

# Biologische Mediatoren zur Steuerung kieferorthopädischer Zahnbewegung

KN Fortsetzung von Seite 1

des PDL.<sup>1</sup> Frühere Studien<sup>2-4</sup> legen nahe, dass, wenn die Geschwindigkeit der kieferorthopädischen Zahnbewegung gegen die Zeit aufgezeichnet wurde, es insgesamt vier Phasen gibt. Doch was sind die zellularen und molekularen Veränderungen in jeder dieser Phasen?

## Erste Phase

Die erste Phase dauert 24 Stunden bis zwei Tage und beschreibt die Initialbewegung des Zahns innerhalb des Knochenlagers. Zelluläre und molekulare Reaktionen treten dabei sofort nach Krafteinwirkung auf. Der Druck und die Spannung an den PDL-Zellen zwingen diese dazu, Proteine wie Zytokine zu produzieren. Diese starten den komplexen Prozess der Rekrutierung von Osteoklasten- (OC) und Osteoblasten- (OB) Vorläufern.

ANZEIGE

## Zweite Phase

Kompressionsbereiche können anhand der Distorsion einer normalen PDL-Faseranordnung erkannt werden. Die Unterbrechung des Blutflusses lässt hyalinisierte Bereiche entstehen und resultiert in einem Stillstand der kieferorthopädischen Zahnbewegung von vier bis 30 Tagen. Dieser Prozess verlangt die Rekrutierung von Makrophagen und

Osteoklasten (OC) des umgebenden, unbeschädigten Parodontalbereiches. Nur die Entfernung nekrotisierten Gewebes und unterminierender Knochenresorption wird die Wiederaufnahme einer kieferorthopädischen Zahnbewegung ermöglichen. Gleichzeitig vergrößern sich ruhende Osteoblasten (OB) in den PDL-Spannungsregionen und beginnen mit der Produktion neuer Knochenmatrix.

## Dritte und vierte Phase

Die dritte und vierte Phase sind als Beschleunigungs- und Linearphase bekannt und beginnen jeweils ca. 30 Tage nach der ersten Krafteinwirkung. Sie beschreiben den größten Anteil der kieferorthopädischen Zahnbewegung. Wie können wir jedoch die kieferorthopädische Zahnbewegung beschleunigen oder verringern? Um diese Frage zu beantworten, müssen wir wissen, wie der Knochenumbau verläuft und die Rolle der Osteoklasten, Osteoblasten und Osteozyten während der kieferorthopädischen Zahnbewegung kennen.

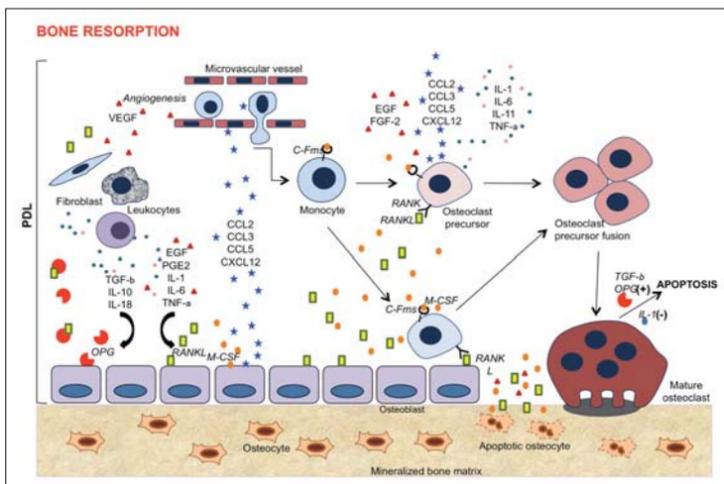
## Osteoklasten

Wollen wir die kieferorthopädische Zahnbewegung beschleunigen, ist der erste Schritt dazu das Auftreten von Osteoklasten in den Bereichen der Knochenresorption (Bone Resorption, BR). Im parodontalen Ligament treten so gut wie keine ausgereiften Osteoklasten in physiologischer Kondition auf. Dennoch erscheinen, wenn eine Kraft appliziert wird, binnen weniger Tage Osteoklasten, welche ihr höchstes Level nach 50 Stunden erreichen.<sup>5</sup> In Studien wird berichtet, dass Prä-Osteoklasten das parodontale Ligament von den blutbildenden Organen aus über den Blutkreislauf sowie über alveoläre Knochenmarkskavitäten erreichen.<sup>6,7</sup>

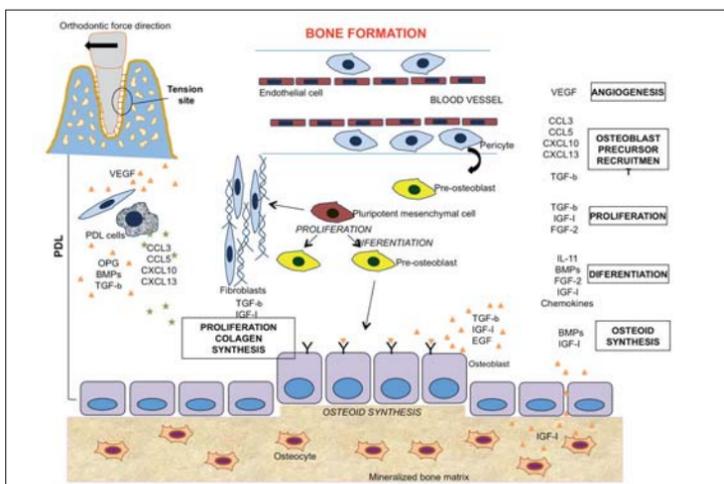
Die Osteoklastogenese wird durch Ablauf verschiedener Prozesse erreicht (Abb. 2):<sup>7</sup> Stammzellteilung und Osteoklasten-Vorläufer-Proliferation in den blutbildenden Geweben (1), Migration der mononuklearen Osteoklasten-Vorläufer zu den BR-Bereichen (2), Differenzierung in Prä-Osteoklasten, welche durch zelluläre Wechselwirkung (cell-to-cell interaction) mit den Osteoblasten geführt werden (3), Fusion zu multinuklearen Osteoklasten (4).

## Osteoblasten

Die Bildung von Knochen entsteht durch komplexe Prozesse. Diese beinhalten die Differenzierung von Osteoblasten-Vorläuferzellen aus mesenchymalen Zellen, die Reifung der Osteoblasten sowie die Bildung einer Matrix, gefolgt von deren Mineralisierung (Abb. 3).<sup>8</sup> Das Initialereig-



**Abb. 2:** In den Kompressionsarealen setzen Fibroblasten, Osteoblasten und andere PDL-Zellen PGE2, IL-1,6,11 und TNF-α unter mechanischer Beanspruchung frei. Zwei dieser Modulatoren, IL-1 und TNF-α, stimulieren die Osteoblasten zur Produktion von Chemokinen wie CCL2, CCL3, CCL5 und CXCL12. Gemeinsam mit RANKL und TNF-α induzieren sie die chemotaktische Rekrutierung von Osteoklasten-Vorläufern an den BR-Arealen, wo diese Zellen in ausgereifte Osteoklasten durch Osteoblasten-Osteoklasten-Kommunikation differenzieren. PGE2 und Zytokine (IL-1,6,8 und TNF-α) regen die Osteoblasten zur Produktion von M-CSF und RANKL an, die sich mit den Rezeptoren c-Fms und RANK verbinden, deren Expression auf den Osteoklasten-Vorläufern stattfindet. Beschädigte Osteozyten sind weiterhin die Quelle von RANKL und M-CSF. Andere Zytokine, GFs und Chemokine können die Osteoklasten-Differenzierung, Überlebensrate und Aktivität verstärken. Dennoch kann die Osteoklastogenese abgeschwächt werden, indem sich Osteoprotegerin an RANKL bindet und die RANK-RANKL-Interaktion verhindert.



**Abb. 3:** Osteoblasten-Differenzierung und Knochenbildung treten in den Tensionsarealen während der kieferorthopädischen Zahnbewegung auf. Gestreckte PDL-Zellen stimulieren die Zellreplikation, indem sie Chemokine, Zytokine und GFs freisetzen. Stammzellen, die von den Wänden der Blutgefäße und mesenchymalen Stammzellen migriert sind, differenzieren in Prä-OBs durch Krafteinwirkung. Die Chemokine CCL3, CCL5, CXCL10, CXCL12 und CXCL13 lösen Rekrutierung, Proliferation, Differenzierung und Überleben der OB-Vorläufer aus. Durch lokale Osteoblasten und Osteozyten findet die Expression von GFs statt, die die Proliferation und Differenzierung von Osteoblasten-Vorläufern sowie die Mineralisierung neuen Knochens durch ausgereifte Osteoblasten fördern. Zusätzlich verstärken BMPs, epidermaler Wachstumsfaktor und IL-11 die Differenzierung und Funktion der Osteoblasten. Durch Osteoblasten und PDL-Fibroblasten wird die Expression von VEGF geregelt, das die Angiogenese stimuliert. In der Zwischenzeit stimulieren TGF-β und insulinartiges GF-1 die Proliferation und Differenzierung von Osteoblasten- und PDL-Zellen sowie die Kollagensynthese.

Den Knochenumbauprozess beeinflussende Faktoren	
<b>Hormone</b>	Polypeptides Parathyroid hormones Calcitonin Insulin Growth hormone Steroid 1,25, dihydroxy vitamin D <sub>3</sub> Glucocorticoids Sex steroids Thyroxid hormones
<b>Wachstumsfaktoren</b>	Insulin-like growth factors I & II Transforming growth factor β Fibroblast growth factor Platelet derived growth factor Connective tissue growth factors
<b>Zytokine</b>	Bone loss Interleukin-1 Interleukin-6 Interleukin-11 Tumor necrosis factor Osteoclast differentiating factor Bone formation Interleukin-4 Interleukin-13 Interleukin-18 Interferon-γ Osteoprotegerin
<b>Kolonie-stimulierende Faktoren</b>	M-CSF G-CSF GM-CSF
<b>Andere</b>	Prostaglandins Leukotriens Nitric oxide

nis in dieser appositionalen Phase stellt die chemische Affinität der Osteoblasten oder ihrer Vorläufer zum Ort der Knochenformation zur Bildung von Knochenmatrix dar.

## Osteozyten

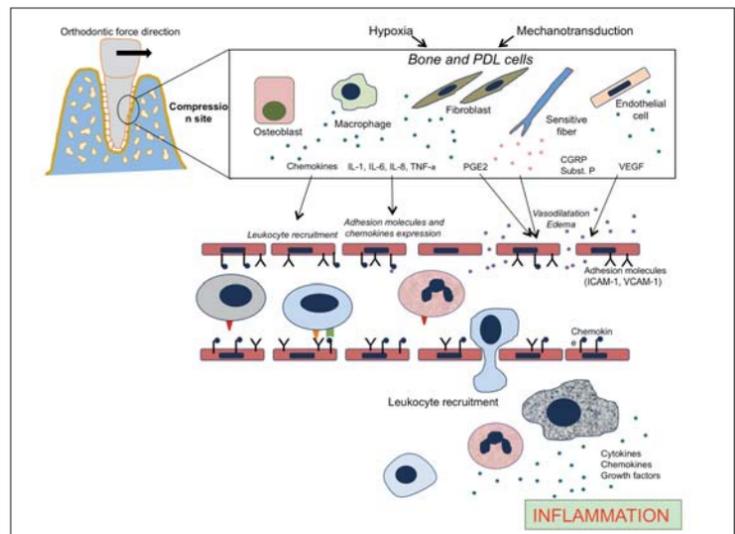
Osteozyten werden innerhalb der kortikalen und trabekulären Knochen ausgeschüttet. Diese Zellen bilden ein komplexes Netzwerk, das für den Erhalt der Lebensfähigkeit und Strukturintegrität des Knochens von großer Bedeutung ist. Die Osteozyten sind sowohl miteinander als auch mit anderen Zellen der Knochenoberfläche verbunden und spielen eine wichtige Rolle dabei, lokale Veränderungen und Stabilität zu erkennen.<sup>9</sup> Bei Belastung senden diese Knochenzellen ein Signal zur Expression von Entzündungsmediatoren aus.

## Osteoklasten-Osteoblasten-Interaktion

### Rank-Rankl

Osteoklasten und Prä-Osteoklasten werden durch verschiedene Signalpfade und Moleküle reguliert. Ein Schlüsselmodul zur Regulation ist ein Protein, das als Rezeptor-Aktivatoren für den Nuklearfaktor-κB-Liganden (RANKL) bezeichnet wird. Es wird von unterschiedlichen Zelltypen produziert, einschließlich Osteoblasten und deren Vorläuferzellen im Verlauf der Interaktion mit den Osteoklasten-Oberflächenrezeptoren, RANK.<sup>10</sup>

Die Interaktion löst die Aktivierung der Signalpfade aus, die für die Differenzierung, Aktivierung und das Überleben der Osteoklasten eine Rolle spielen und zu einem Anstieg der BR führen.



**Abb. 4:** In Kompressionsarealen rufen die kieferorthopädischen Wirkkräfte eine lokale Hypoxie und Mechanotransduktion hervor. Die Konzentration der entzündungsfördernden Zytokine, GFs, Prostaglandin E2 (PGE2), Chemokine, Neurotransmitter Calcitonin gen-verwandte Peptide (CGRP) und Substanz P erhöht sich. Weiterhin verstärken PGE2 und VEGF die Durchblutung und Permeabilität. Dies führt zu Plasmaextravasation und zur Diapedese von Leukozyten. Diese Veränderungen lösen eine akute Entzündungsreaktion aus, die durch einen chronischen Prozess ersetzt wird, der es den Vorläufern der Leukozyten und Osteoklasten erlaubt, ihre Migration in die beanspruchten Parodontalgewebe fortzusetzen und diesen Umbauprozess zu modulieren.

**RANKL-OPG**

Um den RANKL-Effekt auszugleichen, wird von den Osteoblasten auch Osteoprotegerin (OPG) abgesondert. Dieses Protein wirkt wie ein Lockstoff bei der Bindung an RANKL und verhindert seine Interaktion mit RANK auf der Oberfläche der Osteoklasten.<sup>11</sup> Verschiedene Hormone, Wachstumsfaktoren und Zytokine sorgen für eine Balance zwischen RANKL und Osteoprotegerin (siehe Tabelle S. 10).

**Entzündung und kieferorthopädische Zahnbewegung**

Doch was löst das Auftreten dieser Zellen in den Kompressions- und Tensionsbereichen aus? Die Antwort darauf bilden die Beziehung zwischen Entzündung und kieferorthopädischer Zahnbewegung sowie die Rolle der Zytokine, Chemokine und Wachstumsfaktoren.

Wenn eine kieferorthopädische Kraft auf einen Zahn wirkt, können sofort Veränderungen im parodontalen Gewebe beobachtet werden (Abb. 4). Kompressionsbereiche werden durch Gewebe- und Zellschäden, eine Reduktion der Kapillarenzahl, Okklusion und eine partielle Desintegration der Blutgefäße gekennzeichnet, die zu Ischämie und Hypoxie führen können.<sup>12</sup>



Abb. 5: Die Konzentration der Zytokine, Hormone, GFs und PGs steigt in der Sulkusflüssigkeit an und ist leicht zu erkennen.

**Akute Phase**

Die frühe Phase der kieferorthopädischen Zahnbewegung beinhaltet immer eine akute Entzündungsreaktion, die durch parodontale Vasodilatation und Migration der Leukozyten aus den Kapillaren gekennzeichnet ist. Diese migratorischen Zellen produzieren eine Vielzahl von Zytokinen, die direkt oder indirekt mit der gesamten Population der nativen parodontalen Zellen interagieren.

Der Patient verbindet eine akute Entzündung mit starken Schmerzempfindungen und einer eingeschränkten Kaufunktion. Dieses Phänomen spiegelt sich auch in der Sulkusflüssigkeit (Gingival Crevicular Fluid, GCF) sich bewegender Zähne wider, wo temporär signifikante Erhöhungen der Konzentration von Entzündungsmediatoren wie Zytokine und Prostaglandine auftreten (Abb. 5).

**Chronische Phase**

Einen oder zwei Tage später klingt die akute Entzündungsphase ab und wird durch einen chronischen Prozess abgelöst,

der hauptsächlich proliferativ ist und Fibroblasten, Endothelzellen, OBs und alveolare Knochenmarkzellen enthält. Die chronische Entzündung hält bis zum folgenden klinischen Behandlungstermin an, wenn die Apparatur reaktiviert wird und ein neuer Abschnitt akuter Entzündung beginnt.

**Zytokine**

Zytokine sind extrazelluläre Signalproteine, die direkt im Knochenumbau und in entzündlichen Prozessen während einer kieferorthopädischen Zahnbewegung involviert sind. Sie wirken direkt oder indirekt und ermöglichen die Differenzierung, Aktivierung und Apoptose von Knochen- und PDL-Zellen.<sup>12</sup> RANKL, Monozytenkolonien-stimulierender Faktor (Macrophage Colony-Stimulating Factor, M-CSF) und Tumornekrosenfaktor (TNF)- $\alpha$ <sup>13</sup> sind die wichtigsten proinflammatorischen Zytokine, die für die Rekrutierung, Differenzierung, Aktivierung und das Überleben der Osteoklasten verantwortlich sind (Abb. 2 bis 4).

**Chemokine**

Die Fähigkeit, Zellmigration herbeizuführen, ist eine Eigenschaft, welche die Gruppe der Chemokine von anderen Zytokinen unterscheidet. Sie senden Signale für die Zellkommunikation, -differenzierung und die Aktivierung von Knochenzellen aus und spielen damit eine wichtige Rolle beim Knochenumbau und entzündlichen Knochenerkrankungen (Abb. 2 bis 4).<sup>12</sup> Darüber hinaus stimulieren Chemokine die Aktivität der OCs (CCL2, CCL3 und IL-8)<sup>14</sup> und verlängern die Überlebensrate der Osteoklasten (CCL3 und CCL9).<sup>15</sup> RANKL regt die OC-Produktion von CCL2, CCL3 und CCL5 an. Dies impliziert eine autokrine und parakrine Signalisierung während der Osteoklastogenese sowie einen Anstieg der BR.<sup>16</sup>

**Wachstumsfaktoren**

Wachstumsfaktoren (Growth Factors, GF) sind Stoffe, welche die zelluläre Proliferation, Migration und Differenzierung stimulieren. Darüber hinaus sind sie lokal beim Knochenumbau und folglich auch bei der kieferorthopädischen Zahnbewegung aktiv.<sup>17,18</sup> Vasculäre Endothelial-GFs (VEGF) haben die stärkste Beziehung zur kieferorthopädischen Zahnbewegung. Sie können die BR verstärken.<sup>18</sup> Auch die transformierenden Wachstumsfaktoren (TGF)- $\beta$ , welche die Osteoklastogenese unterdrücken<sup>19</sup>, und die wachstumsauslösenden Proteine (Bone Morphogenetic Proteins, BMPs), die eine Rolle bei der Knochenbildung spielen (Abb. 2 bis 4), stehen in enger Beziehung zur kieferorthopädischen Zahnbewegung.

**Klinische Perspektiven**

In der Literatur werden verschiedene klinische Verfahren zur Be-

Fortsetzung auf Seite 12 KN

ULTRADENT

DENTAL UNITS. MADE IN GERMANY.



easyKFO. Für Spezialisten.

Kombiniertes Zahnarzt- u. Assistenzelement



easy KFO 1

Assistenzelement



easy KFO 2

Ausgeklapptes Zahnarzttelement

easy bedienen.

easy behandeln.

easy KFO.

easy KFO 1 zeichnet sich durch freien und ungehinderten Zugang für den Patienten aus. Keine hängenden Schläuche. Der Behandler nimmt die Instrumente von der linken Seite auf. easy KFO 1 besticht durch modernes Design, kombiniert mit neuester Technik und perfekter Ergonomie.

easy flexibel.

easy vielseitig.

easy KFO.

easy KFO 2 ist die perfekte Basis für Komfort, Zuverlässigkeit und Ergonomie. Individuelle Ausstattungsmöglichkeiten, wie z.B. Flachbildschirm und LED-Polymerisationslampe, sorgen für eine langfristige Nutzung und machen diesen Arbeitsplatz noch wertvoller.

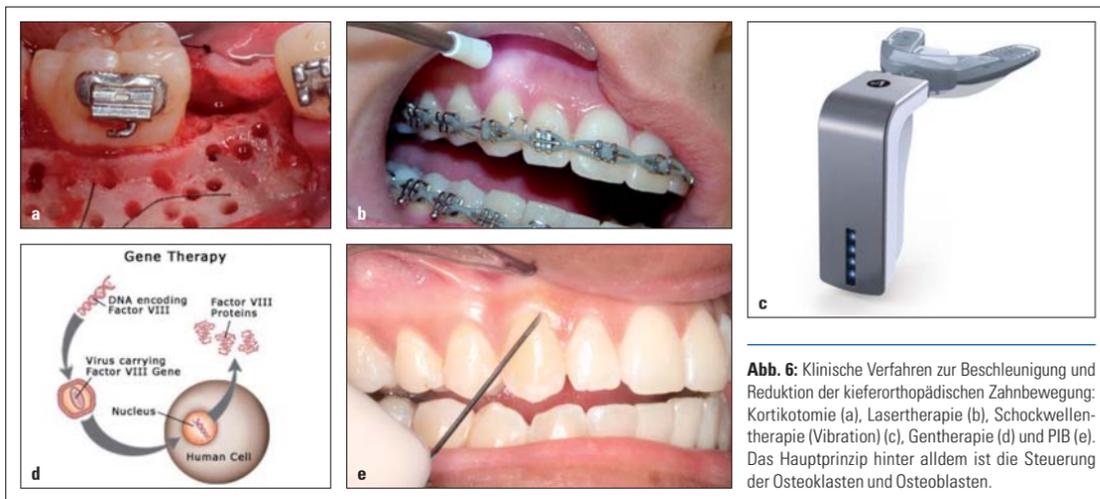


Hier finden Sie Ihre neue KFO-Behandlungseinheit.

Dental-Medizinische Geräte GmbH & Co. KG  
D-85649 Brunthal | Eugen-Sänger-Ring 10  
Telefon: +49 (0)89/42 09 92-70



www.ultradent.de  
info@ultradent.de



**Abb. 6:** Klinische Verfahren zur Beschleunigung und Reduktion der kieferorthopädischen Zahnbewegung: Kortikotomie (a), Lasertherapie (b), Schockwellentherapie (Vibration) (c), Genterapie (d) und PIB (e). Das Hauptprinzip hinter alldem ist die Steuerung der Osteoklasten und Osteoblasten.

**KN Fortsetzung von Seite 11**

schleunigung oder Reduktion der kieferorthopädischen Zahnbewegung aufgezeigt: Kortikotomie (Abb. 6a), Lasertherapie (Abb. 6b), Schockwellentherapie (Vibration, Abb. 6c), Genterapie (Abb. 6d) und parodontale Injektion von Biomodulatoren (PIB, Abb. 6e). Das Grundprinzip dieser Verfahren ist die Steuerung von Osteoklasten und Osteoblasten. Studien haben gezeigt, dass sie die Expression proinflammatorischer Biomodulatoren wie MCSF und RANKL im parodontalen Ligament vergrößern und damit die kieferorthopädische Zahn-

bewegung verstärken.<sup>20-24</sup> Dennoch könnten einige von ihnen genutzt werden, um die kieferorthopädische Zahnbewegung durch Osteoprotegerin zu verringern, z. B. die Genterapie und PIB.<sup>25,26</sup> Darüber hinaus können Medikamente wie met-RANTES und P8A, die spezifische Chemokinrezeptoren blockieren, verwendet werden, um Knochenkrankungen wie Osteoporose und rheumatische Arthritis zu behandeln.<sup>14</sup> In Zukunft könnte die lokale Anwendung gegenwärtiger und künftiger Medikamente hilfreich dabei sein, die biologische Verankerung und Stabilität der Endergebnisse

zu erhöhen. Weiterhin können potenzielle kieferorthopädische Patienten nach Polymorphismen des IL-1 $\beta$ -Genotyps überprüft werden, der das Risiko für eine externe Wurzelresorption während der kieferorthopädischen Zahnbewegung erhöht. Ein solches Screening erfolgt durch Analyse der DNA nach einem einfachen Wangenabstrich oder einer Mundspülung während der Erstuntersuchung. Danach wäre es möglich, die Patienten über ihre genetischen Veranlagungen vor Behandlungsbeginn zu informieren und Risikopatienten durch regelmäßige Röntgenaufnahmen zu überwachen.<sup>27</sup>

Außerdem kann die Analyse der Zytokinlevel in der Sulkusflüssigkeit während der kieferorthopädischen Zahnbewegung in Zukunft deren Geschwindigkeit anzeigen und bestimmen, welches Kraftniveau für die kieferorthopädischen Apparaturen optimal ist. Die Analyse der Zytokinlevel in der Sulkusflüssigkeit kann auch hilfreich bei der Überwachung der biologischen Aktivitäten des Parodontiums während der Retentionsphase sein und damit Informationen über ein mögliches Rezidiv zur Verfügung stellen. Insgesamt wird durch den gegenwärtigen Wissensstand impliziert, dass die mechanische Beanspruchung die Expression vieler Zytokine, Hormone und GFs stimuliert. Diese spielen beim Umbau

von Knochen und des parodontalen Ligaments in den frühen Phasen der kieferorthopädischen Zahnbewegung sowohl in den tensilen als auch kompressiven Bereichen eine Rolle. Zukünftig könnten lokale Injektionen von Mediatoren in den Parodontalgewebe die Geschwindigkeit der kieferorthopädischen Zahnbewegung anpassen oder die Stabilität der kieferorthopädischen Behandlungsergebnisse verbessern. **KN**



**KN Kurzvita**

**Ildeu Andrade Jr., DDS, MS, PhD**  
[Autoreninfo]

**KN Adresse**

Ildeu Andrade Jr., DDS, MS, PhD  
Department of Orthodontics  
School of Dentistry  
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas)  
Av. Dom José Gaspar 500  
CEP 31.270-901  
Belo Horizonte/MG  
Brasilien  
Tel.: +55 31 3319-4411  
Fax: +55 31 3319-4415  
ildeuandrade@pucminas.br

ANZEIGE



www.orthodent.de

**Essix ESSENTIALS**  
Katalog ab sofort erhältlich!

**mtm**  
clear aligner  
in office

Simple Technik,  
effiziente Lösung.

DENSPLY  
RAINTREE ESSIX

**Beispiele**



ODS GmbH  
Dorfstraße 5  
24629 Kisdorf

Telefon +49 (0) 4193-96 58 40  
Telefax +49 (0) 4193-96 58 41  
kundenservice@orthodent.de