

Premolar Root Changes Following Treatment with the Banded Herbst Appliance

Veränderungen an den Prämolarenwurzeln nach Behandlung mit dem an Bändern befestigten Herbst-Scharnier*

Athanasios T. Nasiopoulos, Athanasios E. Athanasiou, Moschos A. Papadopoulos, George Kolokithas, Ioulia Ioannidou¹

Abstract

Aim: The aim of this prospective study was to radiographically assess root morphology changes in maxillary and mandibular premolars following Herbst appliance treatment.

Patients and Methods: Twenty-five consecutive adolescents (19 boys and six girls, mean age 13.08 years) with Class II, Division 1 malocclusion were treated with the banded Herbst appliance for a mean period of 13.16 months. Periapical radiographs of the upper and lower premolars were obtained before appliance insertion and immediately after appliance removal using the parallel technique. All radiographs were scanned, digitized and analyzed using appropriately adjusted cephalometric software. The pre- and post-treatment length and area of the first and second maxillary and mandibular premolar roots were calculated. Statistical analysis included paired t-tests to evaluate pre- and post-treatment changes, and independent t-tests to compare the pre- and post-treatment differences between the first and the second premolars, which served as controls. The level of significance was set at $p \leq 0.05$ for all tests.

Results: No statistically significant decrease in premolar root lengths or areas was noted following removal of the Herbst appliance. We observed a statistically-significant decrease in the root area of the first mandibular premolars compared to that of the second mandibular premolars.

Conclusions: Although we observed no statistically-significant root morphology changes in the first and second premolars following Herbst appliance treatment, the mandibular first premolars revealed significantly more root resorption than did the mandibular second premolars.

Key Words: Root resorption · Herbst appliance · Herbst treatment · Class II, Division 1 malocclusion

Zusammenfassung

Ziel: Ziel dieser prospektiven Studie war, radiologische Veränderungen der Wurzelmorphologie an Oberkiefer- und Unterkieferprämolaren nach einer Behandlung mit der Herbst-Apparatur nachzuweisen.

Patienten und Methodik: 25 aufeinander folgende jugendliche Patienten (19 Jungen und sechs Mädchen, mittleres Alter 13,08 Jahre) mit einer Klasse-II/1-Anomalie wurden im Schnitt für 13,16 Monate mit einem an Bändern befestigten Herbst-Scharnier behandelt. Periapikale Röntgenaufnahmen der oberen und unteren Prämolaren wurden vor dem Einsetzen und unmittelbar nach der Entfernung der Apparatur mittels der Paralleltechnik angefertigt. Alle Röntgenaufnahmen wurden eingescannt, digitalisiert und mittels einer adäquat angepassten kephalometrischen Software analysiert. Die Wurzellänge und -fläche der ersten und zweiten Ober- und Unterkieferprämolaren wurden sowohl vor als auch nach der Behandlung berechnet. Die statistische Analyse enthielt paarige t-Tests zur Evaluation der eingetretenen Veränderungen und unabhängige t-Tests, um diese Veränderungen bei den ersten Prämolaren mit denen der zweiten Prämolaren, die als Kontrollgruppe dienten, zu vergleichen. Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf $p \leq 0,05$ gesetzt.

Ergebnisse: Es wurde keine statistisch signifikante Abnahme der Wurzellänge und -fläche der Prämolaren nach Entfernung der Herbst-Apparatur nachgewiesen. Eine statistisch signifikante Abnahme der Wurzelfläche der ersten unteren Prämolaren wurde im Vergleich zu den zweiten unteren Prämolaren festgestellt.

Schlussfolgerungen: Obwohl keine statistisch signifikanten Veränderungen in der Wurzelmorphologie der ersten und zweiten Prämolaren nach Behandlung mit dem Herbst-Scharnier beobachtet wurden, war eine signifikant erhöhte Wurzelresorption bei den ersten unteren Prämolaren im Vergleich zu den zweiten unteren Prämolaren offensichtlich.

Schlüsselwörter: Wurzelresorption · Herbst-Apparatur · Herbst-Scharnier-Behandlung · Anomalie der Klasse II/1

¹ Department of Orthodontics, School of Dentistry, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.

Received: February 3, 2006; accepted: April 3, 2006

*Ins Deutsche übersetzt von Dr. S. Ammann, Freiburg/Br.

Introduction

Herbst appliance is a fixed functional appliance that has been used successfully in the treatment of severe Class II, Division 1 and Class II, Division 2 malocclusions [13, 27, 29]. Since its re-introduction in orthodontic practice in 1979, there have been various suggestions made regarding appliance design and fabrication, including the banded Herbst appliance, the incorporation of stainless-steel crowns on the anchorage teeth, the combination with extraoral traction, the acrylic-splint Herbst appliance, and the cast-silver splinted Herbst appliance [13, 22, 27, 29, 40]. In spite of these variations in design and fabrication, the therapeutic concept remains very much the same.

Root resorption is a highly negative but ultimately unavoidable side effect of orthodontic treatment [3, 4, 32]. It is an extremely complex phenomenon in which a great number of variables come into play, such as individual susceptibility [33, 34], genetics [14], and systemic [20] and iatrogenic factors [5, 8, 10, 11, 15–17, 19, 23, 31, 37, 39]. In the rare event that it becomes radiographically evident, a considerable amount of root material has been irreversibly lost, which may have grave consequences for the tooth involved [3]. Although there are several investigations and extensive reviews in the contemporary orthodontic literature contributing to the understanding of the biological mechanisms involved and its clinical significance [3–5, 8, 10, 11, 14–17, 19, 20, 23, 31–34, 37, 39], important aspects of this process remain unclear. To date, the extent and severity of potential root resorption phenomena in individuals undergoing orthodontic treatment cannot be predicted [14, 37] or safely prevented [4, 14].

During Herbst appliance treatment, bite jumping results in masticatory muscle and facial soft tissue stretching, which in turn produces a highly complex system of forces applied to the dentition [25]. In two dimensions they can be analyzed into horizontal (sagittal) and vertical (intrusive) components, and their magnitude can be physically measured using specifically-designed force transducers, and theoretically calculated (Figure 1) [25]. These are intermittent forces varying in magnitude and duration according to the activity in which they engage – they can be momentarily very strong during maximum bite (19.4 N), moderately strong during swallowing and open-close cycles (8.6 N and 9.9 N respectively), and very low at rest position (1.4 N) [25]. When the third dimension is considered in the analysis, this system of forces and moments becomes even more complicated. Incorporation of a maxillary expansion appliance into the bite-jumping appliance produces a more challenging model for analyzing the forces generated and applied to the dentition.

The incidence of root resorption has been associated with orthodontic treatment duration [5, 37], force magnitude [5, 10, 11, 33, 39], and force duration [10, 16, 33, 39]. Intrusion is regarded as a type of tooth movement that may cause root resorption [8, 10, 15, 17, 19, 23, 31], although some disagree [6]. Indeed, treatment with the Herbst appliance produces

Einleitung

Die Herbst-Apparatur ist ein festsitzendes funktionelles Behandlungsgerät, das mit Erfolg zur Therapie ausgeprägter Klasse-II/1- und -II/2-Anomalien eingesetzt wurde [13, 27, 29]. Seit ihrer Wiedereinführung 1979 in die Kieferorthopädie wurden unterschiedliche Vorschläge zur Gestaltung und Herstellung der Apparatur gemacht: die an Bändern befestigte Herbst-Apparatur, die mit zementierten Edelstahlkronen auf den Ankerzähnen, die in Kombination mit einem extraoralen Zug, die Herbst-Apparatur mit Splints aus Kunststoff oder Silberguss [13, 22, 27, 29, 40]. Trotz der Unterschiede in Gestaltung und Herstellung bleibt das therapeutische Konzept im Grunde immer das gleiche.

Wurzelresorptionen sind ein gefürchteter, aber letztlich unvermeidbarer Nebeneffekt einer kieferorthopädischen Behandlung [3, 4, 32]. Es handelt sich um ein extrem komplexes Phänomen, bei dem eine ganze Anzahl verschiedener Faktoren, wie die individuelle Disposition [33, 34], die genetische Veranlagung [14] und systemische [20] wie iatrogene Faktoren [5, 8, 10, 11, 15–17, 19, 23, 31, 37, 39] eine Rolle spielen. In dem seltenen Fall, dass sie radiologisch erkennbar sind, ist bereits ein beträchtlicher Anteil der Wurzellänge irreversibel verloren gegangen. Das kann schwerwiegende Konsequenzen für die betroffenen Zähne haben [3]. Obwohl in der aktuellen kieferorthopädischen Literatur wiederholt einige Untersuchungen und ausführliche Abhandlungen publiziert wurden, die sich sowohl mit dem Verständnis der zugrunde liegenden biologischen Mechanismen als auch mit deren klinischer Bedeutung beschäftigen [3–5, 8, 10, 11, 14–17, 19, 20, 23, 31–34, 37, 39], bleiben wichtige Aspekte des Vorgangs unklar. Bis heute können weder Ausmaß noch Schweregrad von Wurzelresorptionen, die bei jeder kieferorthopädischen Therapie auftreten können, vorhergesagt [14, 37] oder sicher verhindert werden [4, 14].

Während einer Behandlung mit der Herbst-Apparatur führt die Bissumstellung zu einer Dehnung der Kaumuskulatur und des Weichgewebes, welche wiederum ein hochkomplexes Kräftesystem hervorruft, das auf die Zähne des Patienten wirkt [25]. Die Kräfte können als horizontale (sagittale) und vertikale (intrudierende) Komponenten in zwei Dimensionen bestimmt werden, wobei ihre Größe mittels speziell hergestellter Kraftübertragungssysteme physikalisch gemessen und theoretisch errechnet werden kann (Abbildung 1) [25]. Diese Kräfte sind intermittierend und variieren je nach der ausgeführten Funktion in Größe und Dauer; sie können bei maximalem Zubiss kurzzeitig sehr hoch werden (19,4 N), während des Schluckvorgangs und der Öffnungs-/Schließungszyklen (8,6 N bzw. 9,9 N) sind sie mittelstark und in der Ruheposition sehr niedrig (1,4 N) [25]. Wird die dritte Dimension in die Analyse mit einbezogen, dann wird dieses Kräfte- und Drehmomentsystem sogar noch komplizierter. Durch Hinzufügen einer Dehnungsapparatur zur Bissumstellungsapparatur wird das Modell zur Berech-

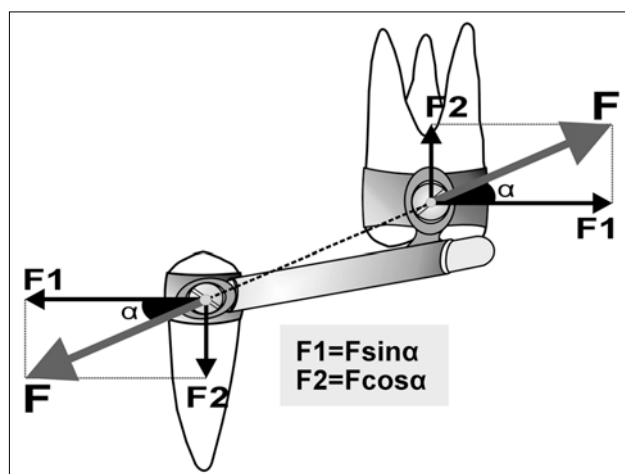


Figure 1. Simplified schematic representation of the forces F transmitted via the banded Herbst appliance to the main anchorage teeth (maxillary first molars and mandibular first premolars). F_1 : Horizontal (sagittal) force component. F_2 : Vertical (intrusive) force component. α : The angle defined by the force F line of action and true horizontal. If F is known, the magnitude of each force component can be calculated by the depicted mathematic formula.

Abbildung 1. Vereinfachte schematische Darstellung der Kräfte F , die über die an Bändern befestigte Herbst-Apparatur auf die Hauptankerzähne übertragen werden (obere erste Molaren und untere erste Prämolaren). F_1 : Horizontale (sagittale) Kraftkomponente. F_2 : Vertikale (intrusive) Kraftkomponente. α : Der Winkel definiert durch die Wirkungslinie der Kraft F und die wahre Horizontale. Wenn die Kraft F bekannt ist, kann die Größe jeder Kraftkomponente mittels der dargestellten mathematischen Formel berechnet werden.

intrusive intermittent forces and moments of various magnitude and duration [25] whose effects on the roots of the supporting premolars have not been investigated.

The aim of this prospective investigation was to radiographically assess root morphology changes in the maxillary and mandibular premolars following treatment with the Herbst appliance.

Patients and Methods

Twenty-five consecutive adolescents (19 boys and six girls) with a mean age of 13.08 years (range: 12–16 years) and Class II, Division 1 malocclusion, were treated with the banded Herbst appliance (Dentaurum, Ispringen, Germany) for a mean period of 13.16 months. A Hyrax maxillary expansion screw was incorporated into the appliance for transversal correction and activated once or twice every 4–6 weeks. Metal brackets (0.018 inch slot) were bonded on the patients' upper and lower anterior teeth. All patients were treated at the Postgraduate Orthodontic Clinic of the Aristotle University of Thessaloniki. The first author treated 13 patients, while four postgraduate students treated the remaining twelve under the continuous supervision and guidance of the former. A detailed medical and

history of the patients and the forces acting on the teeth were recorded.

The appearance of root resorption was assessed with the duration of orthodontic treatment [5, 37] as well as the magnitude [5, 10, 11, 33, 39] and duration [10, 16, 33, 39] of the acting force in connection with it. The intrusion is considered as a type of tooth movement, which can cause root resorption [8, 10, 15, 17, 19, 23, 31], although there is no general agreement on this [6]. In fact, intermittent intrusive forces and moments of different magnitude and duration during treatment with the Herbst appliance [25], whose effects on the anchoring premolars have not been investigated.

The aim of this prospective investigation was to radiographically assess changes in root morphology of the upper and lower premolars after treatment with a Herbst appliance to determine.

Patients and Methodik

25 aufeinander folgende Heranwachsende (19 Jungen und sechs Mädchen) mit einem Durchschnittsalter von 13,08 Jahren (Altersspanne 12–16 Jahre) und einer Klasse-II/1-Anomalie wurden mit einer an Bändern befestigten Herbst-Apparatur (Dentaurum, Ispringen, Deutschland) über einen mittleren Zeitraum von 13,16 Monaten behandelt. Eine Hyrax-Dehnschraube wurde zur transversalen Korrektur des Oberkiefers an der Apparatur befestigt und alle 4–6 Wochen ein- oder zweimal aktiviert. Die oberen und unteren Frontzähne der Patienten wurden mit Metallbrackets (0.018er Slot) beklebt. Alle Patienten wurden an der Postgraduierten-Abteilung der Klinik für Kieferorthopädie, Aristoteles-Universität Thessaloniki, Griechenland, behandelt. Der Erstautor behandelte 13 Patienten, die restlichen zwölf Patienten wurden von vier Postgraduierten unter der ständigen Aufsicht und Führung des Erstautors behandelt. Von allen Patienten wurde eine ausführliche medizinische und zahnmedizinische Anamnese erhoben. Der Gesundheitszustand sowie der Zahn- und Parodontalstatus wurden ebenso aufgezeichnet wie systemische und andere Erkrankungen. Alle in die Studie einbezogenen Patienten hatten eine Klasse-II/1-Anomalie mit einer Distalbissstellung von einer vollen Prämolarenbreite, einen Overjet von mehr als 6 mm (Mittelwert 10,54 mm, Bereich 6,5–15 mm) und ein bleibendes Gebiss ohne fehlende oder überzählige Zähne oder Zahnformanomalien. Patienten mit schlechter Mundhygiene, einer hohen Kariesinzidenz und mit ausgedehnten dentalen Restaurationen wurden ebenso von der vorliegenden Studie ausgeschlossen wie Patienten mit systemischen oder anderen Erkrankungen. Nach der Entfernung der Herbst-Apparatur, am Ende der Studie, wurde die orthodontische Behandlung fortgesetzt und mit einer festsitzenden Apparatur zu Ende geführt. Bei allen Patienten verlief die Einstellung in eine Klasse-I-Beziehung im Molaren- und

dental history was obtained from all patients. Physical, dental and periodontal health was recorded, as were any systemic or other diseases. All patients included in the study presented a full-cusp Class II, Division 1 malocclusion, an overjet exceeding 6 mm (mean 10.54 mm, range: 6.5–15 mm), and a permanent dentition with no missing, supernumerary, or abnormally-shaped teeth. Patients with poor oral hygiene, numerous caries and/or extensive dental restorations, and those with systemic or other diseases were excluded from the present study. After Herbst appliance removal, and the end of this study, orthodontic treatment was continued and completed using fixed orthodontic appliances. Following successful treatment, all patients presented a Class I molar and canine relationship, and they received an activator as a retaining appliance after treatment was completed. Prior to treatment, the patients and their parents received detailed information regarding the treatment plan, the orthodontic appliances involved, and the diagnostic records required, including radiographs. Informed consent was obtained from all the patients' parents.

Radiographic Evaluation

Before Herbst appliance insertion and immediately after appliance removal, periapical radiographs of the maxillary and mandibular first and second premolars were obtained by the first author using the parallel technique and the same radiographic and X-ray-developing equipment (Heliodent EC, Siemens AG, Bensheim, Germany; Dent-X 9000 Film Processor, Elmsford, NY, USA, respectively). This type of X-ray is routinely recommended by other researchers for monitoring treatment outcome and assessing serious root resorption [4, 35]. Due to the fact that no appliances were placed on the second premolars, and that they were only subjected to the forces produced by the appliance indirectly via their mesial and distal contact points, those teeth served as control teeth in this study.

Only high quality radiographs were evaluated. In total, 200 periapical radiographs were obtained (from 25 patients, four quadrants, pre- and post-treatment phases); they were scanned using a table scanner (SNAPSCAN 1236, AGFA-Gevaert AG, Mortsel, the Netherlands) and the appropriate software (AGFA-Fotolook, AGFA-Gevaert NV, Mortsel, the Netherlands) in 1:1 magnification at 1200 dpi resolution by the first author. The premolar root lengths and areas were calculated digitally using cephalometric software (Viewbox 2.2, dHAL Orthodontic Software, Kifissia, Greece) after appropriate adjustment.

In measuring premolar root length, we used the following three reference points (Figure 2):

- cemento-enamel junction, distal (CEJ-distal),
- cemento-enamel junction, mesial (CEJ-mesial), and
- apex, as the midpoint between the line connecting the most mesial with the most distal points of the root apex.

Eckzahnbereich erfolgreich, und sie erhielten nach Abschluss der Behandlung einen Aktivator als Retentionsgerät. Vor Beginn der Behandlung wurden die Patienten detailliert über den Behandlungsplan, die vorgesehenen kieferorthopädischen Apparaturen und die benötigten diagnostischen Aufzeichnungen einschließlich der Röntgenaufnahmen aufgeklärt. Eine Einverständniserklärung lag von allen Patienteneltern vor.

Röntgenologische Untersuchung

Vor Einsetzen und unmittelbar nach Entfernung der Herbst-Apparatur wurden periapikale Röntgenaufnahmen der oberen und unteren ersten und zweiten Prämolaren vom Erstautor mittels Paralleltechnik und mit jeweils demselben Röntgengerät und derselben Entwicklungsmaschine angefertigt (Heliodent EC, Siemens AG, Bensheim, Deutschland; bzw. Dent-X 9000-Filmprozessor, Elmsford, NY, USA). Dieser Typ von Röntgenaufnahmen wird in der Regel von anderen Autoren zur Aufzeichnung des Behandlungsergebnisses und zur Bestimmung schwerer Wurzelresorptionen empfohlen [4, 35]. Aufgrund der Tatsache, dass an den zweiten Prämolaren keine Elemente befestigt waren und die von der Apparatur entwickelten Kräfte nur indirekt über die mesialen und distalen Kontaktpunkte auf sie übertragen wurden, dienten diese in der Studie als Kontrollzähne.

Ausgewertet wurden nur qualitativ gute Röntgenbilder. Insgesamt lagen 200 periapikale Röntgenbilder (25 Patienten, vier Quadranten, prä- und posttherapeutische Bilder) vor. Diese wurden vom Erstautor mit einem Tischscanner (SNAPSCAN 1236, AGFA-Gevaert AG, Mortsel, Niederlande) mittels der entsprechenden Software (AGFA-Fotolook, AGFA-Gevaert NV, Mortsel, Niederlande) eingescannt und im Verhältnis 1:1 bei einer Auflösung von 1200 dpi dargestellt. Nach entsprechender Anpassung erfolgte die Berechnung der Wurzellänge und -fläche der Prämolaren digital mittels einer kephalometrischen Software (Viewbox 2.2, dHAL Orthodontic Software, Kifissia, Griechenland).

Zur Messung der Wurzellänge der Prämolaren wurden die folgenden drei Punkte ermittelt (Abbildung 2):

- Schmelz-Zement-Grenze, distal (CEJ-distal)
- Schmelz-Zement-Grenze, mesial (CEJ-mesial) und
- der Apex als der Mittelpunkt der Linie, die den mesialsten mit dem distalsten Punkt der Wurzelspitze verbindet.

Die senkrechte Distanz (mm) des Punktes Apex zu der Verbindungslinie der Punkte CEJ-distal und CEJ-mesial wurde als Wurzellänge definiert [2].

Zur Messung der Wurzelfläche der Prämolaren wurden die folgenden neun anatomischen Punkte auf der Wurzelkontur der Prämolaren ermittelt (Abbildung 3):

- Schmelz-Zement-Grenze, distal (CEJ-distal),
- die Punkte r1 und r2, die die Kontur der distalen Oberfläche der Wurzel in drei Abschnitte gleicher Länge einteilen,

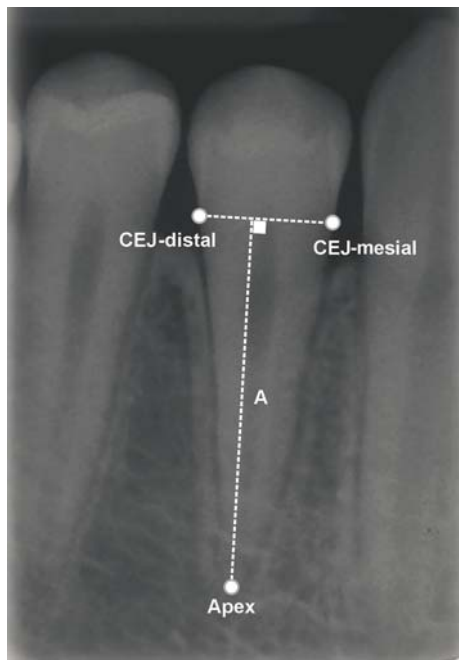


Figure 2. Measurement of the premolar root length. A: The perpendicular distance from apex to the line connecting CEJ-distal to CEJ-mesial.

Abbildung 2. Messung der Länge der Prämolaren. A: Die senkrechte Distanz zwischen dem Apex und der Verbindungslinie CEJ-distal und CEJ-mesial.

Root length was defined as the perpendicular distance in millimeters of the point apex to the line connecting the points CEJ-distal and CEJ-mesial [2].

To measure the premolar root area, we used the following nine anatomic points on the premolar root contours (Figure 3):

- cemento-enamel junction, distal (CEJ-distal),
- points r1 and r2, which divided the outline of the root's distal surface into three distances of equal length,
- point r3, corresponding to the most distal and inferior point of the apex,
- point r4, corresponding to the most mesial and inferior point of the apex,
- points r5 and r6, which divided the outline of the root's mesial surface into three distances of equal length, and
- cemento-enamel junction, mesial (CEJ-mesial).

When connected, these points define a closed geometric pattern corresponding to the premolar root area in mm² which can be calculated using the appropriate software.

Statistical Analysis

Statistical analysis was made using the statistical software SPSS, version 10.0 for Windows (SPSS Inc., Chicago, IL,

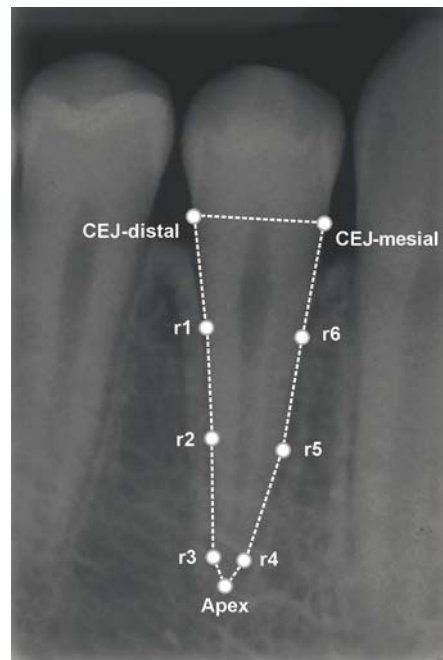


Figure 3. Calculation of the premolar root area. When connected, the points CEJ-distal, r1 to r3, Apex, r4 to r6 and CEJ-mesial, define a closed geometric pattern (dotted line) whose area can be calculated in mm².

Abbildung 3. Berechnung der Wurzelfläche der Prämolaren. Verbunden definieren die Punkte CEJ-distal, r1 nach r3, Apex, r4 nach r6 und CEJ-mesial eine geschlossene geometrische Figur (gepunktete Linie), deren Fläche in mm² errechnet werden kann.

- der Punkt r3, entsprechend dem distalsten und untersten Punkt des Apex,
- der Punkt r4, entsprechend dem mesialsten und untersten Punkt des Apex,
- die Punkte r5 und r6, die die Kontur der mesialen Oberfläche der Wurzel in drei Abschnitte gleicher Länge einteilen, und
- die Schmelz-Zement-Grenze, mesial (CEJ-mesial).

Durch die Verbindung dieser Punkte wird eine geschlossene geometrische Figur definiert, die der Wurzelfläche der Prämolaren in mm² entspricht. Diese Fläche kann bei Anwendung geeigneter Software berechnet werden.

Statistische Analyse

Die statistische Analyse erfolgt mit der statistischen Software SPSS, Version 10.0 für Windows (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Zunächst wurde die Verteilung der Daten mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test überprüft und eine Normalverteilung nachgewiesen. Diesem Ergebnis zufolge wurden paarige t-Tests zum Vergleich innerhalb der Gruppen verwendet, um Unterschiede vor Eingliederung und unmittelbar nach Entfernung der Herbst-Apparatur in Bezug auf die Wurzellänge und -fläche sowohl der ersten als auch der

USA). Data distribution was initially evaluated by the Kolmogorov-Smirnov test and found to be normal. According to this initial evaluation, paired t-tests were used for the intra-group comparisons to assess the differences in root length and area for the first and second mandibular premolars separately, before Herbst appliance insertion and immediately after its removal. In addition, independent t-tests were used for inter-group comparisons to compare those changes in first premolar root lengths and areas occurring after treatment with those in the second premolars, which served as control teeth. The significance level was set at $p \leq 0.05$ for all tests.

Method Error

To evaluate method error, 29 periapical radiographs from twelve randomly-selected patients were obtained 15 minutes after the initial radiographs had been taken. These double radiographs were digitized and analyzed by the first author according to the same procedure described above, after a 4-week interval. The magnitude of the method error $s(i)$ was calculated using Dahlberg's formula:

$$s(i) = \sqrt{\frac{\sum(Xa-Xb)^2}{2N}}$$

$s(i)$ = the magnitude of the method error, $Xa-Xb$ = the difference in values between measurements before and immediately after Herbst appliance treatment for every tooth investigated, N = the number of double assessments) (Table 1) [7].

Only those changes were considered statistically significant in which the p value equaled or was less than 0.05, while the $s(i)$ value was smaller than the difference observed between before and after treatment (i.e., biological change). On the contrary, changes with a p value equal to or less than 0.05 coexisting with an $s(i)$ value greater than the differences

zweiten Unterkiefer-Prämolaren festzustellen. Zusätzlich wurden unabhängige t-Tests zum Vergleich zwischen den Gruppen verwendet, um die Veränderungen in der Wurzellänge und -fläche der ersten Prämolaren nach der Behandlung mit den entsprechenden der zweiten Prämolaren zu vergleichen, die als Kontrollzähne dienten. Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf $p \leq 0,05$ festgelegt.

Methodischer Fehler

Um den methodischen Fehler zu ermitteln, wurden 29 periapikale Röntgenbilder von zwölf zufällig ausgewählten Patienten ein zweites Mal 15 Minuten nach der ersten Aufnahme angefertigt. Diese zusätzlichen Röntgenbilder wurden digitalisiert und vom Erstautor nach einem 4-wöchigen Intervall entsprechend der oben beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet. Die Größe des methodischen Fehlers $s(i)$ wurde mittels der Dahlberg-Formel errechnet:

$$s(i) = \sqrt{\frac{\sum(Xa-Xb)^2}{2N}}$$

$s(i)$ = die Größe des methodischen Fehlers, $Xa-Xb$ = Differenz der Messwerte vor und direkt nach der Behandlung mit der Herbst-Apparatur für jeden untersuchten Zahn, N = Anzahl der Wiederholungsmessungen) (Tabelle 1) [7].

Als statistisch signifikant wurden nur diejenigen Änderungen angesehen, bei denen der p -Wert kleiner oder gleich 0,05 war und bei denen gleichzeitig der $s(i)$ -Wert kleiner als die ermittelte Differenz der Werte vor und nach der Behandlung war (d.h. die natürliche Veränderung). Im Gegenzug wurden Änderungen mit einem p -Wert kleiner oder gleich 0,05, aber gleichzeitig einem $s(i)$ -Wert, der größer als die Differenz der Werte vor und nach der Behandlung war, als nicht signifikant angesehen, weil der methodische Fehler hier größer war als die natürliche Veränderung.

Table 1. Comparison of the premolar root lengths and areas before and immediately after Herbst appliance treatment.

Tabelle 1. Vergleich der Wurzellängen und -flächen der Prämolaren vor und unmittelbar nach der Behandlung mit der Herbst-Apparatur.

	Before treatment		After treatment		Difference	P-Value	Method error
	$\bar{x}_1$	SD_1	$\bar{x}_2$	SD_2	$\bar{x}_2 - \bar{x}_1$		$s(i)$
Root length (mm)							
Maxillary first premolars	13.30	1.50	13.87	1.52	0.57	0.001	0.85
Maxillary second premolars	12.84	1.64	13.69	1.61	0.85	0.000	0.39
Mandibular first premolars	14.79	1.65	15.18	1.58	0.40	0.038	0.40
Mandibular second premolars	14.24	1.89	14.91	2.04	0.68	0.008	0.44
Root area (mm²)							
Maxillary first premolars	107.54	17.33	112.14	21.35	4.59	0.013	10.11
Maxillary second premolars	98.61	15.09	106.28	19.40	7.67	0.003	8.41
Mandibular first premolars	109.66	16.09	107.18	15.35	-2.48	0.147	5.32
Mandibular second premolars	111.58	22.13	117.36	21.69	5.78	0.013	3.79

between before and after treatment were considered not significant because the magnitude of the method error was greater than the biological change.

Results

Table 1 presents the results regarding mean values, standard deviations and differences in premolar root lengths and areas before and after treatment, p values and the magnitude of the method error. No statistically-significant reduction in premolar root lengths or areas was noted following removal of the Herbst appliance. On the contrary, we observed a significant increase in root length and area in the mandibular second premolars, and in root length of the maxillary second premolars. These findings lead us to assume that the second premolar root development continued undisturbed because they had not been directly incorporated in the appliance, thus reinforcing our decision to use them as controls.

The results concerning the comparison of the differences in the root lengths and areas between the first and the second premolars (which served as controls), are presented in Table 2. A statistically-significant decrease in the root area of the first mandibular premolars was observed when compared to the second mandibular premolars.

Discussion

An advantage of this investigation is that Herbst appliance treatment was carried out solely by the first author or by postgraduate students under his supervision. Furthermore, treatment protocol was the same throughout the study, and the same investigator took and evaluated all the X-rays. The absence of a completely untreated control group of patients may be considered a drawback to this study. However, we considered it inappropriate and unethical to obtain periapical radiographs from an untreated sample of patients with the same malocclusion and age who would obviously not benefit from the radiation exposure. In an effort to overcome this shortcoming, the second premolars were used as control teeth; they were left relatively undisturbed during the Herbst appliance treatment, since no parts of the

Ergebnisse

Die Ergebnisse in Bezug auf die Mittelwerte, die Standardabweichungen und die Differenzen der Wurzellänge und -fläche der Prämolaren vor und nach der Behandlung, die p-Werte und die Größe des methodischen Fehlers sind in Tabelle 1 dargestellt. Es wurde keine statistisch signifikante Abnahme der Wurzellänge und -fläche der Prämolaren nach Entfernung der Herbst-Apparatur festgestellt. Im Gegenteil: Es wurde eine signifikante Zunahme der Wurzellänge und -fläche der zweiten unteren Prämolaren und der Wurzellänge der zweiten oberen Prämolaren festgestellt. Diesen Ergebnissen zufolge kann angenommen werden, dass die Wurzelentwicklung der zweiten Prämolaren ungestört fortgesetzt wurde, da diese nicht direkt in die Apparatur mit einbezogen waren. Dies bestätigt unsere Entscheidung, diese Zähne als Kontrollgruppe ausgewählt zu haben.

Die Ergebnisse bezüglich des Vergleichs zwischen der Wurzellänge und -fläche der ersten Prämolaren mit den zweiten (die als Kontrolle dienten), sind in Tabelle 2 dargestellt. Im Vergleich mit den zweiten unteren Prämolaren wurde bei den ersten unteren Prämolaren eine statistisch signifikante Abnahme der Wurzelfläche festgestellt.

Diskussion

Ein Vorteil dieser Untersuchung bestand in der Tatsache, dass die Behandlungen mit der Herbst-Apparatur entweder allein durch den Erstautor oder aber von Postgraduierten unter seiner Aufsicht ausgeführt wurden. Weiterhin blieb der Behandlungsverlauf über den Ablauf der Studie hinweg gleich, und derselbe Untersucher fertigte alle Röntgenaufnahmen an und führte anschließend deren Evaluation durch. Das Fehlen einer unbehandelten Kontrollgruppe von Patienten, die keine Behandlung erhielten, könnte als Nachteil der Studie angesehen werden. Wir erachteten es jedoch als unangemessen und unethisch, periapikale Röntgenbilder von einer unbehandelten, altersgleichen Patientengruppe mit der gleichen Anomalie anzufertigen, die aus der Strahlenexposition im Grunde keinerlei Nutzen ziehen könnten. Um diesen Nachteil auszugleichen, wurden die zweiten Prämolaren als Kontrollzähne genutzt; diese waren von der Herbst-Behand-

Table 2. Comparison of the differences before and immediately after Herbst appliance treatment between the first and second premolar root lengths and areas.

Tabelle 2. Vergleich der Unterschiede zwischen den Wurzellängen der ersten und zweiten Prämolaren vor und unmittelbar nach der Herbst-Behandlung.

Variables	First premolars		Second premolars		Difference of means	P-Value
	$\bar{x}_2 - \bar{x}_1$	SD	$\bar{x}_2 - \bar{x}_1$	SD		
Maxillary premolars (length in mm)	0.57	1.15	0.85	1.32	-0.28	0.246
Mandibular premolars (length in mm)	0.40	1.34	0.68	1.63	-0.28	0.353
Maxillary premolars (area in mm ²)	4.41	12.76	7.67	17.89	-3.26	0.282
Mandibular premolars (area in mm ²)	-2.48	12.14	5.78	15.01	-8.26	0.004

Herbst appliance were directly bonded to the maxillary and mandibular second premolars, and they were thus not subjected to directly-applied orthodontic forces. However, forces may have been indirectly applied on those teeth via their mesial and distal contact points. For this reason, and because those teeth were clearly depicted in the periapical radiographs anyway, we considered it justifiable to evaluate these teeth as well and use them as controls.

Many clinicians and researchers incorporate a Hyrax palatal expansion screw into the Herbst appliance; the screw is used in conjunction with the appliance to correct any transversal discrepancy between the upper and lower dental arches, followed by the immediate forward positioning of the mandible. In this study, the Hyrax screw was considered as an indispensable part of the Herbst appliance and not a separate, independent orthodontic apparatus. In addition, we did not employ the Hyrax screw as a rapid maxillary expansion device; rather, the treating orthodontist just activated it gently once or twice at each appointment (time span between appointments ranged between 4 to 6 weeks). Therefore, its impact on the upper premolar roots should not be considered separately, but as a result of the Herbst appliance treatment.

Studies in random samples of orthodontically-treated and -untreated patients revealed that there is no consistent relationship between gender and the incidence of root resorption [1, 8, 12, 14, 16, 19, 28, 31, 32]. For this reason, we statistically evaluated the data from male and female patients in this study together.

The parallel technique for obtaining periapical radiographs has been used by other investigators when investigating and quantifying the occurrence of root resorption phenomena [8, 24, 35, 37]. Indeed, periapical radiographs are considered better than panoramic films for assessing root shape and morphology [35], and a considerable amount of relevant research has been devoted to using them [2, 6, 8, 23, 24, 37]. Moreover, they have also used that premolar root length calculation method [2]. The disadvantage in calculating root length using the anatomic points CEJ-distal and CEJ-mesial is that those points can sometimes be difficult to define, and they largely depend on an investigator's subjective opinion [6]. The radiographs used in this study were of very good quality, the positions of points CEJ-distal and CEJ-mesial were easily defined, and all radiographs were evaluated by the same investigator. Moreover, the teeth we investigated were not rotated or substantially moved during Herbst appliance treatment; all first premolars were rigidly connected via stainless-steel bands to the appliance's metallic frame, while we applied no kind of orthodontic appliance whatsoever on the second premolars.

When comparing the root morphology changes in the first and second premolars after active Herbst treatment separately, we observed that all lengths and areas of the premolar roots had increased, with the exception of the root area of

lung relativ unbeeinflusst, da keine Teile der Herbst-Apparatur direkt an den oberen oder unteren zweiten Prämolaren befestigt waren und daher keine direkten kieferorthopädischen Kräfte auf diese Zähne wirkten. Andererseits könnten über die mesialen und distalen Kontaktpunkte der Zähne indirekte Kräfte wirken. Deshalb und weil zudem diese Zähne in jedem Fall gut auf den periapikalen Röntgenbildern zu erkennen waren, hielten wir es für angemessen, sie ebenfalls zu untersuchen und sie als Kontrolle zu nutzen.

Eine Hyrax-Palatinalschraube zur Expansion wird von vielen Klinikern und in der Forschung häufig in die Herbst-Apparatur mit eingebaut; sie wird in Verbindung mit der Herbst-Apparatur genutzt, um transversale Diskrepanzen zwischen dem oberen und unteren Zahnbogen zu korrigieren, gefolgt von der sofortigen Ventraleinstellung des Unterkiefers. In dieser Studie wurde die Hyrax-Schraube als unverzichtbarer Teil der Herbst-Apparatur angesehen und nicht als weiteres, unabhängiges orthodontisches Gerät. Weiterhin wurde die Hyrax-Schraube nicht als schnelle Dehnungsapparat für den Oberkiefer benutzt, sondern nur vorsichtig vom behandelnden Kieferorthopäden ein- oder zweimal pro Kontrolltermin aktiviert. (Die Zeitspanne zwischen den Kontrollterminen variierte zwischen 4 und 6 Wochen.) Daher sollte ihr Effekt auf die Wurzeln der oberen Prämolaren nicht getrennt, sondern als Ergebnis der Herbst-Behandlung betrachtet werden.

Studien in zufällig ausgewählten Kollektiven von kieferorthopädisch behandelten und unbehandelten Patienten zeigten, dass keine konstante Beziehung zwischen dem Geschlecht und der Inzidenz von Wurzelresorptionen besteht [1, 8, 12, 14, 16, 19, 28, 31, 32]. Daher wurden die Daten männlicher und weiblicher Patienten in dieser Studie gemeinsam statistisch ausgewertet.

Die Paralleltechnik wurde auch von anderen Untersuchern bei der Anfertigung periapikaler Röntgenbilder eingesetzt, um das Auftreten von Wurzelresorptionen zu untersuchen und zu quantifizieren [8, 24, 35, 37]. In der Tat kann die Wurzelform und -morphologie mittels periapikaler Röntgenbilder besser eingeschätzt werden als mittels Panoramaschichtaufnahmen [35]. Sie wurden deshalb bereits in einer bemerkenswerten Anzahl relevanter Untersuchungen genutzt [2, 6, 8, 23, 24, 37]. Weiterhin wurde die Methode zur Berechnung der Wurzellänge der Prämolaren ebenfalls kürzlich angewendet [2]. Der Nachteil bei der Quantifizierung der Wurzellänge unter Einbeziehung der anatomischen Punkte CEJ-distal und CEJ-mesial ist, dass diese Punkte manchmal schwierig zu bestimmen sind und sie weithin von der persönlichen Einschätzung des Untersuchers abhängen [6]. Die in dieser Studie genutzten Röntgenbilder waren qualitativ sehr gut, die Position der Punkte CEJ-distal und CEJ-mesial konnte leicht definiert werden, und alle Röntgenbilder wurden von demselben Untersucher ausgewertet. Darüber hinaus wurden die untersuchten Zähne nicht rotiert oder während der Herbst-Behandlung über weite Strecken bewegt; alle ersten Prämolaren waren über Edelstahlbänder starr mit dem Metallrahmen

the first mandibular premolars, which decreased (albeit not to a statistically-significant extent) (Table 1). This finding, however, may suggest the occurrence of root resorption phenomena in the mandibular first premolars. In light of the fact that we also observed a statistically-significant reduction in root area of the first mandibular premolars in comparison with the respective changes in the second mandibular premolars (serving as controls) (Table 2), we concluded that the mandibular first premolars exhibited root resorption.

Posterior teeth usually exhibit root shortening during active orthodontic treatment independent of sex, age, extraction versus non-extraction therapy, and duration of active treatment [16]. However, teeth with incomplete root formation at onset of orthodontic treatment demonstrate root lengthening during active treatment [18]; nevertheless they did not reach their "normal" tooth length [16]. An interesting finding in this study was that the lengths of both the maxillary and mandibular premolars increased. There may be two explanations for this phenomenon.

Firstly, since the mean age of our treatment sample was 13.08 years and all premolars were in occlusion, root formation is regarded as nearly complete. According to Nolla, at that age, female maxillary and mandibular second premolars are at stages 9 and 9-, respectively, while male maxillary and mandibular second premolars correspond to stages 9- and 8+ [26]. This is analogous to root completion, with an open apex about to close. Root formation at our sample's age – especially that of the mandibular premolars – corresponds with stages G to H (root complete, apical foramen closed or about to close), according to van der Linden [38]. Of course, small increments of growth in the premolar apical area may remain, even though premolar root formation appears to be complete in the periapical radiographs. This may apply to the second premolars in particular, which usually develop later than the first premolars. Therefore, statistically-significant differences observed when comparing root area changes between the mandibular first and second premolars should be interpreted with some caution.

Secondly, the forces exerted by the banded Herbst appliance are mainly applied onto the anchorage teeth, namely the maxillary first molars and mandibular first premolars. This may explain the first mandibular premolars' tendency toward root resorption. Consequently, when forces were applied onto the second premolars during Herbst appliance treatment, they were transmitted indirectly via their mesial and distal contact points. This may explain why no root resorption was radiographically evident in maxillary or mandibular second premolars.

Among other factors, the occurrence of root resorption may depend on the magnitude of the orthodontic forces applied [4, 5, 10, 11, 15, 33, 34, 39]. The results of this investigation may be attributed to the fact that the forces transmitted by the Herbst appliance to the dentition are mainly low in magnitude [25]. Furthermore, there are reports claiming that

der Apparatur verbunden, während an den zweiten Prämolaren keinerlei kieferorthopädische Apparatur befestigt war.

Beim getrennten Vergleich der Änderungen in der Wurzelmorphologie bei den ersten bzw. zweiten Prämolaren nach der aktiven Herbst-Behandlung wurde beobachtet, dass sich sowohl deren Längen als auch deren Flächen vergrößerten, außer der Wurzelfläche der ersten unteren Prämolaren, die abnahm, wenn auch nicht statistisch signifikant (Tabelle 1). Dieses Ergebnis kann jedoch als Auftreten von Wurzelresorptionen an den ersten unteren Prämolaren verstanden werden. In Anbetracht der Tatsache, dass die Wurzelfläche der unteren ersten Prämolaren im Vergleich zu den korrespondierenden Änderungen im Bereich der unteren zweiten Prämolaren, die als Kontrollzähne dienten, statistisch signifikant abnahm (Tabelle 2), könnte außerdem gefolgert werden, dass die unteren ersten Prämolaren Wurzelresorptionen aufwiesen.

In der Regel ist das Auftreten von verkürzten Wurzeln an Seitenzähnen während der kieferorthopädischen Behandlung unabhängig von Geschlecht, Alter, Extraktions- oder Non-Extraktionstherapie und Dauer der aktiven Behandlung [16]. Zähne mit nicht abgeschlossener Wurzelbildung zu Beginn der kieferorthopädischen Behandlung weisen jedoch eine weitere Längenentwicklung der Wurzeln während der aktiven Behandlung auf [18]; nichtsdestotrotz erreichen sie ihre „normale“ Wurzellänge nicht [16]. Ein interessantes Ergebnis dieser Studie war, dass die Längen sowohl der oberen als auch der unteren Prämolaren zunahmen. Für dieses Phänomen könnte es zwei Erklärungen geben.

Zum einen war wohl die Wurzelentwicklung nahezu abgeschlossen, da das mittlere Alter unserer Patientengruppe 13,08 Jahre betrug und alle Prämolaren in Okklusion standen. In diesem Alter befinden sich bei Mädchen die oberen und unteren Prämolaren im Entwicklungsstadium 9 bzw. 9- nach Nolla [26], während bei Jungen die oberen und unteren Prämolaren den Stadien 9- und 8+ entsprechen. Dies entspricht einer abgeschlossenen Wurzelentwicklung, der offene Apex ist dabei, sich zu schließen. Vor allem bei den unteren Prämolaren deckt sich die Wurzelentwicklung im Alter unserer Patientengruppe mit den Stadien G und H nach van der Linden [38] (Wurzel vollständig, Foramen apicale geschlossen oder dabei, sich zu schließen). Natürlich kann ein kleiner Längenzuwachs im apikalen Bereich der Prämolaren noch stattfinden, auch wenn in den periapikalen Röntgenaufnahmen die Wurzelentwicklung der Prämolaren abgeschlossen erscheint. Dies mag vor allem für die zweiten Prämolaren zutreffen, deren Entwicklung in der Regel später erfolgt als die der ersten. Daher sollten die beim Vergleich der Veränderungen im Wurzelbereich zwischen den unteren ersten und zweiten Prämolaren beobachteten statistisch signifikanten Unterschiede mit Vorsicht interpretiert werden.

Zweitens wirken sich die von der an Bändern befestigten Herbst-Apparatur produzierten Kräfte vorwiegend auf die Ankerzähne aus, das sind die ersten oberen Molaren und die ersten unteren Prämolaren. Dadurch könnte sich die Tendenz

continuous forces may lead to more extensive root resorption phenomena than do intermittent forces [16, 32]. Those forces delivered by the Herbst appliance are indeed intermittent, they depend on head posture and vary according to the biologic activity the patient engages in (i.e. maximum bite, chewing cycles, swallowing, rest position, etc.) and drop to zero at mouth opening [6].

Another important factor reported to correlate with root resorption is the distance that the root travels through bone during treatment [21, 36]. All the teeth investigated in this study were fixed by the Herbst appliance's stainless-steel frames: they did not rotate, they moved en bloc with the appliance, and their roots traveled a very short distance through bone.

Prolonged orthodontic treatment has also been shown to correlate with the magnitude of root resorption [11, 12, 16, 32, 36]. Taithongchai et al. [37] reported root resorption incidence on the maxillary central incisors in a randomly-selected sample of 400 cases after a mean treatment period of 21 months. The patients in our sample were treated with the Herbst appliance for a mean period of only 13.16 months.

Finally, we should keep in mind that periapical radiographs only provide a two-dimensional projection of the tooth's complex three-dimensional (3-D) structure, thus obscuring potentially minor local areas of root resorption. Complex, computerized 3-D reconstructions derived from computed tomography scans or magnetic resonance imaging may provide more detailed images. However, the high dose of radiation and high costs prohibit their implementation as standard diagnostic procedures in everyday clinical routine [9, 30].

Conclusion

Although no statistically-significant root morphology changes in the first and second premolars were observed following Herbst appliance treatment, we did note significantly greater root resorption in the mandibular first premolars than in the mandibular second premolars.

References

1. Beck BW, Harris EF. Apical root resorption in orthodontically treated subjects: analysis of edgewise and light wire mechanics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994;105:350-61.
2. Bishara SE, Vonwald L, Jakobsen JR. Changes in root length from early to mid-adulthood: resorption or apposition? *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999;115:563-8.
3. Brezniak N, Wasserstein A. Orthodontically induced inflammatory root resorption. Part I: the basic science aspects. *Angle Orthod* 2002;72:175-9.
4. Brezniak N, Wasserstein A. Orthodontically induced inflammatory root resorption. Part II: the clinical aspects. *Angle Orthod* 2002;72:180-4.
5. Casa MA, Faltin RM, Faltin K, et al. Root resorption in upper first premolars after application of continuous torque moment. Intra-individual study. *J Orofac Orthop* 2001;62:285-95.

zu Wurzelresorptionen im Bereich der ersten unteren Prämolaren erklären lassen. Sofern Kräfte auf die zweiten Prämolaren einwirken, werden diese folglich während einer Herbst-Behandlung indirekt über die mesialen und distalen Kontaktpunkte übertragen. Dies würde erklären, warum sowohl im Bereich der oberen als auch der unteren zweiten Prämolaren radiologisch keine Wurzelresorptionen erkennbar waren.

Unter anderem könnte das Auftreten von Wurzelresorptionen von der Größe der angewandten kieferorthopädischen Kräfte abhängen [4, 5, 10, 11, 15, 33, 34, 39]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung könnten auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass die Kräfte, die von der Herbst-Apparatur auf die Dentition übertragen werden, meist von geringer Größe sind [25]. Weiterhin wird berichtet, dass kontinuierliche Kräfte zu extensiveren Wurzelresorptionen führen als intermittierende Kräfte [16, 32]. Die Kräfte, die von einer Herbst-Apparatur übertragen werden, sind tatsächlich intermittierend, hängen von der Kopf Lage ab, variieren entsprechend der biologischen Funktion, die der Patient gerade ausübt (d.h. maximaler Zubbiss, Kauzyklen, Schlucken, Ruheposition etc.) und gehen gegen null bei der Mundöffnung [6].

Ein anderer wichtiger Faktor, der mit Wurzelresorptionen in Verbindung gebracht wird, ist die Strecke, die die Wurzel während der Behandlung durch den Knochen zurücklegt [21, 36]. In dieser Studie waren alle untersuchten Zähne durch den Stahlrahmen der Herbst-Apparatur fixiert, wurden nicht rotiert, wurden en bloc mit der Apparatur bewegt, und ihre Wurzeln legten nur eine geringe Strecke durch den Knochen zurück.

Auch lang andauernde orthodontische Behandlungen wurden mit der Anzahl auftretender Wurzelresorptionen in Beziehung gebracht [11, 12, 16, 32, 36]. Taithongchai et al. berichteten von Wurzelresorptionen an den oberen zentralen Inzisivi in einem zufällig ausgewählten Kollektiv von 400 Fällen nach einer mittleren Behandlungsdauer von 21 Monaten [37]. Die Patienten unserer Studie wurden mit der Herbst-Apparatur über einen mittleren Zeitraum von 13,16 Monaten behandelt.

Zuletzt ist anzumerken, dass periapikale Röntgenbilder nur eine zweidimensionale Abbildung der komplexen dreidimensionalen Struktur des Zahnes darstellen, so dass eventuell vorhandene kleinere lokalisierte Bereiche mit Wurzelresorptionen verborgen bleiben. Komplexe rechnergestützte bildgebende Verfahren, dreidimensionale Rekonstruktionen mittels Computertomographie oder magnetresonanztomographischer Verfahren könnten möglicherweise ein detaillierteres Bild ergeben. Die größere Strahlendosis und die hohen Kosten verbieten jedoch ihre Anwendung als alltägliche Standard-Diagnostikverfahren [9, 30].

Schlussfolgerung

Obwohl keine statistisch signifikanten Änderungen in der Wurzelmorphologie erster und zweiter Prämolaren nach der Behandlung mit der Herbst-Apparatur beobachtet wur-

6. Costopoulos G, Nanda R. An evaluation of root resorption incident to orthodontic intrusion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1996;109:543-8.
7. Dahlberg G. Statistical methods for medical and biological students. New York: Interscience Publications, 1940.
8. Dermaut LR, De Munck A. Apical root resorption of upper incisors caused by intrusive tooth movement: a radiographic study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1986;90:321-6.
9. Elefteriadis JN, Athanasiou AE. Evaluation of impacted canines by means of computerized tomography. *Int J Adult Orthod Orthognath Surg* 1996;11:257-64.
10. Faltin RM, Arana-Chavez VE, Faltin K, et al. Root resorptions in upper first premolars after application of continuous intrusive forces. Intra-individual study. *J Orofac Orthop* 1998;59:208-19.
11. Faltin RM, Faltin K, Sander FG, et al. Ultrastructure of cementum and periodontal ligament after continuous intrusion in humans: a transmission electron microscopy study. *Eur J Orthod* 2001;23:35-49.
12. Goldin B. Labial root torque: effect on the maxilla and incisor root apex. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989;95:209-19.
13. Hägg U, Tse ELK, Rabie ABM, et al. A comparison of splinted and banded Herbst appliances: treatment changes and complications. *Aust Orthod J*. 2002;18:76-81.
14. Harris EF, Kineret SE, Tolley EA. A heritable component for external apical root resorption in patients treated orthodontically. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1997;111:301-9.
15. Harry MR, Sims MR. Root resorption in bicuspid intrusion: A scanning electron microscope study. *Angle Orthod* 1982;235-58.
16. Hendrix I, Carels C, Kuijpers-Jagtman AM, et al. A radiographic study of posterior apical root resorption in orthodontic patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994;105:345-9.
17. Lu LH, Lee K, Imoto S, et al. Histological and histochemical quantification of root resorption incident to the application of intrusive force to rat molars. *Eur J Orthod* 1999;21:57-63.
18. Mavragani M, Boe OE, Wisth PJ, et al. Changes in root length during orthodontic treatment: advantages for immature teeth. *Eur J Orthod* 2002;24:91-7.
19. McFadden WM, Engstrom C, Engstrom H, et al. A study of the relationship between incisor intrusion and root shortening. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989;96:390-6.
20. McNab S, Battistuta D, Taverne A, et al. External apical root resorption of posterior teeth in asthmatics after orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999;116:545-51.
21. McNab S, Battistuta D, Taverne A, et al. External apical root resorption following orthodontic treatment. *Angle Orthod* 2000;70:227-32.
22. McNamara JA, Howe RP. Clinical management of the acrylic splint Herbst appliance. *Am Orthod Dentofacial Orthop* 1988;94:142-9.
23. Melsen B, Agerbaek N, Markenstam G. Intrusion of incisors in adult patients with marginal bone loss. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989;96:232-41.
24. Mirabela AD, Artun J. Prevalence and severity of apical root resorption of maxillary anterior teeth in adult orthodontic patients. *Eur J Orthod* 1995;17:93-9.
25. Nasiopoulos A. Biomechanics of the Herbst scharnier orthopedic method and head posture: A synchronized electromyographic and dynamographic study. Master's Thesis. Malmö, Sweden: Lund University, 1992.
26. Nolla CM. The development of the permanent teeth. *J Dent Child* 1960;27:254-66.
27. Obijou C, Pancherz H. Herbst appliance treatment of Class II, Division 2 malocclusions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1997;112:287-91.
28. Owman-Moll P, Kurol J, Lundgren D. Effects of a doubled orthodontic force magnitude on tooth movement and root resorptions. An inter-individual study in adolescents. *Eur J Orthod* 1996;18:141-50.
29. Pancherz H. Treatment of Class II malocclusions by jumping the bite with the Herbst appliance. *Am J Orthod* 1979;76:423-42.
30. Papadopoulos MA, Christou PK, Athanasiou AE, et al. Three-dimensional craniofacial reconstruction imaging. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2002;93:382-93.
31. Parker RJ, Harris EF. Directions of orthodontic tooth movements associated with external apical root resorption of the maxillary central incisor. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1998;114:677-83.
32. Reitan K. Effects of force magnitude and direction on tooth movement on different alveolar bone types. *Angle Orthod* 1964;34:244-55.
33. Reitan K. Initial tissue behavior during apical root resorption. *Angle Orthod* 1974;44:68-82.
34. Rygh P. Orthodontic root resorption studied by electron microscopy. *Angle Orthod* 1977;47:1-16.
35. Sameshima GT, Asgarifar KO. Assessment of root resorption and root shape: periapical vs panoramic films. *Angle Orthod* 2001;71:185-9.
36. Sharpe W, Reed B, Subtenly JD, et al. Orthodontic relapse, apical root resorption, and crestal alveolar bone levels. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1987;91:252-8.
37. Taithongchai R, Sookkorn K, Killiany DM. Facial and dentoalveolar structure and the prediction of apical root shortening. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1996;110:296-302.
38. Van der Linden FPGM. Numerical and graphical information. In: Van der Linden FPGM, ed. *Development of the Dentition*. Chicago: Quintessence Publishing, 1983:166-8.
39. Vardimon AD, Graber TM, Voss LR, et al. Determinants controlling iatrogenic external root resorptions and repair during and after palatal expansion. *Angle Orthod* 1991;61:113-22.
40. Wieslander L. Intensive treatment of severe class II malocclusions with a headgear-Herbst appliance in the early mixed dentition. *Am J Orthod* 1984;86:1-13.

Correspondence Address

Prof. A.E. Athanasiou, DDS, MSD, Dr Dent
 Department of Orthodontics
 Dean, School of Dentistry
 Aristotle University of Thessaloniki
 54124 Thessaloniki
 Greece
 Phone (+30/2310) 9995-56, Fax -49
 e-mail: aeathan@dent.auth.gr