

Skeletal Anchorage in Orthodontics – Basics and Clinical Application

Skelettale Verankerung in der Kieferorthopädie – Grundlagen und klinische Anwendung

Heiner Wehrbein¹, Peter Göllner²

Abstract

This review article describes the basics and clinical applications of skeletal anchorage in orthodontics, namely: areas of indication, anchorage devices, insertion areas, indications, potential complications, and their use in growing patients.

The areas for skeletal anchorage include orthodontic-prosthetic anchorage, orthodontic anchorage, and skeletal anchorage in orthopedic therapy procedures. The anchorage devices currently available are: prosthetic implants, miniscrews, palatal implants, onplants, bone anchors, zygoma wires and skeletally-supported distractors. The insertion areas described so far (according to therapeutic procedure and bone supply available) include edentulous jaw sections, the interdental septum, infra-apical and supra-apical areas, the palate (median, paramedian, lateral), the retromolar area, and the zygomatic bone. Force systems are applied (direct or indirect anchorage) according to surgical and orthodontic or orthopedic requirements. Skeletal anchorage devices should be selected according to the following criteria. Is the anchorage task unifunctional or multifunctional? How many anchorage devices are required for the therapy in question? What is the success rate of the various anchorage devices; what are the applicable biomechanics and soft tissue or hard tissue conditions in the insertion area? The success rates for miniscrews are currently between 80% and 90%, and over 90% for palatal implants.

The potential of skeletal anchorage is broadening the current orthodontic treatment spectrum, guaranteeing the practitioner absolute control of anchorage by avoiding the unpredictable reactions of periodontal anchorage, leading to a reduction in unwanted side effects.

Key Words: Skeletal anchorage · Miniscrews · Palatal implants · Bone anchors · Bone-supported RME · Skeletal maxillofacial protraction

Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel beschreibt die Grundlagen und die klinische Anwendung der skelettalen Verankerung in der Kieferorthopädie: Indikationsbereiche, Verankerungsmittel, Insertionsbereiche, Indikationen, potentielle Komplikationen und die Nutzung beim noch wachsenden Patienten.

Als Indikationsbereiche der skelettalen Verankerung sind heute zu nennen: orthodontisch-prothetische Verankerung, orthodontische Verankerung und skelettale Verankerung bei kieferorthopädischen Behandlungsaufgaben. Als Verankerungsmittel stehen heute zur Verfügung: prothetische Implantate, Minischrauben, Gaumenimplantate, Onplants, Bone Anchors, Zygoma-Drähte und skelettal abgestützte Distraktoren. Je nach Behandlungsaufgabe und dem Knochenangebot wurden folgende Insertionsbereiche beschrieben: zahnloser Kieferabschnitt, interdentes Septum, infra- und supraapikaler Bereich, Gaumen (median, paramedian, lateral), retromolarer Bereich sowie der Bereich des Os zygomaticum. Die Applikation des Kraftsystems (direkte/indirekte Verankerung) richtet sich nach den chirurgischen und orthodontischen/orthopädischen Erfordernissen. Die Selektion des skelettalen Verankerungsmittels sollte nach folgenden Kriterien erfolgen: uni- bzw. multifunktionelle Verankerungsaufgaben, Anzahl der notwendigen Verankerungselemente für die jeweilige Behandlungsaufgabe, Erfolgsrate der diversen Verankerungselemente, der zu applizierenden Biomechanik und der Weichgewebe- sowie Hartgewebebedingungen im Insertionsbereich. Die Erfolgsraten liegen heute bei Minischrauben bei 80–90%, bei Gaumenimplantaten bei über 90%.

Die heutigen Möglichkeiten der skelettalen Verankerung erweitern das kieferorthopädische Behandlungsspektrum, garantieren eine absolute Kontrolle der Verankerung durch den Behandler, umgehen die unvorhersagbaren Reaktionen der desmodontalen Verankerung und führen zu einer Reduktion unerwünschter Nebenwirkungen.

Schlüsselwörter: Skelettale Verankerung · Minischrauben · Gaumenimplantate · Bone Anchors · Knochen-gestützte GNE · Skelettale maxillofaziale Protraktion

¹ Department of Orthodontics, Johannes Gutenberg University Hospital, Mainz, Germany,

² Orthodontist (SSO) in private practice, Berne, Switzerland.

Received: July 5, 2007; accepted: October 8, 2007

J Orofac Orthop 2007;68:443–461

DOI 10.1007/s00056-007-0725-y

Introduction

Anchorage is a fundamental problem in the treatment of malocclusions and dysgnathias. The loading of the anchorage unit is based on the conditions of static balance (action = reaction) as defined by Newton in 1687 (Diedrich [23]).

When teeth are used for anchorage purposes, their reactive load is determined according to the force magnitude, direction, type, and duration of the moments and forces exerted through the biomechanical force system for active tooth movement. This problem must be taken into account when planning each and every anchorage.

If the patient's periodontal anchorage potential fails to accommodate the ultimate treatment goal, additional intra-oral or extra-oral anchorage devices must be employed to prevent side effects [23].

Every type of auxiliary anchorage devices such as headgear or intermaxillary elastics entail characteristic potential disadvantages, i.e. visibility, compliance-dependency, and the risk of unwanted side effects. Class-II elastics, for example, can lead to canting of the occlusal plane in the cw direction, protrusion of the incisors in the maxilla, and tooth extrusion [23].

The aim of this article is to illustrate the basics of skeletal anchorage and describe the clinical aspects of the skeletal anchorage elements presently available.

Skeletal Anchorage

Skeletal anchorage is largely based on the principle of osseointegration as described in 1977 by Brånemark [12]. Osseointegration implies direct contact between living bone and an implant visible through an optical microscope. Roberts [55] expanded the concept of osseointegration to include no fibrous tissue between implant and bone, high tone on percussion, absence of physiological drift, no movement under orthodontic load, and the functional equivalent of a dental ankylosis (Figure 1).

At present endosseous implants are predominantly used for skeletal anchorage purposes, as case reports, prospective clinical research, and animal experimental studies have shown that osseointegrated implants remain stable under orthodontic and orthopedic load conditions [3, 6, 11, 14, 19, 22, 23, 25, 26, 32, 35, 42, 45, 50, 51, 54–58, 62–66, 68]. They can therefore be used as skeletal anchorage elements for orthodontic and orthopedic treatment purposes.

Areas of Application for Skeletal Anchorage in Orthodontics

Current areas of application for skeletal anchorage in orthodontics can be classified as [22, 34, 56, 66]:

- orthodontic-prosthetic anchorage
- orthodontic anchorage
- skeletal anchorage for orthopedic procedures

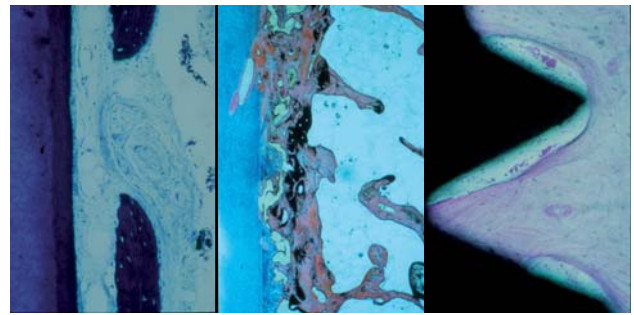


Figure 1. Physiological periodontal ligament (left), dental ankylosis (center), osseointegrated implant (right). (Photo center: by courtesy of Prof. Diedrich, Aachen, Germany)

Abbildung 1. Physiologisches parodontales Ligament (links), dentale Ankylose (Mitte), osseointegriertes Implantat (rechts). (Bild Mitte: Prof. Diedrich, Aachen)

Einleitung

Verankerung ist ein grundlegendes Problem bei der Behandlung von Malokklusionen und Dysgnathien. Die Belastung der Verankerungseinheit basiert auf den Bedingungen des statischen Gleichgewichtes (actio = reactio), wie bereits von Newton 1687 definiert (siehe Diedrich [23]).

Wenn Zähne für Verankerungszwecke genutzt werden, wird deren reaktive Belastung hinsichtlich Kraftgröße, Richtung, Art und Dauer durch die Kräfte und Momente determiniert, die durch das biomechanische Kraftsystem zur aktiven Zahnbewegung ausgeübt wird. Dieses Problem muss bei jeder Verankerungsplanung berücksichtigt werden.

Wenn das parodontale Verankerungspotential im Hinblick auf das angestrebte Behandlungsziel inadäquat ist, sollten (müssen) zusätzliche intra- und/oder extraorale Verankerungshilfen eingesetzt werden, um Nebeneffekte zu vermeiden [23].

Zusätzliche Verankerungshilfen wie der Headgear und intermaxilläre Elastics sind je nach Art durch einige potentielle Nachteile charakterisiert: Sichtbarkeit, Compliance-Abhängigkeit und das Risiko von unerwünschten Nebeneffekten. Klasse-II-Elastics können z. B. zur Kippung der Okklusionsebene im cw-Sinn, Protrusion der Inzisiven im Unterkiefer und Extrusion von Zähnen führen [23].

Das Ziel dieses Artikels ist, die Grundlagen der skelettalen Verankerung aufzuzeigen und die klinischen Aspekte der momentan verfügbaren skelettalen Verankerungselemente darzustellen.

Skelettale Verankerung

Die skelettale Verankerung basiert überwiegend auf dem Prinzip der Osseointegration, das Brånemark 1977 [12] beschrieben hat. Osseointegration bedeutet ein unter dem Lichtmikroskop sichtbarer direkter Kontakt zwischen lebendem Knochen und einem Implantat. Roberts [55] hat den Begriff der Osseointegration erweitert: kein fibröses Binde-

Skeletal Orthodontic-prosthetic Anchorage

In skeletal orthodontic-prosthetic anchorage, the prosthetic implants are initially used as orthodontic anchorage elements and then later as abutments upon which to attach a fixed prosthetic replacement [66] (Figure 2). The insertion site is the edentulous alveolar bone of the upper or lower jaw. After insertion and application of a supraconstruction, a bracket or other orthodontic attachments can be applied to a provisional crown or to a commercially-obtainable bonding base. The orthodontic force system thus functions between the tooth to be moved and the implant. The orthodontic tooth movement's reactive forces and moments are thus transferred directly to the implant. Biomechanically

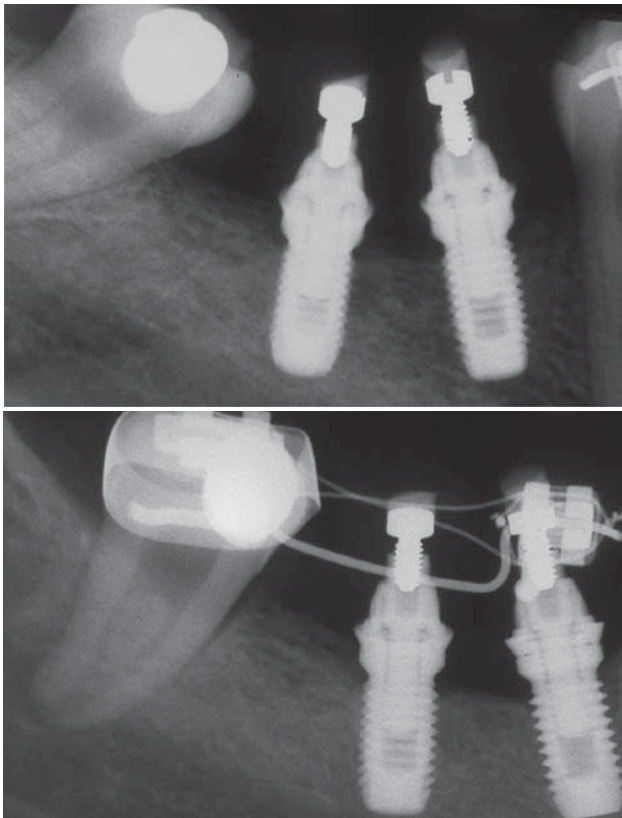


Figure 2. Orthodontic-prosthetic implant anchorage; two prosthetic implants were inserted in an edentulous jaw section (missing teeth: 46 and 47). They served first as orthodontic anchorage elements for molar up-righting (uprighting spring according to Burstone) and then as a pillar to accommodate a fixed prosthetic replacement. Advantage: the anterior dentition was not used for anchorage tasks, thus avoiding side effects.

Abbildung 2. Orthodontisch-prothetische Implantatverankerung; zwei prothetische Implantate wurden in einen zahnlosen Kieferabschnitt inseriert (fehlende Zähne: 46 und 47). Sie dienten zunächst als orthodontische Verankerungselemente zur Molarenaufrichtung (Aufrichtefeder nach Burstone) und danach als Pfeiler zur Aufnahme eines festsitzenden prothetischen Ersatzes. Vorteil: Die anteriore Dentition wurde nicht für Verankerungsaufgaben genutzt. Dadurch wurden Nebenwirkungen vermieden.

gewebe zwischen Implantat und Knochen, hoher Ton auf Perkussion, Abwesenheit physiologischer Drift, keine Bewegung gegenüber orthodontischer Belastung und funktionelles Äquivalent einer dentalen Ankylose (Abbildung 1).

Heute werden überwiegend enossale Implantate für skelettale Verankerungszwecke genutzt, denn Fallberichte, prospektive klinische Untersuchungen und tierexperimentelle Studien haben gezeigt, dass osseointegrierte Implantate unter orthodontischen und orthopädischen Belastungsbedingungen positionsstabil bleiben [3, 6, 11, 14, 19, 22, 23, 25, 26, 32, 35, 42, 45, 50, 51, 54–58, 62–66, 68]. Demnach können sie als skelettale Verankerungselemente für orthodontische sowie orthopädische Behandlungsaufgaben genutzt werden.

Einsatzbereich der skelettalen Verankerung in der Kieferorthopädie

Die heutigen Einsatzbereiche der skelettalen Verankerung in der Kieferorthopädie können eingeteilt werden in [22, 34, 56, 66]:

- Orthodontisch-prothetische Verankerung
- Orthodontische Verankerung
- Skelettale Verankerung bei kieferorthopädischen Maßnahmen

Skelettale orthodontisch-prothetische Verankerung

Bei der skelettalen orthodontisch-prothetischen Verankerung werden grundsätzlich prothetische Implantate verwendet, welche zunächst als orthodontisches Verankerungselement und späterer als Pfeiler für die Aufnahme eines festsitzenden Zahnersatzes genutzt werden [66] (Abbildung 2). Der Insertionsort ist der zahnlose Alveolar Knochen des Ober- bzw. Unterkiefers. Nach der Insertion und Applikation einer Suprakonstruktion kann ein Bracket oder anderes orthodontisches Attachment an einer provisorischen Krone oder an einer kommerziell erhältlichen Klebebasis angebracht werden. Das orthodontische Kraftsystem wirkt demnach zwischen den zu bewegenden Zähnen und dem Implantat. Die reaktiven Kräfte und Momente für die orthodontische Zahnbewegung werden also direkt auf das Implantat übertragen. Biomechanisch gesehen, ist dies der Typ einer direkten orthodontischen Implantatverankerung.

Skelettale orthodontisch-prothetische Verankerungen können bei teilbezahnten Patienten indiziert sein wie z.B. bei:

- dysgnath stehenden Frontzähnen mit einseitiger oder beidseitiger Freundsituation oder
- dysgnath stehenden Front- und/oder Seitenzähnen in Verbindung mit Zahnlücken (zwei oder mehr fehlende Zähne), meistens im posterioren Bereich des Unter- und/oder Oberkiefers.

Residuales Wachstum und orthodontisch-prothetische Implantatverankerung mit Alveolarfortsatzimplantaten

Enossale Implantate sollten nicht vor Abschluss des Wachstums in den Alveolar Knochen eingesetzt werden, da sie die

speaking, this is the model for direct orthodontic implant anchorage.

Skeletal orthodontic-prosthetic anchorage can be indicated for partially-edentulous patients, for instance:

- for malpositioned anterior teeth with a free-end situation on one or both sides, or
- for malpositioned anterior teeth and/or lateral teeth in conjunction with tooth gaps (two or more missing teeth) primarily in the posterior upper and/or lower jaw.

Residual Growth and Orthodontic-prosthetic Implant Anchorage with Alveolar Bone Implants

Endosseous implants should not be inserted in the alveolar bone before growth has ceased, since they can interfere with growth of the surrounding bone and even the eruption of adjacent teeth [50, 59]. Insertion of prosthetic implants in the alveolar process can lead to infraposition of the implant and open-bite development if the patient is still growing.

Skeletal Orthodontic Anchorage

Patients who undergo exclusively orthodontic treatment have complete dentitions or extraction sites that should be closed. Hence orthodontic anchorage elements cannot be inserted into an edentulous area in the jaw.

The following anatomical regions have been described concerning the application of skeletal orthodontic anchoring elements:

- the interradicular septum of the dentulous alveolar process [15, 17, 26, 28, 36, 43, 47]
- the supra-apical and infrazygomatikal area [18, 43, 47]
- the retromolar area of the lower and upper jaw [37, 56]
- the median or paramedian anterior palate [3, 5, 6, 7, 9, 19, 25, 31, 38, 67, 69, 72].

Since the above-mentioned insertion sites contain distinctly less horizontal or vertical bone support than the edentulous area of the jaw, special skeletal anchorage devices were developed. Diameter-reduced screws (miniscrews) are probably the most frequently used, followed by length-reduced screws (e.g. palatal implants), so as to maintain the integrity of neighboring anatomical structures.

The following skeletal orthodontic anchorage devices have been described and applied:

- miniscrews [10, 11, 17, 18, 26–28, 36, 43, 44, 47, 52, 74]
- palatal implants [3, 5, 6, 14, 19, 61, 66, 67, 72]
- onplants [9, 38]
- bone anchors [20, 24]
- zygoma ligatures [46].

Indication for Skeletal Orthodontic Anchorage Devices

Skeletal orthodontic anchorage devices are indicated when stationary anchorage is required involving diverse anchorage tasks. In particular, these can include [3, 6, 7, 9, 14, 18, 24, 26, 28, 40, 43, 44, 47, 52, 61, 67, 69, 71, 74]:

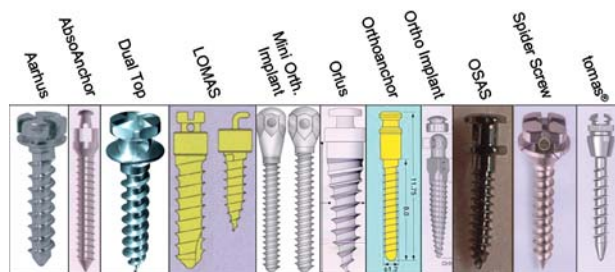


Figure 3. Miniscrews from various producers (Ø 1.1–2.2 mm/length: 8–12 mm). Predominantly derived from osteosynthesis technology, machine-polished smooth surface, mode of insertion: self-drilling, self-cutting.

Abbildung 3. Minischrauben verschiedener Hersteller (Ø 1,1–2,2 mm/Länge: 8–12 mm). Überwiegend aus Osteosynthesetechnik abgeleitet, maschinenpolierte glatte Oberfläche, Insertionsmodus: selbstbohrend, -schneidend.

Entwicklung des umliegenden Knochens und sogar die Eruption der angrenzenden Zähne beeinträchtigen können [50, 59]. Das Einsetzen von prothetischen Implantaten in den Alveolarfortsatz kann bei noch vorhandenem Wachstum zu einer Infraokklusion des Implantates und Entwicklung eines offenen Bisses führen.

Skelettale orthodontische Verankerung

Ausschließlich kieferorthopädisch zu behandelnde Patienten haben geschlossene Zahnreihen oder Extraktionslücken, die geschlossen werden sollen. Daher können orthodontische Verankerungselemente nicht in einen zahnlosen Kieferabschnitt inseriert werden.

Die folgenden anatomischen Regionen wurden für den Einsatz von skelettalen orthodontischen Verankerungselementen beschrieben:

- das interradikuläre Septum des bezahnten Alveolarfortsatzes [15, 17, 26, 28, 36, 43, 47],
- der supraapikale und infrazygomatikal Bereich [18, 43, 47],
- der retromolare Bereich des Unterkiefers [37, 56] und
- der mediane oder paramediane anteriore Gaumen [3, 5, 6, 7, 9, 19, 25, 31, 38, 67, 69, 72].

Da die oben genannten Insertionsbereiche im Vergleich zum zahnlosen Alveolarfortsatz deutlich weniger horizontales und/oder vertikales Knochenangebot aufweisen, wurden spezielle skelettale Verankerungsmittel entwickelt. Am häufigsten werden heute vermutlich durchmesserreduzierte Schrauben (Minischrauben) gefolgt von längenreduzierten Schrauben (z. B. Gaumenimplantat) verwendet, um die Integrität benachbarter anatomischer Strukturen nicht zu beeinträchtigen.

Folgende skelettale orthodontische Verankerungsmittel wurden beschrieben und angewendet:



Figure 4. 62-year-old patient with deep bite, pathological migration of the anterior teeth and gingival retraction owing to a periodontal disease. Therapy: MB treatment with skeletal anchorage for intrusion of the anterior tooth segment so as not to extrusively load the periodontally-compromised posterior teeth.

Abbildung 4. 62-jähriger Patient mit Tiefbiss, pathologischer Migration der Frontzähne und Gingivaretraktion aufgrund einer Parodontalerkrankung. Therapie: MB-Behandlung mit skelettaler Verankerung zur Intrusion des Frontzahnsegmentes, um die parodontal geschädigten Seitenzähne nicht extrusiv zu belasten.

- space closure from mesial
- space closure from distal
- intrusion and extrusion (anterior and posterior teeth)
- distalization, mesialization, and midline corrections
- molar uprighting.

Miniscrews

Miniscrews are largely a product of osteosynthesis technology. They have a smooth, machine-polished surface. The mode of insertion is self-drilling or self-cutting. Most miniscrews feature a special head to accommodate orthodontic force systems or wires. Miniscrews can be loaded immediately after insertion. It is advisable to take an intraoral periapical view prior to insertion in the interdental area to mark the insertion site in the mucosa. A variety of systems (Figure 3) is currently available [44].

The advantages of miniscrews over other skeletal anchorage concepts are:

- simple insertion and explantation technique
- relative affordability
- application in various anatomical areas (upper and lower jaw).

Figures 4 to 7 depict miniscrew application possibility in the frontal tooth area of the upper jaw.

Potential disadvantages of the miniscrew are: various insertion sites (each insertion site has special characteristics and their associated risks: e.g. retromolar maxilla, lingual mandible, unattached mucosa), rotational instability, need to use several screws for multifunctional anchorage tasks, screw migration, screw fracture upon removal, impairment of the anchorage concept if a screw is lost where several are

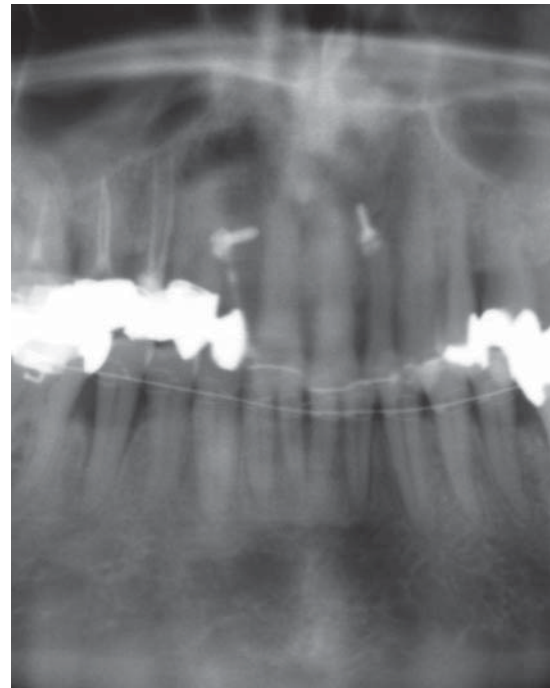


Figure 5. Detail from panoramic radiograph: insertion of two miniscrews regio 12 (missing tooth 12) and interdentially between 21 and 22. The selection of the screw positions occurred according to surgical (bone support, attached gingiva) and orthodontic criteria (action line of force/center of resistance of the anterior tooth segment to be intruded: 11 to 22). The teeth were intruded with NiTi coil springs or elastic chains, fixed between the miniscrews and the segmented arch (direct implant anchorage).

Abbildung 5. Ausschnitt aus Orthopantomogramm: Insertion von zwei Minischrauben Regio 12 (fehlender 12) und interdental zwischen 21 und 22. Die Selektion der Position der Schrauben erfolgte nach chirurgischen (Knochenangebot, angewachsene Gingiva) und orthodontischen Kriterien (Kraftwirkungslinie/Widerstandszentrum des zu intrudierenden Frontzahnsegmentes: 11 bis 22). Die Zähne wurden mit NiTi-Coil-Springs bzw. elastischen Ketten intrudiert, welche zwischen den Mini-Schrauben und dem Segmentbogen fixiert wurden (direkte Implantatverankerung).



Figure 6. Finding after intrusion from 11 to 21. Retention phase, screws still *in situ*. The soft tissue around the screws is relatively free of inflammation. Insertion occurred in attached gingiva.

Abbildung 6. Zustand nach Intrusion von 11 bis 21. Retentionsphase, Schrauben noch *in situ*. Das Weichgewebe um die Schrauben ist relativ entzündungsfrei. Die Insertion erfolgte in der angewachsenen Gingiva.



Figure 7. Situation after debonding, screw removal and prosthetic therapy. Arrows: former insertion site. Note amount of intrusion and improvement in the periodontal findings (compare with Figure 4).

Abbildung 7. Zustand nach Debonding, Schraubenentfernung und prothetischer Versorgung. Pfeile: ehemaliger Insertionsort. Beachte: Ausmaß der Intrusion und Verbesserung des Parodontalbefundes (vgl. mit Abbildung 4).

required, mucosa irritation or overgrowth where screw head is located in unattached mucosa (Figure 8), and the danger of injury to the root of the tooth when inserted interdentially [15, 17, 26, 28, 43, 47, 52, 74]. In an animal experimental study, however, Asscherickx et al. [2] documented that if tooth roots are injured superficially the periodontal structures (root cement, periodontal ligament space, lamina dura) heal completely once the screw is removed. Screw insertion in the periodontal space, however, is under discussion as one cause of screw loss [2].

The success rate (positional stability through osseointegration, no implant loss) of miniscrews is between 51 and 100% according to the literature [15, 17, 26, 36, 52, 74]. By using the appropriate insertion protocol, avoiding insertion in certain regions (e.g. the lingual mandibula), avoiding regions with unattached mucosa [15, 36, 52, 74] and selecting the appropriate screw [76], the chances of success can be sig-



Figure 8. Miniscrew insertion in mobile mucosa: mucosal irritation and overgrowing of the screw head by mucosal proliferation.

Abbildung 8. Minischaubeneninsertion in beweglicher Mukosa: Schleimhautirritation und Überwachsen des Schraubenkopfes durch Mukosaproliferation.

- Minischrauben [10, 11, 17, 18, 26–28, 36, 43, 44, 47, 52, 74]
- Gaumenimplantate [3, 5, 6, 14, 19, 61, 66, 67, 72]
- Onplants [9, 38]
- Bone Anchors [20, 24]
- Zygoma-Ligaturen [46].

Indikation skelettaler orthodontischer Verankerungsmittel

Die Indikation skelettaler orthodontischer Verankerungsmittel liegt in der Notwendigkeit einer stationären Verankerung bei diversen Verankerungsaufgaben. Diese können im Einzelnen umfassen [3, 6, 7, 9, 14, 18, 24, 26, 28, 40, 43, 44, 47, 52, 61, 67, 69, 71, 74]:

- Lückenschluss von mesial
- Lückenschluss von distal
- In- und Extrusion (Front- und Seitenzähne)
- Distalisierung/Mesialisierung/Mittellinienkorrekturen
- Molarenaufrichtung.

Minischrauben

Minischrauben sind überwiegend aus der Osteosynthesetechnik abgeleitet und weisen eine glatte maschinierpolierte Oberfläche auf. Der Insertionsmodus ist selbstbohrend oder selbstschneidend. Der überwiegende Teil der Minischrauben weist einen speziellen Kopf auf, um orthodontische Kraftsysteme oder Drähte aufzunehmen. Minischrauben können unmittelbar nach der Insertion belastet werden. Vor der Insertion im interdentalen Bereich wird die Anfertigung eines Zahnfilms mit Markierungsdraht empfohlen, um die Insertionsstelle in der Mukosa zu markieren. Eine Vielzahl diverser Systeme (Abbildung 3) ist heute erhältlich [44].

Vorteile der Minischrauben gegenüber anderen skelettalen Verankerungskonzepten sind:

- einfache Insertions- und Explantationstechnik,
- relativ günstiger Preis und
- Anwendung in diversen anatomischen Bereichen (Ober- und Unterkiefer).

Die Abbildungen 4 bis 7 zeigen eine Anwendungsmöglichkeit von Minischrauben im Oberkieferfrontzahnbereich.

Als potentielle Nachteile der Minischrauben sind zu werten: variierender Insertionsort (jeder Insertionsort hat spezielle Charakteristika und damit auch Risiken: z.B. retro-molare Maxilla, linguale Unterkiefer, bewegliche Schleimhaut), Rotationsinstabilität, Notwendigkeit der Nutzung mehrerer Schrauben bei multifunktionellen Verankerungsaufgaben, Schraubenwanderung, Schraubenfraktur bei Entfernung, Beeinträchtigung des Verankerungskonzeptes bei Verlust einer Schraube, wenn mehrere Schrauben erforderlich sind, Mukosairritation/Schleimhautüberwucherung bei Lage des Schraubenkopfes in der nicht angewachsenen Schleimhaut (Abbildung 8) sowie die Gefahr der Zahnwurzelverletzung bei interdentaler Insertion [15, 17, 26, 28, 43, 47, 52, 74]. In einer tierexperimentellen Studie konnte allerdings

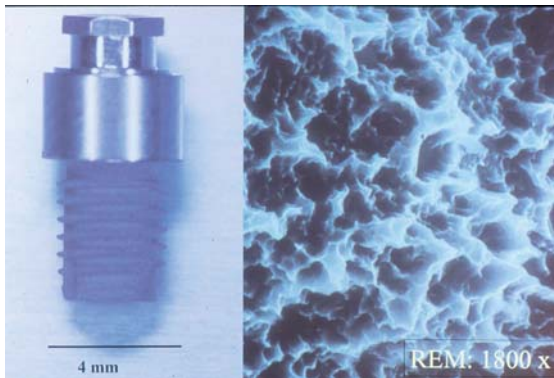


Figure 9. Palatal implant (Orthosystem®, Straumann, Basel, Switzerland), endosseous implant length: 4 mm. Rough surface (right part of the picture) to increase microretention. Insertion mode: self-cutting.

Abbildung 9. Gaumenimplantat (Orthosystem®, Straumann, Basel, Schweiz), endossale Implantatlänge: 4 mm. Raue Oberfläche (rechter Bildteil) zur Erhöhung der Mikroretention. Insertionsmodus: selbstschneidend.

nificantly enhanced. One recent study established a cumulative success rate of 86% [74]. In principle, it is assumed that application of various skeletal anchorage devices (miniscrews, palatal implants, bone anchors, etc.) is associated with a learning curve, and that the success rate will increase as the user gains experience.

Palatal Implants

Palatal implants (Figure 9) are length-reduced screws with a rough surface; they are a product of implant technology. Owing to their short length, they are especially well-suited for regions with a low vertical bone supply (such as the palate). They retain their positional stability under the application of orthodontic force. The orthodontic supraconstruction is rigidly attached to the implant abutment (to the implant via a screw-fixed abutment to which a transpalatal arch or quad-pendulum appliance is laser-welded). The vertical bone support is evaluated on the cephalogram [71]. The insertion and explantation modus of palatal implants is slightly more extensive than that of miniscrews.

The advantages of palatal implants over other skeletal anchorage procedures are:

- multifunction anchorage tasks with only one implant through modification of the supraconstruction,
- rigid 3-D anchorage control,
- rotational stability,
- standardized insertion and explantation protocol,
- standardized insertion site (median or paramedian palate, attached mucosa), and
- no danger of injury to roots.

That last point applies to miniscrews as well when they are inserted in the median or paramedian palate.



Figure 10. 15-year-old patient with harmonious profile.

Abbildung 10. 15 Jahre alter Patient mit harmonischem Profil.

von Asscherickx et al. [2] nachgewiesen werden, dass bei superfiizieller Wurzelverletzung die parodontalen Strukturen (Wurzelzement, Desmodont, Lamina dura) nach Entfernung der Schraube wieder völlig ausheilen. Die Insertion einer Schraube in den Parodontalspalt hinein wird jedoch als Ursache für Schraubenverluste diskutiert [2].

Die Erfolgsrate (Positionsstabilität durch Osseointegration, kein Implantatverlust) von Minischrauben liegt nach Literaturangaben zwischen 51 und 100% [15, 17, 26, 36, 52, 74]. Durch Anwendung eines adäquaten Insertionsprotokolls, Vermeidung der Insertion in bestimmten Regionen (z.B. linguale Mandibula), Umgehung von Regionen mit beweglicher Mukosa [15, 36, 52, 74] und Selektion einer adäquaten Schraube [76] kann der Erfolg signifikant gesteigert werden. In einer aktuellen Studie wurde eine kumulative Erfolgsrate von 86% angegeben [74]. Prinzipiell ist davon auszugehen, dass die Anwendung diverser skelettaler Verankerungsmittel (Minischrauben, Gaumenimplantate, Bone Anchors etc.) mit einer Lernkurve verbunden ist und die Erfolgsrate mit zunehmender Erfahrung des jeweiligen Behandlers ansteigt.

Gaumenimplantate

Gaumenimplantate (Abbildung 9) sind längenreduzierte Schrauben, welche aus der Implantattechnik abgeleitet sind und eine raue Oberfläche aufweisen. Durch ihre geringe Länge sind sie besonders für Regionen mit geringem vertikalem Knochenangebot (z.B. Gaumen) geeignet. Unter



Figures 11a to 11c. Aplasia of all second premolars, deep bite, palatally positioned tooth 23, Angle Class II, $\frac{1}{4}$ cusp in width. Treatment goal: extraction of the four second deciduous molars, stationary anchorage of the anterior dentition (no profile change!), space closure exclusively from distal.

Abbildungen 11a bis 11c. Nichtanlage aller zweiten Prämolaren, Tiefbiss, Palatalstand 23, Angle-Klasse II, $\frac{1}{4}$ PM Breite. Behandlungsziel: Exzision der vier zweiten Milchmolaren, stationäre Verankerung der anterioren Dentition (keine Profilveränderung!), Lückenschluss ausschließlich von distal.

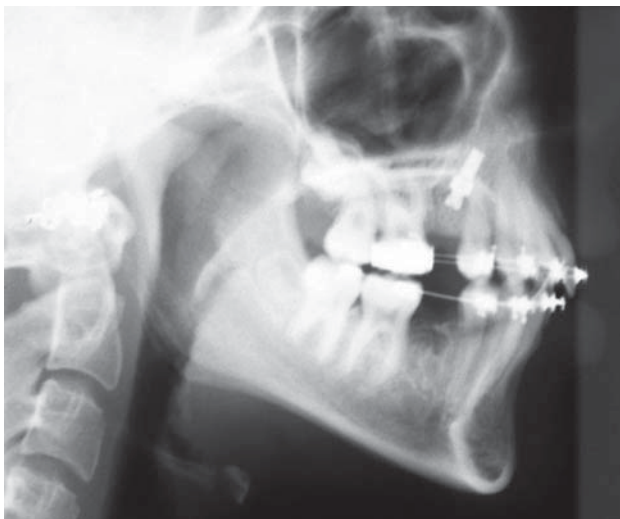


Figure 12. Lateral cephalogram: Situation after insertion of a palatal implant for stationary anchorage of the anterior dentition in the maxilla.

Abbildung 12. Fernröntgenseitenbild: Zustand nach Insertion eines Gaumenimplantates zur stationären Verankerung der anterioren Dentition im Oberkiefer.

Figures 9 to 18 illustrate treatment with a multifunctional anchorage task in which only one palatal implant and one supraconstruction (TPA) were used.

The disadvantages compared to other skeletal anchorage techniques are: 1) slightly more demanding insertion and explantation techniques (in comparison to miniscrews, yet simpler in comparison to bone anchors), 2) the necessity of a supraconstruction-plus-laboratory procedure when used with indirect anchorage (Figure 13), 3) for the most part, the restriction of anchorage to the maxilla. A success rate of over 90% has been reported by several authors after unloaded healing (ca. 12 weeks) [3, 5, 6, 70, 72] and under delayed immediate loading as well (one week after insertion) [19]. This 90% success rate was also attained under conditions in clinical practice [14].



Figure 13. Clinical finding after integration of an implant-supported TPA. The anterior segment is anchored by a palatal implant and serves a multifunctional anchorage task: mesialization of the maxillary lateral teeth (vestibular and palatal traction: arrows) and the interception of Class-II elastics to mesialize the mandibular lateral teeth. Alternatively, four miniscrews would have been required for this anchorage task.

Abbildung 13. Klinischer Befund nach Integration eines implantatgestützten TPA. Das frontale Segment wird durch ein Implantat skelettal verankert und dient einer multifunktionellen Verankerungsaufgabe: der Mesialisierung der Oberkieferseitenzähne (vestibuläre und palatinale Traktion: Pfeile) sowie dem Abfangen von Klasse-II-Gummizügen zur Mesialisierung der Unterkieferseitenzähne. Alternativ wären für diese Verankerungsaufgabe vier Minischrauben erforderlich.

orthodontischer Kraftapplikation bleiben sie positionsstabil. Die orthodontische Suprakonstruktion wird rigide mit dem Implantatabutment verbunden (am Implantat mittels Schraube fixiertes Abutment, an welches z. B. ein Trans-/Palatinalbügel oder eine Quad-Pendulum-Apparatur angelasert wird). Die Evaluation des vertikalen Knochenangebotes erfolgt am Fernröntgenseitenbild [71]. Der Inser-

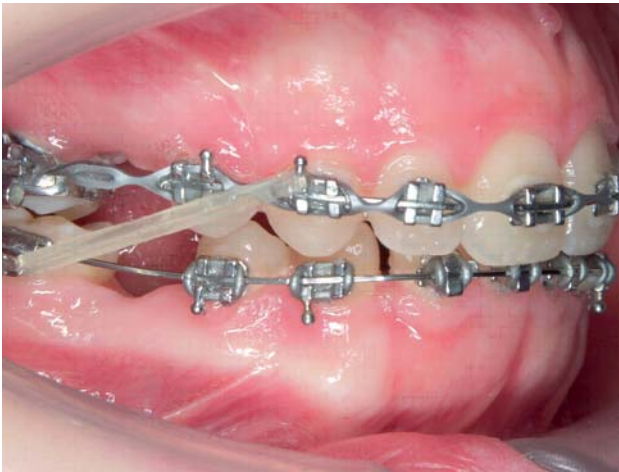


Figure 14. Class-II elastics to mesialize the mandibular posterior teeth against the implant-supported maxillary anterior teeth.

Abbildung 14. Klasse-II-Gummizüge zur Mesialisierung der Unterkieferseitenzähne gegen die implantatgestützten Oberkieferfrontzähne.

The onplant described by Block & Hoffman [9] and Hoffman [38] has assumed special status. With regard to design, this device is not an endosseous implant, but a subperiosteal, disk-form orthodontic anchorage element covered with hydroxyapatite. Its main insertion area is the median palate.

Bone Anchors

Bone anchors are modified osteosynthesis plates derived from osteosynthesis technology whose design has been adapted to orthodontic needs. They are usually affixed to the zygomatic bone or basal mandibular body with two or three screws [20, 24]. The application and removal of bone anchors is more complex and time-consuming than that of miniscrews and palatal implants, involving transmucosal access, bone-surface preparation, and fastening or removal of two or three screws per bone anchor. There are numerous potential uses offered by the 3D-fixation of wires to the transmucosal posts. Bilateral anchorage requires two bone

tions- und Explantationsmodus ist im Vergleich zu Minischrauben geringfügig aufwendiger.

Vorteile der Gaumenimplantate gegenüber anderen skelettalen Verankerungssystemen sind:

- multifunktionelle Verankerungsaufgaben mit nur einem Implantat durch Modifikation der Suprakonstruktion
- rigide 3-D Verankerungskontrolle
- Rotationsstabilität
- standardisiertes Insertions- und Explantationsprotokoll
- standardisierter Insertionsort (medianer/paramedianer Gaumen, attached mucosa)
- keine Gefahr der Verletzung von Zahnwurzeln.

Der letztgenannte Punkt trifft auch für Minischrauben zu, wenn sie in den medianen oder paramedianen Gaumen inseriert werden.

Die Abbildungen 9 bis 18 zeigen eine Behandlung mit einer multifunktionellen Verankerungsaufgabe, bei der nur ein Gaumenimplantat und eine Suprakonstruktion (TPA) zur Anwendung kamen.

Die Nachteile gegenüber anderen skelettalen Verankerungstechniken liegen in: geringfügig aufwendigere Insertions- und Explantationstechnik (im Vergleich zu Minischrauben, jedoch weniger aufwendig im Vergleich zu Bone Anchors), Erfordernis einer Suprakonstruktion mit Laborprozess bei Anwendung der indirekten Verankerung (siehe Abbildung 13), vorwiegende Beschränkung auf Verankerungsaufgaben in der Maxilla. Die Erfolgsrate wird von verschiedenen Autoren nach unbelasteter Einheilung (ca. 12 Wochen) wie auch unter verzögerter Sofortbelastung (1 Woche post insertionem) [19] mit über 90% angegeben [3, 5, 6, 70, 72]. Diese Erfolgsrate (90%) wurde auch unter Praxisbedingungen erzielt [14].

Das von Block & Hoffman [9] und Hoffman [38] beschriebene Onplant nimmt einen Sonderstatus ein. Im Hinblick auf das Design ist diese Fixtur kein enossales Implantat, sondern ein subperiostales mit Hydroxylapatit beschichtetes scheibenförmiges orthodontisches Verankerungselement. Vorwiegender Insertionsbereich ist der mediane Gaumen.



Figures 15a to 15c. Lateral and frontal occlusal views after debonding and deep-bite correction; Angle Class I occlusion.

Abbildungen 15a bis 15c. Laterale und frontale Ansichten der Okklusion nach Debonding und Tiefbisskorrektur; Angle-Klasse-I-Verzahnung.

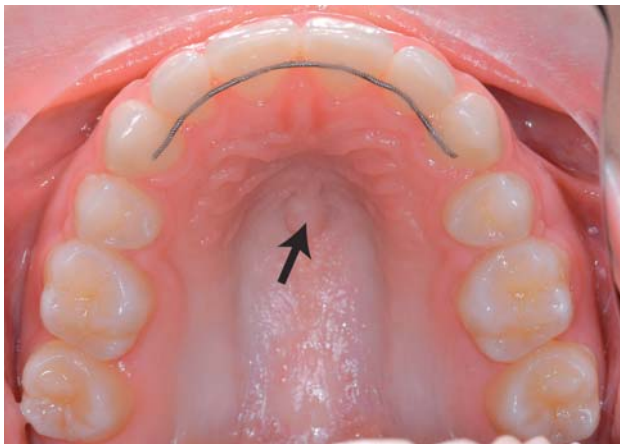


Figure 16. Situation 2 months after palatal-implant removal (arrow: former insertion site), retention phase.

Abbildung 16. Zustand 2 Monate nach Explantation des Gaumenimplantates (Pfeil: ehemaliger Insertionsort), Retentionsphase.

anchors (on the right and left). No information is currently available on the success rate of bone anchors.

Clinical Aspects Concerning the Use of Orthodontic Anchorage Screws

Selection and Position of Skeletal Anchorage Units

When selecting skeletal orthodontic anchorage devices and their position, surgical and orthodontic aspects must be considered.

Among the surgical aspects to be considered are soft tissue conditions in the insertion area (attached vs unattached gingiva or mucosa), bone quality and quantity, and potential root crowding. The insertion of one or two miniscrews in the mid-palate (e.g. for fastening an implant-supported pendulum appliance) with low vertical bone support can lead to perforation of the nasal cavity. It is our opinion that clinicians should not subject their patients to such a risk. Rather, a length-reduced screw (palatal implant) is the device of choice in such a situation. There is a risk of peri-implant mucosal infections, peri-implantitis and soft tissue overgrowth in patients whose attached gingiva presents a low apico-coronal width [52] (Figure 8). Those factors are often quoted as reasons for implant loss [52].

The orthodontic aspects comprise [66]: indirect or direct skeletal anchorage, action line of force in relation to the center of resistance, and number and position of required anchorage elements. Should for example direct anchorage be effected with one or several miniscrews, the position of the screw or screws must correspond to the required action line of force. If it is impossible to position the screw(s) in the desired anatomical areas for surgical reasons (unattached gingiva or root crowding), they must be inserted in other, anatomically more favorable areas. A supraconstruction must,



Figure 17. Lateral cephalogram after space closure and palatal-implant removal. Compare the position of the anterior teeth (maxilla) with that of the initial lateral cephalogram (Figure 12).

Abbildung 17. Fernröntgenseitenbild nach Lückenschluss und Entfernung des Gaumenimplantates. Vergleiche die Position der Frontzähne (Maxilla) mit denen im Anfangs-Fernröntgenseitenbild (Abbildung 12).

Bone Anchors

Bone Anchors sind aus der Osteosynthesetechnik abgeleitete modifizierte Osteosyntheseplatten, deren Design an kieferorthopädische Bedürfnisse angepasst wurde. Sie werden im Os zygomaticum oder basalen Unterkieferkörper mit mehreren (meist zwei bis drei) Schrauben fixiert [20, 24]. Die Applikation und Entfernung der Bone Anchors ist aufwendiger im Vergleich zu den Minischrauben und Gaumenimplantaten: transmukosaler Zugang, Präparation der Knochenoberfläche, Fixierung bzw. Entfernung von zwei bis drei Schrauben. Durch die Möglichkeit der 3-D Fixierung von Drähten am transmukosalen Pfosten ergibt sich eine Vielzahl von Nutzungsmöglichkeiten. Für bilaterale Verankerungsaufgaben in einem Kiefer sind zwei Bone Anchors (rechts/links) erforderlich. Zu Erfolgsraten von Bone Anchors liegen momentan noch keine Angaben vor.

Klinische Aspekte bei der Anwendung orthodontischer Verankerungsschrauben

Selektion und Position der skelettalen Verankerungseinheit(en)

Bei Selektion des skelettalen orthodontischen Verankerungsmittels sowie dessen Position sind sowohl chirurgische als auch orthodontische Aspekte zu berücksichtigen.

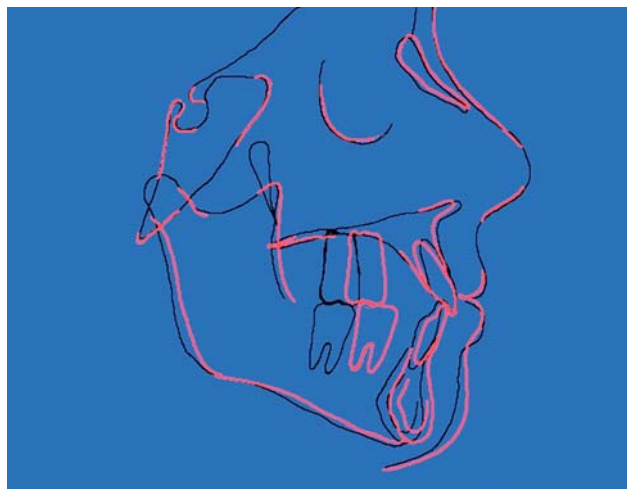


Figure 18. Superimposed tracings of lateral cephalogram from before (black) and after (red) treatment: the anterior tooth position has been retained; the profile has not changed.

Abbildung 18. Überlagerte Durchzeichnungen der Fernröntgenseitenbilder vor (schwarz) und nach (rot) der Behandlung: Die Frontzahnposition wurde beibehalten, und das Profil hat sich nicht verändert.

however, then be affixed to the anchorage element to guarantee required action line of force.

A further possibility consists in the use of indirect anchorage technique: teeth are connected by a wire to the skeletal anchorage element (forming a periodontal-skeletal anchorage unit). Teeth or tooth groups can then be orthodontically moved against this unit. Owing to the small dimensions of the wire being attached to miniscrews (e.g. 0.016×0.022 inch), one must assume that some deformation will occur upon the application of force, which can involve anchorage loss, especially when the lever arm is long. A deformation of 0.5–1 mm has been observed under clinical conditions in a palatally implant-supported 0.032×0.032 inch TPA [72]. This deformation is, however, clinically irrelevant.

Positional Stability Despite Small Dimensions

Anchorage screws should maintain their position under orthodontic load despite their small dimensions. Because of the possibility of implant dislocation or loss under application of force owing to a connective-tissue encapsulation, osseointegration should be a fundamental prerequisite.

Histological studies of miniscrews explanted from humans have shown that osseointegration was maintained during orthodontic loading of long duration under clinical conditions [10, 70]. Such results have also been demonstrated in animal experiments (miniscrews) examining translatory and extrusive forces [27].

The percentage of direct bone contact with the implant surface of palatal implants removed after treatment lay between 34% and 93%, with a mean of 75% [70]. The implant

Zu den chirurgischen Aspekten gehören: Schleimhaut im Insertionsbereich (attached vs. non-attached Gingiva/Mukosa), Knochenqualität und -quantität und potentieller Wurzelengstand. Die Insertion einer oder zweier Minischraube(n) im mittleren Gaumen (z.B. zur Fixierung einer implantatgestützten Pendulumapparatur) mit einem geringen vertikalen Knochenangebot kann zu einer Perforation des Cavum nasi führen. Dies sollte nach Ansicht der Autoren nicht billigend in Kauf genommen werden. Hier ist eine längenreduzierte Schraube das Mittel der Wahl (Gaumenimplantat). Bei Patienten mit einer geringen apiko-koronalen Breite der angewachsenen Gingiva sind periimplantäre Mukosairritationen, Peri-Implantitis und Überwachungen möglich (siehe Abbildung 8) [52]. Diese werden als Grund für Implantatverluste angegeben [52].

Die orthodontischen Aspekte umfassen [66]: indirekte oder direkte skelettale Verankerung, Kraftwirkungslinie in Relation zum Widerstandszentrum sowie Anzahl und Position der erforderlichen Verankerungselemente. Soll z. B. eine direkte Verankerung mit einer oder mehreren Minischraube(n) genutzt werden, muss die Position der Schraube(n) der erforderlichen Kraftwirkungslinie entsprechen. Ist die Positionierung in den gewünschten anatomischen Bereichen aus chirurgischen Gründen nicht möglich (non-attached Gingiva/Wurzelengstand), muss die Schraube in anderen anatomisch günstigeren Bereichen inseriert werden. Eine Suprakonstruktion muss dann allerdings am Verankerungselement fixiert werden, um die erforderliche Kraftwirkungslinie zu erzielen.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Anwendung der indirekten Verankerungstechnik: durch einen Draht werden Zähne mit einem skelettalen Verankerungselement verbunden (Bildung einer desmodontal-skelettalen Verankerungseinheit). Gegen diese Einheit können dann Zähne oder Zahngruppen orthodontisch bewegt werden. Aufgrund der geringen Dimension der an Minischrauben zu fixierenden Drähte (z. B. $0,016 \times 0,022$ inch) ist jedoch von einer Deformation unter Kraftapplikation auszugehen, womit ein Verankerungsverlust verbunden sein kann – insbesondere dann, wenn der Hebelarm lang ist. Bei gaumenimplantatgestütztem TPA (Dimension: $0,032 \times 0,032$ inch) wurde unter klinischen Bedingungen eine Deformation von 0.5–1 mm angegeben [72]. Diese Deformation ist jedoch klinisch nicht relevant.

Positionsstabilität trotz geringer Dimension

Trotz ihrer geringen Dimension sollten Verankerungsschrauben ihre Position unter orthodontischer Belastung aufrechterhalten. Da durch eine bindegewebige Ummantelung eine Implantatdislokation oder ein -verlust unter Kraftapplikation möglich ist, sollte die Osseointegration eine grundlegende Voraussetzung sein.

Histologische Untersuchungen von explantierten Minischrauben und Gaumenimplantaten beim Menschen zeigten, dass Osseointegration während lang andauernder

surface seems to play a key role in this context. Implants with a rough surface exhibit much higher removal torque than those with a smooth surface, and significantly higher interface shear strength between implant and bone [13, 75]. This may have a positive effect on the necessarily-shorter orthodontic anchorage implant required by the presence of low vertical bone support (e.g. palate). One disadvantage of implants with a rough surface (e.g. palatal implants) lies in the fact that they must be explanted with a trephine drill. On the other hand, thanks to their smooth surfaces, miniscrews can usually be removed from the bone by simply unscrewing them [15, 17, 26, 36, 43, 52]. However, if there is too much bone-implant contact (percentage of osseointegration), removal by unscrewing can be difficult, and the screw can even break. This is a genuine problem associated with interdental insertion. In a clinical study involving a total of 227 miniscrews, five broke during explantation [52]. There has been no study to date establishing how much osseointegration is required to both provide positional stability under orthodontic loading while still permitting simple removal (unscrewing) of miniscrews. Moreover the question arises as to whether the percentage of osseointegration can be controlled at all, and if so, how this is feasible. It is a (probably) unsolvable problem under clinical conditions.

Minimizing Strain on the Patient

Patients are generally subjected to a minimal degree of stress when a miniscrew is implanted or explanted. However, if several miniscrews must be inserted to achieve anchorage, that advantage is compromised. Such is the case for example when distalization must be performed in the maxilla. The following measures may be required in such a case: bilateral insertion of two vestibular miniscrews in the anterior area for distalization, and later insertion of two vestibular miniscrews in the posterior area for retraction of the anterior dentition (a multifunctional anchorage task). If a screw is lost, anchorage cannot be realized, and another screw must be inserted. A palatal implant is preferable in such a case. One implant suffices, by modifying the supraconstruction, to effect complete anchorage.

Another aspect in this context is the dynamics of implant loss (loss rate over time). Palatal implants are lost during the healing phase predominantly [19]. Miniscrews can be lost at any time during treatment [74], a factor that can detract from the success of a course of treatment.

Another example of a case is when, owing to tooth agenesis in all four quadrants (second permanent premolars) the gaps are closed from distal only. In this case, four miniscrews may be necessary in the upper jaw alone (two vestibular and two palatal: bilateral vestibular and palatal action lines of force). A palatal implant with a rigid TPA (e.g. stainless steel $\varnothing 0.9$ mm) is preferable in this case as well, because it handles multifunctional anchorage tasks with just one implant. The anchorage occurs bilaterally-vestibular through the implant-

orthodontischer Belastung unter klinischen Bedingungen aufrechterhalten wurde [10, 70]. Im Tierexperiment (Minischrauben) konnte dies ebenfalls für translatorische und extrusive Kräfte nachgewiesen werden [27].

Der Prozentsatz an direktem Knochenkontakt an der Implantatoberfläche bei nach der Behandlung entnommenen Gaumenimplantaten lag zwischen 34 und 93%, bei einem Mittelwert von 75% [70]. In diesem Zusammenhang scheint der Implantatoberfläche eine wichtige Bedeutung zuzukommen. Implantate mit rauer Oberfläche wiesen im Vergleich zu denen mit glatter Oberfläche einen deutlich höheren „removal torque“ und eine signifikant höhere „interface shear strength“ zwischen Implantat und Knochen auf [13, 75]. Dies kommt möglicherweise der erforderlichen Reduktion der Länge aufgrund eines geringen vertikalen Knochenangebotes orthodontischer Verankerungsimplantate zugute (Beispiel: Gaumen). Ein Nachteil von Implantaten mit einer rauen Oberfläche (z.B. Gaumenimplantat) liegt allerdings darin, dass sie mit einem Trepanbohrer explantiert werden müssen. Minischrauben können hingegen aufgrund ihrer glatten Oberfläche in der überwiegenden Anzahl der Fälle durch einfaches Herausschrauben aus dem Knochen entfernt werden [15, 17, 26, 36, 43, 52]. Wenn der Knochen-Implantat-Kontakt (Prozentsatz der Osseointegration) bei Minischrauben allerdings zu hoch ist, kann es schwierig werden, diese durch einfaches Herausdrehen zu entfernen oder sie frakturieren. Dies ist bei interdentaler Insertion als kritisch anzusehen. In einer klinischen Studie frakturierten von insgesamt 227 inserierten Minischrauben fünf bei der Explantation. [52]. Bis heute gibt es keine Studie, die belegt, wie viel Osseointegration erforderlich ist, um einerseits der Positionsstabilität bei orthodontischer Belastung und andererseits dem einfachen Herausdrehen von Minischrauben Rechnung zu tragen. Zudem stellt sich die Frage, ob und wenn ja wodurch der Anteil der Osseointegration überhaupt steuerbar ist. Dieses Problem ist vermutlich unter klinischen Bedingungen kaum zu lösen.

Minimale Belastung für den Patienten

Prinzipiell ist bei Minischrauben die Belastung für den Patienten bei der Im- und Explantation einer Schraube als gering einzustufen. Müssen jedoch zur Realisierung eines Verankerungskonzeptes mehrere Minischrauben inseriert werden, relativiert sich dieser Vorteil. Dies ist z. B. der Fall, wenn in der Maxilla distalisiert werden soll. Folgende Maßnahmen können dabei erforderlich sein: bilaterale Insertion von zwei vestibulären Minischrauben im anterioren Bereich zur Distalisierung und später Insertion von zwei vestibulären Minischrauben im posterioren Bereich zur Retraktion der anterioren Dentition (multifunktionelle Verankerungsaufgabe). Wenn eine Schraube verloren geht, kann zudem das Verankerungskonzept nicht realisiert werden oder eine erneute Schraubeninsertion wird erforderlich. In diesem Fall ist ein Gaumenimplantat zu favorisieren. Durch Modi-

supported teeth, and bilaterally-palatal via the implant-supported TPA (Figures 10 to 18).

Patient stress can be reduced by employing atraumatic surgical technology when inserting palatal implants [13, 25]. By using a mucosal punch during insertion, or a standardized system-compatible trephine drill during explantation, the extent of intervention is minimized in the soft and hard tissue areas [14, 72]. Surgical intervention is minimally invasive during miniscrew- and palatal implantation in general. Minimal invasiveness in the surgical sense is defined as buttonhole or keyhole surgery. Transmucosal insertion, or insertion after removal of the mucosal membrane with a mucosal punch, corresponds therefore to the criterion of minimal invasiveness, since flap preparation with bone exposure is not required.

Skeletal Anchorage in Adolescents

In still-growing patients, the insertion of skeletal anchorage elements in still highly growth-active areas must be approached with great caution. This applies to the dentulous alveolar process in particular, as is illustrated by the example of the maxilla.

Growth changes in the maxilla occur through displacement and cortical drift. Björk [8] established, in specific areas of the maxilla, mean vertical growth changes in the maxillary complex from the fourth year of life until the completion of growth: displacement of the maxilla by cranial-suture growth (11.2 mm), apposition (drift) on the orbital floor (6.4 mm), apposition in the infrazygomatikal area (2.5 mm), lowering of the nasal floor (drift; 4.6 mm) and increase in alveolar bone height (14.6 mm). If we speculate that a third of growth must still occur from the twelfth year of life to the conclusion of growth, this means that 1.5 mm of residual vertical growth can be anticipated in the palate and 5 mm in the alveolar process from the twelfth year of life. During that same period of time, any anchorage element inserted in the palate would thus remain 1.5 mm, and an anchorage implant inserted in the alveolar process 5 mm behind the growth of the surrounding bone, with the associated risk of impairing tooth eruption or development. Reliable data on the insertion of anchoring screws in the dentulous alveolar process in still-growing patients are, however, not available at present.

Initial experience with paramedianally-inserted palatal anchoring screws in adolescents has, however, revealed that this insertion site can be used in adolescents from age twelve. Our investigations have shown that anchorage screws inserted in the paramedian palate shifted caudally or anterocaudally with the maxillary complex. Partial sinking of the anchorage elements due to bone drift of the maxillary complex was not observed. This reflects a potential difference from fixtures inserted in the alveolar process of still-growing persons, since the growth potential still existing in adolescents is higher in the alveolar process than in the palate [8]. The paramedian area (directly parasutural) is the insertion site of choice in adolescents. This is necessary so as not to nega-

fikation der Suprakonstruktion reicht ein Implantat aus, um das gesamte Verankerungskonzept zu realisieren.

Ein anderer Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Dynamik des Implantatverlustes (Verlustrate über die Zeit). Gaumenimplantate gehen überwiegend in der Einheilungsphase verloren [19]. Minischrauben können zu jeder Zeit während einer Behandlung verloren gehen [74]. Dies kann den Behandlungsablauf beeinträchtigen.

Ein anderer Fall ist zum Beispiel, wenn aufgrund von Nichtanlagen in allen vier Quadranten (zweite Prämolaren) die Lücken ausschließlich von distal geschlossen werden sollten. In diesem Fall können allein im Oberkiefer vier Minischrauben erforderlich sein (zwei vestibulär und zwei palatinal: bilaterale vestibuläre und palatinale Kraftwirkungslinien). Auch in diesem Fall ist ein Gaumenimplantat mit einem rigiden TPA (z.B. stainless steel, Ø 0,9 mm) zu favorisieren aufgrund der Bewältigung multifunktionaler Verankerungsaufgaben mit nur einem Implantat. Die Verankerung erfolgt bilateral vestibulär über die implantatgestützten Zähne und bilateral palatinal durch den implantatgestützten TPA (siehe Abbildungen 10 bis 18).

Die Belastung für den Patienten kann bei der Implantation von Gaumenimplantaten reduziert werden, indem eine atraumatische chirurgische Technik angewandt wird [13, 72]. Durch Nutzung einer Mukosastanze während der Insertion oder eines standardisierten systemkompatiblen Trepanbohrers während der Explantation wird der Umfang der Intervention im Bereich des Weich- und Hartgewebes minimiert [14, 72]. Prinzipiell ist der chirurgische Eingriff bei Minischrauben und Gaumenimplantaten als minimalinvasiv einzustufen. Minimalinvasivität im chirurgischen Sinn ist definiert als Knopfloch- oder Schlüsselchirurgie. Die transmukosale Insertion oder Insertion nach Entfernung der Schleimhaut mit einer Mukosastanze entspricht demnach dem Kriterium für Minimalinvasivität, da eine Lappenpräparation mit Knochenfreilegung nicht erforderlich ist.

Skelettale Verankerung bei Jugendlichen

Beim noch wachsenden Patienten ist eine Insertion skelettaler Verankerungselemente in noch (stark) wachstumsaktive Bereiche als kritisch zu bewerten. Zu diesen gehört insbesondere der bezahnte Alveolarfortsatz. Dies sei am Beispiel der Maxilla verdeutlicht.

Die Wachstumsveränderungen der Maxilla geschehen durch Displacement und kortikale Drift. In spezifischen Bereichen der Maxilla wurden von Björk [8] die mittleren vertikalen Wachstumsveränderungen des maxillären Komplexes vom 4. Lebensjahr bis Abschluss des Wachstums ermittelt: Displacement der Maxilla durch Wachstum kranialer Suturen 11,2 mm, Apposition (Drift) am Orbitaboden 6,4 mm, Apposition im infrazygomatikal Bereich 2,5 mm, Absenkung des Nasenbodens (Drift) 4,6 mm und Zunahme der alveolären Knochenhöhe 14,6 mm. Wenn spekuliert wird, dass ein Drittel dieses Wachstums vom 12. Lebensjahr bis zum Wachstum-

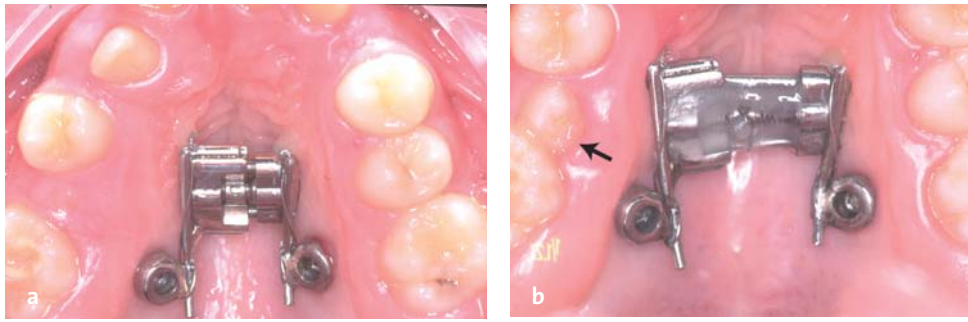


Figure 19. Palatal implant-supported Rapid Maxillary Expansion (RME) for transversal expansion. Note inflammation-free peri-implant conditions. Further tooth eruption during the retention phase (arrow), since the tooth eruption is not hindered by a dentally-fixed RME appliance.

Abbildung 19. Gaumenimplantatgestützte schnelle maxilläre Expansion (GNE) zur transversalen Erweiterung.

Beachte die entzündungsfreien periimplantären Verhältnisse. Während der Retentionsphase erfolgt der weitere Zahndurchbruch (Pfeil), da der Zahndurchbruch nicht durch eine dental fixierte GNE-Apparatur behindert wird.

tively influence residual growth processes in the midpalatal suture (transversal growth) [1].

Skeletal Anchorage with Dentofacial-orthopedic Measures

The following skeletal anchorage devices have been successfully applied in patients:

- transpalatal distractors for rapid palatal expansion [29, 48]
- implant-fixed Hyrax screws for rapid palatal expansion [34, 35]
- bone anchors for maxillary protraction [21].

The advantages of using skeletal (bone-supported) anchorage for skeletal treatment are obvious. No teeth are included in the anchorage; the forces are transferred directly to the facial skeleton, and there is no dental compensation.

Skeletally-supported Rapid Maxillary Expansion (Sutural Expansion)

Below are the potential side effects of dentally-supported rapid maxillary expansion (RME):

- compression of the periodontal ligament space – root resorption – bony fenestrations [4, 41, 60]
- tilting movements of the teeth and alveolar process [16, 73]
- tendency to relapse [30, 39, 53].

One problem associated with dentally-supported palatal expansion is buccal tilting of the teeth during transversal expansion, with a corresponding tendency to relapse. Hence it is recommended to overcorrect the transversal width so as to compensate for any relapse [30, 39, 53]. An overcorrection can, however, amplify unwanted periodontal reactions (recessions, attachment loss). These disadvantages can be minimized or even avoided with skeletally-anchored appliances.

Cambiotti et al. [16] found 6° buccal tilting of the upper molars in 11-year-old patients treated with a dentally-supported RME appliance. When a NiTi-expansion appliance

sende noch realisiert werden muss, bedeutet dies, dass im Gaumen ab dem 12. Lebensjahr ein residuales vertikales Wachstum von noch 1,5 mm und im Alveolarfortsatz von noch 5 mm zu erwarten ist. In derselben Zeiteinheit würde ein in den Gaumen inseriertes Verankerungselement demnach um nur 1,5 mm und ein in den Alveolarfortsatz inseriertes Verankerungsimplantat allerdings um 5 mm hinter dem Wachstum des umgebenden Knochens zurückbleiben und möglicherweise die Zahnentwicklung/-eruption beeinträchtigen. Belastbare Daten zum Einsatz von Verankerungsschrauben in den bezahnten Alveolarfortsatz beim noch wachsenden Patienten liegen jedoch bis heute nicht vor.

Erste Erfahrungen mit paramedian inserierten palatinalen Verankerungsschrauben bei Jugendlichen zeigen hingegen, dass dieser Insertionsort beim Jugendlichen ab dem 12. Lebensjahr genutzt werden kann. Eigene Untersuchungen zeigen, dass in den paramedianen Gaumen inserierte Verankerungsschrauben mit dem maxillären Komplex nach kaudal bzw. anterokaudal verlagert werden. Eine partielle Versenkung der Verankerungselemente durch Knochen drift des maxillären Komplexes konnte nicht beobachtet werden. Hier liegt möglicherweise ein Unterschied zu den im Alveolarfortsatz inserierten Fixturen beim wachsenden Menschen vor, da das beim Jugendlichen noch vorhandene Wachstumspotential im Alveolarfortsatz deutlich höher ist als im Gaumen [8]. Beim Jugendlichen ist der paramediane Bereich (direkt parasutural) der Insertionsort der Wahl. Dies ist erforderlich, um residuale Wachstumsvorgänge in der Sutura palatina mediana (transversales Wachstum) nicht negativ zu beeinflussen [1].

Skelettale Verankerung bei kieferorthopädischen Maßnahmen

Folgende skelettale Verankerungsmittel sind bis heute erfolgreich beim Patienten angewendet worden:

- transpalatinale Distraktoren zur schnellen Gaumennahterweiterung [29, 48]
- implantatfixierte Hyraxschrauben zur schnellen Gaumennahterweiterung [34, 35]
- Bone Anchors zur maxillären Protraktion [21].



Figures 20a to 20c. Skeletally-supported maxillary protraction with a Delaire mask in an adolescent patient with maxillary hypoplasia. Two palatal implants (Orthosystem®, length: 4 or 6 mm) were inserted under local anesthesia in the anterior area of the zygomatic bone (a). A sterilized, individually-bent wire with hooks was fixed to the implants and led through the mucosa. After the soft tissue healed, the implants were loaded. The hooks provided a means upon which to hang the elastics (b and c). Figure 20b: the radiologic finding 6 months after the start of protraction.

Abbildungen 20a bis 20c. Skelettal abgestützte maxilläre Protraktion mit einer Delaire-Maske bei einem Jugendlichen mit maxillärer Hypoplasie. Zwei Gaumenimplantate (Orthosystem®, Länge: 4 bzw. 6 mm) wurden in Lokalanästhesie in den anterioren Bereich des Os zygomaticum inseriert (a). Ein sterilisierter, individuell gebogener Draht mit Haken wurde an den Implantaten fixiert und durch die Mukosa geführt. Nach der Weichteilabheilung wurden die Implantate belastet. Die Haken dienten zum Einhängen der Gummizüge (b und c). Abbildung 20b zeigt den radiologischen Befund 6 Monate nach Beginn der Protraktion.

was used, buccal tilting even increased to 11.68°. The teeth tip more than does the alveolar process when dentally-supported palatal expansion appliances are employed. The opposite is true when using skeletally-supported palatal expansion appliances. Recent investigations with the Dresden distractor show that the tilting of the teeth by an average of 3.5° to 7° was less than that of the alveolar process [33].

The disadvantage of the skeletally-supported palatal expansion appliance, as opposed to the dentally-supported appliance, is that its application requires a surgical intervention. Here, too, a minimally-invasive approach is mandatory, as with the other skeletal anchorage devices.

We anticipate that distractors will be applied which fulfill this criterion. Plate-supported distractors [29, 48] (lateral palate) require more extensive soft-tissue surgical measures. On the other hand, application of an implant-supported distractor (e.g. the Dresden distractor) can be considered to be minimally invasive. Figure 19 illustrates the application of implant-supported rapid maxillary expansion (RME).

Skeletally-supported Maxillary Protraction

Skeletal anchorage units have been used in animal experiments for maxillary protraction. Smalley et al. [58] demonstrated in an experiment with monkeys that dentally-supported (dentition with splint) maxillary protraction led to tilting of the teeth toward anterior, development of vestibular bony dehiscences, and a slight reaction in the temporom-

Die Vorteile der Nutzung einer skelettalen (knochengestützten) Verankerung für skelettale Behandlungsaufgaben liegen auf der Hand. Es werden keine Zähne in die Verankerung einbezogen, die Kräfte werden direkt auf das Gesichtsskelett übertragen und eine dentale Kompensation findet nicht statt.

Skelettal abgestützte schnelle maxilläre Expansion (Gaumennahterweiterung)

Als potentielle Nebenwirkungen einer dentalen Abstützung bei der schnellen maxillären Expansion (GNE) wurden beschrieben:

- Kompression des Parodontalspalt/Wurzelresorptionen / knöcherne Fenestrationen [4, 41, 60],
- kippende Bewegung der Zähne und der Alveolarfortsätze [16, 73] und
- Rezidivneigung [30, 39, 53].

Ein Problem bei der dental abgestützten Gaumennahterweiterung ist die Bukkalkippung der Zähne während der transversalen Erweiterung mit anschließender Rezidivtendenz. Daher wird empfohlen, die transversale Breite überzukorrigieren, um die Rezidivtendenz zu kompensieren [30, 39, 53]. Eine Überkorrektur kann jedoch unerwünschte parodontale Reaktionen (Rezessionen, Attachmentverlust) verstärken. Diese Nachteile können durch eine skelettal verankerte Apparatur reduziert oder sogar vermieden werden.

zygomatic suture. Skeletally-supported maxillary protraction (the bilateral zygoma implants were 5 mm long) led however, to exclusively skeletal effects – distinctive sutural expansion (temporozygomatic suture) and no dental side effects. Our experiences show that this procedure is possible in patients (Figures 20a to 20c). Owing to the invasiveness of this intervention, this procedure is not employed routinely at present.

De Clerck [21] showed, impressively, how the adolescent maxilla can be protracted without dental side effects – with four bone anchors (two bilygomatic und two in the anterior mandible, application of strong Class-III elastics). It remains questionable whether this procedure will gain broad acceptance in routine therapy because of its invasiveness.

Conclusions

The possibilities of skeletal anchorage broaden our current spectrum of treatments. Anchorage is controlled by the clinician, is independent of patient compliance, and is not left to the incalculable reactions of the periodontal ligament. Clinically-relevant anchorage losses are practically unheard of in the presence of positional stability (osseointegration), thus making treatment results easier to predict. In some situations one can work temporarily or during the entire treatment with reduced orthodontic appliances, which in turn enhances wearing comfort and reduces esthetic impairment.

The disadvantages or risks of skeletal anchorage are: surgical intervention when applying and removing the anchorage element, anchorage element loss, infection around the anchorage element, and root injury with interdental application. Moreover, the patient must cover the additional expenses associated with skeletal anchorage, although these costs are, depending on findings, usually justified by the advantages.

Prerequisites for high acceptance of this relatively new technology are: minimum strain on the patient, risk reduction, simple use, comprehensive biomechanical possibilities in conjunction with the fewest anchorage elements, and high success rates of the one or the other method under clinical conditions.

As Hoffman [38] wrote 12 years ago in his article on skeletal anchorage using the onplant: “Even though an orthodontist’s dream of absolute anchorage control and pure orthopedic intervention has been realized, we set our sights higher to consider matters beyond our horizons”.

Cambiotti et al. [16] stellten eine 6°-Bukkalkippung der oberen Molaren bei Patienten von 11 Jahren fest, die mit einer dental abgestützten forcierten GNE-Apparatur behandelt wurden. Bei Verwendung einer NiTi-Erweiterungsapparatur stieg die Bukkalkippung sogar auf 11,68° an. Bei der Anwendung dental abgestützter GNE-Apparaturen ist die Kippung der Zähne größer als die der Alveolarfortsätze. Diese Relation wird durch skelettal abgestützte GNE-Apparaturen umgekehrt. Neuere Untersuchungen mit dem Dresden-Distraktor zeigen, dass die Kippung der Zähne um durchschnittlich 3,5°–7° geringer war als die der Alveolarfortsätze [33].

Die skelettal abgestützte GNE-Apparatur hat gegenüber der dental abgestützten den Nachteil, dass deren Applikation mit einem chirurgischen Eingriff verbunden ist. Auch hier ist wie bei den anderen skelettalen Verankerungsmitteln eine Minimalinvasivität zu fordern.

Zukünftig werden voraussichtlich jene Distraktoren zur Anwendung kommen, die dieses Kriterium erfüllen. Plattengestützte Distraktoren (lateraler Gaumen) erfordern ausgedehntere weichteilchirurgische Maßnahmen. Hingegen ist die Applikation eines implantatgestützten Distraktors (z. B. Dresden-Distraktor) als minimalinvasiv einzustufen. Abbildung 19 zeigt die Anwendung einer implantatgestützten schnellen maxillären Expansion (RME: Rapid Maxillary Expansion).

Skelettal abgestützte maxilläre Protraktion

Ferner wurden skelettale Verankerungseinheiten tierexperimentell zur maxillären Protraktion genutzt. Smalley et al. [58] konnten im Tierexperiment am Affen zeigen, dass eine dental abgestützte (Dentition mit Splint) maxilläre Protraktion zu folgenden Effekten führte: Kippung der Zähne nach anterior, Ausbildung von vestibulären knöchernen Dehiscenzen und geringe Reaktion in der Sutura temporozygomatica. Die skelettal abgestützte maxilläre Protraktion (bilaterale Zygomaimplantate von 5 mm Länge) führte hingegen ausschließlich zu skelettalen Effekten: ausgeprägte suturale Erweiterung (Sutura temporozygomatica) und keine dentalen Nebeneffekte. Eigene Erfahrungen beim Patienten zeigen (Abbildungen 20a bis 20c), dass dieses Verfahren beim Patienten möglich ist. Aufgrund der Invasivität des Eingriffes ist dieses Verfahren in der Routinebehandlung momentan nicht gebräuchlich.

De Clerck [21] zeigte eindrucksvoll, wie beim Jugendlichen mit vier Bone Anchors (zwei bilygomatic und zwei in der anterioren Mandibula, Anwendung von starken Klasse-III-Gummizügen) die Maxilla skelettal abgestützt und ohne dentale Nebenwirkungen protrahiert werden kann. Die Frage ist, ob sich dieses Verfahren aufgrund seiner Invasivität in der Routinebehandlung durchsetzen wird.

Schlussfolgerungen

Die Möglichkeiten der skelettalen Verankerung erweitern unser heutiges Behandlungsspektrum. Die Verankerung

References

1. Asscherickx K, Hansen JL, Wehrbein H, Sabzevar MM. Orthodontic anchorage implants inserted in the median palatal suture and normal transverse maxillary growth in growing dogs. A biometric and radiographic study. *Angle Orthod* 2005;75:826–31.
2. Asscherickx K, Vannet BV, Wehrbein H, Sabzevar MM. Root repair after injury from mini-screw. *Clin Oral Implants Res* 2005;16:575–8.
3. Bantleon HP, Bernhard T, Crismani AG, Zachrisson BJ. Stable orthodontic anchorage with palatal osseointegrated implants. *World J Orthod* 2002;3:109–6.
4. Barber AF, Sims MR. Rapid maxillary expansion and external root resorption in man. A scanning electron microscope study. *Am J Orthod* 1981;79:630–52.
5. Bernhard T, Vollgruber A, Gahleitner A, et al. Alternative to the median region of the palate for placement of an orthodontic implant. *Clin Oral Implants Res* 2000;11:595–601.
6. Bernhard T, Dörtbudak O, Wehrbein H, et al. Das Gaumenimplantat. *Inf Orthod Kieferorthop* 2000;32:209–29.
7. Bernhard T, Freudenthaler J, Dörtbudak O, et al. Short epithetic implants for orthodontic anchorage in the paramedian region of the palate. A clinical study. *Clin Oral Implants Res* 2001;12:624–31.
8. Björk A. Growth of the maxilla in three dimensions as revealed radiographically by the implant method. *Br J Orthod* 1977;4:53–64.
9. Block MS, Hoffman DR. A new device for absolute anchorage for orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1995;107:251–8.
10. Böhm B, Fuhrmann R. Clinical application and histological examination of the FAMI screw for skeletal anchorage – a pilot study. *J Orofac Orthop* 2006;67:175–85.
11. Bousquet F, Bousquet P, Mauran G, Parquel P. Use of an impacted post for anchorage. *J Clin Orthod* 1996;30:261–5.
12. Brånemark PI, Hansson B, Adell R, et al. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period. Stockholm: Almqvist and Wiksell, 1977.
13. Buser D, Nydegger T, Hirt HP, et al. Removal torque values of titanium implants in the maxilla of miniature pigs. A direct comparison of sandblasted and acid-etched with machined and acid-etched screw implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1998;13:611–9.
14. Chhatwani B, Schneider B. Maximum anchorage in orthodontics with the palatal implant. *J Orofac Orthop* 2006;6:459–70.
15. Cheng SJ, Tseng IY, Lee JJ, Kok SH. A prospective study of the risk factors associated with failure of mini-implants used for orthodontic anchorage. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2004;19:100–6.
16. Ciambotti C, Ngan P, Durkee M, et al. A comparison of dental and dentoalveolar changes between rapid palatal expansion and nickel-titanium palatal expansion appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001;119:11–20.
17. Costa A, Raffini M, Melsen B. Miniscrews as orthodontic anchorage. A preliminary report. *Int J Adult Orthod Orthognath Surg* 1998;13:201–9.
18. Ceekmore TD, Eklund MK. The possibility of skeletal anchorage. *J Clin Orthod* 1983;17:266–9.
19. Crismani AG, Bernhart T, Schwarz K, et al. Ninety percent success in palatal implants loaded 1 week after placement. A clinical evaluation by resonance frequency analysis. *Clin Oral Implants Res* 2006;17:445–50.
20. De Clerck H, Geerinckx V, Siciliano S. The zygoma anchorage system. *J Clin Orthod* 2002;36:455–9.
21. De Clerck H. Maxillofacial protraction with the zygoma anchorage system. Vortrag auf dem Symposium: Implantate in der Kieferorthopädie – aktueller Stand der Wissenschaft und klinische Einsatzmöglichkeiten, Düsseldorf 9. März 2007.
22. De Pauw GAM, Dermaut L, De Bruin H, Johansson C. Stability of implants as anchorage for orthopedic traction. *Angle Orthod* 1999;69:401.

wird vom Kliniker kontrolliert, ist complianceunabhängig und nicht den unkalkulierbaren Reaktionen des Desmodonts überlassen. Klinisch relevante Verankerungsverluste treten bei Positionsstabilität (Osseointegration) quasi nicht auf. Dadurch wird das Behandlungsergebnis besser vorhersehbar. In einigen Situationen kann temporär oder während der Gesamtbehandlung mit reduzierter orthodontischer Apparatur gearbeitet werden, wodurch der Tragekomfort verbessert und die ästhetische Beeinträchtigung gemildert wird.

Die Nachteile bzw. Risiken der skelettalen Verankerung sind chirurgische Intervention bei der Applikation sowie bei der Entfernung des jeweiligen Verankerungselementes, Verlust des Verankerungselementes, Infektion um das Verankerungselement und Wurzelverletzung bei interdentaler Applikation. Außerdem kommen bei der Anwendung der skelettalen Verankerung zusätzliche Kosten auf den Patienten zu. Diese werden allerdings zum Teil je nach Befund durch die Vorteile relativiert.

Voraussetzung für eine hohe Akzeptanz dieser relativ neuen Technologie sind minimale Belastung der Patienten, Risikominimierung, einfache Nutzung, umfassende biomechanische Möglichkeiten mit der geringsten Anzahl von Verankerungselementen und hohe Erfolgsrate der ein oder anderen Methode unter klinischen Bedingungen.

Wie schrieb Hoffman [38] vor nun schon 12 Jahren in seinem Artikel zur skelettalen Verankerung mit dem Onplant: „Obwohl ein Traum des Kieferorthopäden von absoluter Verankerungskontrolle und ausschließlich orthopädischer Intervention realisiert wurde, werden wir unsere Ziele höher stecken, um Dinge hinter unseren Horizonten zu betrachten.“

23. Diedrich P. Verschiedene orthodontische Verankerungssysteme. Eine kritische Betrachtung. *Fortschr Kieferorthop* 1993;54:156–71.
24. Everdi N, Baysal B, Cakirer B. Intrusion of overerupted molars by zygomatic implant anchorage in an adult orthoprosthetic patient. *Orthodontics* 2003;1:99–105.
25. Feifel H, Wehrbein H, Jänicke S, Riediger R. Surgical experience with the Orthosystem, a new palatal implant for orthodontic anchorage. (Abstract) *J Cranio-Maxillofac Surg* 1998;26(Suppl. 1):90–1.
26. Freudenthaler JW, Haas R, Bantleon HP. Bicortical titanium screw for cortical orthodontic anchorage in the mandible. A preliminary report on clinical applications. *Clin Oral Implants Res* 2001;12:358–68.
27. Fritz U, Diedrich P, Kinzinger G, Al-Said M. The anchorage quality of mini-implants towards translatory and extrusive forces. *J Orofac Orthop* 2003;64:293–304.
28. Fritz U, Ehmer A, Diedrich P. Clinical suitability of Titanium microscrews for orthodontic anchorage – preliminary experiences. *J Orofac Orthop* 2004;65:410–8.
29. Gerlach KL, Zahl C. Transversal expansion using a palatal distractor. *J Orofac Orthop* 2003;64:443–9.
30. Glassman AS, Nahigian SJ, Medway JM, Aronowitz HI. Conservative surgical orthodontic adult rapid palatal expansion, sixteen cases. *Am J Orthod* 1984;86:207–13.
31. Glatzmaier J, Wehrbein H, Diedrich P. Biodegradable implants for orthodontic anchorage. A preliminary biomechanical study. *Eur J Orthod* 1996;18:465–9.
32. Haanaes HR, Stenvik A, Beyer-Olson ES, et al. The efficacy of two-stage titanium implants as orthodontic anchorage in the preprosthetic correction of third molars in adults. A report of three cases. *Eur J Orthod* 1991;13:287–96.
33. Hansen L. 3-D-Evaluation der chirurgisch unterstützten, implantatgetragenen, forcierten Gaumennahterweiterung mit dem Dresden Distraktor. *Med Diss, Dresden* 2007.
34. Harzer W, Schneider M, Gedrange T. Direct bone placement of the Hyrax fixation screw for surgically assisted rapid palatal expansion (SARPE). *J Oral Maxillofac Surg* 2006;64:1313–7.
35. Harzer W, Schneider M, Gedrange T. Rapid maxillary expansion with palatal anchorage of a hyrax screw. Pilot study with case presentation. *J Orofac Orthop* 2004;65:419–22.
36. Hermann RJ, Currier GF, Miyake A. Mini-implant anchorage for maxillary canine retraction. A pilot study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006;130:228–35.
37. Higuchi KW, Slack JM. The use of titanium fixtures for intraoral anchorage to facilitate orthodontic tooth movement. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1991;6:338–44.
38. Hoffman D. Implants and orthodontics. In: Block MS, Kent JK, eds. *Endosseous implants for maxillofacial reconstruction*. Philadelphia—London—Toronto—Sydney—Tokyo: Saunders, 1995:382–99.
39. Jacobs JD, Bell WH, Williams CE, Kennedy JW. Control of the transverse dimension with surgery and orthodontics. *Am J Orthod* 1980;77:248–306.
40. Kanomi R. Mini-implants for orthodontic anchorage. *J Clin Orthod* 1997;11:763–7.
41. Langford SR. Root resorption extreme resulting from clinical RME. *Am J Orthod* 1982;81:371–7.
42. Linkow LI. Implanto-orthodontics. *J Clin Orthod* 1970;4:685–705.
43. Liou EJW, Pai BJC, Lin JCY. Do miniscrews remain stationary under orthodontic forces? *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2004;126:42–7.
44. Ludwig B: *Mini-Implantate in der Kieferorthopädie*. Berlin—Chicago—Tokio u.a.: Quintessenz, 2007.
45. Majzoub Z, Finotti M, Miotti F, et al. Bone response to orthodontic loading of endosseous implants in the rabbit calvaria: early continuous distalizing forces. *Eur J Orthod* 1999;21:223–30.
46. Melsen B, Petersen JK, Costa A. Zygoma ligatures. An alternative form of maxillary anchorage. *J Clin Orthod* 1998;32:154–8.
47. Melsen B. Mini-implants. Where are we? *J Clin Orthod* 2005;39:539–47.
48. Mommaerts MY. Transpalatal distraction as a method of maxillary expansion. *Br J Oral Maxillofac Surg* 1999;37:268–72.
49. Ödman J, Lekholm U, Jemt T, et al. Osseointegrated titanium implants. A new approach in orthodontic treatment. *Eur J Orthod* 1988;10:98–105.
50. Ödman J, Gröndahl K, Lekholm U, Thilander B. The effect of osseointegrated implants on the dento-alveolar development. A clinical and radiological study in growing pigs. *Eur J Orthod* 1991;13:279–86.
51. Ödman J, Lekholm U, Jemt T, Thilander B. Osseointegrated implants as orthodontic anchorage in treatment of partially edentulous adult patients. *Eur J Orthod* 1994;3:198–201.
52. Park HS, Jeong SH, Kwon OW. Factors affecting the clinical success of screw implants used as orthodontic anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006;130:18–25.
53. Progrell MA, Kaban LB, Vargervik K, Baumrind S. Surgically assisted maxillary rapid maxillary expansion in adults. *Int J Orthod Orthognath Surg* 1992;7:37–41.
54. Roberts WE, Smith RK, Silberman Y, et al. Osseous adaptation to continuous loading of rigid endosseous implants. *Am J Orthod* 1984;86:95–111.
55. Roberts WE, Helm FR, Marshal KJ, Gongloff RK. Rigid endosseous implants for orthodontic and orthopedic anchorage. *Angle Orthod* 1990;59:247–56.
56. Roberts WE, Marshall KJ, Mozsary PG. Rigid endosseous implant utilized as anchorage to protract molars and close an atrophic extraction site. *Angle Orthod* 1990;60:135–52.
57. Shapiro PA, Kokich VG: *Uses of implants in orthodontics*. *Dent Clin N Am* 1988;32:539–50.
58. Smalley W, Shapiro PA, Hohl TH, et al. Osseointegrated titanium implants for maxillofacial protraction in monkeys. *Am J Orthod* 1988;94:285–95.
59. Thilander B, Ödman J, Gröndahl K, Lekholm U. Osseointegrated implants in adolescents. An alternative in replacing missing teeth? *Eur J Orthod* 1994;16:84–95.
60. Timms DJ, Moss JP. A histological investigation into the effects of rapid maxillary expansion on the teeth and their supporting tissues. *Trans Eur Orthod Soc* 1971;263–71.
61. Triaca A, Antonini M, Wintermantel E. Ein neues Titan-Flachschraubenimplantat zur Verankerung am anterioren Gaumen. *Inf Orthod Kieferorthop* 1992;24:251–7.
62. Turley PK, Shapiro PA, Moffett BC. The loading of bioglass coated aluminium oxide implants to produce sutural expansion of the maxillary complex in pigtail (*Macaca nemestrina*). *Arch Oral Biol* 1980;25:459–69.
63. Turley PK, Kean C, Schnur J, et al. Orthodontic force application to titanium endosseous implants. *Angle Orthod* 1988;58:151–62.
64. Van Roeckel NB. The use of Branemark System implants for orthodontic anchorage. Report of a case. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1989;4:341–4.
65. Wehrbein H, Diedrich P. Endosseous titanium implant during and after orthodontic load. An experimental study in dog. *Clin Oral Implants Res* 1993;4:76–82.
66. Wehrbein H: *Enossale Titanimplantate als orthodontische Verankerungselemente*. Experimentelle Untersuchungen und klinische Anwendung. *Fortschr Kieferorthop* 1994;55:236–50.
67. Wehrbein H, Glatzmaier J, Mundwiler U, Diedrich P. The Orthosystem. A new implant system for orthodontic anchorage in the palate. *J Orofac Orthop* 1996;57:142–53.
68. Wehrbein H, Glatzmaier J, Yildirim M. Anchorage capacity of short titanium screw implants in the maxilla. An experimental study in the dog. *Clin Oral Impl Res* 1997;8:131–41.

69. Wehrbein H, Merz BR. Aspects of use of endosseous palatal implants in orthodontic therapy. *J Esth Dent* 1998;6:315–24.
70. Wehrbein H, Merz BR, Hämmerle CHF, Lang PN. Bone-to-implant contact of orthodontic implants in humans subjected to horizontal loading. *Clin Oral Implants Res* 1998;9:348–53.
71. Wehrbein H, Merz BR, Diedrich P. Palatal bone support for orthodontic implant anchorage reinforcement. A clinical and radiological study. *Eur J Orthod* 1999;27:65–70.
72. Wehrbein H, Feifel H, Diedrich P. Palatal implant anchorage reinforcement of posterior teeth. A prospective study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999;116:678–86.
73. Wertz RA. Skelettal and dental changes accompanying rapid mid-palatal suture opening. *Am J Orthod* 1970;58:41–66.
74. Wiechmann D, Meyer U, Blüchter U. Success rate of mini- and micro-implants used for orthodontic anchorage. A prospective clinical study. *Clin Oral Implants Res* 2007;18:263–7.
75. Wilke HJ, Claes L, Steinemann S. The influence of various implant surfaces on the interface shear strength between implant and bone. In: Heinke G, Soltesz U, Lee AJC, eds. *Advances in biomaterials*. Amsterdam: Elsevier, 1990.
76. Wilmes B, Rademacher C, Olthoff G, Drescher D. Parameters affecting primary stability of orthodontic mini-implants. *J Orofac Orthop* 2006;67:162–74.

Correspondence Address

Univ.- Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Heiner Wehrbein
Department of Orthodontics
Johannes Gutenberg University Hospital
Augustusplatz 2
55131 Mainz
Germany
Phone: (+49/6131) 17-3024, Fax -5569
e-mail: wehrbein@kieferortho.klinik.uni-mainz.de