

Aus dem Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität zu Köln
Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und plastische Gesichtschirurgie
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. Dr. med. dent. J. E. Zöller

Retrospektive, radiologische Analyse des periimplantären Knochenabbaus dentaler Implantate mit unterschiedlichen Durchmessern

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der zahnärztlichen Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Paul Henn
aus Pforzheim

promoviert am 09. Februar 2023

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink

1. Gutachter: Privatdozent Dr. med. dent. J. Neugebauer

2. Gutachter: Universitätsprofessor Dr. med. D.-C. Maintz

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten

Prof. Dr. med. dent. Jörg Neugebauer - Überlassung des Themas und Betreuung
Sebastian Waßenberg (punkt05 Statistik) - Statistische Auswertung

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Der dieser Arbeit zugrunde liegenden Datensatz wurde von mir anhand der Patientenakten der Praxis Dr. Bayer und Kollegen in Landsberg am Lech erstellt.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Messergebnisse wurden von mir ohne Unterstützung Dritter erhoben.

Die in dieser Arbeit angegebenen Messungen sind nach Einweisung und Kalibrierung durch meinen Betreuer Prof. Dr. med. dent. Jörg Neugebauer erfolgt.

Die Operationen an den Patienten der vorliegenden Studie wurden durch Herrn Prof. Dr. med. dent. Jörg Neugebauer durchgeführt.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 08.05.2022

Unterschrift: 

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Neugebauer für die Überlassung des Dissertationsthemas und die stetige Hilfsbereitschaft in allen Belangen rund um das Promotionsthema, sowie meiner Familie die mich fortwährend unterstützt und gefördert hat. Danke.

Für meine Eltern

Widmung

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis:.....	8
1. Zusammenfassung	9
2. Einleitung.....	10
2.1 Klinische Relevanz Durchmesserreduzierter Implantate	10
2.2 Biologie der dentalen Implantologie	12
2.2.1 Knochenstoffwechsel.....	12
2.2.2 Initiale Interaktionen zwischen Implantat und periimplantärem Gewebe	15
2.2.3 Osteokonduktion am Implantat.....	16
2.2.4 Klinische Parameter der Knochenqualität	17
2.2.5 Dentoalveoläre Atrophie.....	18
2.2.6 Systemische Risikofaktoren in der dentalen Implantologie.....	20
2.3 Behandlungsstrategien der dentalen Implantologie	21
2.3.1 Durchmesserreduzierte Implantate	21
2.3.2 Klassifikation der Knochenersatzmaterialien nach deren biologischen Ursprung.....	23
2.3.3 Sofortimplantation - Sofortbelastung.....	28
2.3.4 Sofortbelastete Implantate	30
2.3.5 Fazit.....	31
2.4 Zielsetzung	32
3. Material und Methoden.....	33
3.1 Deskriptive Parameter	33
3.1.1 Auswahl der Patienten	33
3.1.2 Patientenkollektiv	34
3.1.3 Falldarstellung Implantation durchmesserreduzierter Implantate	35
3.1.5 Implantatangulation	39
3.1.9 Lokalisation der Implantate nach Kiefer.....	42
3.1.12 Augmentationsverfahren.....	44
3.2 Untersuchungsprotokoll	45
3.4 Datenverarbeitung und statistische Auswertung	48
3.4.1 Ethikantrag.....	48
3.4.2 Sicherung der Datenqualität.....	48
3.4.3 Statistische Methoden.....	48
4. Ergebnisse.....	50
4.1.2 Vertikales Knochenniveau 3,5mm DRI versus 4,0mm SDI.....	51
4.1.3 Horizontales Knochenniveau 3,5mm DRI versus 4,0mm SDI	52
4.2 Implantatlokalisierung	53
4.3 Implantationszeitpunkt - Sofortimplantation versus verzögerte Implantation.....	55
4.4 Belastungszeitpunkt – Sofortbelastung versus verzögerte Belastung	57
4.5 Augmentation	59
5. Diskussion.....	63
5.1 Kritische Betrachtung des Studiendesigns.....	64
5.2 Biomechanik der DRI	65
5.3 Knochenniveau der DRI im teilbezahnten und zahnlosen Kiefer	66

5.4 Sofortimplantation	69
5.5 Sofortbelastung.....	70
5.6 Augmentationen und durchmesserreduzierte Implantate	71
6. Literaturverzeichnis	73
7. Anhang.....	78
7.1 Tabellenverzeichnis	78
7.2 Abbildungsverzeichnis	78

Abkürzungsverzeichnis:

SDI	Standard Durchmesser Implantate
DRI	Durchmesserreduzierte Implantate
LKIS	Lakunäres-kanalikulläres-intraossäres System
SOBL	Surface Osteoblasts
GBR	Guided Bone Regeneration
VEGF	Vascular endothelial growth factor
BSP	Bone sialoprotein
FEM	Finite-Elemente-Analyse
PDGF	Platelet-derived growth factor

1. Zusammenfassung

Absicht: Grundlage einer erfolgreichen Implantation ist ein langzeitstabiles periimplantäres Knochenniveau. Zur Sicherung des stabilen Knochenniveaus liegen verschiedene Strategien vor. Diese retrospektive Studie untersuchte das periimplantäre Knochenniveau von durchmesserreduzierten Implantaten in unterschiedlichen Indikationsklassen der dentalen Implantologie im Kontext verschiedener operativer und prothetischer Versorgungsstrategien.

Methode: 123 Patienten wurden mit 326 Implantaten versorgt. 247 Implantate waren durchmesserreduziert, die übrigen 79 Implantate waren Standardimplantate. Die mittlere Beobachtungszeit betrug 24,4 und die maximale Beobachtungszeit 76,0 Monate. Ausgewertet wurde das periimplantäre Knochenniveau der Implantate unter Berücksichtigung des Durchmessers, sowie des Implantationszeitpunktes, Belastungszeitpunktes, Augmentationsumfanges und der Lokalisation der Implantate.

Ergebnis: Innerhalb der beobachteten Fälle gab es eine Explantation eines durchmesserreduzierten Implantates nach 91 Tagen. Es konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Verwendung von DRI oder SDI in den beobachteten Indikationsklassen nachgewiesen werden. Darüber hinaus ließ sich kein signifikanter Unterschied für den Implantationszeitpunkt, Belastungszeitpunkt, sowie die Anwendung von zweizeitigen Augmentationen, hinsichtlich der Stabilität des periimplantären Knochenniveaus nachweisen.

Fazit: Durchmesserreduzierte Implantate stellen eine suffiziente Behandlungsoption in horizontal defizitären Knochenverhältnissen dar. Die Verwendung von durchmesserreduzierten Implantaten im Seitenzahnbereich zeigt vielversprechende Ergebnisse und kann für Implantate mit 3,5mm Durchmesser unter Berücksichtigung der individuellen Patientensituation indiziert sein. Die Sofortimplantation und Sofortbelastung von DRI und SDI zeigte in der vorliegenden Studie gute Ergebnisse und kann unter Ausschluss von operativen und prothetischen Risikofaktoren das Behandlungsprotokoll erheblich verkürzen.

2. Einleitung

Die dentale Implantologie ist als integraler Bestandteil der modernen Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde der kontinuierlichen Erweiterung ihres Indikationsspektrums ausgesetzt¹. Die stetige Verbesserung der biomechanischen Eigenschaften dentaler Materialien hat in Kombination mit der Weiterentwicklung chirurgischer Therapien die ehemaligen Grenzen der Implantologie durchbrochen². Die Implantologie hat in den vergangenen Jahrzehnten in zahlreichen Studien und Langzeitbeobachtungen bewiesen, dass sie eine evidenzbasierte Behandlungsalternative und Ergänzung zu konventionellen zahnmedizinischen Versorgungen darstellt³⁻⁷.

2.1 Klinische Relevanz durchmesserreduzierter Implantate

Es gibt verschiedene Strategien, um die Implantate, trotz reduzierten Knochenangebotes, primär stabil zu inserieren und eine erfolgreiche, langzeitstabile Implantation zu gewährleisten^{8,9}. Die Tatsache, dass ein Mindestabstand von 1,5mm zu den Nachbarzähnen notwendig ist, um das parodontale Ligament des Nachbarzahnes nicht zu verletzen, ist evident. Dies bedeutet im Falle eines 4mm Standard Implantates, dass ca. 7 mm horizontales Knochenangebot in mesio-distaler Ausdehnung notwendig ist, um eine suffiziente Insertion zu gewährleisten². Darüber hinaus kann die Implantation von Standardimplantaten in atrophen Knochenverhältnissen besonders beim schmalen Kieferkamm komplikationsbehaftet sein.

In diesem Wissen werden seit einigen Jahren sogenannte durchmesserreduzierte Implantate (DRI) verwendet, mit dem Ziel bei defizitärem horizontalem Knochenangebot das Indikationsspektrum für dentale Implantate zu erweitern^{10,11}. Implantate mit einem Durchmesser kleiner oder gleich 3,5mm gelten als durchmesserreduzierte Implantate¹². Neben dem Ausbleiben von periimplantären Entzündungen ist die Stabilität des periimplantären Knochenniveaus ein Erfolgsfaktor für eine Implantatversorgung¹³. Die Einflussfaktoren, die über den Langzeiterfolg einer Implantatversorgung entscheiden, sind vielfältig und komplex. Der entscheidende Faktor ist hierbei die suffiziente und langzeitstabile Osseointegration des Implantates. Dabei soll es nach der Heilung des geschaffenen Knochendefektes am Alveolarkamm, in den auf die Implantatinsertion folgenden Wochen, zu einer bioinerten

Verbundosteogenese zwischen Titanimplantat und Knochen kommen. Die Weiterentwicklung der eingesetzten Materialien dentaler und enossaler Implantate zielt in der Zukunft auf die bioaktive, physikochemische Verbundosteogenese ab, die zum Beispiel bei Trikalziumphosphatkeramik und Glaskeramik eintreten soll¹⁴. Bis dato sind vor allem Operationsverfahren etabliert, die sich der klassischen Implantatdurchmesser bedienen. Diese liegen zumeist in einem Bereich zwischen 4,0-5,0mm. Im vergangenen Jahrzehnt hat sich ein neues Spannungsfeld etabliert, das erstmals die Erfolgsaussichten von konventionellen Augmentationsverfahren und der Verwendung von Standardimplantaten mit dem Einsatz von minimalinvasiven Implantationstechniken mit durchmesserreduzierten Implantaten vergleicht. In der Vergangenheit wurden Implantate häufig an den Stellen gesetzt, die nach Beurteilung der Knochenqualität und Quantität als suffizientestes Implantatlager erschienen. Mittlerweile hat ein Paradigmenwechsel stattgefunden, der die Implantation am prothetisch günstigsten Ort in den Vordergrund rückt. Oftmals ist eine primärstabile Implantation an prothetisch günstiger Stelle nicht möglich, sodass das Knochenangebot in horizontaler oder vertikaler Dimension durch Augmentation des Knochens verbessert werden muss. Die präimplantologische Augmentation unzureichender horizontaler Knochenverhältnisse geht mit Risiken einher. Sowohl die Prozessqualität der Implantation als auch die individuelle genetische, biochemische und mikrobielle Prädisposition sind Einflussfaktoren, die zu Misserfolgen führen können. Demzufolge scheint es evident, dass ein minimalinvasiveres Verfahren durch Verwendung durchmesserreduzierter Implantate (DRI) diese Risikofaktoren reduziert und die Erfolgsaussichten bei unzureichendem horizontalem Knochenangebot steigert. Ob durchmesserreduzierte Implantate eine wissenschaftlich fundierte Alternative zu Augmentationsverfahren und der Verwendung von Standardimplantaten darstellen, ist nicht abschließend geklärt. Ebenso ist das Verhalten von DRI unter den Bedingungen von Sofortimplantation und Sofortbelastung, sowie deren Verwendung im Seitenzahnbereich nicht ausreichend untersucht. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit diesen Fragestellungen und soll einen weiteren Anhaltspunkt schaffen, um die Möglichkeiten und Grenzen der durchmesserreduzierten Implantate besser definieren zu können.

2.2 Biologie der dentalen Implantologie

2.2.1 Knochenstoffwechsel

Prinzipiell werden im Skelett- und Alveolarknochen zwei Knochenarten unterschieden. Die Spongiosa stellt ein wabenartiges, von Knochenmark durchsetztes, trabekuläres Netzwerk aus Knochenstrukturen dar. Ihnen ist gemeinsam, dass sie sich nach den Belastungstrajektorien im Knochen ausrichten¹⁵. Der Lamellenknochen ist ein komplexes dreidimensionales Gewebe. In seiner Histomorphologie verlaufen gebündelte, parallel angeordnete, mineralisierte Kollagenfibrillen in einem den Belastungstrajektorien entsprechenden Muster.

Die Knochenbildung stellt einen komplexen, dreidimensionalen Prozess dar, der unter Beteiligung verschiedener Zellpopulationen abläuft. In der Knochenbildung werden zwei verschiedene Mechanismen unterschieden. Die intramembranöse Knochenbildung wird durch die innere periostale, osteogene Schicht vermittelt, wohingegen die enchondrale Knochenbildung entlang eines mineralisierten Knorpelgerüsts stattfindet. Diese beiden Mechanismen sind in der Fraktur- und Osteotomieheilung essenziell und stellen somit einen Schlüsselpunkt für die Einheilung sämtlicher enossaler Implantate dar.

Die ultrastrukturelle Baueinheit der Knochentrabekel in der Spongiosa sind die Knochenlamellen. Diese sind eine mineralisierte Struktur aus Kollagenfasern des Kollagentyp I mit eingelagerten Hydroxylapatit Kristallen, die im Gegensatz zu den Knochenlamellen der Kompakta, parallel verlaufen. Die Kompakta stellt eine homogene, aus konzentrisch angeordneten Knochenlamellen bestehende Knochenstruktur dar, die sich über ein hochspezialisiertes System, bestehend aus ruhenden Osteozyten und deren Zellfortsätzen, zusammensetzt. Sie stehen wiederum über die Ausbildung von Gap-junctions mit den Oberflächenosteoblasten (SOBL) in Kontakt¹⁵. Die konzentrischen Systeme in den Knochenlamellen der Kompakta bezeichnet man als Osteone¹⁶. Histologisch setzt sich ein Osteon aus einem zentralen Havers-Kanal und davon orthogonal abzweigenden Volkmann'schen Kanälen zusammen. Das Innere der Havers-Kanäle ist mit fenestriertem Endothel ausgekleidet und stellt einen substanziellen Bestandteil der Blut- und Nährstoffversorgung des Osteons dar, da in der Kompakta, im Gegensatz zur Spongiosa, eine

diffusionsgetragene Nährstoffversorgung nicht möglich ist. Die Osteozyten liegen zwischen 3-5µm breiten Knochenlamellen, eingebettet in sogenannten Lakunen¹⁵.

Ausgehend von den Lakunen folgen ihre Zellfortsätze der konzentrischen Organisation des Osteons durch das lakunäre-kanalikulläre-intraosseäre System. (LKIS). Im Gegensatz zur konzentrischen Organisation des LKIS in den Osteonen des Lamellenknochens der Kompakta, verlaufen die Lamellen der Spongiosa innerhalb der Trabekel parallel und besitzen keine Blutgefäße. Letzteres begründet sich darin, dass die räumliche Distanz zwischen dem medullären System der Spongiosa und dem LKIS in den Lamellen der Spongiosa verhältnismäßig gering ist und eine Nährstoffversorgung per Diffusion gewährleistet werden kann. Die Vorstufe des Lamellenknochens ist der unreife Geflechtknochen, der sich vor allem initial in der Frakturheilung als frühe Knochenmatrix zeigt. Die Synthese der Knochenmatrix erfolgt in zwei wesentlichen Schritten: der Ausbildung eines Gerüsts, bestehend aus Geflechtknochen, und der Umwandlung dessen in Lamellenknochen¹⁵.

In der Alveole liegen die Sharpey'schen Fasern vor, in denen die Zähne in Form einer Gomphosis verankert sind. Dabei erfolgt eine Umwandlung des axial intrusiven Kaudruckes in eine Zugbelastung, die auf die Sharpey'schen Fasern wirkt. Die Umlenkung der Druckbelastung in eine Zugbelastung ist bei Implantaten nur bedingt vorhanden. Implantate heilen ankylosiert ein und besitzen keinen fibroossären Halteapparat. Eine Konsequenz der verringerten Durchmesser von DRI Implantaten ist, dass sich mit der Verringerung ihrer Fläche gegenüber Standard Implantaten (SDI) simultan der Druck auf den umliegenden Knochen erhöht. Dabei wird die interzelluläre Kommunikation des Knochengewebes durch die Mechanotransduktion bestimmt¹⁷. Die zellulären Bestandteile des LKIS sind in der Lage die Veränderung des Belastungszustandes des Knochens zu erfassen und einen remodellierenden, den Belastungstrajektorien entsprechenden Restrukturierungsprozess des Knochens zu induzieren¹⁷.

Die mechanosensitive Remodellierung des Knochens kann in vier Phasen eingeteilt werden. Initial kommt es durch eine Belastung zur Dehnung und Stauchung der zellulären Bestandteile des lakunar-kanalikullär-intraossären Systems, woraufhin die molekulare Deformation des Zytoskelettes dieser Zellen eine Signaltransduktion über die Osteozyten des LKIS an die Oberflächenosteoblasten (SOBL) verursacht¹⁵. Dieser, sich zyklisch wiederholende Prozess, führt zu einer über Gap-junktions

vermittelten Verstärkung der Kommunikation mit proliferativen Zellen (Osteoblasten) des Knochengewebes. Dem gegenüber steht die druckinduzierte Knochenresorption durch die proliferative Aktivierung der Osteoklasten.

Es werden zwei Osteoblastensubtypen unterschieden. Die mesenchymalen Osteoblasten nehmen eine essenzielle Rolle in der Bildung des Geflechtknochens ein und sind damit hinsichtlich ihrer Funktion auch ein entscheidender Einflussfaktor in der Knochenheilung und Osseointegration von biokompatiblen Materialien in den Alveolarknochen. Die Oberflächenosteoblasten (SOBL) sind vor allem im reifen Lamellenknochen vertreten und regulieren verschiedene Prozesse im Knochenstoffwechsel. Eine der Hauptaufgaben der SOBL ist dabei die bereits oben beschriebene, mechanotransduktionsinduzierte Regulationskaskade der Knochenmineralisation und Osteoklastendifferenzierung. Letztere sind im Prozess des bone remodeling durch osteoresorptive Eigenschaften charakterisiert. Prinzipiell enthält der reife Lamellenknochen weniger zelluläre Bestandteile als der Geflechtknochen. Dies ist durch die Verringerung der Remodellierungsfrequenz im stagnierenden Belastungszustand des Knochens begründet. Sofern den Knochen keine Reize in Form von Belastungsänderungen erreichen, baut dieser sich unter physiologischen Bedingungen nicht um. Erst nach Rezeption einer einwirkenden Kraft und deren Mechanotransduktion im LKIS wird der Knochenstoffwechsel den neuen Anforderungen entsprechend verschoben. Durchmesserreduzierte Implantate zeigen höhere Belastungen am Übergang zwischen Implantat und Knochen. Dies begründet sich in ihrer verringerten Oberfläche und manifestiert sich besonders am kristallinen Knochen. Verändert sich die einwirkende Kraft am Implantat-Knochen Übergang, müssten sich folglich auch die mechanotransduktiven Eigenschaften des LKIS und infolgedessen der Knochenstoffwechsel ändern. Die theoretischen Überlegungen, die hier zugrunde gelegt werden, könnten auch Auswirkungen auf den klinischen Langzeiterfolg von DRI haben.

2.2.2 Initiale Interaktionen zwischen Implantat und periimplantärem Gewebe

Nach der Implantatinsertion zeigt sich eine molekulare Interaktion zwischen Implantat und Knochengewebe. Die in dieser Arbeit betrachteten Titan Implantate besitzen die Eigenschaft, bereits kurz nach der Insertion in den Alveolarknochen, einige molekulare Kaskaden an ihrer Oberfläche zu induzieren. Verschiedene Autoren kamen zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der frühen Interaktion zwischen Knochen und Oberflächen von Titanimplantaten. *Davies et al.* beschrieben in einer Studie die Abläufe am Implantat Knochen Interface. Die Knochenneubildung beginnt mit der Bildung einer organischen Matrix auf der Oberfläche des Implantates. In der Analyse der organischen Matrix konnten vor Allem Osteopontin und Bone sialoprotein (BSP) nachgewiesen werden. Osteopontin vermittelt die Adhäsion von Osteoblasten, BSP die Initiation der Kristallbildung von Calciumphosphat. Der Ablauf der Knochenneubildung kann in vier Schritte unterteilt werden:

1. Bildung einer organischen Matrix
2. Beginn der Kristallisierung von Calciumphosphat
3. Anlagerung von Kollagen und weiteres Kristallwachstum
4. Mineralisierung des Kollagengerüsts

Darüber hinaus dient diese organische Matrix an der Oberfläche des Implantates der Adhäsion von Gerinnungsfaktoren und Thrombozyten sowie der Ausschüttung von Zytokinen. Die Aktivierung der Thrombozyten und Zytokinausschüttung bedingt die Stimulation der Migration osteoproliferativer Zellen. Das Spektrum der Zytokine, die auf die Einheilung des Implantates Einfluss nehmen, ist groß. Zwei ihrer wichtigsten Vertreter sind der vaskular-endotheliale Wachstumsfaktor (VEGF), welcher in der Angiogenese eine zentrale Rolle spielt, sowie der platelet derived growth factor ¹⁸.

VEGF nimmt eine Schlüsselposition in der Angiogenese und Rekrutierung hämatopoetischer und osteogener Zellpopulationen ein. Das Protein stimuliert unter anderem die Produktion von bone-morphogenetic-protein-2 (BMP-2). BMP-2 ist ein wichtiger Vertreter der morphogenetischen Knochenproteine, die maßgeblich an der Knochenentwicklung beteiligt sind. Des Weiteren sind vasoaktive Substanzen wie Serotonin und Histamin an der frühen Implantat-Knochen Interaktion beteiligt¹⁸⁻²⁰ Membrangebundene Rezeptoren interagieren mit den an der Implantatoberfläche absorbierten Proteinen, wie beispielsweise Fibrin und VWF und ermöglichen die

weitere Thrombozytenadhäsion und Degranulation an der Implantatoberfläche. Studien haben gezeigt, dass durch Mikrorauigkeiten der Implantatoberfläche, die Adsorption von Fibrin und somit die Thrombozytenadhäsion und Aktivierung mit konsekutiver Degranulierung, gesteigert werden konnte²¹. Hierzu untersuchten *Park et. al.*²² die Thrombozytenaggregation an säuregeätzten Titanoberflächen und konnten feststellen, dass durch die Veränderung der Mikrotopographie an der Implantat-Blut Grenze, die Adhäsion und Degranulation der Thrombozyten kurzfristig signifikant erhöht werden konnte.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die Migration von Blutzellen durch die frühe Fibrinmatrix an der Implantatoberfläche in vitro einen erheblichen Reiz für die Osteokonduktion an der Grenze zwischen Implantat und Körper darstellt^{22,23}. Inwiefern dieser Effekt eine Auswirkung auf das klinische Ergebnis der Implantation hat, ist Gegenstand der Forschung.

Die Knochenneubildung und somit Einheilung dentaler Implantate wurde in vivo stets an Standardimplantaten beobachtet. Es ist davon auszugehen, dass die Prozesse auf molekularer Ebene keine Differenzen zwischen DRI und SDI zeigen. Die Beurteilung und Analyse des klinischen Osseointegrationsverhaltens von DRI könnte weitere Anhaltspunkte liefern, ob durch das veränderte Belastungsverhalten auch veränderte molekulare Verhältnisse entstehen.

2.2.3 Osteokonduktion am Implantat

Die Bildung des Blutkoagulums, die Ausschüttung der Zytokine und Wachstumsfaktoren wie PDGF, TGF und VEGF induzieren die Chemoattraktion und Rekrutierung osteogener Zellen. Diese bewegen sich von der äußeren Grenze des Knochens, entlang des Blutkoagulums als Leitstruktur bis hin zum Implantat. Der Begriff Osteokonduktion umschreibt folglich eine zelluläre Kaskade aus Rekrutierung, Migration und Adhäsion osteogener Zellen.

Die Eigenschaft der Osteokonduktivität ist eines der wesentlichen Merkmale von Titanimplantaten und ermöglicht den Einheilungsprozess des Implantates.

2.2.4 Klinische Parameter der Knochenqualität

Biochemische und hormonelle Veränderungen der Knochenhämostase nach der Implantation sind Schlüsselpunkte im Hinblick auf den Erfolg einer Implantation. Dennoch stehen für die Prognostizierung der Erfolgsaussichten einer Implantation klinische Parameter der Knochenqualität im Vordergrund. Spezielle Parameter, die die klinische Knochenqualität beeinflussen, sind die Knochenarchitektur und die Knochendichte. Diese wurden durch *Lekholm und Zarb*²⁴ definiert. Ihr Klassifikationssystem umfasst vier Kategorien.

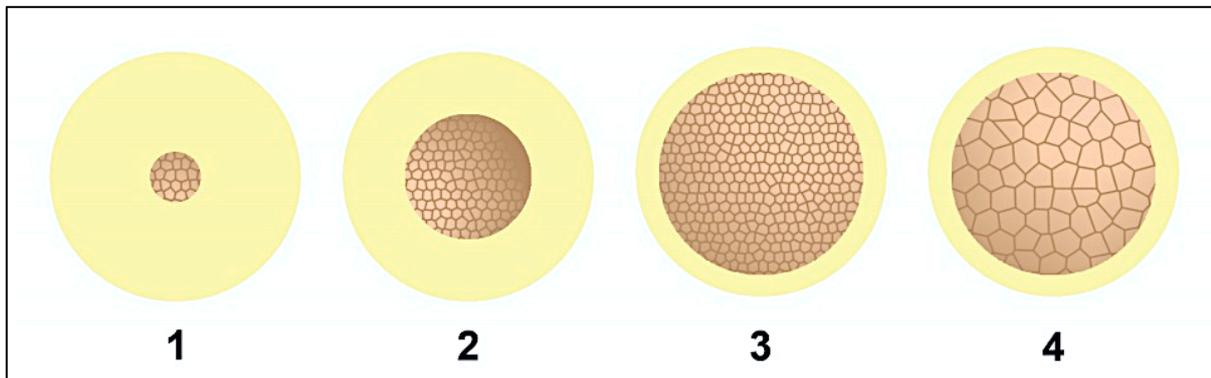


Abbildung 1: Klassifizierung der Knochenqualität nach Lekholm und Zarb

- Typ I: Fast ausschließlich homogene Kompakta
- Typ II: Engmaschige Spongiosa umgeben von breiter Kompakta
- Typ III: Engmaschige Spongiosa umgeben von dünner Kompakta
- Typ IV: Weitmaschige Spongiosa umgeben von dünner Kompakta

Die Klassifikation nach *Lekholm und Zarb* bezieht sich auf die radiologische Erscheinung und Resistenz bei der Aufbereitung des Implantatlagers²⁴. Dabei ist zusätzlich zu konstatieren, dass die Knochenqualitäten in den verschiedenen Regionen der Kieferknochen variieren. *Truhlar et. al.* definierten bereits 1997, dass die Knochenqualitäten in Maxilla und Mandibula am häufigsten unter Typ II und III fallen²⁵. Die Mandibula ist vorrangig durch eine Typ II Knochendichte charakterisiert, wohingegen in der Maxilla eher eine Typ III Knochendichte vorrangig ist. Die Abstufung der Knochendichte nach Regionen erfolgt folgendermaßen:

anteriore Mandibula > posteriore Mandibula > anteriore Maxilla > posteriore Maxilla.

Durch den Verlust von Zähnen kann eine Reduktion des Knochenvolumens eintreten, durch das die orale Rehabilitation durch Implantate erschwert sein kann. Die Formen

der Atrophie unterscheiden sich zwischen Maxilla und Mandibula deutlich. In der Maxilla tritt zumeist eine vertikale Atrophie auf, die den krestalen Anteil des Kieferknochens kranial, Richtung Sinus Maxillaris verlegt und dadurch das vertikale Knochenangebot zur Implantation deutlich reduziert. Speziell in der posterioren Region der Maxilla ergibt sich hierdurch eine erschwerte anatomische Situation²⁶.

2.2.5 Dentoalveoläre Atrophie

In Folge einer Zahnextraktion wird eine komplexe Kaskade umfassender Remodellierungsvorgänge in Kraft gesetzt. Diese wird durch inflammatorische Reize gesteuert und beeinflusst. Nach der Zahnextraktion füllt sich die Alveole mit Blut und es entwickelt sich ein stabiles Blutkoagulum mit einem Fibrinnetz und Thrombozyten.

Der Wundbereich am Übergang zwischen Blutkoagulum und Kieferknochen wird von neutrophilen Granulozyten und Makrophagen konsolidiert. Durch ihre Anwesenheit werden Wachstumsfaktoren und Zytokine freigesetzt, die die Neoangiogenese und Bildung des Granulationsgewebes fördern. Das Koagulum wird in den darauffolgenden Tagen graduell durch Granulationsgewebe ersetzt. Nach circa 7 Tagen hat sich in der Extraktionsalveole Granulationsgewebe gebildet. Nach etwa 14 Tagen können an den Randbereichen der Extraktionsalveole sodann erste Bindegewebsneubildungen beobachtet werden. In den darauffolgenden Wochen wird die Ossifikation der Alveole induziert. Der epitheliale Verschluss der Extraktionswunde tritt zumeist zwischen 10-20 Wochen nach der Extraktion ein. Die ossäre Konsolidierung, sodass in Röntgenaufnahmen keine Alveole mehr zu erkennen ist, tritt zwischen 12-24 Wochen post extractionem ein²⁷.

Die nach Zahnverlusten auftretende dentoalveoläre Atrophie ist ein komplexer dreidimensionaler Prozess, der sich in Ober- und Unterkiefer aufgrund der anatomischen Grundlagen unterschiedlich darstellt. Über Jahrzehnte hinweg wurden verschiedene deskriptive Modelle entwickelt und Klassifikationen vorgenommen.

Eine Unterteilung der dentoalveolären Atrophie erfolgte 1987 durch *Misch und Judy*²⁸, die den Kieferknochen als Erste in allen Raumdimensionen beschrieben und dessen Resorptionsverhalten nach Zahnverlusten kategorisierten.

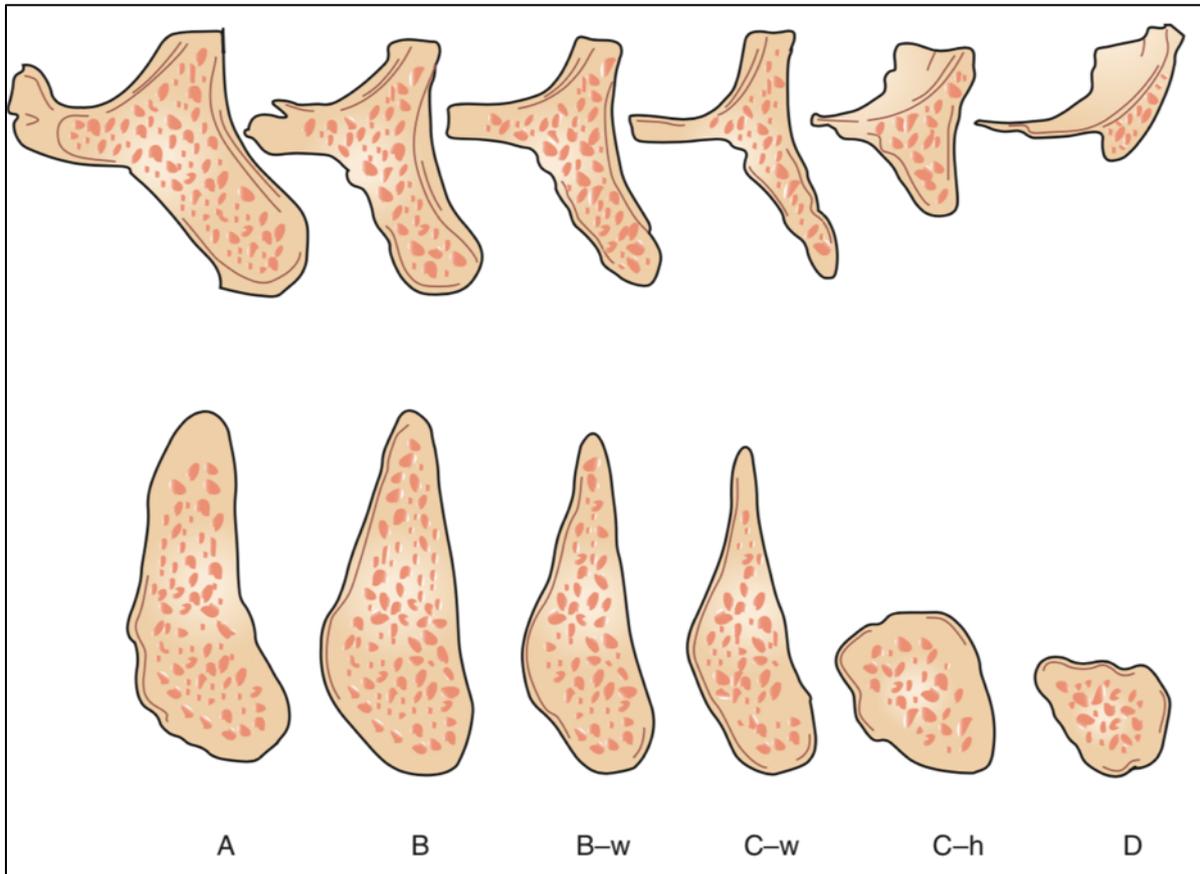


Abbildung 2: Knochentrophie nach Judy und Misch

Die Autoren unterteilen die Knochentrophie in Gruppen von A bis D und die Indizes w und h, die den Zustand des Abbaus im Hinblick auf Breite (width) und Höhe (height) beschreiben²⁸.

Der Hauptfaktor für die dentoalveoläre Kieferkammatrophy ist der mit dem Zahnverlust eintretende Verlust der mechanischen Belastung des parodontalen Ligaments. Nachdem das parodontale Ligament verloren gegangen ist und sich keine funktionellen Kaukräfte mehr in den Kieferknochen ableiten, geht der Bündelknochen verloren. Dieser Verlust des Bündelknochens manifestiert sich vor allem an der bukkalen Knochenlamelle, die fast ausschließlich aus Bündelknochen besteht²⁹. Der Bündelknochen wird intraalveolär resorbiert und fördert den Übergang zur osteoklastischen Aktivität im Umfeld der Alveole. *Araujo und Lindhe* führten zur Quantifizierung der dentoalveolären Knochentrophie Tierversuche durch, bei denen

ermittelt werden konnte, dass die Dicke der bukkalen Knochenlamelle sich innerhalb der ersten sieben Wochen nach Zahnverlust um bis zu 38% reduzierte²⁹.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass sich die Dicke der bukkalen Knochenlamelle um mehr als das Doppelte der lingualen Knochenlamelle reduzierte. Die Reduktion der bukkalen, im Vergleich zur lingualen, Knochenlamelle induziert das klinische Bild eines messerschneidenartigen Alveolarfortsatzes. Dem folgend reduziert sich auch die linguale Knochenlamelle, jedoch wesentlich langsamer³⁰.

In der Mandibula zeigt sich klinisch eine Defektkonfiguration, die insbesondere durch den Volumenverlust im Seitenzahnbereich charakterisiert ist³¹. Dies kann unter anderem durch die im Durchschnitt deutlich bessere kariologische und parodontale Prognose der Unterkieferinzisiven im Vergleich zu den Seitenzähnen begründet werden. Im Oberkiefer findet analog zum Unterkiefer auch eine stärkere Resorption im Seitenzahnbereich statt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Sinus maxillares nach Zahnverlust expandieren und somit das vertikale Knochenangebot reduzieren.

2.2.6 Systemische Risikofaktoren in der dentalen Implantologie

Hinsichtlich der systemischen Risikofaktoren sind vor Allem die Nikotin- und Diabetes-Anamnese ausschlaggebend. So ist inzwischen die verschlechterte Wundheilung und verminderte Nährstoffversorgung im Operationsgebiet durch Nikotinkonsum oder schlecht eingestellten Diabetes evident. Die potentiell negativen Einflüsse des Nikotinkonsums auf die Langzeitstabilität von Implantaten, sowie den Stoffwechsel der Mundhöhle und die Wundheilung sind hinreichend untersucht und belegt, weshalb dieser Parameter in der vorliegenden Studie zusätzlich evaluiert wurde³². Die Auswertung erfolgte trotz der hohen Evidenz für die schlechtere Langzeitstabilität von Implantaten bei Rauchern unter der Annahme, dass bei den vorliegenden Fällen kein signifikanter Unterschied zwischen dem Knochenniveau von Nichtrauchern und Rauchern besteht. Dies begründet sich vornehmlich in der geringen Implantatverlust Fallzahl ($n=1$) in dieser Studie.

2.3 Behandlungsstrategien der dentalen Implantologie

2.3.1 Durchmesserreduzierte Implantate

Der Begriff durchmesserreduzierter Implantate (DRI) beschreibt Implantate mit einem Durchmesser von weniger oder gleich 3,5mm¹². Weiterhin wird unterschieden zwischen schmalen regulären Implantaten³³ und Mini-Implantaten mit einem Durchmesser von weniger als 2,7mm.

*Klein et. al*³⁴ klassifizierten in einer Literaturübersicht die DRI in drei Gruppen:

- Gruppe I einteilige Implantate <3.0mm
- Gruppe II zweiseitige Implantate 3,0-3,25mm
- Gruppe III zweiseitige Implantate 3,3-3,5mm

Die Implantate der vorliegenden Arbeit können folglich der Gruppe III der DRI zugeordnet werden. Insgesamt zeichnet sich in der Literatur eine sich zunehmend festigende Evidenz für die Verwendung von DRI der Gruppe III in allen Indikationsbereichen der dentalen Implantologie ab. Dabei konnte in Studien gezeigt werden, dass keine signifikanten Unterschiede in der Verwendung von DRI der Gruppe III im Frontzahnbereich bestehen. Im Seitenzahnbereich kommen *Klein et al.* zu dem Ergebnis, dass eine individuelle Abwägung und Therapieentscheidung unter Verweis auf biomechanische Komplikationen, sinnvoll ist. Darüber hinaus existiert eine Indikationsstellung für die Verwendung von DRI seitens der Hersteller bis dato nur in Kieferabschnitten mit geringer funktioneller Belastung.

Augmentationsverfahren

Der dentoalveolären Atrophie steht ein großes therapeutisches Spektrum zur Verbesserung beziehungsweise Regeneration der Knochenlager gegenüber. Problematisch ist hierbei die Komplikationsrate der unterschiedlichen Verfahren. Die ersten Eingriffe zur Verbesserung der Knochenlager wurden als Auflagerungsplastiken von Brännemark et al. 1975 durchgeführt³⁵. Später wurde die Anlagerung von extraoral gewonnenen kortikospongiösen Transplantaten durch intraorale Knochenentnahmen für die meisten Indikationen abgelöst³⁶. Die Erfahrung des Operateurs, sowie intraoperativ auftretende Komplikationen machen die Augmentation des

Knochenlagers trotzdem stets zu einem Risikofaktor. Des Weiteren sind Augmentationen meist zweizeitigen Verfahren. Der Defekt muss stabil arretiert sein, um keinen zusätzlichen Volumenverlust nach der Implantatinsertion zu erleiden. Intraoperativ ergeben sich aus der Verwendung von DRI mit oder ohne Augmentation einige Vorteile. So werden bei Bone Splitting Augmentationen die Knochenlamellen um den verringerten Durchmesser weniger distrahiert, was der Resorption einer dünnen bukkalen Lamelle entgegenwirken kann. Die Anforderungen an Augmentationsverfahren sind vielfältig, dennoch stehen im Hinblick auf deren Weiterentwicklung die Reduktion der Morbidität und die Effizienz des operativen Protokolls im Vordergrund. Darum stellen die ursprünglichen Formen der kortikospongiösen Knochengewinnung über den Beckenkamm heute nur noch eine Indikation für große Defektvolumina dar. Je nach Augmentationsumfang kann meist auf die extraorale Knochenentnahme verzichtet werden und intraoperativ Knochen aus der Symphysenregion, der Crista zygomaticoalveolaris oder dem Ramus mandibulae entnommen werden. Zu den postoperativen Komplikationen zählen Schmerzen, Wundheilungsstörungen, Narbenbildung, Entzündungen sowie Nervverletzungen. Nach der Präparation und Darstellung des Knochens werden die entnommenen Knochenstücke formkongruent aufbereitet und durch Osteosyntheseschrauben fixiert. Eine logische Konsequenz der Neugenerierung solcher Knochenvolumina ist, dass die Deckung durch das Weichgewebe erschwert wird. Um Wunddehiszenzen zu vermeiden, sollte daher eine spannungsfreie und suffiziente plastische Deckung angestrebt werden.

Besonders unter geriatrischen Gesichtspunkten sollte die Gegenüberstellung und Ergänzung von DRI und Augmentationsverfahren angestrebt werden, da zum Beispiel freie Transplantate bei Patienten hohen Alters oder reduzierten Allgemeinzustandes Komplikationen in der Vaskularisierung aufweisen können¹². Entscheidend für den Erfolg des jeweiligen Augmentationsverfahren sind unter anderem die morphologischen und histologischen Eigenschaften des Transplantates. Ein überwiegend kortikales Transplantat zeigt wenig Remodeling und eine geringer ausgeprägte Angiogenese. Dem gegenüber steht die starke Resorption von spongiösen Transplantaten. *Michalczyk et al.* konnten bei kortikalen Transplantaten über einen Zeitraum von 3 Jahren resorptive Vorgänge am Transplantat nachweisen³⁷. *Cordaro et al.* verglichen in einer Studie das Volumen des Knochengewinns direkt nach einer Auflagerungsplastik und sechs Monate später zum Zeitpunkt der

Implantation. Zum Zeitpunkt der Auflagerungsplastik betrug die durchschnittliche Knochenbreite $6,5 \pm 0,33\text{mm}$. Im Rahmen der Implantation wurde die Knochenbreite erneut vermessen, wobei man einen Mittelwert von $5,0 \pm 0,23\text{mm}$ ermittelte³⁸. Dies entspricht einem Breitenverlust von 23,5 Prozent. Analog zur Breitenmessung wurden in Studien bis zu 42 Prozent vertikaler Höhenverlust zwischen dem Zeitpunkt der Augmentation und der Implantation festgestellt.

2.3.2 Klassifikation der Knochenersatzmaterialien nach deren biologischen Ursprung

Für Augmentationen können diverse Materialien verwendet werden. Diese werden nach ihrem biologischen Ursprung und ihrer Verarbeitung eingeteilt. Es existieren 3 Untergruppen:

- Autologe Knochentransplantate
- Allogene Knochenersatzmaterialien
- Xenogene Knochenersatzmaterialien

Bei autologen Transplantaten stammt das Knochenmaterial vom Patienten selbst. Je nach Defektausdehnung kann dazu Knochen alio loco entnommen und der Defekt damit gefüllt werden. Dies geschieht zum Beispiel bei Augmentationen mittels Knochenblocktransplantaten, partikuliertem Knochen oder Beckenkammpongiosa. Allogene Knochenersatzmaterialien stammen ebenfalls vom Menschen und sind immunologisch mit denen des Empfängers kompatibel. Die allogenen Transplantate stammen oft aus Knochenbanken. Weiterhin existieren xenogene Knochentransplantate. Dabei handelt es sich um Knochenersatzmaterialien, die entsprechend biotechnisch aufbereitet werden, um abstoßungsfrei inkorporiert werden zu können³⁹.

Um Patienten mit einem ausreichenden Knochenvolumen versorgen zu können, müssen nicht nur die eingebrachten Materialien, sondern auch die Operationsverfahren betrachtet werden. Auf dem Gebiet der autologen Knochentransplantate existieren diesbezüglich unterschiedliche Verfahren. Durch diese kann das Knochenmaterial, welches Zellen, Signalmoleküle und Matrix enthält, transplantiert werden. Je nach Beschaffenheit des verwendeten Transplantates, kann man zwischen kortikalem, kortikospongiossem und spongiossem Transplantat

unterscheiden⁴⁰. Vor allem die laterale Auflagerungsplastik unter Verwendung von Knochenblöcken nimmt dabei eine bedeutende Rolle ein. Bei diesem OP-Verfahren wird mittels piezoelektrischen Instrumenten Knochen aus dem Unterkieferwinkel an der linea obliqua oder der Crista zygomaticoalveolaris des Oberkiefers gewonnen. Dieser kann dann entweder partikuliert oder als Blocktransplantat eingebracht werden. Bei Blocktransplantaten tritt die Vaskularisierung und die osteogene Aktivität im Vergleich zu Operationsverfahren mit partikuliertem oder kombiniert partikuliertem und schalenförmig angepasstem Knochen verzögert und vermindert ein^{41,42}. Diese Technik ist als Schalentchnik bekannt und bedient sich der Kombination der Vorteile von partikuliertem Knochen, der besser vaskularisiert, und der mechanischen Stabilität des kortikalen Knochens. Mit autogenen retromolaren oder mentalen Knochentransplantaten können Defekte bis zur Größe eines Quadranten therapiert werden. Allen Verfahren und Materialien gemeinsam ist der Volumenverlust infolge der ossären Konsolidierung der augmentierten Kieferbereiche. *Dreiseidler et al.* untersuchten die Volumenreduktion infolge von Beckenkammaugmentationen. Die Autoren stellten in der Maxilla, sowie der Mandibula einen mittleren Volumenverlust von 15% innerhalb der ersten vier Monate fest⁴³. Augmentationen mit Knochen aus der retromolaren oder Symphysenregion des Unterkiefers zeigen nach vier Monaten bei der Implantation nur einen geringen Volumenverlust, der über die weiteren Jahre der prothetischen Versorgung stabil ist^{42,44}. Es scheint daher ratsam, jede Augmentation in gewissem Maße überextendiert durchzuführen, um dem folgenden Volumenverlust entgegenzuwirken. Unter Berücksichtigung dessen, stellt sich die Frage inwiefern DRI aufgrund des geringeren horizontalen Platzbedarfs den Effekt des Volumenverlustes kompensieren könnten. Es konnte nachgewiesen werden, dass Augmentationen mit intraoral entnommenem Knochen weniger Volumenverlust aufweisen, als solche die sich extraoraler Knochenentnahmen bedienen⁴⁵.

Die Verwendung von Knochenersatzmaterialien erweitert die Möglichkeiten der Augmentation enorm. Eine Metaanalyse kam zu dem Ergebnis, dass Knochenersatzmaterialien bei Auflagerungsplastiken gleiche und in Teilen sogar bessere Implantatüberlebensraten aufwiesen als autologe Knochentransplantate. Insgesamt konnte Anhand der Daten kein signifikanter Unterschied zwischen der Verwendung von autologen und allogenen Knochenersatzmaterialien festgestellt werden⁴⁶. Diese Studienergebnisse sind allerdings stets kritisch zu bewerten, da die

histomorphologische Ossifikation von Knochenersatzmaterialien nicht der des autologen Knochens entspricht.

Bisher existieren überwiegend Studien zur Verwendung von Knochenersatzmaterialien, die SDI nachbeobachten. Mit der zunehmenden Indikationserweiterung der dentalen Implantologie und der steigenden Verwendung von DRI sollte auch analysiert werden ob Unterschiede hinsichtlich der Verwendung von Knochenersatzmaterialien bei Implantationen von DRI nachgewiesen werden können.

GBR – Guided Bone Regeneration

Neben der Einbringung von Knochenersatzmaterialien kommen in den heutigen Augmentationsverfahren Membranen zum Einsatz. Die Verwendung von Membranen beruht auf der Feststellung, dass schnell proliferierende Zellen, unter anderem Fibroblasten und Epithelzellen des Weichgewebes, den systematischen Ablauf der Gewebeneubildung im Defekt stören⁴⁷. Um eine Trennung zwischen den schnell proliferierenden, aber gering differenzierten Zellen einerseits, und den langsam proliferierenden, aber hoch differenzierten Zellen andererseits, zu gewährleisten, werden resorbierbare Membranen aus Kollagen und nicht resorbierbare Membranen aus Polytetrafluorethylen verwendet. Die nicht resorbierbaren Membranen können nur bei zweizeitigen Eingriffen verwendet werden und müssen wieder entfernt werden. Es existieren folgende vier Kriterien, die allgemein als Erfolgsindikator für die GBR betrachtet werden können⁴⁷.

- Wundstabilität
- Blutversorgung und Neoangiogenese
- Trennung zwischen Defekt und schnell proliferierenden Zellen – Schaffung eines Regenerationsraumes
- Spannungsfreier Wundverschluss und primäre Wundheilung

Bei der Auflagerung von partikuliertem Knochen ist die Stabilisierung des Augmentats für den Erfolg ausschlaggebend. Im Zuge von Augmentationen mit autologem Knochen oder Knochenersatzmaterialien sind der spannungsfreie Wundverschluss und die Volumenstabilität unumgänglich⁴⁸. Weiterhin sollte die Bedeckung der GBR Membran mit Schleimhaut gewährleistet sein⁴⁷. Die GBR stellt je nach Beurteilung eine

Ergänzung oder Grundlage für erfolgreiche Augmentationen dar. Im anterioren Kieferbereich kann die GBR zur Rekonstruktion und dem Erhalt der bukkalen Knochenlamelle angewendet werden. Da DRI bisweilen vor Allem in der atrophen anterioren Kieferregion verwendet wurden, ist die Implementierung von Membranen in das Operationsprotokoll der DRI bei reduziertem Knochenangebot sinnvoll.

Sinusbodenelevation

Die Sinusbodenelevation stellt im weiteren Sinne eine GBR-Maßnahme unter Zuhilfenahme einer natürlichen Membran dar. Die Elevation des Sinusbodens durch das Anheben der Schneider'schen Membran schafft einen Raum, in den Knochenersatzmaterial eingebracht werden kann, und hat simultan osteoinduktive Eigenschaften⁴⁹. Die Sinusbodenelevation erfolgt ohne weitere Stabilisierung durch zusätzliche Membranen mit partikuliertem Knochen. Dabei zeigt die Beimengung von autologer Knochenmatrix zu xenogenen Knochenersatzmaterialien eine bessere histomorphologische Ossifikation⁵⁰. Die Sinusbodenelevation ermöglicht einen vertikalen Knochengewinn. Die Anwendung von Durchmesserreduzierten Implantaten ist besonders in horizontal defizitären Knochen sinnvoll. Dennoch kann eine Sinusbodenelevation in Kombination mit der Verwendung von DRI die Langzeitstabilität des periimplantären Knochens positiv beeinflussen, da dieser durch längere Implantate insgesamt homogener belastet wird. Ebenso nachvollziehbar scheint die Schlussfolgerung, dass der vorhandene Knochen besser genutzt wird, da durch die Reduktion des horizontalen Defekts insgesamt mehr ortsständiger Knochen erhalten bleibt.

Alveolarextensionsplastik - Bone Splitting

Das Bone Splitting, auch als Alveolarextensionsplastik bezeichnet, beschreibt ein operatives Verfahren zur horizontalen Erweiterung der Maxilla und Mandibula. Die Erstbeschreibung des Verfahrens erfolgte durch *Osborn*⁵¹. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Alveolarextensionsplastik als zweizeitiges Vorgehen angewandt und erst nach ossärer Konsolidierung des Defektes implantiert. Schon ein Jahr später (1986) wurde das Behandlungsprotokoll von *Nentwig* um die simultane Implantation ergänzt⁵².

Es existieren auch heute unterschiedliche Formen der Alveolarextensionsplastik. Grundsätzlich wird bei allen eine horizontale Dehnung beziehungsweise Spreizung

des Knochens angestrebt. Zunächst wird der Knochen dargestellt. Zur folgenden horizontalen Extension existieren verschiedene Strategien. Der Knochen kann mit rotierenden Diamantscheiben oder Piezoinstrumenten longitudinal aufgetrennt und anschließend gedehnt werden. Andere operative Techniken benutzen Dehnschrauben oder Dehnbohrer, die ohne vorherige Auftrennung des Kieferkammes auskommen. Ein physikalisch scheinbar offensichtlicher Vorteil der DRI Implantate ist, dass die horizontale Distraction des Alveolarkamms geringer ausfällt als bei Standardimplantaten, was folgend die Frakturgefahr der vestibulären Lamelle reduziert. Der entstandene Hohlraum zwischen den Lamellen kann durch Knochenersatzmaterialien autologen, autogenen oder xenogenen Ursprungs erfolgen. Risiken des Bone Splittings sind vor allem die Fraktur der bukkalen Lamelle und Nahtdehiszenzen. In einer Studie ermittelten *Shalabi et al.* nach 56 Monaten eine Überlebensrate von 98,5 Prozent und keinen signifikanten Unterschied zu Implantaten in nativem Knochen⁵³.

Implantatangulation

Die Benutzung angulierter Implantate hat mehrere Gründe. Sie kann in Abhängigkeit der anatomischen Gegebenheiten zur Umgehung von anatomischen Strukturen angewandt, oder zur Verbesserung der Knochenbelastung durch eine Verlängerung der Implantate genutzt werden. So kann durch die angulierten Implantates im Oberkiefer bei ausreichendem Knochenangebot im Bereich der Eckzähne zum Beispiel ein Sinuslift vermieden werden. Angulierte Implantate haben außerdem einen besonderen Stellenwert bei der Fixierung von festsitzenden Suprakonstruktionen auf vier oder sechs Implantaten pro Kiefer⁵⁴.

2.3.3 Sofortimplantation - Sofortbelastung

In den vergangenen Jahrzehnten haben sich neben den von Brännemark entwickelten, klassischen Behandlungsprotokollen verschiedene Algorithmen zur Versorgung mit dentalen Implantaten entwickelt^{55,56,57}. Dabei sind die Sofortimplantate und die verzögerte Sofortimplantation stark in den Fokus gerückt. Die zeitliche Verkürzung des Behandlungsprotokolls, durch den Entfall der Phase, in der die Alveole vollständig regeneriert wird, erscheint im Hinblick auf die Patientenadhärenz nützlich. In den anterioren Kieferregionen haben Sofortversorgungen aufgrund der annähernd formkongruenten Knochenverhältnisse zwischen Implantatbett und Extraktionsalveole und der Herausforderung des Erhalts der bukkalen Knochenlamelle eine besondere Indikation. Ziel ist die primärstabile Implantation und die darauffolgende Vermeidung von Makrobewegungen am Implantatinterface.

Grundlegend wird zwischen den drei folgenden Implantationszeitpunkten unterschieden:

- Sofortimplantation
- Verzögerte Sofortimplantation
- Spätimplantation

Im Zuge einer Sofortimplantation wird die Alveole post extractionem chirurgisch für die Aufnahme eines Implantates aufbereitet. Dabei werden formkongruente Verhältnisse zwischen ehemaliger Zahnwurzel und Implantat angestrebt. Die Sofortimplantation kann bis zu 7 Tage post extractionem erfolgen⁵⁸. Zu diesem Zeitpunkt sind weder die Weichgewebe noch das Knochenlager regeneriert. Unter anderem soll durch die Durchführung einer Sofortimplantation die Alveolarkammatrophie reduziert werden. Da die Alveolarkammatrophie initial vor allem die bukkale Lamelle der Kieferknochen betrifft, kommt ihrer Vermeidung in der ästhetischen Zone ein besonderer Stellenwert zu⁵⁹⁻⁶². Metaanalysen haben gezeigt, dass durch die Sofort-, und Frühimplantation Rezessionen und der Verlust der Papillen verhindert, oder zumindest eingeschränkt werden können⁶¹. Es hat sich gezeigt, dass der Erhalt der Weichgewebe vom gingivalen Biotyp abhängt. Dieser wird unterteilt in einen dicken und dünnen Biotyp, der durch einen Sondentest ermittelt werden kann. Im Rahmen dieses Testverfahrens, wird eine Parodontalsonde in den Sulkus eingeführt und deren Sichtbarkeit evaluiert. Eine hohe Transluzenz der Weichgewebe deutet auf einen dünnen gingivalen Biotyp

hin. Dabei steht der Erhalt der Weichgewebe in enger Korrelation mit dem Erhalt der ossären Strukturen.

Eine Sofortimplantation kann nur unter bestimmten Voraussetzungen erfolgen. Insbesondere ausgedehnte, floride apikale Entzündungen und ausgedehnte Knochendefekte stellen eine absolute Kontraindikation für die Versorgung mit Sofortimplantaten dar⁶². Eine der klassischen Indikationen für eine Sofortimplantation ist die Fraktur der Wurzel eines anterioren Zahnes. Sollte eine der oben genannten Kontraindikationen vorliegen, kann man auf die Technik der verzögerten Sofortimplantation zurückgreifen.

Unter einer verzögerten Sofortimplantation versteht man die Einbringung eines Implantats anstelle eines extrahierten Zahnes bis 8 Wochen nach der Extraktion⁶². Auch in diesem Zeitraum ist die Alveole noch nicht vollständig ossär regeneriert, Entzündungen und Defekte sind jedoch bereits ausgeheilt.

Die Spätimplantation stellt bisweilen das zeitliche Standardverfahren der dentalen Implantologie dar. Sie orientiert sich an den von Brännemark postulierten Abläufen für die Einbringung enossaler Implantate. Dabei wird mit einer zeitlichen Distanz von mindestens drei bis vier Monaten an der Stelle des extrahierten Zahnes implantiert. Die Alveole hat sich in diesem Zeitraum vollständig ossär regeneriert und eine Veränderung der Knochenverhältnisse kann durch die extraktionsinduzierte Kieferkammatrophy eingetreten sein. Die Veränderung der dreidimensionalen ossären Struktur des Kiefers fordert folglich eine Neubewertung der Ausrichtung, Länge sowie des Durchmessers des Implantates. Im Falle eines reduzierten Knochenangebots können speziell im anterioren Kieferbereich DRI genutzt werden, um eine sofortige implantologische Versorgung zu ermöglichen.

2.3.4 Sofortbelastete Implantate

Weiterhin kann die dentale Implantologie nach den Belastungszeitpunkten der Implantate unterschieden werden. Es existieren drei Belastungszeitpunkte:

- Sofortbelastung
- Frühbelastung
- Spätbelastung

Die Unterteilung richtet sich im Wesentlichen nach der Belastung durch Okklusionskontakte. Eine funktionelle Sofortbelastung liegt vor, wenn provisorischer oder definitiver Zahnersatz am selben Tag eingebracht wird. Ist kein Okklusionskontakt vorhanden, spricht man von einer nicht funktionellen Sofortbelastung. Die spätbelasteten Implantate ordnen sich in die von Brännemark vorgegebenen zeitlichen Rahmenbedingungen der prothetischen Versorgung ein. Unter frühzeitig belasteten Implantaten sind solche zu verstehen, die sich weder bei den spät- noch bei den sofortbelasteten Implantaten einordnen lassen. Seit Jahrzehnten beschäftigt sich die Wissenschaft mit der Verkürzung des implantologischen Behandlungsprotokolls. Dabei ist eines der Ziele die Erhöhung des Patientenkomforts und die Reduktion chirurgischer Eingriffe am Patienten. Studien konnten nachweisen, dass auch sofortbelastete Implantate gute osseointegrative Eigenschaften aufweisen⁶³. Dabei scheint ein Schlüsselpunkt die Vermeidung von Mikrobewegungen in der Zone des Kontakts zwischen Implantat und Knochen zu sein. Es existieren verschiedene Strategien zur Vermeidung solcher Über- und Fehlbelastungen, wie zum Beispiel der Verzicht auf exzentrische Belastung und ein reduziertes okklusales Tableau⁶⁴.

2.3.5 Fazit

Die dentale Implantologie bedient sich einer großen strategischen Vielfalt zur Versorgung von anatomisch schwierigen Situationen. Augmentationsverfahren sind eine etablierte Möglichkeit zur Verbesserung der Knochenlager. Dennoch ist die physische und psychische Belastung in Folge der vermehrten Eingriffe groß und kann die Patientenzufriedenheit negativ beeinflussen. Die DRI und zeigen in ihren bisherigen Indikationsspektren zufriedenstellende Ergebnisse. Das Ziel, dass allen implantologischen Behandlungsstrategien gemeinsam ist, ist die schnelle funktionelle Versorgung im kompromittierten Zahnsystem. Gerade in der Versorgung von Einzelzähnen zeigte die Implantologie in den letzten Jahrzehnten einen hohen ästhetischen und funktionellen Wert. Es muss weiterhin evaluiert werden, inwiefern minimalinvasivere Konzepte wie die Verwendung von DRI – auch außerhalb ihrer bisherigen Indikation eine schnelle, effektive und langzeitstabile Ergänzung des implantologischen Behandlungsspektrums darstellen können.

2.4 Zielsetzung

Das Ziel dieser Fall-Kontroll-Studie ist die radiologische Analyse und Evaluation klinischer Langzeitergebnisse dentaler Implantate mit reduziertem Durchmesser (DRI). Bei den Implantaten handelt es sich um narrowSKY Implantate der Firma Bredent mit einem Durchmesser von 3,5mm. Die Kontrollgruppe sind SKYclassic Implantate aus der gleichen Systemreihe mit einem Durchmesser von 4mm. Die Implantationen erfolgten zwischen 2013 und 2019 in der Praxis Dr. Bayer und Kollegen in Landsberg am Lech. Ziel dieser retrospektiven Analyse ist es, die Veränderungen des periimplantären Knochenniveaus bei den Standardimplantaten mit dem der DRI zu vergleichen. Infolge der statistische Auswertung soll eine Aussage getroffen werden können, ob zwischen der Verwendung im anterioren und posterioren Zahnbogen innerhalb der Gruppe der DRI ein signifikanter Unterschied besteht. Weiterhin soll verglichen werden, ob die Wahl des Implantations- und Belastungszeitpunktes einen signifikanten Einfluss auf das periimplantäre Knochenniveau hat. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich auch mit der Fragestellung, ob durch die Verwendung von DRI die umfangreiche präimplantologische Augmentation vermieden werden kann. Dies beruht auf der Annahme, dass durch die Verwendung eines durchmesserreduzierten Implantates weniger horizontales Knochenvolumen benötigt wird und somit die zweizeitige Augmentation vermieden werden kann. Folgende Parameter wurden in beiden Gruppen evaluiert:

- Postoperative Veränderungen des periimplantären Knochenniveaus
- Osseointegrationsverhalten
- Implantatlockerung
- Implantatverlust

3. Material und Methoden

3.1 Deskriptive Parameter

3.1.1 Auswahl der Patienten

Im Rahmen der vorliegenden retrospektiven Studie wurden die Daten von 123 Patienten ausgewertet, bei denen 247 durchmesserreduzierte Implantate mit einem Durchmesser von 3,5mm inseriert wurden (DRI). Zusätzlich wurden bei 47 Patienten Implantate mit einem Durchmesser von 4,0mm implantiert (SDI). Die Operationen wurden zwischen 2013 und 2019 durchgeführt. Die Patienten befinden sich im routinemäßigen Recall der Praxis und zur Verlaufskontrolle wurden entsprechend den Vorgaben des Strahlenschutzgesetzes Röntgenaufnahmen angefertigt.

Einschlusskriterien:

- Vorliegende Indikation zur Implantation eines dentalen Implantates
- Vorliegende Indikation zur Implantation eines Implantates mit verringertem Durchmesser aufgrund von reduziertem horizontalem Knochenangebot.
- Patienten sind mindestens 18 Jahre und geschäftsfähig
- Vorliegen eines Röntgenbildes zum Zeitpunkt der Implantation und Vorhandensein von Kontrollröntgenbilder
- Qualität des Röntgenbildes mindestens „gut“

Ausschlusskriterien:

- Antiresorptive Therapie
- Instabiler Diabetes mellitus
- Immunsupprimierte Patienten
- Zustand nach Radiatio / Chemotherapie
- Unbehandelte Parodontitis

3.1.2 Patientenkollektiv

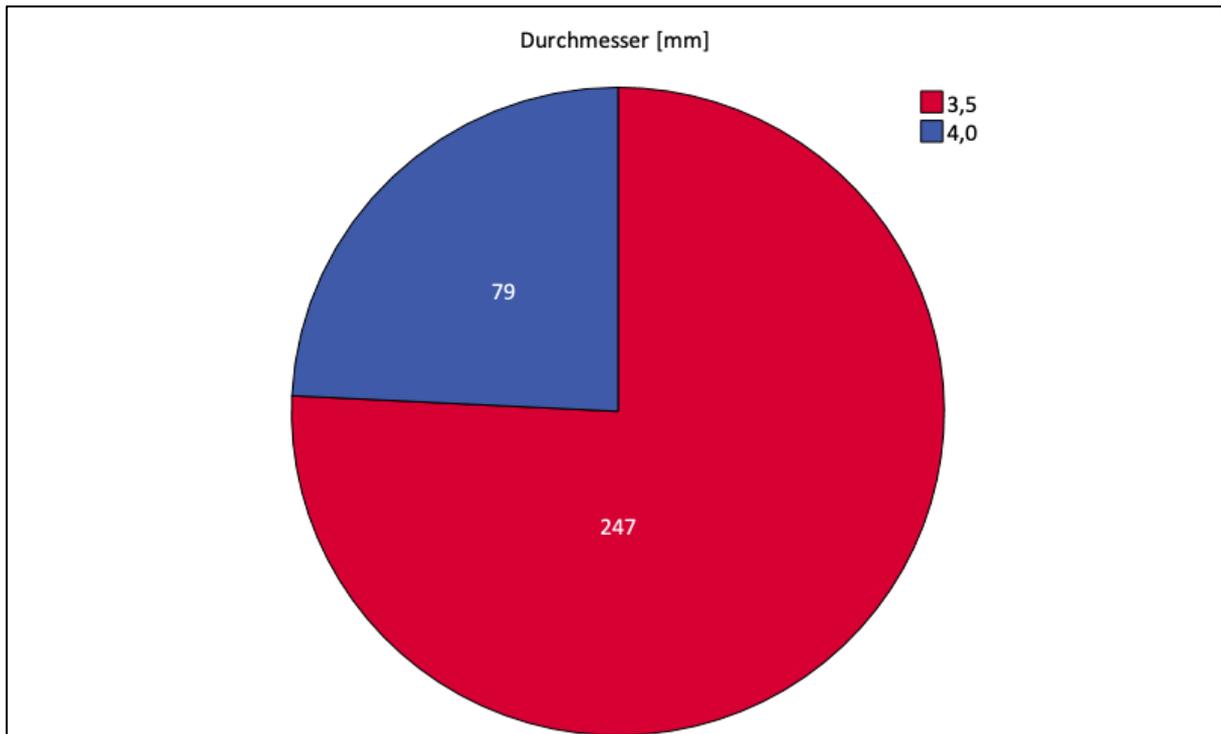


Abbildung 3 Anteile der Implantat Durchmesser an der Gesamtzahl der Implantate

Insgesamt ergab sich aus den vorliegenden Daten eine 123 Personen umfassendes Patientenkollektiv, dass mit 326 Implantaten versorgt wurde. Zwischen März 2013 und März 2019 wurden 247 durchmesserreduzierte Implantate (narrowSKY, bredent medical GmbH & Co.KG) inseriert. Weiterhin wurden bei diesen Patienten zusätzlich Standard Durchmesser Implantate (SKYclassic bredent medical GmbH & Co.KG) gesetzt, wovon je Patient (79 Implantate) ein oder entsprechend der Zahl der DRI mehrere Implantate in vergleichbarer Position zum DRI-Implantat als Kontrollgruppe ausgewählt wurde. Der Durchmesser der Standardimplantate (SDI) betrug 4,0mm, der der durchmesserreduzierten (DRI) 3,5mm. Um den Einfluss des geometrischen Designs unterschiedlicher Implantatsysteme auf die Ergebnisqualität zu reduzieren, wurde nur ein Implantatsystem verwendet

3.1.3 Falldarstellung Implantation durchmesserreduzierter Implantate

Ein 65-jähriger Patient stellte sich in der Zahnarztpraxis Dr. Bayer und Kollegen in Landsberg am Lech im Juli 2013 vor. Anamnestisch ergab sich ein gut eingestellter Diabetes mellitus Typ 2 mit einem HbA1c von 7%. Weiterhin wurde nach klinischer und röntgenologischer Befunderhebung eine Parodontitis Stadium IV Grad B diagnostiziert. Außerdem waren Lockerungen Grad 1-3 nach ARPA festzustellen. Der Patient äußerte den Wunsch nach einer festsitzenden Versorgung im Unterkiefer. Nach erfolgter Aufklärung und Abwägung der Therapieoptionen wurde eine intraforaminäre Implantation von vier durchmesserreduzierten Implantaten im Unterkiefer nach vorrangegangener Extraktion der parodontal geschädigten Zähne geplant. Zur verbesserten Ausnutzung des Knochenangebotes wurden zwei angulierte Implantate in Regio 034 und 044 geplant, mit einem Durchmesser von 4,0 mm und einer Länge von 14mm. Weiterhin sollten in Regio 032 und 042 durchmesserreduzierte Implantate mit 3,5mm Durchmesser und 10mm Länge inseriert werden.

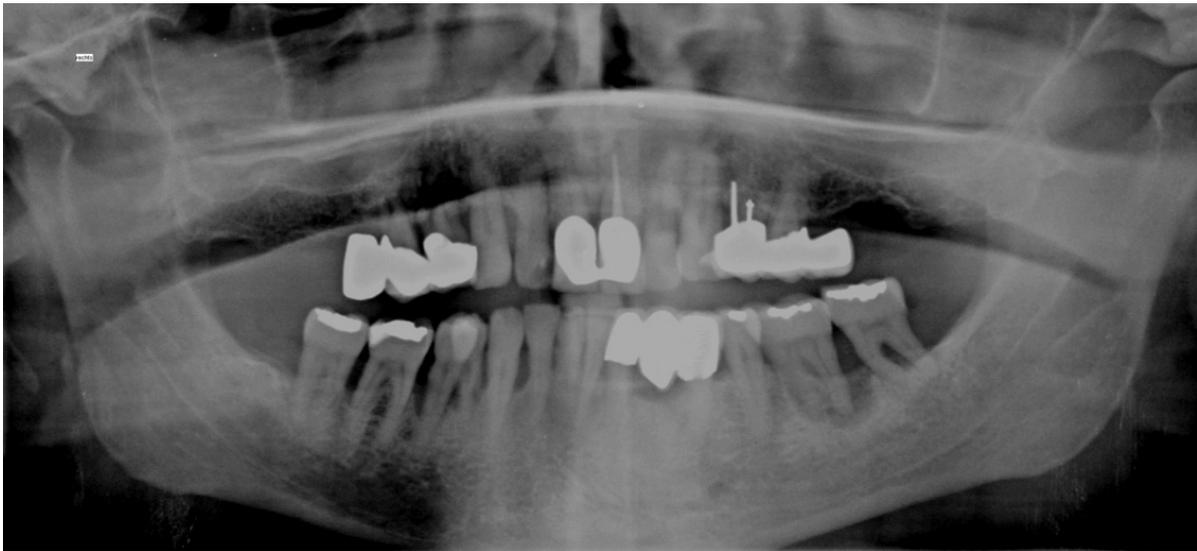


Abbildung 4: Präoperative Röntgenaufnahme



Abbildung 6: Befund intraoral präoperativ



Abbildung 5: antimikrobielle photodynamische Therapie

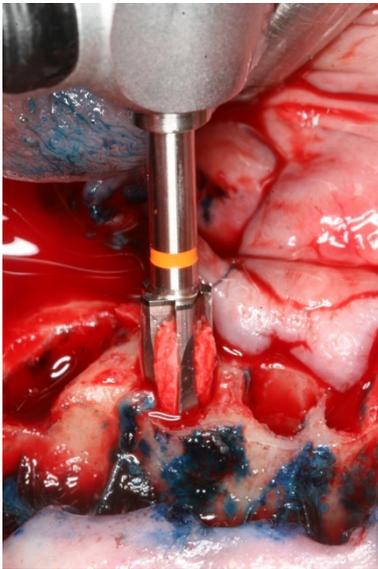


Abbildung 7: Aufbereitung des Implantatbettes



Abbildung 8: DRI (SKYnarrow 3,5 Bredent)

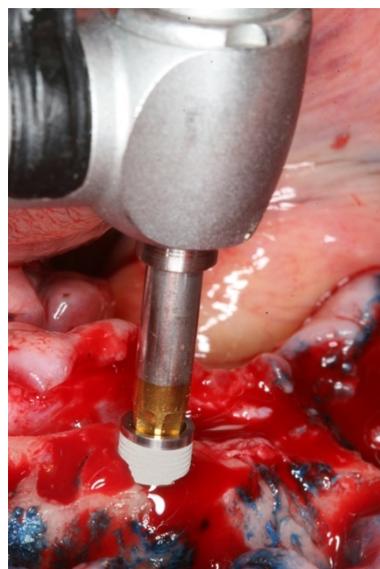


Abbildung 9: Insertion des 3,5mm DRI

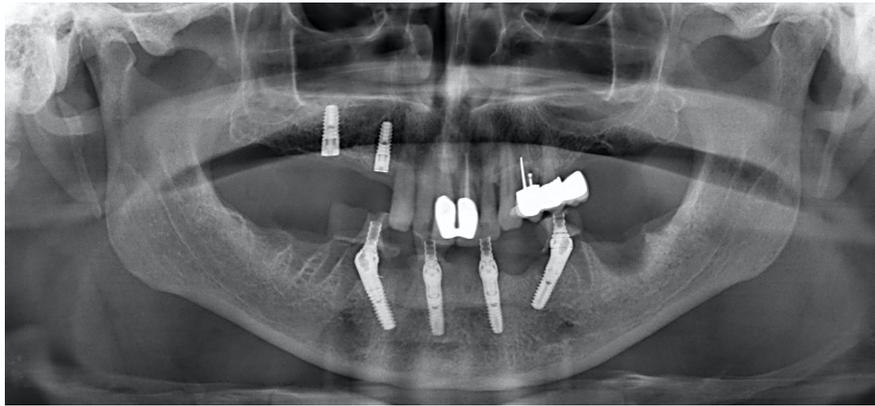


Abbildung 10: Postoperative Röntgenkontrolle



Abbildung 12: Eingesetzte Implantate von okklusal



Abbildung 11: provisorische Versorgung zur Sofortbelastung

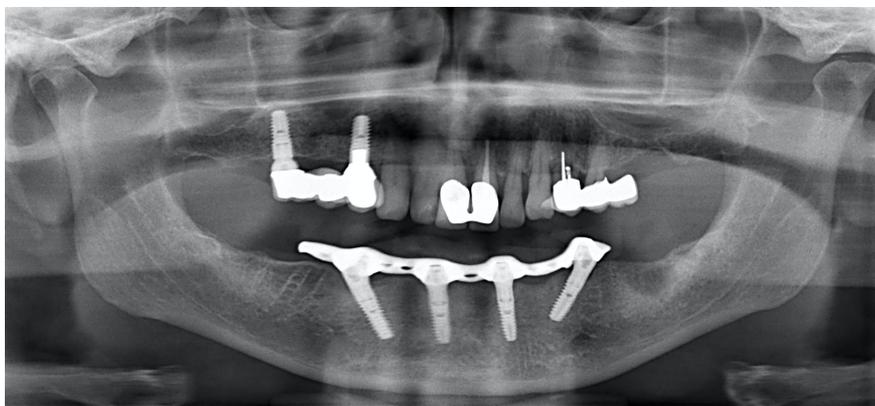


Abbildung 13: Röntgenbild 100 Tage postoperativ



Abbildung 15: Implantateinheilung nach Entfernung der provisorischen Versorgung



Abbildung 14: Definitiver Zahnersatz

3.1.4 Implantatlänge

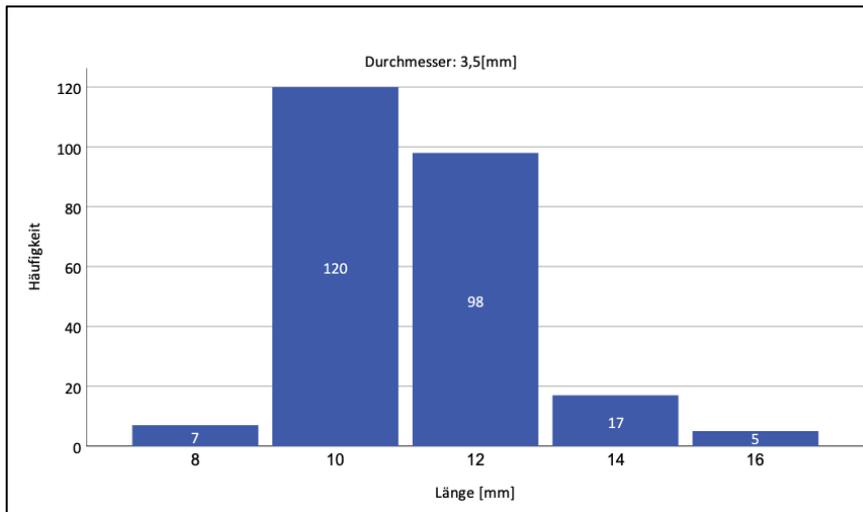


Abbildung 16: Implantatlänge in der Testgruppe DRI (3,5mm)

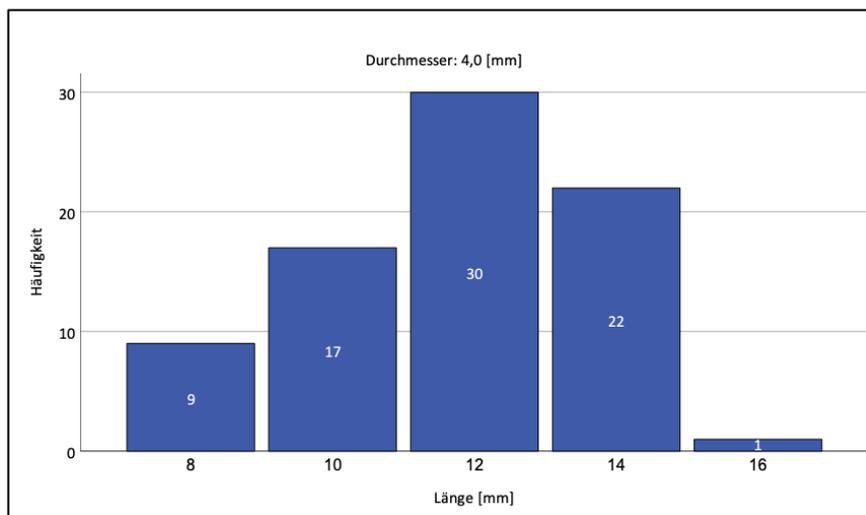


Abbildung 17: Implantatlänge in der Kontrollgruppe SDI (4,0mm)

In beiden Gruppen liegt der Hauptanteil der verwendeten Implantatlängen im Bereich 10mm und 12mm. Um die Vergleichbarkeit der Gruppen zu gewährleisten, wurde unter Berücksichtigung anatomischer Grundvoraussetzungen versucht, eine ähnliche Längenverteilung wie in der Testgruppe zu erzielen.

3.1.5 Implantatangulation

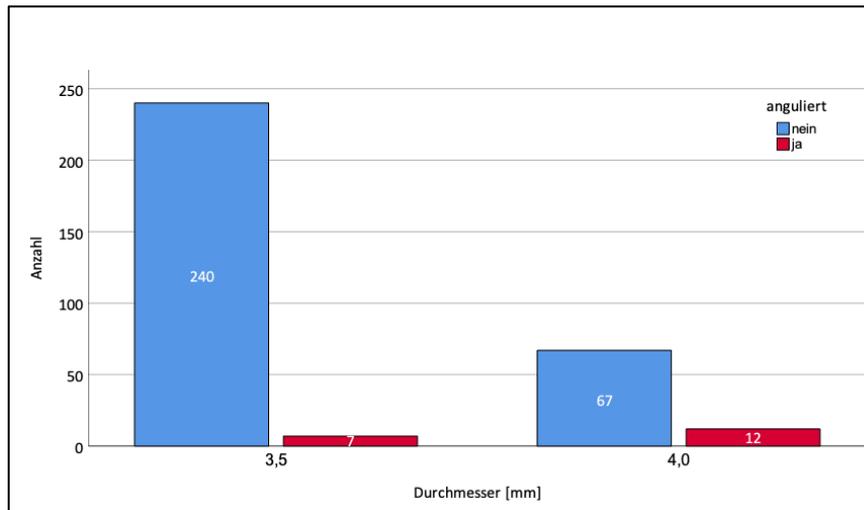


Abbildung 18: Implantatangulation in der Testgruppe und Kontrollgruppe

Insgesamt wurden 19 Implantate identifiziert, die anguliert inseriert wurden. Die Angulation der Implantate erfolgte vorrangig bei Versorgungen des zahnlosen Kiefers, die auf vier Implantaten getragen werden.

3.1.6 Lebensgewohnheiten und Vorerkrankungen

Der Tabakkonsum wurde in drei Kategorien unterteilt. Unterschieden wurden Nicht-Raucher (0/d), leichte Raucher (<10/d) und starke Raucher(>10d).

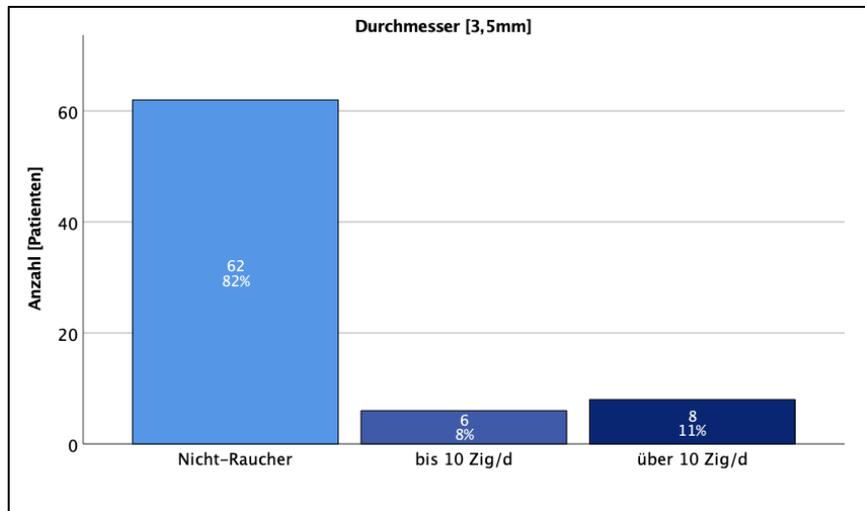


Abbildung 19: Nikotinanamnese Testgruppe

In der Gruppe der Patienten die mit 3,5mm DRI versorgt wurden gaben 82 Prozent an, Nicht-Raucher zu sein. 8 Prozent der Patienten wurden als leichte Raucher, und 11 Prozent als starke Raucher identifiziert. In der finalen Auswertung wurde die Gruppe der Raucher zusammengefasst. Somit lag der Anteil der Personen mit positiver Nikotinanamnese bei 19 Prozent in der Gruppe der DRI.

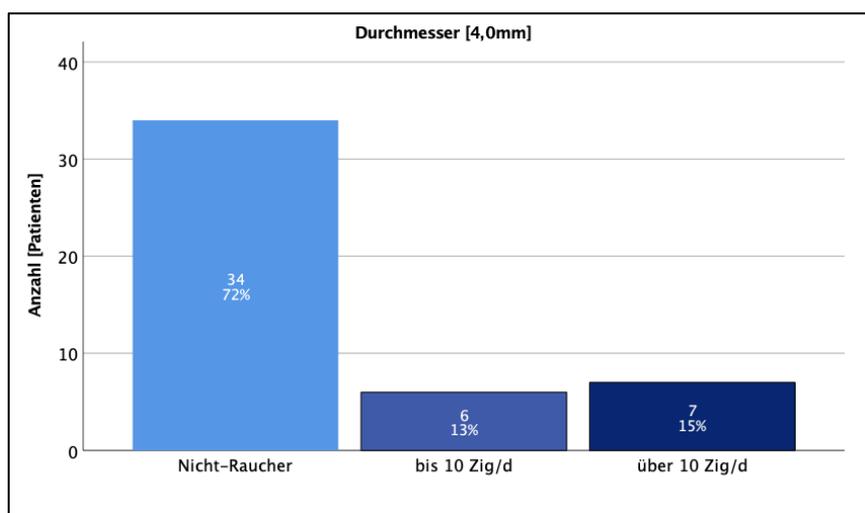


Abbildung 20: Nikotinanamnese Kontrollgruppe

Die Kontrollgruppe der SDI zeigte eine ähnliche Nikotinanamnese. 72 Prozent der Patienten gaben an Nicht-Raucher zu sein, 13 Prozent wurden als leichte und 15

Prozent als starke Raucher klassifiziert. In der finalen Auswertung wurde die Gruppe der Raucher zusammengefasst. Somit lag der Anteil der Personen mit positiver Nikotinanamnese bei 28 Prozent in der Gruppe der SDI.

3.1.7 Implantationszeitpunkt

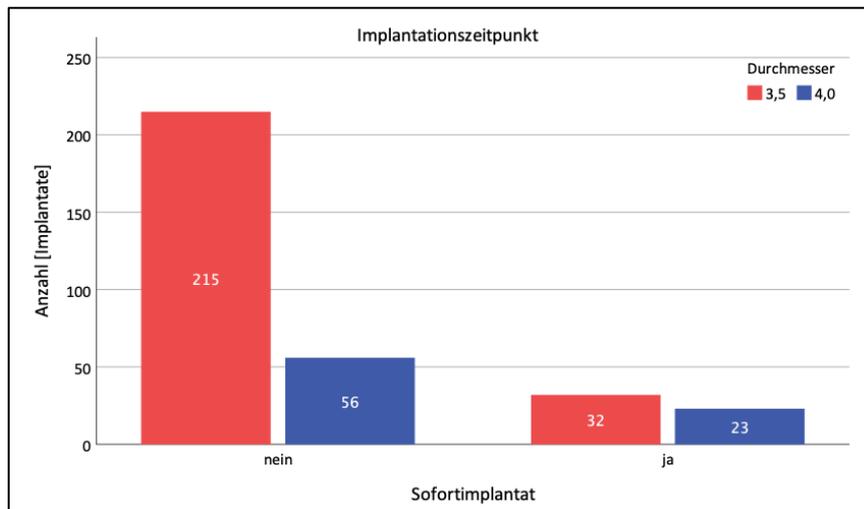


Abbildung 21: Implantationszeitpunkt nach Durchmesser

Die Implantate wurden weiterhin nach ihrem Implantationszeitpunkt klassifiziert. Insgesamt wurden 271 Implantate (83 Prozent) nach knöcherner Konsolidierung der Alveole implantiert. 55 der 326 inserierten Implantate (17 Prozent), wurden sofort nach Extraktion eines Zahnes implantiert. Dabei waren 32 Sofortimplantate (58 Prozent) DRI. Die zuvor beschriebene verzögerte Implantation wurde in der Auswertung nicht berücksichtigt. Der Gruppe der Sofortimplantation wurden nur diejenigen Implantate zugeordnet, die direkt nach Extraktion eines Zahnes inseriert wurden.

3.1.8 Belastungszeitpunkt

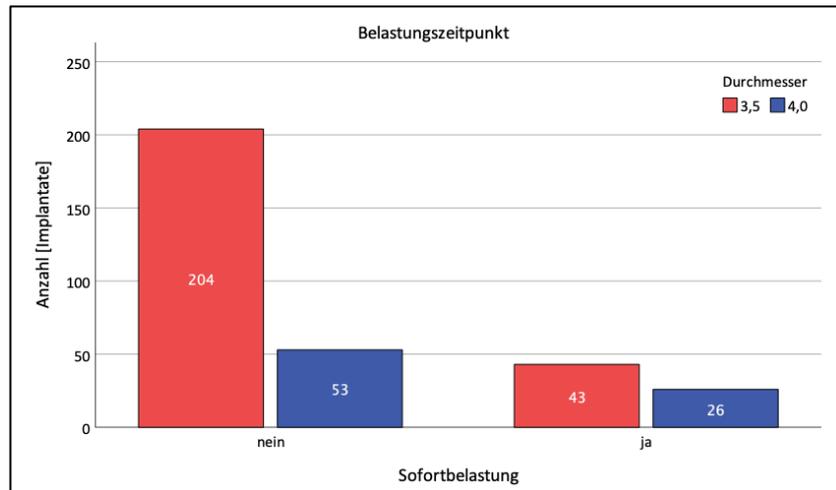


Abbildung 22: Belastungszeitpunkt nach Durchmesser

Vorrangig wurden die Implantate entsprechend dem Behandlungsprotokoll der Spätbelastung kaufunktionell belastet. Der Anteil der spätbelasteten Implantate, an den 326 Implantaten, betrug 79 Prozent. Weiterhin wurden 69 Implantate sofort versorgt (21 Prozent) und sofort belastet. In dieser Gruppe verzeichneten die DRI einen Anteil von 43 Implantaten (62 Prozent).

3.1.9 Lokalisation der Implantate nach Kiefer

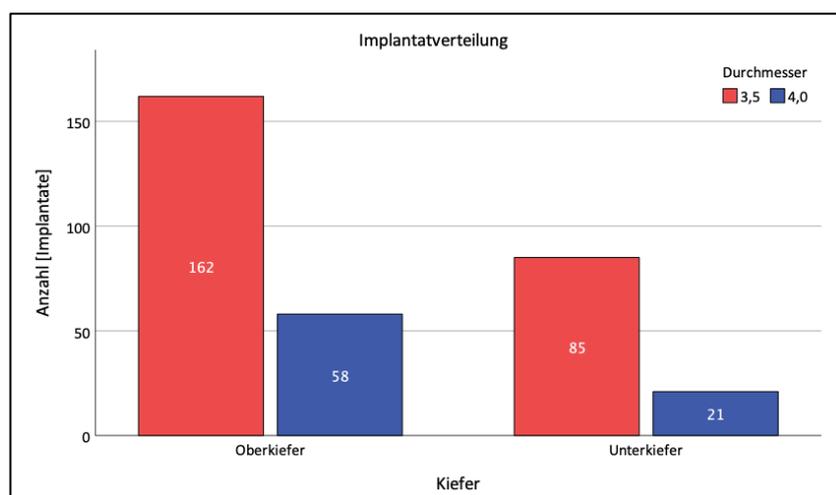


Abbildung 23: Implantat Verteilung nach Kiefer und Durchmesser

Insgesamt 220 Implantate wurden im Oberkiefer und 106 im Unterkiefer inseriert. Insgesamt wurden 162 der DRI (65 Prozent) im Oberkiefer inseriert. In der Kontrollgruppe verhielt es sich ähnlich. Auch hier wurden die Implantate überwiegend (73 Prozent) im Oberkiefer inseriert.

3.1.10 Lokalisation der Implantate nach Kieferabschnitt

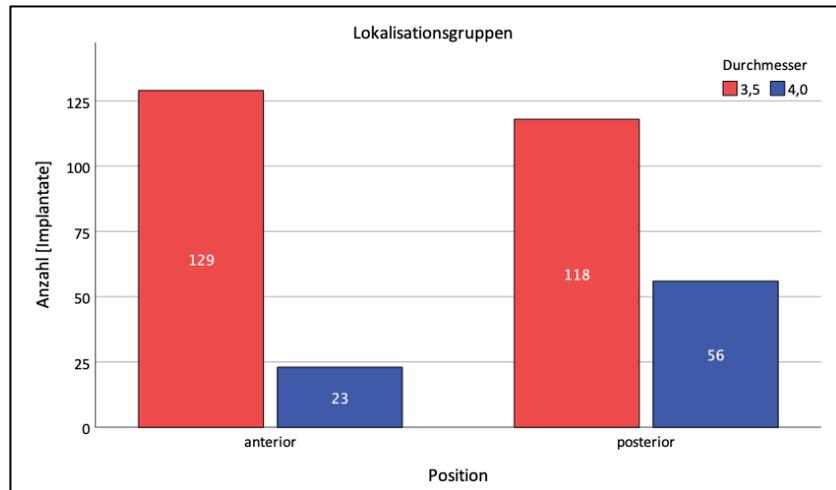


Abbildung 24: Lokalisationsgruppen nach anteriorer und posteriorer Belastungszone

Zur weiteren Präzisierung der Lokalisation der Implantate, wurde die Positionierung in den anterioren und posterioren Belastungsbereich eingeteilt. Der anteriore Belastungsbereich umfasst die Front-, sowie die Eckzähne. Der posteriore Bereich die Prämolaren und Molaren. 129 DRI wurden im anterioren und 118 im posterioren Belastungsbereich implantiert.

3.1.11 Art des Zahnersatzes

Die Art der prothetischen Versorgung unterteilte sich in Einzelzahnkronen, Brücken und Suprakonstruktionen.

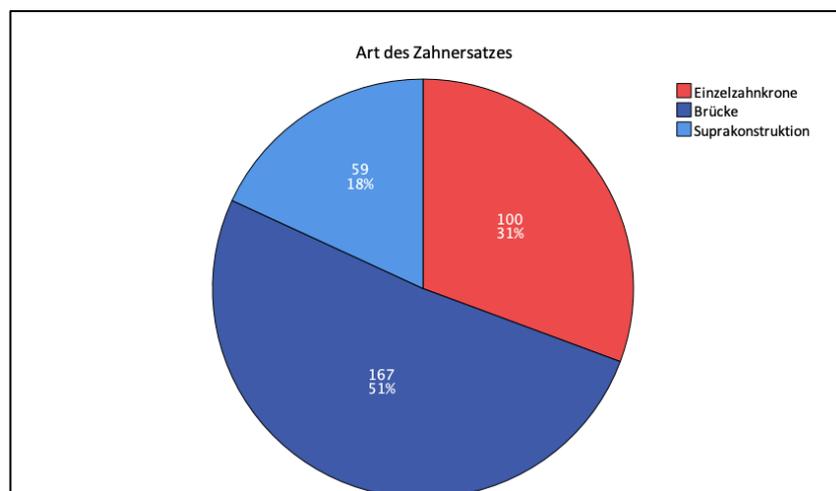


Abbildung 25: Art des Zahnersatzes

3.1.12 Augmentationsverfahren

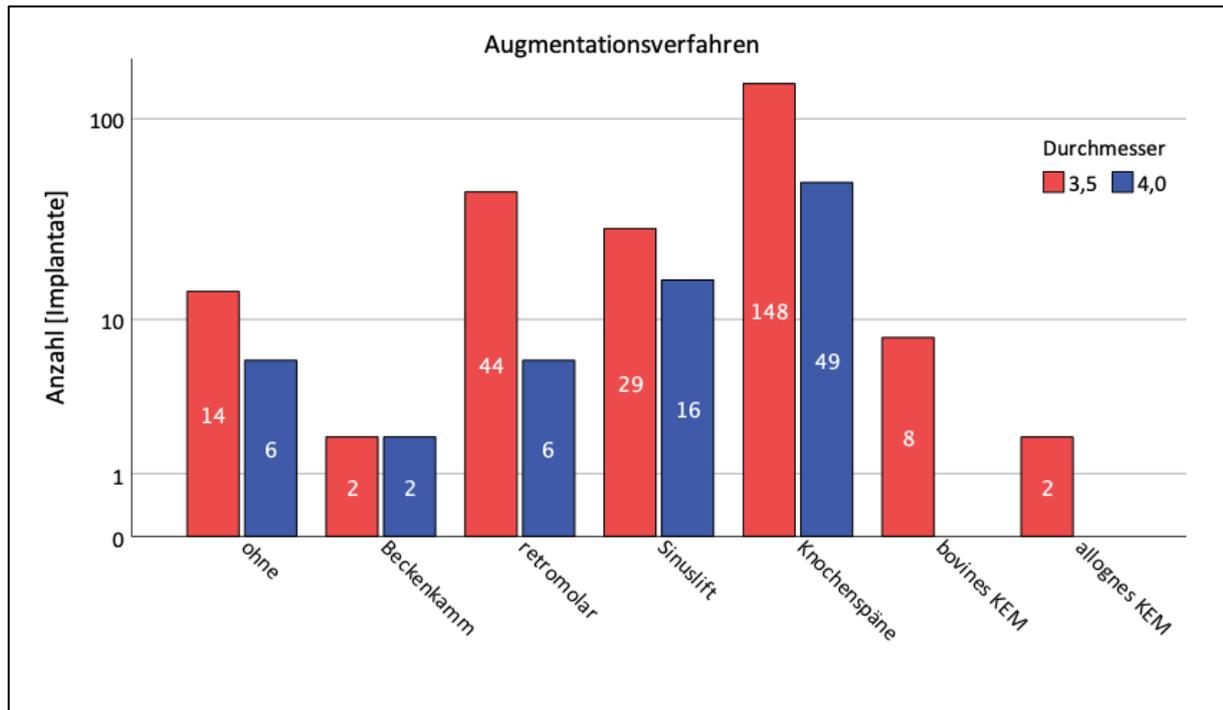


Abbildung 26: Augmentationsverfahren in Abhängigkeit des Durchmessers (logarithmisch)

Zur Unterstützung und Verbesserung des Osseointegrationsverhaltens der Implantate, wurden zusätzliche Augmentationen durchgeführt. Die Abbildung ist logarithmisch dargestellt. Insgesamt war die Anlagerung von autologen Knochenspänen in beiden Gruppen das häufigste Augmentationsverfahren (60 Prozent), gefolgt von Kieferkammrekonstruktionen mit retromolaren Knochenentnahmen. Nur bei 20 von 326 Implantationen wurde auf Augmentationsverfahren vollständig verzichtet (6 Prozent). In der statistischen Auswertung wurde die laterale Anlagerung von Knochenspänen mit den Fällen ohne Augmentation zusammengefasst. Die laterale Anlagerung stellt keinen separaten Eingriff zur Gewinnung von Knochenvolumen dar, sondern bediente sich nur des Umstandes, dass die Späne, die bei der Bohrung anfallen, routinemäßig gesammelt und lateral angelagert wurden, um diese nicht zu verwerfen.

3.2 Untersuchungsprotokoll

Die Erfassung der Namen, der Geburtsdaten, des Geschlechts, sowie der Anamnese erfolgte digital mit dem Verwaltungssystem der Praxis Dr. Bayer und Kollegen (Charly by Solutio, solutio GmbH & Co. KG, Holzgerlingen). Weiterhin wurden den Patienten Nummern zugewiesen, um die Patientendaten nach der Auswertung vollständig zu pseudonymisieren.

Neben der allgemeinen Anamnese wurden bei den Patienten auch möglichen Risikofaktoren dokumentiert, die die Ausbildung einer Periimplantitis fördern können. Der Tabakkonsum und die Erkrankung an Diabetes mellitus Typ 1 und 2 wurden abgefragt. Aus der digitalen Patientenakte wurden das verwendete Implantatsystem, der Durchmesser, die Länge, die Lokalisation, das Implantationsdatum, Allgemeinerkrankungen, sowie die Medikamentenanamnese entnommen. Zu letzteren zählen vor allem Antikoagulationstherapien, Radiatio, Chemotherapie, Einnahme von Bisphosphonaten, Einnahme von immunsupprimierenden Medikamenten und Störungen des Knochenmetabolismus. Darüber hinaus wurde der Patientenakte die Art der prothetischen Versorgung entnommen (Einzelzahnkronen, Brücken, Suprakonstruktionen) und kategorisiert.

3.3 Radiologische Auswertung – Bestimmung des periimplantären Knocheniveaus

Die Beurteilung und Analyse des periimplantären Knocheniveaus erfolgte anhand radiologischer Kontrollaufnahmen, die im Rahmen der routinemäßigen Nachsorge in der Praxis in Landsberg am Lech, oder in der Überweiserpraxis angefertigt wurden. Sofern die Bilder in den Überweiserpraxis vorlagen, wurden diese verschlüsselt übermittelt, ausgewertet und die gewonnenen Daten in die Auswertung aufgenommen. Bei den untersuchten Röntgenbildern handelt es sich ausschließlich um nativ-digitale Panoramaschichtaufnahmen und Zahnfilme. Die Vermessung der Röntgenaufnahmen erfolgte mithilfe der Röntgensoftware Sidexis4 von Dentsply Sirona. Zunächst wurden die Messinstrumente der Software anhand der bekannten Implantatlänge kalibriert. Referenzpunkte waren die Implantatschulter und der Implantatapex. Die Verbindungslinie zwischen den beiden Referenzpunkten wurde mit der vom Hersteller vorgegebenen Implantatlänge kalibriert. Folgend wurde zur Qualitätssicherung der Vermessung der Kontrast, sowie die Belichtung optimiert und die Gradationskurve so

angepasst, dass die Grenzlinien eines evtl. vorhandenen periimplantären Knochenverlustes gut ersichtlich wurden. Darüber hinaus wurde zur Sicherung der Prozessqualität eine gelbe Linie eingezeichnet, die den Verlauf des periimplantären Knochniveaus darstellt. In den meisten Fällen stellt sich der Verlust des periimplantären Knochniveaus in Form eines dreidimensionalen Resorptionstrichters dar, der durch drei Punkte begrenzt wird:

1. Implantatschulter
2. Kontakt zwischen Implantat und Knochen
3. Laterale Begrenzung des Resorptionstrichters

Das vertikale periimplantäre Knochniveau wurde quantifiziert, indem die Distanz zwischen dem Referenzpunkt Implantatschulter und dem Referenzpunkt Implantat-Knochenkontakt ermittelt wurde. Sofern eine Reduktion des periimplantären Knochniveaus vorlag, wurde dies mit einem negativen Vorzeichen versehen. Weiterhin wurde das horizontale, periimplantäre Knochniveau durch die Differenz zwischen dem lateralen, orthogonalen Grenzpunkt des Resorptionstrichters auf Höhe der Implantatschulter und der Implantatschulter selbst quantifiziert. Sodann ein horizontaler Verlust des periimplantären Knochens zu verzeichnen war, wurde dieser ebenfalls vermessen und mit einem positiven Vorzeichen als horizontale Distanz vermerkt. Für weitere Auswertungen hinsichtlich des Implantationszeitpunktes, sowie des Belastungszeitpunktes und des Vergleichs verschiedener Strategien der Augmentation, wurde der Mittelwert des mesial und distal vertikalen Knochendefektes bestimmt.

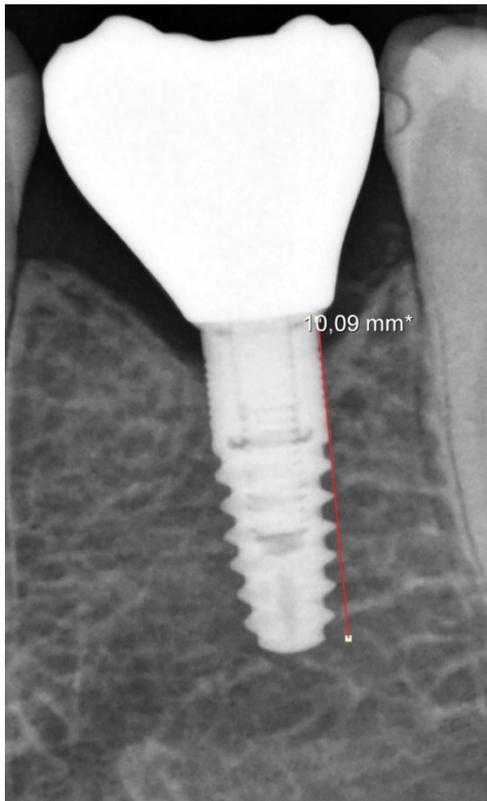


Abbildung 28: Referenzmessung

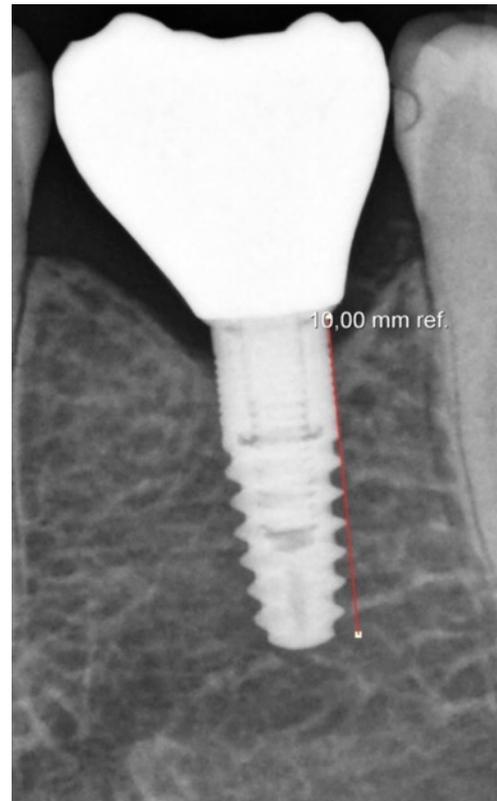


Abbildung 27: Kalibrierung der Implantatlänge

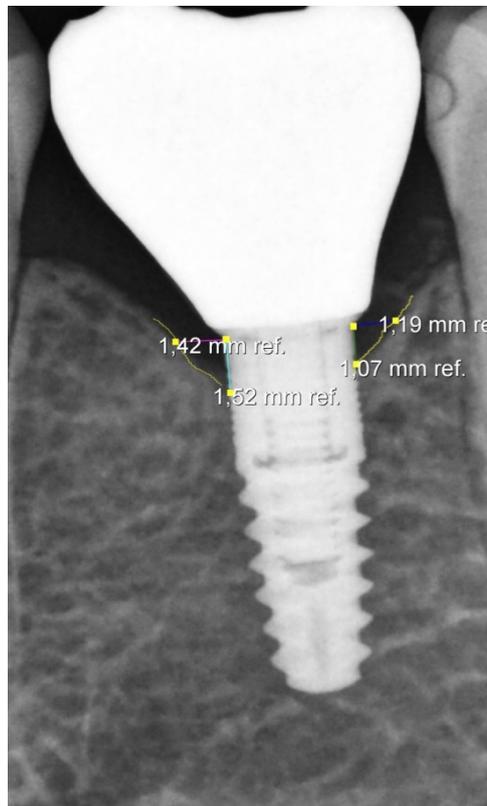


Abbildung 29: Vermessung des periimplantären Knochenniveaus

3.4 Datenverarbeitung und statistische Auswertung

3.4.1 Ethikantrag

Vor Beginn der Datenerhebung und der statistischen Auswertung wurde ein Antrag an die Ethikkommission der Universität zu Köln gestellt, in dem das retrospektive Vorhaben umfangreich erläutert wurde. Weiterhin wurden datenschutzrechtliche Fragestellungen erörtert und festgehalten, dass die Patientendaten im Zuge der Datenerhebung pseudonymisiert werden sollen. Dies konnte durch Verwendung der Karteinummern anstelle der Namen der Patienten sichergestellt werden. Jedem Patienten wurde eine entsprechende Patientenidentifikationsnummer und jedem Implantat eine Implantatidentifikationsnummer zugewiesen. Des Weiteren wurde der Datenschutzbeauftragte der Praxis, in welcher die Daten erhoben wurden, über das retrospektive Forschungsvorhaben unterrichtet und begleitete dieses stets.

3.4.2 Sicherung der Datenqualität

Die Messwerte wurden vom Autor dieser Dissertation erhoben (P.H) der vor Beginn der radiologischen Auswertung durch seinen Betreuer (J.N) anhand von 10 Patientenfällen kalibriert wurde. Zur Sicherung der Datenqualität wurden alle Messwerte, bei denen ein progressiver Verlust des periimplantären Knochenniveaus vorlag und mehr als 5mm vertikaler Verlust nach < 2 Jahren vorlag von J.N geprüft und reevaluiert.

3.4.3 Statistische Methoden

Die Datenerhebung erfolgte mit Microsoft Excel. Hierbei wurden alle nominalen Daten codiert, um eine einheitliche Übertragungssyntax gewährleisten zu können. Die Statistische Auswertung der erhobenen Messwerte erfolgte unter Verwendung der Statistiksoftware SPSS 24.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Die deskriptiven Daten wurden in SPSS übertragen und entsprechende Analyseverfahren programmiert. Die Erstellung der Diagramme erfolgte in R. Zur Auswertung wurde ein gemischtes lineares Modell verwendet, in dem die hierarchische Struktur der Daten abgebildet werden kann. Es existierten mehrere Messzeitpunkte zu einem Implantat und wiederum mehrere Implantate pro Person. Das gemischte lineare Modell ermöglicht die Abbildung der Ergebnisse und den Vergleich der Systeme, trotz der

unterschiedlichen Beobachtungshäufigkeit. Zur Visualisierung der Ergebnisse wurden in R aus den Daten zwei Linien errechnet, deren Verlauf linear abgebildet werden kann. Jede Linie besitzt eine Steigung, die dem mathematisch berechneten Faktor F entspricht, der die Entwicklung des periimplantären Knochenniveaus abbildet. Durch dieses Verfahren entstehen keine Dropouts wie bei der klassischen Varianzanalyse von retrospektiven, teilweise lückenhaften Daten. Dieses Vorgehen erhöht die Qualität des statistischen Ergebnisberichts. Jede Linie, die in den Scatterplots abgebildet ist, repräsentiert ein System. Laufen zwei Linien parallel zueinander, so kann geschlussfolgert werden, dass zwischen den Systemen kein Unterschied besteht. Darüber hinaus kann errechnet werden, ob trotz Divergenz der Linien ein signifikanter Unterschied zwischen den Systemen besteht. Dieser Berechnung wurde die Annahme zugrunde gelegt, dass der physiologische Knochenabbau an Implantaten in den ersten 12 Monaten 0,5mm und in der darauffolgenden Zeit 0,2mm pro Jahr betragen. Die Formulierung der Nullhypothesen wurde so gewählt, dass sie angenommen werden können, wenn die Systeme keinen signifikanten Unterschied über den Beobachtungszeitraum aufweisen.

Die Nullhypothesen umfassten folgende Annahmen:

Es existiere kein signifikanter Unterschied in der Entwicklung des periimplantären Knochenniveaus hinsichtlich der Verwendung von DRI oder SDI im anterioren, sowie posterioren Zahnbogen in nativem und augmentiertem Knochen. Darüber hinaus existiere kein signifikanter Unterschied zwischen dem Implantationszeitpunkt, dem Belastungszeitpunkt und dem Vorhandensein von Risikofaktoren.

4. Ergebnisse

In der vorliegenden retrospektiven Fall-Kontroll-Studie konnten insgesamt 326 Implantate nachuntersucht werden. 247 der nachuntersuchten Implantate entfielen auf die Testgruppe der 3,5mm Durchmesser reduzierten Implantate (DRI), 79 auf die Standard Durchmesser Implantate (SDI). Der Beobachtungszeitraum innerhalb der Studie lag bei einer Nachbeobachtungsdauer von bis zu 76 Monaten mit einem Mittelwert von 24,4 Monaten. Die Auswertung der Daten erfolgte in SPSS. Als Methode zur Berechnung der statistischen Signifikanz der zuvor postulierten Nullhypothesen, wurde ein gemischtes lineares Modell gewählt. Dieses ist in der Lage die unterschiedliche Anzahl der Implantate pro Patienten, sowie die unterschiedliche Häufigkeit der Nachbeobachtung in den Röntgenaufnahmen zu berücksichtigen. Der Varianzanalyse wurde zugrunde gelegt, dass im ersten Jahr nach Implantation ein Knochenabbau von 0,5mm und in den darauffolgenden Jahren ein Knochenabbau von 0,2mm pro Jahr als physiologisch angesehen werden können. Die Nullhypothesen wurden unter Verwendung des gemischten Modells einer Varianzanalyse unterzogen und auf Annahme oder Ablehnung der Nullhypothese überprüft.

4.1 Periimplantäres Knochenniveau

An jedem Implantat wurden vier Messpunkte erhoben. Zu diesen zählten das mesial vertikale sowie das distal vertikale und das mesial horizontale, sowie das distal horizontale Knochenniveau. Weiterhin wurde der Mittelwert des vertikalen und horizontalen Knochenniveaus für jedes Implantat je Untersuchung berechnet. Die linearen Zusammenhänge betreffen das Knochenniveau [mm] und die Beobachtungszeit [Jahre]. Im Folgenden wurde der periimplantäre Knochenabbau mittels eines gemischten linearen Modells als Faktor F berechnet, der sich graphisch als Steigung einer Linie in einem linearen Diagramm abbilden lässt. Sofern sich beide Linien parallel zueinander verhalten, sind die Test- und die Kontrollgruppe hinsichtlich der Entwicklung des periimplantären Knochenniveaus identisch. Divergieren die Linien, ist ein unterschiedliche Entwicklung des periimplantären Knochenniveaus zwischen der Test- und der Kontrollgruppe zu verzeichnen. Der Winkel zwischen den Linien bildet die Differenz des periimplantären Knochenniveaus zwischen den beiden Systemen graphisch ab und kann hinsichtlich seiner statistischen Signifikanz analysiert werden.

4.1.2 Vertikales Knochenniveau 3,5mm DRI versus 4,0mm SDI

H_{01a} : Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem vertikalen Knochenniveau der 3,5mm DRI und dem der 4,0mm SDI.

Die Nullhypothese konnte angenommen werden, da sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen dem Knochenniveau der 3,5mm Testgruppe und der der 4,0mm Kontrollgruppe berechnen ließen. ($p = 0,068$, $95\% CI = -0,01 - 0,15$)

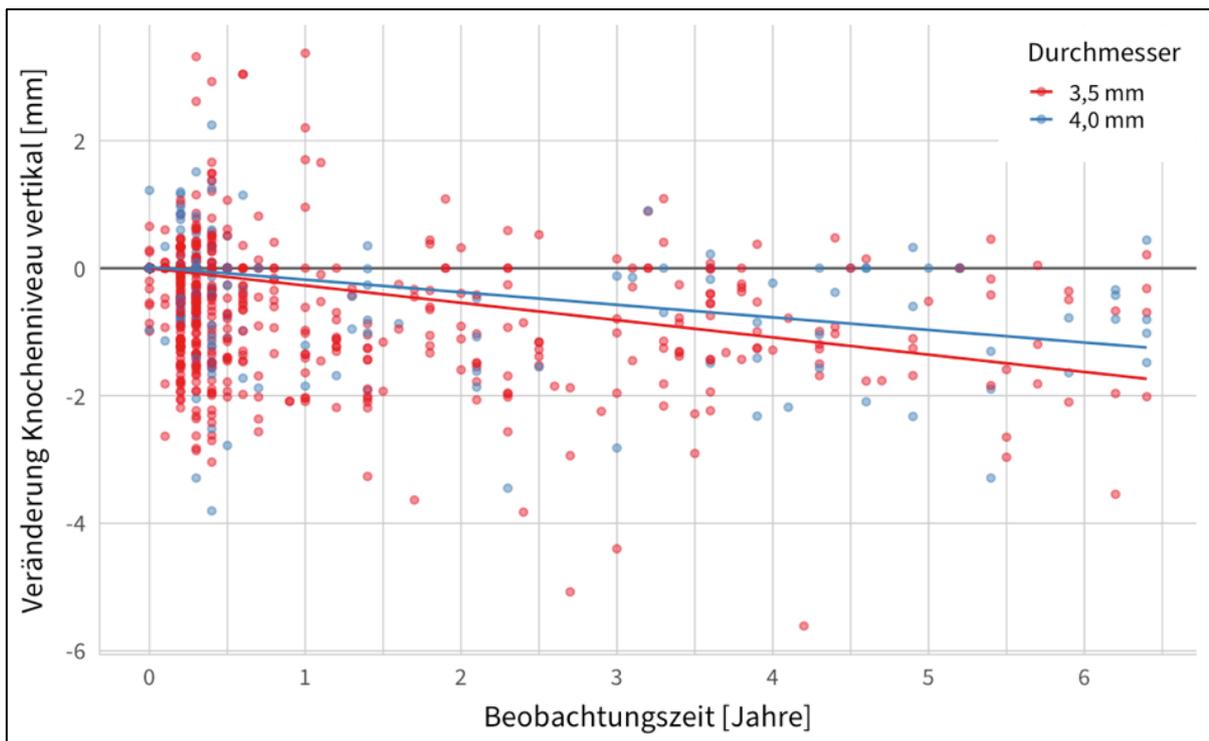


Abbildung 30: vertikales Knochenniveau 3,5mm vs. 4,0mm

4.1.3 Horizontales Knochenniveau 3,5mm DRI versus 4,0mm SDI

H_{01b} : Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem horizontalen Knochenniveau der 3,5mm Implantate und dem der 4,0mm Implantate.

Die Nullhypothese konnte angenommen werden, da sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen dem Knochenniveau der 3,5mm Testgruppe und dem der 4,0mm Kontrollgruppe berechnen ließen ($p = 0,598$, 95% CI = -0,04 - 0,07)

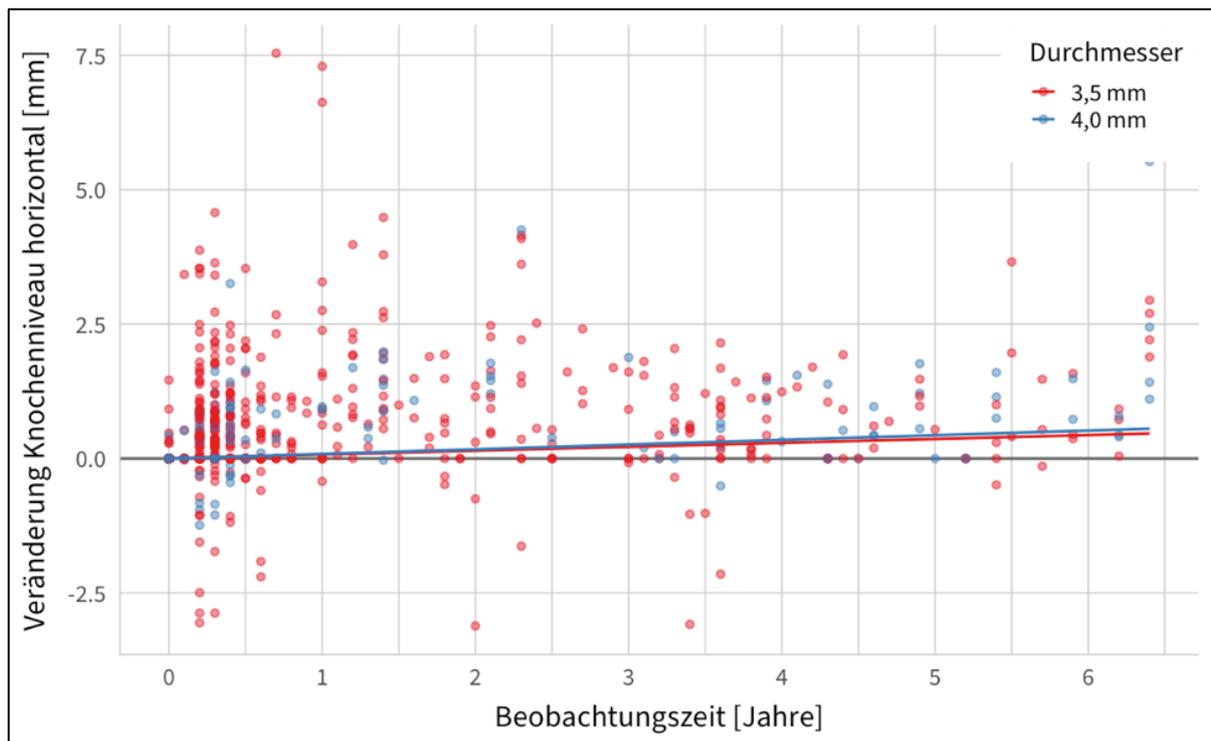


Abbildung 31: horizontales Knochenniveau 3,5mm vs. 4,0mm

4.2 Implantatlokalisierung

Posteriore versus anteriore Belastungszone in der Gruppe der DRI (3,5mm)

H_{02a}: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem vertikalen Knochenniveau der 3,5mm Implantate in der anterioren und posterioren Belastungszone

Die Nullhypothese konnte für das vertikale Knochenniveau angenommen werden, da kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Belastungszonen berechnet werden konnte ($p = 0,06$, 95% CI = -0,18 - 0,00) Anhand des p-Wertes kann jedoch geschlossen werden, dass eine Tendenz zu einer Unterscheidung hinsichtlich des periimplantären Knochenniveaus in den beiden Gruppen vorliegt. Daraus kann die Notwendigkeit weiterer Nachuntersuchungen von DRI im posterioren Kieferabschnitt abgeleitet werden.

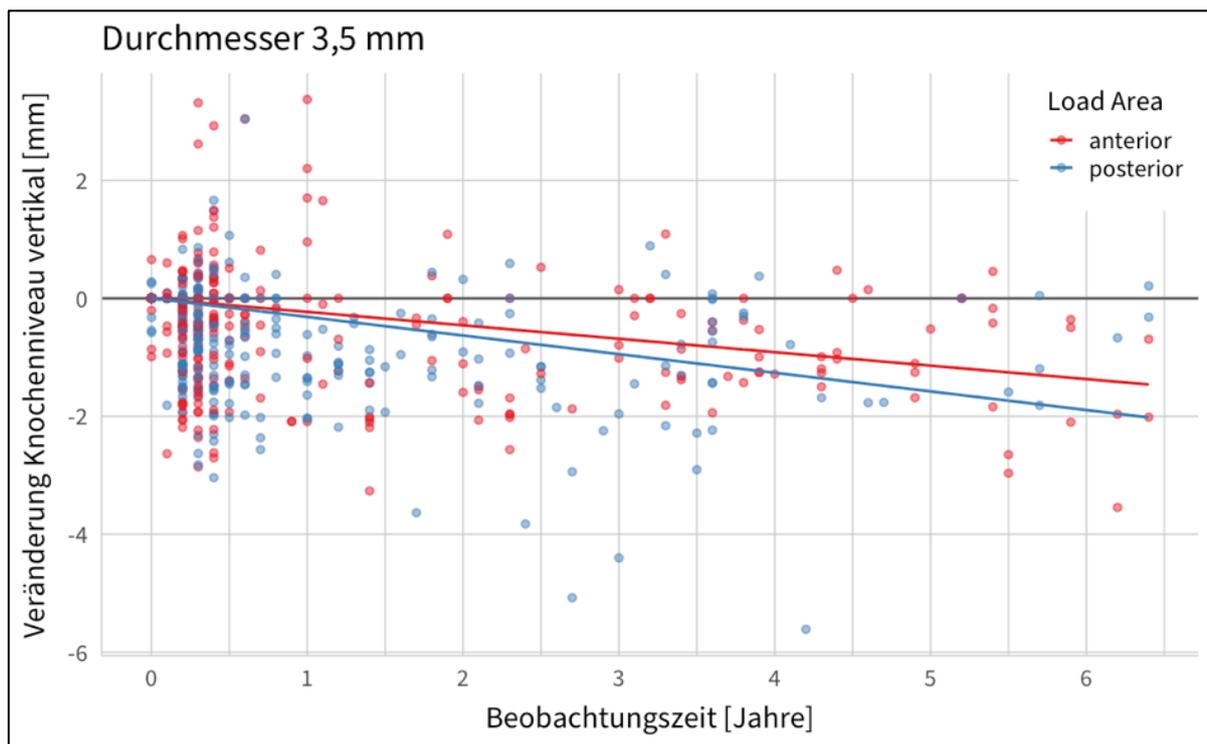


Abbildung 32: vertikales Knochenniveau anteriore vs.posteriore Belastungszone (3,5mm)

H_{02b}: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem horizontalen Knochenniveau der 3,5mm Implantate in der anterioren und posterioren Belastungszone.

Für das horizontale Knochenniveau konnte die Nullhypothese ebenfalls angenommen werden. Zwischen der anterioren und posterioren Belastungszone konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des periimplantären Knochenniveaus errechnet werden ($p = 0,506$, $95\% \text{ CI} = -0,08 - 0,04$) In diesem Fall zeigt der annähernd parallele Verlauf der Linien des Diagramms besonders deutlich das sehr ähnlich verlaufende Knochenniveau.

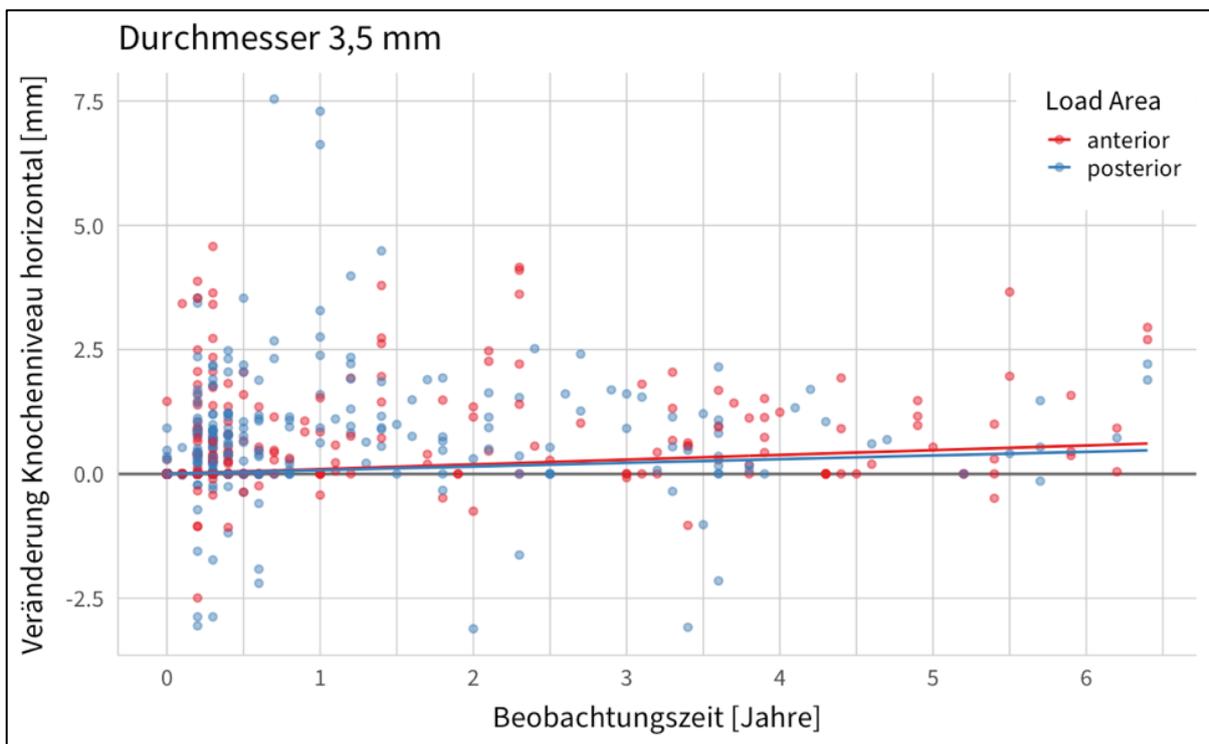


Abbildung 33: horizontales Knochenniveau anteriore vs. posteriore Belastungszone (3,5mm)

4.3 Implantationszeitpunkt - Sofortimplantation versus verzögerte Implantation

Im Folgenden wurde das vertikale Knochenniveau als Vergleichsparameter benutzt, da es die stärkste Aussagekraft über die Defektconfiguration an dentalen Implantaten besitzt.

H₀₃: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Insertionszeitpunkt der Implantate in beiden Gruppen hinsichtlich der Entwicklung des vertikalen Knochenniveaus.

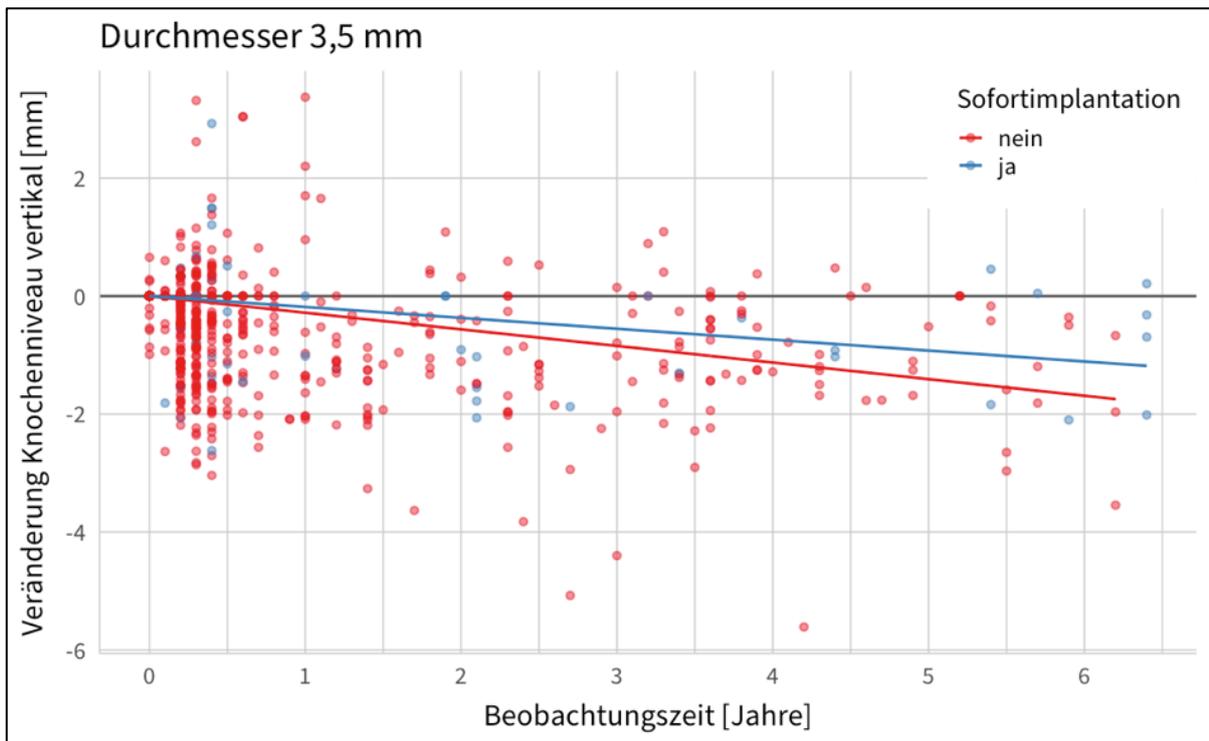


Abbildung 34: Sofortimplantation vs. verzögerte Implantation - vertikales Knochenniveau (3,5mm)

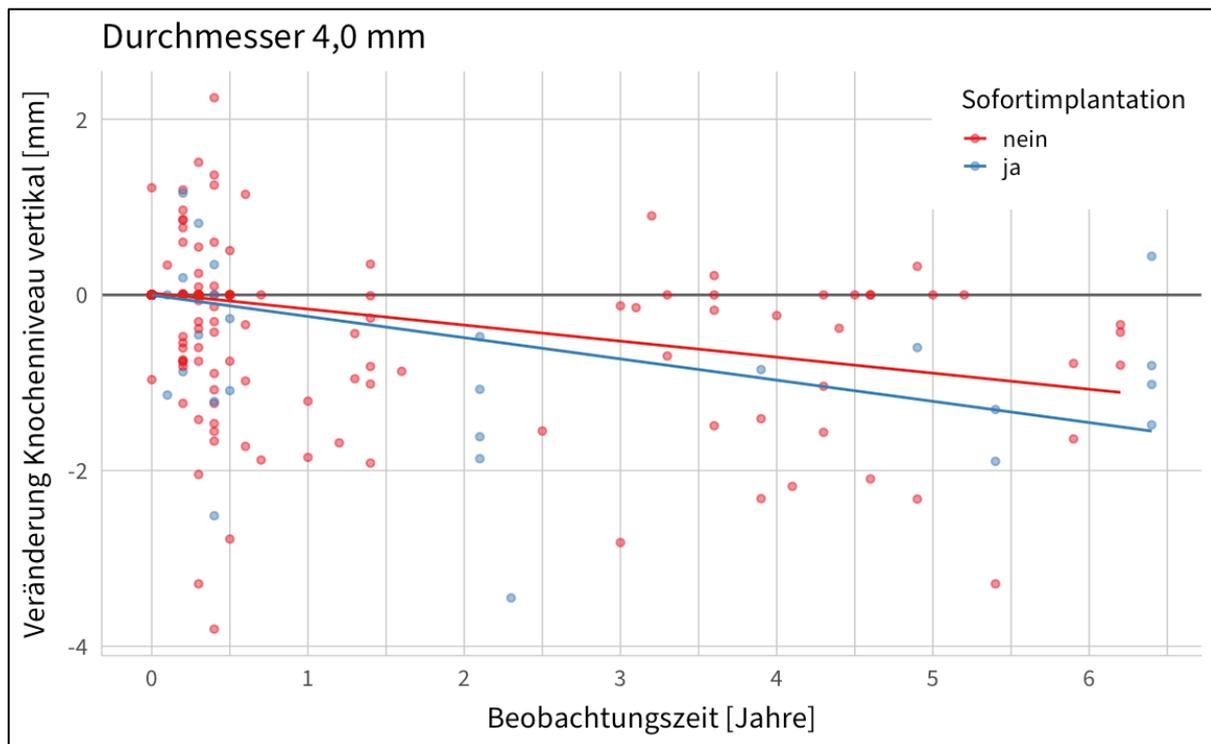


Abbildung 35: Sofortimplantation vs. verzögerte Implantation - vertikales Knochenniveau (4,0mm)

Für beide Gruppen konnte die Nullhypothese angenommen werden. In der Gruppe der DRI konnte kein signifikanter Unterschied zwischen der Sofortimplantation und der verzögerten Implantation nachgewiesen werden ($p = 0,085$, $95\% \text{ CI} = -0,01 - 0,21$). Dabei wurden gleichermaßen alle Belastungszonen berücksichtigt. In der Gruppe der SDI wurde ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen der Sofortimplantation und der verzögerten Implantation verzeichnet ($p = 0,430$, $95\% \text{ CI} = -0,21 - 0,09$). Anhand der p -Werte kann konstatiert werden, dass die DRI jedoch hinsichtlich des Implantationszeitpunktes in der Tendenz eher eine unterschiedliche Entwicklung des periimplantären Knochenniveaus aufweisen.

4.4 Belastungszeitpunkt – Sofortbelastung versus verzögerte Belastung

H₀₄: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen dem Belastungszeitpunkt der Implantate in beiden Gruppen hinsichtlich der Entwicklung des vertikalen Knochenniveaus.

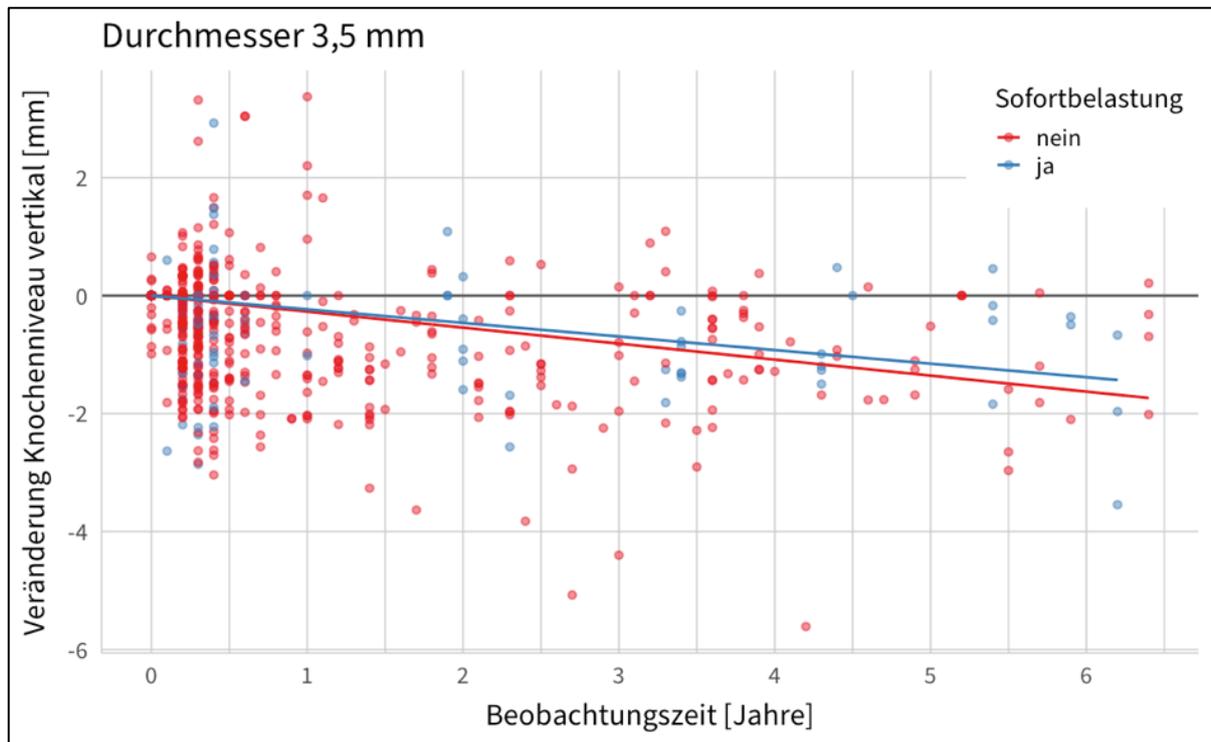


Abbildung 36: Sofortbelastung vs. verzögerte Belastung - vertikales Knochenniveau (3,5mm)

In der Gruppe der DRI konnte die Nullhypothese angenommen werden, dass kein signifikanter Unterschied zwischen dem Belastungszeitpunkt der Implantate besteht ($p = 0,434$, 95% CI = -0,06 - 0,14).

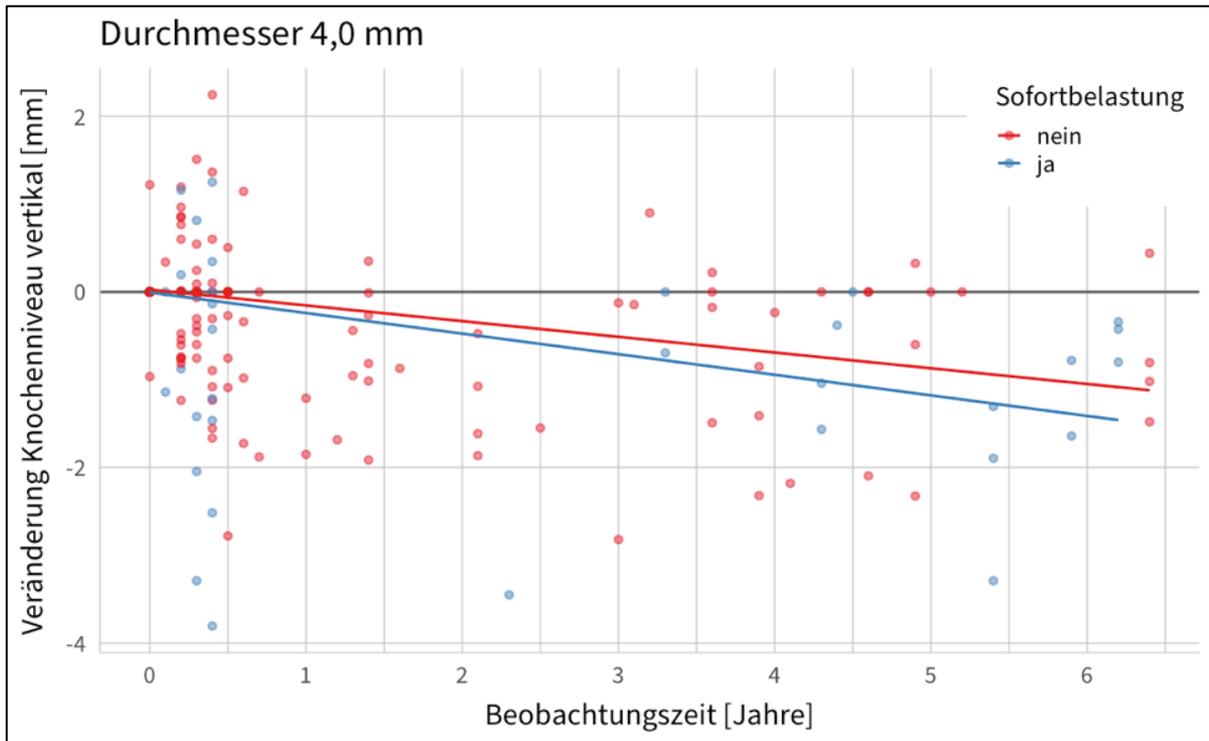


Abbildung 37: Sofortbelastung vs. verzögerte Belastung - vertikales Knocheniveau (4,0mm)

Die Gruppe der SDI zeigte ähnliche Ergebnisse. Auch in dieser Gruppe konnte die Nullhypothese angenommen werden, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Belastungszeitpunkten besteht ($p = 0,438$, 95% CI = -0,20 - 0,09).

4.5 Augmentation

H₀₅: Es existiert kein signifikanter Unterschied zwischen der Anwendung von Augmentationen wie Knochenblockentnahmen, Beckenkammaugmentationen, Sinuslift und dem umfangreichen Einsatz von Knochenersatzmaterialien an den DRI und SDI hinsichtlich der Entwicklung des vertikalen Knochenniveaus. Es wird angenommen, dass DRI keinen umfangreichen Augmentationsbedarf aufweisen.

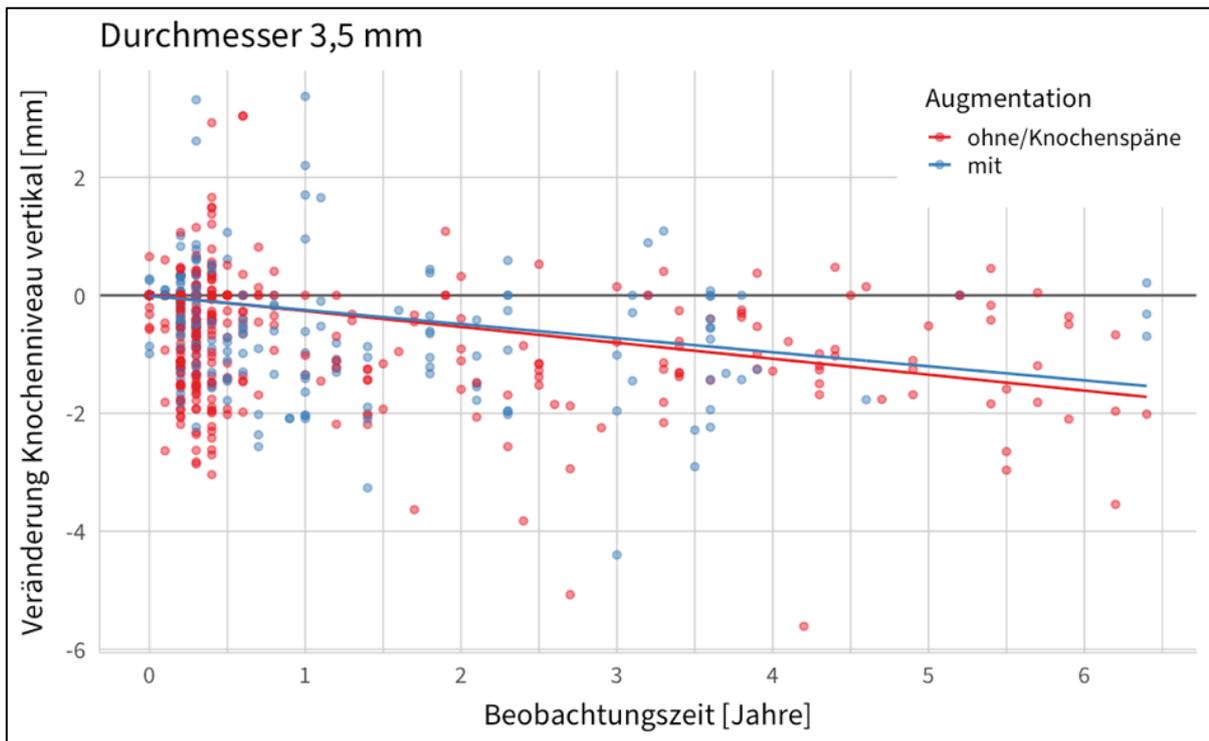


Abbildung 38: Augmentation vs. keine Augmentation / laterale Anlagerung von Knochenspänen (3,5mm)

Hinsichtlich der Unterscheidung zwischen umfangreichen Augmentationen und der lateralen Anlagerung von Knochenspänen aus der Knochenbohrung, oder dem gänzlichen Verzicht auf Augmentation oder Anlagerung an DRI ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das vertikale Knochenniveau. ($p = 0,527$, 95% CI = -0,07- 0,13).

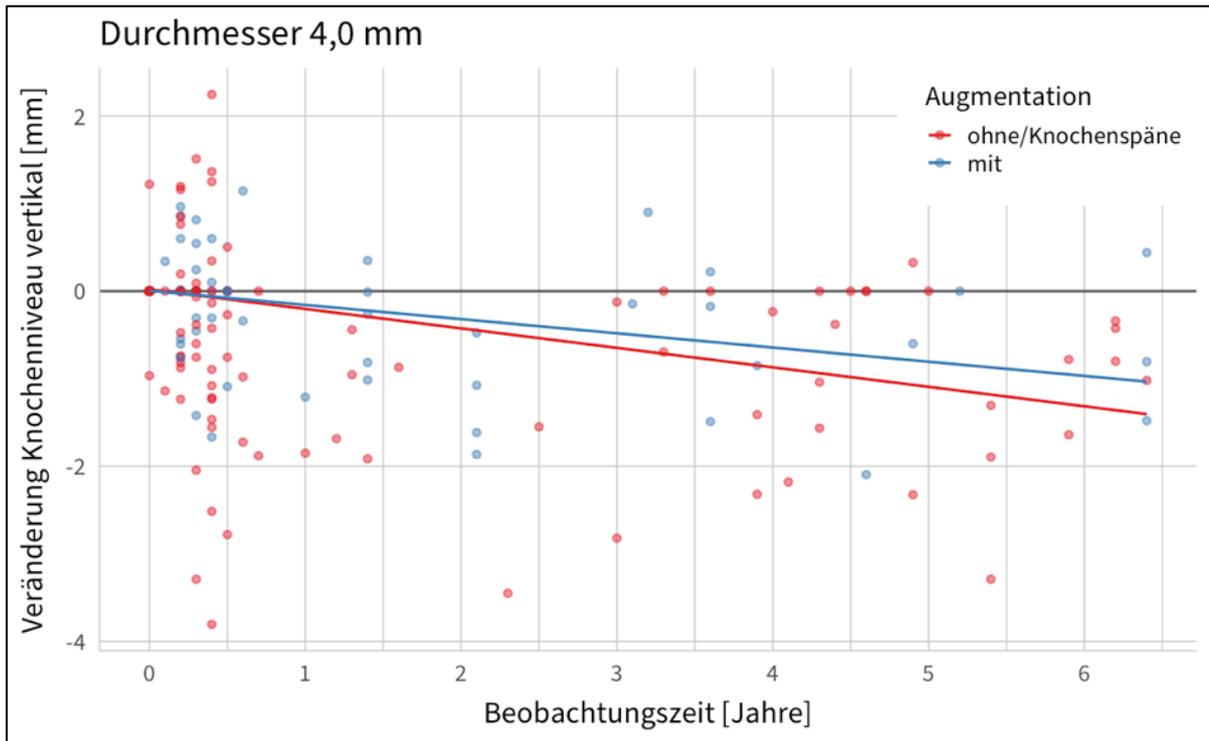


Abbildung 39: Augmentation vs. keine Augmentation / laterale Anlagerung von Knochenspänen (4,0mm)

Hinsichtlich der Unterscheidung zwischen umfangreichen Augmentationen und der Anlagerung von Knochenspänen aus der Knochenbohrung, oder dem gänzlichen Verzicht auf Augmentation oder Anlagerung an SDI ergaben sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das vertikale Knochenniveau. ($p = 0,408$, 95% $CI = -0,08 - 0,20$).

4.6 Nikotinanamnese

In der vorliegenden Arbeit wurde unter anderem die Nikotinanamnese der Patienten erhoben. Dabei wurde zwischen leichten und starken Rauchern unterschieden. Im Folgenden wurden die Gruppen Patienten mit positiver Nikotinanamnese als Raucher zusammengefasst.

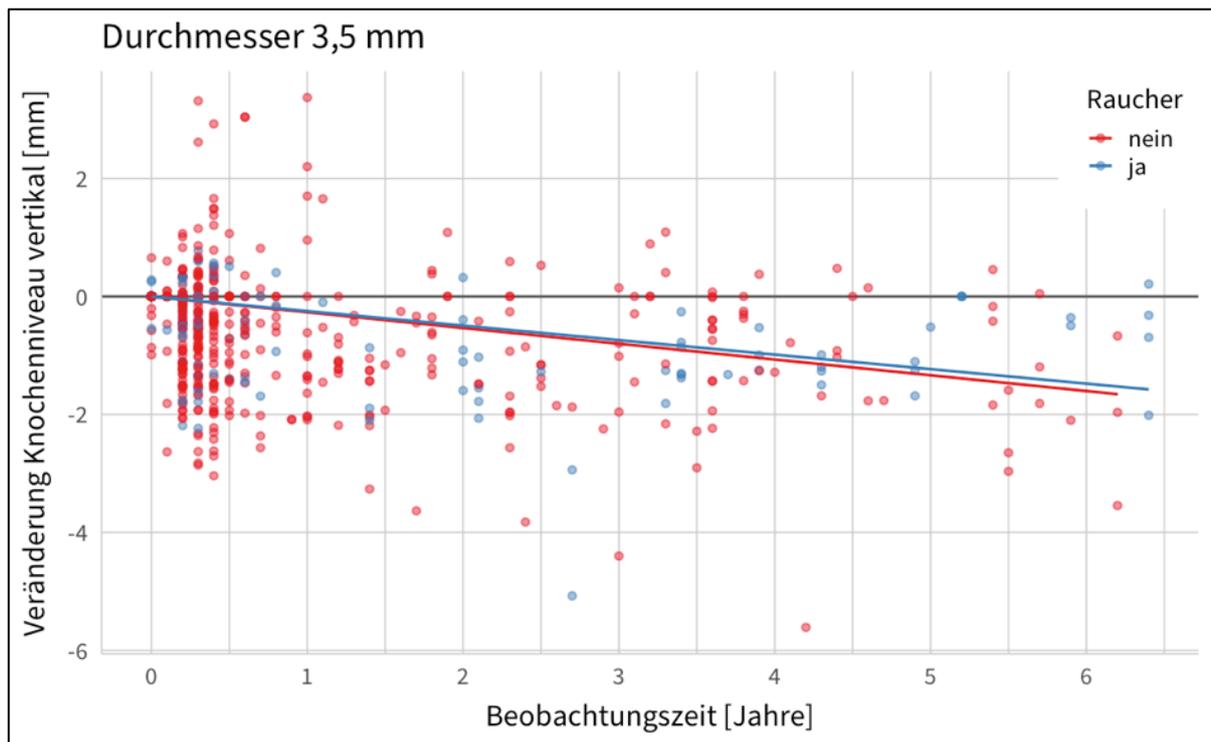


Abbildung 40: Raucher vs. Nichtraucher in der Gruppe der DRI (3,5mm)

Das vertikale Knocheniveau an den DRI in den Gruppen der Nichtraucher und Raucher zeigte keine signifikanten Unterschiede. ($p = 0,664$, $95\% \text{ CI} = -0,07 - 0,12$).

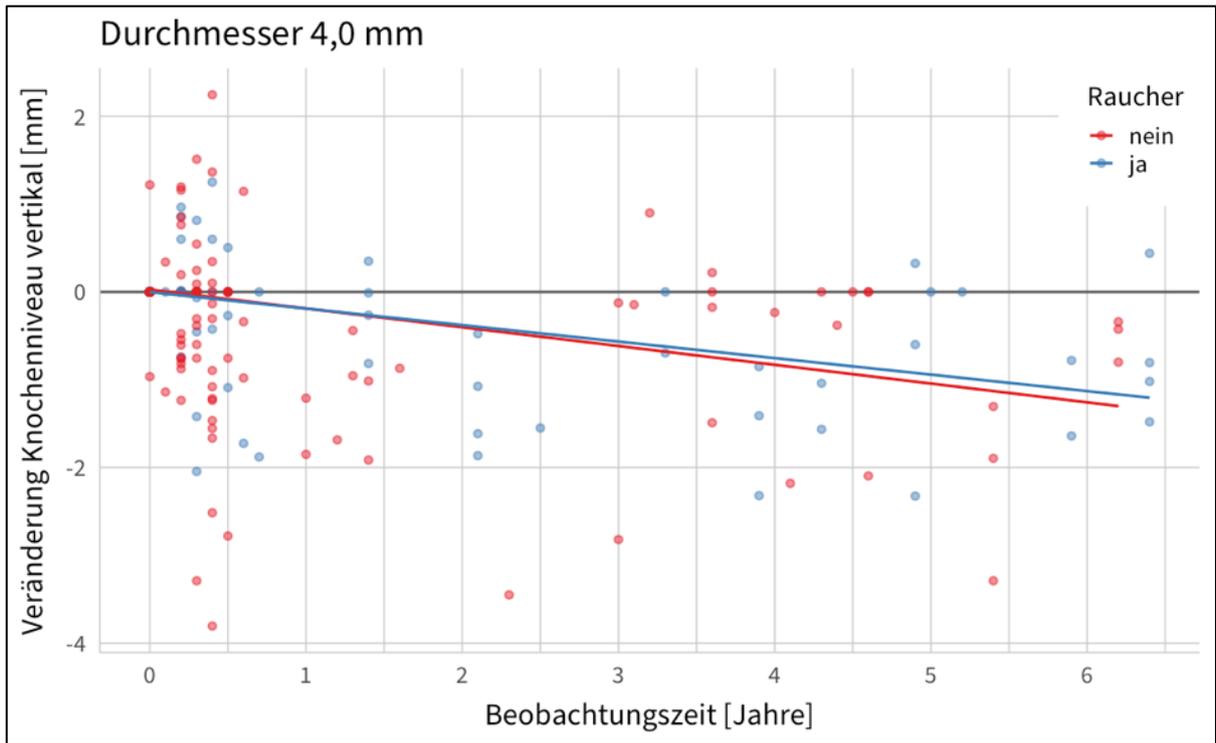


Abbildung 41: Raucher vs. Nichtraucher in der Gruppe der SDI (4.0mm)

Das vertikale Knocheniveau an den SDI in den Gruppen der Nichtraucher und Raucher zeigte ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. ($p = 0,709$, 95% CI = -0,11 - 0,16).

5. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde das periimplantäre Knochenniveau von durchmesserreduzierten Implantaten (DRI/3,5mm) mit dem periimplantären Knochenniveau von Standardimplantaten verglichen (SDI/4,0mm). Weiterhin wurden die Implantatposition, der Implantationszeitpunkt, die Implantatbelastung und die präoperative, zweizeitige Augmentation als einflussnehmender Parameter erhoben und analysiert. Ziel der Arbeit ist es, das periimplantäre Knochenniveau der DRI und SDI zu vergleichen und zu evaluieren, ob die DRI für eine Indikationserweiterung im Seitenzahnbereich oder höheren mechanischen Belastungszonen geeignet sind. Darüber hinaus soll evaluiert und kritisch betrachtet werden, ob DRI unter Anwendung verkürzter Behandlungs- und Belastungsstrecken signifikante Unterschiede zu klassischen spätbelasteten, verzögert inserierten Implantaten aufweisen.

In den vergangenen Jahrzehnten galten Implantate mit Durchmessern ab 4,0mm als Standardgröße für sämtliche Implantat Indikationen. Den Standardimplantaten gegenüber stehen durchmesserreduzierte Implantate mit Durchmessern kleiner oder gleich 3,5mm. Diese DRI sollen neue, minimalinvasivere Vorgehen in der Versorgung von Patienten mit Implantaten ermöglichen. Dabei steht unter anderem die Reduktion der patientenindividuellen Belastung durch eine Reduktion der Behandlungsdauer und Umfang im Vordergrund. Diese kann durch den Verzicht auf das zweizeitige Vorgehen mit Augmentationseingriffen, sowie der direkten Verkürzung des Behandlungsprotokolls durch Sofortimplantation und Sofortbelastung deutlich verringert werden. Die Indikation der DRI besteht bei Implantation in defizitärem horizontalem Knochenvolumen und zahnbegrenzten Lücken mit wenig Abstand zu den Nachbarzähnen. Durch den verringerten Durchmesser soll der horizontale Platzbedarf verringert werden. Dem folgend können Augmentationen vermieden oder im Umfang reduziert werden. Besonders umfangreiche Augmentationen zur Regeneration des Knochens ein erhöhtes Behandlungsrisiko.

Zur Beurteilung des periimplantären Knochenniveaus wurden in der vorliegenden Arbeit die 1997 postulierten Anforderungen von *Roos et al.* angesetzt. Die Autoren legten damals fest, dass das periimplantäre Knochenniveau im ersten Jahr nicht mehr Knochenabbau als 1mm und in den darauffolgenden Jahren nicht mehr als 0,2mm pro Jahr aufweisen sollte⁶⁵.

5.1 Kritische Betrachtung des Studiendesigns

Die vorliegende Arbeit wurde als retrospektive Fall-Kontroll-Studie konzipiert und durchgeführt. Dabei wurden insgesamt 326 Implantate nachbeobachtet. 247 Implantate konnten der Testgruppe der SDI und 79 der Kontrollgruppe der DRI zugeordnet werden. Der mittlere Beobachtungszeitraum betrug 24 Monate mit einem maximalen Beobachtungszeitraum von 76 Monaten. Dem retrospektiven Charakter der Datenerhebung folgend, wurden die Implantate unterschiedlich oft nachbeobachtet. Somit konnten keine festen Untersuchungsintervalle festgelegt werden, die einen direkten zeitlichen Vergleich zwischen den Systemen ermöglichen. Aufgrund dieser Tatsache wurde die Varianzanalyse mittels eines gemischten linearen Modells durchgeführt, um die verschiedenen Ebenen der Daten abbilden und berücksichtigen zu können. Sämtliche SDI wurden bei Patienten inseriert, die simultan an anderer Stelle mit DRI versorgt wurden. Dies bildet in der Wertung der Ergebnisse eine gute Vergleichsgrundlage, da externe, patientenbezogene Parameter keinen Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Systeme nehmen konnten. Weiterhin wurde als ausschlaggebender Parameter die radiologische Auswertung des periimplantären Knochenniveaus gewählt. Dieses bildet mit hoher Genauigkeit den Verlauf der Osseointegration und Langzeitstabilität von Implantaten ab und ermöglicht einen Vergleich auf sehr genauer Ebene. Das Implantatüberleben spielte in der Auswertung der Daten eine untergeordnete Rolle, da nur ein einzelnes der 326 Implantate explantiert wurde und keine klinischen Lockerungen von Implantaten beobachtet und dokumentiert wurden. Unterzieht man das Studiendesign einer kritischen Betrachtung, so sollte erwähnt werden, dass ein Teil der Implantate nicht nachbeobachtet werden konnte, da Patienten in den Überweiserpraxen nicht zu regelmäßigen Recall Terminen erschienen. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen wäre für weitere Erhebungen ein prospektives Studiendesign sinnvoll. Eine weitere Überlegung die bereits Anwendung in anderen Studien findet ist der Beobachtungsbeginn zum Zeitpunkt der prothetischen Belastung. Durch die veränderte Wahl des Startpunktes der Beobachtung können Verzerrungen in den Daten, die durch Remodeling-Prozesse in der Einheilphase, die unter anderem von der Insertionstiefe des Implantates abhängen, vermieden werden. Andererseits sollte kritisch betrachtet werden, dass durch die studienindividuelle Verlegung des Beobachtungsbeginns die Vergleichbarkeit der Studien untereinander reduziert wird.

5.2 Biomechanik der DRI

Die Reduktion des Implantatdurchmessers bewirkt eine Änderung im Belastungsverhalten der Implantate. SDI erfahren bei exzentrischen Belastungen eine geringere Verformung und üben weniger Stress auf den krestalen Knochen aus. Infolgedessen geht man davon aus, dass mit abnehmenden Implantatdurchmessern die Belastung des krestalen Knochens und das Risiko des periimplantären Knochenverlusts steigen. In Studien konnte nachgewiesen werden, dass sich das Belastungsverhalten der DRI von dem der SDI vor allem im krestalen Bereich des Knochens tatsächlich unterscheidet. So zeigte eine Studie von *Anitua et al.* mittels Finite-Elemente-Analyse (FEM), dass die Belastung bei einer Veränderung von 3,3mm auf 4,0mm Durchmesser um 28,2 Prozent abnahm⁶⁶. Weitere FEM Studien zeigten, dass die Belastung des Knochens unter anderem von der Dicke der krestalen Kortikalis abhängig ist⁶⁷. Die Belastung verteilt sich dabei zumeist auf die ersten fünf Gewindgänge und nimmt von krestal nach apikal ab. Auch die Insertionstiefe scheint einen Einfluss auf das Belastungsverhalten der Implantate zu haben. So konnte nachgewiesen werden, dass die Belastung des Knochens durch die Verlagerung der Implantatposition von krestal nach subkrestal verringert werden konnte⁶⁸. Unter Berücksichtigung dieser mechanischen Herausforderungen, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit dem radiologisch nachuntersuchten periimplantären Knochenniveau, um einen Anhaltspunkt zu finden, ob das veränderte mechanische Verhalten der DRI einen Einfluss auf deren klinische Langzeitstabilität hat.

5.3 Knochenniveau der DRI im teilbezahnten und zahnlosen Kiefer

*Klein et. al*³⁴ haben in einer Literaturübersicht zunächst eine Kategorisierung und Definition des Begriffs DRI vorgenommen. Dabei wurden folgende Gruppen unterteilt.

- Gruppe I einteilige Implantate <3,0mm
- Gruppe II zweiteilige Implantate 3,0-3,25mm
- Gruppe III zweiteilige Implantate 3,3-3,5mm

Die Implantate der DRI Testgruppe, die in der vorliegenden Arbeit beobachtet wurden, lassen sich folglich der Gruppe III nach *Klein et. Al*³⁴ zuordnen. Die Literaturübersicht beschrieb unter anderem 5 Studien, in denen DRI der Gruppe III mit SDI verglichen wurden. Hierbei konnte kein signifikanter Unterschied im Implantatüberleben gezeigt werden³⁴. Bei der Einordnung der Ergebnisse der Literaturübersicht von *Klein et al.* sollte berücksichtigt werden, dass ein direkter Vergleich zur vorliegenden Studie nur bedingt möglich ist, da das Implantatüberleben durch zusätzliche Bewertungskriterien definiert wird als der alleinige Vergleich des periimplantären Knochenniveaus. Trotzdem lässt sich schlussfolgern, dass durch die Annahme der Nullhypothese der vorliegenden Studie, dass zwischen dem periimplantären Knochenniveau der Testgruppe (DRI) und Kontrollgruppe (SDI) kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Langzeitstabilität des periimplantären Knochenniveaus besteht, auch das Implantatüberleben keinen signifikanten Unterschied aufweist. Insgesamt konnte in der Nachbeobachtung der vorliegenden Arbeit gezeigt werden, dass kein signifikanter Unterschied zwischen dem vertikalen Knochenniveau ($p = 0,068$, 95% CI = -0,01 - 0,15) und horizontalem Knochenniveau ($p = 0,598$, 95% CI = -0,04 - 0,07) der DRI und SDI besteht. Beim Implantatüberleben zeigte sich in der Testgruppe der DRI eine Explantation nach 91 Tagen und in der Gruppe der SDI keine Explantation. Im Falle der Explantation nach 91 Tagen, handelte es sich um ein 3,5mm DRI an der Position 26, das zusätzlich mit einem externen Sinuslift versorgt wurde. Anamnestisch ergab sich eine positive Nikotinanamnese mit >10 Zigaretten pro Tag. Das Implantat wurde verzögert implantiert und zeigte nach 91 Tagen keine Osseointegration unter Ausschluss funktioneller Belastung und gedeckter Einheilung. Aufgrund der anamnestischen Risikoanalyse und der geringen Explantationsfallzahl ($n=1$) bei insgesamt 247 beobachteten DRI, wurde auf eine Überlebensanalyse nach Kaplan-Meyer verzichtet.

Insgesamt konnte in der Literaturübersicht von *Klein et. al.*⁶⁹ gezeigt werden, dass im Bereich der DRI einige Studien ausschließlich DRI beobachteten, rein retrospektiver Natur waren und keine Kontrollgruppe aufwiesen. In Ihrer Literaturübersicht konnten die Autoren lediglich 4 Studien identifizieren, die der Gruppe III der DRI zuzuordnen waren und den Ergebnissen der Testgruppe eine Kontrollgruppe entgegenstellten. Eine Studie um *Anitua et. al.*⁷⁰ aus dem Jahr 2008 kam bei der Nachuntersuchung von 804 DRI und einer Kontrollgruppengröße von 1654 SDI zu dem Ergebnis, dass die Gruppe der 3,3mm DRI schlechtere Überlebensraten aufwies als die Kontrollgruppe der 3,75mm SDI. In der Gruppe der DRI lag die Überlebensrate nach 54 Monaten bei 98,8%, wohingegen in der Gruppe der 3,75mm SDI eine Überlebensrate von 99,2% ermittelt werden konnte.⁷⁰ Der Ergebnisbericht der retrospektiven Kohortenstudie zeigte, dass der Implantatverlust in der Gruppe der DRI fast ausschließlich bei Sofortimplantationen und sofortbelasteten Implantaten auftrat.⁷⁰ Dahingehend ist zu konstatieren, dass in der vorliegenden Arbeit keine ausbleibende Osseointegration nach sofortiger Insertion oder Belastung beobachtet werden konnte. Eine weitere Studie von *Lazarra et al.*⁷¹ verglich 3,3mm DRI mit 4,0mm SDI und schlüsselte die Ergebnisse nach der Verteilung auf Maxilla und Mandibula auf. In dieser Studie zeigten die Ergebnisse eine 96,0% Überlebensrate der DRI in der Mandibula, sowie eine 95,5% Überlebensrate in der Maxilla im Vergleich zu 95,0% und 92,0% für die SDI. Eine weitere Studie von *Malo et al.* verdeutlichte, dass die Anwendung der DRI auch in posterioren Kieferabschnitten erfolgreich ist⁷². Die Autoren kamen darüber hinaus zu dem Schluss, dass der Erfolg der Verwendung von DRI im posterioren Kieferabschnitten auch von der individuellen Erfahrung und den Fertigkeiten des Operateurs abhängt⁷². Dahingehend sollte in Betracht gezogen werden, dass DRI besonders unter dem Aspekt der erleichterten Verwendung ohne vergrößerten Augmentationsumfang angewandt werden. Die Frage, inwiefern sich diese zwei Effekte durch das Ausbleiben von komplexen Augmentationen gegenüber der komplexeren Implantation gegenseitig kompensieren, könnte Gegenstand zukünftiger Erhebungen sein. Auch *Barter et al.* konnten in einer Studie belegen, dass 3,3mm DRI mit einer Nachbeobachtungszeit von 24 Monaten stabile Ergebnisse zeigten⁷³. *Romeo et al.* untersuchten in einer Studie 188 teilbezahnte Patienten, welchen 330 Implantate inseriert wurden. Verwendet wurden 3,3mm DRI und 4,1mm SDI. Hinsichtlich des Implantatversagens durch krestalen Knochenverlust konnten die Autoren keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen identifizieren⁷⁴.

Trotz vielversprechender Ergebnisse der DRI Gruppe III, kamen *Klein et al.* in Ihrer Literaturübersicht zu dem Ergebnis, dass eine generelle Empfehlung für DRI der Gruppe III in posterioren Kieferabschnitten nicht ausgesprochen werden kann. Dies begründeten die Autoren vor allem in der Studienlage und dem Mangel an randomisierten klinischen Studien mit Vergleichsgruppen. Unter Berücksichtigung der Literatur und der in der vorliegenden Arbeit erhobenen Daten, können mehrere Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Die DRI stellen eine fundierte Alternative zu SDI dar. Im anterioren Zahnbogen konnten sie in mehreren Studien ihre Vergleichbarkeit mit den SDI beweisen. Die Verwendung der DRI im posterioren Zahnbogen scheint mit mehreren morphologischen und biomechanischen Risikofaktoren verbunden zu sein. Eines der Probleme bei der Verwendung der DRI im Seitenzahnbereich, ist die Knochenqualität der posterioren Maxilla. In der posterioren Maxilla scheint die Erfolgsaussicht der DRI besonders stark von der präoperativen Diagnostik und Bildgebung abzuhängen. Dies begründet sich unter anderem in der Biomechanik der DRI, die durch ihren verringerten Durchmesser signifikant höhere Belastungen auf eine kleinere Knochenoberfläche übertragen und dadurch speziell im posterioren Bereich der Maxilla schwerere Grundvoraussetzungen für eine suffiziente Osseointegration schaffen⁶⁶. Weiterhin konnte in Studien eine Abhängigkeit der Belastung der Kortikalis und der vertikalen Implantatposition herstellen. So schlussfolgerten die Autoren, dass eine subkrestale Positionierung der Implantate zu einer Verringerung der Belastung des krestalen Knochens und somit zu besserer Osseointegration führte⁶⁸. Darüber hinaus scheint die Länge der DRI ein Einflussfaktor für die Langzeitstabilität des periimplantären Knochenniveaus zu sein. Sofern das vertikale Platzangebot die Insertion von DRI länger als 10,00mm erlaubt, sind keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf die Stabilität des periimplantären Knochenniveaus bei Sofortversorgungen mit DRI zu erwarten. Daraus kann abgeleitet werden, dass die DRI im posterioren Seitenzahnbereich besonders in horizontal defizitären Knochenverhältnissen mit vertikalem Knochenangebot von über 10,0mm eine sinnvolle Alternative zu konventionellen Implantationsverfahren darstellen könnten.

5.4 Sofortimplantation

Sofortimplantationen beschreiben den Umstand, dass die Implantation simultan mit der Extraktion eines Zahnes erfolgt, ohne ossäre Konsolidierung der Alveole post extractionem. In einer Literaturübersicht von *Klein et al.* wurden Komplikationen in der Gruppe III der DRI vor Allem bei Sofortimplantationen und Sofortbelasteten Implantaten beobachtet. Im Vergleich hierzu, zeigten sich in der vorliegenden Auswertung keine signifikanten Unterschiede zwischen den sofort- und den verzögert implantierten DRI ($p = 0,085$, $95\% \text{ CI} = -0,01 - 0,21$). In der vorliegenden Studie wurden in der Testgruppe 32 DRI als Sofortimplantate erfasst und 215 verzögert inseriert. In der Gruppe der SDI konnte ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen dem periimplantären Knochenniveau der sofort- und der verzögert implantierten SDI verzeichnet werden. In der Gruppe der SDI wurden insgesamt 23 Implantate sofort- und 56 verzögert implantiert. *Degidi et al.* untersuchten in einer Studie mit insgesamt 510 DRI, von denen 255 sofort implantiert und funktionell nicht belastet wurden. Die Autoren konnten nach einer mittleren Beobachtungsdauer von 20 Monaten einen höheren periimplantären Knochenverlust beobachten, als in der Gruppe der SDI. Darüber hinaus stellten die Autoren fest, dass Implantate mit 3,4mm und 3,5mm Durchmesser sowie Implantate mit Längen über 13mm ein stabileres periimplantäres Knochenniveau zeigten als solche kürzer als 13mm oder mit geringerem Durchmesser⁷⁵. Die in der vorliegenden Arbeit beobachteten DRI einen Durchmesser von 3,5mm und einer Länge von überwiegend größer oder gleich 10mm. Die Beobachtung, dass in der vorliegenden Studie kein signifikanter Unterschied zwischen den DRI und den SDI werden konnte, deckt sich folglich mit den Beobachtungen der Gruppe um *Degidi et al.*

5.5 Sofortbelastung

Die Sofortimplantation mit konsekutiver Sofortbelastung ist seit Jahren Gegenstand intensiver Forschung und hat inzwischen längst den Weg in den Behandlungsalltag gefunden. So konstatierten *Del Fabbro et al.* in ihrer Literaturübersicht, dass die Sofortimplantation ein berechenbares und erfolgreiches Behandlungskonzept darstellt⁷⁶. *Chen et al.* hingegen kamen zu dem Ergebnis, dass sofortbelastete Implantate zwar gute klinische Langzeitergebnisse zeigten, aber generell höhere Komplikationsraten aufwiesen als die verzögerte Belastung⁷⁷. So lag die Implantat-Überlebensrate in der Gruppe der sofortbelasteten Implantate signifikant unter der der spätbelasteten Implantate ($p = 0,012$, 95% CI = 0,954 - 0,994). Hinsichtlich des periimplantären Knochenniveaus, des Attachmentverlustes sowie der Implantatstabilität konnte die Studie keine signifikanten Unterschiede zwischen sofort-, verzögerter- und Spätbelastung feststellen. Die Ergebnisse dieser Studie decken sich weitgehend mit denen der vorliegenden Arbeit. In den vorliegenden Daten konnte kein Implantatverlust nach Sofortversorgung und Sofortbelastung ermittelt werden. Darüber hinaus konnte kein statistisch signifikanter Unterschied hinsichtlich der Stabilität des periimplantären Knochenniveaus zwischen sofort- und verzögert belasteten Implantaten festgestellt werden ($p = 0,434$, 95% CI = -0,06 - 0,14). *Ding et al.*⁵⁷ konnten in einer Studie nachweisen, dass die Belastung des Knochens im Vergleich zwischen 3,3mm und 4,1mm Implantaten unter Sofortbelastung signifikante Unterschiede aufweisen. Anhand der Daten wurde geschlussfolgert, dass Implantate unter 10mm Länge mindestens 4,1mm Durchmesser aufweisen sollten, um die Belastung des Knochens in der Phase der Einheilung zu reduzieren⁵⁷.

5.6 Augmentationen und durchmesserreduzierte Implantate

Eine umfangreiche, präimplantologische, zweizeitige Augmentation kann ein erhöhtes Risiko für den Erfolg einer Implantation darstellen. Dieser Erkenntnis folgend beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Frage, inwiefern zweizeitige Augmentationen in einen engen Indikationsbereich durch die Verwendung von durchmesserreduzierten Implantaten ergänzt oder ersetzt werden können. In der vorliegenden Fall-Kontroll-Studie konnte während der Datenauswertung kaum ein Implantat identifiziert werden ($n=27$), dass keine zusätzliche Anlagerung von autologen Knochenmaterialien erfuhr. Die Beschreibung dieses Umstandes wurde als lokale Anlagerung von Knochenspänen klassifiziert. Hierbei handelte es sich ausschließlich um autologes Material aus der Bohrung des Implantatbettes, das unter Zuhilfenahme eines Bone-Collectors gesammelt und lateral angelagert wurde.

Wie bereits zuvor beschrieben, tritt nach Zahnverlust stets eine dentoalveoläre Atrophie des Kieferknochens auf. Es existieren unterschiedliche Möglichkeiten diese Effekte zu kompensieren, um eine erfolgreiche Implantation zu ermöglichen. Dabei spielt die Defektkonfiguration eine entscheidende Rolle. Der Vergleich zwischen DRI und Augmentationsverfahren sollte sich idealer Weise auf die horizontalen Knochendefekte konzentrieren, da dies durch die Durchmesserreduktion ein besonderer Vorteil der DRI sein könnte. Aufgrund der geringen Fallzahl an isolierten horizontalen Knochendefiziten, wurde in der vorliegenden Arbeit jedoch der grundlegende Vergleich zu umfangreichen Augmentationsverfahren getätigt. Zu diesen zählten nach Auswertung der Daten die laterale Augmentation von autologen Knochenblockentnahmen, der Sinuslift, die Beckenkammaugmentation, sowie umfangreiche Anlagerungen von allogenen Knochenersatzmaterialien.

Wird ein Implantat ohne zusätzliche Augmentation inseriert, so spricht man von einem in nativen Knochen inserierten Implantat. Dem gegenüber steht die Möglichkeit der Implantation in augmentierten Knochen. Augmentierter Knochen zeigt stets eine postoperative Knochenresorption, weshalb die Augmentation oft initial überextendiert wird. Die Überextension birgt die Gefahr der Entstehung von Wunddehiszenzen oder der übermäßigen Resorption des Augmentats durch Muskel und Bindegewebszug. Zur Einordnung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können verschiedene Studien herangezogen werden. *Michalczyk et al.* konnten in einer retrospektiven Studie an

Knochenblockaugmentaten im Unterkiefer nach drei Jahren eine durchschnittliche Resorption von 2,03mm feststellen³⁷. *Lorenzoni et al.* beobachteten nach 5 Jahren unter Verwendung von GBR Verfahren eine Knochenresorption von 1,39mm an Knochenblockaugmentaten im Unterkiefer⁷⁸. *Buser et al.* ermittelten für dasselbe Vorgehen einen Knochenverlust von $2,95 \pm 0,87$ mm nach fünf Jahren⁷⁹. Den Ergebnissen dieser Studien zufolge kann davon ausgegangen werden, dass autologe Knochenblockaugmentationen ähnlich gute Langzeitergebnisse zeigen wie Implantationen im nativen Knochen. Knochenblockaugmentationen können im Gegensatz zum Sinuslift im Oberkiefer auch horizontale Defekte kompensieren. Daher ist der Vergleich der Verwendung von DRI zur autologen Knochenblockaugmentation besonders angebracht. In der vorliegenden Arbeit konnte nur ein Explantationsfall identifiziert werden. Dieser betraf ein DRI, das zuvor aufgrund des defizitären vertikalen Knochenniveaus mittels Sinuslift augmentiert wurde. Da der Sinuslift zur Augmentation eines vertikalen Defekts angewandt wurde, widerspricht die Explantation im Falle dieses DRI nicht der These, dass die Implantation von DRI in nativem Knochen den Ergebnissen von SDI in augmentiertem Knochen nicht unterlegen ist. Im Zuge der Varianzanalyse wurden die DRI und SDI ohne Augmentation beziehungsweise solche mit Lateraler Anlagerung von Knochenspänen aus der Implantatbohrung mit denen verglichen, bei welchen Augmentationen durchgeführt wurden. Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Verfahren festgestellt werden. Dieses Ergebnis kann dahingehend positiv interpretiert werden, dass die Implantate auch ohne umfangreiche Augmentationen ein gutes Osseointegrationsverhalten zeigten. Demgegenüber steht die Überlegung, dass Verfahren wie die laterale Anlagerung von Knochenblockaugmenten gut dokumentiert sind und auch in der vorliegenden Arbeit ein langzeitstabiles periimplantäres Knochenniveau bei Augmentationsverfahren gezeigt werden konnte. Insgesamt sollte die Entscheidung für oder gegen eine Augmentation vor oder während der Insertion der Implantate also eine individuelle Entscheidung sein. Dabei sollten neben den anatomischen Voraussetzungen auch die Adhärenz der Patienten, sowie der Allgemeinzustand und geriatrische Aspekte berücksichtigt werden. Ein zweizeitiges Vorgehen mit Augmentation und Implantation zu unterschiedlichen Zeitpunkten kann für die Patienten eine große physische und psychische Belastung darstellen. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte kann der Verzicht auf Augmentationen und anstelle dessen die Verwendung von DRI eine sinnvolle Behandlungsalternative darstellen.

6. Literaturverzeichnis

1. Berczy K, Laszlo Z, Gondocs G, Shkolnik T, Joob FA. Changes of trends in the size of the dental implants in recent years Part 1. The role of short implants in dental implantology The literature review. *Fogorv Sz* 2016; **109**(4): 136-40.
2. Galindo-Moreno P, Nilsson P, King P, et al. Clinical and radiographic evaluation of early loaded narrow-diameter implants: 5-year follow-up of a multicenter prospective clinical study. *Clin Oral Implants Res* 2017; **28**(12): 1584-91.
3. Buser D, Mericske-stern R, Pierre Bernard JP, et al. Long-term evaluation of non-submerged ITI implants. Part 1: 8-year life table analysis of a prospective multi-center study with 2359 implants. *Clinical oral implants research* 1997; **8**(3): 161-72.
4. Degidi M, Piattelli A. Comparative analysis study of 702 dental implants subjected to immediate functional loading and immediate nonfunctional loading to traditional healing periods with a follow-up of up to 24 months. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants* 2005; **20**(1).
5. Krebs M, Schmenger K, Neumann K, Weigl P, Moser W, Nentwig GH. Long-term evaluation of ANKYLOS® dental implants, part I: 20-year life table analysis of a longitudinal study of more than 12,500 implants. *Clinical implant dentistry and related research* 2015; **17**: e275-e86.
6. Romeo E, Chiapasco M, Ghisolfi M, Vogel G. Long-term clinical effectiveness of oral implants in the treatment of partial edentulism: Seven-year life table analysis of a prospective study with ITI® Dental Implants System used for single-tooth restorations. *Clinical Oral Implants Research* 2002; **13**(2): 133-43.
7. Simion M, Nevins M, Rasperini G, Tironi F. A 13-to 32-Year Retrospective Study of Bone Stability for Machined Dental Implants. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry* 2018; **38**(4).
8. Pommer B, Mailath-Pokorny G, Haas R, Buseniechner D, Millesi W, Furhauser R. Extra-short (< 7 mm) and extra-narrow diameter (< 3.5 mm) implants: a meta-analytic literature review. *Eur J Oral Implantol* 2018; **11 Suppl 1**: S137-S46.
9. Aghaloo TL, Mardirosian M, Delgado B. Controversies in Implant Surgery. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am* 2017; **29**(4): 525-35.
10. Badran Z, Struillou X, Strube N, et al. Clinical Performance of Narrow-Diameter Titanium-Zirconium Implants: A Systematic Review. *Implant Dent* 2017; **26**(2): 316-23.
11. Sohrabi K, Mushantat A, Esfandiari S, Feine J. How successful are small-diameter implants? A literature review. *Clinical oral implants research* 2012; **23**(5): 515-25.
12. Renouard F, Nisand D. Impact of implant length and diameter on survival rates. *Clinical oral implants research* 2006; **17**(S2): 35-51.
13. Chen MH, Shi JY. Clinical and Radiological Outcomes of Implants in Osteotome Sinus Floor Elevation with and without Grafting: A Systematic Review and a Meta-Analysis. *J Prosthodont* 2018; **27**(5): 394-401.
14. Le Guehennec L, Soueidan A, Layrolle P, Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dent Mater* 2007; **23**(7): 844-54.
15. Shapiro F. Bone development and its relation to fracture repair. The role of mesenchymal osteoblasts and surface osteoblasts. *Eur Cell Mater* 2008; **15**: 53-76.
16. Gebhardt W. Über funktionell wichtige Anordnungsweisen der feineren und gröberer Bauelemente des Wirbeltierknochens. *Development Genes and Evolution* 1905; **20**(2): 187-322.

17. Duncan R, Turner C. Mechanotransduction and the functional response of bone to mechanical strain. *Calcified tissue international* 1995; **57**(5): 344-58.
18. Lin Z, Rios HF, Volk SL, Sugai JV, Jin Q, Giannobile WV. Gene expression dynamics during bone healing and osseointegration. *J Periodontol* 2011; **82**(7): 1007-17.
19. Pagel CN, Sivagurunathan S, Loh LH, Tudor EM, Pike RN, Mackie EJ. Functional responses of bone cells to thrombin. *Biological chemistry* 2006; **387**(8): 1037-41.
20. Kieswetter K, Schwartz Z, Dean DD, Boyan B. The role of implant surface characteristics in the healing of bone. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine* 1996; **7**(4): 329-45.
21. Chang YY, Kim SH, Park KO, Yun JH. Effect of microthreads on coronal bone healing of narrow-diameter implants with reverse-tapered design in beagle dogs. *Clin Oral Implants Res* 2017; **28**(12): 1532-42.
22. Park JY, Davies JE. Red blood cell and platelet interactions with titanium implant surfaces. *Clinical oral implants research* 2000; **11**(6): 530-9.
23. Hong J, Andersson J, Ekdahl KN, et al. Titanium is a highly thrombogenic biomaterial: possible implications for osteogenesis. *Thrombosis and haemostasis* 1999; **82**(07): 58-64.
24. Lekholm U. Patient selection and preparation In: Branemark PI, Zarb G, Albrektsson T Tissue integrated prosthesis: osseointegration in clinical dentistry. *Quintessence* 1985; **199**.
25. Truhlar RS, Orenstein IH, Morris HF, Ochi S. Distribution of bone quality in patients receiving endosseous dental implants. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 1997; **55**(12): 38-45.
26. Esposito M, Felice P, Worthington HV. Interventions for replacing missing teeth: augmentation procedures of the maxillary sinus. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2014; (5).
27. Araújo MG, Silva CO, Misawa M, Sukekava F. Alveolar socket healing: what can we learn? *Periodontology 2000* 2015; **68**(1): 122-34.
28. Misch CE. Available bone and dental implant treatment plans. *Dental Implant Prosthetics-E-Book* 2014: 315.
29. Araújo MG, Lindhe J. Dimensional ridge alterations following tooth extraction. An experimental study in the dog. *Journal of clinical periodontology* 2005; **32**(2): 212-8.
30. Cawood J, Howell R. A classification of the edentulous jaws. *International journal of oral and maxillofacial surgery* 1988; **17**(4): 232-6.
31. Sàndor GK, Kainulainen VT, Queiroz JO, Carmichael RP, Oikarinen KS. Preservation of ridge dimensions following grafting with coral granules of 48 post-traumatic and post-extraction dento-alveolar defects. *Dental Traumatology* 2003; **19**(4): 221-7.
32. Chrcanovic BR, Albrektsson T, Wennerberg A. Smoking and dental implants: a systematic review and meta-analysis. *Journal of dentistry* 2015; **43**(5): 487-98.
33. Gleiznys A, Skirbutis G, Harb A, Barzdziukaite I, Grinyte I. New approach towards mini dental implants and small-diameter implants: an option for long-term prostheses. *Stomatologija* 2012; **14**(2): 39-45.
34. Klein MO, Schiegnitz E, Al-Nawas B. Systematic review on success of narrow-diameter dental implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2014; **29** Suppl: 43-54.
35. Brånemark P-I, Lindström J, Hallen O, Breine U, Jeppson P-H, Öhman A. Reconstruction of the defective mandible. *Scandinavian journal of plastic and reconstructive surgery* 1975; **9**(2): 116-28.
36. Braun TW, Sotereanos GC. Autogenous regional bone grafting as an adjunct in orthognathic surgery. *Journal of oral and maxillofacial surgery* 1984; **42**(1): 43-8.

37. Michalczyk V, Terheyden H. Stabilität des Knochenniveaus an Implantaten nach Augmentation mit Unterkiefer-Blocktransplantaten. *Z Zahnärztl Impl* 2007; **4**: 266-79.
38. Cordaro L, Amadè DS, Cordaro M. Clinical results of alveolar ridge augmentation with mandibular block bone grafts in partially edentulous patients prior to implant placement. *Clinical oral implants research* 2002; **13**(1): 103-11.
39. McAllister BS, Haghghat K. Bone augmentation techniques. *Journal of periodontology* 2007; **78**(3): 377-96.
40. Garg AK. Knochen: Biologie, Gewinnung, Transplantation in der zahnärztlichen Implantologie: Quintessenz-Verlag-GmbH; 2006.
41. Horch H-H, Pautke C. Regeneration statt Reparatur. *Mund-, Kiefer-und Gesichtschirurgie* 2006; **10**(4): 213-20.
42. Khoury F. Bone and Soft Tissue Augmentation in Implantology: Quintessenz Verlag; 2021.
43. Dreiseidler T, Kaunisaho V, Neugebauer J, Zöller JE, Rothamel D, Kreppel M. Changes in volume during the four months' remodelling period of iliac crest grafts in reconstruction of the alveolar ridge. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 2016; **54**(7): 751-6.
44. Widmark G, Andersson B, Ivanoff C-J. Mandibular bone graft in the anterior maxilla for single-tooth implants: presentation of a surgical method. *International journal of oral and maxillofacial surgery* 1997; **26**(2): 106-9.
45. Zins JE, Whitaker LA. Membranous versus endochondral bone: implications for craniofacial reconstruction. *Plastic and reconstructive surgery* 1983; **72**(6): 778-85.
46. Al-Nawas B, Schiegnitz E. Augmentation procedures using bone substitute materials or autogenous bone-a systematic review and meta-analysis. *Eur J Oral Implantol* 2014; **7**(Suppl 2): S219-S34.
47. Wang H-L, Boyapati L. "PASS" principles for predictable bone regeneration. *Implant dentistry* 2006; **15**(1): 8-17.
48. Dahlin C, Andersson L, Linde A. Bone augmentation at fenestrated implants by an osteopromotive membrane technique. A controlled clinical study. *Clinical Oral Implants Research* 1991; **2**(4): 159-65.
49. Palma VC, Magro-Filho O, De Oliveria JA, Lundgren S, Salata LA, Sennerby L. Bone reformation and implant integration following maxillary sinus membrane elevation: an experimental study in primates. *Clinical Implant Dentistry and Related Research* 2006; **8**(1): 11-24.
50. Jensen SS, Terheyden H. Bone augmentation procedures in localized defects in the alveolar ridge: clinical results with different bone grafts and bone-substitute materials. Database of Abstracts of Reviews of Effects (DARE): Quality-assessed Reviews [Internet]: Centre for Reviews and Dissemination (UK); 2009.
51. Nevins M, Mellonig JT, Clem III DS, Reiser GM, Buser DA. Implants in regenerated bone: long-term survival. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry* 1998; **18**(1).
52. Nentwig G. Technic of bone splitting for alveolar recession in anterior maxillary region. *Die Quintessenz* 1986; **37**(11): 1825-34.
53. Shalabi MM, Manders P, Mulder J, Jansen JA, Creugers NH. A meta-analysis of clinical studies to estimate the 4.5-year survival rate of implants placed with the osteotome technique. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants* 2007; **22**(1).
54. Del Fabbro M, Ceresoli V. Veränderungen des marginalen Knochens um axiale bzw. angulierte Implantate: Eine systematische Übersicht. *EJOI* 2014; **7**(2): 329.

55. Olsson M, Urde G, Andersen JB, Sennerby L. Early loading of maxillary fixed cross-arch dental prostheses supported by six or eight oxidized titanium implants: results after 1 year of loading, case series. *Clinical implant dentistry and related research* 2003; **5**: 81-7.
56. Cho SC, Froum S, Tai CH, Cho YS, Elian N, Tarnow DP. Immediate loading of narrow-diameter implants with overdentures in severely atrophic mandibles. *Pract Proced Aesthet Dent* 2007; **19**(3): 167-74.
57. Ding X, Zhu XH, Liao SH, Zhang XH, Chen H. Implant-bone interface stress distribution in immediately loaded implants of different diameters: a three-dimensional finite element analysis. *J Prosthodont* 2009; **18**(5): 393-402.
58. Gomez-Roman G, Kruppenbacher M, Weber H, Schulte W. Immediate postextraction implant placement with root-analog stepped implants: surgical procedure and statistical outcome after 6 years. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants* 2001; **16**(4).
59. Strietzel F. Implantattypen und ihre Charakteristika. *Reichart PA, Hausamen JE, Becker J, Neukam FW, Schliephake H, Schmelzeisen R, (Hrsg) Curriculum Zahnärztliche Chirurgie, Chirurgie*; **1**: 394-9.
60. Younis L, Taher A, Abu-Hassan MI, Tin O. Evaluation of bone healing following immediate and delayed dental implant placement. *J Contemp Dent Pract* 2009; **10**(4): 35-42.
61. Kinaia BM, Ambrosio F, Lambie M, Hope K, Shah M, Neely AL. Soft tissue changes around immediately placed implants: a systematic review and meta-analyses with at least 12 months of follow-up after functional loading. *Journal of periodontology* 2017; **88**(9): 876-86.
62. Nkenke E, Vairaktaris E, Neukam F. Sofortbelastung dentaler Implantate. *Zahnärztliche Implantologie unter schwierigen Umständen: Neukam FW, Wichmann M, Wiltfang J* 2007.
63. Javed F, Romanos GE. The role of primary stability for successful immediate loading of dental implants. A literature review. *Journal of dentistry* 2010; **38**(8): 612-20.
64. Flanagan D. Fixed partial dentures and crowns supported by very small diameter dental implants in compromised sites. *Implant Dentistry* 2008; **17**(2): 182-91.
65. Roos J, Sennerby L, Lekholm U, Jemt T, Gröndahl K, Albrektsson T. A qualitative and quantitative method for evaluating implant success: a 5-year retrospective analysis of the Brånemark implant. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants* 1997; **12**(4).
66. Anitua E, Tapia R, Luzuriaga F, Orive G. Influence of implant length, diameter, and geometry on stress distribution: a finite element analysis. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry* 2010; **30**(1).
67. Guan H, Van Staden R, Loo Y-C, Johnson N, Ivanovski S, Meredith N. Influence of bone and dental implant parameters on stress distribution in the mandible: a finite element study. *International journal of oral & maxillofacial implants* 2009; **24**(5).
68. Chou H-Y, Müftü S, Bozkaya D. Combined effects of implant insertion depth and alveolar bone quality on periimplant bone strain induced by a wide-diameter, short implant and a narrow-diameter, long implant. *The Journal of prosthetic dentistry* 2010; **104**(5): 293-300.
69. Schiegnitz E, Al-Nawas B. Narrow-diameter implants: A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res* 2018; **29 Suppl 16**: 21-40.
70. Anitua E, Orive G, Aguirre JJ, Ardanza B, Andía I. 5-year clinical experience with BTI® dental implants: risk factors for implant failure. *Journal of clinical periodontology* 2008; **35**(8): 724-32.
71. Lazzara R, Siddiqui A, Binon P, et al. Retrospective multicenter analysis of 3i endosseous dental implants placed over a five-year period. *Clinical Oral Implants Research* 1996; **7**(1): 73-83.

72. Maló P, de Araújo Nobre M. Implants (3.3 mm diameter) for the rehabilitation of edentulous posterior regions: a retrospective clinical study with up to 11 years of follow-up. *Clinical implant dentistry and related research* 2011; **13**(2): 95-103.
73. Barter S, Stone P, Brägger U. A pilot study to evaluate the success and survival rate of titanium–zirconium implants in partially edentulous patients: results after 24 months of follow-up. *Clinical oral implants research* 2012; **23**(7): 873-81.
74. Romeo E, Lops D, Amorfini L, Chiapasco M, Ghisolfi M, Vogel G. Clinical and radiographic evaluation of small-diameter (3.3-mm) implants followed for 1–7 years: a longitudinal study. *Clinical oral implants research* 2006; **17**(2): 139-48.
75. Degidi M, Piattelli A, Carinci F. Clinical outcome of narrow diameter implants: a retrospective study of 510 implants. *Journal of Periodontology* 2008; **79**(1): 49-54.
76. Del Fabbro M, Testori T, Kekovic V, Goker F, Tumedei M, Wang H-L. A Systematic Review of Survival Rates of Osseointegrated Implants in Fully and Partially Edentulous Patients Following Immediate Loading. *Journal of Clinical Medicine* 2019; **8**(12): 2142.
77. Chen J, Cai M, Yang J, Aldhohrah T, Wang Y. Immediate versus early or conventional loading dental implants with fixed prostheses: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled clinical trials. *The Journal of prosthetic dentistry* 2019; **122**(6): 516-36.
78. Lorenzoni M, Pertl C, Polansky RA, Jakse N, Wegscheider WA. Evaluation of implants placed with barrier membranes: A retrospective follow-up study up to five years. *Clinical oral implants research* 2002; **13**(3): 274-80.
79. Buser D, Ingimarsson S, Dula K, Lussi A, Hirt HP, Belser UC. Long-term stability of osseointegrated implants in augmented bone: a 5-year prospective study in partially edentulous patients. *International journal of periodontics & restorative dentistry* 2002; **22**(2).

7. Anhang

7.1 Tabellenverzeichnis

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifizierung der Knochenqualität nach Lekholm und Zarb.....	17
Abbildung 2: Knochenatrophie nach Judy und Misch	19
Abbildung 3: Anteile der Implantat Durchmesser an der Gesamtzahl der Implantate	34
Abbildung 4: Präoperative Röntgenaufnahme.....	35
Abbildung 5: antimikrobielle photodynamische Therapie	36
Abbildung 6: Befund intraoral präoperativ.....	36
Abbildung 7: Aufbereitung des Implantatbettes.....	36
Abbildung 8: DRI (SKYnarrow 3,5 Bredent).....	36
Abbildung 9: Insertion des 3,5mm DRI	36
Abbildung 10: Postoperative Röntgenkontrolle	37
Abbildung 11: provisorische Versorgung zur Sofortbelastung.....	37
Abbildung 12: Eingesetzte Implantate von okklusal	37
Abbildung 13: Röntgenbild 100 Tage postoperativ.....	37
Abbildung 14: Implantateinheilung nach Entfernung der provisorischen Versorgung	37
Abbildung 15: Definitiver Zahnersatz	37
Abbildung 16: Implantatlänge in der Testgruppe DRI (3,5mm)	38
Abbildung 17: Implantatlänge in der Kontrollgruppe SDI (4,0mm).....	38
Abbildung 18: Implantatangulation in der Testgruppe und Kontrollgruppe.....	39
Abbildung 19: Nikotinanamnese Testgruppe.....	40
Abbildung 20: Nikotinanamnese Kontrollgruppe	40
Abbildung 21: Implantationszeitpunkt nach Durchmesser.....	41
Abbildung 22: Belastungszeitpunkt nach Durchmesser.....	42
Abbildung 23: Implantat Verteilung nach Kiefer und Durchmesser	42
Abbildung 24: Lokalisationsgruppen nach anteriorer und posteriorer Belastungszone.....	43
Abbildung 25: Art des Zahnersatzes	43
Abbildung 26: Augmentationsverfahren in Abhängigkeit des Durchmessers (logarithmisch)	44
Abbildung 27: Kalibrierung der Implantatlänge	47
Abbildung 28: Referenzmessung.....	47
Abbildung 29: Vermessung des periimplantären Knochenniveaus.....	47
Abbildung 30: vertikales Knochenniveau 3,5mm vs. 4,0mm.....	51
Abbildung 31: horizontales Knochenniveau 3,5mm vs. 4,0mm.....	52
Abbildung 32: vertikales Knochenniveau anteriore vs.posteriore Belastungszone (3,5mm).....	53
Abbildung 33: horizontales Knochenniveau anteriore vs. posteriore Belastungszone (3,5mm)	54
Abbildung 34: Sofortimplantation vs. verzögerte Implantation - vertikales Knochenniveau (3,5mm)..	55
Abbildung 35: Sofortimplantation vs. verzögerte Implantation - vertikales Knochenniveau (4,0mm)..	56
Abbildung 36: Sofortbelastung vs. verzögerte Belastung - vertikales Knochenniveau (3,5mm).....	57
Abbildung 37: Sofortbelastung vs. verzögerte Belastung - vertikales Knochenniveau (4,0mm).....	58
Abbildung 38: Augmentation vs. keine Augmentation / laterale Anlagerung von Knochenspänen (3,5mm).....	59
Abbildung 39: Augmentation vs. keine Augmentation / laterale Anlagerung von Knochenspänen (4,0mm).....	60
Abbildung 40: Raucher vs. Nichtraucher in der Gruppe der DRI (3,5mm)	61
Abbildung 41: Raucher vs. Nichtraucher in der Gruppe der SDI (4.0mm).....	62