

AUS DER KLINIK FÜR KIEFER- UND GESICHTSCHIRURGIE
DER UNIVERSITÄT ZU LÜBECK

DIREKTOR: PROFESSOR DR. DR. PETER SIEG

**„Radiologisches Resorptionsverhalten des autologen
Beckenkammtransplantates nach vertikaler
Kieferaugmentation und Interpositionsplastik (Sinuslift)“**

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde
(Dr. med. dent.)

der Universität zu Lübeck

- Aus der Sektion Medizin -

vorgelegt von

Payam Mirzaei, M.Sc.

aus Hamburg

Lübeck 2021

1. Berichterstatter: Prof. Dr.med. Dr. med. dent. Samer Hakim
2. Berichterstatterin/Berichterstatter: Prof. Dr. med. Robert Krämer
Tag der mündlichen Prüfung: 03.05.2022
Zum Druck genehmigt. Lübeck, den 03.05.2022
Promotionskommission der Sektion Medizin

Für meine Familie

1.	Einleitung	1
2.	Knöchernes Hartgewebe	4
2.1.	Knochenstruktur	5
2.2.	Physiologie der Knochenreparatur und -regeneration	6
2.3.	Mechanismen der Knochenbildung	7
2.4.	Knochenersatzmaterialien	8
2.5.	Autogene Knochentransplantate	9
2.6.	Allogenes Knochentransplantat.....	10
2.7.	Xenografts	11
2.8.	Synthetisches Knochenersatzmaterial	12
3.	Knochenentnahme und Augmentationstechniken	13
3.1.	Ramus/Bukkale kortikale Knochentransplantate	13
3.2.	Distraktionsosteogenese	14
3.3.	Beckenkamm-Knochentransplantat.....	15
4.	Operationstechniken	17
4.1.	Distraktionsosteotomie	17
4.2.	Sinuslift.....	17
4.3.	Lateraler Sinuslift.....	17
4.4.	Interner Sinuslift	21
4.5.	Auflagerungsosteoplastik	23
5.	Material und Methode	25
5.1.	Patienten und Studiendesign	25
5.2.	Chirurgisches Verfahren.....	26
5.3.	Radiologische Messungen	27
5.4.	Statistische Auswertung	28
6.	Ergebnisse	30
6.1.	Zeitabhängige Knochenresorption in der OG-Gruppe	30
6.2.	Zeitabhängige Knochenresorption in der SL-Gruppe	32
6.3.	Technikbedingte Knochenhöhenresorption	34

6.4.	Prognose der technikbedingten Knochenhöhenresorption	34
7.	Diskussion.....	36
7.1.	Knochenbiologie.....	37
7.2.	Einfluss der Technik auf den Knochenabbau	38
7.3.	Einfluss der Zeit auf den Knochenabbau.....	40
7.4.	Entnahmemorbidität	41
8.	Zusammenfassung	43
9.	Literaturverzeichnis	44
10.	Danksagung	53
11.	Lebenslauf.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Regionen für mögliche Knochentransplante des Unterkiefers (modifiziert nach Pocket Dentistry;2016).¹

Abb. 2: Die seitliche Ansicht zeigt die Platzierung einer weichen Rolle zur Anhebung des vorderen Beckenkamms. Die Inzision (gestrichelte Linie) wird lateral zum Kamm und posterior zur vorderen Darmbeinwirbelsäule gelegt (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 1264).¹

Abb. 3: Entnahme eines kortikokokkalen Blocks aus der medialen Seite des vorderen Darmbeins. Nach der Entnahme des Blocks kann die freiliegende darunter liegende Spongiosa mit Hilfe von Knochenkurrettern und -meißeln entnommen werden (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 1266).¹

Abb. 4 a-c: a) Darstellung des vorderen Beckenkamms. b) Kortikospongiöser Block. c) Entnahme von Spongiosa mit einer Knochenkürette (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 1262).¹

Abb. 5: Koronaler Querschnitt durch die Kieferhöhle. Lateraler Sinuslift mit krestaler Inzision und lateraler Osteotomie (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 201).¹

Abb. 6: : Fensterung des lateralen Sinusknochen mit Sinusmembranelevation (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 202).¹

Abb. 7: Das Knochentransplantat ist an der entsprechenden Stelle eingebracht (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 202).¹

Abb. 8: Operation der zweiten Phase mit eingeeiltem reifem Knochentransplantat und Implantat (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 203).¹

Abb. 9 a-c: a) Osteotomie entlang des lateralen Kieferhöhlenwand. b) Anhebung der Sinusmembran. c) Partikuläres allogenes Knochentransplantat entlang des Sinusbodens der rechten Kieferhöhle platziert (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 201).¹

Abb. 10: Koronaler Querschnitt durch die Kieferhöhle. Transalveolärer Sinuslift mit krestaler Inzision (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 204).¹

Abb. 11: Der Pilotbohrer stoppte im Abstand von 2 mm unterhalb des Kieferhöhlenbodens (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 204).¹

Abb. 12: Das Osteotom, das zur anfänglichen Implantatstabilität unterdimensioniert ist, wird zum Aufklopfen des Sinusbodens und Anhebung des Sinusbodens verwendet (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 205).¹

Abb. 13: Das Implantat wird platziert mit Anhebung des Sinusbodens (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 205).¹

Abb. 14: Auflagerungsosteoplastik im atrophischen Oberkiefer. Nach Konturierung wird das Knochentransplantat auf den atrophischen Oberkiefer aufgelagert und durch Osteosyntheseschrauben fixiert. Die Weichgewebedecke wird reponiert und durch Rückstichnähte geschlossen oder zweischichtig adaptiert (modifiziert nach Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie: Operationslehre und -atlas; 2012, S.105).²

Abb. 15: Transplantatresorption nach Sinuslift (rot mit CI) und Onlay-Augmentation (blau mit CI) innerhalb von 12 Monaten nach dem Follow-up.

Abb. 16 A & B: Schematische Darstellung der radiologischen Beurteilung der Transplantathöhe und -breite durch das digitale Volumentomographen. Rot = Sinuslift; Blau = Onlay-Knochentransplantat.

Abb. 17 A-D: Darstellung des Knochenvolumens in coronaler (A), axialer (B), sagittaler (C) Richtung sowie Volumendarstellung des gesamten Augmentats.

Abb. 18: Nichtlineare Regression zur Abschätzung der vorhersagbaren Transplantatresorption in % nach Zeit und Technik vor der Implantatinserterion. Rot = Sinuslift; Blau = Onlay-Knochentransplantat

Abb. 19: Prozentualer Anteil der Resthöhe des Transplantats innerhalb der Nachbeobachtung von 12 Monaten in drei Intervallgruppen. Rot = Sinuslift; Blau = Onlay-Knochentransplantat.

Abb. 20: Prozentsatz der verbleibenden Transplantatbreite innerhalb von 12 Monaten nach der Nachuntersuchung. Rot = Sinuslift; Blau = Onlay-Knochentransplantat.

Abb. 21: Prozentsatz der verbleibenden Transplantatbreite innerhalb von 12 Monaten nach der Nachuntersuchung. Rot = Sinuslift; Blau = Onlay-Knochentransplantat.

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BIC	bone to implant contact / Kontaktfläche Implantat zu Knochen
BMP	Bone Morphogenetic Proteins / knochenmorphogene Proteine
cm	Zentimeter
Ccm	Kubikzentimeter
DVT	Digitale Volumentomographie
mm	Milimeter
OG	Onlay-Graft
SL	Sinuslift
z.B.	zum Beispiel

1. Einleitung

Knochendefizite der Kiefer sind häufig auf Unfälle, chirurgische Entfernung gutartiger und bösartiger Läsionen, angeborene Anomalien, Parodontalenzündung, Zahnabszesse, Extraktion und schließlich Kieferatrophien aufgrund von fortgeschrittenem Alter zurückzuführen ³.

Teilweiser oder vollständiger Zahnverlust und die damit verbundenen Veränderungen des oralen Hart- und Weichgewebes können zu funktionellen und ästhetischen Einbußen führen. Die Folgen sind Beeinträchtigungen des persönlichen und sozialen Alltags und letztlich ein Verlust an Lebensqualität. Eine rein prothetische Rekonstruktion kann die Bedürfnisse des betroffenen Patienten oft nicht erfüllen ⁴.

Im Jahr 1938 wurde die erfolgreiche Platzierung der ersten metallischen Schraube zur Unterstützung eines künstlichen Zahnes in eine Extraktionsstelle, deren Überlebensrate mehr als 10 Jahre betrug, ausgezeichnet ⁵. Doch die Geburtsstunde der heutigen Implantologie begann durch die Verwendung von Titanimplantate durch Brånemark ^{6, 7}.

Auf der Konferenz über die Osseointegration in der klinischen Zahnmedizin im Jahre 1982 präsentierte Brånemark seine chirurgischen und prothetischen Implantatprotokolle, die bis heute noch verwendet werden ⁸.

Rehabilitation des teilbezahnten oder unbezahnten hinteren Abschnitts des Oberkiefers mit Implantaten hat sich als Herausforderung erwiesen, da ein Mangel an verfügbarem Knochenvolumen, insbesondere der vertikale Knochenhöhe ein Problem darstellt. Viele Studien zeigen, dass die Knochenqualität des posterioren Oberkiefers verantwortlich für eine sehr hohe Verlustrate von Implantaten ist ⁹⁻¹³.

Die Oberkieferatrophie als Zeichen der fortschreitenden Knochenresorption ergibt sich aus Zahnverlust, Pneumatisierung der Kieferhöhle und zunehmendem Alter ^{14, 15}.

Da die Wiederherstellung der Kaufunktion mit Zahnimplantaten eine ausreichende Knochenmenge erfordert, ist in vielen Fällen ein Knochenaufbau vor der Implantation im atrophischen Oberkiefer erforderlich.

Die Versuche, bei Mangel an quantitativ ausreichendem Knochen der Maxilla kurze Implantate mit einer Länge von 7-8 mm zur Unterstützung der Prothetik zu nutzen, zeigte in klinischen Studien unbefriedigende Ergebnisse^{9, 16, 17}. Ausfallraten von bis zu 35% oder mehr zeigten sich^{18, 19}.

Zusätzlich zu den quantitativen Problemen des Knochenvolumens, die eine Implantation erschweren, gibt es qualitative Probleme, die selten den Unterkiefer betreffen. Der Knochen im Oberkiefer wird oft als weich und schwammig bezeichnet mit mangelnder Knochendichte^{14, 18}.

Diese quantitativen und qualitativen Merkmale sind die Hauptgründe für die hohen Ausfallraten von Zahnimplantaten im Oberkiefer im Vergleich zu Implantaten des Unterkiefers. Marx und Garg beobachteten, dass Implantate, die in augmentierten Kiefern eingesetzt wurden, durch den erhöhten „bone to implant contact (BIC)“ eine höhere Stabilität zeigten²⁰.

Mit dieser präprothetischen Maßnahme kann ein größtmöglicher Stabilitätsgewinn für die prothetische Versorgung und damit eine entscheidende Entlastung für den Patienten beim Kauen, Sprechen und Lachen erreicht werden²¹.

Verschiedene Augmentationstechniken wurden eingesetzt, um das Volumen des Alveolarkamms zu verbessern, wie z.B. Onlay-Knochentransplantat (OG), Sinuslift (SL), interpositionelles Knochentransplantat („Sandwich-Technik“) oder Distraktionsosteogenese. Autologe Transplantate sind osteokonduktiv und osteoinduktiv, aber sie unterliegen auch einer Resorption abhängig von der Knochenentnahmestelle, der Zeit bis zur Implantation und den verwendeten Techniken^{22, 23}.

Die überwiegende Mehrheit der Knochenresorptionsstudien untersuchte Sinuslift-Fälle mit Knochenersatzmaterialien durch 2-dimensionale Röntgenaufnahmen unter Verwendung der Überlebensrate der Implantate als Ersatzparameter für eine erfolgreiche Knochenregeneration^{24 25}.

Augmentationsstudien mit autologem Knochen sind meist heterogen in Bezug auf die Operationstechnik, die Quelle der Knochentransplantate und die Nachbeobachtungszeit und auf die resultierenden Empfehlungen²⁶⁻²⁸. Schließlich untersuchten bis jetzt die meisten Studien das Ergebnis verschiedener Augmentationstechniken anhand der anschließenden Implantatüberlebensrate^{24, 29, 30} anstelle einer direkten Messung der Knochenhöhe. Ziel dieser Studie war es daher,

die zeit- und technikbedingte Resorption von autologem Beckenkammknochen bei OG im Vergleich zu SL während der Knochenremodellierung und Einheilungsphase bis zu 12 Monaten vor Implantatinserktion zu bewerten.

2. Knöchernes Hartgewebe

Knochen ist das zweithäufigste Material, das beim Menschen transplantiert wird. Die meisten davon sind Prozeduren, bei denen entweder autogener Knochen des Patienten oder allogene Knochentransplantate verwendet wurde.

Die erste Aufzeichnung eines Knochentransfers wurde 1682 durchgeführt. Hier wurde Knochen aus dem Schädel eines Hundes in den Kopf eines russischen Soldaten transferiert ³¹.

Erst im neunzehnten Jahrhundert begann sich die Kunst und Wissenschaft der Knochentransplantation zu entwickeln.

Von Walther wird im Jahr 1820 der Transfer des ersten autologen Knochens zugeschrieben. 1878 wurde das erste chirurgische Verfahren mit allogene Knochentransplantat unter sterilen Bedingungen durchgeführt ³².

Im Jahr 1907 beschrieb Axhausen den histologischen Prozess der Knochenbildung eines Knochentransplantats, die zu seiner Theorie der „schleichenden Substitution“ führte ^{32, 33}. Die Grundprinzipien der Knochentransplantation wurden erst 1923 von Albee, nach 3.000 erfolgreichen Knochentransplantationsverfahren, veröffentlicht ³⁴.

In der dentalen Implantologie wurden viele verschiedene Augmentationsmaterialien verwendet, um die Implantatinserion zu erleichtern. Bei jeder Augmentation ist das Ziel die Bildung von 100% vitalem Knochen um eine erfolgreiche Implantat- Osseointegration zu erreichen ³⁵.

Die idealen Eigenschaften eines Knochentransplantats oder Knochenersatzmaterials sind ²³:

- Kosteneffektiv
- Biokompatibel
- Osteogen
- Osteoinduktiv
- Osteokonduktiv
- Behandlerfreundlich

In einer Meta-Analyse verglichen Tong und Kollegen die Erfolgsrate nach Implantation bei vorausgegangenem Sinuslift mit unterschiedlichen Knochenersatzmaterialien einschließlich autogenen Knochens. Das Ergebnis der Analyse sieht autogene Knochentransplantate als aktuellen Goldstandard an ³⁶.

Nach erfolgtem Sinuslift mit 100% autogenem Knochen zeigte die histomorphologische Analyse einen Durchschnitt von 26% bis 69% neu gebildetem vitalem, mineralisierte Knochen ^{37, 38}. Wurden andere Knochenersatzmaterialien verwendet, lag der Bereich des gebildeten, vital und mineralisierten Knochens zwischen 5% und 45% ^{37, 39-41}.

Autogener Knochen war das erste Transplantatmaterial, das zur Rekonstruktion des Oberkiefers verwendet wurde. In frühen Studien erfolgte die Entnahme des Transplantates aus dem Beckenkamm. Berichte über die Transplantatüberlebensrate reichten von 100% bis 55% ^{23, 29, 42-44}.

Berichte über eine 100%ige Implantat-Osseointegration bei Beckenkammaugmentaten des Oberkiefers sind vielversprechend ^{23, 42}.

2.1. Knochenstruktur

Der Knochen ist ein einzigartiges, vitales Gewebe, das mehrere Funktionen erfüllt. Es ist biologisch aktiv in der Wundheilung, gibt strukturelle Unterstützung und Steifigkeit für das menschliche Skelett, und es ist am Kalziumstoffwechsel beteiligt ⁴⁵.

Um die normale knöcherne Struktur aufrechtzuerhalten, müssen sowohl Proteine als auch Mineralien in ausreichender Menge vorhanden sein.

Dieses spezialisierte Bindegewebe verfügt über eine Kollagen-Protein-Matrix, die vor allem aus Kalziumphosphat, Kalziumkarbonat und kleineren Mengen an Kalziumfluorid und Magnesiumfluorid besteht ⁴⁶.

Die Mineralien im Knochen bestehen in erster Linie aus Hydroxylapatit, das sich auf einer Matrix aus Kollagen Typ I abgelagert. Kollagen Typ I verleiht dem Knochen Steifigkeit. Die organische Knochenmatrix liefert die Zugfestigkeit und das Gerüst zur Knochenbildung. Knochen enthält auch Nicht-Kollagen-Proteine in seiner mineralischen Matrix, die knochenmorphogenen Proteine (BMP). Das Heilungspotenzial von Knochen wird durch viele biochemische, biomechanische,

zelluläre und hormonelle Faktoren beeinflusst. Ein kontinuierlicher Zustand der Knochenablagerung, -resorption und -umbau ermöglichen den Heilungsprozess ⁴⁷.

Die Struktur des menschlichen Knochens wird in kortikalem und spongiösem Knochen eingeteilt. Der kortikale Knochen, auch Kompaktknochen genannt, besteht aus einem engen Verbund von verdichteten parallelen zylindrischen Strukturen, die als Osteone bezeichnet werden. Der kortikale Knochen befindet sich auf den Außenflächen des Skeletts und ist aufgrund von konzentrischen Kollagenfibrillen in Form von lamellarem Knochen sehr steif und ermöglicht die mechanische Tragfunktion und Zugbelastung ⁴⁸
⁴⁹.

Die Spongiosa, bekannt auch als trabekulärer oder schwammiger Knochen, besteht aus einem Verbund von Platten und Strängen aus Gewebe, die eine poröse Struktur bilden. Der spongiöse Anteil des Knochens ist in der Lage, Druckbelastungen zu tolerieren. Die zylindrischen Strukturen umgeben ein zentrales Blutgefäß, das als Haverssches System bezeichnet ist und durch hämatopoetische Elemente für den Stoffwechsel sorgt ⁵⁰.

2.2. Physiologie der Knochenreparatur und -regeneration

Der Prozess der Knochenwundheilung findet in drei verschiedenen überlappenden Phasen statt, aber. Diese sind die Entzündungsphase, die Reparaturphase und die Umbauphase ^{32, 49}.

Im entzündlichen Stadium erfolgt die Hämatombildung an der Frakturstelle innerhalb von Stunden nach dem Trauma. Fibroblasten und Entzündungszellen wie Monozyten, Lymphozyten und Makrophagen gelangen in den Wundbereich. Dies führt zur Bildung von Granulationsgewebe, zur Vaskularisierung und zur Migration von mesenchymalen Zellen in den Wundbereich. Die Reparaturphase ist gekennzeichnet durch die Bildung eines knöchernen Kallus. Die Vaskularisierung des Bereichs setzt sich mit der Produktion von osteoiden und fibrokollagenen Fasern fort. Die Osteoidinseln entwickeln sich weiter und überbrücken den Kallus mit Knochengewebe, das in den nächsten sechs bis acht Wochen schließlich durch lamellaren Knochen ersetzt wird. Die Umbauphase wird sich in den nächsten Monaten fortsetzen. Eine

zufriedenstellende Knochenfestigkeit entwickelt sich in der Regel nach sechs Monaten⁵¹.

2.3. Mechanismen der Knochenbildung

Bei Knochenheilung- und Transplantationsverfahren gibt es drei Mechanismen zur Knochenbildung⁵²:

- Osteogenese,
- Osteokonduktion
- Osteoinduktion

Die Osteogenese beschreibt vitale Knochenzellen, die in der Empfängerregion überleben und neuen Knochen ausbilden können. Hierfür wird eine optimale und zeitnahe Ernährung des Transplantates aus dem Empfängergewebe benötigt und kommt daher hauptsächlich bei autogenen Transplantaten mit Gefäßanschluss zum Tragen.

Die osteokonduktive Wirkung beschreibt die Bildung einer künstlichen Extrazellulärmatrix durch das Knochenersatzmaterial, damit eine Leitstruktur für den neuen Knochen bereitstellt. Die Platzhalterfunktion ermöglicht bei intraoralen Augmentationstechniken das Einwandern der knochenbildenden Zellen in den Defektbereich⁵³.

Die Osteoinduktion ist definitionsgemäß eine Substanz, die eine ektope Knochenneubildung, also eine Induktion von Knochengewebe an einem extraskelettalen Ort, bewirkt. Unter diesem Prozess versteht man die Anregung pluripotenter Reservezellen durch morphogene Faktoren wie zum Beispiel die Bone Morphogenetic Proteins (BMP), die zur Differenzierung durch morphogene Faktoren ausgelöst werden⁵⁴.

In allen drei Prozessen wird die Knochenheilung direkt durch das Empfängerbett, die Angiogenese, die Sauerstoffspannung des Gewebes und die Stabilität des Transplantats gesteuert^{20, 55}.

Die Wechselwirkungen zwischen Knochenbildung und Angiogenese müssen noch vollständig aufgeklärt werden. Angiogenese ist die Bildung neuer Blutgefäße aus bereits vorhandenen Gefäßen und ist entscheidend für die Wundheilung. In der

Kieferhöhle ist die Umgebung eine mit geringer Vaskularität, niedriger Sauerstoffkonzentration und hoher Stoffwechselaktivität, die die Angiogenese stimuliert ^{56, 57}.

Die Bildung eines Gefäßsystems ist für die Zufuhr von Nährstoffen und Sauerstoff und die Entfernung von Zellschutt unerlässlich. In der Anfangsphase der Wundheilung durchlaufen Endothelzellen eine Reihe von Ereignissen, die zur Entstehung und Entwicklung eines Kapillarnetzes führen ⁵⁸. Die Angiogenese so wie die Osteogenese werden durch Zytokine (Wachstumsfaktoren) unterstützt ²⁰. Wenn neu gebildete Blutgefäße nicht mehr benötigt werden, durchlaufen sie einen Prozess, der als programmierter Zelltod oder Apoptose bezeichnet wird ⁵⁹.

2.4. Knochenersatzmaterialien

In den letzten Jahren wurden verschiedene Knochenersatzmaterialien entwickelt, um den autogenen Knochen zu ersetzen. Diese Materialien stammen aus Menschen, Rindern, Pflanzen oder Algen. Es gibt vier Arten von Knochenersatzmaterialien, die derzeit in der rekonstruktiven Chirurgie der Kiefer verwendet werden:

- autogene Knochentransplantate
- Allografts
- Xenografts
- Synthetisches Knochenersatzmaterial

Das ideale Transplantatmaterial sollte biokompatibel sein, ohne eine immunologische Reaktion hervorzurufen. Das Material sollte auch leicht verfügbar, kostengünstig und klinisch einfach zu verwenden sein. Vor allem sollte es mechanische Eigenschaften ähnlich dem menschlichen Knochen aufweisen und in der Lage sein, die Knochenneubildung (Osteoinduktion) zu stimulieren, um die Knochenbildung zu unterstützen (Osteokonduktion) und die Angiogenese zu fördern.

2.5. Autogene Knochentransplantate

Autogenes Knochentransplantat ist definiert als Gewebe, das gewonnen und transplantiert wird von derselben Person. Es hat unter den verschiedenen Knochenersatzmaterialien keinen gleichwertigen Ersatz, da es die Fähigkeit hat, neuen Knochen durch alle drei bekannten Mechanismen der Knochenbildung zu bilden: Osteogenese, Osteokonduktion und Osteoinduktion ³⁷.

Es gilt als das effektivste Transplantatmaterial, da es lebensfähige Osteoprogenitorzellen liefert, Mineralien und Kollagen enthält und als Gerüst für die Osteokonduktion dient. Es enthält auch nicht-kollagene Matrixproteine und Wachstumsfaktoren für die Osteoinduktion ^{47, 60}. Nach dem Transplantationsverfahren ist es in der Lage, sich mit dem nativen Knochen zu verbinden und erlaubt keine Immunantwort ⁶⁰.

Ein Vorteil von autogenem Knochen ist das schnelle, angiogene Einwachsen von Kapillaren aus dem umgebenden Wirtsknochen ⁶¹. Der kapillare Blutfluss an der Empfängerstelle während der Operation ist entscheidend, um eine Gewebhypoxie zu verhindern, da die Differenzierung mesenchymaler Zellen zu lebensfähigen Zellen sauerstoffabhängig ist. Die Osteoblasten sind für 60%, die Periostzellen zu 30% und die Transplantatosteozyten zu 10% für die Knochenneubildung verantwortlich ^{62, 63}. Freie hämatopoetische Zellen aus dem transplantierten Knochenmark sind essenziell, da sie osteogene Wachstumsfaktoren, osteoblastische Vorläuferzellen und ein Fibringerüst für die Knochenapposition liefern zur Revaskularisierung ⁶⁴.

Zahlreiche klinische Studien zeigen, dass autogener Knochen aufgrund seiner Fähigkeit, neuen Knochen zu bilden und sein Volumen im Laufe der Zeit aufrechtzuerhalten, am besten für die Sinustransplantation geeignet ist ^{42, 52, 65}. Bei der Entnahme von Knochen aus dem Beckenkamm oder aus den unteren Extremitäten wird zusätzlich spongiöses Knochengewebe zur Transplantation gewonnen. Spongiosa liefert lebensfähige Knochen- und Markzellen, die die Osteogenese fördern, Proteine für die Osteoinduktion liefern und die Knochenmatrix für die Osteokonduktion bilden ^{64, 66}.

Autogener Knochen kann von extraoralen Stellen wie dem Beckenkamm, dem Schädel und dem Schienbein entnommen werden. Intraorale Stellen sind der vordere und hintere Unterkiefer und der hintere Oberkiefer.

Nachteile der Entnahme und Verwendung von autogenem Knochen sind unter anderem die Spendermorbidity und die Notwendigkeit eines zusätzlichen operativen Eingriffs, was zu erhöhten Kosten führen kann. Eine weitere Limitation ist die begrenzten Knochenmengen, die entnommen werden kann ^{39, 41}.

Des Weiteren ist das Risiko des Patienten erhöht, da Wundinfektion, erhöhter Blutverlust und eine längere Zeitspanne bis zur Rückkehr zur vollen Funktionalität gegeben sind ⁴¹.

Diese Nachteile haben den Anstoß für die Entwicklung alternativer Knochenersatzmaterialien mit ähnlichen Eigenschaften wie autogenem Knochen vorangetrieben, um die Notwendigkeit einer zweiten Operationsstelle sowie die Reduktion der Menge an autogenem Knochen zur Rekonstruktion des Oberkiefers zu ermöglichen ^{39, 41}.

2.6. Allogenes Knochentransplantat

Allogener Knochen ist das am häufigsten verwendete Knochenersatzmaterial ⁶⁷.

Ein allogenes Knochenersatzmaterial (Allotransplantat) wird von einem Individuum entnommen und in ein anderes Individuum transplantiert. Allografts (human) sind von der gleichen Art, aber mit einer anderen genetischen Zusammensetzung als die des Empfängers ⁶⁸.

Bei der oralen, maxillofazialen und implantologischen Rekonstruktion werden Allotransplantate häufig verwendet, da die Gewinnung großer Mengen an autogenem Knochen biologisch schwierig ist ⁶⁹.

Diese Transplantate eliminieren oder verringern die Morbidity des Knochenentnahmeverfahrens und sind in unbegrenzten Mengen aus den Knochenbanken erhältlich. Allotransplantate können als alleiniges Transplantatmaterial verwendet oder mit autogenem Knochen als Kompositransplantat kombiniert werden. Da die Zellkomponente bei der Herstellung des Transplantats entfernt wird, entfällt das osteogene Potenzial. Allotransplantate

sind nur osteokonduktiv und schwach osteoinduktiv ⁷⁰. Daher wird empfohlen, dem Allotransplantat autogenen Knochen hinzuzufügen.

Nachteile von Allotransplantaten sind, dass das osteogene Potenzial fehlt, sie schwach osteoinduktiv sind, hohe Kosten verursachen und das Risiko einer Übertragung von infektiösen Erkrankungen möglich ist ⁷¹.

2.7. Xenografts

Xenografts sind Transplantate von einer Spezies, die zu einer anderen transplantiert werden und die möglicherweise eine starke immunologische Reaktion induzieren können ⁶⁶.

Das am häufigsten verwendete Xenotransplantatmaterial ist anorganisches, aus Rindern gewonnene Hydroxylapatite. HA ist eine natürliche, osteokonduktive poröse Mineralmatrix, die die Osteogenese fördert. Um eine immunologische Reaktion zu vermeiden, werden die organischen Komponenten entfernt (deproteiniert), wobei die poröse Architektur der Substanz erhalten bleibt. Dies liefert eine Matrix für die Neubildung von Knochen ⁷².

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Hydroxylapatit sind vergleichbar mit denen des menschlichen kortikalen und spongiösen Knochens. Zu den klinischen Vorteilen gehören die Osteokonduktion, die einfache Handhabung, die Förderung der Koagelstabilisierung und die Revaskularisierung, die die osteoblastische Migration erleichtert.

In den histologischen Studien mit Xenotransplantatmaterialien wurde durchschnittlich 25% neuer vitaler Knochenbildung und 25% Transplantatmaterialreste in dem augmentierten Bereich beobachtet. Dieses so erhaltene 50% mineralisierte Gesamthartgewebe entspricht der Knochendichte Typ II, die typischerweise im hinteren Unterkiefer beobachtet wird. Diese harte, dichte Gewebesqualität ist dem, lockeren Typ IV Knochen im nicht transplantierten hinteren Oberkiefer weit überlegen ⁷³.

Das größte Problem bei der Verwendung von Rinderknochen ist die mögliche Übertragung von infektiösen Partikeln (Prionen), die neuroinfektiösen Krankheiten wie die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit verursachen können ^{71, 74}. Derzeit gibt es keine gemeldeten Fälle von Patienten, die durch eine Operation infiziert wurden. Die

Übertragung dieser Krankheit wurde jedoch durch den Verzehr von infektiösem Rindermaterial gemeldet ⁷⁵.

Ein nicht-tierisches Augmentations-Biomaterial ist eine kommerziell erhältliche Rotalge, *Corallina officinalis*, die chemisch in Hydroxylapatit umgewandelt wird. Es zeichnet sich durch eine zusammenhängende Porosität und einer großen spezifische Oberfläche aus 100% Hydroxylapatit aus, ähnlich wie Spongiosa und Zahnschmelz und fördert die Migration, Proliferation und Differenzierung von Osteozyten ^{76, 77}.

Die Vorteile dieses natürlichen Xenotransplantats sind, die unbegrenzt verfügbare Menge, ist preiswert, ruft keine Immunantwort hervor und wird aufgrund der Oberflächenporosität und osteoklastischen Resorption durch Knochen ersetzt ^{71, 76}.

2.8. Synthetisches Knochenersatzmaterial

Diese sind künstliche Knochenersatzmaterialien aus natürlich vorkommende Substanzen, die als Hydroxylapatite, Rinderkollagen und mineralische Verbundwerkstoffe verarbeitet werden. Zu den heute verfügbaren synthetischen Transplantatmaterialien gehören unter anderem Keramik, bioaktive Gläser und Polymere ^{60, 66}.

Für ein biosynthetisches Material, das für die menschliche Transplantation in Betracht kommt, sind Biokompatibilität und eine akzeptable Resorptionsrate, die es ermöglicht im Laufe der Zeit durch menschlichen Knochen ersetzt zu werden ^{66, 78}.

Das Material muss auch einfach zu handhaben sein, preiswert sein, unbegrenzt in der Menge sein und darf keine Immunantwort hervorrufen ⁶⁰.

Alle Allotransplantate sind nur osteokonduktiv, da sie keine osteogenen oder osteoinduktiven Potenziale haben. Daher wird empfohlen, dass autogener Knochen eingebracht wird im Sinne einer Verbundmischung ⁷⁹.

3. Knochenentnahme und Augmentationstechniken

Der Begriff „Augmentation“ steht für einen Gewebeaufbau und bezeichnet in der präprothetischen dento-alveolären Chirurgie die Rekonstruktion von Knochendefekten im Unter- oder Oberkiefer durch Knochengewebe und/oder Knochenersatzmaterial. Dieser erfolgt in der Regel bei geplanter dentaler Implantation bei nicht ausreichendem Knochenangebot in der Höhe und/oder der Breite. Hierbei wird die Eigenschaft des Knochenumbaus ausgenutzt ⁷¹.

Generell wird unterschieden zwischen mikrovaskulären und avaskulären Knochentransplantaten. Bei mikrovaskulären Knochentransplantaten werden die ernährenden Gefäße mitentnommen und am Zielort an geeigneten Gefäße anastomosiert und ermöglichen eine direkte Versorgung des Transplantates. Bei avaskulären Knochentransplantaten wird auf die Entnahme der versorgenden Gefäße verzichtet. Dies hat den Vorteil eines kleineren operativen Eingriffs mit dem Nachteil einer erhöhten Knochenresorption von bis zu 30% des auf- bzw. angelagerten Knochens innerhalb der ersten 6 Monate nach Transplantation ⁸⁰⁻⁸².

Das Volumen des autologen Knochens, das für den Wiederaufbau der Kiefer benötigt wird, bestimmt die Auswahl der Entnahmestelle. Intraorale Entnahmestellen sind die Tuber maxillae im hinteren Abschnitt des Oberkiefers, der Ramus mandibulae und die Symphyse des im vorderen Abschnitt des Unterkiefers. Die Einschränkung der Knochenentnahme aus intraoralen Regionen ist die Menge an Knochen, die entnommen werden kann ⁸³. Bei großen Mengen an Spongiosa, wie z.B. bei der Durchführung von bilateralen Sinustransplantationen, sind der Beckenkamm der Hüfte oder das Schienbein der unteren Extremität die bevorzugten Entnahmestellen ^{83, 84}.

3.1. Ramus/Bukkale kortikale Knochentransplantate

Die Ramus- und bukkale kortikale Platte des Unterkiefers wurde erfolgreich verwendet, um erfolgreich autogenes Knochenmaterial zu gewinnen, wenn bei der Rekonstruktion begrenzte Mengen (weniger als 5 ccm) Knochen benötigt werden ⁸⁵.

Der entscheidende Vorteil bei der intraoralen Knochenentnahme ist der bequeme chirurgische Zugang ^{86, 87}. Mit dieser Technik ist die Morbidität gering und kortikale Knochenaspäne können unter Lokalanästhesie gewonnen werden. Wenn größere

Mengen an autogenem Knochen für die Rekonstruktion benötigt werden, sollte entweder der Beckenkamm oder das Schienbein gewählt werden, da sie im Vergleich zum Ramus des Unterkiefers eine weitaus größere Menge an Knochen liefern ^{83, 84}.



Abb. 1: Regionen für mögliche Knochentrasplante des Unterkiefers (modifiziert nach Pocket Dentistry;2016). ¹

3.2. Distraktionsosteogenese

Die erste sogenannte Kallusdistraktion auf dem Gebiet der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie wurden 1992 für die Verlängerung eines hypoplastischen Unterkieferastes publiziert ⁸⁸.

Die Distraktionsosteogenese beruht darauf, dass ein Spalt zwischen zwei Knochenfragmenten, die durch Zugspannung langsam voneinander entfernt werden, mit neuem Knochen aufgefüllt wird ^{23, 89, 90}. Durch Osteotomie an definierter Stelle mit anschließender Distraktion mittels eines Fixateur externas, gelang es Ilizarov Extremitätenknochen über eine Distanz von über 40 cm zu verlängern ⁹⁰

In der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie wird entgegen dem ursprünglichen Prinzip ein transkutaner Fixateur externe unter die Mundschleimhaut implantiert ⁸⁸.

3.3. Beckenkamm-Knochentransplantat

Eine Rekonstruktion von Kontinuitätsdefekten von mehr als 6 cm Länge, eine großflächige, einseitige oder zweiseitige Auflagerungsplastik oder eine umfangreiche einseitige oder zweiseitige Sinusaugmentation des Oberkiefers können als Indikation für Beckenkammtransplantate angesehen werden. Dies ist auf die große Menge an autogenem kortikalem, spongiösem oder kortikospongiösem Knochen sowie die Zugänglichkeit des anterior oder posterior Beckenkamms zurückzuführen^{91, 92}. Beim Sinustransplantat sorgt das vordere Ilium für eine zufriedenstellende Mengen an Spongiosa für einseitige oder bilateralen Augmentation mit minimaler Morbidität^{91, 93, 94}. Aus dem vorderen Ilium kann ca. 50 ml kortikaler Spaltknochen gewonnen werden. Bei größeren Knochenmengen ist das hintere Ilium die bevorzugte Quelle^{92, 95}. Die bei jedem Patienten angewandte Entnahmetechnik nutzt einen lateralen Zugang zum vorderen Ilium unter Darstellung der Crista iliaca anterior. Zur Knochengewinnung vom posterioren Beckenkamm erfolgt die Schnittführung lateral der Spina iliaca posterior entlang der posterioren Crista iliaca beispielsweise in der Technik nach Marx & Morales⁹¹.

Trotz der geringen Komplikationsrate bei diesem chirurgischen Eingriff wurde eine signifikante Morbidität festgestellt⁹¹.

Die am häufigsten gemeldeten Komplikationen bei der Entnahme von Beckenknochen sind Gangstörungen, anhaltende postoperative Schmerzen, übermäßiger Blutverlust und neurosensorische Störungen der unteren Extremität^{91, 96}.

Anteriorer Tuberkel des Iliums

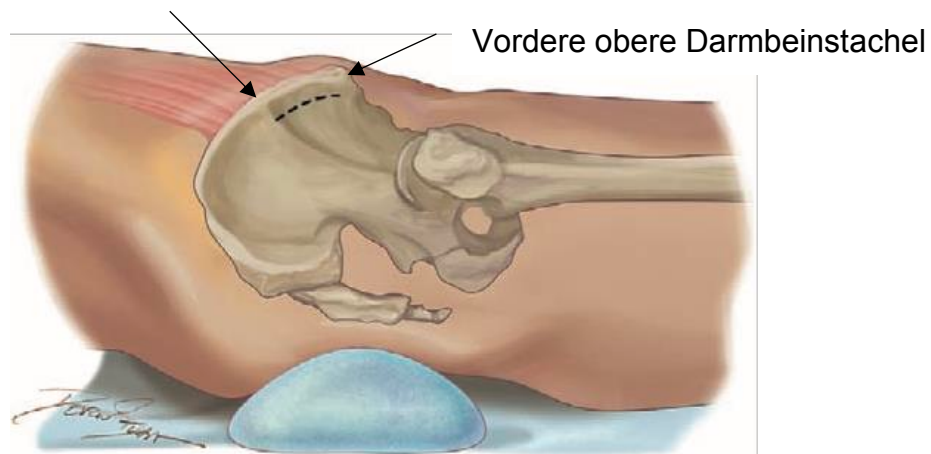


Abb. 2: Die seitliche Ansicht zeigt die Platzierung einer weichen Rolle zur Anhebung des vorderen Beckenkamms. Die Inzision (gestrichelte Linie) wird lateral zum Kamm und posterior zur vorderen Darmbeinwirbelsäule gelegt (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 1264).¹

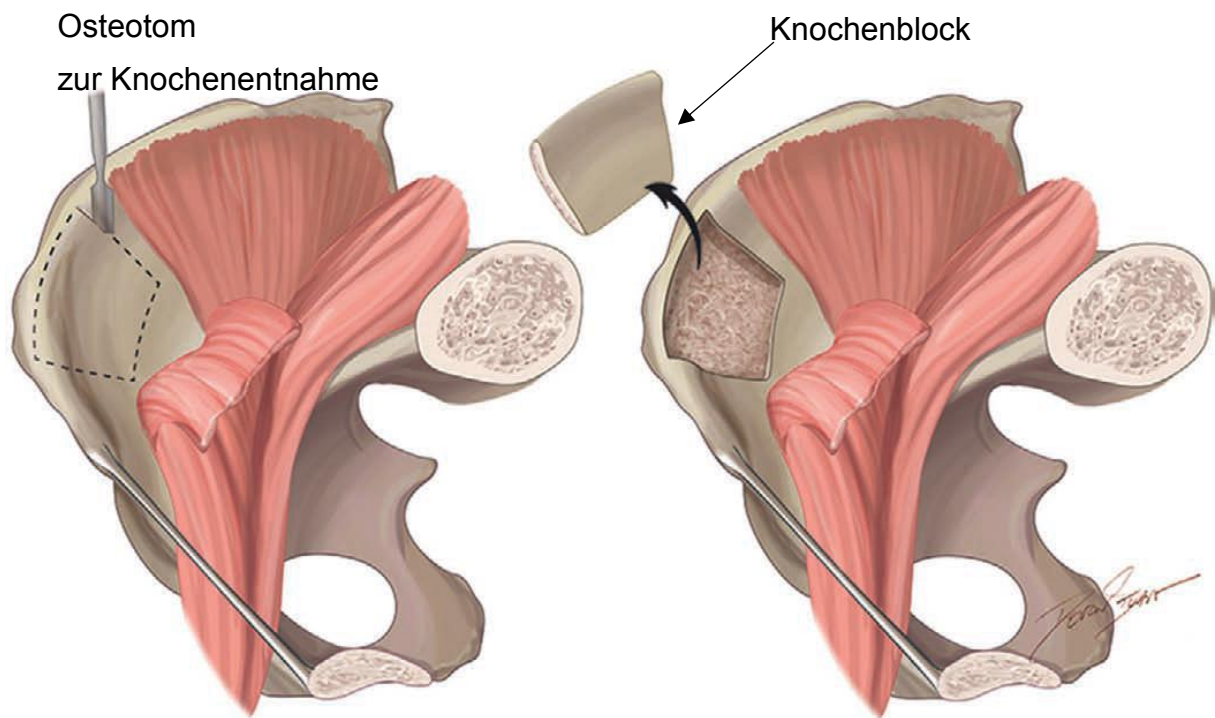


Abb. 3: Entnahme eines kortikokokkalen Blocks aus der medialen Seite des vorderen Darmbeins. Nach der Entnahme des Blocks kann die freiliegende darunter liegende Spongiosa mit Hilfe von Knochenkurrettern und -meißeln entnommen werden (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 1266).¹

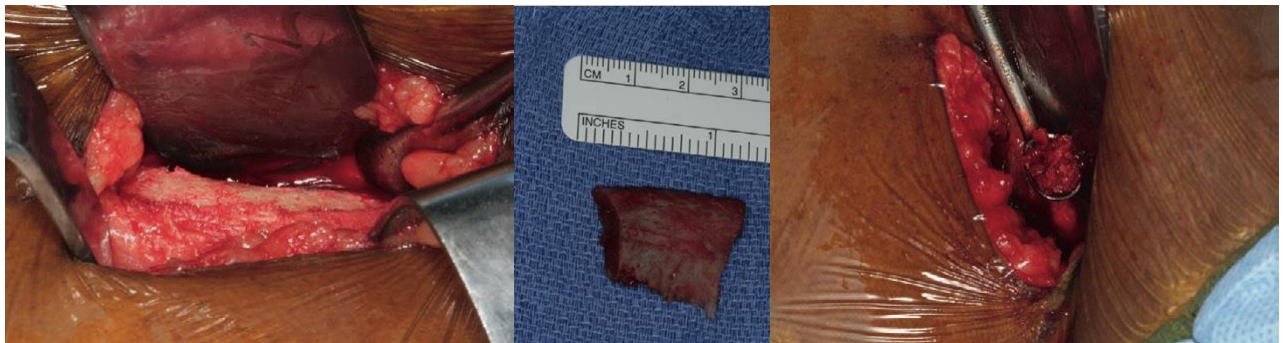


Abb. 4 a-c: a) Darstellung des vorderen Beckenkamms. b) Kortikospongiöser Block. c) Entnahme von Spongiosa mit einer Knochenkurette (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 1262).¹

4. Operationstechniken

4.1. Distraktionsosteotomie

Im Rahmen einer Distraktionsosteotomie wird nach Osteotomie und Distraktorimplantation eine postoperative Weichgewebsheilungsphase von 7 Tagen angestrebt, bevor es zur ersten Aktivierung des Distraktors. Man geht davon aus, dass sich in der interfragmentären Bruchspalte ein Kallus bildet. Nach der 7-tägigen Latenzzeit schließt sich die aktive Distraktionsphase an, in der die Fragmente einem Millimeter pro Tag auseinandergezogen werden ⁹⁷. Eine Aktivierung von 1 mm/Tag, verteilt auf zwei bis drei Einzeldistraktionen ab dem achten postoperativen Tag, hat sich als klinisch bewährtes Vorgehen etabliert ⁹⁸. Der Kallus expandiert hierbei ohne Kontinuitätsverlust in Distraktionsrichtung und verknöchert während der folgenden Konsolidierungsphase ⁹⁹.

Die Bewegung des mobilen Knochensegmentes kann in vertikaler wie in horizontaler Richtung durchgeführt werden ¹⁰⁰. Diese Operationstechnik wird vollständigshalber dargestellt und wurde in der Studie nicht berücksichtigt.

4.2. Sinuslift

Der Sinuslift beschreibt die operative Elevation und Bildung eines geschaffenen Hohlraums zwischen der Schneiderschen Membran und dem knöchernen Kieferhöhlenboden zur Einlagerung von autogenem Knochen oder Knochenersatzmaterial. Um die anatomische Situation hinsichtlich Restknochenhöhe und Sinustopografie zu erfassen, ist eine dreidimensionale Bildgebung hilfreich ¹⁰¹. Der Sinuslift wird je nach gewähltem Zugang in einen externen beziehungsweise internen Sinuslift unterschieden.

4.3. Lateraler Sinuslift

Im Jahre 1980 wurde die erste Veröffentlichung dieser Operationstechnik [mittels einer modifizierten Caldwell-Luc-Operation publiziert ^{102, 103}. Bei diesem Verfahren wird ein Zugang in die faciale Knochenwand des Sinus maxillaris eröffnet.

Es folgt das Lösen und abheben der Schneiderschen Membran der Kieferhöhle zur Bildung eines begrenzten Hohlraumes mit anschließender Implantation des Augmentationsmaterials. Bei einer Restknochenhöhe von ≥ 4 mm kann eine gleichzeitige Implantation mit dem Sinuslift in Betracht gezogen werden. Dies setzt voraus, dass eine primäre Stabilität des Implantates nach Insertion gewährleistet ist. Eine Vergleichsstudie zur Überlebensrate von Implantaten mit Sinusbodenelevation bei einzeitigem oder zweizeitigem Verfahren ergab keinen signifikanten Unterschied in Bezug auf den Behandlungserfolg ⁷³.

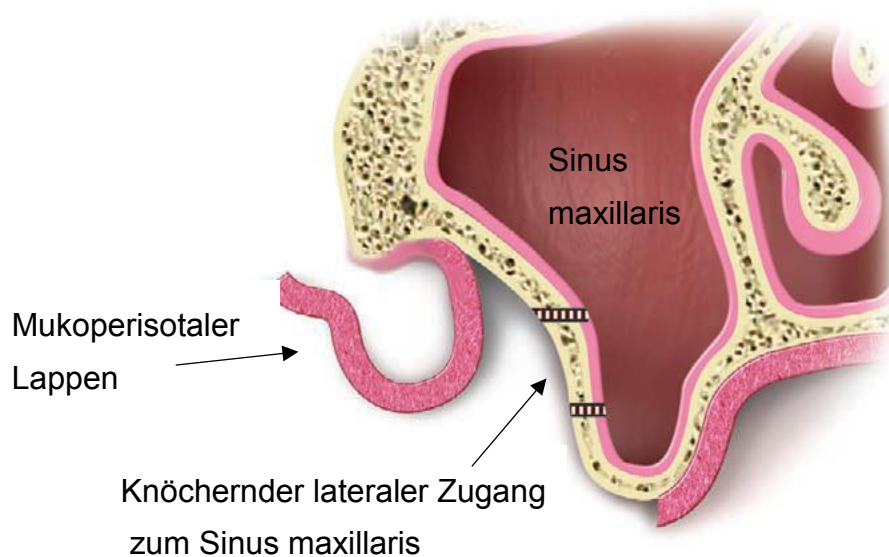


Abb. 5: Koronaler Querschnitt durch die Kieferhöhle. Lateraler Sinuslift mit krestaler Inzision und lateraler Osteotomie (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 201).¹

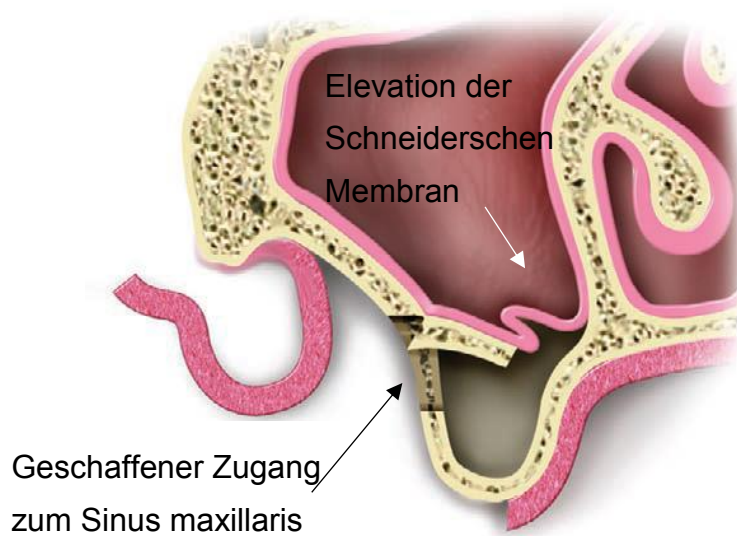


Abb. 6: : Fensterung des lateralen Sinusknochen mit Sinusmembranelevation (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 202).¹

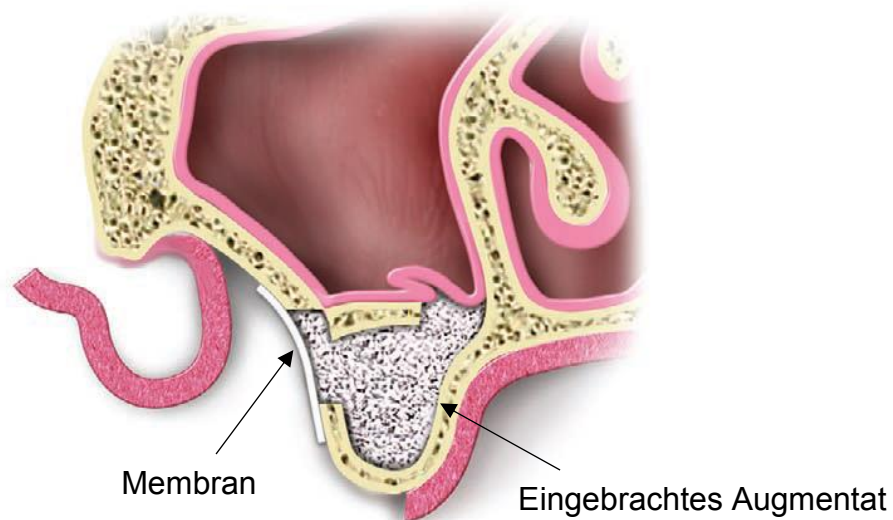


Abb. 7: Das Knochentransplantat ist an der entsprechenden Stelle eingebracht (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 202).¹

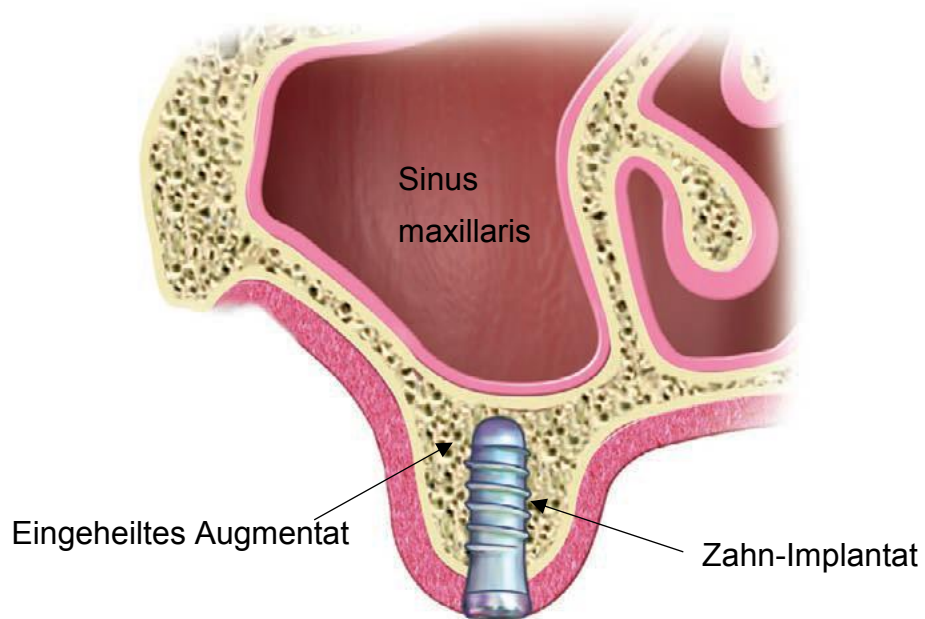


Abb. 8: Operation der zweiten Phase mit eingeheiltem reifem Knochentransplantat und Implantat (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 203).¹

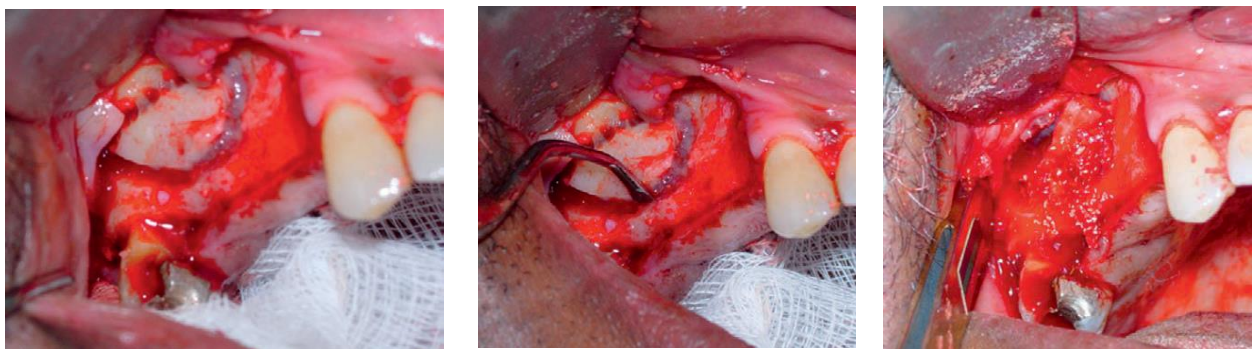


Abb. 9 a-c: a) Osteotomie entlang des lateralen Kieferhöhlenwand. b) Anhebung der Sinusmembran. c) Partikuläres allogenes Knochentransplantat entlang des Sinusbodens der rechten Kieferhöhle platziert (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 201).¹

4.4. Interner Sinuslift

Besteht annähernd ausreichend Knochen und ein vertikaler Zugewinn von 3-5 mm wird benötigt, kann eine Sinusbodenelevation auch mittels der weniger invasiven Osteotomietechnik vorgenommen werden ¹⁰⁴.

Hierbei wird über dem Alveolarkamm mittels Osteotomie-Instrumenten der kortikale Sinusboden nach cranial verschoben. Wenn nötig kein Augmentationsmaterial über den krestalen Zugang eingebracht werden ¹⁰⁵.

Eine weitere Technik, die zur Ablösung der Schneiderschen Membran über den krestalen Zugang ist das Balloon-Lift-Control™-Verfahren (Hager & Meisinger GmbH, Neuss), bei dem Ballon sukzessive mit Flüssigkeit gefüllter Ballon wird, um die Kieferhöhlenschleimhaut vom knöchernen Untergrund zu lösen ¹⁰⁶.

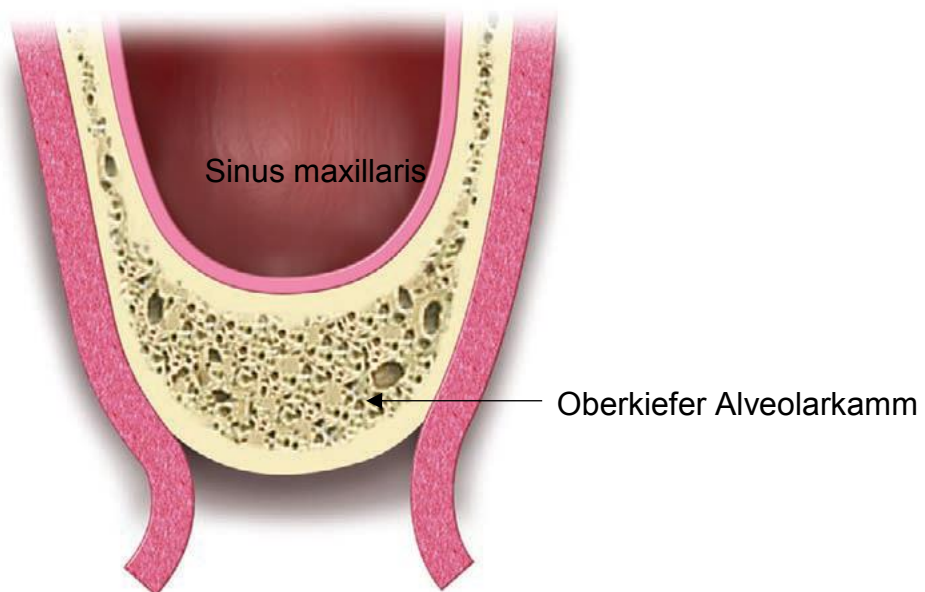


Abb. 10: Koronaler Querschnitt durch die Kieferhöhle. Transalveolärer Sinuslift mit krestaler Inzision (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 204).¹

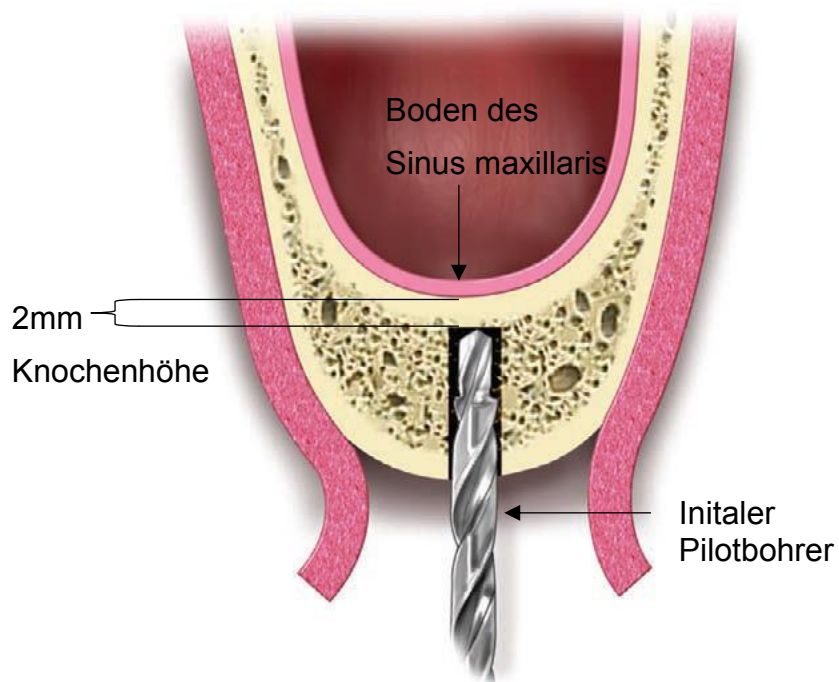


Abb. 11: Der Pilotbohrer stoppte im Abstand von 2 mm unterhalb des Kieferhöhlenbodens (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 204).¹

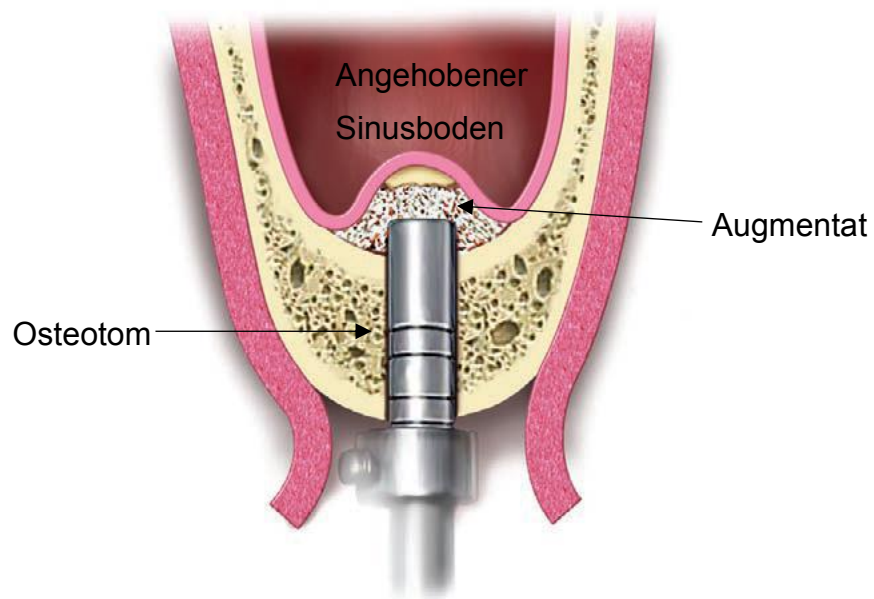


Abb. 12: Das Osteotom, das zur anfänglichen Implantatstabilität unterdimensioniert ist, wird zum Aufklopfen des Sinusbodens und Anhebung des Sinusbodens verwendet (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 205).¹

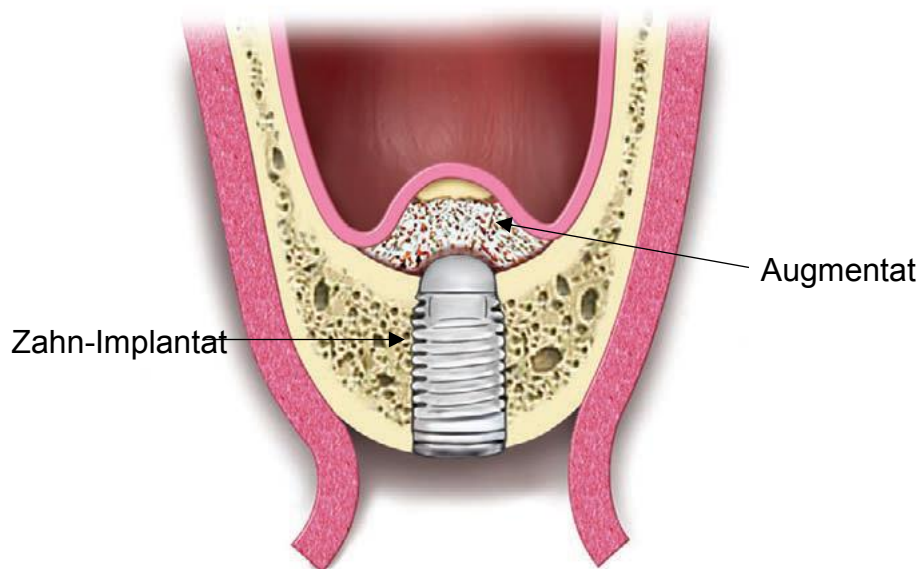


Abb. 13: Das Implantat wird platziert mit Anhebung des Sinusbodens (modifiziert nach "Atlas of oral and maxillofacial surgery: Elsevier Health Sciences; 2015, S. 205).¹

4.5. Auflagerungsosteoplastik

Die Auflagerungsosteoplastik dient zum Aufbau eines vertikalen und/oder horizontalen Volumendefizites des Alveolarfortsatzes mit autogenem oder xenogenem Knochentransplantaten. Die mechanische Stabilität und der randlose Kontakt zum Knochenlager sind bei dieser Technik Voraussetzung. Dies kann über Fixationsschrauben oder durch direkte Implantation erreicht werden ¹⁰⁷. Ebenfalls kann eine Auflagerungsosteoplastik selbst bei vertikal ausreichendem Knochenangebot angezeigt sein, wenn dies aus ästhetischen Gründen sinnvoll erscheint.

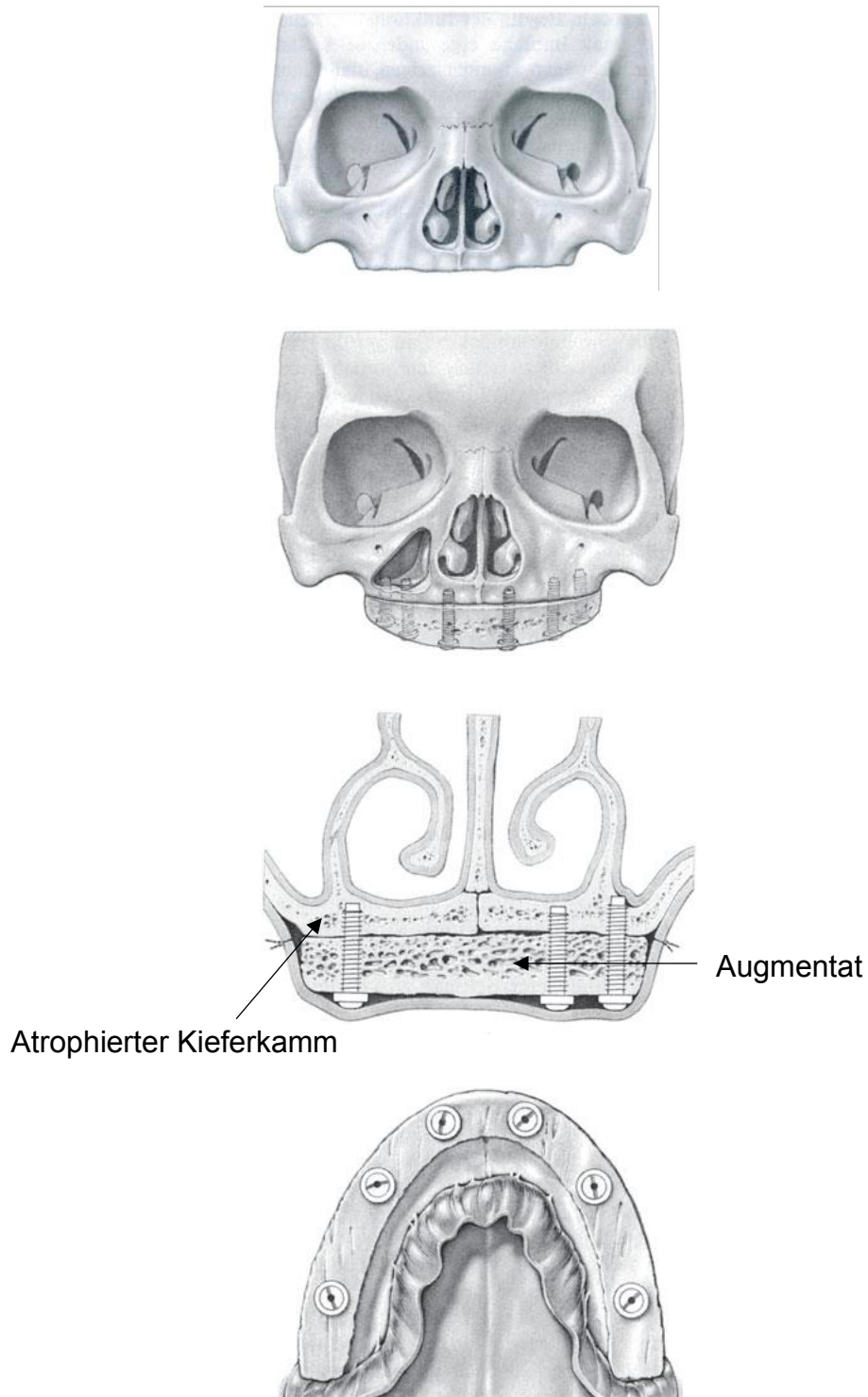


Abb. 14: Auflagerungsteoplastik im atrophischen Oberkiefer. Nach Konturierung wird das Knochentransplantat auf den atrophischen Oberkiefer aufgelagert und durch Osteosyntheseschrauben fixiert. Die Weichgewebendecke wird reponiert und durch Rückstichnähte geschlossen oder zweischichtig adaptiert (modifiziert nach Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie: Operationslehre und -atlas; 2012, S.105).²

5. Material und Methode

5.1. Patienten und Studiendesign

Von den 159 Patienten, die sich zwischen 2009 und 2017 einem ossären Beckenkammtransplantat unterzogen hatten, hatten 51 einen teilweise oder vollständig zahnlosen Oberkiefer mit unzureichender vertikaler Knochenhöhe. Ausschlusskriterien für die Studie waren:

- Patienten mit Lippen-, Kiefer-Gaumenspalten
- Patienten nach Strahlentherapie
- Patienten mit Implantatinserterion innerhalb des Auswertungszeitraums
- Antiresorptive Therapie (Bisphosphonate oder RANKL-Inhibitoren)
- Träger von herausnehmbarem Zahnersatz
- Zensierte Daten

Einschlusskriterien waren:

- Restknochenhöhe <3 mm
- Knochenbreite <6 mm
- DVT-Aufnahmen (Digitale Volumentomographie) direkt nach der Augmentation (T0) und mindestens einmal vor der Implantatinserterion (T1-T3)
- Teilweise zahnloser oder zahnloser Oberkiefer
- Verwendung eines Beckenknochen-transplantats zur Auflagerungsplastik/Onlay Graft (OG-Gruppe) oder Sinuslift (SL-Gruppe).

Insgesamt wurden 43 Patienten (26 Frauen und 17 Männer) in diese Studie aufgenommen und bis zu 12 Monate vor Implantatinserterion nachbeobachtet. Die mittlere Nachbeobachtungszeit betrug $5,59 \pm 0,265$ Monate in einer Querschnittskonstruktion (Abb. 15).

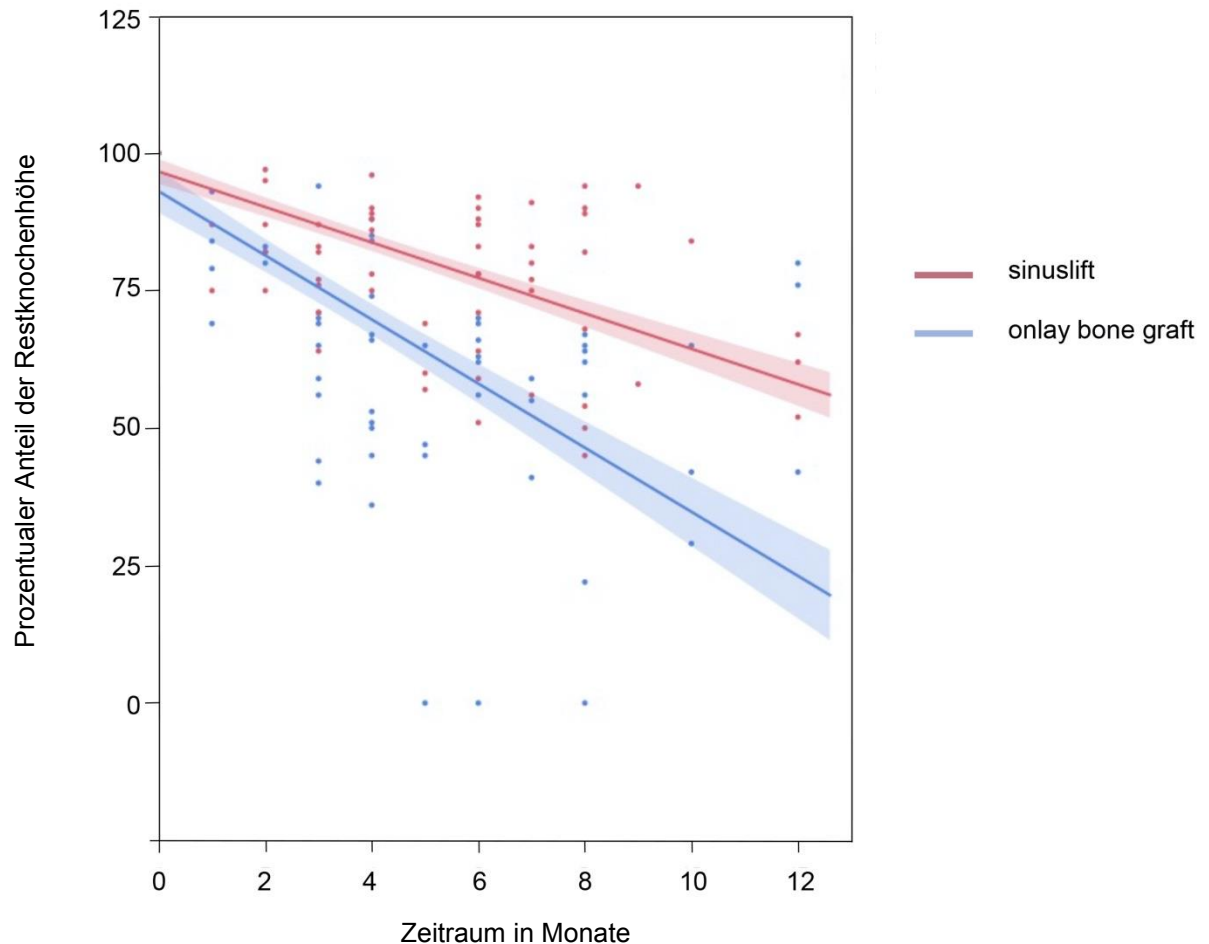


Abb. 15: Transplantatresorption nach Sinuslift (rot mit CI) und Onlay-Augmentation (blau mit CI) innerhalb von 12 Monaten nach dem Follow-up.

Für die Berechnung der Knochenresorption in jeder Gruppe von Knochentransplantaten wurden drei Zeiträume gewählt: bis zu 3 Monate, zwischen 4. und 6. Monaten und zwischen 7. und 12. Monaten.

5.2. Chirurgisches Verfahren

Die Operation beider Knochentransplantationen wurde in Vollnarkose durchgeführt. Die Patienten erhielten präoperativ ein prophylaktisches Antibiotikum (1g Sulbactam und 2g Ampicillin, Unacid® 3g, Pfizer, New York City, USA oder Clindamycin 600 mg, Ratiopharm, Ulm, Deutschland). Kortiko-spongiöse Knochentransplantate wurden aus dem Beckenkamm über einen anterioren Zugang entnommen. Onlay-Transplantate wurden an die Empfängerstelle des Alveolarkamms angepasst und mit 1,5 mm Titan-

Mikroschrauben (Medicon, Tuttlingen, Deutschland) fixiert. Für die SL-Gruppe wurde Knochen mit einer Knochenmühle (Ergoplast Mikro-Knochenmühle, Aesculap, Tuttlingen, Deutschland) zerkleinert. Danach wird der gemahlene Knochen für die Augmentation der Kieferhöhle nach der Anhebung des Sinusbodens unter Anwendung der lateralen Fenstertechnik verwendet.

5.3. Radiologische Messungen

Die postoperative Nachbeobachtung erfolgte mittels DVT.

Sie wurden einen Tag nach der Operation und bis zu dreimal innerhalb von 3-12 Monaten vor der Implantatinserktion durchgeführt. Die Knochenhöhe des Transplantats wurde bestimmt, indem der maximale vertikale Abstand vom kaudalen zum kranialen Rand des Transplantats in 5mm-Schritten (mesial bis distale Ausdehnung) in beiden Gruppen, Sidexis XG 2.63 software (Dentsply Sirona, Bensheim, Germany), gemessen wurde (Abb. 16 A). Die Messwerte wurden in Prozentwerte umgewandelt, die dem für jeden Patienten berechneten realen Knochenverlust entsprechen.

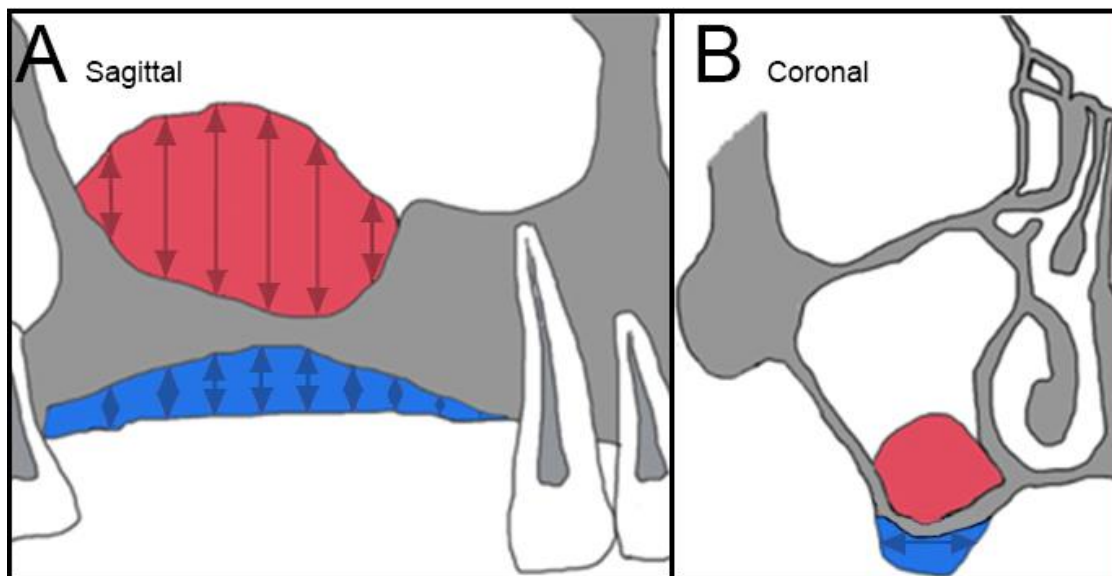


Abb. 16 A & B: Schematische Darstellung der radiologischen Beurteilung der Transplantathöhe und -breite durch das digitale Volumetomographen. Rot = Sinuslift; Blau = Onlay-Knochentransplantat.

Die Breite des augmentierten Knochentransplantats wurde in der OG-Gruppe in 5-mm-Schritten (palatinale bis vestibuläre Ausdehnung) bestimmt (Abb. 16 B).

Das durch SL gewonnene Knochenvolumen wurde nach Bestimmung eines Schwellenwerts zur Trennung von nativem und transplantiertem Knochen mit Mimics 21.0 (Materialise Europe, Leuven, Belgien) und der Software Meshmixer 3.5 (Autodesk, San Rafael, CA, USA) gemessen (Abb. 17A-D). Die Werte wurden als Prozentsätze in Bezug auf die ursprüngliche Größe des Knochentransplantats angegeben.

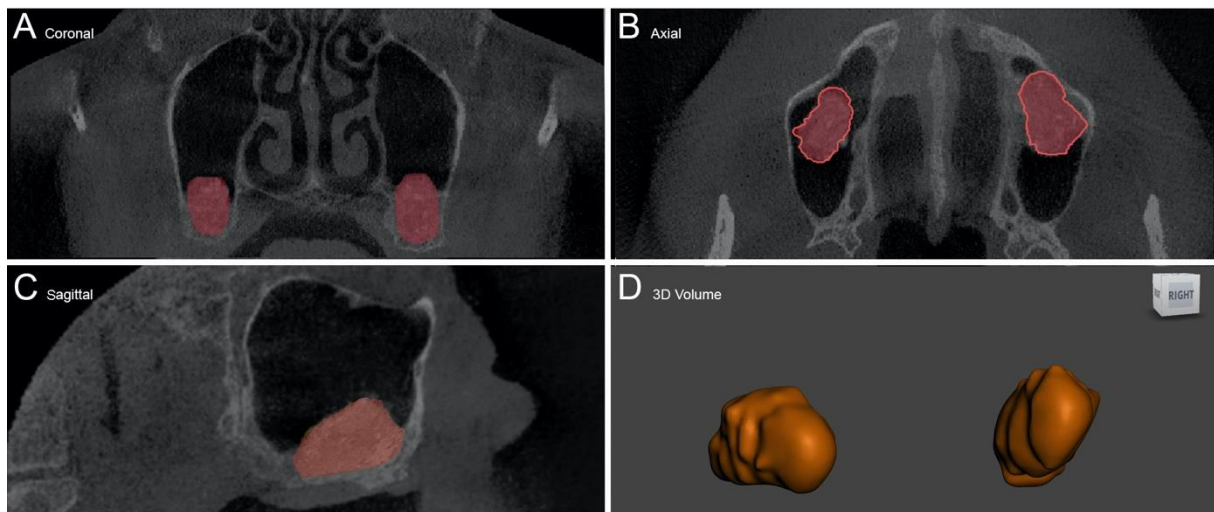


Abb. 17 A-D: Darstellung des Knochenvolumens in coronaler (A), axialer (B), sagittaler (C) Richtung so wie Volumendarstellung des gesamt Augmentatets .

5.4. Statistische Auswertung

Die Knochenhöhe direkt nach der Knochentransplantation wurde mit 100% definiert. Der Resorptionsgrad zu jedem Folgezeitpunkt wurde in Prozent berechnet. Die Werte wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung geprüft und als Mittelwert $\pm$ Standardabweichung angegeben. Unterschiede im Knochenabbau zwischen OG- und SL-Gruppe wurden mit dem t-Test für ungepaarte Proben mit IBM SPSS Statistics Version 25 (IBM, Armonk, USA) in drei definierten Zeitintervallen untersucht. Darüber hinaus wurden auch Unterschiede im zeitlichen Verlauf des Knochenhöhenverlustes innerhalb der einzelnen Gruppe durch den t-Test für gepaarte Proben untersucht. Die Ergebnisse wurden als signifikant angesehen, wenn $p \leq 0.05$. Ein nicht lineares

Regressionsmodell wurde berechnet, um den prognostischen Knochenverlust vorherzusagen (Abb. 18).

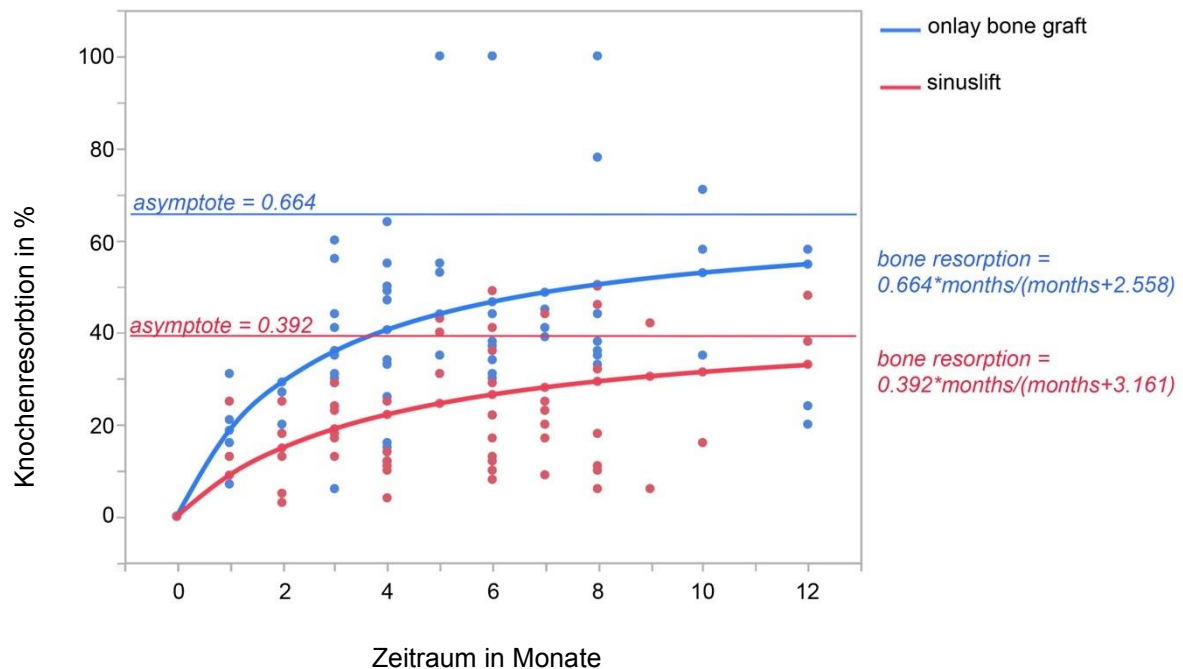


Abb. 18: Nichtlineare Regression zur Abschätzung der vorhersagbaren Transplantatresorption in % nach Zeit und Technik vor der Implantatinserion. Rot = Sinuslift; Blau = Onlay-Knochentransplantat

6. Ergebnisse

Insgesamt 73 Knochentransplantationsstellen mit OG oder SL (38 OG und 35 SL) wurden bewertet. Die augmentierte Knochenhöhe in der OG-Gruppe betrug $9,34 \pm 2,21$ mm während die Breite $12,87 \pm 2,76$ mm betrug. In der SL-Gruppe betrug die ursprüngliche Höhe im Mittel $13,67 \pm 3,72$ mm und das durchschnittliche Volumen $3,3 \pm 0,97$ cm³.

6.1. Zeitabhängige Knochenresorption in der OG-Gruppe

Betrachtet man nur die OG-Gruppe, so zeigte sich eine signifikante Abnahme der Transplantathöhe nach 3 Monaten im Vergleich zur Ausgangshöhe und eine weitere Resorption während der Nachbeobachtungszeit: $72 \pm 15\%$ nach 1-3 Monaten gegenüber $49 \pm 23\%$ nach 7-12 Monaten ($P = 0,007$) (Abb. 19)

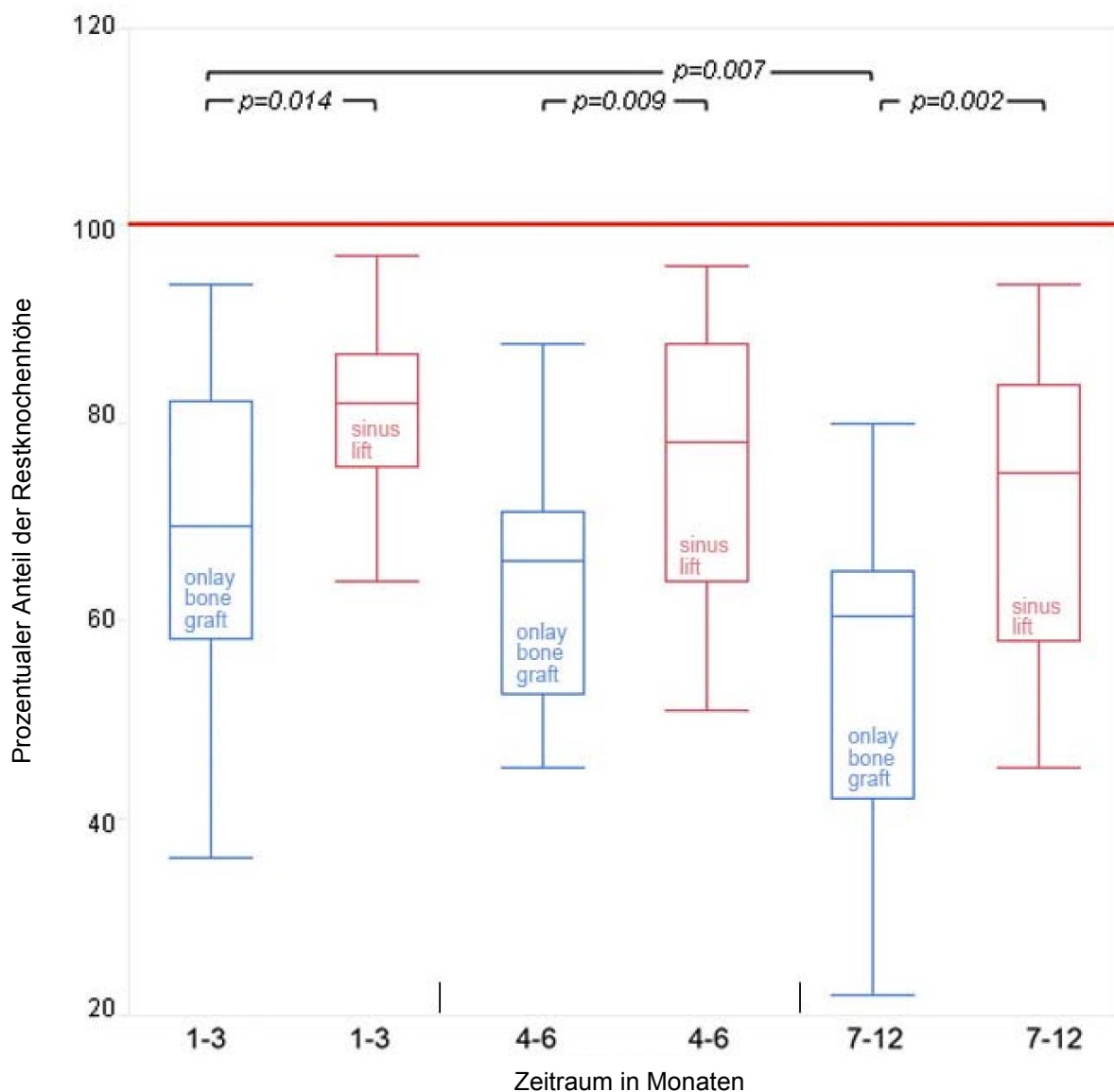


Abb. 19: Prozentualer Anteil der Resthöhe des Transplantats innerhalb der Nachbeobachtung von 12 Monaten in drei Intervallgruppen. Rot = Sinuslift; Blau = Onlay-Knochen transplantat.

Die OG-Gruppe wies auch signifikante Unterschiede in der Knochenbreite zwischen dem anfänglichen und dem nachfolgenden Untersuchungszeitraum auf.

Innerhalb der ersten 3 Monate wurde eine Alveolarkammbreite von $86 \pm 14 \%$ beibehalten. Der verbleibende Knochen nahm nach 12 Monaten auf $70 \pm 15 \%$ ab ($86 \pm 14 \%$ nach 1-3 Monaten gegenüber $76 \pm 15 \%$ nach 4-6 Monaten ($P < 0,001$); $76 \pm 15 \%$ nach 4-6 Monaten gegenüber $70 \pm 15 \%$ nach 7-12 Monaten ($P < 0,001$)).

Eine weitere signifikante Abnahme der Knochenbreite wurde zwischen 1-3 Monaten und 7-12 Monaten ($P < 0,001$) (Abb. 20).

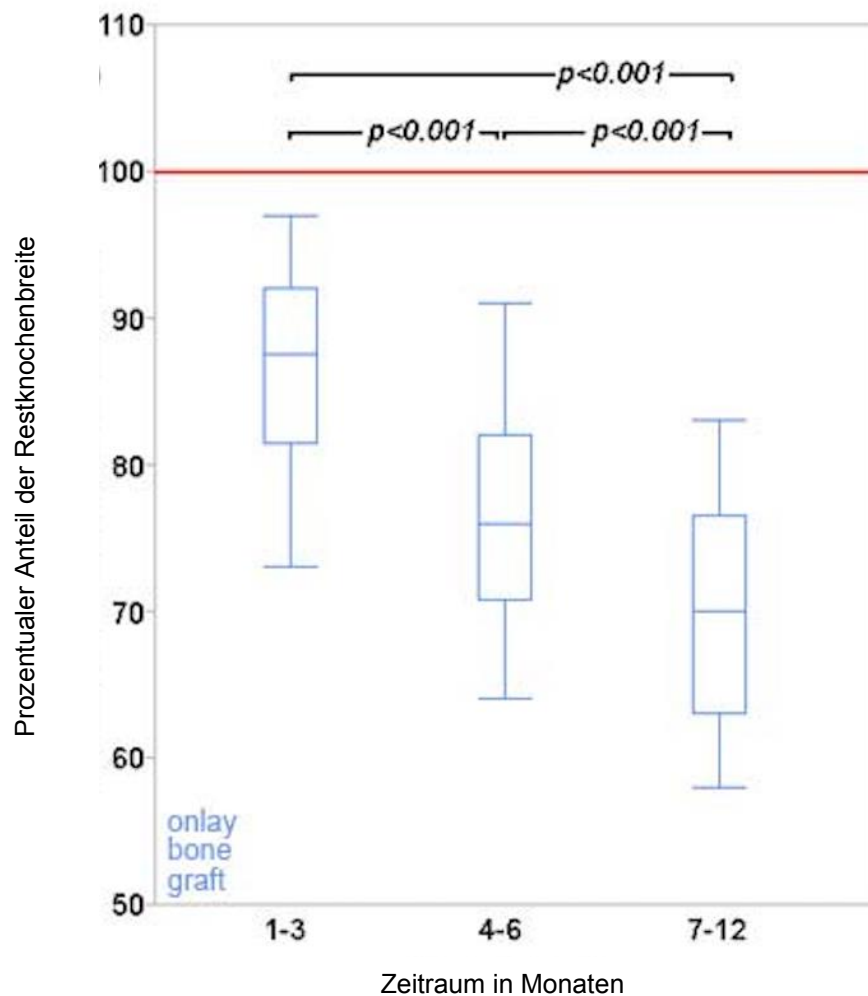


Abb. 20: Prozentsatz der verbleibenden Transplantatbreite innerhalb von 12 Monaten nach der Nachuntersuchung. Blau = Onlay-Knochentransplantat.

6.2. Zeitabhängige Knochenresorption in der SL-Gruppe

In der SL-Gruppe führte es zu einer anfänglich signifikanten Resorption der Knochenhöhe während der ersten 3 Monate. Danach blieb die Knochenhöhe jedoch konstant und reduzierte sich während der Nachbeobachtung nicht (81 ± 9 % nach 1 bis 3 Monaten gegenüber 76 ± 14 % nach 4 bis 6 Monaten ($P = 0,146$); (81 ± 9 % nach 1 bis 3 Monaten gegenüber 72 ± 15 % nach 7 bis 12 Monaten ($P = 0,134$); 76 ± 14 %

nach 4 bis 6 Monaten gegenüber $72 \pm 15 \%$ nach 7 bis 12 Monaten ($P = 0,395$) (Abb. 19).

Das Transplantatvolumen in der SL-Gruppe zeigte ebenfalls eine anfängliche signifikante Abnahme im Vergleich zum Ausgangsvolumen während der ersten 3 Monate ($92.1 \pm 4\%$ nach 1-3 Monaten; $P = 0,001$). Die Auswertung der Resorption des Transplantatvolumens im Rahmen der Nachbeobachtung zeigte eine weitere allmähliche Abnahme bis zu 12 Monaten ($92.1 \pm 4 \%$ nach 1-3 Monaten gegenüber $85,9 \pm 7 \%$ nach 4-6 Monaten ($P = 0,01$); $92.1 \pm 4\%$ nach 1-3 Monaten vs. $83 \pm 8\%$ nach 7-12 Monaten ($P < 0,001$) (Abb. 21).

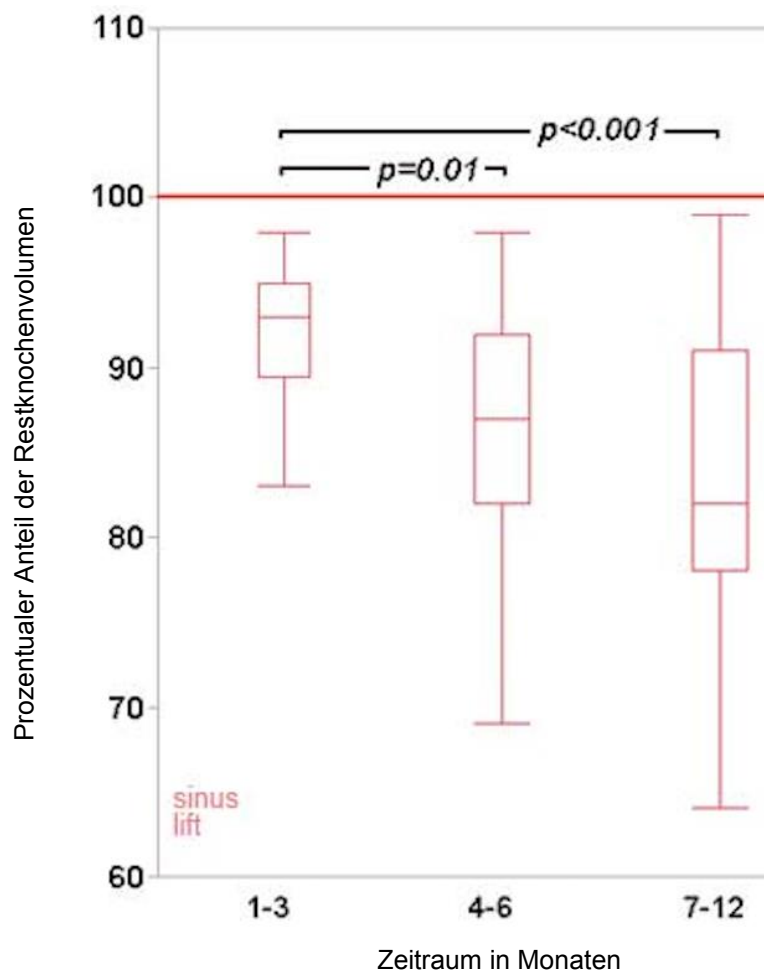


Abb. 21: Prozentsatz der verbleibenden Transplantatvolumen innerhalb von 12 Monaten nach der Nachuntersuchung. Rot = Sinuslift.

6.3. Technikbedingte Knochenhöhenresorption

In der Nachbeobachtungsphase der erste 3 Monate war die Knochenhöhe in der OG-Gruppe im Vergleich zur SL-Gruppe signifikant stärker reduziert (OG $72 \pm 15\%$ gegenüber SL $81 \pm 9\%$ nach 1-3 Monaten ($P = 0,014$)).

Der gleiche Effekt wurde auch in den anderen Nachbeobachtungszeiträumen beobachtet (OG $54 \pm 26\%$ vs. SL $76 \pm 14\%$ nach 4-6 Monaten ($P = 0,009$); OG $49 \pm 23\%$ vs. SL $72 \pm 15\%$ nach 7-12 Monaten ($P = 0,002$) (Abb. 19)).

6.4. Prognose der technikbedingten Knochenhöhenresorption

Um die Vorhersage eines möglichen Höhenverlustes des augmentierten Knochens in jeder Operationstechnik zu erzielen, wurde ein nicht lineares Regressionsmodell (asymptotischer Verlauf), das den mittleren Knochenverlust über die Zeit in Bezug auf die verwendete Technik darstellt, angewandt:

$$f(x) = \frac{a' t}{t + t_{1/2}}$$

$f(x)$ = Knochenresorption in %

a = (OG= 0.66; SL = 0.39)

t = Zeit in Monaten seit Augmentation

$t_{1/2}$ = (OG = 2.56; SL= 3.16)

Asymptotische Werte und $t_{1/2}$ wurden nach dem Levenberg-Marquardt-Verfahren berechnet, wobei Iterationen mittels nicht linearer Regression durchgeführt wurden (Abb. 17).

Dieses Regressionsmodell ermöglicht die Schätzung der proportionalen Knochenresorption ($f(x)$). a ist ein konstanter Wert für jede Technik (0,66 für OG und 0,39 für SL), " t " steht für das Zeitintervall ab der Operation in Monaten, während " $t_{1/2}$ " die Zeit angibt, die erforderlich ist, um eine Knochenmenge auf die Hälfte ihres Wertes zu reduzieren (2,56 für OG und 3,16 für SL).

Um die Berechnungsschritte zu reduzieren, wurde für jede Technik eine vereinfachte Formel erstellt, die wie folgt lautet:

Für OG:

$$BH_{Rem} = \left(1 - \frac{0.66 \times t_{months}}{t_{months} + 2.56}\right) \times BH_{initial}$$

&

Für SL:

$$BH_{Rem} = \left(1 - \frac{0.39 \times t_{months}}{t_{months} + 3.16}\right) \times BH_{initial}$$

BH_{Rem} : Verbliebene Restknochenhöhe

$BH_{initial}$: Initiale Knochenhöhe

7. Diskussion

Das Ziel dieser retrospektiven Studie war es, über einen Zeitraum von 12 Monaten die Resorptionsrate von insgesamt 73 Knochentransplantationsstellen mit OG oder SL, die chirurgisch atrophische Kieferhöhlen von 43 Patienten unter Verwendung von autogenem Knochen gesetzt wurden, zu bewerten.

Da die Kosten für die Gesundheitsversorgung in alarmierendem Maße steigen und die meisten Krankenkassen sich weigern, die Kosten für die präprotethische Behandlung zu übernehmen, entscheiden sich die meisten Patienten dafür, sich einer Implantatbehandlung im ambulanten Rahmen zu unterziehen. Dieser Behandlungsansatz minimiert nicht nur die finanziellen Kosten für den Patienten, sondern verringert auch die Angst des Patienten und Wahrnehmung über die Schwierigkeiten der Rekonstruktion des atrophierten Oberkiefers durch vermehrten Einsatz von Knochenersatzmaterialien. Dies erfolgte insbesondere für SL-Verfahren, da diese einfach ohne zusätzliche Spenderregionen verwendet werden können.

In schweren atrophischen Fällen ist der limitierende Faktor die Gewinnung ausreichender Mengen an Knochentransplantatmaterial mit minimal invasiven Verfahren. Daher werden autologe Knochentransplantate immer noch unter mehreren Bedingungen eingesetzt, wie z.B. für die erweiterte dreidimensionale Augmentation im Oberkiefer (Onlay-Transplantat), aber auch für das Sinuslifting bei bestrahlten und immunsupprimierten Patienten, da weiterhin aus dem Beckenkamm gewonnene autogener Knochen als Goldstandard für die Knochentransplantation zur Rekonstruktion des atrophischen Oberkieferalveolarkamms gilt ^{37, 108}.

Der Vorteil der Verwendung von autogenem Knochen bei rekonstruktiven Verfahren liegt in der angiogenen Proliferation, der Fülle an osteogenen Zellen und der Freisetzung von Gewebewachstumsfaktoren ²⁰.

Das Knochentransplantationsmaterial, das zur Abstützung von Zahnimplantaten im Oberkiefer verwendet wird, sollte resorbierbar sein und in kurzer Zeit durch autogenen Knochen ersetzt werden und den biomechanischen Belastungen der Okklusion standhalten zu können. Autogener Knochen erfüllt alle diese Kriterien ^{23, 42}. Es wird davon ausgegangen, dass autogener Knochen die Knochenbildung mit der Einarbeitung des Transplantatersatzes induziert und erleichtert. Bei der Verwendung

als alleiniges Transplantatmaterial hat sich jedoch gezeigt, dass autogener Knochen im ersten Jahr bis zu 50% resorbiert ^{41, 61}. Da autogener Knochen allein eine hohe Resorptionsrate aufweist, werden häufiger nicht-autogene Knochenersatzmaterialien verwendet ⁶¹. Obwohl diese Knochenersatzmaterialien von Knochenbanken oder Implantatfirmen bequemer sind und das Gesamtvolumen des Transplantatmaterials erweitern können, sind die Möglichkeiten der Einheilung und des langfristigen Remodellierens nicht vorhersehbar. Das Knochenersatzmaterial muss innerhalb kurzer Zeit resorbiert und durch neuen Knochen ersetzt werden ¹⁰⁹. Das am häufigsten verwendeten Xenotransplantat beim Sinustransplantationsverfahren ist ein boviner Hydroxylapatit. Der Nachteil dieses Transplantatsubstituts ist die langsame Resorptionsrate im Laufe der Zeit.

Histomorphologische und histomorphometrische Studien haben gezeigt, dass die Resorption dieser Art von Transplantatersatz bis zu sieben Jahre dauern kann ⁷³. Knochenersatzmaterialien wie Gläser und Keramiken werden überhaupt nicht resorbiert oder umgestaltet und passen sich funktionell nicht an die physiologischen Funktionsbelastungen des Knochens an ¹⁰. Nur neu gebildeter Knochen ist in der Lage, den funktionellen physiologischen Belastungen eines Kauverschlusses standzuhalten ⁷¹.

7.1. Knochenbiologie

Experimentelle Studien haben gezeigt, dass die embryonale Herkunft des Transplantatmaterials den Reparationsprozess während der Knochenbildung beeinflussen kann. Membranöse Knochentransplantate haben eine höhere Revaskularisierungsrate als endochondrale Knochentransplantate, was zu einem größeren Transplantatvolumen führt. Dies ist auf eine verstärkte Proliferation der Angiogenese und eine größere Anzahl von Osteoprogenitorzellen, die an der Knochenbildung beteiligt sind, zurückzuführen. Das Ergebnis ist, dass membranöse Transplantate eine kürzere Einheilzeit benötigen als endochondrale Transplantate ⁴⁸. In einer Vaskularisierungsstudie von Lorenzetti und Kollegen zeigte eine ausgedehnte Revaskularisierung um das Transplantat herum aufgrund der Angiogenese, die bereits nach vier Monaten auftrat, und zwar unter Verwendung von membranöser Spongiosa, die aus dem Beckenkamm entnommen wurde, im Vergleich zu Knochen, der aus dem

Kinn entnommen wurde ³⁸. Bei der Verwendung von kortikalen Blocktransplantaten wurden entgegengesetzte Ergebnisse beobachtet. Es gibt die Theorie, dass die dicken, kortikalen Blöcke als Barriere für die Resorption und Revaskularisierung von Knochen wirken können ⁴³.

In unserer Studie spielte die geometrische Konfiguration des Beckenkammtransplantates eine Rolle, da in der OG-Gruppe ein dichtes Blocktransplantats mit spongiösem Knochen augmentiert wurde, während bei der SL-Gruppe die endochondralen Kortikalistransplantatanteile gemahlen als Späne mit der Spongiosa vermischt augmentiert wurden. Daher sind sowohl spongiöse und kortikale Transplantate in einer geringen geometrischen Konfiguration und Dichte vorliegend, die eine verkürzte Einheilzeit und eine frühere Implantatinserterion ermöglichen.

Histologische Analysen zeigten die Vitalität des neu gebildeten Knochens, durch die große Anzahl von Osteozyten, nach nur vier Monaten Einheilzeit. Je größer die Zelldichte der osteokompetenten Zellen, desto größer ist das Potenzial für die Knochenbildung ²⁰.

7.2. Einfluss der Technik auf den Knochenabbau

Einige Patienten erhielten aufgrund der einschränkenden Rahmenbedingungen bis zu 12 Monate nach der Knochentransplantation keine Implantatinserterion, sodass der Einfluss der Technik auf die Transplantatresorption über einen längeren Zeitraum beurteilt werden konnte. Die Ergebnisse ergaben eine Resorption von bis zu 51% innerhalb der folgenden 10 Monate nach der Knochentransplantation in der OG. Die Resorption in der SL-Gruppe lag dabei bei 28% ($p = 0,002$).

Die Anfertigung von kongruenten Röntgenbildern zu verschiedenen Zeitpunkten zur Überprüfung des präimplantologisch aufgebauten Knochens ist ein limitierender Faktor der Untersuchung. Die präimplantologische Rehabilitation bei größeren Defekten durch Augmentation mit autologen Beckenkammtransplantaten ist momentan noch der Goldstandard ^{37 108}. Als kritisch wird jedoch der Langzeiterhalt des augmentierten Knochens gesehen. Der Erhalt des aufgelagerten Knochens ist abhängig davon, wie zeitnah nach Augmentation der Knochen funktionell belastet wird. Anhand von knochenszintigrafischen Kontrollen konnte gezeigt werden, dass

nach 3-4 Monaten das aufgelagerte Knochentransplantat knöchern durchbaut war und damit belastet werden konnte ³⁰. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit ähnlichen Studien, in denen über eine Volumenreduzierung von Knochentransplantaten zwischen 23% und 59% berichtet wird, je nach verwendeter Technik ^{26-28, 110}.

Im Allgemeinen wurde der technisch bedingte Transplantaterfolg jedoch hauptsächlich anhand der Überlebensraten von Implantaten, die in den transplantierten Knochen eingesetzt wurden, bewertet ²⁴.

Die Knochenresorption an der Schnittstelle zwischen der strukturierten, rauen intraknöchernen Oberfläche und dem polierten Kragenteil gilt als eine der häufigsten Implantatkomplikationen, die zum Implantatversagen führen. Diese kritische Stelle befindet sich im OG des transplantierten Oberkiefers; dies steht im Gegensatz zum SL-Transplantat, bei dem das Transplantat apikal liegt und die Schnittstelle im ursprünglichen Oberkieferknochen liegt. Daher ist die Bewertung des Implantatüberlebens als Surrogatparameter für die Transplantatresorption nach SL nicht anwendbar. Daher bietet die dreidimensionale Transplantatresorption vor der Implantatinserterion, wie sie in der vorliegenden Studie untersucht wurde, einen zuverlässigeren Parameter für die Implantatplanung.

Widersprüchliche Ergebnisse wurden von Johnson et al. und Wiltfang et al. gemeldet. Beide fanden eine ähnliche Knochenvolumenreduktion von Beckentransplantaten bei OG- und SL-Techniken (49,5% und 47% sowie 20% und 17%) ²⁷. Diese Diskrepanz ist auf den Unterschied im Studiendesign zurückzuführen, da sowohl einfache radiologische Bewertungsmethoden (Orthopantomogramm) als auch Fälle mit bereits eingesetzten Implantaten an Augmentationsstellen berücksichtigt wurden.

Diese Diskrepanz kann auf den Unterschied im Studiendesign zurückgeführt werden, da in beiden Studien einfache radiologische Auswertungsmethoden (Panoramaröntgenaufnahmen) angewandt und Fälle mit bereits inserierten Implantaten an den Transplantationsstellen berücksichtigt wurden. Obwohl der in dieser Studie vorgenommene Vergleich hauptsächlich für den lateralen Oberkiefer gilt, wo beide Techniken angewandt werden können, gilt die Resorptionsschätzung für die OG-Gruppe auch für den vorderen Teil des Oberkiefers, wo nur Onlay-Transplantate durchgeführt werden, und die eingeführte Formel ermöglicht die Bewertung der verbleibenden Knochenhöhe in Nachuntersuchungen. In Fällen mit schwerer

Kieferatrophie ist es häufig notwendig, beide Techniken gleichzeitig zu kombinieren, so dass unterschiedliche Resorptionsmuster zu beobachten sind.

7.3. Einfluss der Zeit auf den Knochenabbau

Der Einfluss der Zeit auf die Knochentransplantatresorption konnte in dieser Studie für die OG- und SL-Gruppe jeweils verifiziert werden. Bezogen auf die SL-Gruppe führte diese Technik zu einer relativ konstanten, aber nicht signifikanten Knochenresorption zwischen den Bewertungszeiträumen im Follow-up ($p = 0,146$, $0,134$ bzw. $0,395$), während die OG-Gruppe nur innerhalb der ersten 6 Monate nach dem Knochentransplantat (50% , $p = 0,007$) einen signifikanten Rückgang der Transplantathöhe zeigte (Abb.19).

Frühere Studien haben gezeigt, dass Knochentransplantation ohne Implantatinserterion zu einer subtotalen Resorption des Transplantats führt, während die gleichzeitige Implantatinserterion zusammen mit der Knochenaugmentation zu einer unzureichenden marginalen Knochenheilung führt ^{111 112}. Die Optimierung des Zeitpunkts der Implantatinserterion hat daher die Aufmerksamkeit auf dieses Feld gelenkt.

Einige Autoren empfahlen eine 2-stufige Technik einschließlich Knochentransplantation mit einer 6-monatigen Einheilzeit vor der Implantatinserterion ^{109, 113}. Spätere Studien zeigten, dass eine 3-monatige Einheilzeit für die Revaskularisierung des Transplantats ausreichend und das Einsetzen von Zahnimplantaten sicher ist ^{114, 115}.

Wiltfang et al. berichteten von anfänglichen Knochenabbau von 17-20% innerhalb der ersten 12 Monate nach der Knochentransplantation bei beiden Techniken aber keinen anschließenden weiteren signifikanten Rückgang der Knochenhöhe ^{116, 117}. Die weitere vertikale Knochenhöhenreduktion war minimal und über die Zeit konstant. Dreiseidler et al. zeigten, dass das Beckenknochen-Onlay-Transplantat nach vier Monaten einheilzeitunabhängig von der anfänglichen Knochenhöhe eine Resorption von 15% erfährt ²⁶.

Im Gegensatz zu unseren Ergebnissen fanden Johansson et al. heraus, dass ein größeres Anfangsvolumen des Transplantats mit einer höheren Resorptionsrate korreliert ²⁷. Diesen Effekt konnten wir in unseren Fällen nicht beobachten.

Eine vergleichbare Studie mit dem gefriergetrockneten iliac-Knochenallotransplantat unterschied weiter zwischen Spongiosatransplantaten und Kortikospongiösemtransplantaten für das Onlay-Knochentransplantat und zeigte nach 24 Monaten ein höheres Resttransplantat für das erstere (29,17 +/- 2,58% bzw. 19,27 +/- 2,31%) ¹¹⁸.

7.4. Entnahmemorbidität

Auch wenn die klinische Anwendung von Knochenersatzmaterialien, Wachstumsfaktoren oder Stammzellen vielversprechende Ergebnisse liefert, kann in bestimmten Indikationen noch immer nicht auf Eigenknochen als Augmentationsmaterial verzichtet werden.

Die Entnahmeregionen innerhalb dieser Studie waren der Beckenkamm. In der aktuellen Literatur finden sich zahlreiche, zum Teil sogar widersprüchliche Angaben über die zu erwartende Komplikationsrate nach autogener Knochenentnahme vom Becken. Beschrieben werden geringfügige Komplikationen wie postoperative Hämatome, temporäre Schmerzen oder temporäre Sensibilitätsstörung der Haut und schmerz- und schwellungsbedingte Bewegungseinschränkung. Dem gegenüber stehen schwere Komplikationen wie persistierende Schmerzen oder andauernde Sensibilitätsstörung. Weiter Einschränkungen für den Patienten sind die Notwendigkeit eines Klinikaufenthaltes und eine sichtbar verbleibende Narbe in der Haut des seitlichen Beckens ⁹⁴.

Die schwerwiegenden und länger als ein Jahr nach Operation andauernden sensorischen Störungen sind in den Literaturangaben zwischen 0 und 25% ⁹⁵.

Zu persistierenden Schmerzen im Zusammenhang mit der Entnahmeoperation findet man Prozentangaben von 1,3 bis 27% ⁹¹.

Intraorale Knochenentnahmen können zur Alveolarkammrekonstruktion vor dentaler Implantation mit sehr guten Ergebnissen durchgeführt werden. Die räumliche Nähe von Entnahmestelle und Augmentationsregion verringert den Zeitaufwand bei der

Anästhesie und bei den chirurgischen Maßnahmen selbst entscheidend ¹¹⁹. Durch Beschränkung des Eingriffes auf die intraorale Region wird die Durchführung in örtlicher Betäubung möglich. Ein stationärer Klinikaufenthalt entfällt.

Limitierender Faktor bei Knochenentnahme vom Ramus mandibulae ist das anatomisch begrenzte Knochenangebot. Verglichen mit der mandibulären Symphyse erlaubt diese Region nur die Entnahme von etwa der Hälfte an Knochenvolumen. Die Einbeziehung des Unterkieferkörpers in die Entnahmeregion ist zum Volumengewinn möglich, erhöht jedoch das Risiko einer direkten Schädigung des neurovaskulären Bündels und kann somit zu postoperativen Sensibilitätsstörungen führen ^{85, 119}.

Gerade hinsichtlich neuronaler Beeinträchtigungen beschreiben vergleichende Studien ein vermehrtes Auftreten nach Knochentransplantation von der mandibulären Symphyse ¹¹⁹.

8. Zusammenfassung

In der vorliegenden retrospektiven Studie wurde über einen Zeitraum von 12 Monaten die vertikale Resorptionsrate von 73 vertikal augmentierten Knochenbetten als präimplantologisches Lager untersucht. Die Auflagerungsosteoplastik mit freiem Beckenkammtransplantat wurde mit der Sinusbodenelevation verglichen.

Ziel dieser Studie war es, die zeit- und technikbedingte Resorption von autologem Beckenkammknochen bei OG im Vergleich zu SL während der Knochenremodellierung und Einheilungsphase bis zu 12 Monaten nach der Implantatinserterion zu bewerten.

Es wurden die prä- sowie postoperativen volumtomografischen Aufnahmen von insgesamt 43 Patienten ausgewertet. Es handelte sich dabei um 26 Frauen und 17 Männer. Die digitalen Aufnahmen wurden untereinander verglichen und die Knochenveränderungen zu den verschiedenen postoperativen Zeitpunkten ausgewertet.

Die Studie hat gezeigt, dass es einen signifikanten Einfluss der Zeit und der Knochentransplantationstechnik auf die nachfolgende Resorption des Beckenknochentransplantats besteht. Diese Knochenhöhenreduktion ist bei Onlay-Grafts höher als beim Sinuslifting. Sie folgt einem bestimmten Muster und ist unabhängig von der ursprünglichen Transplantathöhe und kann nach der dargestellten Formel berechnet werden.

$$f(x) = \frac{a' t}{t + t_{1/2}}$$

Dies ist besonders wichtig, um den optimalen Zeitpunkt für die Implantatinserterion nach der Einheilung von Transplantaten zu bestimmen, um das Überleben des Implantats zu verbessern.

9. Literaturverzeichnis

1. Kademani D, Tiwana P. *Atlas of oral and maxillofacial surgery*: Elsevier Health Sciences; 2015.
2. Hausamen J-E, Machtens E, Reuther JF, Eufinger H, Kübler A, Schliephake H. *Mund-, Kiefer-und Gesichtschirurgie*: Springer-Verlag; 2012.
3. Kumar P, Vinitha B, Fathima G. Bone grafts in dentistry. *Journal of pharmacy & bioallied sciences*. 2013;5(Suppl 1):S125-S127.
4. Boerrigter EM, Stegenga B, Raghoobar GM, Boering G. Patient satisfaction and chewing ability with implant-retained mandibular overdentures: A comparison with new complete dentures with or without preprosthetic surgery. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 1995/10/01/ 1995;53(10):1167-1173.
5. Strock AE. Experimental work on a method for the replacement of missing teeth by direct implantation of a metal support into the alveolus: Preliminary report. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*. 1939/05/01/ 1939;25(5):467-472.
6. Branemark PI, Adell R, Breine U, Hansson BO, Lindstrom J, Ohlsson A. Intra-osseous anchorage of dental prostheses. I. Experimental studies. *Scand J Plast Reconstr Surg*. 1969;3(2):81-100.
7. Branemark PI, Hansson BO, Adell R, et al. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period. *Scand J Plast Reconstr Surg Suppl*. 1977;16:1-132.
8. Breine U, Branemark PI. Reconstruction of alveolar jaw bone. An experimental and clinical study of immediate and preformed autologous bone grafts in combination with osseointegrated implants. *Scand J Plast Reconstr Surg*. 1980;14(1):23-48.
9. Bahat O. Treatment planning and placement of implants in the posterior maxillae: report of 732 consecutive Nobelpharma implants. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 1993;8(2):151-161.
10. Hallman M, Sennerby L, Lundgren S. A clinical and histologic evaluation of implant integration in the posterior maxilla after sinus floor augmentation with autogenous bone, bovine hydroxyapatite, or a 20:80 mixture. *Int J Oral Maxillofac Implants*. Sep-Oct 2002;17(5):635-643.
11. Kourtis SG, Sotiriadou S, Voliotis S, Challas A. Private practice results of dental implants. Part I: survival and evaluation of risk factors--Part II: surgical and prosthetic complications. *Implant Dent*. Dec 2004;13(4):373-385.
12. Tangerud T, Gronningsaeter AG, Taylor A. Fixed partial dentures supported by natural teeth and Branemark system implants: a 3-year report. *Int J Oral Maxillofac Implants*. Mar-Apr 2002;17(2):212-219.

13. Tolstunov L. Dental implant success-failure analysis: a concept of implant vulnerability. *Implant Dent.* Dec 2006;15(4):341-346.
14. Branemark PI. Osseointegration and its experimental background. *J Prosthet Dent.* Sep 1983;50(3):399-410.
15. Tallgren A. The continuing reduction of the residual alveolar ridges in complete denture wearers: a mixed-longitudinal study covering 25 years. 1972. *J Prosthet Dent.* May 2003;89(5):427-435.
16. Bahat O. Branemark system implants in the posterior maxilla: clinical study of 660 implants followed for 5 to 12 years. *Int J Oral Maxillofac Implants.* Sep-Oct 2000;15(5):646-653.
17. Higuchi KW, Folmer T, Kultje C. Implant survival rates in partially edentulous patients: a 3-year prospective multicenter study. *J Oral Maxillofac Surg.* Mar 1995;53(3):264-268.
18. Branemark PI, Adell R, Albrektsson T, Lekholm U, Lindstrom J, Rockler B. An experimental and clinical study of osseointegrated implants penetrating the nasal cavity and maxillary sinus. *J Oral Maxillofac Surg.* Aug 1984;42(8):497-505.
19. Friberg B, Grondahl K, Lekholm U, Branemark PI. Long-term follow-up of severely atrophic edentulous mandibles reconstructed with short Branemark implants. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2000;2(4):184-189.
20. Marx RE, Garg AK. Bone structure, metabolism, and physiology: its impact on dental implantology. *Implant Dent.* 1998;7(4):267-276.
21. Berretin-Felix G, Nary Filho H, Padovani CR, Machado WM. A longitudinal study of quality of life of elderly with mandibular implant-supported fixed prostheses. *Clinical Oral Implants Research.* 2008;19(7):704-708.
22. Al-Moraissi EA, Alkhutari AS, Abotaleb B, Altairi NH, Del Fabbro M. Do osteoconductive bone substitutes result in similar bone regeneration for maxillary sinus augmentation when compared to osteogenic and osteoinductive bone grafts? A systematic review and frequentist network meta-analysis. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery.*
23. Block MS, Kent JN. Sinus augmentation for dental implants: the use of autogenous bone. *J Oral Maxillofac Surg.* Nov 1997;55(11):1281-1286.
24. Nkenke E, Stelzle F. Clinical outcomes of sinus floor augmentation for implant placement using autogenous bone or bone substitutes: a systematic review. *Clin Oral Implants Res.* Sep 2009;20 Suppl 4:124-133.
25. Nystrom E, Ahlqvist J, Gunne J, Kahnberg KE. 10-year follow-up of onlay bone grafts and implants in severely resorbed maxillae. *Int J Oral Maxillofac Surg.* Apr 2004;33(3):258-262.
26. Dreiseidler T, Kaunisaho V, Neugebauer J, Zoller JE, Rothamel D, Kreppel M. Changes in volume during the four months' remodelling period of iliac crest

- grafts in reconstruction of the alveolar ridge. *Br J Oral Maxillofac Surg.* Sep 2016;54(7):751-756.
27. Johansson B, Grepe A, Wannfors K, Hirsch JM. A clinical study of changes in the volume of bone grafts in the atrophic maxilla. *Dentomaxillofac Radiol.* May 2001;30(3):157-161.
 28. Sbordone C, Toti P, Guidetti F, Califano L, Pannone G, Sbordone L. Volumetric changes after sinus augmentation using blocks of autogenous iliac bone or freeze-dried allogeneic bone. A non-randomized study. *J Craniomaxillofac Surg.* Mar 2014;42(2):113-118.
 29. Del Fabbro M, Testori T, Francetti L, Weinstein R. Systematic review of survival rates for implants placed in the grafted maxillary sinus. *Int J Periodontics Restorative Dent.* Dec 2004;24(6):565-577.
 30. Schliephake H, Neukam FW, Wichmann M. Survival analysis of endosseous implants in bone grafts used for the treatment of severe alveolar ridge atrophy. *J Oral Maxillofac Surg.* Nov 1997;55(11):1227-1233; discussion 1233-1224.
 31. Meek'ren Jv. *Heel- en geneeskonstige aenmerkingen.* De tweede druk, van zeer veel fouten gezuivert, voornamentlyk, in de voorschryvinge der geneesmiddelen. Met kopere platen versierd. ed: Te Rotterdam : by Hermanus Kentlink#agter het Stadhuis#; 1730.
 32. Burchardt H, Enneking WF. Transplantation of bone. *Surg Clin North Am.* Apr 1978;58(2):403-427.
 33. Axhausen W. The osteogenetic phases of regeneration of bone; a historial and experimental study. *J Bone Joint Surg Am.* Jun 1956;38-a(3):593-600.
 34. ALBEE FH. FUNDAMENTALS IN BONE TRANSPLANTATION: EXPERIENCES IN THREE THOUSAND BONE GRAFT OPERATIONS. *Journal of the American Medical Association.* 1923;81(17):1429-1432.
 35. Garetto LP, Chen J, Parr JA, Roberts WE. Remodeling dynamics of bone supporting rigidly fixed titanium implants: a histomorphometric comparison in four species including humans. *Implant Dent.* Winter 1995;4(4):235-243.
 36. Tong DC, Rioux K, Drangsholt M, Beirne OR. A review of survival rates for implants placed in grafted maxillary sinuses using meta-analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants.* Mar-Apr 1998;13(2):175-182.
 37. Moy PK, Lundgren S, Holmes RE. Maxillary sinus augmentation: histomorphometric analysis of graft materials for maxillary sinus floor augmentation. *J Oral Maxillofac Surg.* Aug 1993;51(8):857-862.
 38. Lorenzetti M, Mozzati M, Campanino PP, Valente G. Bone augmentation of the inferior floor of the maxillary sinus with autogenous bone or composite bone grafts: a histologic-histomorphometric preliminary report. *Int J Oral Maxillofac Implants.* Jan-Feb 1998;13(1):69-76.

39. Froum SJ, Tarnow DP, Wallace SS, Rohrer MD, Cho SC. Sinus floor elevation using anorganic bovine bone matrix (OsteoGraf/N) with and without autogenous bone: a clinical, histologic, radiographic, and histomorphometric analysis--Part 2 of an ongoing prospective study. *Int J Periodontics Restorative Dent*. Dec 1998;18(6):528-543.
40. Valentini P, Abensur DJ. Maxillary sinus grafting with anorganic bovine bone: a clinical report of long-term results. *Int J Oral Maxillofac Implants*. Jul-Aug 2003;18(4):556-560.
41. Wheeler SL. Sinus augmentation for dental implants: the use of alloplastic materials. *J Oral Maxillofac Surg*. Nov 1997;55(11):1287-1293.
42. Keller EE, Tolman DE, Eckert S. Surgical-prosthetic reconstruction of advanced maxillary bone compromise with autogenous onlay block bone grafts and osseointegrated endosseous implants: a 12-year study of 32 consecutive patients. *Int J Oral Maxillofac Implants*. Mar-Apr 1999;14(2):197-209.
43. Pinholt EM. Branemark and ITI dental implants in the human bone-grafted maxilla: a comparative evaluation. *Clin Oral Implants Res*. Oct 2003;14(5):584-592.
44. Simion M, Fontana F, Rasperini G, Maiorana C. Long-term evaluation of osseointegrated implants placed in sites augmented with sinus floor elevation associated with vertical ridge augmentation: a retrospective study of 38 consecutive implants with 1- to 7-year follow-up. *Int J Periodontics Restorative Dent*. Jun 2004;24(3):208-221.
45. Roberts WE, Turley PK, Breznjak N, Fielder PJ. Implants: Bone physiology and metabolism. *Cda j*. Oct 1987;15(10):54-61.
46. Dalen N, Olsson KE. Bone mineral content and physical activity. *Acta Orthop Scand*. 1974;45(2):170-174.
47. Ladd AL, Pliam NB. Use of bone-graft substitutes in distal radius fractures. *J Am Acad Orthop Surg*. Sep-Oct 1999;7(5):279-290.
48. Burchardt H. Biology of bone transplantation. *Orthop Clin North Am*. Apr 1987;18(2):187-196.
49. Boden SD, Schimandle JH, Hutton WC. An experimental lumbar intertransverse process spinal fusion model. Radiographic, histologic, and biomechanical healing characteristics. *Spine (Phila Pa 1976)*. Feb 15 1995;20(4):412-420.
50. Yaszemski MJ, Payne RG, Hayes WC, Langer R, Mikos AG. Evolution of bone transplantation: molecular, cellular and tissue strategies to engineer human bone. *Biomaterials*. 1996/01/01/ 1996;17(2):175-185.
51. Kalfas IH. Principles of bone healing. *Neurosurg Focus*. Apr 15 2001;10(4):E1.
52. Misch CE, Dietsh F. Bone-grafting materials in implant dentistry. *Implant Dent*. Fall 1993;2(3):158-167.

53. Aukhil I, Simpson DM, Suggs C, Pettersson E. In vivo differentiation of progenitor cells of the periodontal ligament. An experimental study using physical barriers. *J Clin Periodontol*. Oct 1986;13(9):862-868.
54. Carter TG, Brar PS, Tolas A, Beirne OR. Off-label use of recombinant human bone morphogenetic protein-2 (rhBMP-2) for reconstruction of mandibular bone defects in humans. *J Oral Maxillofac Surg*. Jul 2008;66(7):1417-1425.
55. Buckwalter JA, Glimcher MJ, Cooper RR, Recker R. Bone biology. I: Structure, blood supply, cells, matrix, and mineralization. *Instr Course Lect*. 1996;45:371-386.
56. Butterfield KJ, Bennett J, Gronowicz G, Adams D. Effect of platelet-rich plasma with autogenous bone graft for maxillary sinus augmentation in a rabbit model. *J Oral Maxillofac Surg*. Mar 2005;63(3):370-376.
57. Johnson RB, Serio FG, Dai X. Vascular endothelial growth factors and progression of periodontal diseases. *J Periodontol*. Aug 1999;70(8):848-852.
58. De Marco AC, Jardini MA, Lima LP. Revascularization of autogenous block grafts with or without an e-PTFE membrane. *Int J Oral Maxillofac Implants*. Nov-Dec 2005;20(6):867-874.
59. Nor JE, Polverini PJ. Role of endothelial cell survival and death signals in angiogenesis. *Angiogenesis*. 1999;3(2):101-116.
60. Betz RR. Limitations of autograft and allograft: new synthetic solutions. *Orthopedics*. May 2002;25(5 Suppl):s561-570.
61. Schlegel KA, Fichtner G, Schultze-Mosgau S, Wiltfang J. Histologic findings in sinus augmentation with autogenous bone chips versus a bovine bone substitute. *Int J Oral Maxillofac Implants*. Jan-Feb 2003;18(1):53-58.
62. Gray JC, Elves MW. Early osteogenesis in compact bone isografts: a quantitative study of contributions of the different graft cells. *Calcif Tissue Int*. 1979;29(3):225-237.
63. Gray JC, Elves MW. Donor cells' contribution to osteogenesis in experimental cancellous bone grafts. *Clin Orthop Relat Res*. Mar 1982(163):261-271.
64. Fleming JE, Jr., Cornell CN, Muschler GF. Bone cells and matrices in orthopedic tissue engineering. *Orthop Clin North Am*. Jul 2000;31(3):357-374.
65. Jensen J, Sindet-Pedersen S. Autogenous mandibular bone grafts and osseointegrated implants for reconstruction of the severely atrophied maxilla: a preliminary report. *J Oral Maxillofac Surg*. Dec 1991;49(12):1277-1287.
66. Bauer TW, Muschler GF. Bone graft materials. An overview of the basic science. *Clin Orthop Relat Res*. Feb 2000(371):10-27.
67. Moghadam HG, Sandor GK, Holmes HH, Clokie CM. Histomorphometric evaluation of bone regeneration using allogeneic and alloplastic bone substitutes. *J Oral Maxillofac Surg*. Feb 2004;62(2):202-213.

68. Schallhorn RG, Hiatt WH. Human allografts of iliac cancellous bone and marrow in periodontal osseous defects. II. Clinical observations. *J Periodontol*. Feb 1972;43(2):67-81.
69. Keating JF, McQueen MM. Substitutes for autologous bone graft in orthopaedic trauma. *J Bone Joint Surg Br*. Jan 2001;83(1):3-8.
70. KERWIN SC, LEWIS DD, ELKINS AD, et al. Deep-Frozen Allogeneic Cancellous Bone Grafts in 10 Dogs: A Case Series. *Veterinary Surgery*. 1996;25(1):18-28.
71. Ewers R. Maxilla Sinus Grafting With Marine Algae Derived Bone Forming Material: A Clinical Report of Long-Term Results. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2005/12/01/ 2005;63(12):1712-1723.
72. Turunen T, Peltola J, Helenius H, Yli-urpo A, Happonen R-P. Bioactive glass and calcium carbonate granules as filler material around titanium and bioactive glass implants in the medullar space of the rabbit tibia. *Clinical Oral Implants Research*. 1997;8(2):96-102.
73. Wallace SS, Froum SJ. Effect of maxillary sinus augmentation on the survival of endosseous dental implants. A systematic review. *Ann Periodontol*. Dec 2003;8(1):328-343.
74. Deslys JP. [Prions and risks for blood transfusion: the situation in 2003]. *Transfus Clin Biol*. Jun 2003;10(3):113-125.
75. Wenz B, Oesch B, Horst M. Analysis of the risk of transmitting bovine spongiform encephalopathy through bone grafts derived from bovine bone. *Biomaterials*. Jun 2001;22(12):1599-1606.
76. Turhani D, Cviki B, Watzinger E, et al. In vitro growth and differentiation of osteoblast-like cells on hydroxyapatite ceramic granule calcified from red algae. *J Oral Maxillofac Surg*. Jun 2005;63(6):793-799.
77. Damien CJ, Parsons JR. Bone graft and bone graft substitutes: a review of current technology and applications. *J Appl Biomater*. Fall 1991;2(3):187-208.
78. MacNeill SR, Cobb CM, Rapley JW, Glaros AG, Spencer P. In vivo comparison of synthetic osseous graft materials. A preliminary study. *J Clin Periodontol*. Apr 1999;26(4):239-245.
79. Vaccaro AR. The role of the osteoconductive scaffold in synthetic bone graft. *Orthopedics*. May 2002;25(5 Suppl):s571-578.
80. Widmark G, Andersson B, Ivanoff CJ. Mandibular bone graft in the anterior maxilla for single-tooth implants. Presentation of surgical method. *Int J Oral Maxillofac Surg*. Apr 1997;26(2):106-109.
81. Araujo MG, Sonohara M, Hayacibara R, Cardaropoli G, Lindhe J. Lateral ridge augmentation by the use of grafts comprised of autologous bone or a biomaterial. An experiment in the dog. *J Clin Periodontol*. Dec 2002;29(12):1122-1131.

82. Cordaro L, Amade DS, Cordaro M. Clinical results of alveolar ridge augmentation with mandibular block bone grafts in partially edentulous patients prior to implant placement. *Clin Oral Implants Res*. Feb 2002;13(1):103-111.
83. Garg AK. Lateral proximal tibia bone harvest for use in augmentation procedures. Interview. *Dent Implantol Update*. May 2001;12(5):33-37.
84. Lee CY. An in-office technique for harvesting tibial bone: outcomes in 8 patients. *J Oral Implantol*. 2003;29(4):181-184.
85. Misch CM. The harvest of ramus bone in conjunction with third molar removal for onlay grafting before placement of dental implants. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 1999/11/01/ 1999;57(11):1376-1379.
86. Braun TW, Sotereanos GC. Autogenous regional bone grafting as an adjunct in orthognathic surgery. *J Oral Maxillofac Surg*. Jan 1984;42(1):43-48.
87. Sindet-Pedersen S, Enemark H. Reconstruction of alveolar clefts with mandibular or iliac crest bone grafts: a comparative study. *J Oral Maxillofac Surg*. Jun 1990;48(6):554-558; discussion 559-560.
88. McCarthy JG, Schreiber J, Karp N, Thorne CH, Grayson BH. Lengthening the human mandible by gradual distraction. *Plast Reconstr Surg*. Jan 1992;89(1):1-8; discussion 9-10.
89. Oda T, Sawaki Y, Ueda M. Experimental alveolar ridge augmentation by distraction osteogenesis using a simple device that permits secondary implant placement. *Int J Oral Maxillofac Implants*. Jan-Feb 2000;15(1):95-102.
90. Ilizarov GA. [Basic principles of transosseous compression and distraction osteosynthesis]. *Ortop Travmatol Protez*. Nov 1971;32(11):7-15.
91. Marx RE, Morales MJ. Morbidity from bone harvest in major jaw reconstruction: A randomized trial comparing the lateral anterior and posterior approaches to the Ilium. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 1988;46(3):196-203.
92. Hall MB, Vallerand WP, Thompson D, Hartley G. Comparative anatomic study of anterior and posterior iliac crests as donor sites. *J Oral Maxillofac Surg*. Jun 1991;49(6):560-563.
93. Rudman RA. Prospective evaluation of morbidity associated with iliac crest harvest for alveolar cleft grafting. *J Oral Maxillofac Surg*. Mar 1997;55(3):219-223; discussion 223-214.
94. Hardy SP, Wilke RC, Doyle JF. Advantages of percutaneous hollow needle technique for iliac bone harvest in alveolar cleft grafting. *Cleft Palate Craniofac J*. May 1999;36(3):252-255.
95. Ahlmann E, Patzakis M, Roidis N, Shepherd L, Holtom P. Comparison of anterior and posterior iliac crest bone grafts in terms of harvest-site morbidity and functional outcomes. *J Bone Joint Surg Am*. May 2002;84(5):716-720.

96. Seiler JG, 3rd, Johnson J. Iliac crest autogenous bone grafting: donor site complications. *J South Orthop Assoc.* Summer 2000;9(2):91-97.
97. Ilizarov GA. The tension-stress effect on the genesis and growth of tissues: Part II. The influence of the rate and frequency of distraction. *Clin Orthop Relat Res.* Feb 1989(239):263-285.
98. McAllister BS, Gaffaney TE. Distraction osteogenesis for vertical bone augmentation prior to oral implant reconstruction. *Periodontol 2000.* 2003;33:54-66.
99. Block MS, Almerico B, Crawford C, Gardiner D, Chang A. Bone response to functioning implants in dog mandibular alveolar ridges augmented with distraction osteogenesis. *Int J Oral Maxillofac Implants.* May-Jun 1998;13(3):342-351.
100. Takahashi T, Funaki K, Shintani H, Haruoka T. Use of horizontal alveolar distraction osteogenesis for implant placement in a narrow alveolar ridge: a case report. *Int J Oral Maxillofac Implants.* Mar-Apr 2004;19(2):291-294.
101. Sandler NA, Johns FR, Braun TW. Advances in the management of acute and chronic sinusitis. *J Oral Maxillofac Surg.* Aug 1996;54(8):1005-1013.
102. Boyne PJ, James RA. Grafting of the maxillary sinus floor with autogenous marrow and bone. *J Oral Surg.* Aug 1980;38(8):613-616.
103. Smiler DG. The sinus lift graft: basic technique and variations. *Pract Periodontics Aesthet Dent.* Oct 1997;9(8):885-893; quiz 895.
104. Summers RB. A new concept in maxillary implant surgery: the osteotome technique. *Compendium.* Feb 1994;15(2):152, 154-156, 158 passim; quiz 162.
105. McAllister BS, Haghighat K. Bone augmentation techniques. *J Periodontol.* Mar 2007;78(3):377-396.
106. Stelzle F, Benner KU. Evaluation of different methods of indirect sinus floor elevation for elevation heights of 10mm: an experimental ex vivo study. *Clin Implant Dent Relat Res.* Jun 2011;13(2):124-133.
107. Urbani G, Lombardo G, Santi E, Tarnow D. Localized ridge augmentation with chin grafts and resorbable pins: case reports. *Int J Periodontics Restorative Dent.* Aug 1998;18(4):363-375.
108. Tadjoein ES, de Lange GL, Lyaruu DM, Kuiper L, Burger EH. High concentrations of bioactive glass material (BioGran) vs. autogenous bone for sinus floor elevation. *Clin Oral Implants Res.* Aug 2002;13(4):428-436.
109. Lundgren S, Nystrom E, Nilson H, Gunne J, Lindhagen O. Bone grafting to the maxillary sinuses, nasal floor and anterior maxilla in the atrophic edentulous maxilla. A two-stage technique. *Int J Oral Maxillofac Surg.* Dec 1997;26(6):428-434.

110. Sbordone L, Toti P, Menchini-Fabris GB, Sbordone C, Piombino P, Guidetti F. Volume changes of autogenous bone grafts after alveolar ridge augmentation of atrophic maxillae and mandibles. *Int J Oral Maxillofac Surg.* Oct 2009;38(10):1059-1065.
111. Curtis TA, Ware WH. Autogenous bone graft procedures for atrophic edentulous mandibles. *J Prosthet Dent.* Oct 1977;38(4):366-379.
112. Nystrom E, Kahnberg KE, Gunne J. Bone grafts and Branemark implants in the treatment of the severely resorbed maxilla: a 2-year longitudinal study. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 1993;8(1):45-53.
113. Verhoeven JW, Cune MS, Ruijter J. Perimucosal implants combined with iliac crest onlay grafts used in extreme atrophy of the mandible: long-term results of a prospective study. *Clin Oral Implants Res.* Feb 2006;17(1):58-66.
114. Heberer S, Ruhe B, Krekeler L, Schink T, Nelson JJ, Nelson K. A prospective randomized split-mouth study comparing iliac onlay grafts in atrophied edentulous patients: covered with periosteum or a bioresorbable membrane. *Clin Oral Implants Res.* Mar 2009;20(3):319-326.
115. Semper W, Heberer S, Nelson K. Retrospective analysis of bar-retained dentures with cantilever extension: marginal bone level changes around dental implants over time. *Int J Oral Maxillofac Implants.* Mar-Apr 2010;25(2):385-393.
116. Wiltfang J, Schultze-Mosgau S, Nkenke E, Thorwarth M, Neukam FW, Schlegel KA. Onlay augmentation versus sinuslift procedure in the treatment of the severely resorbed maxilla: a 5-year comparative longitudinal study. *Int J Oral Maxillofac Surg.* Dec 2005;34(8):885-889.
117. Wiltfang J, Jatschmann N, Hedderich J, Neukam FW, Schlegel KA, Gierloff M. Effect of deproteinized bovine bone matrix coverage on the resorption of iliac cortico-spongy bone grafts - a prospective study of two cohorts. *Clin Oral Implants Res.* Feb 2014;25(2):e127-132.
118. F GFT, Cortes ARG, Hernandez Vallejo G, Cabrejos-Azama J, Tamimi F, Torres J. Clinical and radiographic outcomes of allogeneic block grafts for maxillary lateral ridge augmentation: A randomized clinical trial. *Clin Implant Dent Relat Res.* Oct 2019;21(5):1087-1098.
119. Raghoobar, G. M., Meijndert, L., Kalk, W. W., & Vissink, A. (2007). Morbidity of mandibular bone harvesting: a comparative study. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 22(3).

10. Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Dr. Samer Hakim bedanken, der mich nicht nur im Rahmen dieser Dissertation bestens betreut hat, sondern mir das freundliche Team und die nötigen Mittel zur Verfügung gestellt und meine Ideen und Vorschläge umfassend und produktiv unterstützt hat.

Dem Direktor der Klinik für Kiefer- und Gesichtschirurgie des UKSH, Campus Lübeck, Herrn Prof. Dr. Dr. Siegfried Siegfried danke ich für die freundliche Aufnahme und die angenehme Zusammenarbeit.

Des Weiteren danke ich Herrn Dr. Dr. Daniel Steller für die tolle Unterstützung bei dem Aufbau des Untersuchungsmodells und die Durchführung der Messungen sowie für seine fachlichen Anregungen.

Für die konstruktive Manuskriptkorrektur bedanke ich mich besonders bei Herrn Dr. Fazlollah Mirzaei und Herrn Dr. Dr. Ali Shakery Teherany.

Zu guter Letzt danke ich meiner gesamten Familie dafür, dass sie mir das Studium der Zahnmedizin ermöglicht haben und mich in jeglicher Hinsicht und zu jeder Zeit unterstützt haben.