Zeitschrift: Bulletin der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften = Bulletin de l'Académie suisse des sciences médicales = Bollettino dell' Accademia svizzera delle scienze mediche

Herausgeber: Schweizerische Akademie der Medizinischen Wissenschaften

Band: 6 (1950)

Heft: 5-6

Artikel: Über die geweblichen Veränderungen bei der Knochentransformation

Autor: Häupl, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-309057

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

D. K. 616.71.018

Zahn- und Kieferklinik der Universität Innsbruck. Vorsteher: Prof. *K. Häupl*

Über die geweblichen Veränderungen bei der Knochentransformation

Von **K. Häupl**

Der erste Autor, der in einer eingehenden Darstellung auf den Zusammenhang zwischen Beanspruchung des Knochengewebes und seiner Struktur hinwies, war der Züricher Anatom *H. Meyer*. In einer 1867 erschienenen Erörterung über die Architektur der Spongiosa zeigte er an einer Reihe von Beispielen am menschlichen Skelett, daß die Elementarteile des Knochens, also die Bälkchen und Plättchen, entsprechend der Beanspruchung geformt sind. Er versah diese Veröffentlichung mit sehr aufschlußreichen Bildern, die er mit Hilfe der graphischen Statik von *K. Cullmann* gewann, und noch heute schmücken solche Bilder die anatomischen Lehr- und Handbücher. Eine Erklärung erfuhren die Beobachtungen *H. Meyers* erst durch *W. Roux*' Entdeckung der formativen und formgestaltenden Wirkung der funktionellen Reize im Jahre 1883 anläßlich seiner Untersuchungen über den Bau der Schwanzflosse des Delphins. *W. Roux* zeigte in dieser Schrift, daß der funktionelle Reiz auf den Teilungsapparat der Zelle wirkt, Zellteilung und Gewebebildung auslöst und daß das so entstehende Gewebe sich entsprechend der funktionellen Beanspruchung formt. Ein weiterer wichtiger Beitrag zur Frage des funktionellen Aufbaues des Knochengewebes wurde von *J. Wolff* geliefert, der in seinem 1892 erschienenen Werk «Das Gesetz der Transformation der Knochen» zeigte, daß nicht nur unter physiologischen Verhältnissen, sondern auch unter krankhaften die Knochenstruktur der funktionellen Beanspruchung angepaßt ist, ja sein muß. Die Anpassung erstreckt sich nicht nur auf den groben, makroskopischen Aufbau, sondern auch auf den feingeweblichen Aufbau. In diesem Werk kann aber *J. Wolff* noch nicht die Veränderungen schildern, die im Knochen vor sich gehen, wenn sich nach einer Änderung der funktionellen Beanspruchung das Knochengewebe umbaut und sich so der neuen Beanspruchung anpaßt. Er stellt die Lösung dieser Frage künftigen histologischen Untersuchungen anheim.

Ich bin nun in der Lage, Ihnen heute ein histologisches Material vorzulegen, das uns einen Einblick in die Vorgänge im Knochengewebe ermöglicht, die sich bei einem funktionellen Umbau daselbst abspielen. Es gibt uns Aufschluß darüber, wie sich die Grundsubstanz verhält und wie die Osteocyten, ferner welche Veränderungen das Markgewebe durchmacht, wie An- und Abbauvorgänge ausgelöst werden und wie sie sich gegenseitig ablösen. Es sei schon an dieser Stelle mitgeteilt, daß der funktionelle Reiz nicht nur die Anbauvorgänge auslöst und steuert, sondern auch, allerdings indirekt, die Abbauvorgänge, und daß er so Einfluß nimmt auf eine zweckmäßige räumliche Verteilung dieser beiden die Knochenstruktur gestaltenden Vorgänge. Nur bei dieser Sachlage ist es möglich, daß ein der geänderten funktionellen Beanspruchung angepaßtes Knochengewebe entstehen kann. Das Ihnen vorgelegte histologische Material gewann ich anläßlich meiner Untersuchungen über die Auswirkung funktionsorthopädischer Apparate auf den paradentalen Knochen. Gestatten Sie mir nur ganz kurz zum Verständnis der weiteren Ausführungen notwendige Einschaltungen.

Unter Funktionsorthopädie versteht man eine therapeutische Richtung, die sich zur Aufgabe stellt, den bei der Behandlung von Stellungs- und Bißfehlern der Zähne notwendigen Knochen- und Gelenksumbau mit Hilfe muskulärer Reize durchzuführen. Zu diesem Zwecke wird ein loser Plattenapparat (Abb. 1) zwischen Ober- und Unterkiefer ein-

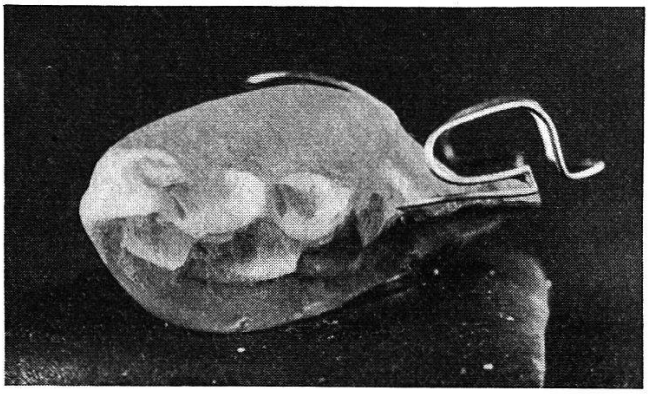

Abb. 1. Plattenapparat für funktionskieferorthopädische Behandlung. Die Platte liegt dem Gaumen und den oberen Seitenzähnen an, die Flügel den unteren Seitenzähnen, der eingebaute Draht den Vorderzähnen. Der Apparat ist erst in bewegtem Zustand wirksam. Die Bewegung wird ausgelöst durch die Tätigkeit der Zungen-, Lippen-, Wangen- und Kaumuskulatur.

gelegt, und zwar im allgemeinen nur nachts. Durch die im Schlaf allfällig erfolgende Tätigkeit der Kau-, Wangen- und vor allem der Zungenmuskulatur wird dieser Apparat bewegt, stößt an die zu bewegenden Zähne an und überträgt so muskuläre Reize über den Zahn auf sein paradentales Gewebe. Es besteht die Möglichkeit, durch entsprechende

Gestaltung eines solchen Plattenapparates die Zähne in jeder Richtung zu bewegen. Die Auswirkung dieser muskulären Reize auf den paradentalen Knochen wird uns ohne weiteres verständlich, wenn wir uns die Befestigung des Zahnes und die Art seiner Beanspruchung vor Augen führen. Der Zahn hängt mit Hilfe der sehnenartigen Faserbündel der Wurzelhaut an einer Knochenröhre, die mit Hilfe abstützender Bälkchen mit der Kieferspongiosa wie auch mit der Spongiosa des benachbarten paradentalen Knochens in Verbindung steht. Bei Beanspruchung des Zahnes, so bei der Kautätigkeit, aber auch beim Anstoßen der Zunge und Wange und auch beim Anstoßen des orthopädischen Apparates gerät der Zahn in Bewegung. Dabei werden örtlich Wurzelhautfasern angespannt, und die Zahnfachwand wird im Bereiche der gespannten Sehnenfasern durchgebogen, aber auch die abstützenden Bälkchen. Nach der Beanspruchung kehren diese Elementarteile des Knochens wieder in ihre Ruhelage zurück. Bei diesem Durchbiegen und Zurückkehren in die Ruhelage wird das anliegende Keimgewebe erschüttert, und diese Erschütterungen sind das Wesen des funktionellen Reizes. Örtlich wird aber auch die Wurzelhaut auf Druck beansprucht, was ebenfalls zu einer Durchbiegung der Knochenplatte und Bälkchen führen kann und zu einer im Prinzip gleichen Erschütterung, also funktionellen Reizung des Keimgewebes Anlaß gibt.

Meinen Untersuchungen über die Wirkungsweise orthopädischer Apparate auf den paradentalen Knochen war der Umstand günstig, daß es Behandlungsfälle gibt, bei welchen das Mißverhältnis zwischen Zahn- und Kiefergröße ein derartiges ist, daß die Entfernung von Zähnen notwendig oder zweckmäßig erscheint, um ein dauerhaftes Ergebnis zu erreichen. Solche Fälle nun wurden mit einem funktionsorthopädischen Apparat 3 Nächte, 7 Nächte usw. bis zu einem Jahr behandelt, und dann wurde der betreffende Zahn mit seinem paradentalen Knochen nach Aufklappung der Schleimhaut mittels einer feinen Gigli-Säge herausgesägt, die Wunde durch Naht versorgt und die Zahnreihe nachträglich durch orthopädische Zahnverschiebung geschlossen. Das Schließen dieser Lücke gelang verhältnismäßig leicht, weil ja der notwendige Knochenabbau bereits besorgt war. Ich gelangte so in den Besitz eines histologischen Materials, das mir den Knochenumbau in allen verschiedenen Stadien aufzeigte. Dazu kam noch, daß es im menschlichen Körper kaum ein Knochengewebe gibt, das so leicht beeinflußbar ist wie das zur Untersuchung herangezogene paradentale. Für derartige Versuche ist der Zahn mit seiner Stützeneinrichtung geradezu geschaffen. Es läßt sich jegliche ins feinste abgestufte Beanspruchung auf die Zähne ausüben und auf den Knochen übertragen. Der paradentale Knochen zeigt

eine auffällig ausgerichtete Struktur, die mit der funktionellen Beanspruchung des Zahnes auf das innigste zusammenhängt. Diese Struktur bildet sich übrigens erst nach dem Zahndurchbruch, während vorher ein rein nachbarliches Verhältnis zwischen Zahnwurzel und Knochen besteht, nicht aber das einer funktionellen Abhängigkeit bzw. funktionellen Prägung.

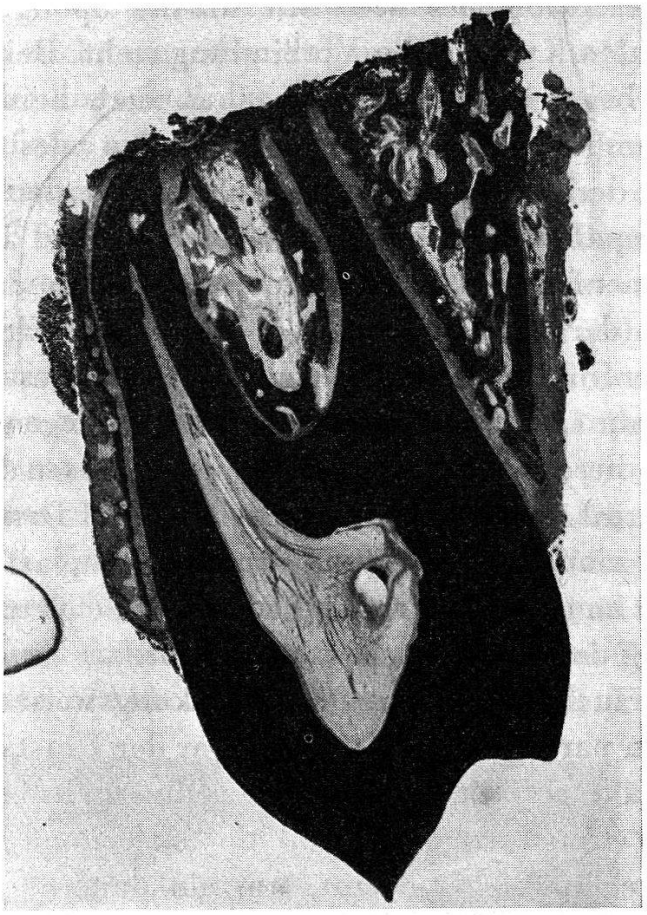

Abb. 2. Übersichtsbild eines Mikrotomschnittes durch den linken oberen ersten Backenzahn mit zugehörigem paradentalem Gewebe. Der Backenzahn gehörte einem 14jährigen Mädchen an und wurde 7 Nächte hindurch der Einwirkung eines funktionsorthopädischen Apparates ausgesetzt. Der Apparat trifft entsprechend der Muskeltätigkeit den Zahn auf der palatinalen Seite, und die einwirkenden Impulse drängten ihn buccalwärts. Dementsprechend ist der palatinale Wurzelhautraum etwas verbreitert, der buccale Wurzelhautraum etwas eingeengt. Die größere Knochenmasse entspricht dem palatinal gelegenen Knochen, die geringere dem buccalen.

Dem mir gesteckten Rahmen Rechnung tragend, muß ich mich darauf beschränken, Ihnen die histologischen Befunde eines solchen Falles vorzutragen, und zwar des Falles, der 7 Nächte den orthopädischen Apparat getragen hat. Auf einem Übersichtsbild (Abb. 2) sei der mit seinem Stützgewebe entfernte Zahn, ein erster oberer Backenzahn, vorgeführt. Es sind die zwei Wurzeln, die buccale und die palatinale wie auch der buccal und palatinal gelegene paradentale Knochen zu sehen, wie auch der zwischen den Wurzeln gelegene Knochen. Der durch Muskeltätigkeit

in Bewegung gesetzte orthopädische Apparat traf dabei die Zahnkronen auf der palatinalen Seite, und die so auf den Zahn einwirkenden Impulse waren buccalwärts gerichtet. Diese Einwirkungen haben bereits zu einer Verlagerung des Zahnes in dem bereits aufgelockerten Wurzelhautgefüge geführt. Es ist die palatinale Wurzelhaut breiter als die buccale. Ich will Ihnen nun einzelne Detailbilder vorführen. So zeigt die Abb. 3

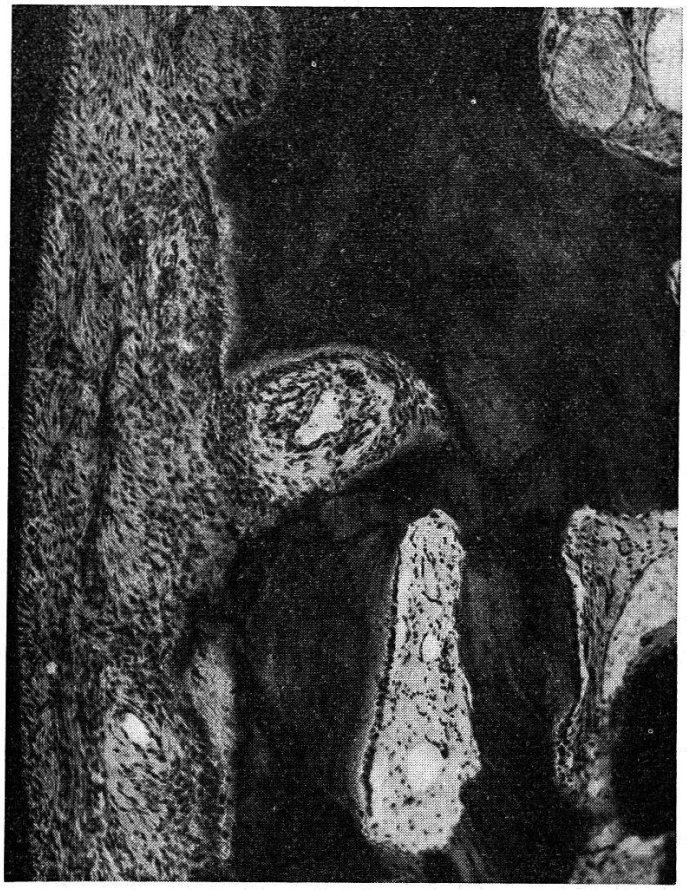

Abb. 3. Detailbild der Abb. 2. Palatinal gelegener Wurzelhautabschnitt mit angrenzender Zahnoberfläche und paradentalem Knochen. Die Wurzelhaut ist zellreich und durch Vermehrung der Gewebeflüssigkeit etwas aufgelockert. An Stelle der Zahnfachwand ist eine Osteoblastenreihe neben einem kalklosen Knochenstreifen zu sehen, der sich auch in die in der Mitte des Bildes befindliche Bucht fortsetzt. Das Fettmark ist in den drei getroffenen Markräumen durch Fasermark ersetzt. Das Fettgewebe ist verschwunden und durch ein zellreiches und sehr saftreiches Fasergewebe ersetzt. Die Gefäße sind hyperämisch erweitert. An der Knochenoberfläche daselbst auch örtlich Osteoblasten neben einem kalklosen Knochenstreifen.

einen beschränkten Abschnitt der palatinalen Wurzelhaut mit angrenzender Zahnoberfläche und palatinalen Knochen. Die Wurzelhaut ist aufgelockert, zell- und saftreich.

Unter dem Einfluß der sich wohl im gesteigerten Ausmaß auswirkenden funktionellen Muskelreize wurde formative Reizung des Wurzelhautmesenchyms verursacht, das mit Zellvermehrung antwortete. Örtlich dürften aber auch die Fibrocyten durch Teilung an der Anhäufung dieser Zellen beteiligt sein. Aber auch das Gefäßsystem blieb nicht unbeein-

flußt. Eine ausgelöste Steigerung der Transsudation führte zu einer Vermehrung der Gewebeflüssigkeit. An der Knochenoberfläche ist ein Osteoblastenbelag neben einem kalklosen Knochenstreifen zu sehen, der sich auch in eine Bucht hin erstreckt. Diese Osteoblasten, die sich vom Knochenrand bis zur Wurzelspitze hin nachweisen lassen, sind auf die unmittelbare Einwirkung funktioneller Reize, die durch die Apparatwirkung vermittelt wurden, zurückzuführen. Das Kind war bereits 14 Jahre alt, der Zahn bereits 4–5 Jahre durchgebrochen und die mit dem Durchbruch einhergehenden Umbauvorgänge längst abgeschlossen.

Von großer Wichtigkeit sind die Markbefunde. Das Fettmark ist durch Fasermark ersetzt. Der örtlich auffällige Zellreichtum ist z. T. auf die gesteigerte Einwirkung funktioneller Reize zurückzuführen, z. T. allerdings handelt es sich um Zellen, die an Stelle der hydropisch und durch die Einlagerung von Eiweißkörnchen im Gewebe geschädigten Fettzellen getreten sind. Auch im Markgewebe hat das Gefäßsystem auf die durch Apparatwirkung gegebene Veränderung der funktionellen Inanspruchnahme reagiert, was durch die Weite der venösen Gefäße, also durch Vermehrung der Gewebeflüssigkeit, dargetan ist. Eine gesteigerte Transsudation hat zur Vermehrung der Gewebeflüssigkeit Anlaß gegeben und ferner auch zu einer hydropischen Schädigung der Fettzellen, welche dabei zugrunde gingen und durch Bindegewebezellen ersetzt wurden. Dieses Geschehen ist in Parallele zu bringen mit den von *Recklinghausen* und *G. Pommer* beschriebenen und als Phlegmasie bezeichneten Markveränderungen, die sich sowohl im Rahmen physiologischen Wachstums als auch unter den Bedingungen der verschiedenartigsten Knochenerkrankungen nachweisen lassen. Zu ihrer Erklärung ist auf die Tatsache hinzuweisen, daß das Markgewebe in die starren, unnachgiebigen Wände, wie sie durch die Knochenbalken dargestellt werden, eingeschlossen ist. Ferner ist das Markgewebe arm an Lymphgefäßen, und der Blutumlauf in den venösen Gefäßen ist, worauf schon ihre Dünnwandigkeit hinweist, ein langsamer. Auf erstere Tatsache wurde bereits von *Arnold*, *Budge* und *Schwalbe* hingewiesen, auf letztere von *C. Langer*. Bei der Anreicherung der Gewebeflüssigkeit kann das Knochenmark nicht wie das übrige Weichgewebe sein Volumen diesen Zuständen anpassen, da die Knochenwände nicht nachgiebig sind. Es kommt aus diesem Grunde schon frühzeitig zu einer hydrophischen Gewebeschädigung.

Betreffs des Ersatzes des Fettmarkes durch Fasermark ist noch zu bemerken, daß das Knochenmark ungünstig gestellt ist, wenn es gilt, vermehrte Gewebeflüssigkeit wegzuschaffen, was einerseits durch die Lymphgefäße und anderseits durch die venösen Gefäße geschieht.

Erstere sind ja, wie oben erwähnt, in geringer Zahl vorhanden, und in letzteren ist die Zirkulation langsamer. Des weiteren verlaufen die abführenden Venen durch die engen Volkmannschen und Haversschen Kanäle. In diesem Bereiche kann es deshalb leicht zu einer Abflußbehinderung und somit zu einer Flüssigkeitsstauung kommen, was sich auch an einschlägigen, häufig erhobenen Befunden kundtut. Örtlich lassen sich dann auch noch ausgetretene rote Blutkörperchen nachweisen, deren Zerfallsprodukte ebenfalls Reizkörper darstellen. Im Zusammenwirken von gesteigerten funktionellen Reizen, hydropischen Schädigungen und Reizeinwirkungen seitens zugrunde gehender Zellen wird dann allmählich das Fettgewebe durch Fasermark ersetzt.

Die Folgewirkungen dieses Knochenumbaues werden uns klar auf dem nächsten Bild, welches einen Wurzelhautabschnitt auf der buccalen Seite mit angrenzendem Zahn- und Knochengewebe veranschaulicht. In dieser Abb. 4 ist die bereits auf Abb. 2 auffällige Einengung zu sehen. Die Wurzelhaut ist weitgehend aufgelockert. An Stelle der Wurzelhautsehnen ist ein zellreiches und faserarmes Gewebe getreten. Beide Umstände, sowohl die Zellvermehrung wie auch die Vermehrung der Gewebeflüssigkeit, für die ich die Erklärung bereits oben abgegeben habe, führen zu einer Steigerung des Blut- und Gewebedruckes. Damit sind nach *Köllicker* und *G. Pommer* die Bedingungen für die osteoklastische Knochenresorption gegeben. Wir finden demnach die Zahnfachwand auf der Wurzelhautseite von einer Resorptionslinie eingenommen, die zahlreiche Howshipsche Lakunen aufweist, in denen ein- oder mehrkernige Osteoklasten liegen. Durch die Zellvermehrung wie auch Vermehrung der Gewebeflüssigkeit stieg also der Blut- und Gewebedruck im Bereich der Wurzelhaut an. Ein weiteres Moment, welches das Ansteigen des Gewebedruckes begünstigt, war die Einengung der Wurzelhaut, auf die ich schon bei Erklärung der Abb. 2 hingewiesen habe. An der Knochenoberfläche wuchernde Zellen nehmen unter diesen Bedingungen osteoklastische Funktion an und bilden Kohlensäure in statu nascendi, welche örtlich die Erdsalze im Knochen auflöst, wie auch Fermente, welche die organische Substanz abbauen.

Die in Abb. 4 getroffenen Markräume zeigen ebenfalls die auf Abb. 3 vorgeführten Veränderungen, Abänderung des Fettmarkes in Fasermark. Das Fettgewebe ist durch ein zellreiches, faserarmes, ödematös durchtränktes Gewebe ersetzt, in dem weite, gestaute Venen auffällig sind. Die Genese dieser Veränderungen habe ich eben erklärt, wie auch die Ätiologie. Diese ist in diesem Fall die Einwirkung gesteigerter funktioneller mechanischer Reizeinwirkungen. Im Zusammenhang mit diesen Phlegmasieveränderungen kam es zu einer

Blut- und Gewebedruckerhöhung, die zur Entstehung der Osteoklasten führte, welche in beiden Markräumen zu sehen sind. Im oberen Markraum liegen sie vor allem im Bereiche einer Einengung. Die Markraumenge begünstigte die Entstehung der Blut- und Gewebedruckerhöhung und somit auch die Entstehung von Osteoklasten. Die ihnen gegenüberliegende Zahnfachwand zeigt sowohl im oberen wie im unteren Markraum einen osteoblastischen Zellbelag neben einem Streifen neu gebildeten Knochengewebes.

Es ist nun die für die Erklärung der Knochentransformation grund-

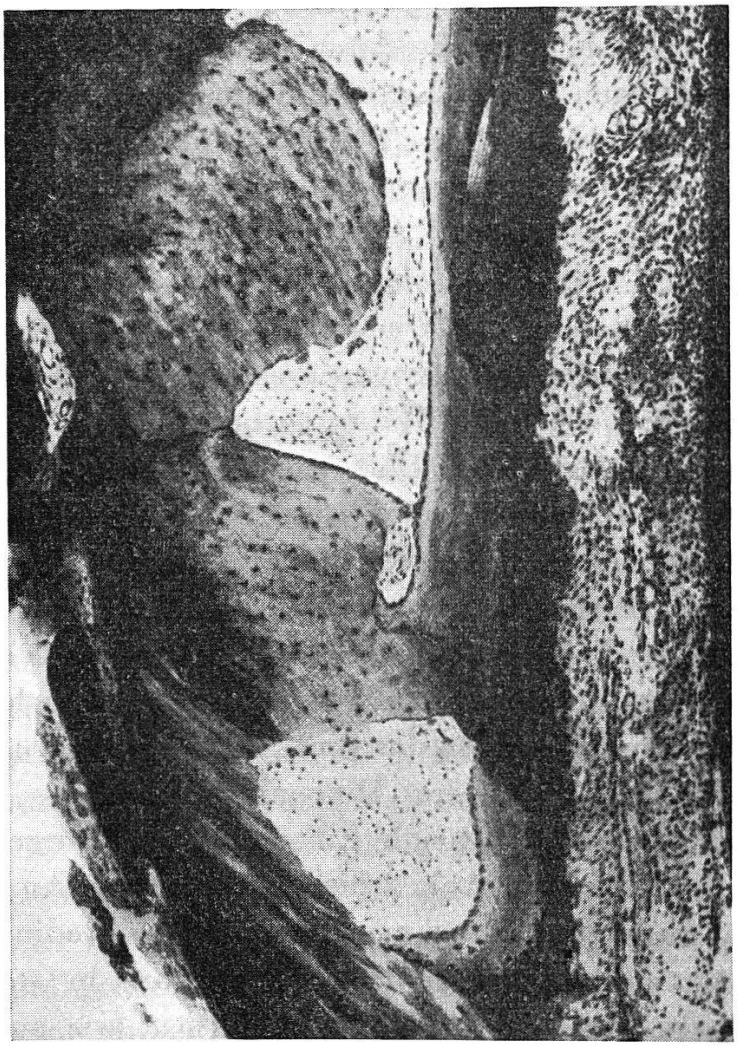

Abb. 4. Detailbild der Abb. 2. Begrenzter buccal gelegener Wurzelhautabschnitt mit angrenzender Zahnoberfläche und paradentalem Knochengewebe. Der Periodontalraumabschnitt ist eingeengt (vgl. Abb. 2). Das Wurzelhautgewebe ist sehr zell- und saftreich. Die Faserbündelstruktur ist nur mehr örtlich angedeutet. Die Knochenoberfläche wird von einer Resorptionslinie eingenommen, in deren Howshipschen Lakunen ein- bis mehrkernige osteoklastische Zellgebilde liegen. Auf der Markraumseite ist ein osteoblastischer Zellbelag neben einem kalklosen Knochenstreifen. Gegenüber diesen Osteoblasten liegen Osteoklasten, die etwas abgehoben erscheinen. Das Markgewebe zeigt in beiden Markräumen Fasermarkbildung. Das Markgewebe ist sehr zell- und vor allem saftreich, und die Gefäße sind hyperämisch erweitert. Von Fettzellen ist nichts mehr zu sehen. Es hat bereits ein Knochenumbau eingesetzt, der die angestrebte Buccalbewegung des Zahnes ermöglicht.

legende Frage zu erörtern, wieso es denn komme, daß in ein und demselben Markraum in örtlicher Nähe einerseits Osteoblasten, anderseits Osteoklasten zu finden sind, obwohl die Entstehung der An- und Abbauzellen verschiedene Reizeinwirkung zur Voraussetzung haben. Die Erklärung ist in dem Umstand zu suchen, daß das Mesenchym an der Markraumseite der Zahnfachwand unter dem unmittelbaren Einfluß der gesteigerten funktionell-mechanischen Reize steht. Durch die Durchbiegung der Zahnfachwand wird das anliegende Keimgewebe in hinreichende Erschütterung versetzt, womit der osteoblastische Reiz gegeben ist. Die wuchernden Mesenchymzellen auf der gegenüberliegenden Knochenoberfläche liegen aber unter dem Einfluß der Blut- und Gewebedruckerhöhung, bzw. der damit einhergehenden Behinderung des Wachstums und der Entfaltung von Zellen, also unter dem Einfluß des osteoklastischen Reizes. Die Differenzierung der Zelle hängt davon ab, welcher der Reize örtlich vorherrscht, der osteoblastische oder der osteoklastische, bzw. welcher der Reize den anderen übertönt. Beide sind aber letzten Endes auf gesteigerte funktionelle Einflußnahme zurückzuführen. Diese Steigerung der funktionellen Inanspruchnahme erzeugt unmittelbar die Osteoblasten, während die Osteoklasten mittelbar auf dem Umwege der Blut- und Gewebedruckerhöhung entstehen. Daß sie auch nebeneinander in örtlicher Nachbarschaft zu finden sind, legt die Auffassung nahe, daß bereits differenzierte Zellen, also die Osteoblasten, gegenüber dem Ansteigen des Blut- und Gewebedruckes mehr Widerstand leisten und erst verhältnismäßig später bei weiterem Ansteigen des Blut- und Gewebedruckes zu Osteoklasten werden. Daß sie das tun, geht unzweifelhaft aus der Tatsache hervor, daß bei dem drei Tage behandelten Fall nicht nur auf der Markraumseite, sondern auch auf der Wurzelhautseite der Zahnfachwand osteoblastische Zellbeläge nachzuweisen waren. Die osteoblastischen Zellbeläge auf der Wurzelhautseite wurden im Laufe von 8 Tagen zum größten Teil durch Osteoklasten ersetzt, und es ist wohl anzunehmen, daß die Osteoblasten selbst zu Osteoklasten geworden sind.

Aus dem bis jetzt Gesagten geht also hervor, daß die im Rahmen der Knochentransformation auftretenden Knochenumbauvorgänge wie auch die sie begleitende Fasermarkbildung auf die Einwirkung gesteigerter funktioneller Reize zurückzuführen sind. Durch die oben genannten Veränderungen steigt im Bereich des in starre Wände eingeschlossenen Markgewebes der Blut- und Gewebedruck an und löst örtlich osteoklastische Resorption aus, und zwar im Bereich besonders lebhafter Gewebsbildung und auffällig entwickelter Zirkulationsveränderungen. In der Nachbarschaft der Osteoklasten finden sich ja immer lebhafte Ge-

webebildung, Zirkulationsveränderungen und Vermehrung der Gewebeflüssigkeit. So nimmt der funktionelle Reiz Einfluß auf Knochenanbau direkt, auf Knochenabbau indirekt, aber auch auf eine zweckmäßige örtliche Verteilung der An- und Abbauvorgänge. Bei einem solchen Sachverhalt kann im Rahmen der Knochentransformation eine der neuen Beanspruchung genau angepaßte Struktur entstehen; ja sie muß entstehen. Denn solange eine Disharmonie, also eine mangelhafte Anpassung an die Funktion, im Knochengefüge besteht, wirkt sich die Funktion als formativer Reiz aus. Erst eine angepaßte Struktur ist so widerstandsfähig geworden, daß die funktionellen Erschütterungen unterschwellig werden. Der Knochenumbau ist dann abgeschlossen.

Ich kann mir nicht versagen, in diesem Rahmen kurz auf gemeinsam mit *Eschler* durchgeführte Untersuchungen hinzuweisen, die die Aufgabe hatten, zu zeigen, daß nur der Muskelreiz Knochenumbau zu bewerkstelligen vermag, nicht aber der Dauerdruck oder Dauerzug eines elastischen Drahtes oder Gummizuges, wie er in der älteren Orthodontie zur Zahnbewegung verwendet wurde. Um diese Tatsache zu beweisen, wurden bei Hunden an der Schädelbasis die motorischen Nerven des Kauorgans, so die Nn. trigemini III, die Nn. hypoglossi und die Nn. faciales durchschnitten und so eine völlige Lähmung der Muskulatur des Kauapparates erzeugt. An diesen Hunden wurden orthopädische Apparate angelegt, mit deren Hilfe Zugeinwirkungen auf die Zähne ausgeübt wurden. Wie wir aus anderen einschlägigen Untersuchungen wissen, treten bei Erhaltensein der muskulären Reize bereits nach 27 Stunden Umbauvorgänge auf. In unserem Untersuchungsmaterial hingegen, das 50 Stunden der Einwirkung dieser künstlichen Kräfte ausgesetzt wurde, war von irgendwelchen Umbauvorgängen nichts zu sehen, wie auf Abb. 5 veranschaulicht ist. Die Sehnenbündel überspannen die Wurzelhaut; an der Knochenoberfläche herrscht Ruhe, die Markräume sind mit Fettmark gefüllt. Nirgends ist Knochenan- oder -abbau zu sehen, wie auch kein Ansatz zur Fasermarkbildung. Um diese Untersuchungen zu vervollständigen, wurden bei einem weiteren Hund die obengenannten Nerven durchgeschnitten und die Zähne stündlich mit Holzstäbchen bewegt. Dadurch wurden 50 Stunden hindurch Muskelreize zugeführt, deren Quelle allerdings die Tätigkeit der Muskulatur der betreffenden Extremität waren. Dann wurde das Tier getötet. Ein histologisches Bild aus diesem Untersuchungsgut veranschaulicht Abb. 6. Die Wurzelhaut ist hochgradig durch die Vermehrung der Gewebeflüssigkeit aufgelockert. Weiterhin sind die Zellen vermehrt, die Fasern spärlich, an der Knochenoberfläche ist ein Osteoblastenbelag neben einem kalklosen Saum zu sehen. Mit diesen Untersuchungen war

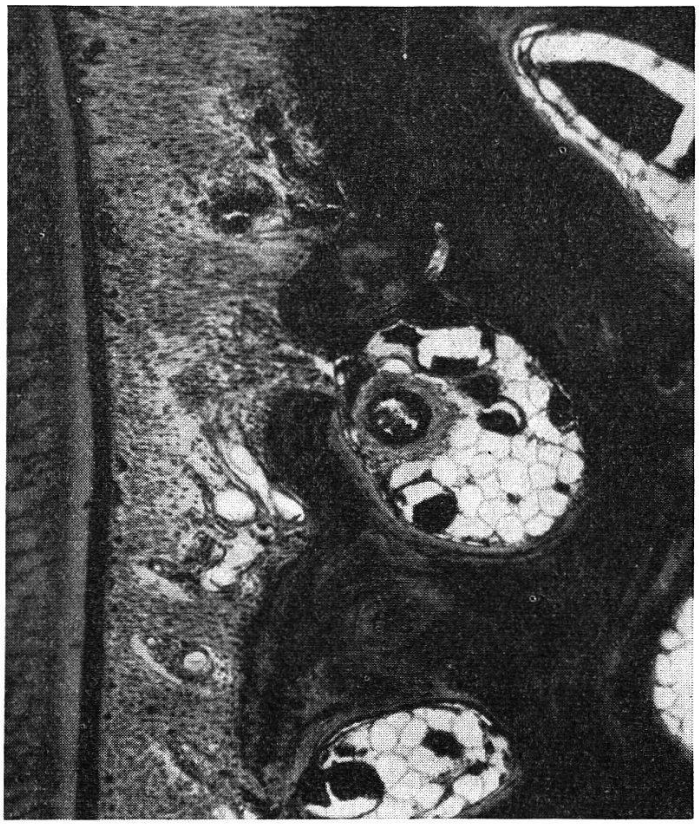

Abb. 5. Begrenzter buccal gelegener Periodontalraumabschnitt mit angrenzendem Zahn- und Knochengewebe, von einem Hund stammend. Bei diesem Hund wurden zur Ausschaltung der Muskulatur des Kauapparates die Nn. faciales, trigemini III und hypoglossi durchschnitten. Der Zahn war 50 Stunden der Einwirkung eines elastischen Drahtes ausgesetzt. Die Wurzelhautbündel sind angespannt. Weder an der Knochenoberfläche im Bereich der Wurzelhaut noch in den Markräumen sind auf Umbau zu beziehende Befunde zu erheben. Überall herrscht Ruhe.

also der Beweis erbracht, daß nur die Muskelreize Knochenumbau auslösen. Diese muskulären Reize sind ja auch bei Verwendung von Zug- und Druckkräften als orthodontische Maßnahmen immer vorhanden. Es wird ja auf Zähne gebissen, und Wange, Lippe und Zunge berühren sie. Diese Muskelreize sind die eigentlichen Umbaureize, während die rein mechanischen Reize den muskulären aufgepfropft sind und diese verstärken und die Zahnbewegungen steuern. Gleiches gilt auch für andere orthopädische Apparate, die mit Hilfe von Druck- und Zugeinwirkungen das Knochengewebe beeinflussen.

Diese hier vorgeführten Untersuchungen erlauben also einen Einblick in das mikroskopische Geschehen während der Knochentransformation. Sie unterrichten uns über das Entstehen der einzelnen Zellformen wie auch über die einzelnen Gewebeveränderungen, über die ursächlichen Entstehungsbedingungen und über die gegenseitige Einflußnahme.

Das Wesentliche, worauf ich am Schlusse meiner Ausführungen noch einmal hinweise, liegt darin, daß der abgeänderte funktionelle Reiz sowohl die Osteoblasten wie auch die Osteoklasten auf den Plan ruft,

Abb. 6. Begrenzter Periodontalraumabschnitt mit angrenzender Zahnoberfläche und Knochengewebe, von einem Hunde stammend. Auch bei diesem Hund wurden zur Ausschaltung der Muskulatur des Kauapparates die Nn. faciales, trigemini III und hypoglossi durchschnitten. Der Zahn wurde stündlich 50 Stunden hindurch mit einem Holzstäbchen bewegt und so dem paradentalen Gewebe muskuläre Umbaureize zugeführt. Die Wurzelhaut ist zellreich und infolge der Vermehrung von Gewebsflüssigkeit aufgelockert. An der Zahnoberfläche ist ein Zementoblastenbelag über einem Streifen neugebildeten Zementgewebes. Die Markräume zeigen Fasermarkentwicklung. Das Fettmark ist durch Fasermark ersetzt. Letzteres ist zell- und saftreich, und die Gefäße sind hyperämisch erweitert. An der Knochenoberfläche ist ein Osteoblasten belag neben einem unverkalkten Knochenstreifen.

erstere direkt, letztere indirekt, über den Umweg von Blut- und Gewebedruckerhöhung. Die abgeänderten Reize nehmen aber auch Einfluß auf eine zweckmäßige Verteilung von An- und Abbauvorgängen. Diese halten so lange an, bis eine Knochenstruktur entstanden ist, die der abgeänderten funktionellen Inanspruchnahme hinlänglich Widerstand leistet, so daß die bei der funktionellen Inanspruchnahme auftretenden Erschütterungen des Mesenchyms nicht mehr formativ wirken. Erst dann ist eine der geänderten funktionellen Inanspruchnahme angepaßte neue Knochenstruktur entstanden, und diese bleibt so lange bestehen, bis wiederum Funktionsveränderungen zur Gewebeumbildung Anlaß geben.

Der funktionelle Reiz also ist es, der in der funktionellen Lebensperiode die Knochenstruktur schafft und erhält. Fällt er weg, stellen sich Zirkulationsveränderungen ein und somit Stauung des venösen

Blutes mit Anreicherung der Kohlensäure, was zu ausgedehnten Abbauvorgängen Anlaß gibt, wie *Nasse* nach Nervendurchschneidung an Extremitätenknochen gezeigt hat. Ähnliche Gewebebilder lassen sich auch bei der durch Inaktivität bzw. mangelnde Aktivität verursachten Atrophie im Knochen erheben. Die Erbanlage bzw. Konstitution äußert sich in der Art und Weise, wie das Mesenchym auf An- und Abbaureiz reagiert. Diese Reaktionsbereitschaft der Zellen ist wohl durch alle Umstände beeinflußbar, welche überhaupt auf das Zelleben einzuwirken vermögen, so u. a. auch durch Zufuhr von Hormonen und chemischen Stoffen. Die Knochenbälkchen können als insubstantiertes Mesenchym aufgefaßt werden, das in den Kraftlinien liegt, in denen sich die osteoblastischen Reizeinwirkungen an Druck, Zug und Erschütterung im besonderen bemerkbar machen. Unter allen Umständen erscheint es berechtigt, diese Sachlage mit einem Dichterwort zu kennzeichnen:

«Es ist der Geist, der sich den Körper baut.»

In diesem Zusammenhang wird der «Geist», das Schöpferische, durch den funktionellen Reiz dargestellt.

Das Mikroskop aber erlaubt einen Einblick in die Vorgänge, die sich in diesem Bereich des Organismus abspielen. Es unterrrichtet uns über Werden und Vergehen der Zellen, über ihre Tätigkeit und Endschicksale, über die gegenseitige Einflußnahme wie auch über die Aufgabe, die dem Gefäßsystem zufällt. So gelingt es, eine Vorstellung über die geweblichen Veränderungen zu gewinnen, die nach Veränderung der Funktion zu neuer Gestalt führen.

«Was kann der Mensch im Leben mehr gewinnen,
Als daß sich Gott Natur ihm offenbare,
Wie sie das Feste läßt zu Geist verrinnen,
Wie das *Geist*-erzeugte fest bewahre.»

Zusammenfassung

In einer «Die Architektur der Spongiosa» betitelten, im Jahre 1867 erschienenen Untersuchung zeigte der Zürcher Anatom *H. Meyer*, daß das Knochengerüst in seinem Aufbau der funktionellen Beanspruchung angepaßt ist. 1892 erschien eine umfangreiche Monographie von *J. Wolff*, «Das Gesetz der Transformation der Knochen», in welcher an einer großen Anzahl von Beispielen gezeigt wurde, daß auch die nach krankhaften Veränderungen neu entstandene Struktur der funktionellen Inanspruchnahme entspricht. Hingegen fehlte bis jetzt eine eingehende Untersuchung darüber, welche Veränderungen sich im Knochengewebe nach einer Abänderung der Funktion einstellen und wie diese eine neue

funktionelle Gestalt schaffen. Im Rahmen von Untersuchungen, welche die Auswirkungen der passiven kieferorthopädischen Plattenapparate auf den paradentalen Knochen betreffen, gelang es, ein histologisches Material zu gewinnen, welches einen Einblick in diese Vorgänge erlaubt. Diese losen Plattenapparate übertragen die durch die Tätigkeit der Kau-, Zungen-, Wangenmuskulatur entstandenen Muskelreize auf den paradentalen Knochen und lösen daselbst Knochenumbau aus. Der funktionell bedingte Knochenumbau beginnt mit Gewebeneubildung im Bereiche der Weichgewebe und an der Knochenoberfläche, wie auch mit einer gleichzeitig einsetzenden Hyperämie der Gefäße. Letztere verursacht eine gesteigerte Transsudation, eine Anreicherung der Gewebeflüssigkeit und so eine hydropische Reizung des Knochenmarkgewebes, welches daraufhin mit Untergang der Fettzellen und Neubildung von Bindegewebezellen und Fasern antwortet. Alle diese Geschehen führen zu einer Steigerung des Blut- und Gewebedruckes und veranlassen so die Ausbildung von Osteoklasten, die vielfach auch durch den Funktionswechsel aus Osteoblasten entstehen. So nimmt der funktionelle Reiz auf beide Geschehen, welche die Entstehung einer neuen Knochensubstanz veranlassen, auf Knochenan- und -abbau, Einfluß. Unter ständigem Wechsel der eben geschilderten Knochenan- und -abbauvorgänge entsteht eine neue funktionelle Knochenstruktur.

Résumé

L'anatomiste zurichois *H. Meyer* avait déjà montré en 1867, dans son ouvrage «Die Architektur der Spongiosa», que la structure osseuse montrait une adaptation structurelle aux nécessités fonctionnelles. En 1892 apparut une importante monographie de *J. Wolff*, «Das Gesetz der Transformation der Knochen», dans laquelle l'auteur démontrait à l'aide de nombreux exemples que la nouvelle structure qui se forme après des altérations morbides correspond cependant toujours aux nécessités fonctionnelles. Par contre, on n'a pas examiné jusqu'aujourd'hui quelles modifications interviennent dans la structure osseuse lorsque l'on modifie la fonction, ni quelle forme correspond à cette nouvelle fonction. Il nous a été possible d'appréhender cet aspect du problème en étudiant par la biopsie les modifications apportées au tissu osseux paradental par l'emploi de prothèses à plaque. Ces prothèses transmettent au niveau de la mâchoire des excitations musculaires sous l'action de la musculature masticatoire de la langue et des joues, et amènent une modification structurelle de l'os. Cette modification d'origine fonctionnelle commence par une néoformation dans les parties molles et la surface osseuse avec en même temps une hyperémie des vaisseaux sanguins. Cette dernière

cause une augmentation de la transsudation et de la quantité de liquide cellulaire, et provoque par cela une excitation hydropique de la moelle osseuse qui réagit par destruction des cellules graisseuses et formation de cellules conjonctives. Ces processus augmentent la pression sanguine et cellulaire et exaltent l'activité des ostéoclastes, qui se développent des ostéoblastes par altération fonctionnelle. C'est ainsi que l'excitation fonctionnelle agit en même temps sur les deux processus régissant la fabrication de l'os, c'est-à-dire la résorption et la formation osseuse. C'est par un jeu continuel de ces deux méchanismes que l'on voit apparaître une structure osseuse nouvelle adaptée à la fonction.

Riassunto

L'anatomo zurighese *H. Meyer* in un suo lavoro apparso nel 1867, dal titolo «Die Architektur der Spongiosa», mostrava come l'architettura delle ossa fosse adattata alla loro funzione. Nel 1892, *J. Wolff* pubblicava una estesa monografia sulla «Das Gesetz der Transformation der Knochen», nella quale esponeva con molteplici esempi che pure la struttura ossea, formatasi dopo fatti patologici, era espressione dello stimolo funzionale.

Finora però nessuna ricerca è stata fatta sulle modificazioni del tessuto osseo provocate da nuovi impulsi funzionali e come quest'ultimi sono capaci di creare nuove forme architettoniche.

Queste ricerche furono ora eseguite su preparati istologici, ottenuti nel quadro di esperimenti che si erano prefissi come scopo la determinazione dell'effetto degli apparecchi ortopedici funzionali passivi sullo strato osseo paradentale.

Questi apparecchi non essendo fissi, trasmettono l'energia delle contrazioni dei muscoli della masticazione, della guancia e della lingua sugli strati paradentali e ne provocano la trasformazione architettonica.

Le fasi iniziali di questa trasformazione sono caratterizzate dall'insorgere di un nuovo tessuto nelle parti molli e negli strati superficiali dell'osso, e concomitante iperemia dei vasi. L'iperemia causa un'aumentata transudazione con arrichimento di liquido interstiziale, quindi uno stimolo idropico sul tessuto midollare con susseguente necrobiosi delle cellule midollari grasse e neoformazione di cellule e fibre connettivali.

Tutti questi fenomeni, aumentando la pressione nei vasi e nel tessuto, provocano la formazione di osteoclasti, sovente derivanti da un cambio funzionale degli osteoblasti. Lo stimolo funzionale, agendo così sui processi tessigeni di neoformazione, dà origine ad un nuovo tessuto osseo, il cui aspetto definitivo sarà una nuova struttura funzionale.

Summary

In an investigation published in 1867 entitled «Die Architektur der Spongiosa» ("The Architecture of the Spongiosa") the Zurich anatomist *H. Meyer* showed that the skeleton is adapted in its construction to functional requirements. In 1892, a comprehensive monograph by *J. Wolff* was published, «Das Gesetz der Transformation der Knochen» ("The Law of the Transformation of Bones"), in which it was demonstrated in a great number of examples that the structure which develops after changes due to disease also corresponds to functional demands. On the other hand, a detailed investigation of the changes which take place in the bone tissue after a modification of function and how they create a new functional form has been lacking up to now. Within the scope of investigations which concerned the effects of passive, jaw-orthopedic plate appliances on the paradental bone it was possible to obtain histological material which permits insight into these processes. These loose plate appliances transfer muscular stimuli arising through the activity of the masticatory, tongue and cheek musculature to the paradental bone and there elicit modification of the bone structure. The functionally conditioned modification of the bone structure begins with the new formation of tissue in the area of the soft tissue and on the surface of the bone, and also with hyperemia of the vessels, seeting in at the same time. The latter causes heightened transsudation, a concentration of tissue fluid and thus a hydropexic stimulation of the bone marrow tissue which responds with the destruction of fat cells and the new production of connective tissue cells and fibres. All these occurrences lead to an increase in blood and tissue pressure and so cause the formation of osteoclasts which frequently arise of the osteoblasts through the change in function. Thus, the functional stimulus exerts influence on both processes which bring about the origination of a new bone substance, on bone construction and bone destruction. Under constant alternation of the processes of bone construction and destruction just described, a new functional bone structure arises.