit dem an Zahn 16 und das Knochenangebot an Zahn 25 mit dem an Zahn 26 verglichen.

3.2.4. Vergleich des Knochenangebots zwischen rechter und linker Kieferhälfte

Die Hypothese war in diesem Fall gleich der Nullhypothese. Sie besagte, dass es keinen Unterschied im Knochenangebot der rechten und linken Kieferhälfte geben würde. Die Überprüfung erfolgte mit dem Wilcoxon-Test.

Zunächst wurde der Median des Knochenangebots des rechten ersten Prämolaren, des rechten zweiten Prämolaren und des rechten ersten Molaren mit dem Median dergleichen Zähne der linken Kieferhälfte verglichen.

Die gleichen Berechnungen wurden im Anschluss ebenfalls für jedes Zahnpaar (erster Prämolare rechts und links, zweiter Prämolare rechts und links, erster Molar rechts und links) separat durchgeführt. Dabei wurden die Medianwerte des Knochenangebots an den unterschiedlichen Entfernungen zur palatinalen Kronenspitze getrennt betrachtet. Dies führte zu folgenden Vergleichen:

1. 14_13 mit 24_13
2. 14_16 mit 24_16
3. 14_19 mit 24_19
4. 14_21 mit 24_21
5. 14_23 mit 24_23

Diese Berechnungen wurden ebenfalls für die zweiten Prämolaren und ersten Molaren mit allen 140 Datensätzen durchgeführt.

3.2.5. Vergleich des Knochenangebots zwischen den Geschlechtern

Die Gruppe 1 (männliche Patienten) wurde mit der Gruppe 2 (weibliche Patienten) verglichen. Die Hypothese lautete, dass männliche Patienten mehr Knochen bieten würden als weibliche Patienten. Die Nullhypothese sagte aus, dass es keinen Unterschied zwischen der Knochenmenge bei männlichen und weiblichen Patienten geben würde. Zur Überprüfung wurde der Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Zunächst wurde der Medianwert des Knochenangebots an den gesamten Zähnen der männlichen Patienten mit dem Medianwert des Knochenangebots der weiblichen Patienten verglichen. Anschließend wurde jeder Zahn auch separat auf Unterschiede zwischen den Geschlechtern untersucht. Dabei wurden die Medianwerte des Knochenangebots an den unterschiedlichen

Entfernungen zur palatinalen Kronenspitze getrennt betrachtet. Folgende Paare wurden verglichen:

1. 14_13 Männlich mit 14_13 Weiblich
2. 14_16 Männlich mit 14_16 Weiblich
3. 14_19 Männlich mit 14_19 Weiblich
4. 14_21 Männlich mit 14_21 Weiblich
5. 14_23 Männlich mit 14_23 Weiblich

Die gleichen Vergleiche wurden auch für die zweiten Prämolaren und ersten Molaren mit allen 140 Datensätzen angefertigt.

3.2.6. Vergleich des Knochenangebots zwischen verschiedenen Altersgruppen

Die Gruppe A (jüngere Patienten) wurde mit der Gruppe B (ältere Patienten) verglichen. Die Hypothese lautete, dass ältere Patienten mehr Knochenangebot besitzen würden als jüngere Patienten. Die Nullhypothese besagte hingegen, dass sich das Knochenangebot bei älteren und jüngeren Patienten nicht unterscheiden würde. Die Berechnungen erfolgten wie in den Abschnitten 3.2.4 und 3.2.5 beschrieben. Zunächst wurde der Medianwert aller Zähne der älteren Patienten mit dem Medianwert der jüngeren Patienten verglichen. Im Anschluss wurden die einzelnen Zähne getrennt voneinander betrachtet. Dabei wurden auch hier die Medianwerte des Knochenangebots an den unterschiedlichen Entfernungen zur palatinalen Kronenspitze getrennt betrachtet. Der Mann-Whitney-U-Test wurde genutzt, um die Hypothese zu überprüfen. Folgende Paare wurden verglichen:

1. 16_13 Alt mit 16_13 Jung
2. 16_16 Alt mit 16_16 Jung
3. 16_19 Alt mit 16_19 Jung
4. 16_21 Alt mit 16_21 Jung
5. 16_23 Alt mit 16_23 Jung

Analog hierzu wurde das Knochenangebot an den übrigen Zähnen (15, 14, 24, 25 und 26) verglichen.

4. Ergebnisse

4.1. Allgemeine Statistik

4.1.1. Test auf Normalverteilung der Daten

Es wurden DVT-Datensätze von 140 Patienten genutzt, um das Knochenangebot des Gaumens an den ersten Prämolaren, den zweiten Prämolaren und den ersten Molaren zu ermitteln. Das Knochenangebot wurde dabei von fünf verschiedenen Ausgangspunkten gemessen (13, 16, 19, 21 und 23 mm von der palatinalen Kronenspitze entfernt). Insgesamt wurden pro Patient somit 30 Messungen durchgeführt. Als Resultat ergaben sich 30 Variablen, die alle mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests auf Normalverteilung überprüft wurden. Sollte das Ergebnis dieses Tests einen signifikanten Wert ($p < 0,05$) erreichen, weicht die überprüfte Variable signifikant von einer Normalverteilung ab.

Die Auswertung des Tests ergab, dass 15 der überprüften Variablen einer Normalverteilung unterlagen ($p \geq 0,05$) und 15 Variablen keine Normalverteilung aufwiesen ($p < 0,05$). Da bei diesem Ergebnis nicht für alle Variablen von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann, wurden für die Auswertung der Daten nicht-parametrische statistische Tests verwendet.

4.1.2. Berechnung des Methodenfehlers

Zur Berechnung des Methodenfehlers wurde das Knochenangebot von 15 Patienten doppelt gemessen. Zwischen diesen zwei Messungen lagen mindestens 7 Tage Abstand. Anhand dieser Ergebnisse konnte der Methodenfehler nach Dahlberg (Dahlberg 1940) bestimmt werden, der bei $D = 0,539$ lag. Da das Ergebnis < 1 war, konnte von ausreichender Genauigkeit ausgegangen werden. Zusätzlich wurde der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston (Houston 1983) bestimmt, um auch die Streuung in das Ergebnis mit einzubeziehen. Es wurde ein Koeffizient $R = 0,90$ ermittelt. Je näher dieser Wert an dem höchstmöglichen Ergebnis „1“ liegt, desto höher ist die Reliabilität der Methode. Bei diesem Resultat konnte von einer klinisch akzeptablen Genauigkeit ausgegangen werden.

4.2. Auswertung der Hypothesen

4.2.1. Knochenangebot in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze

Das Knochenangebot von 140 Patienten wurde anhand von DVT-Datensätzen an den ersten (14 und 24) und zweiten (15 und 25) Prämolaren sowie den ersten Molaren (16 und 26) des Oberkiefers erhoben. Für die Messungen wurden fünf Ausgangspunkte mit unterschiedlichen Entfernungen zur palatinalen Kronenspitze gewählt. Diese Entfernungen betrugen 13, 16, 19, 21 bzw. 23 mm Abstand von der Kronenspitze. Von diesen Messpunkten ausgehend wurde das vorhandene Knochenangebot gemessen. Das Knochenangebot an den weiter koronal gelegenen Messpunkten war wesentlich geringer als das Knochenangebot an den weiter apikal gelegenen Messpunkten (siehe Abb. 11, Tab. 6).

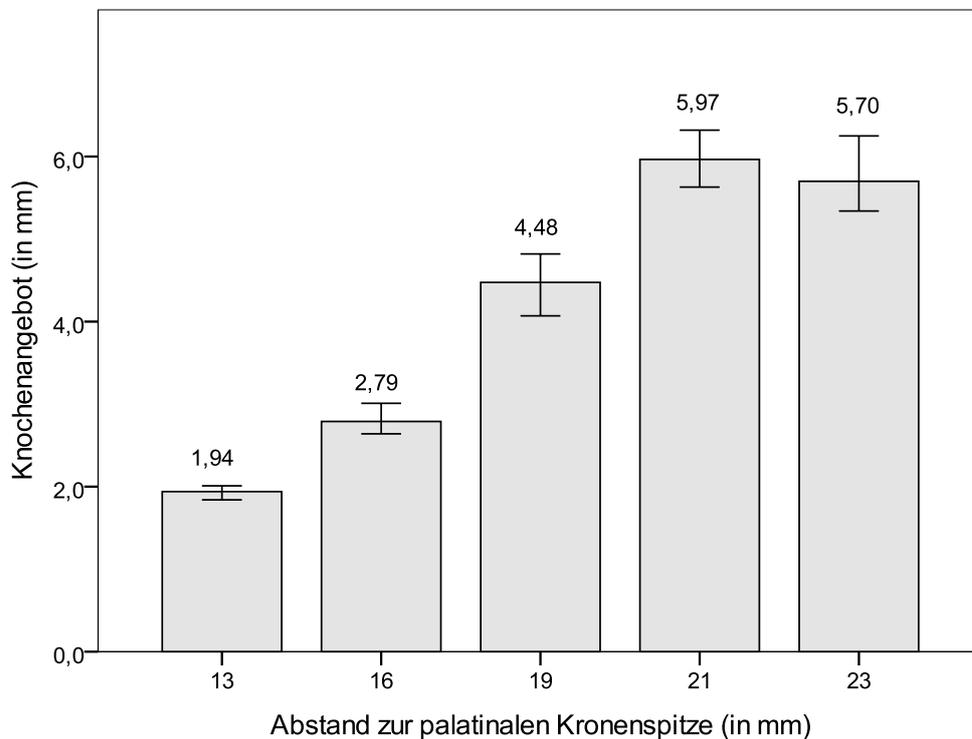


Abb. 11: Balkendiagramm mit 95 % Konfidenzintervallen zur Darstellung der Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze. Das Knochenangebot nahm von koronal nach apikal zu.

Die Hypothese „Das palatinale Knochenangebot auf Höhe der Prämolaren und Molaren nimmt von koronal nach apikal zu“ konnte durch den Wilcoxon-Test hoch signifikant ($p < 0,001$) bestätigt werden.

Bei einem Abstand von 13 mm betrug das Knochenangebot im Median 1,94 mm. Bei einem Abstand von 16 mm zur Kronenspitze lag das Knochenangebot bei 2,79 mm und stieg bei einem Abstand von 19 mm weiter auf 4,48 mm an. Das größte Knochenangebot von 5,97 mm wurde bei einem Abstand von 21 mm zur Kronenspitze gemessen. Bei einem Abstand von 23 mm hingegen war die Menge an Knochenangebot marginal geringer als bei dem vorangegangenen Messpunkt und lag im Median bei 5,70 mm. Die Medianwerte des Knochenangebots sowie die Medianwerte der Zunahme des Knochenangebots bei steigender Entfernung zur palatinalen Kronenspitze sind Tab. 6 aufgelistet.

Tab. 6: Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze und die Zunahme des Knochenangebots zwischen den Messpunkten.

Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)	Knochenangebot im Median (in mm)	Zunahme / Abnahme des Knochenangebots (in mm)
13	1,94	-
16	2,79	0,85
19	4,48	1,69
21	5,97	1,49
23	5,70	- 0,27

Da Unterschiede im Knochenangebot zwischen den einzelnen Zähnen wahrscheinlich waren, wurde das Knochenangebot auch für jeden der Zähne separat betrachtet (siehe Abb. 12, Tab. 7). Die ersten Prämolaren boten das größte Knochenangebot und die ersten Molaren wiesen das geringste Knochenangebot auf. Das Knochenangebot der zweiten Prämolaren lag zwischen denen der ersten Prämolaren und Molaren.

Die Zunahme des Knochenangebots von koronal nach apikal an den Molaren war verhältnismäßig klein. Es stieg lediglich von 1,42 mm (bei 13 mm Abstand zur Kronenspitze) auf 3,86 mm (bei einem Abstand von 23 mm). Der größte Anstieg war zwischen den Entfernungen 19 und 21 mm zu verzeichnen.

Das Knochenangebot an den ersten Prämolaren wies den höchsten Anstieg von koronal nach apikal auf. Hier stieg das mediane Knochenangebot von

1,98 mm auf 9,95 mm (gemessen von 13 mm bis 23 mm Entfernung zur Kronenspitze). Die größten Anstiege waren zwischen den Entfernungen 16 und 19 mm sowie zwischen 19 und 21 mm zu finden.

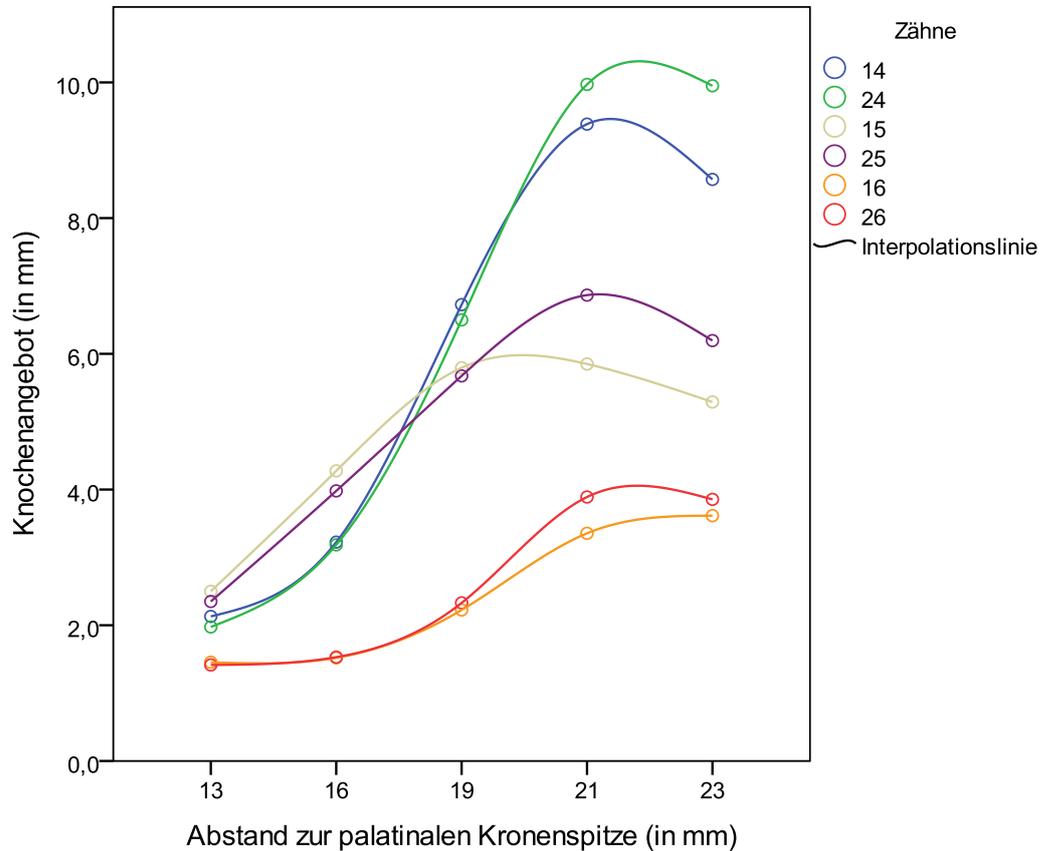


Abb. 12: Liniendiagramm zur Darstellung der Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26. Das Knochenangebot nahm von koronal nach apikal bei allen Zähnen zu. Das größte Knochenangebot wiesen die ersten Prämolaren und das geringste Knochenangebot die ersten Molaren auf.

Bei dem zweiten Prämolare lag das Knochenangebot bei einem Abstand von 13 mm im Median bei 2,35 mm und stieg bis zu einem Abstand von 23 mm zur Kronenspitze auf 6,20 mm an. Die Anstiege des Knochenangebots waren bei den Abständen 13 und 16 mm sowie 16 und 19 mm am größten (siehe Abb. 12, Tab. 7).

Tab. 7: Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26.
Bei jedem Zahn nimmt das Knochenangebot von koronal nach apikal zu.

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
14	2,13	3,23	6,73	9,39	8,57
24	1,98	3,19	6,50	9,97	9,95
15	2,50	4,28	5,76	5,85	5,29
25	2,35	3,98	5,68	6,87	6,20
16	1,46	1,52	2,23	3,36	3,62
26	1,42	1,53	2,33	3,89	3,86

Die Hypothese „Das palatinale Knochenangebot auf Höhe der Prämolaren und Molaren nimmt von koronal nach apikal zu“ wurde durch den Wilcoxon-Test auch für jeden der definierten Abstände zur palatinalen Kronenspitze überprüft. Sie konnte für alle Zähne an den meisten der definierten Abstände zur Kronenspitze statistisch signifikant bestätigt werden (siehe Tab. 8).

Die Hypothese wurde für alle Zähne bei einem geringeren Abstand zur Kronenspitze (13, 16 und 19 mm) bestätigt. Für alle Zähne (mit Ausnahme des Zahnes 15) war auch der Vergleich des Knochenangebots zwischen den Entfernungen 19 und 21 mm signifikant unterschiedlich. Bei dem Zahn 16 ergab der Vergleich des Knochenangebots an den Entfernungen 21 und 23 mm ebenfalls einen statistisch signifikanten Unterschied. Alle anderen Ergebnisse waren statistisch nicht signifikant. Die statistischen Signifikanzwerte sowie die Zunahme des Knochenangebots mit steigender Entfernung zur palatinalen Kronenspitze sind in Tab. 8 dargestellt.

Tab. 8: Zunahme / Abnahme des Knochenangebots zwischen den verschiedenen Entfernungen zur palatinalen Kronenspitze für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26 mit Angabe des statistischen p-Werts. Si-
 Signifikante Ergebnisse sind gekennzeichnet: ** - $p < 0.001$, * - $p < 0.01$, ° $p < 0.05$

Zahn	Abstände zur palatinalen Kronenspitze (in mm)	Zunahme/Abnahme des Knochenangebots (in mm)	p-Wert
14	13 – 16	+ 1,10	< 0,001**
	16 – 19	+ 3,50	< 0,001**
	19 – 21	+ 2,66	< 0,001**
	21 – 23	-0,82	0,526
24	13 – 16	+ 1,21	< 0,001**
	16 – 19	+ 3,31	< 0,001**
	19 – 21	+ 3,47	< 0,001**
	21 – 23	- 0,02	0,004*
15	13 – 16	+ 1,78	< 0,001**
	16 – 19	+ 1,48	< 0,001**
	19 – 21	+ 0,09	0,900
	21 – 23	- 0,56	0,289
25	13 – 16	+ 1,63	< 0,001**
	16 – 19	+ 1,70	< 0,001**
	19 – 21	+ 1,19	< 0,001**
	21 – 23	- 0,67	0,906
16	13 – 16	+ 0,06	0,001**
	16 – 19	+ 0,71	< 0,001**
	19 – 21	+ 1,13	< 0,001**
	21 – 23	0,26	0,034°
26	13 – 16	+ 0,11	0,001*
	16 – 19	+ 0,80	< 0,001**
	19 – 21	+ 1,56	< 0,001**
	21 – 23	- 0,03	0,153

4.2.2. Vergleich des Knochenangebots zwischen den ersten und zweiten Prämolaren im Oberkiefer

Das Knochenangebot wurde zwischen den ersten Prämolaren (14, 24) und den zweiten Prämolaren (15, 25) des Oberkiefers jeweils an den unterschiedlichen Entfernungen zur Kronenspitze verglichen (13, 16, 19, 21 und 23 mm). An den weiter koronal gelegenen Entfernungen (13 und 16 mm) wiesen die zweiten Prämolaren im Vergleich mit den ersten Prämolaren ein größeres Knochenangebot auf. Im Gegensatz dazu boten die ersten Prämolaren an den weiter apikal gelegenen Entfernungen (19, 21 und 23 mm) ein größeres Knochenangebot (siehe Abb. 13, Tab. 9).

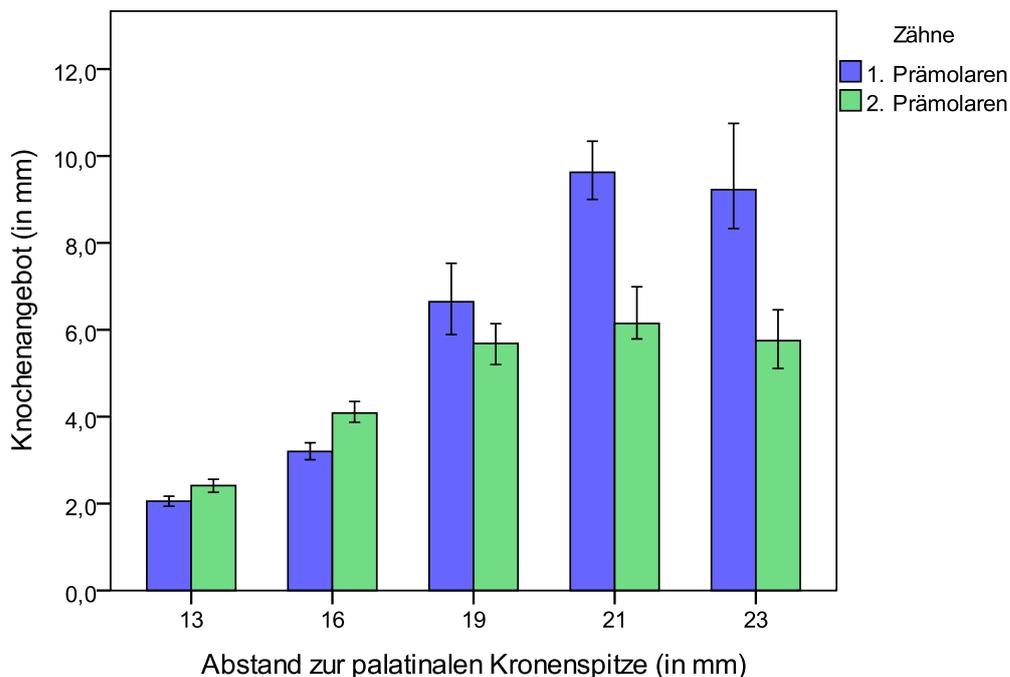


Abb. 13: Balkendiagramm mit Angabe der 95 % Konfidenzintervalle zur Darstellung der Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die ersten (14, 24) und zweiten (15, 25) Prämolaren. Das Knochenangebot der zweiten Prämolaren war bei geringerer Entfernung (13 und 16 mm) zur palatinalen Kronenspitze größer und das Knochenangebot der ersten Prämolaren bei steigendem Abstand (19, 21, 23).

Bei einem Abstand von 13 mm zur Kronenspitze betrug das Knochenangebot der zweiten Prämolaren im Median 2,42 mm und das Knochenangebot an den ersten Prämolaren 2,06 mm. Auch bei einer Entfernung von 16 mm wies die Umgebung des zweiten Prämolaren mit 4,09 mm Knochenangebot mehr Knochen auf als die Umgebung des ersten Prämolaren mit 3,20 mm.

Tab. 9: Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die ersten Prämolaren (14, 24) und die zweiten Prämolaren (15, 25). Das Knochenangebot an den zweiten Prämolaren war bei einem Abstand von 13 und 16 mm zur palatinalen Kronenspitze größer als das an den ersten Prämolaren. Ab einem Abstand von 19 mm wiesen dagegen die ersten Prämolaren mehr Knochenangebot auf.

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
1. Prämolaren	2,06	3,20	6,65	9,63	9,23
2. Prämolaren	2,42	4,09	5,69	6,15	5,75

Ab einem Abstand von 19 mm zur Kronenspitze wies der erste Prämolare mehr Knochenangebot auf als der zweite Prämolare. Bei einem Abstand von 19 mm lag das Knochenangebot beim ersten Prämolare bei 6,65 mm und beim zweiten Prämolare bei 5,69 mm. Beim zweiten Prämolaren blieb das Knochenangebot mit weiterer Entfernung von der palatinalen Kronenspitze nun relativ konstant. Das Knochenangebot an den ersten Prämolaren dagegen stieg bei einer Entfernung von 21 mm nochmal auf 9,63 mm an um dann ebenfalls relativ konstant zu bleiben. Diese Medianwerte für die ersten und zweiten Prämolaren sind in Tab. 9 aufgelistet.

Die Hypothese „Das Knochenangebot im Bereich der ersten Prämolaren ist größer als das Knochenangebot im Bereich der zweiten Prämolaren“ wurde mit dem Wilcoxon-Test überprüft. Die Hypothese konnte statistisch hoch signifikant für die Entfernungen 13, 16 und 19 mm von der palatinalen Kronenspitze bestätigt werden ($p < 0,001$ für alle Werte).

Bei den geringeren Abständen 13 und 16 mm zur Kronenspitze konnte im Gegensatz dazu ein statistisch hoch signifikant höheres Knochenangebot an den zweiten Prämolaren gezeigt werden ($p < 0,001$ für alle Werte).

Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse sowohl für die rechte als auch für die linke Kieferhälfte gleichermaßen zutreffen, wurden beide auch unabhängig voneinander überprüft. Die Ergebnisse konnten mit dem Wilcoxon-Test statistisch signifikant bestätigt werden. Die statistischen Signifikanzwerte sowie die Richtung der Ergebnisse sind in Tab. 10 dargestellt. Die Medianwerte des Knochenangebots für die einzelnen Zähne können Tab. 7 entnommen werden.

Tab. 10: Statistische Signifikanzwerte (p-Werte) aus dem Vergleich der ersten und zweiten Prämolaren der linken Seite (14, 15) und der rechten Seite (24, 25). Das Knochenangebot der zweiten Prämolaren beider Seiten war an den Abständen 13 und 16 mm größer (grün) und das der ersten Prämolaren beider Seiten an den größeren Abständen (ab 19 mm, blau). Signifikante Ergebnisse sind gekennzeichnet: ** - $p < 0.001$, * - $p < 0.01$, ° $p < 0.05$

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
14 / 15	14 < 15, $p < 0,001^{**}$	14 < 15, $p < 0,001^{**}$	14 > 15, $p = 0,002^*$	14 > 15, $p < 0,001^{**}$	14 > 15, $p < 0,001^{**}$
24 / 25	24 < 25, $p < 0,001^{**}$	24 < 25, $p = 0,003^*$	24 > 25, $p = 0,026^\circ$	24 > 25, $p < 0,001^{**}$	24 > 25, $p < 0,001^{**}$

4.2.3. Vergleich des Knochenangebots zwischen den zweiten Prämolaren und ersten Molaren im Oberkiefer

Das Knochenangebot zwischen den zweiten Prämolaren (15 und 25) und den ersten Molaren (16 und 26) wurde, analog zu der Methode in Abschnitt 4.3, jeweils an den unterschiedlichen Entfernungen zur Kronenspitze gemessen (13, 16, 19, 21, 23 mm). Das Knochenangebot war bei allen Entfernungen an den zweiten Prämolaren größer als das Knochenangebot bei den entsprechenden Entfernungen an den ersten Molaren (siehe Abb. 14, Tab. 11).

Bei einer Entfernung von 13 mm zur palatinalen Kronenspitze wiesen die zweiten Prämolaren im Median 2,42 mm Knochenangebot auf während die ersten Molaren nur 1,42 mm Knochenangebot boten.

Die Umgebung der zweiten Prämolaren wies zur Entfernung von 16 mm den größten Zuwachs an Knochenangebot auf und bot 4,09 mm Knochenangebot. An den ersten Molaren dagegen wurde im Median ein Knochenangebot von 1,52 mm gemessen.

Zur nächsten Entfernung wies die Umgebung der zweiten Prämolaren einen ähnlich großen Anstieg an wie zuvor und das Knochenangebot lag bei 5,69 mm. Zu dieser Entfernung war der Anstieg an Knochenangebot an den ersten Molaren wesentlich geringer und das Knochenangebot lag bei 2,26 mm.

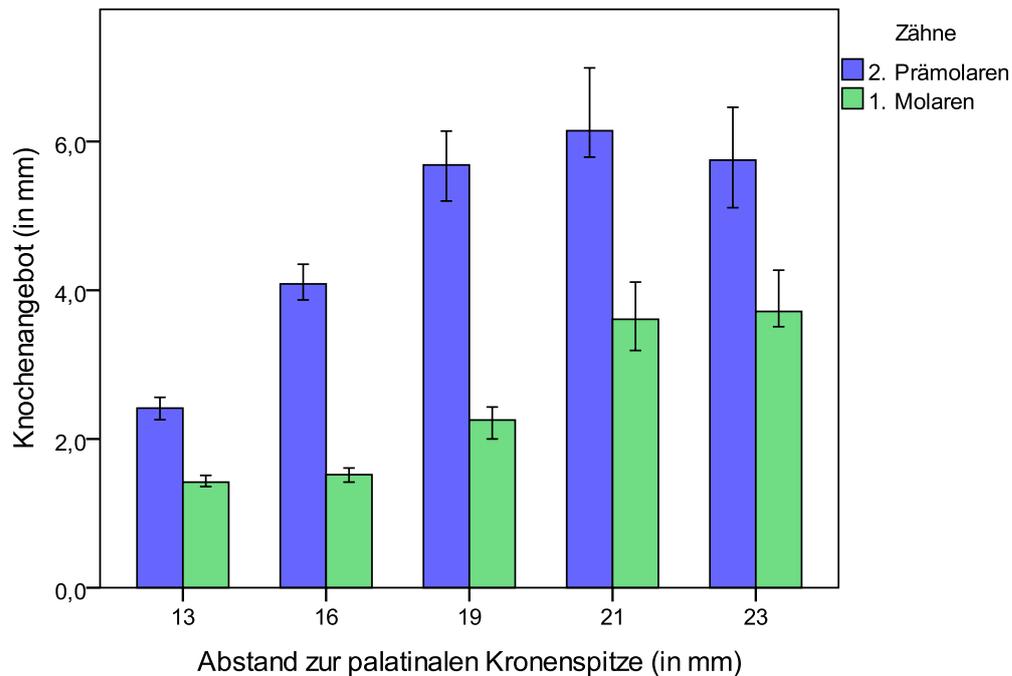


Abb. 14: Balkendiagramm mit Angabe der 95 % Konfidenzintervalle zur Darstellung der Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die zweiten Prämolaren (15, 25) und ersten Molaren (16, 26). Das Knochenangebot der zweiten Prämolaren war statistisch signifikant größer als das der Molaren, unabhängig von dem Abstand zur palatinalen Kronenspitze.

Das Knochenangebot stieg an den zweiten Prämolaren bei einer Entfernung von 21 mm noch auf den höchsten Wert, 6,15 mm an und sank dann bei 23 mm wieder leicht auf 5,75 mm ab.

Bei den ersten Molaren zeigte das Knochenangebot den größten Anstieg zu einer Entfernung auf 3,61 mm und blieb bei der nächsten Entfernung relativ konstant bei 3,71 mm.

Die Medianwerte des Knochenangebots für die zweiten Prämolaren und ersten Molaren sind in Tab. 11 dargestellt.

Die Hypothese „Das Knochenangebot im Bereich der zweiten Prämolaren ist größer als das Knochenangebot im Bereich der ersten Molaren“ konnte für alle Zähne unabhängig vom Abstand zur palatinalen Kronenspitze statistisch hoch signifikant bestätigt werden ($p < 0.001$ für alle Werte).

Tab. 11: Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die zweiten Prämolaren (15, 25) und die ersten Molaren (16, 26).
Das Knochenangebot der zweiten Prämolaren war größer als das der ersten Molaren, unabhängig von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze.

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
2. Prämolaren	2,42	4,09	5,69	6,15	5,75
1. Molaren	1,42	1,52	2,26	3,61	3,72

Wie in Abschnitt 4.3 wurden beide Kieferhälften auch unabhängig voneinander untersucht, um auszuschließen, dass die Ergebnisse größtenteils von nur einer Seite getrieben wurden. Es konnte durch den Wilcoxon-Test bestätigt werden, dass sowohl die rechten als auch die linken zweiten Prämolaren statistisch hoch signifikant größer sind als die rechten bzw. linken ersten Molaren ($p < 0.001$ für alle Werte).

4.2.4 Vergleich des Knochenangebots zwischen rechter und linker Kieferhälfte

Mit Hilfe des Wilcoxon-Tests wurde das Knochenangebot an der linken und der rechten Kieferhälfte verglichen. Die linke Kieferhälfte wies 3,49 mm Knochenangebot auf und die rechte Kieferhälfte mit 3,41 mm eine fast identische Menge (siehe Abb. 15).

Auch statistisch konnte kein Unterschied gefunden werden ($p = 0.94$).

Die Hypothese „Es gibt keinen Unterschied zwischen dem Knochenangebot in der rechten und linken Kieferhälfte“ konnte somit bestätigt werden.

Das Knochenangebot an den beiden Kieferhälften wurde ebenfalls separat für die ersten Prämolaren (14, 24), die zweiten Prämolaren (15, 25) und die ersten Molaren (16, 26) an den definierten Abständen zur palatinalen Kronenspitze verglichen. Auch für diese einzelnen Zahnpaare konnte kein Einfluss der Kieferhälfte auf das Knochenangebot gefunden werden (siehe Abb. 16 und Tab. 12).

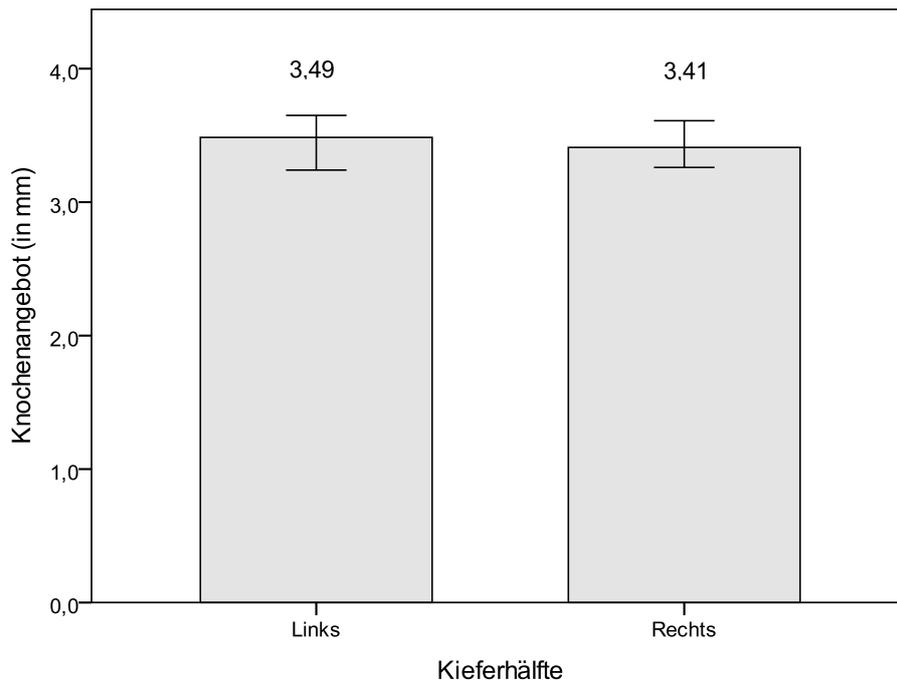


Abb. 15: Balkendiagramm zur Darstellung des Knochenangebots in der rechten und linken Kieferhälfte.
Es gab keinen Unterschied im Knochenangebot zwischen den Seiten.

Tab. 12: Statistische Signifikanzwerte (p-Werte) aus dem Vergleich der linken und rechten Kieferhälften der ersten Prämolaren (14, 24), der zweiten Prämolaren (25, 25) und der ersten Molaren (16,26).
Grundsätzlich unterschied sich das Knochenangebot an den Kieferhälften nicht. Eine Ausnahme bildeten die ersten Prämolaren an der Entfernung 23 mm (links größer, blau) und die zweiten Prämolaren an der Entfernung 16 mm (rechts größer, grün). Signifikante Ergebnisse sind gekennzeichnet: ** - $p < 0.001$, * - $p < 0.01$, ° $p < 0.05$

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
14 / 24	14 = 24, $p = 0,192$	14 = 24, $p = 0,949$	14 = 24, $p = 0,842$	14 = 24, $p = 0,562$	14 < 24, $p = 0,009^*$
15 / 25	15 = 25, $p = 0,224$	15 > 25, $p < 0,001^{**}$	15 = 25, $p = 0,186$	15 = 25, $p = 0,112$	15 = 25, $p = 0,304$
16 / 26	16 = 26, $p = 0,153$	16 = 26, $p = 0,120$	16 = 26, $p = 0,970$	16 = 26, $p = 0,123$	16 = 26, $p = 0,847$

Die einzigen Ausnahmen bildeten das Paar 14 und 24 bei einem Abstand von 23 mm zur palatinalen Kronenspitze und das Paar 15 und 25 bei einem Abstand von 16 mm. An Zahn 14 (dem linken ersten Prämolaren) war dabei mit 8,57 mm weniger Knochenangebot vorhanden als an Zahn 24 (dem rechten ersten Prämolaren) mit 9,95 mm. An Zahn 15 (dem linken zweiten Prämolaren) war dabei hingegen mit 4,28 mm mehr Knochenangebot vorhanden als an Zahn 25 (dem rechten Prämolaren) mit 3,98 mm.

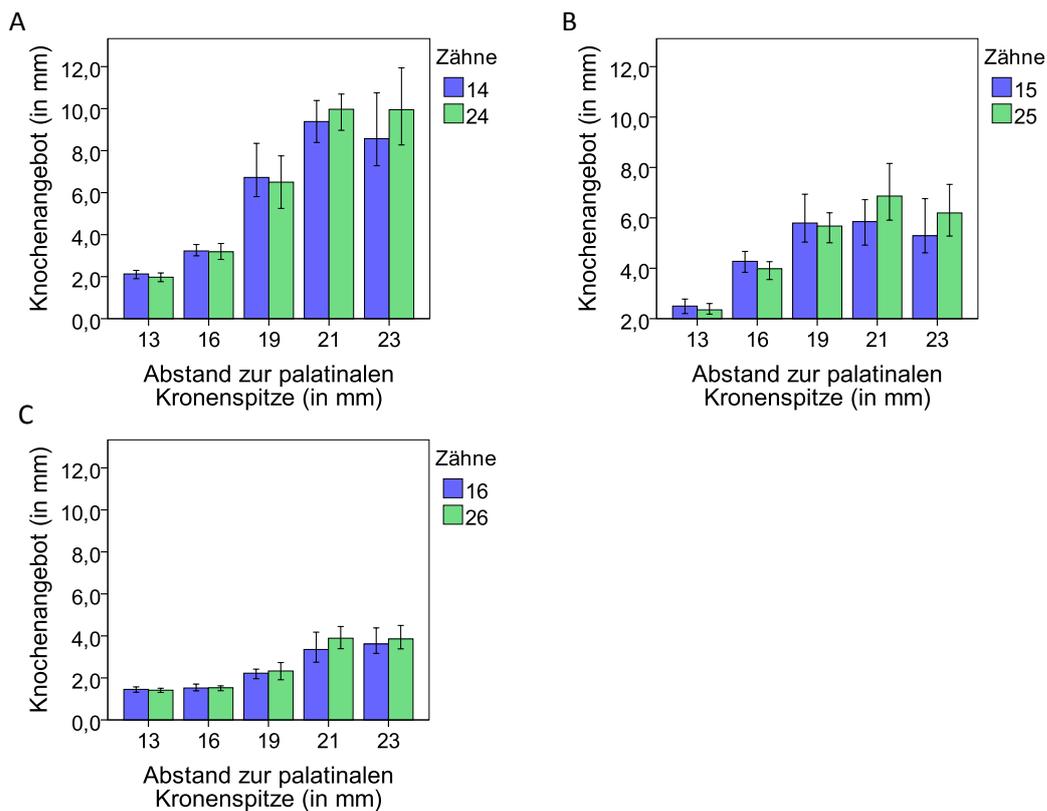


Abb. 16: Balkendiagramm zur Darstellung des Knochenangebots in der rechten und linken Kieferhälfte in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die ersten Prämolaren (A: 14, 24), die zweiten Prämolaren (B: 15, 25) und die ersten Molaren (C: 16, 26). Es gab keinen Unterschied im Knochenangebot zwischen den Kieferhälften.

Auch statistisch unterschieden sich die Knochenangebote zwischen den Geschlechtern nicht ($p = 0.9$). Die Hypothese „Männliche Patienten bieten mehr Knochendicke als weibliche Patienten“ konnte somit nicht bestätigt werden.

4.2.5 Vergleich des Knochenangebots zwischen den Geschlechtern

Ein möglicher Einfluss des Geschlechts auf das Knochenangebot wurde durch den Mann-Whitney-U-Test überprüft. Bei den männlichen Patienten wurde im Median ein Knochenangebot in Höhe von 3,4 mm und bei den weiblichen Patienten ein Knochenangebot in Höhe von 3,5 mm festgestellt (siehe Abb. 17). Auch statistisch unterschieden sich die Knochenangebote zwischen den Geschlechtern nicht ($p = 0.9$). Die Hypothese „Männliche Patienten bieten mehr Knochendicke als weibliche Patienten“ konnte somit nicht bestätigt werden.

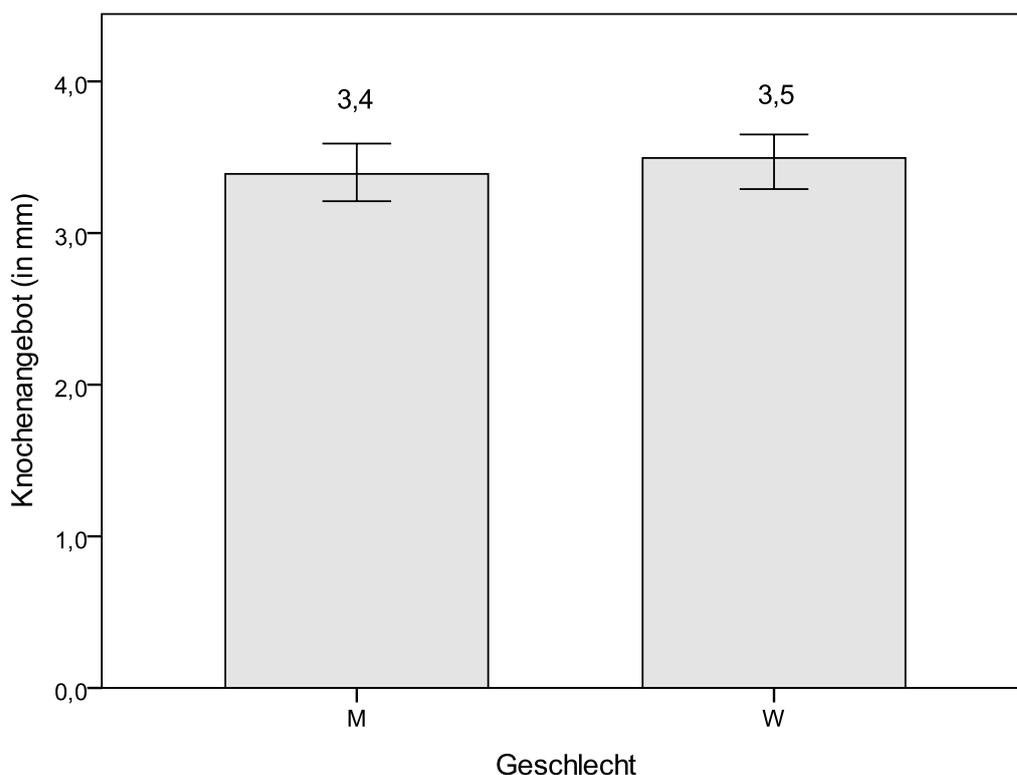


Abb. 17: Balkendiagramm zur Darstellung des Knochenangebots bei männlichen und weiblichen Patienten.
Das Geschlecht hatte keinen Einfluss auf das Knochenangebot.

Die mögliche Abhängigkeit des Knochenangebots vom Geschlecht wurde auch separat für jeden einzelnen Zahn (14, 24, 15, 25, 16 und 26) untersucht. Auch hier gab es keinen Einfluss des Geschlechts auf das Knochenangebot (siehe Abb. 18). Eine Ausnahme bildete das Knochenangebot an Zahn 24 bei einer Entfernung von 21 mm zur palatinalen Kronenspitze, welches mit einem Wert von 10,52 mm statistisch signifikant größer bei männlichen Patienten war als

bei weiblichen Patienten mit 9,28 mm. Die Zähne 25 und 26 bildeten ebenfalls Ausnahmen bei einer Entfernung von 13 bzw. 23 mm, hier boten die weiblichen Patienten signifikant mehr Knochenangebot als die männlichen Patienten.

Tab. 13 gibt die statistischen Signifikanzwerte sowie die Richtung der Ergebnisse an. Die Medianwerte des Knochenangebots für männliche und weibliche Patienten sind für die ersten Prämolaren in Tab. 15 dargestellt, für die zweiten Prämolaren in Tab. 16 und für die ersten Molaren in Tab. 17.

Tab. 13: Statistische Signifikanzwerte (p-Werte) aus dem Vergleich der männlichen (M) und weiblichen (W) Patienten für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26. Grundsätzlich unterschied sich das Knochenangebot zwischen den Geschlechtern nicht. Ausnahmen bildeten Zahn 24 an der Entfernung 21 mm (größer bei männlichen Patienten, blau) und die Zähne 25 und 26 an den Entfernungen 13 bzw. 23 mm (größer bei weiblichen Patienten, grün). Signifikante Ergebnisse sind gekennzeichnet: ** - $p < 0.001$, * - $p < 0.01$, ° $p < 0.05$

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
14	M = W, p = 0,340	M = W, p = 0,201	M = W, p = 0,532	M = W, p = 0,070	M = W, p = 0,108
24	M = W, p = 0,871	M = W, p = 0,960	M = W, p = 0,807	M > W, p = 0,032°	M = W, p = 0,598
15	M = W, p = 0,246	M = W, p = 0,328	M = W, p = 0,668	M = W, p = 0,461	M = W, p = 0,306
25	M < W, p = 0,024°	M = W, p = 0,126	M = W, p = 0,459	M = W, p = 0,528	M = W, p = 0,917
16	M = W, p = 0,438	M = W, p = 0,920	M = W, p = 0,286	M = W, p = 0,579	M = W, p = 0,301
26	M = W, p = 0,777	M = W, p = 0,509	M = W, p = 0,380	M = W, p = 0,601	M < W, p = 0,027°

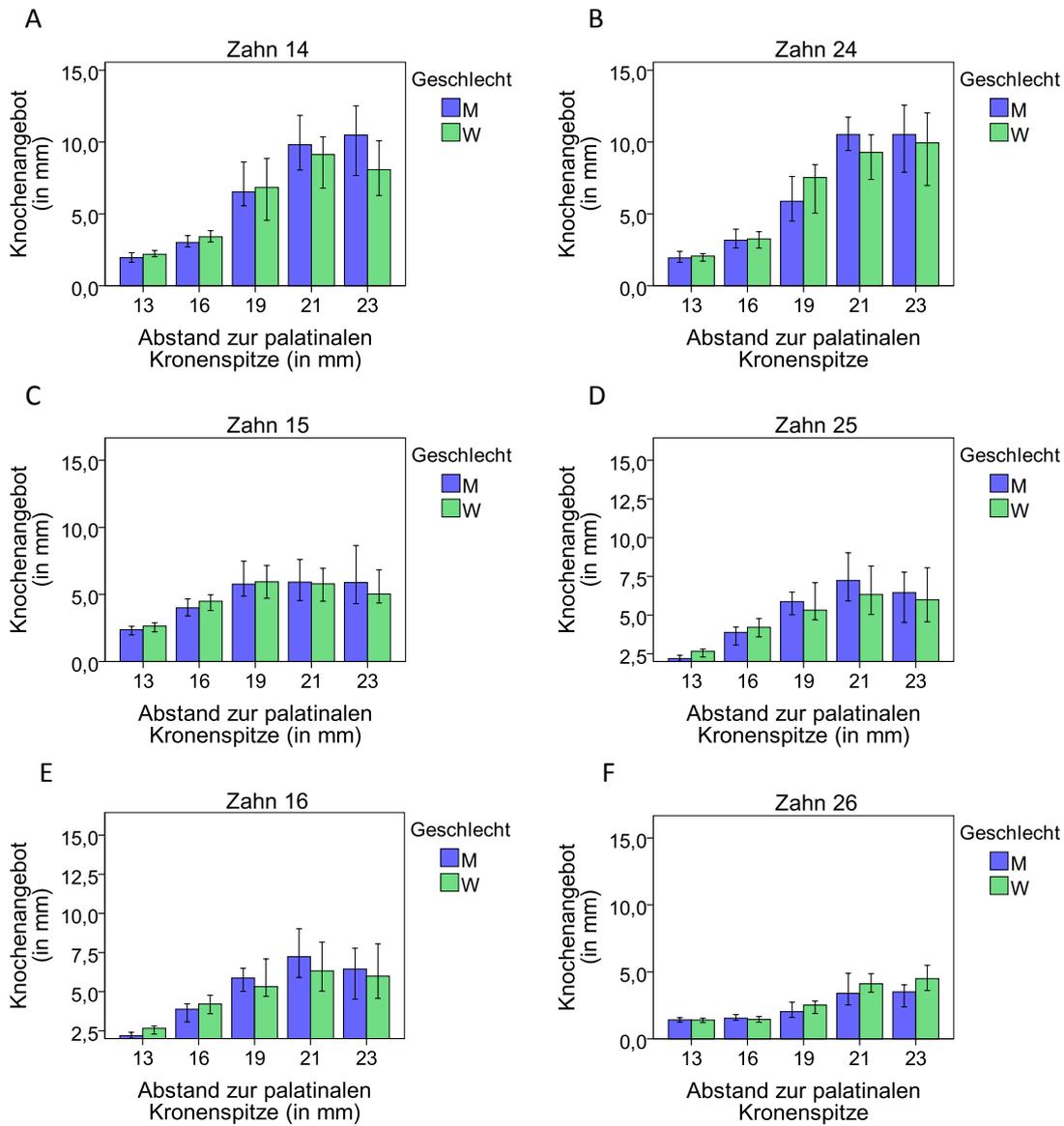


Abb. 18: Balkendiagramme zur Darstellung des Knochenangebots bei männlichen und weiblichen Patienten für die Zähne 14 (A), 24 (B), 15 (C), 25 (D), 16 (E) und 26 (F). Es gab keinen Unterschied im Knochenangebot zwischen männlichen und weiblichen Patienten.

4.2.6. Vergleich des Knochenangebots zwischen verschiedenen Altersgruppen

Der mögliche Einfluss des Alters auf das Knochenangebot wurde mit dem Mann-Whitney-U-Test überprüft. Dazu wurden die Patienten in eine jüngere Altersgruppe (12 – 15 Jahre) und eine ältere Altersgruppe (16 – 30 Jahre) aufgeteilt. Jede Gruppe bestand aus insgesamt 70 Patienten. Jüngere Patienten wiesen mit 4,12 mm Knochenangebot im Median ein größeres Knochenangebot

auf als ältere Patienten, die im Median nur einem Knochenangebot von 2,94 mm boten (siehe Abb. 19).

Die Hypothese „Das Knochenangebot bei älteren Patienten (16 - 30 Jahre) ist größer als das Knochenangebot bei jüngeren Patienten (12 - 15 Jahre)“ konnte somit verworfen werden. Der Unterschied zwischen den Altersgruppen war hoch signifikant ($p < 0.001$).

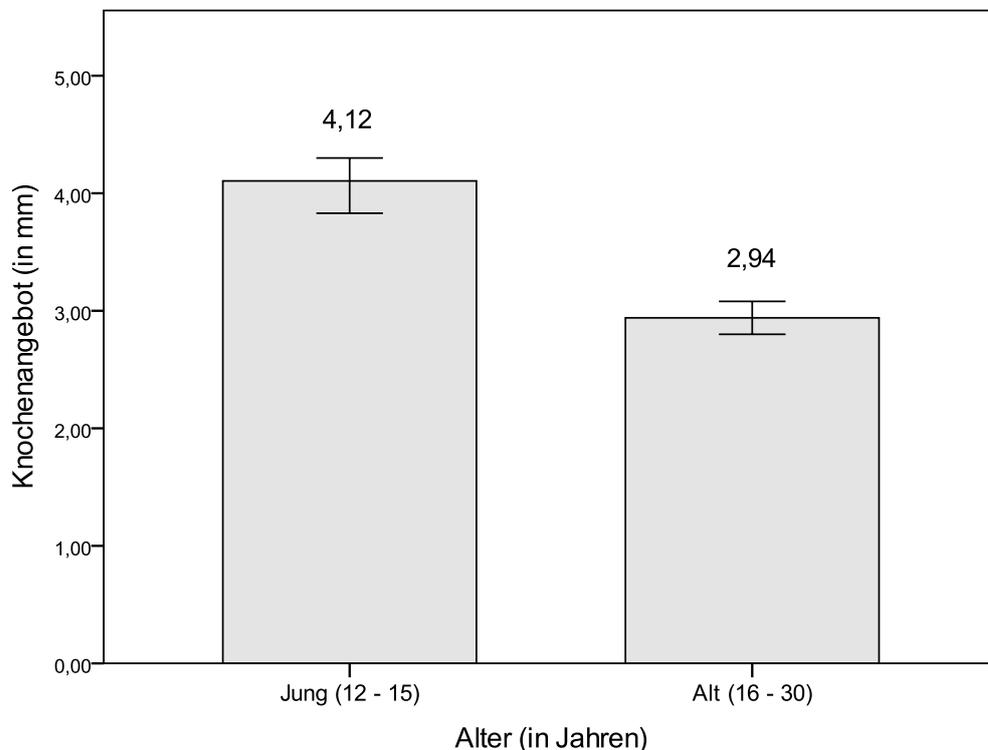


Abb. 19: Balkendiagramm zur Darstellung des Knochenangebots bei verschiedenen Altersgruppen (12 – 15 Jahre und 16 – 30 Jahre).
Junge Patienten boten mehr Knochenangebot als ältere Patienten.

Der Einfluss der Altersgruppen auf das Knochenangebot wurde ebenfalls an jedem einzelnen Zahn untersucht. Die jüngeren Patienten boten mehr Knochen als die älteren Patienten (siehe Abb. 20).

Für die zweiten Prämolaren (15, 25) und die ersten Molaren (16, 26) war dieser Vergleich für jede der Entfernungen zur palatinalen Kronenspitze (mit Ausnahme der Entfernung 23 mm bei Zahn 25) statistisch signifikant.

Tab. 14 stellt die statistischen Signifikanzwerte sowie die Richtung der Ergebnisse dar.

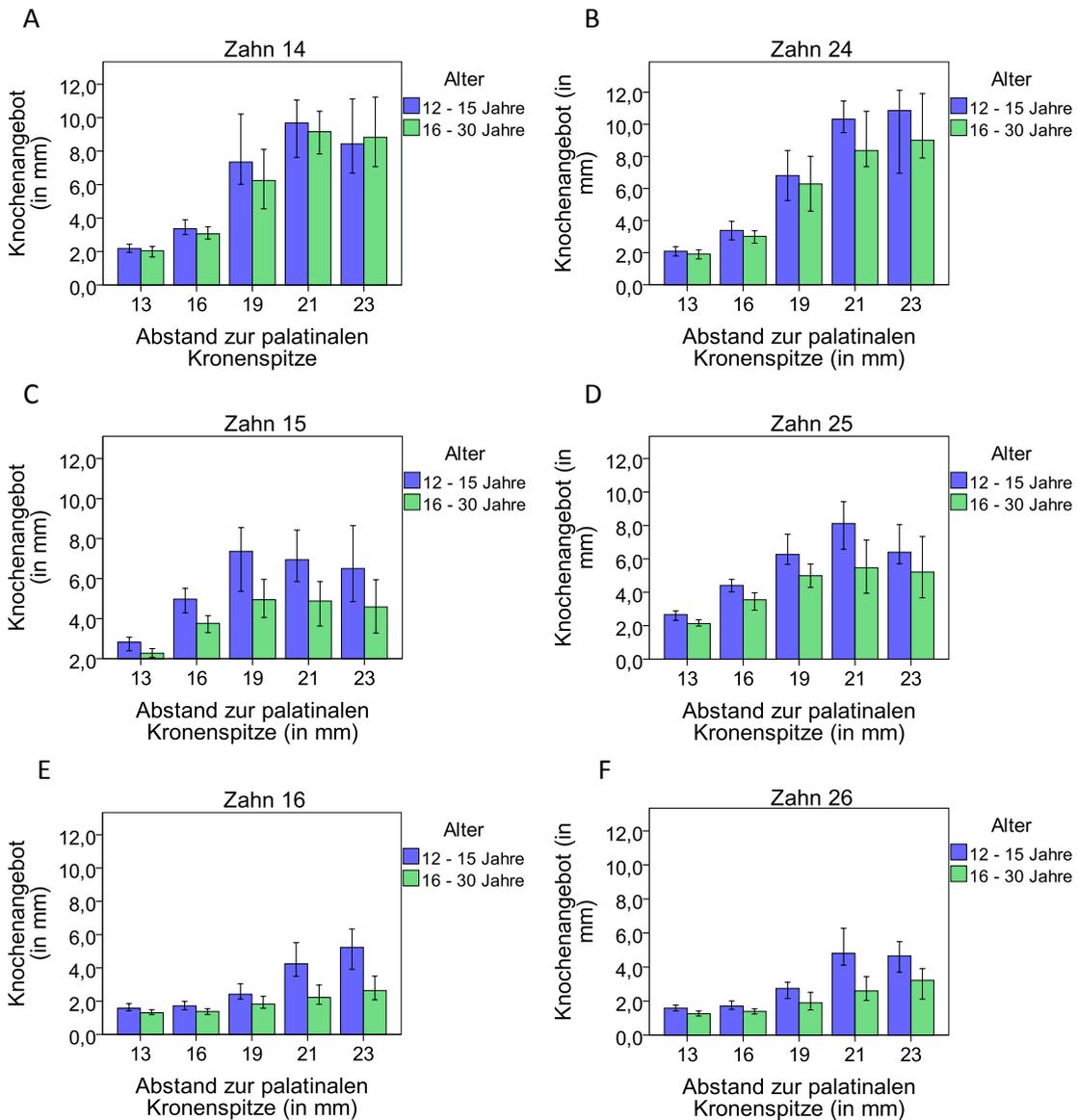


Abb. 20: Balkendiagramme zur Darstellung des Knochenangebots in Abhängigkeit vom Alter für die Zähne 14 (A), 24 (B), 15 (C), 25 (D), 16 (E) und 26 (F). Die jungen Patienten wiesen an den Zähnen 15, 25, 16 und 26 ein statistisch signifikant größeres Knochenangebot auf.

Der Vergleich der Altersgruppen bei den ersten Prämolaren lieferte keine statistische Signifikanz. Abb. 20 A, Abb. 20 B und Tab. 15 zeigen aber, dass die Medianwerte des Knochenangebots auch an den ersten Prämolaren bei den jüngeren Patienten meist etwas höher waren als bei den älteren Patienten.

Tab. 14: Statistische Signifikanzwerte (p-Werte) aus dem Vergleich der jüngeren Patienten (J: 12 – 15 Jahre) und der älteren Patienten (A: 16 – 30 Jahre) für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26.

Das Knochenangebot der Zähne 15, 25, 16 und 26 war bei den jüngeren Patienten statistisch signifikant größer als bei den älteren Patienten (blau). Signifikante Ergebnisse sind gekennzeichnet: ** - $p < 0.001$, * - $p < 0.01$, ° $p < 0.05$

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
14	J = A, p = 0.366	J = A, p = 0.252	J = A, p = 0.058	J = A, p = 0.293	J = A, p = 0.965
24	J = A, p = 0.271	J = A, p = 0.623	J = A, p = 0.158	J = A, p = 0.076	J = A, p = 0.572
15	J > A, p = 0.010°	J > A, p < 0.001**	J > A, p = 0.003*	J > A, p = 0.004*	J > A, p = 0.016°
25	J > A, p = 0.001*	J > A, p = 0.005*	J > A, p = 0.012°	J > A, p = 0.003*	J = A, p = 0.149
16	J > A, p = 0.001*	J > A, p = 0.009*	J > A, p = 0.009*	J > A, p < 0.001**	J > A, p < 0.001**
26	J > A, p < 0.001**	J > A, p = 0.001*	J > A, p = 0.004*	J > A, p < 0.001**	J > A, p < 0.001**

Die Medianwerte des Knochenangebots für jüngere und ältere Patienten sind für die ersten Prämolaren in Tab. 15 dargestellt, für die zweiten Prämolaren in Tab. 16 und für die ersten Molaren in Tab. 17. Das Knochenangebot in der Nähe der palatinalen Kronenspitze (13 und 16 mm Entfernung) wies insgesamt einen kleineren Einfluss des Alters auf das Knochenangebot auf. Die Unterschiede lagen hier zwischen 0,29 mm und 1,23 mm. An dem von der Kronenspitze ausgehend weiter apikal gelegenen Knochenangebot (19, 21 und 23 mm Entfernung) lag der Unterschied hingegen zwischen 0,61 mm und 2,62 mm. Das Knochenangebot an dem rechten ersten Molaren (Zahn 16) wies diesen größten Unterschied von 2,62 mm auf.

Tab. 15: Medianwerte (\pm Standardabweichung) des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze, vom Alter und vom Geschlecht für die ersten Prämolaren (14 und 24).

Die Patienten wurden in vier Gruppen eingeteilt: (1) junge männliche Patienten (M 12 – 15 Jahre, hellblau), (2) ältere männliche Patienten (M 16 – 30 Jahre, dunkelblau), (3) junge weibliche Patienten (W 12 – 15 Jahre, hellgelb), (4) ältere weibliche Patienten (W 16 – 30 Jahre, dunkelgelb).

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
14 (M 12 – 15)	2,34 (\pm 1,68)	3,21 (\pm 2,14)	6,71 (\pm 4,60)	10,41 (\pm 5,16)	11,03 (\pm 5,23)
14 (M 16 – 30)	1,74 (\pm 2,2)	2,90 (\pm 2,10)	6,44 (\pm 3,70)	9,18 (\pm 4,67)	10,35 (\pm 5,22)
14 (W 12 – 15)	2,17 (\pm 0,91)	3,69 (\pm 2,38)	8,01 (\pm 4,17)	8,96 (\pm 4,46)	7,28 (\pm 4,50)
14 (W 16 – 30)	2,40 (\pm 0,87)	3,23 (\pm 2,68)	6,08 (\pm 3,74)	9,16 (\pm 4,45)	8,38 (\pm 5,14)
24 (M 12 – 15)	2,15 (\pm 1,52)	3,49 (\pm 2,94)	6,71 (\pm 4,80)	11,47 (\pm 3,95)	11,99 (\pm 5,24)
24 (M 16 – 30)	1,78 (\pm 0,86)	2,82 (\pm 2,83)	5,15 (\pm 4,08)	8,10 (\pm 5,17)	8,88 (\pm 4,88)
24 (W 12 – 15)	2,08 (\pm 1,15)	3,36 (\pm 2,32)	7,53 (\pm 4,34)	9,42 (\pm 4,57)	9,96 (\pm 4,51)
24 (W 16 – 30)	2,00 (\pm 1,32)	3,22 (\pm 2,43)	7,62 (\pm 3,55)	8,80 (\pm 4,31)	9,29 (\pm 5,39)

Tab. 16: Medianwerte (\pm Standardabweichung) des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze, vom Alter und vom Geschlecht für die zweiten Prämolaren (15 und 25).

Die Patienten wurden in vier Gruppen eingeteilt: (1) junge männliche Patienten (M 12 – 15 Jahre, hellblau), (2) ältere männliche Patienten (M 16 – 30 Jahre, dunkelblau), (3) junge weibliche Patienten (W 12 – 15 Jahre, hellgelb), (4) ältere weibliche Patienten (W 16 – 30 Jahre, dunkelgelb).

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
15 (M 12 – 15)	2,96 (\pm 1,55)	5,10 (\pm 2,43)	7,52 (\pm 5,41)	7,14 (\pm 4,99)	8,44 (\pm 7,35)
15 (M 16 – 30)	2,09 (\pm 0,79)	3,39 (\pm 1,44)	4,92 (\pm 3,76)	4,83 (\pm 4,51)	4,96 (\pm 4,20)
15 (W 12 – 15)	2,78 (\pm 1,04)	4,76 (\pm 3,95)	7,15 (\pm 3,92)	6,77 (\pm 4,12)	5,29 (\pm 3,56)
15 (W 16 – 30)	2,51 (\pm 0,75)	4,18 (\pm 2,30)	5,10 (\pm 3,43)	4,88 (\pm 3,78)	4,22 (\pm 4,37)
25 (M 12 – 15)	2,67 (\pm 1,28)	4,29 (\pm 1,31)	6,91 (\pm 3,52)	9,41 (\pm 5,13)	7,41 (\pm 4,93)
25 (M 16 – 30)	1,88 (\pm 0,74)	3,02 (\pm 1,63)	4,40 (\pm 3,39)	5,55 (\pm 3,84)	4,82 (\pm 4,55)
25 (W 12 – 15)	2,66 (\pm 1,19)	4,43 (\pm 3,64)	5,07 (\pm 3,61)	7,28 (\pm 3,91)	5,99 (\pm 3,29)
25 (W 16 – 30)	2,54 (\pm 0,69)	4,01 (\pm 1,77)	5,32 (\pm 4,07)	5,35 (\pm 4,60)	5,79 (\pm 4,98)

Tab. 17: Medianwerte (\pm Standardabweichung) des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze, vom Alter und vom Geschlecht für die ersten Molaren (16 und 26).

Die Patienten wurden in vier Gruppen eingeteilt: (1) junge männliche Patienten (M 12 – 15 Jahre, hellblau), (2) ältere männliche Patienten (M 16 – 30 Jahre, dunkelblau), (3) junge weibliche Patienten (W 12 – 15 Jahre, hellgelb), (4) ältere weibliche Patienten (W 16 – 30 Jahre, dunkelgelb).

Zahn	Abstand zur palatinalen Kronenspitze (in mm)				
	13 mm	16 mm	19 mm	21 mm	23 mm
16 (M 12 – 15)	1,84 (\pm 0,72)	1,54 (\pm 1,23)	2,39 (\pm 1,79)	4,43 (\pm 3,51)	3,34 (\pm 3,83)
16 (M 16 – 30)	1,31 (\pm 0,75)	1,45 (\pm 2,26)	2,07 (\pm 2,89)	1,96 (\pm 2,20)	2,02 (\pm 2,65)
16 (W 12 – 15)	1,53 (\pm 0,52)	1,81 (\pm 0,82)	2,45 (\pm 3,36)	4,14 (\pm 2,66)	5,13 (\pm 2,91)
16 (W 16 – 30)	1,27 (\pm 0,67)	1,26 (\pm 0,69)	1,58 (\pm 1,79)	2,71 (\pm 3,47)	3,18 (\pm 2,20)
26 (M 12 – 15)	1,62 (\pm 0,66)	1,85 (\pm 1,50)	2,73 (\pm 1,87)	6,33 (\pm 2,98)	4,26 (\pm 4,13)
26 (M 16 – 30)	1,27 (\pm 0,44)	1,45 (\pm 0,52)	1,65 (\pm 2,54)	2,19 (\pm 3,59)	2,25 (\pm 2,62)
26 (W 12 – 15)	1,52 (\pm 0,64)	1,67 (\pm 1,08)	2,76 (\pm 2,29)	4,61 (\pm 2,16)	4,69 (\pm 2,70)
26 (W 16 – 30)	1,22 (\pm 0,64)	1,32 (\pm 1,49)	2,39 (\pm 3,35)	3,56 (\pm 5,02)	3,86 (\pm 3,53)

5. Diskussion

5.1. Diskussion der Methode

Für die Messungen wurde diejenige Vertikalebene zu Grunde gelegt, bei welcher die Wurzelspitze am weitesten kranial lag und der Apex dementsprechend zu sehen war. In dieser Ebene wurde nun der am weitesten kaudal gelegene Punkt des Zahnes, also die palatinale Kronenspitze, als Referenzpunkt gewählt. Von diesem Punkt aus wurden 5 verschiedene Entfernungen gemessen. Ein rein klinischer ermittelter Referenzpunkt wäre wünschenswert gewesen, um die gemessenen Werte für den behandelnden Arzt besser zugänglich zu machen. Referenzpunkte, die nur röntgenologisch sichtbar sind, können nicht gut in die Mundhöhle übertragen werden und zu falschen Insertionsorten führen (Crismani et al. 2005) und so zu Verletzungen von anatomischen Strukturen. Eine Alternative wäre die von Fayed et al. 2010 genutzte Schmelz-Zement-Grenze gewesen. Diese ist jedoch klinisch schwerer aufzufinden und röntgenologisch nicht so gut zu erkennen wie die palatinale Kronenspitze. Der in dieser Studie über den Apex ermittelte Referenzpunkt garantiert, dass die gesamte Wurzel auf dem Vertikalschnitt zu sehen ist. Es wurde ein Kompromiss gewählt, indem ein klinischer Referenzpunkt für die Messungen genommen wurde, der jedoch radiologisch mitbestimmt wurde und klinisch so nicht immer identisch war.

Die Messungen wurden an weiter apikal gelegenen Regionen getätigt, als in den Studien in denen Knochen interdental vermessen wurde (Fayed et al. 2010, Poggio et al. 2006). Der Grund hierfür liegt darin, dass auch herausgefunden werden sollte, ab welcher Höhe Mini-Pins inseriert werden können. Somit war nicht nur der Knochen auf Höhe der Wurzeln von Interesse.

5.2. Diskussion der Hypothesen

5.2.1. Knochenangebot in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze

Aus den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass das Knochenangebot von koronal nach apikal stetig zunimmt. Die Gründe hierfür liegen zum einen in der Anatomie des Gaumens und zum anderen in den Strukturen, die das Knochenangebot begrenzen. Zu den letzteren zählen die Zahnwurzeln, die Kieferhöhle und die Nasenhöhle (Abb. 21).

Die Zahnwurzeln, die bei den meisten Messungen die begrenzenden Strukturen darstellen, verjüngen sich nach apikal und enden in einer Spitze, dem Apex (Abb. 10). Somit divergiert die Zahnwurzel mit der palatinalen Oberfläche nach kranial und das palatinale Knochenangebot für das Platzieren von Mini-Pins nimmt zu. Die Zahnwurzel endete meist bei einer Entfernung von 19 - 21 mm zur palatinalen Kronenspitze.

Die begrenzenden Strukturen bildeten dann entweder die Kiefer- oder die Nasenhöhle. Dabei waren insbesondere die Form der Kieferhöhle und ihre Beziehung zu dem Fundus der Alveolen entscheidend und damit ausschlaggebend für die Menge an Knochen, die für das Setzen von Mini-Pins zur Verfügung stand. Die Knochenwanddicke zwischen dem Fundus der Alveolen und der Kieferhöhle steigt in mesialer Richtung entlang des Zahnbogens. So ist die Knochenwanddicke bei den ersten Molaren in 46 % der Fälle 0,2 - 1mm, in 38 % 1 - 3 mm und in 16 % > 3 mm. Bei den ersten Prämolaren ist die Knochenwanddicke 0,2 – 1 mm bei 6 %, 1 - 3mm bei 30 % und > 3 mm bei 64 %. Somit ist mehr Knochen an den Prämolaren als an den Molaren zu erwarten (Radojević et al. 1964).

Der zweite Grund für die Knochenzunahme von koronal nach apikal war die anatomische Form des Gaumens. Dieser wölbt sich entgegen den Wurzeln nach median und so steigt das Knochenangebot für die Insertion von Mini-Pins, die von palatinal eingebracht werden sollen.

Betrachtet man jeden Zahn für sich, steigt das Knochenangebot in Richtung apikal unterschiedlich stark an, jedoch zeigt sich an jedem Zahn die oben beschriebene Knochenzunahme.

Der erste Prämolare verzeichnet bei geringerer Entfernung zur Kronenspitze eine nur geringe Knochenzunahme. Hier sind die Wurzeln des Zahnes und die Krümmung des Gaumens für den Knochenunterschied verantwortlich. Bei einem Abstand von 19 mm zur palatinalen Kronenspitze ist das Knochenangebot schon deutlich höher. Bei dieser Messung war in einigen Fällen das Wurzelende bereits erreicht und es gab häufig keine begrenzende Struktur, sodass der komplette Alveolarknochen für das Setzen von Mini-Pins genutzt werden könnte. Der erneut hohe Anstieg zu dem Messpunkt bei 21 mm ist erstens durch die Krümmung der Gaumens zu erklären und zweitens dadurch, dass die Zahnwurzel als begrenzende Struktur seltener vorkam. Nur selten war bei den ersten Prämolaren die Kieferhöhle die begrenzende Struktur. Zum letzten Messpunkt blieb das Knochenangebot dann fast konstant. Die Gründe sind ähnlich, jedoch anstelle der Begrenzung durch die Zahnwurzel stellen häufiger die Kiefer- sowie die Nasenhöhle die limitierenden Strukturen dar.

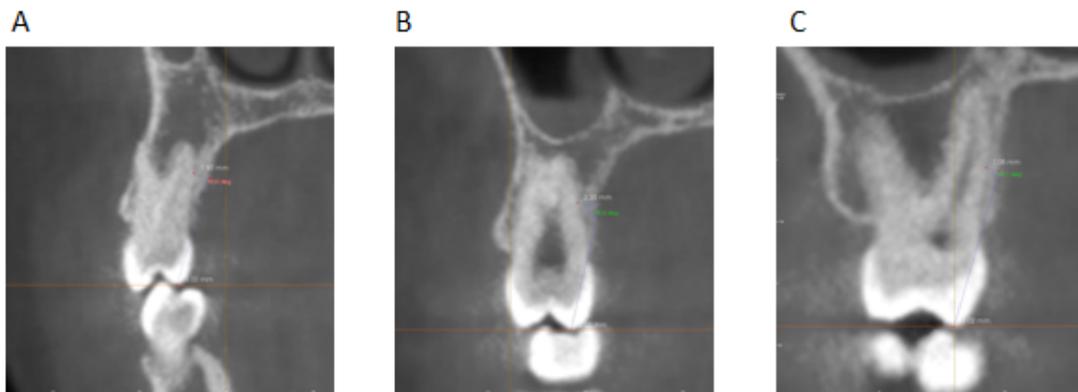


Abb. 21: Schnittbilder in der Frontalebene einer DVT Röntgenaufnahme.

Verdeutlicht werden die Unterschiede in der Kieferhöhle, der Nasenhöhle und der Wurzeln an den unterschiedlichen Zähnen.

A: Erster Prämolare: Gaumen und Wurzel divergieren mäßig, die Kieferhöhle ist sehr klein.

B: Zweiter Prämolare: Gaumen und Wurzel divergieren stärker, die Kieferhöhle befindet sich dichter an der Wurzelspitze.

C: Erster Molare: Gaumen und Wurzel divergieren wenig, die Kieferhöhle befindet sich direkt über der Wurzelspitze.

Bei den zweiten Prämolaren stieg das Knochenangebot zu Beginn an. Das lag sowohl an der Wölbung des Gaumens als auch an der Verschmälerung der Wurzel. Anschließend stieg das Knochenangebot weiter an. Auch hier liegt der Grund in der weiteren Krümmung des Gaumens und im Erreichen des Wurzel-

endes. Die Wurzel war entweder nur noch sehr schmal oder der Messpunkt lag bereits oberhalb dieser. Zum nächsten Messpunkt nahm das Knochenangebot weiter zu. Das Ende der Wurzel wurde hier wahrscheinlich schon häufig überschritten und außerdem war in vielen Fällen der Anfang der Kieferhöhle noch nicht erreicht. Beim letzten Messpunkt hingegen sinkt das Knochenangebot wieder leicht.

Bei den ersten Molaren schränkt die palatinale Wurzel das Knochenangebot ein. Diese ist sehr häufig nach palatinal gekippt und verläuft so mit dem Bogen des Gaumens (Abb. 21). Somit wirken sich die Verjüngung der Wurzel und die Gaumenkrümmung wesentlich geringer auf das Knochenangebot aus. Zu Beginn steigt das Knochenangebot nur minimal und in den Fällen, in denen die Wurzel überstiegen wird, wirkt die große Ausdehnung der Kieferhöhle limitierend.

5.2.2. Vergleich des Knochenangebots zwischen den ersten und zweiten Prämolaren im Oberkiefer

Das Knochenangebot ist an den weiter koronal gelegenen Regionen (13, 16 mm) an den zweiten Prämolaren größer. Bei den weiter apikal liegenden Messpunkten (19, 21, 23 mm) hingegen war das Knochenangebot bei den ersten Prämolaren größer.

Die Gründe hierfür liegen, wie schon in 5.2.1. beschrieben, in den begrenzenden Strukturen und an der anatomischen Form des Gaumens.

An den ersten beiden Messpunkten wurden die begrenzenden Strukturen ausschließlich durch die Wurzeln gebildet. Die ersten Prämolaren haben häufig (60 %) zwei Wurzeln – eine palatinal und eine bukkal (Lehmann and Hellwig 2005). Dadurch ist die Wurzel zu Beginn etwas breiter und läuft spitzer im Apex zusammen. Zusätzlich ist die Krümmung des Gaumens weiter posterior (am zweiten Prämolaren) zu Beginn flacher und somit koronal schon weiter fortgeschritten als in der Region des ersten Prämolaren. Dies erklärt das größere Knochenangebot an den zweiten Prämolaren.

An dem Messpunkt 19 mm bot der erste Prämolare etwas mehr Knochen. Das liegt unter anderem daran, dass sich der Gaumen nun auch stärker krümmt.

Den Hauptgrund stellt jedoch die Kieferhöhle dar. Die Knochenwanddicke zwischen Kieferhöhle und Alveolenfundus ist bei dem ersten Prämolaren deutlich größer (vgl. 5.3.1., Radojević et al. 1964). Der Messpunkt bei 19 mm Entfernung zur palatinalen Kronenspitze befand sich in einigen Fällen kranial der Wurzelspitze. Dadurch wurde die Kieferhöhle zur begrenzenden anatomischen Struktur. Da die Kieferhöhle so häufiger das Knochenangebot an den zweiten Prämolaren beeinträchtigt, gibt es im Median mehr Knochen an den ersten Prämolaren (Radojević et al. 1964).

Derselbe Grund gilt für die letzten beiden Messpunkte (21 und 23 mm). Das Knochenangebot steigt an den ersten Prämolaren weiter, da die Messpunkte häufiger kranial der Wurzel liegen. Bei den zweiten Prämolaren ist dies ebenfalls der Fall, jedoch beeinträchtigt der Kieferhöhle viel häufiger das zur Verfügung stehende Knochenangebot. Somit ist der gemessene Knochen im Median deutlich geringer.

5.2.3. Vergleich des Knochenangebots zwischen den zweiten Prämolaren und ersten Molaren im Oberkiefer

Das Knochenangebot ist an den zweiten Prämolaren an allen Messpunkten größer als an den ersten Molaren.

Die Gründe hierfür liegen an den koronalen Messungen (13, 16 mm) vor allem an der palatinalen Wurzel der ersten Molaren, die den begrenzenden Faktor darstellt. An den apikalen Messpunkten (19, 21, 23 mm) war die unterschiedliche Ausdehnung der Kieferhöhle entscheidend (vgl. 5.3.1.).

An den koronalen Messpunkten, an denen die Wurzeln und die Gaumenanatomie hauptsächlich für die Menge des Knochenangebots verantwortlich waren, spielen die Wurzeln den entscheidenden Faktor. Die palatinale Wurzel der ersten Molaren ist stark nach palatinal gekrümmt und läuft eher parallel zu der Gaumenwölbung. Dadurch ist das Knochenangebot in diesem Bereich geringer. Bei einigen Patienten lagen die Messpunkte in 19, 21 und 23 mm Entfernung zur Kronenspitze schon kranial der Wurzel. In diesen Fällen war der Unterschied wieder hauptsächlich in der Ausdehnung der Kieferhöhle begründet. Diese hatte ihre größte Ausdehnung bei den ersten Molaren des Oberkiefers

und schränkt so auch hier das Knochenangebot am stärksten ein. Das Knochenangebot ist aus diesem Grund auch deutlich geringer als bei den zweiten Prämolaren.

5.2.4. Vergleich des Knochenangebots zwischen rechter und linker Kieferhälfte

Es wurde keine statistisch signifikanter Unterschied zwischen dem Knochenangebot der rechten und linken Kieferhälfte gefunden. Dieses Ergebnis stimmt mit den Ergebnissen anderer Studien überein, die auch Knochen im Gaumen vermessen haben (Kang et al. 2007, Holm 2013, King et al. 2007, Gahleitner et al. 2004)

5.2.5. Vergleich des Knochenangebots zwischen den Geschlechtern

Das Knochenangebot unterschied sich nicht statistisch signifikant zwischen den männlichen und weiblichen Patienten. In der vorliegenden Arbeit gab es an 3 von 30 Koordinaten einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen dem Knochenangebot der weiblichen und männlichen Patienten. An zwei dieser Punkte boten die weiblichen und an einem die männlichen Patienten mehr Knochen. Da es sich bei diesen drei Werten vermutlich um Ausreißer handelt, wurden sie bei der Interpretation der Ergebnisse nicht in Betracht gezogen.

In der Literatur sind die Ergebnisse zu dieser Thematik nicht eindeutig. In zwei Studien wurden im Durchschnitt 1,26 mm bzw. 0,99 mm mehr Knochen bei den männlichen Probanden gefunden (Holm 2013, Taghizadeh 2010). Auch Kang et al. haben in ihrer Arbeit bei den meisten Messpunkten mehr Knochen bei den männlichen Probanden gefunden. Eine Ausnahme bildete der paramediane posteriore Bereich, bei dem die weiblichen Probanden entweder mehr Knochen boten oder es keinen Unterschied im Knochenangebot zwischen den Geschlechtern gab.

Mit dieser Arbeit übereinstimmend sind die Ergebnisse vieler anderer Studien, die keinen signifikanten Unterschied zwischen den Geschlechtern feststellen konnten (Gracco et al. 2008, Gracco et al. 2006, Gracco et al. 2007, Kyung 2004).

Gründe für diese Unstimmigkeiten könnten in den unterschiedlichen Vorgehensweisen bei den Messungen liegen. Außerdem wurde in allen Studien ein sehr großer interindividueller Unterschied im Knochenangebot gefunden. Aus diesem Grund ist insbesondere auch die Wahl der Probandengruppe entscheidend.

5.2.6. Vergleich des Knochenangebots zwischen verschiedenen Altersgruppen

Die Probanden wurden in eine Gruppe von 12 - 15 Jahren und eine Gruppe von 15 - 30 Jahre aufgeteilt. Diese Gruppen wurden so gewählt, da mit 15 Jahren in der Regel das Wurzelwachstum der Zähne bis zum zweiten Molaren abgeschlossen ist. Das Wachstum des Alveolarknochens ist eng an das Wachstum der Zähne und Zahnwurzeln gebunden (Schroeder 2000).

Die Ergebnisse zeigen, dass jüngere Patienten mehr Knochenangebot an den gemessenen Koordinaten aufweisen als ältere Patienten. Dies wurde für die Koordinaten aller ersten Molaren bestätigt, für die zweiten Prämolaren an allen Koordinaten bis auf den Messpunkt am Zahn 25 auf der Höhe von 23 mm. Bei den ersten Prämolaren konnte es zwar nicht signifikant bestätigt werden, der Median war bei den jungen Probanden allerdings immer größer als bei den älteren Patienten, mit Ausnahme des Zahnes 14 am Messpunkt von 23 mm.

Grundsätzlich ist es schwierig, diese Ergebnisse mit anderen Studien zu vergleichen, da in jeder Studie unterschiedliche Altersgruppen gebildet wurden. Die meisten Autoren (Bernhart et al. 2000, Gracco et al. 2008, Taghizadeh 2010) fanden keinen Unterschied zwischen verschiedenen Altersgruppen. Eine Studie fand gegensätzlich zu dieser Arbeit mehr Knochen bei den älteren Patienten. Eine Ausnahme bildeten der anteriore Bereich und die Medianebene, bei denen mehr Knochen in der jüngeren Altersgruppe gefunden wurde. Die Resultate wurden auf die Verschiebung des Messgitters bei älteren und jüngeren Patienten zurückgeführt. Da der Gaumen bei jüngeren Patienten in der Regel kleiner ist, wurde das Messgitter verschoben und befand sich damit nicht auf der gleichen Höhe wie bei den älteren Patienten (Holm 2013).

Ein weiterer Grund könnte sein, dass die Kieferhöhle erst mit Abschluss der zweiten Dentition (Solar et al. 1998) langsam seine endgültige Größe erreicht

und das Wachstum des Sinus erst im Erwachsenenalter mit ca. 25 Jahren abgeschlossen ist (Lippert 2003). Das würde allerdings nur den Unterschied bei den Messpunkten 19, 21 und 23 mm erklären. Die Unterschiede bei den koral gelegenen Messpunkten (13, 16 mm) könnten damit erklärt werden, dass die Messpunkte bei den jüngeren Patienten schon weiter apikal liegen und dort mehr Knochen vorhanden ist.

5.2. Allgemeine Diskussion und Schlussfolgerung

In den letzten Jahren wurden Mini-Pins und Gaumenimplantate immer häufiger eingesetzt um eine optimale Verankerung zu erreichen. Gaumenimplantate werden in die Region um die Sutura palatina und im anterioren Gaumen eingesetzt. Im Gegensatz hierzu werden Mini-Pins im gesamten Oberkiefer platziert. Das dafür zur Verfügung stehende Knochenangebot wurde bereits in vielen Studien gemessen. Wie in Abschnitt 1.2. bereits beschrieben waren die Ergebnisse sehr unterschiedlich. In Tabelle Tab. 18 sind die Ergebnisse einiger Studien (Kang et al. 2007, King et al. 2007, Baumgaertel 2009a, Taghizadeh 2010, Holm 2013, Lai et al. 2010, Gracco et al. 2008, Bernhart et al. 2000) zusammengefasst. Die gelben Markierungen weisen auf Stellen hin, bei denen im Median mehr als 5 mm Knochen gemessen wurde. Für die Insertion von Mini-Pins reichen 5 mm Knochen aus (Winsauer et al. 2012). Die rot markierten Zahlen markieren Orte mit weniger als 5 mm Knochenangebot und an den grün markierten Stellen wurde im Median über 7 mm Knochen gemessen.

Es ist zu erkennen, dass im vorderen Bereich ab dem Foramen incisivum (FI) bis ca. 8 mm posterior und in medio-lateraler Richtung von 1 - 9 mm im Median ausreichend Knochen zur Verfügung steht. Außerdem wurde 1 mm lateral der Sutura palatina und 3 - 24 mm in antero-posteriorer Richtung 5 - 6,5 mm Knochen gemessen. Allerdings wurde in dieser Region nur von einer einzigen Studien Knochen vermessen (Kang et al. 2007).

Aus der Tabelle lässt sich ebenfalls entnehmen, dass an den gleichen Koordinaten in unterschiedlichen Studien teilweise sehr unterschiedliche Mengen an Knochen gemessen wurden. Eine der deutlichsten Abweichungen findet man an der Koordinate 9 mm in medio-lateraler Richtung von der Sutura palatina

Tab. 18: Knochendicke im Bereich des Gaumens.

Die Messungen stammen von verschiedenen Autoren: Be – Bernhart et al. (Bernhart et al. 2000), H – Holm (Holm 2013), K – Kang (Kang et al. 2007), B – Baumgaertel (Baumgaertel 2009a), G – Gracco (Gracco et al. 2008), L – Lai (Lai et al. 2010), T – Taghizadeh (Taghizadeh 2010), Ki – King (King et al. 2007). Die X-Achse gibt die Entfernung vom Foramen incisivum in posteriorer Richtung in mm an. Die Y-Achse gibt die Entfernung von der Sutura palatina in lateraler Richtung in mm an. Die rote Markierung steht für Stellen, bei denen in allen Studien im Median < 5 mm Knochenangebot gemessen wurde. War das Knochenangebot im Median zwischen 5 und 7 mm wurde der Bereich gelb gekennzeichnet und die grünen Markierungen weisen auf Stellen mit einem Knochenangebot > 7 mm hin.

Abkürzungen: AP – Antero-posteriore Distanz vom Foramen incisivum, ML – Medio-laterale Distanz von der Sutura palatina

Distanz AP	Autoren																															
	Be	H	K	B	H	Be	G	L	K	T	Ki	B	H	K	Be	G	L	B	T	Ki	H	K	B	H	Be	L	K	T	Ki	B	L	
	Distanz ML (in mm)																															
	0	0	1	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	5	6	6	6	6	6	6	6	7	8	8	9	9	9	9	9	10	12	
0		1,3			9,5							7,6									6,9			5,2								
2		2,6			10,3							9,9									8,9			7,9								
3	2,9		5,6	8,7		7,9		5,8	9,2	6,3		8,0		9,8	7,1		8,7	7,5	8,4			10,1	8,2		3,9	6,7	11,1	8,9			3,9	
4		3,8			9,2		8,7				7,0		9,8			10,3				4,8	9,6			10,0						2,1		
6	5,1	4,8	6,5		8,8	5,8		6,4	7,2	4,2			7,8	7,2	7,1		7,9		4,2		8,8	7,2		9,8	4,5	8,4	7,9	5,8			5,7	
8		5,0			5,6		5,6				4,8		5,8			6,2				5,2	6,5			7,8					4,8			
9	4,7		6,0	4,3		4,4		5,8	5,5	3,2		3,9		5,3	4,3		5,8	3,7	2,9			5,0	4,1		4,0	6,7	7,2	4,0		5,3	5,1	
10		4,8			4,6								4,3								4,6			5,6								
12	4,6		5,6			3,4		4,3	4,7	2,8	3,5			4,2	3,2		3,8		2,3	3,8			3,8			3,2	4,2	4,1	3,0	5,3		4,8
15			5,6						4,2					3,5									3,2					3,3				
16						3,6										3,6																
18			5,8	2,7					4,3			2,0		3,3				1,6					2,8	1,6				2,9				
21			6,3						4,2					3,1									2,6					2,5				
24			6,5			3,3		4,1						2,6		2,9							2,3					2,1				

und 3 mm in posteriorer Richtung des FI. Hier betrug das vertikale Knochenangebot im Median zwischen 3,9 und 11,1 mm. Ein Grund hierfür ist sicher, dass nicht in allen Studien die gleiche Vorgehensweise bei den Messungen gewählt wurde. Die gewählte Messmethodik hat einen wichtigen Anteil an dem Messergebnis (Taghizadeh 2010). Die beiden in dieser Studie gewählten Messmethoden führten zu Ergebnissen, die hohe intraindividuelle Schwankungen aufwiesen (zwischen 0,18 und 3,69 mm). Dies zeigt den großen Einfluss der Messmethode auf das Ergebnis.

Ein weiterer Grund ist die starke interindividuelle Abweichung in dem Angebot an Knochen. Diese schlägt sich in der Standardabweichung (SD) nieder. In den Studien, die in Tab. 18 verwendet wurden, lag die SD zwischen 0,9 und 5,6 mm. Die SD ist besonders an den Messpunkten, an denen das Knochenangebot im Median über 5 mm lag, sehr groß. An den Messpunkten, an denen ein geringes Knochenangebot gefunden wurde, war auch die SD kleiner.

King et al. 2007 gaben Prozentwerte für die Stellen an, an denen mindestens 4 mm Knochen vorhanden waren. Diese lagen zwischen 11,6 und 92,0 %. Dabei ist zu beachten, dass es nur 2 Koordinaten gab, an denen über 80 % der Patienten ausreichend Knochen aufwiesen. Außerdem gab es Koordinaten, an denen zwar der Median über 5 mm lag, jedoch lediglich 71 % der Probanden mindestens 4 mm vertikalen Knochen boten. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von anderen Studien gefunden (Lai et al. 2010).

Mehr Knochen und geringere Standardabweichungen wurden in Studien gefunden, die das bucco-linguale Knochenangebot zwischen den Molaren, Prämolaren und Eckzähnen (Poggio et al. 2006, Fayed et al. 2010) sowie zwischen den Eckzähnen und seitlichen Schneidzähnen (Carano et al. 2004, Fayed et al. 2010) gemessen haben. An etwa dreiviertel der Messstellen wurden über 9 mm Knochenangebot gefunden (Fayed et al. 2010, Poggio et al. 2006). Es wurden keine Angaben über den Anteil der Patienten mit einem Knochenangebot über 5 mm gemacht. An einigen Messpunkten müsste das Knochenangebot bei nahezu jedem Patienten ausreichend sein, da der komplette Alveolarknochen zur Verfügung stand. Allerdings könnte in diesen Fällen das Knochenangebot in mesio-distaler Richtung limitierend sein, da 1 mm Abstand zu den Wurzeln eingehalten werden sollte (Poggio et al. 2006).

Tab. 19: Medianwerte, Standardabweichungen und der Anteil der Patienten mit einem Knochenangebot ≥ 5 mm in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26.

Zahn	Abstände zur palatinalen Kronenspitze (in mm)	Median (in mm)	Standardabweichung (in mm)	Prozent (in %)
14	13	2,13	1,52	2,1
	16	3,23	2,33	17,9
	19	6,73 ^a	4,09	63,6
	21	9,39 ^a	4,78	77,9
	23	8,57 ^a	5,02	75,0
24	13	1,98	1,24	2,1
	16	3,19	2,62	19,3
	19	6,50 ^a	4,24	60,7
	21	9,97 ^a	4,65	80,0
	23	9,95 ^a	5,02	79,3
15	13	2,50	1,13	5,7
	16	4,28	2,77	33,6
	19	5,76 ^a	4,31	59,3
	21	5,85 ^a	4,48	58,6
	23	5,29 ^a	5,23	53,6
25	13	2,35	1,07	3,6
	16	3,98	2,35	25,0
	19	5,68 ^a	3,73	59,3
	21	6,87 ^a	4,56	67,9
	23	6,20 ^a	4,52	60,7
16	13	1,46	0,65	0,0
	16	1,52	1,41	1,4
	19	2,23	2,57	21,1
	21	3,36	3,15	32,9
	23	3,62	3,16	37,9
26	13	1,42	0,63	0,0
	16	1,53	1,23	2,1
	19	2,33	2,56	13,6
	21	3,89	3,66	35,7
	23	3,86	3,43	37,1

Aus diesem Grund müssen selbst bei kleinen Pins mit einem Durchmesser von 1,2 mm relativ große Abstände von über 3,1 mm zwischen den Wurzeln eingehalten werden. Für die interdentalen Regionen wurden deshalb Mini-Pins mit kleinem Durchmesser (1,2 - 1,5 mm) empfohlen (Fayed et al. 2010, Poggio et al. 2006).

Bei Einhalten dieses Sicherheitsabstandes von $> 3,1$ mm bieten die Regionen zwischen den zweiten Molaren, ersten Molaren, zweiten Prämolaren, ersten Prämolaren, Eckzähnen und seitlichen Schneidezähnen von palatinal eine Möglichkeit für die Insertion von Mini-Pins (Fayed et al. 2010, Poggio et al. 2006).

Die Ergebnisse dieser Arbeit vervollständigen die Knochenmessungen im seitlichen Gaumen, da nicht zwischen den Wurzeln, sondern auf Ebene der Wurzeln gemessen wurde. Es wurden einige Regionen gefunden, an denen das Knochenangebot im Median über 5 mm lag (Tab. 19, in Abb. 22B gelb markiert). Die dazugehörigen SD und die Prozentzahlen zeigen aber, dass der Anteil der Patienten, der wirklich über ein Knochenangebot von mindestens 5 mm verfügte, unzureichend war (59,3-80,0 %).

Aufgrund der beschriebenen Ergebnisse aus der Literatur und der Ergebnisse dieser Studie lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass es bis zum heutigen Zeitpunkt im Gaumen keine sicheren Regionen für die Insertion von Mini-Pins gibt. Der Bereich zwischen den Wurzeln scheint eine Möglichkeit zu bieten, bedarf aber noch weiterer Studien bzw. weiterer Auswertung der vorliegenden Ergebnisse.

Abb. 22A zeigt eine Gaumenskizze, in der alle Studien, die in Tab. 18 verwendet wurden, einbezogen wurden. Alle Studien wurden gleich gewichtet und für jede Koordinate wurde ein Mittelwert aus den Ergebnissen der einzelnen Studien für diese Koordinate gebildet. Alle Werte unter 5 mm wurden rot markiert. In diesen Regionen ist es eher unwahrscheinlich, genug Knochen für die Insertion von Mini-Pins und Implantaten vorzufinden. Die Werte von 5,1 bis 7,0 mm wurden gelb markiert. Hier war im Median ausreichend Knochen vorhanden. Auf Grund der großen interindividuellen Unterschiede aber war auch hier kein sicherer Ort gegeben. Der grüne Bereich markiert alle Messwerte ab 7,1 mm. Obwohl in diesem Bereich davon ausgegangen werden kann, dass viele Patien-

ten ausreichend Knochen bieten werden, wird dieser Anteil an Patienten wahrscheinlich noch immer zu gering sein.

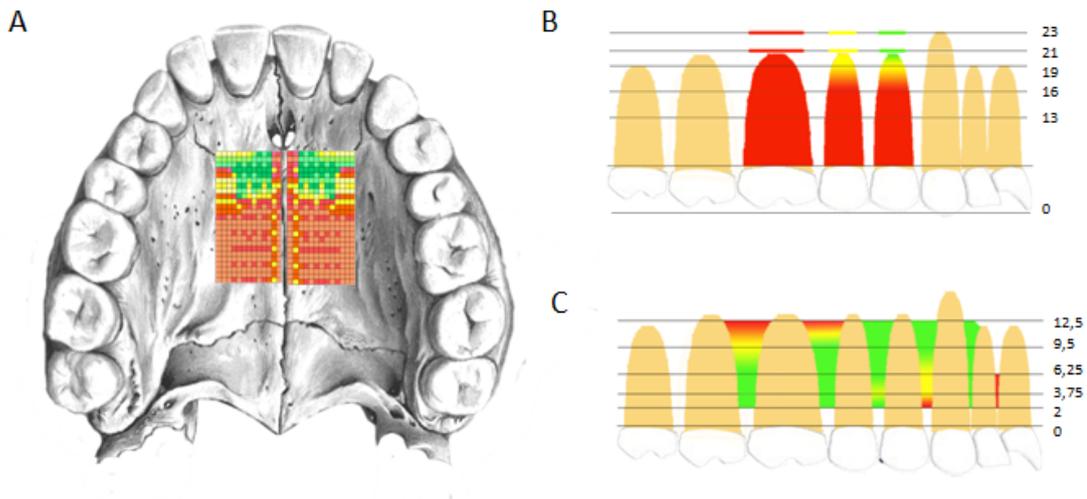


Abb. 22: Knochenangebot im Gaumen und Alveolarknochen
 Rot: Knochenangebot unter 5 mm, Gelb: Knochenangebot von 5,1 - 7 mm, Grün: Knochenangebot größer als 7 mm.
 A: Schematische Darstellung des Knochenangebots im Gaumen distal des Foramen incisivum und um die Sutura palatina. Die farblichen Kodierungen entsprechen den Mittelwerten aus den Ergebnissen der Studien aus Tab. 18.
 B: Schematische Darstellung des Knochenangebots auf Ebene der Wurzeln. Die farblichen Kodierungen entsprechen den Ergebnissen dieser Studie.
 C: Schematische Darstellung des interradikulären Knochenangebots. Die farblichen Kodierungen entsprechen dem Mittelwert der Ergebnisse von drei Studien (Fayed et al. 2010, Carano et al. 2004, Poggio et al. 2006).

Diese Skizze unterscheidet sich unterschiedlich stark von den Abbildungen anderer Autoren (Winsauer et al. 2012, Ludwig et al. 2011 und Kang et al. 2007) (vgl. 1.2.), obwohl teilweise ähnliche Studien zur Analyse herangezogen wurden.

Die Skizze Abb. 22C fasst Studien über das interdendale Knochenangebot (Carano et al. 2004, Poggio et al. 2006, Fayed et al. 2010) zusammen. Die farblichen Markierungen wurden in der gleichen Weise gewählt, wie für die Abb. 22A oben beschrieben. Zusätzlich zu dem bukkolingualen Knochenangebot wurde das mesio-distale Knochenangebot mit einbezogen. Alle Messungen unter 2,9 mm wurden rot markiert, unter 3,1 mm gelb und über 3,1 mm grün. Sollten die Farbskalen für die unterschiedlichen Studien nicht übereinstimmen, wurde diejenige gewählt, die das Knochenangebot als geringer markiert. Unterschieden sich die einzelnen Punkte in ihrer Farbskalierung, so wurde ein Mit-

telwert angenommen. Da den Studien teilweise unterschiedliche Referenzpunkte zu Grunde lagen (Schmelz-Zement-Grenze oder Alveolarknochenkamm) wurden einige Messwerte angepasst. So wurde die Schmelz-Zement-Grenze als Referenzlinie bei einer Position in 1,5 mm Entfernung von dem Alveolarknochenkamm festgelegt. Außerdem wurden anschließend die Referenzlinien 3,5 mm und 4 mm zu 3,75 mm und die Referenzlinien 6 mm und 6,5 mm zu 6,25 mm zusammengefasst. Somit lagen die die Referenzlinien bei 2 mm, 3,75 mm, 6,25 mm, 9,5 mm und 12,5 mm von der Schmelz-Zement-Grenze. Die Skizze zeigt, dass viele Orte vorhanden sind, an denen Mini-Pins inseriert werden können.

Abb. 22B umfasst die Ergebnisse dieser Arbeit. Auch hier ist die Farbkodierung wie in Abb. 22A gewählt worden. Der größte Teil ist rot markiert und es gibt lediglich einen kleinen Bereich, der gelb oder sogar grün markiert werden konnte.

Bei der Betrachtung der Skizzen bleibt zu beachten, dass lediglich Regionen im Gaumen markiert wurden, an denen es wahrscheinlich oder eben weniger wahrscheinlich ist, einen Mini-Pin platzieren zu können. Schlussendlich sind sich fast alle genannten Autoren einig, dass die interindividuellen Unterschiede zu groß sind, um sichere Orte für Mini-Pins anhand der genannten Studien benennen zu können. Es wurde lediglich ein Überblick über das zu erwartende Knochenangebot an unterschiedlichen Regionen im Gaumen geschaffen.

So kann man zu dem Schluss kommen, dass ein Röntgenbild unumgänglich ist um Mini-Pins oder Gaumenimplantate zu platzieren. Bei der Implantation in den Alveolarknochen (Abb. 22B und C) ist ein 3 Dimensionales Röntgenbild nötig, da es keine anderen Röntgenbilder gibt, die diesen Bereich zeigen.

Es wird in der Literatur kontrovers diskutiert, welche bildgebenden Verfahren in dem medianen und paramedianen Gaumen für die Implantatplanung verwendet werden sollten (vgl. 1.3). Einige Autoren (Jung et al. 2011, Wehrbein et al. 1999b) sind der Meinung, dass ein FRS das Knochenangebot ausreichend genau darstellt, da in ihren FRS-Studien eine Perforation in die Nasenhöhle mittels Parodontalsonde ausgeschlossen wurde. Andere Studien belegen jedoch, dass intraoperative Proben mittels Parodontalsonden häufig zu falsch negativen Ergebnissen führen. In diesen Studien zeigten die Proben keine Perforation, die Histologie bewies jedoch das Gegenteil (Crismani et al. 2005).

Außerdem führen post-operative FRS oft zu falsch positiven Ergebnissen, das heißt, in diesen Fällen ließ das FRS eine Perforation vermuten, die jedoch histologisch widerlegt wurde. Zusätzlich kam es zu falsch negativen Ergebnissen (Crismani et al. 2005).

Auf Grund der höheren Genauigkeit fordern andere Autoren (Bernhart et al. 2000, Holm 2013) 3D-Röntgenbilder.

Auch diese Studie kommt zu dem Schluss, dass ein 3D Röntgenbild nötig ist, bevor ein Mini-Pin gefahrlos gesetzt werden kann.

6. Literaturverzeichnis

Angle, E. H. (1907) Treatment of malocclusion of teeth.

Arai, Y., Tammissalo, E., Iwai, K., Hashimoto, K. and Shinoda, K. (1999) Development of a compact computed tomographic apparatus for dental use. *Dento maxillo facial radiology* 28(4): 245-248.

Asscherickx, K., Hanssens, J. L., Wehrbein, H. and Sabzevar, M. M. (2005) Orthodontic anchorage implants inserted in the median palatal suture and normal transverse maxillary growth in growing dogs: a biometric and radiographic study. *The Angle orthodontist* 75(5): 826-831.

Aumüller, G. (2007) Kopf - Schädel und mimische Muskulatur. Duale Reihe - Anatomie. A. Bob and K. Bob. Stuttgart, Georg Thieme Verlag: 942-976.

Baumgaertel, S. (2009a) Quantitative investigation of palatal bone depth and cortical bone thickness for mini-implant placement in adults. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 136(1): 104-108.

Baumgaertel, S. (2009b) State of the art of miniscrew implants: an interview with Sebastian Baumgaertel. Interviewed by Robert P. Scholz. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 136(2): 277-281.

Baumgaertel, S. (2011) Cortical bone thickness and bone depth of the posterior palatal alveolar process for mini-implant insertion in adults. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 140(6): 806-811.

Baumgaertel, S., Razavi, M. R. and Hans, M. G. (2008) Mini-implant anchorage for the orthodontic practitioner. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 133(4): 621-627.

Bernhart, T., Vollgruber, A., Gahleitner, A., Dortbudak, O. and Haas, R. (2000) Alternative to the median region of the palate for placement of an orthodontic implant. *Clinical oral implants research* 11(6): 595-601.

Branemark, P.-I. (1969) Osseointegration and its experimental background. *50(3): 12.*

Bumann, A. (2006) Vielzahl der Möglichkeiten von Minischrauben noch unentdeckt.

Bumann, A. (2008). Die digitale Volumentomographie - klinisch unterschätzt und wirtschaftlich überschätzt? Zahnheilkunde, Management, Kultur. **24**.

Carano, A., Velo, S., Incorvati, C. and Poggio, P. (2004) Clinical applications of the Mini-Screw-Anchorage-System (M.A.S.) in the maxillary alveolar bone. (1723-7785 (Print)).

Creekmore, T. D. and Eklund, M. K. (1983) The possibility of skeletal anchorage. Journal of clinical orthodontics : JCO 17(4): 266-269.

Crismani, A. G., Bernhart, T., Tangl, S., Bantleon, H. P. and Watzek, G. (2005) Nasal cavity perforation by palatal implants: false-positive records on the lateral cephalogram. The International journal of oral & maxillofacial implants 20(2): 267-273.

Dahlberg, G. (1940) Statistical methods for medical and biological students.

Deguchi, T., Nasu, M., Murakami, K., Yabuuchi, T., Kamioka, H. and Takano-Yamamoto, T. (2006) Quantitative evaluation of cortical bone thickness with computed tomographic scanning for orthodontic implants. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics 129(6): 721 e727-712.

Diedrich, P. (1993) verschiedene orthodontische Verankerungssysteme. Fortschritte der Kieferorthopädie 54(4): 156-171.

Diedrich, P. (2000). Kieferorthopädie 1. München/Jena, Urban&Fischer - Elsevier GmbH.

Düker, J. and Schulze, D. (2003) Bildgebende Verfahren. Einführung in die zahnärztliche Chirurgie und Implantologie. R. Gutwald, N. C. Gellrich and R. Schmelzeisen. München, Elsevier: 157-190.

Farnsworth, D., Rossouw, P. E., Ceen, R. F. and Buschang, P. H. (2011) Cortical bone thickness at common miniscrew implant placement sites. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics 139(4): 495-503.

Fayed, M. M., Pazera, P. and Katsaros, C. (2010) Optimal sites for orthodontic mini-implant placement assessed by cone beam computed tomography. The Angle orthodontist 80(5): 939-951.

Feldmann, I. and Bondemark, L. (2008) Anchorage capacity of osseointegrated and conventional anchorage systems: a randomized controlled trial. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the

American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics 133(3): 339 e319-328.

Fenner, M., Vairaktaris, E., Fischer, K., Schlegel, K. A., Neukam, F. W. and Nkenke, E. (2009) Influence of residual alveolar bone height on osseointegration of implants in the maxilla: a pilot study. *Clinical oral implants research* 20(6): 555-559.

Flohr, T. (2011) Aufbau, Physik und Bildgeneration in der Computertomographie - Messprinzip, Bildrekonstruktion, Gerätetypen und Aufnahmetechniken. *Wie funktioniert CT?* H. Alkadhi, S. Leschka, P. Stolzmann and H. Scheffel. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag GmbH: 4-13.

Gahleitner, A., Podesser, B., Schick, S., Watzek, G. and Imhof, H. (2004) Dental CT and orthodontic implants: imaging technique and assessment of available bone volume in the hard palate. *European journal of radiology* 51(3): 257-262.

Gainsforth, B., Higley, LB (1945) A study of orthodontic anchorage possibilities in basal bone. *31(17): 406.*

Geron, S., Shpack, N., Kandos, S., Davidovitch, M. and Vardimon, A. D. (2003) Anchorage loss--a multifactorial response. *The Angle orthodontist* 73(6): 730-737.

Gracco, A., Lombardo, L., Cozzani, M. and Siciliani, G. (2006) Quantitative evaluation with CBCT of palatal bone thickness in growing patients. (1723-7785 (Print)).

Gracco, A., Lombardo, L., Cozzani, M. and Siciliani, G. (2008) Quantitative cone-beam computed tomography evaluation of palatal bone thickness for orthodontic miniscrew placement. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 134(3): 361-369.

Gracco, A., Luca, L., Cozzani, M. and Siciliani, G. (2007) Assessment of palatal bone thickness in adults with cone beam computerised tomography. (0587-3908 (Print)).

Grüner, W. and Lietz, T. (2008). *tomas® handbuch insertion*, Dentaurum.

Han, S., Bayome, M., Lee, J., Lee, Y. J., Song, H. H. and 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.

Henriksen, B., Bavitz, B., Kelly, B. and Harn, S. D. (2003) Evaluation of bone thickness in the anterior hard palate relative to midsagittal orthodontic implants. *The International journal of oral & maxillofacial implants* 18(4): 578-581.

Hernandez, L. C., Montoto, G., Puente Rodriguez, M., Galban, L. and Martinez, V. (2008) 'Bone map' for a safe placement of miniscrews generated by computed tomography. *Clinical oral implants research* 19(6): 576-581.

Holm, M. (2013). Knochenangebot für kieferorthopädische Minischrauben im vorderen Gaumen (Bone thickness of the anterior palate for orthodontic miniscrews). Dr., Charite.

Homolka, P., Gahleitner, A., Kudler, H. and Nowotny, R. (2001) [A simple method for estimating effective dose in dental CT. Conversion factors and calculation examples for a clinical low dose protocol]. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Rontgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 173(6): 558-562.

Houston, W. J. (1983) The analysis of errors in orthodontic measurements. *American journal of orthodontics* 83(5): 382-390.

ICAT-Brochure. (2011). from <http://www.i-cat.com/assets/documents/i-CAT-brochure-5.11.-single-page-layout.pdf>.

Jäkel, O. and Karger, C. (2011) Grundlagen des Strahlenschutzes. Duale Reihe Radiologie. M. Reiser, F. P. Kuhn and J. Debus. Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG: 52-62.

Jong Suk Lee, D., MS, PhD, Jung Kook Kim, D., MS, PhD, Young-Chel Park, D., MS, PhD and Robert L Vanarsdall, J., DDS (2007). Applications of Orthodontic Mini-Implants. Chicago, Berlin, Tokyo, London, Paris, Milan, Barcelona, Istanbul, Sao Paulo, Mumbai, Moscow, Prague, and Warsaw, Quintessence Publishing Co, Inc.

Jung, B. A., Kunkel, M., Gollner, P., Liechti, T. and Wehrbein, H. (2009) Success rate of second-generation palatal implants. *The Angle orthodontist* 79(1): 85-90.

Jung, B. A., Wehrbein, H., Heuser, L. and Kunkel, M. (2011) Vertical palatal bone dimensions on lateral cephalometry and cone-beam computed tomography: implications for palatal implant placement. *Clinical oral implants research* 22(6): 664-668.

Jung, B. A., Wehrbein, H., Wagner, W. and Kunkel, M. (2012) Preoperative diagnostic for palatal implants: Is CT or CBCT necessary? *Clinical implant dentistry and related research* 14(3): 400-405.

Kang, S., Lee, S. J., Ahn, S. J., Heo, M. S. and Kim, T. W. (2007) Bone thickness of the palate for orthodontic mini-implant anchorage in adults. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 131(4 Suppl): S74-81.

Kellinger, Z. (2010). Mini-Implantate - Erfolgreiche Stabilisierung von Totalprothesen selbst im atrophierten Kiefer. Das deutsche Ärzteblatt. New York, Thieme Verlag GmbH. **119**: 50-51.

Kim, H. J., Yun, H. S., Park, H. D., Kim, D. H. and Park, Y. C. (2006) Soft-tissue and cortical-bone thickness at orthodontic implant sites. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics 130(2): 177-182.

King, K. S., Lam, E. W., Faulkner, M. G., Heo, G. and Major, P. W. (2007) Vertical bone volume in the paramedian palate of adolescents: a computed tomography study. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics 132(6): 783-788.

Kuroda, S., Yamada, K., Deguchi, T., Hashimoto, T., Kyung, H. M. and Takano-Yamamoto, T. (2007) Root proximity is a major factor for screw failure in orthodontic anchorage. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics 131(4 Suppl): S68-73.

Kyung, S. H. (2004) A study on the bone thickness of midpalatal suture area for miniscrew insertion. 34: 63-70.

Lai, R. F., Zou, H., Kong, W. D. and Lin, W. (2010) Applied anatomic site study of palatal anchorage implants using cone beam computed tomography. International journal of oral science 2(2): 98-104.

Lehmann, K. and Hellwig, E. (2005). Zahnärztliche Propädeutik. München, Elsevier GmbH.

Leung, M. T., Lee, T. C., Rabie, A. B. and Wong, R. W. (2008) Use of miniscrews and miniplates in orthodontics. Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons 66(7): 1461-1466.

Lippert, H. (2003). Lehrbuch Anatomie. München, Urban & Fischer Verlag, Elsevier GmbH.

Ludwig, B., Glasl, B., Bowman, S. J., Wilmes, B., Kinzinger, G. S. and Lisson, J. A. (2011) Anatomical guidelines for miniscrew insertion: palatal sites. Journal of clinical orthodontics : JCO 45(8): 433-441; quiz 467.

Ludwig, B., Glasl, B., Lietz, T. and Lisson, J. (2008) Miniimplantate - Grundlagen der Verankerung, Auswahl der Schrauben. 1.

Moon, S. H., Park, S. H., Lim, W. H. and Chun, Y. S. (2010) Palatal bone density in adult subjects: implications for mini-implant placement. *The Angle orthodontist* 80(1): 137-144.

Mozzo, P., Procacci, C., Tacconi, A., Martini, P. T. and Andreis, I. A. (1998) A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results. *European radiology* 8(9): 1558-1564.

Nanda, R. S. and Kierl, M. J. (1992) Prediction of cooperation in orthodontic treatment. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 102(1): 15-21.

Nötzel, F. and Schulz, C. (2009). *Kieferorthopädische Diagnostik - Analysen und Tabellen für die Praxis*. Köln, Deutscher Zahnärzte Verlag.

Ono, A., Motoyoshi, M. and Shimizu, N. (2008) Cortical bone thickness in the buccal posterior region for orthodontic mini-implants. *International journal of oral and maxillofacial surgery* 37(4): 334-340.

Paulsen, F. and Waschke, J. (2010). *Sobotta - Atlas der Anatomie des Menschen - Kopf, Hals und Neuroanatomie*. München, Urban & Fischer Verlag, Elsevier GmbH.

Poggio, P. M., Incorvati, C., Velo, S. and Carano, A. (2006) "Safe zones": a guide for miniscrew positioning in the maxillary and mandibular arch. *The Angle orthodontist* 76(2): 191-197.

Proffit W, F. H. e. C. o. (1993) Mechanical principles in orthodontic force control.

Radojević, S., Jovanović, S. and Lotrić, N. (1964) CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES RAPPORTS ENTRE LE SINUS MAXILLAIRE ET DES DENTS DU MAXILLAIRE SUPÉRIEUR. 56(1-2): 11.

Roberts, W. E., Marshall, K. J. and Mozsary, P. G. (1990) Rigid endosseous implant utilized as anchorage to protract molars and close an atrophic extraction site. *The Angle orthodontist* 60(2): 135-152.

Roberts, W. E., Smith, R. K., Zilberman, Y., Mozsary, P. G. and Smith, R. S. (1984) Osseous adaptation to continuous loading of rigid endosseous implants. *American journal of orthodontics* 86(2): 95-111.

Samandari, F. and Mai, J. K. (1995). *Curriculum - Funktionelle Anatomie für Zahnmediziner*. Berlin, Quintessenz Verlags-GmbH.

Sander, F., Ehrenfeld, Michael, Schwenzer, Norbert (2011). *Kieferorthopädie*.

Schroeder, H. (2000). *Orale Strukturbiologie*. Stuttgart, New York, Thieme.

Sergl, H. G., Klages, U. and Zentner, A. (2000) Functional and social discomfort during orthodontic treatment--effects on compliance and prediction of patients' adaptation by personality variables. *European journal of orthodontics* 22(3): 307-315.

Sherman, A. J. (1978) Bone reaction to orthodontic forces on vitreous carbon dental implants. *American journal of orthodontics* 74(1): 79-87.

Silva, M. A., Wolf, U., Heinicke, F., Bumann, A., Visser, H. and Hirsch, E. (2008) Cone-beam computed tomography for routine orthodontic treatment planning: a radiation dose evaluation. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 133(5): 640 e641-645.

Smalley, W. M., Shapiro, P. A., Hohl, T. H., Kokich, V. G. and Branemark, P. I. (1988) Osseointegrated titanium implants for maxillofacial protraction in monkeys. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics* 94(4): 285-295.

Solar, P., Aro, G., Ulm, C. and Bernhart, T. (1998) The effects of tooth loss on the anatomy of the maxilla. (0256-2855 (Print)).

Sowden, D. and Schmitz, J. P. (2002) AO self-drilling and self-tapping screws in rat calvarial bone: An ultrastructural study of the implant interface. *60(3): 6.*

Stockmann, P., Schlegel, K. A., Srour, S., Neukam, F. W., Fenner, M. and Felszeghy, E. (2009) Which region of the median palate is a suitable location of temporary orthodontic anchorage devices? A histomorphometric study on human cadavers aged 15-20 years. *Clinical oral implants research* 20(3): 306-312.

Taghizadeh, N. (2010). *Mediane und paramediane Bestimmung der Knochendicke des Palatum durum bei Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen mittels digitaler Volumetomographie.* Dr., Charite.

Turley, P. K., Kean, C., Schur, J., Stefanac, J., Gray, J., Hennes, J. and Poon, L. C. (1988) Orthodontic Force Application to Titanium Endosseous Implants
58(2).

Turley, P. K., Shapiro, P. A. and Moffett, B. C. (1980) The loading of bioglass-coated aluminium oxide implants to produce sutural expansion of the maxillary complex in the pigtail monkey (*Macaca nemestrina*). *Archives of oral biology* 25(7): 459-469.

Watanabe, H., Deguchi, T., Hasegawa, M., Ito, M., Kim, S. and Takano-Yamamoto, T. (2013) Orthodontic miniscrew failure rate and root proximity,

insertion angle, bone contact length, and bone density. *Orthodontics & craniofacial research* 16(1): 44-55.

Wehrbein, H., Feifel, H. and Diedrich, P. (1999a) Palatal implant anchorage reinforcement of posterior teeth: A prospective study. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics* : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics 116(6): 678-686.

Wehrbein, H., Glatzmaier, J., Mundwiller, U. and Diedrich, P. (1996a) The Orthosystem--a new implant system for orthodontic anchorage in the palate. *Journal of orofacial orthopedics = Fortschritte der Kieferorthopadie* : Organ/official journal Deutsche Gesellschaft fur Kieferorthopadie 57(3): 142-153.

Wehrbein, H., Merz, B. R. and Diedrich, P. (1999b) Palatal bone support for orthodontic implant anchorage--a clinical and radiological study. *European journal of orthodontics* 21(1): 65-70.

Wehrbein, H., Merz, B. R., Diedrich, P. and Glatzmaier, J. (1996b) The use of palatal implants for orthodontic anchorage. Design and clinical application of the orthosystem. *Clinical oral implants research* 7(4): 410-416.

Wilmes, B., Drescher, D. and Nienkemper, M. (2009) A miniplate system for improved stability of skeletal anchorage. *Journal of clinical orthodontics* : JCO 43(8): 494-501.

Winsauer, H., Vlachoianis, C., Bumann, A., Vlachoianis, J. and Chrubasik, S. (2012) Paramedian vertical palatal bone height for mini-implant insertion: a systematic review. *European journal of orthodontics*.

Wolf, F., Rateitschak, E. M. and Rateitschak, K. H. (2004). *Farbatlant der Zahnmedizin 1 - Parodontologie*. Stuttgart, Georg Thieme Verlag.

7. Anhang

7.1. Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Effektive Dosen (μSv) für einige Röntgenmethoden	19
Tab. 2:	Darstellung der Alters- und Geschlechterverteilung der untersuchten Patienten	21
Tab. 3:	Darstellung der Alters- und Geschlechterverteilung der untersuchten Altersgruppen	22
Tab. 4:	Technische Daten der vorhandenen DVT-Geräte.....	23
Tab. 5:	Koordinaten der Messungen	30
Tab. 6:	Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze und die Zunahme des Knochenangebots zwischen den Messpunkten.....	37
Tab. 7:	Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26.	39
Tab. 8:	Zunahme / Abnahme des Knochenangebots zwischen den verschiedenen Entfernungen zur palatinalen Kronenspitze für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26 mit Angabe des statistischen p-Werts. Signifikante Ergebnisse sind gekennzeichnet: ** - $p < 0.001$, * - $p < 0.01$, ° $p < 0.05$..	40
Tab. 9:	Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die ersten Prämolaren (14, 24) und die zweiten Prämolaren (15, 25). Das Knochenangebot an den zweiten Prämolaren war bei einem Abstand von 13 und 16 mm zur palatinalen Kronenspitze größer als das an den zweiten Prämolaren. Ab einem Abstand von 19 mm wiesen dagegen die ersten Prämolaren mehr Knochenangebot auf.....	42
Tab. 10:	Statistische Signifikanzwerte (p-Werte) aus dem Vergleich der ersten und zweiten	43
Tab. 11:	Medianwerte des Knochenangebots in Abhängigkeit von der Entfernung zur....	45
Tab. 12:	Statistische Signifikanzwerte (p-Werte) aus dem Vergleich der linken und rechten	46
Tab. 13:	Statistische Signifikanzwerte (p-Werte) aus dem Vergleich der männlichen (M) und.....	49
Tab. 14:	Statistische Signifikanzwerte (p-Werte) aus dem Vergleich der jüngeren Patienten (J: 12 – 15 Jahre) und der älteren Patienten (A: 16 – 30 Jahre) für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26.	53
Tab. 15:	Medianwerte (\pm Standardabweichung) des Knochenangebots in Abhängigkeit von der	54
Tab. 16:	Medianwerte (\pm Standardabweichung) des Knochenangebots in Abhängigkeit von der	55

Tab. 17: Medianwerte (\pm Standardabweichung) des Knochenangebots in Abhängigkeit von der	56
Tab. 18: Knochendicke im Bereich des Gaumens.	64
Tab. 19: Medianwerte, Standardabweichungen und der Anteil der Patienten mit einem Knochenangebot \geq 5 mm in Abhängigkeit von der Entfernung zur palatinalen Kronenspitze für die Zähne 14, 24, 15, 25, 16 und 26.	66

7.2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Der Gaumen (Palatum).....	6
Abb. 3: Der Alveolarfortsatz (Processus alveolaris) (links) und seine Bestandteile (rechts): der Alveolarknochen (1), die Spongiosa (2) und die Kompakta (3).....	9
Abb. 4: Implantat zur absoluten Verankerung in der Retromolarregion	11
Abb. 5: Palatinales Gaumenimplantat	11
Abb. 6: Darstellung von Gaumenimplantat (A) und Mini-Pin (B).....	12
Abb. 7: Darstellung der Funktionsweisen der digitalen Volumentomographie (DVT, links) und der Computertomographie (CT, rechts).	17
Abb. 8: Anpassen des Zahnbogens	28
Abb. 9: Auswahl der Cross Section.....	29
Abb. 10: Messung der Koordinate 15_13	29
Abb. 11: Balkendiagramm mit 95 % Konfidenzintervallen zur Darstellung der Medianwerte des	36
Abb. 12: Liniendiagramm zur Darstellung der Medianwerte des Knochenangebots in Abhängig-	38
Abb. 13: Balkendiagramm mit Angabe der 95 % Konfidenzintervalle zur Darstellung der Median-	41
Abb. 14: Balkendiagramm mit Angabe der 95 % Konfidenzintervalle zur Darstellung der Median-	44
Abb. 15: Balkendiagramm zur Darstellung des Knochenangebots in der rechten und linken	46
Abb. 16: Balkendiagramm zur Darstellung des Knochenangebots in der rechten und linken	47
Abb. 17: Balkendiagramm zur Darstellung des Knochenangebots bei männlichen und...48	
Abb. 18: Balkendiagramme zur Darstellung des Knochenangebots bei männlichen und weib-.....	50
Abb. 19: Balkendiagramm zur Darstellung des Knochenangebots bei verschiedenen Alters-.....	51
Abb. 20: Balkendiagramme zur Darstellung des Knochenangebots in Abhängigkeit vom Alter für	52

Abb. 21: Schnittbilder in der Frontalebene einer DVT Röntgenaufnahme.....	59
Abb. 22: Knochenangebot im Gaumen und Alveolarknochen.....	68

7.3. Danksagung

Für die Überlassung des Themas, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung während der gesamten Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. A. Bumann bedanken.

Weiterhin möchte ich mich bei den Mitarbeitern von MESANTIS für ihre Unterstützung und technische Hilfe bedanken.

Bei meinen Eltern möchte ich mich dafür bedanken, dass sie mich nicht nur finanziell, sondern auch moralisch immer unterstützt und mir den Rücken gestärkt haben.

Mein ganz besonderer Dank geht an Krissi. Vielen Dank für die Hilfe mit der Statistik, das Motivieren und die aufbauenden Worte nach Rückschlägen. Dafür, dass du mich durch die schlechten Phasen dieser Zeit gebracht hast.

Danke!!!

7.4. Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

7.5. Eidesstattliche Erklärung

„Ich, Nicolaus Koch, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Untersuchung zum Knochenangebot im palatinalen Seitenzahnbereich mittels digitaler Volumetomographie“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

23.04.2014

Nicolaus Koch

7.6. Anteilserklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Nicolaus Koch hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation: Eine Veröffentlichung der Arbeit in dem Journal „Angle Orthodontist“ ist in Vorbereitung.

23.04.2014

Nicolaus Koch