

# Identification of a stable reference area for superimposing mandibular digital models

## Suche nach stabilen Referenzarealen zur Überlagerung von prä- und posttherapeutischen 3-D-Digitalmodellen des Unterkiefers

Kiyong An<sup>1</sup> · Insan Jang<sup>1</sup> · Dong-Soon Choi<sup>1</sup> · Paul-Georg Jost-Brinkmann<sup>2</sup> · Bong-Kuen Cha<sup>1</sup>

### Abstract

**Purpose.** The purpose of this retrospective study was to assess the stability of buccal and lingual alveolar bone surfaces for superimposing three-dimensional (3D) digital models of dental casts.

**Materials and methods.** The pre- and posttreatment dental casts and lateral cephalometric radiographs were obtained from 10 adult patients who had undergone orthodontic treatment entailing the extraction of four premolars. Five of them had bilateral mandibular tori and the other 5 patients had no torus. Dental casts were scanned with a three-dimensional (3D) surface scanning system and 3D digital models were reconstructed using 3D reverse modeling software. The pre- and posttreatment digital models were superimposed on the following reference areas by the best-fit method: Area 1, bilateral lingual surfaces of the alveolar process of the posterior teeth; Area 2, the lingual alveolar surface of the anterior and posterior teeth; Area 3, bilateral surfaces of the posterior teeth's buccal and lingual alveolar surfaces; Area 4, bilateral mandibular tori. The horizontal and vertical movements of the mandibular central incisors and first molars were measured on cephalometric radiographs and on the 3D digital models.

**Results.** In the 5 patients without a mandibular torus, the median differences between cephalograms and 3D digital models ranged from 0.8–1.9 mm and the maximum differences from 1.5–10.0 mm. The median and maximum differences between cephalograms and 3D digital models superimposed on Area 2 were greater than those superimposed on Areas 1 and 3. In the patients with mandibular tori, the median differences between cephalograms and 3D digital models were under 1.0 mm, the maximum difference being 0.7 mm.

### Zusammenfassung

**Studienzweck.** Retrospektive Studie zur Stabilität der Bukkal- und Lingualflächen des Alveolarknochens hinsichtlich ihrer Nutzung als Referenzareale zur Überlagerung von 3-D-Digitalmodellen des Unterkiefers, erstellt aus Oberflächenscans von Gipsmodellen.

**Methode.** Die Studie erfolgte an prä- und posttherapeutischen Gipsmodellen und Fernröntgenseitenbildern (FRS) von 10 Erwachsenen, deren kieferorthopädische Behandlungen die Extraktion von 4 Prämolaren umfasst hatte. Bei 5 Patienten war beidseitig ein Torus mandibularis, bei 5 Patienten kein Torus vorhanden. Per 3-D-Oberflächenscanner wurden die Gipsmodelle eingelese und mit Reverse-Modeling-Software prä- und posttherapeutische 3-D-Digitalmodelle nachkonstruiert, die dann im Best-Fit-Verfahren nach Maßgabe verschiedener Referenzareale 4-mal überlagert wurden: Referenzareal 1 umfasste die beidseitigen Lingualflächen des Alveolarknochens in den Seitenzahnbereichen, Referenzareal 2 seine Lingualfläche entlang des gesamten Kieferbogens, Areal 3 die Lingual- und Bukkalflächen in den Seitenzahnbereichen und Areal 4 die beidseitigen Tori mandibulares. Auf den jeweils überlagerten FRS und 3-D-Digitalmodellen wurden dann die horizontalen und vertikalen Bewegungen der unteren mittleren Schneidezähne und ersten Molaren vermessen.

**Resultate.** Für die 5 Patienten ohne Tori mandibulares ergaben sich mediane Differenzen zwischen den FRS und den 3-D-Digitalmodellen im Bereich von 0,8–1,9 mm und Maximaldifferenzen im Bereich von 1,5–10,0 mm. Die Überlagerungen der 3-D-Digitalmodelle nach Maßgabe von Referenzareal 2 führten gegenüber

<sup>1</sup> Department of Orthodontics, College of Dentistry, Gangneung-Wonju National University, Gangneung

<sup>2</sup> Department of Orthodontics, Dentofacial Orthopedics and Pedodontics, Center for Dental and Craniofacial Sciences, Charité – Universitätsmedizin Berlin, Berlin

Received: 16 October 2013 ; accepted: 23 April 2014;  
published online: 8 August 2015

This manuscript is based on a poster that was awarded the best poster prize in 2011 at the 85th annual meeting of the DGKFO in Stuttgart, Germany.

Dieses Manuskript beruht auf einem Poster, das bei der 85. Wissenschaftlichen Jahrestagung der DGKFO in Stuttgart 2011 mit dem Posterpreis prämiert wurde.

J Orofac Orthop 2015; 76:508–519  
DOI 10.1007/s00056-015-0310-8

**Conclusion.** The buccal and lingual alveolar surface near the dentition seems to be inappropriate as a reference area for superimposing 3D mandibular digital models of patients without a mandibular torus. Mandibular tori in adult patients are stable structures which can be used as reference areas for the superimposition of 3D mandibular digital models.

## Keywords

Superimposition · Three-dimensional digital models · Mandible · Mandibular torus · Tooth movement

## Introduction

It is necessary to be able to measure the movement of teeth retrospectively to evaluate the outcome of orthodontic treatment. Conventionally, tooth movements have been measured by superimposing pre- and posttreatment cephalometric radiographs registered on stable anatomical landmarks according to various superimposition methods [4, 15, 16, 19]. However, the superimposition of cephalograms involves several complications, such as tracing errors, magnification, image distortion [20], and difficulty in identifying bilateral dental and skeletal structures. In addition, taking cephalograms exposes patients to radiation, which is why radiographs cannot be taken frequently on a routine basis.

Three-dimensional (3D) surface scanners have become a state-of-the-art reality in orthodontics, yielding 3D digital models for the diagnosis and evaluation of orthodontic treatment [6, 7, 8, 13]. The superimposition of 3D images of dental casts enables us to evaluate individual tooth movements three-dimensionally. However, this requires a stable reference upon which to superimpose. Several investigators have evaluated the palatal rugae as a reference area in the maxilla for superimposition [1, 2, 3, 13]. We had also proposed the palate as a reference area for superimposition and compared tooth movements measured on cephalograms and 3D digital models in orthodontic patients undergoing the extraction of premolars [6].

Until now, no report has been published estimating the stability of anatomical landmarks in the mandible for superimposing 3D mandibular digital models. Björk and Skieller [5] reported that stable structures in the mandible are the inner contour of the cortical plate at the lower border of the symphysis, the trabecular structure in the symphysis, the contour of the mandibular canal, and the lower contour of a mineralized molar germ before the root begins to develop. However, these structures are of course not visible on dental casts and teeth cannot serve as reference items as they are themselves subject to orthodontic movement.

den FRS zu größeren medianen und maximalen Differenzen als die Überlagerungen auf Basis der Referenzareale 1 und 3. Für die 5 Patienten mit beidseitigem Torus betrug die medianen Differenzen unter 1,0 mm und die maximale Differenz 0,7 mm.

**Schlussfolgerung.** Bei Patienten ohne Tori mandibulares scheinen die Bukkal- und Lingualflächen des Alveolarknochens nahe der Bezahnung keine geeignete Basis zur Überlagerung von 3-D-Digitalmodellen des Unterkiefers darzustellen. Sofern solche Tori bei erwachsenen Patienten anzutreffen sind, handelt es sich bei ihnen um nutzbare, stabile Referenzareale zur Überlagerung solcher virtueller Unterkiefermodelle.

## Schlüsselwörter

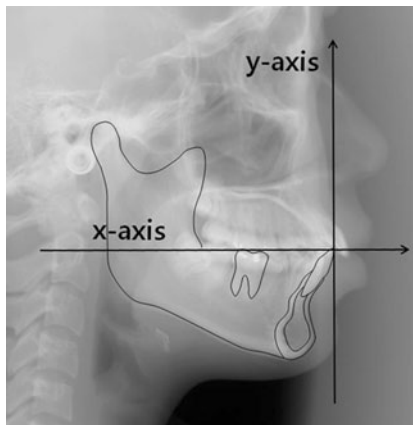
Überlagerung · Digitale 3-D-Modelle · Unterkiefer · Torus mandibularis · Zahnbewegung

## Einleitung

Zur Erfolgsbeurteilung von kieferorthopädischen Behandlungen müssen die erzielten Zahnbewegungen retrospektiv vermessen werden. Die konventionelle Methode für solche Vermessungen besteht darin, dass man Fernröntgenseitenbilder (FRS) der Ausgangs- und Endsituation auf stabile anatomische Referenzstrukturen registriert und mit einer von verschiedenen möglichen Methoden überlagert [4, 15, 16, 19]. Jedoch werden diese FRS-Überlagerungen durch Faktoren wie Durchzeichnungsfehler, Vergrößerungen, Bildverzerrungen [20] und Probleme beim Lokalisieren beidseitiger dentaler oder skelettaler Strukturen erschwert. Hinzu kommt, dass die Anfertigung der FRS für die Patienten mit einer Strahlenbelastung verbunden ist, sodass ein oftmaliger routinemäßiger Einsatz dieser Methode nicht in Frage kommt.

3-D-Oberflächenscanner sind heute Stand der Technik in der Kieferorthopädie. Mit ihrer Hilfe lassen sich digitale Modelle zur Diagnose und Therapiebeurteilung erstellen [6, 7, 8, 13]. Durch Überlagern solcher auf Gipsmodellen beruhender 3-D-Bilder lassen sich einzelne Zahnbewegungen räumlich nachvollziehen. Allerdings setzt dies voraus, dass stabile Referenzstrukturen für solche Überlagerungen vorhanden sind. Mehrere Autoren beurteilten die Gaumenfalten als Referenzareal zur Überlagerung von 3-D-Digitalmodellen des Oberkiefers [1, 2, 3, 13]. Auch wir hatten – im Zusammenhang mit Prämolarenextraktionen und Vermessen kieferorthopädischer Zahnbewegungen an 3-D-Digitalmodellen gegenüber FRS – den Gaumen als Referenzareal vorgeschlagen [6].

Bislang keine Erkenntnisse zur Stabilität anatomischer Referenzstrukturen lagen für 3-D-Überlagerungen von digitalen Unterkiefermodellen vor. Stabile Strukturen in diesem Kiefer wären nach Björk und Skieller [5] die innere Kontur der Kortikalis am Unterrand der Symphyse, die Trabekelstruktur in der Symphyse, die Kontur des Unterkieferkanals und die untere Kontur mineralisierter Molarenkeime vor Einsetzen der Wurzelentwicklung. Allerdings sind diese Strukturen auf Gipsmodellen



**Fig. 1** ▲ Coordinate system of cephalograms. The x-axis passes through the mandibular central incisor edge and distal cusp tip of the mandibular first molar. The y-axis runs perpendicular to the x-axis through the incisal edge.

**Abb. 1** ▲ Koordinatensystem für die FRS: Die x-Achse durchquert die Spitze der unteren mittleren Schneidekante und die distale Höckerspitze des ersten unteren Molaren; die y-Achse verläuft senkrecht hierzu durch die Spitze der unteren mittleren Schneidekante

Lower dental casts yield 3D information on buccal and lingual alveolar surfaces. The purpose of this preliminary study was to assess the stability of the buccal and lingual alveolar surfaces as reference areas for superimposing 3D mandibular digital models. As some adult patients have mandibular tori on their lingual alveolar surfaces, this pilot study also aimed at comparing superimposition in patients with and without tori.

## Materials and methods

### Patients

The dental casts and lateral cephalograms evaluated in this study were obtained from 10 patients (6 women, 4 men) before and after orthodontic treatment at the Department of Orthodontics, Gangneung-Wonju National University Dental Hospital. Five patients had a mandibular torus on both lingual sides, while the other 5 patients had no mandibular torus. Our inclusion criteria were as follows: (1) adult patients, (2) no congenital deformities or skeletal asymmetry in the craniofacial region, (3) good quality pretreatment and posttreatment dental casts and cephalograms. All patients had undergone orthodontic treatment involving the extraction of four premolars. The mean duration of treatment was 33 months; their ages ranged from 16.6–47.8 years (mean 24.9 years, standard deviation [SD] 10).

### Cephalometric analysis

Lateral cephalometric radiographs were taken before (T1) and after (T2) orthodontic treatment with a CX-90SP unit (Asahi Roentgen, Kyoto, Japan). The magnification ratio was 1–1.1.

nicht zu sehen, und Zähne scheiden als Referenz aus, weil sie der kieferorthopädischen Bewegungskraft selbst unterliegen.

Sehr wohl liefern Gipsmodelle räumliche Informationen zur bukkalen und lingualen Oberflächenarchitektur des Alveolar-knochens. Die vorliegende Pilotstudie befasste sich mit der Stabilität dieser Flächen als Referenzstrukturen zur Überlagerung von digitalen 3-D-Unterkiefermodellen. Angesichts der bei manchen Erwachsenen an den Lingualflächen des Alveolar-knochens anzutreffenden Tori mandibulares sollte bei dieser Untersuchung außerdem das Vorliegen beziehungsweise Fehlen solcher Tori berücksichtigt werden.

## Material und Methode

### Patienten

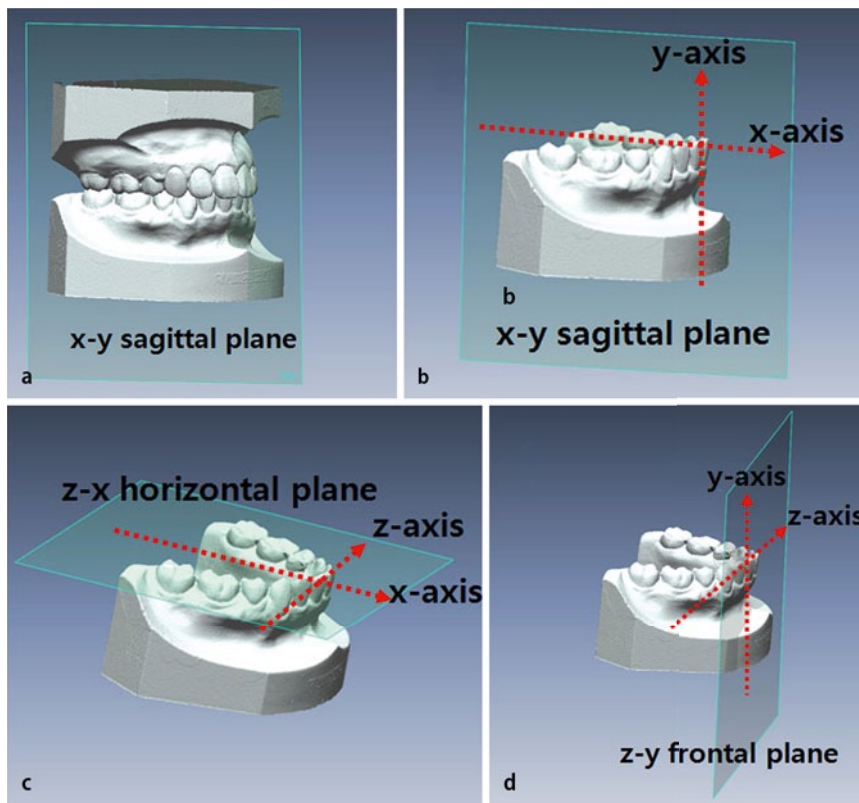
Die Studie erfolgte an prä- und posttherapeutischen Gipsmodellen und FRS von 10 Patienten (6 Frauen, 4 Männer) unserer Abteilung für Kieferorthopädie an der Gangneung-Wonju National University. In 5 dieser Fälle fanden sich linguale Tori auf beiden Unterkieferseiten, die anderen 5 wiesen keine Tori auf. Aufgenommen wurden nur i) Erwachsene ohne ii) angeborene Formanomalien oder skeletale Asymmetrien im Bereich des Gesichtsschädels, für die iii) prä- und posttherapeutische Gipsmodelle und FRS von guter Qualität vorlagen. Allen Patienten waren im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlung 4 Prämolaren extrahiert worden. Die mittlere Therapie-dauer betrug 33 Monate, das mittlere Alter  $24,9 \pm 10$  (16,6–47,8) Jahre.

### Auswertung der Fernröntgenseitenbilder

Die für die Studie verwendeten FRS waren jeweils vor und nach der kieferorthopädischen Behandlung angefertigt worden (CX-90SP; Asahi Roentgen, Kyoto, Japan). Das Vergrößerungsverhältnis betrug 1:1,1. Durchgezeichnet wurden sie in konventioneller Weise auf transparenten Acetatfolien unter Verwendung einer Durchlichtbox mit Halbieren aller beidseitigen Strukturen. Die prätherapeutische Durchzeichnung erhielt ein Koordinatensystem mit der Okklusionsebene als x-Achse (Verbindungsline zwischen der Spitze des unteren mittleren Schneidezahns und der distalen Höckerspitze des ersten Molaren) und mit einem hierauf gefällten Lot durch die Schneidezahnspitze als y-Achse (**Abb. 1**). Zur Überlagerung der jeweiligen prä- und posttherapeutischen FRS wurden diese am Unterrand von Unterkiefer und Symphyse ausgerichtet. Auf dieser Basis erfolgten Vermessungen der horizontalen und vertikalen Bewegungen der Schneidezahnspitze sowie der distalen Höckerspitze des ersten Molaren. Die Messeinheit betrug stets 0,5 mm.

### Auswertung der 3-D-Digitalmodelle

Gipsmodelle von Ober- und Unterkiefer wurden mit einem Laserscanner (KOD-300; Orapix, Seoul, Republik Korea) auf  $\pm 0,05$  mm genau erfasst. Ein zusätzlicher Scan diente zur Erfassung der Bukkalflächen auf den Modellpaaren in maximaler Interkuspidation (**Abb. 2a**). Die Scandaten wurden in 3-D-



**Fig. 2** ◀ Coordinate system for 3D mandibular digital models. **a, b** x–y sagittal plane constructed on the midpalatal suture of the maxillary model transferred to the mandibular model. **c** z–x horizontal plane is perpendicular to sagittal plane and passing the midpoint of the bilateral incisor tips and distobuccal cusp of right first molar. **d** z–y frontal plane is perpendicular to the horizontal and sagittal planes, passing through the midpoint of the bilateral incisal edge.

**Abb. 2** ◀ Koordinatensystem für die digitalen 3-D-Modelle: Die x/y-Sagittalebene folgt der medianen Gaumennaht des auf das Unterkiefermodell übertragenen Oberkiefermodells (**a, b**), die x/z-Horizontalebene durchquert senkrecht zur Sagittalebene den Mittelpunkt zwischen den mittleren Schneidekanten und den distobukkalen Höcker des ersten rechten Molaren (**c**), und die y/z-Frontalebene durchquert senkrecht zur Sagittal- wie auch Horizontalebene den Mittelpunkt zwischen den mittleren Schneidekanten (**d**)

The cephalograms were traced on conventional translucent acetate papers using a transilluminating light box; all bilateral structures were bisected. A coordinate system was constructed on the pretreatment tracing (Fig. 1). The x-axis was defined as the occlusal plane, a line connecting the mandibular central incisor tip and distal cusp tip of the mandibular first molar. The y-axis was perpendicular to the x-axis through the mandibular incisor tip. Cephalograms at T1 and T2 were superimposed on the lower border of the mandible and symphysis. Horizontal and vertical movements were measured at the incisor tip and distal cusp tip of the first molar. All measurements were taken in 0.5 mm units.

### Three-dimensional digital model analysis

Maxillary and mandibular dental casts were scanned by a surface scanning system (KOD300, Orapix Co., Ltd., Seoul, Korea) with  $\pm 0.05$  mm resolution. The buccal surfaces of the maxillary and mandibular dental casts in maximum intercuspal position were recorded in a separate scan (Fig. 2a). The scanning data were imported into a 3D reverse modeling software (Rapidform XOR3, INUS Technology, Seoul, Korea) and 3D images of the dental casts were reconstructed from them.

A coordinate system was established on the digital models of T1 (Fig. 2). The x–y sagittal plane was constructed on the midpalatal suture of the maxillary model that had been recorded in occlusion with the lower dental cast for this purpose. The x–z horizontal plane was perpendicular to the sagittal plane, passing through the midpoint of the bilateral lower central incisal edges

Reverse-Modeling-Software (Rapidform XOR3; INUS Technology, Seoul, Korea) importiert und 3-D-Darstellungen der Gipsmodelle wurden nachkonstruiert. Auf den so generierten Digitalmodellen der Ausgangssituation errichteten wir ein Koordinatensystem (Abb. 2). Anschließend legten wir die x/y-Sagittalebene auf die mediane Gaumennaht des Oberkiefermodells, das zu diesem Zweck zusammen mit dem Unterkiefermodell in Okklusion gescannt worden war. Die x/z-Horizontalebene durchquerte senkrecht zur Sagittalebene den Mittelpunkt zwischen den unteren mittleren Schneidekanten und dem distobukkalen Höcker des ersten rechten Molaren. Die y/z-Frontalebene durchquerte senkrecht zur Horizontal- wie auch zur Sagittalebene den Mittelpunkt zwischen den unteren mittleren Schneidekanten.

### Ausrichtung der 3-D-Überlagerungen

Anschließend wurde das posttherapeutische, vom Unterkiefergipsmodell gewonnene 3-D-Digitalmodell nach Maßgabe von 4 definierten Referenzarealen jeweils im Best-Fit-Verfahren auf das prätherapeutische Modell überlagert. Tab. 1 und die Abb. 3 konkretisieren diese Abschnitte des unteren Alveolarknochens. Referenzareal 1 umfasste beidseitig die Lingualflächen des Alveolarknochens im Bereich der Prämolaren und Molaren (Abb. 3a), Referenzareal 2 seine Lingualfläche im gesamten Unterkieferbogen (Abb. 3b), Referenzareal 3 beidseitig seine Lingual- wie auch Bukkalflächen im Bereich der Prämolaren und Molaren (Abb. 3c), Referenzareal 4 die bei manchen Patienten anzutreffenden Tori mandibulares (Abb. 4). Die La-

<b>Tab. 1</b>	Reference areas used for superimposition of pre- and posttreatment 3D digital models.
<b>Tab. 1</b>	Referenzareale für die Überlagerung der digitalen 3-D-Modelle prä- und posttherapeutisch
Area 1	Lingual alveolar surfaces of both mandibular posterior segments extending from approximately 4 mm under the gingival margin to approximately 5 mm farther below and bilaterally from the mesial surface of the canine to the distal surface of the second molar
Area 2	Lingual alveolar surface of the entire mandibular arch, defined by the same superior and inferior borders as Area 1 and extending bilaterally to the distal surface of the second molar. The surface of the lingual frenulum was excluded
Area 3	Buccal and lingual alveolar surfaces of both mandibular posterior segments, defined by the same superior, mesial and distal borders as Area 1, and with inferior borders approximately 6 mm or approximately 5 mm below the superior border on the buccal or lingual aspect, respectively
Area 4	Surfaces of the bilateral mandibular tori

**Tab. 2** Tooth movements (in mm) measured on superimposed cephalograms versus on superimposed 3D digital models (superimposition here based on various defined reference areas) in patients without mandibular tori.

**Tab. 2** Zahnbewegungen (mm), Messungen auf überlagerten Zephalogrammen vs. auf überlagerten digitalen 3-D-Modellen (Überlagerung hier basierend auf unterschiedlichen definierten Referenzarealen), Patienten ohne Tori mandibulares

Patients without mandibular tori (n=5)								
	Patient	Cephalogram	3D digital models (Area 1   2   3)			Differences (Δ1   Δ2   Δ3)		
<b>Incisors horizontal</b>	P1	-6.5	-4.3	-2.9	-3.9	-2.2	-3.6	-2.6
	P2	-3.0	-2.9	-2.9	-2.5	-0.1	-0.1	-0.5
	P3	-4.0	-2.9	-0.4	-1.9	-1.1	-3.6	-2.1
	P4	-8.0	-7.0	-6.6	-7.2	-1.0	-1.4	-0.8
	P5	-3.0	-2.8	-2.5	-2.7	-0.2	-0.5	-0.3
<b>Incisors vertical</b>	P1	+2.5	-0.5	-7.5	-0.3	+3.0	+10.0	+2.8
	P2	-1.5	+0.3	-0.3	-2.7	-1.8	-1.2	+1.2
	P3	+2.0	+1.9	-1.7	+0.5	+0.1	+3.7	+1.5
	P4	+0.0	-2.6	-4.3	-1.9	+2.6	+4.3	+1.9
	P5	-1.0	-3.0	-4.7	-5.0	+2.0	+3.7	+4.0
<b>Molars horizontal</b>	P1	+2.0	+3.5	+5.2	+3.6	-1.5	-3.2	-1.6
	P2	+5.5	+4.6	+4.7	+5.3	+0.9	+0.8	+0.2
	P3	+1.0	+1.3	+4.4	+2.6	-0.3	-3.4	-1.6
	P4	+1.0	+1.9	+3.8	+2.9	-0.9	-2.8	-1.9
	P5	+2.5	+1.7	+2.1	+1.9	+0.8	+0.4	+0.6
<b>Molars vertical</b>	P1	+1.5	+0.3	-2.8	+0.3	+1.2	+4.3	+1.2
	P2	+1.5	-1.1	-1.0	-1.2	+2.6	+2.5	+2.7
	P3	+0.5	0.0	+1.0	+0.6	+0.5	-0.5	-0.1
	P4	+0.5	-1.1	-1.4	-0.7	+1.6	+1.9	+1.2
	P5	+2.0	+0.4	-0.2	+0.2	+1.6	+2.2	+1.8

*Positive values* mesial (x-axis) or extrusive (y-axis) movements, *negative values* distal (x-axis) or intrusive (y-axis) movements

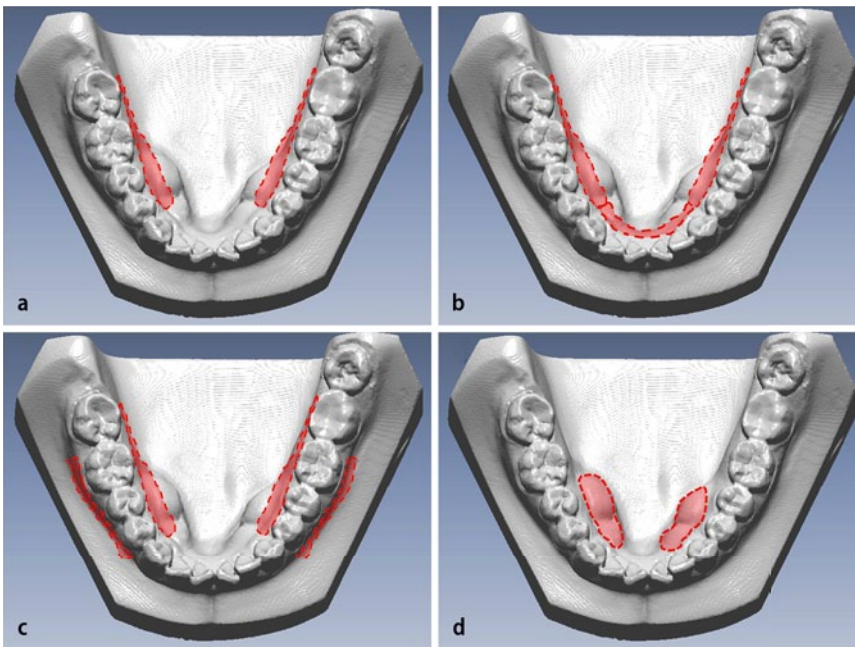
and the distobuccal cusp of the right mandibular first molar. The y-z frontal plane was perpendicular to the horizontal and sagittal planes, passing through the midpoint of the bilateral lower central incisal edges.

The 3D image of mandibular dental cast at T2 was superimposed on that of T1 by the best-fit method on the following reference areas (**Tab. 1 and Fig. 3**): Area 1, bilateral lingual surfaces of alveolar bone of the premolars and molars area (**Fig. 3a**); Area 2, the lingual alveolar surface of the entire dentition (**Fig. 3b**); Area 3, bilateral buccal and lingual alveolar surfaces of the premolars and molars area (**Fig. 3c**); Area 4, bilateral mandibular tori. The displacements of the bilateral lower central incisor edges and distobuccal cusp tips of lower first molars were measured on the x- and y-axes. The bilateral measurements were

geveränderungen des Mittelpunkts zwischen den unteren zentralen Inzisivi und der distobukkalen Höckerspitzen der ersten unteren Molaren wurden entlang der x- und y-Achse vermessen, die beidseitigen Messwerte summiert und zwecks Vergleich mit den FRS-Werten gemittelt. Positive x-/y-Werte stehen für Mesialisierung/Extrusion, negative für Distalisierung/Intrusion.

**Methodenfehler**

Zur Beurteilung des Methodenfehlers, der FRS-Durchzeichnungen und der darauf beruhenden Messungen sowie des Lokalisierens der Referenzpunkte auf den 3-D-Bildern wiederholte ein Untersucher (K. A.) nach 2 Wochen für alle 10 Patienten sowohl die Überlagerungen als auch das Vermessen



**Fig. 3** ◀ Four reference areas in the mandible for superimposing the 3D digital models (red): **a** bilateral lingual alveolar surfaces of the premolars and molars area, **b** lingual alveolar surface of the entire dentition, **c** bilateral buccal and lingual alveolar surfaces of the premolars and molars area, **d** bilateral mandibular tori.

**Abb. 3** ◀ Referenzareale für die Überlagerung der 3-D-Digitalmodelle. Areal 1 umfasst beidseitig die Lingualflächen des Alveolarknochens im Bereich der Prämolaren und Molaren (**a**), Areal 2 seine Lingualfläche im gesamten Unterkieferbogen (**b**), Areal 3 beidseitig seine Lingual- wie auch Bukkalflächen im Bereich der Prämolaren und Molaren (**c**), Areal 4 die – sofern vorhanden – Tori mandibulares (**d**)

summed up and the mean values calculated to compare with the values derived from the cephalograms. Positive values along the x- and y- axes indicate mesial and extrusive tooth movements.

#### Method error

To estimate the method error, cephalometric tracing plus measurements on the tracings, and landmark identification on 3D images, their superimposition and measurements on 3D images for all 10 patients were repeated after 2 weeks by one investigator (K.A.). The method error was calculated by Dahlberg's formula: mean square error ( $SE^2 = \Sigma d^2/2n$ ) [11]. The mean error was 0.30 mm for the cephalometric analysis, and 0.20 mm for the 3D digital model analysis.

#### Results

The tooth movements measured on cephalometric tracings and 3D digital models are presented in **Tab. 2** and **Tab. 3**. The median and maximum differences between the measurements on cephalograms and 3D digital models are shown in **Fig. 4**, **5**, **6**, and **Fig. 7**.

In the 5 patients without torus mandibularis, the median difference between cephalograms and 3D digital models superimposed on Area 1 ranged from 0.9–2.0 mm and those between cephalograms and 3D digital models registered on Area 3 from 0.8–1.9 mm (**Fig. 4**). The median and maximum differences between cephalograms and 3D digital models superimposed on Area 2 were greater than those regarding the superimposition on Areas 1 or Area 3. The median differences between cephalograms and 3D digital models were greater in terms of horizontal incisor movement than in their vertical movement. The maximum differences between cephalograms and 3D models ranged

der 3-D-Bilder. Die Berechnung des Methodenfehlers erfolgte mit der Dahlberg-Formel ( $SE^2 = \text{mittlerer quadratischer Fehler} = \Sigma d^2/2n$ ) [11]. Der mittlere Fehler betrug für die FRS-Auswertungen 0,30 mm und für die Auswertungen der 3-D-Digitalmodelle 0,20 mm.

#### Resultate

Die **Tab. 2** und **3** zeigen überblicksartig die auf den FRS-Durchzeichnungen und 3-D-Digitalmodellen gewonnenen Messwerte, und die **Abb. 4**, **5**, **6**, **7** illustrieren die medianen und maximalen Differenzen zwischen diesen Messungen.

Bei den 5 Patienten ohne Torus mandibularis führten die Überlagerungen der 3-D-Digitalmodelle auf Basis von Referenzareal 1 zu medianen Messdifferenzen gegenüber den FRS von 0,9–2,0 mm und auf Basis von Referenzareal 3 zu medianen Differenzen von 0,8–1,9 mm (**Abb. 4**). Für Referenzareal 2 waren die medianen und maximalen Messdifferenzen größer als für die Areale 1 und 3. Was die Bewegungen der mittleren Schneidezähne betrifft, waren die medianen Differenzen gegenüber den FRS für die horizontalen Messwerte größer als für die vertikalen. Die maximalen Messdifferenzen bei diesen Patienten ohne Tori bewegten sich zwischen 1,5 und 10,0 mm (**Abb. 5**).

Bei den Patienten mit Torus mandibularis (n=5) lagen die medianen Messdifferenzen unter 1,0 mm und waren mithin kleiner als in der Gruppe ohne Tori (**Abb. 6**). Referenzareal 4 zur Überlagerung der digitalen 3-D-Modelle führte zu maximalen Messdifferenzen von 0,4–0,7 mm. Die anderen Maximaldifferenzen betragen 2,7 mm für Referenzareal 1 sowie 2,4 mm beziehungsweise 1,9 mm für Referenzareal 2 und 3 (**Abb. 7** und **Tab. 3**).

**Tab. 3** Tooth movements (in mm) measured on superimposed cephalograms versus on superimposed 3D digital models (superimposition here based on various defined reference areas) in patients with mandibular tori.

**Tab. 3** Zahnbewegungen (mm), Messungen auf überlagerten Zephalogrammen vs. auf überlagerten digitalen 3-D-Modellen (Überlagerung hier basierend auf unterschiedlichen definierten Referenzarealen), Patienten mit Tori mandibulares

Patients with bilateral mandibular tori (n=5)										
	Patient	Cephalogram	3D digital models (Area 1   2   3   4)				Differences ( $\Delta 1$   $\Delta 2$   $\Delta 3$   $\Delta 4$ )			
<b>Incisors horizontal</b>	P6	-1.0	-1.2	-0.5	-0.8	-0.8	+0.2	-0.5	-0.2	-0.2
	P7	-2.0	-1.6	-1.1	-1.2	-2.5	-0.4	-0.9	-0.8	+0.5
	P8	-1.5	-2.7	-2.1	-2.0	-1.2	+1.2	+0.6	+0.5	-0.3
	P9	-2.5	-3.8	-3.2	-1.7	-2.1	+1.3	+0.7	-0.8	-0.4
	P10	-3.5	-2.8	-3.7	-1.9	-2.9	-0.7	+0.2	-1.6	-0.6
<b>Incisors vertical</b>	P6	+1.0	+0.8	+0.2	+0.3	+1.0	+0.2	+0.8	+0.7	0.0
	P7	+1.0	-0.6	-0.5	-0.9	+1.3	+1.6	+1.5	+1.9	-0.3
	P8	+1.0	+0.8	+0.1	+0.7	+1.0	+0.2	+0.9	+0.3	0.0
	P9	+1.5	+3.1	+2.8	+1.6	+1.6	-1.6	-1.3	-0.1	-0.1
	P10	0.0	-0.8	0.0	-1.6	+0.4	+0.8	0.0	+1.6	-0.4
<b>Molars horizontal</b>	P6	+2.0	+2.1	+2.9	+2.5	+2.6	-0.1	-0.9	-0.5	-0.6
	P7	0.0	+0.8	+1.6	+1.5	+0.2	-0.8	-1.6	-1.5	-0.2
	P8	+0.5	-0.8	-0.7	-0.4	+0.5	+1.3	+1.2	+0.9	0.0
	P9	+2.5	+0.6	+1.9	+3.3	+3.0	+1.9	+0.6	-0.8	-0.5
	P10	+2.5	+2.5	+1.8	+3.3	+2.6	0.0	+0.7	-0.8	-0.1
<b>Molars vertical</b>	P6	+1.0	-0.4	0.0	0.0	+1.2	+1.4	+1.0	+1.0	-0.2
	P7	-0.5	-0.2	-0.1	-0.2	-0.7	-0.3	-0.4	-0.3	+0.2
	P8	0.0	-2.7	-2.4	-1.7	-0.5	+2.7	+2.4	+1.7	+0.5
	P9	+1.0	+0.6	+0.8	+1.5	+1.4	+0.4	+0.2	-0.5	-0.4
	P10	-2.0	-1.6	-2.3	-1.0	-1.3	-0.4	+0.3	-1.0	-0.7

*Positive values* mesial (x-axis) or extrusive (y-axis) movements, *negative values* distal (x-axis) or intrusive (y-axis) movements

from 1.5–10.0 mm in the patients without torus mandibularis (Fig. 5).

In the patients with torus mandibularis, the median differences between cephalograms and 3D digital models were less than 1.0 mm, namely smaller than those in patients without torus mandibularis (Fig. 6). When 3D digital models were superimposed on Area 4, the maximum differences between cephalograms and 3D digital models ranged from 0.4–0.7 mm. The maximum differences between cephalograms and 3D digital models superimposed on Areas 1, 2, and 3 were 2.7, 2.4 mm, and 1.9 mm respectively (Fig. 7 and Tab. 3).

**Discussion**

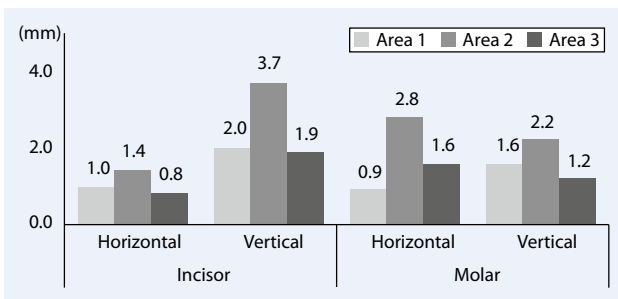
The present study aimed to assess the suitability of the buccal and lingual alveolar surfaces as reference areas for the superimposition of mandibular digital models. The measurements on the digital models were compared to those on cephalometric tracings as the current gold standard. Patients with and without torus were evaluated separately as we anticipated that the mandibular tori would have a significant impact on the accuracy of superimposing mandibular models.

In the patients without mandibular torus, we observed rather large differences between the measurements on the 3D digital

**Diskussion**

Gegenstand dieser Studie waren die Bukkal- und Lingualflächen des Alveolarknochens als potenzielle Referenzareale zur Überlagerung von digitalen Unterkiefermodellen. Hierzu wurden Messungen auf 3-D-Digitalmodellen mit Messungen auf FRS-Durchzeichnungen (als den aktuellen Goldstandard) verglichen. Patienten mit und ohne Tori mandibulares beurteilen wir separat, da wir von diesen Strukturen einen beträchtlichen Einfluss auf die Überlagerungsgenauigkeit der Unterkiefermodelle erwarteten. In der Tat fanden sich bei den Patienten ohne Tori recht große Messdifferenzen zwischen den 3-D-Digitalmodellen und den FRS, zumal wenn das Referenzareal den Alveolarknochen der unteren Frontzahnreihe mit umfasste (Areal 2, Abb. 4 und 5). Dieser Bereich erscheint im Zusammenhang mit der Extraktion von Prämolaren ungeeignet als Referenzareal für Überlagerungen, da die Schneidezähne sich während des Lückenschlusses eher nach distal bewegen und der Alveolarknochen in bukkolingualer Richtung remodelliert wird.

Ausgedehnte Schneidezahnbewegungen ziehen mitunter parodontale Veränderungen wie Gingivarezessionen und linguale Knochendehiszenzen nach sich [17, 21]. Molaren hingegen bewegen sich meist den Unterkieferbogen entlang nach mesial, sodass aller Wahrscheinlichkeit nach ein geringerer Remodel-



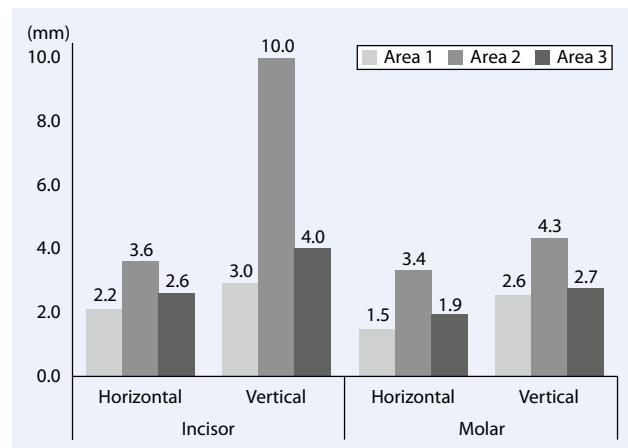
**Fig. 4** ▲ Median differences between measurements on cephalograms and 3D digital models superimposed on Areas 1, 2, and 3 of the patients without torus.

**Abb. 4** ▲ Patienten ohne Tori: mediane Unterschiede zwischen den Messergebnissen auf FRS und 3-D-Digitalmodellen je nach Referenzareal für die Überlagerungen (Areal 1, 2, 3)

models and the cephalograms, especially when the lingual alveolar surfaces of the anterior teeth were included in the reference area (Area 2, **Fig. 4** and **Fig. 5**). The alveolar bone of the lower anterior teeth appears to be unsuitable as a reference area for superimposition in patients undergoing the extraction of premolars. Incisors tend to move distally during space closure, and remodeling of the alveolar bone occurs in the buccolingual direction.

Occasionally, extensive incisor movement leads to periodontal alterations such as gingival recessions and bony lingual dehiscences [17, 21]. On the other hand, molars generally move mesially along the mandibular arch, which—most likely—requires less alveolar remodeling in the buccolingual direction. Moreover, premolars are usually extracted when a significant amount of space is required by anterior crowding. In other words, frequently the incisors are supposed to move more than the molars. The lingual surface of the anterior alveolar process is thus likely to be subject to change while retracting the incisors. An example of the superimposition of cephalograms and 3D digital models without mandibular tori is shown in **Fig. 8**. According to the cephalometric superimposition, the incisors moved distally 6.5 mm and extruded 2.5 mm (**Fig. 8b**). However, the tooth movements measured on the superimposed 3D digital models registered on the lingual alveolar surface (Area 2) were quite different from the results on the cephalograms (**Fig. 8b, c**). The lingual alveolar surface on the posttreatment model revealed more accentuated concavity than the pretreatment model (**Fig. 8a**). This difference in shape of the anterior lingual alveolar surfaces makes this area inappropriate as a stable reference for superimposing mandibular dental casts.

In this pilot study, patients not undergoing premolar extractions were excluded, as the displacement of anterior teeth and remodeling of alveolar bone are probably less pronounced in them than in patients who have undergone the extraction of premolars. We anticipated that superimposition on the buccal and lingual alveolar surfaces of the posterior teeth (Area 3) would be more reliable than superimposition on the lingual alveolar surface only (Area 1). However, we observed no signifi-



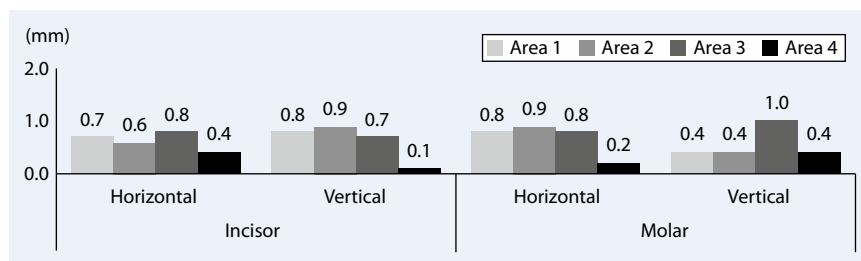
**Fig. 5** ▲ Maximum differences between measurements on the cephalograms and 3D digital models of the patients without torus.

**Abb. 5** ▲ Patienten ohne Tori: maximale Unterschiede zwischen den Messergebnissen auf FRS und 3-D-Digitalmodellen je nach Referenzareal für die Überlagerungen (Areal 1, 2, 3)

lierungsbedarf des Alveolarknochens in bukkolingualer Richtung besteht. Überdies sollten sich angesichts der Tatsache, dass bei signifikantem Platzbedarf durch Frontzahnengstand normalerweise Prämolaren extrahiert werden, die Schneidezähne oftmals stärker bewegen als die Molaren, sodass während der Retraktion der Schneidezähne mit Veränderungen an der Lingualfläche des frontalen Alveolarknochens zu rechnen ist. **Abb. 8** illustriert exemplarische Überlagerungen von FRS und digitalen 3-D-Modellen eines Patienten ohne Tori. Laut FRS-Überlagerung wurden die Schneidezähne durch die Behandlung um 6,5 mm distalisiert und um 2,5 mm extrudiert (**Abb. 8b**). Deutlich anders als die Messergebnisse auf den FRS präsentieren sich die Zahnbewegungen auf den nach Maßgabe von Referenzareal 2 (also der kieferweiten Lingualfläche des Alveolarknochens) überlagerten Modellen (**Abb. 8b, c**). Dieses Referenzareal umfasste nämlich am post- gegenüber dem prätherapeutischen Modell eine stärker akzentuierte Konkavität (**Abb. 8a**). Diese Formveränderung weist die Lingualfläche des Alveolarknochens im unteren Frontzahnbereich als instabil aus – und somit als ungeeignetes Referenzareal zur Überlagerung von Unterkiefermodellen.

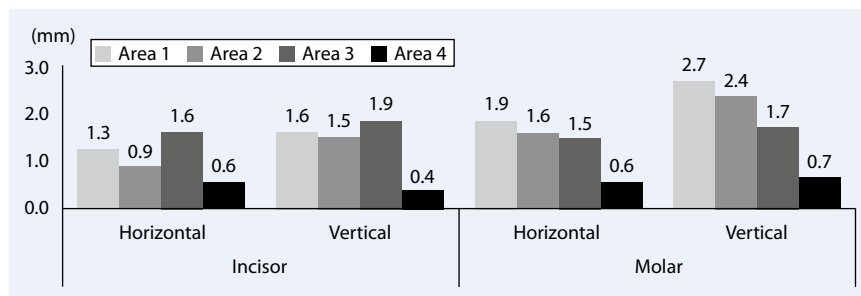
Aus unserer Pilotstudie ausgeschlossen blieben Behandlungsfälle ohne Extraktion von Prämolaren, da die Lageveränderungen der Frontzähne und die Remodellierung des Alveolarknochens bei solchen Patienten vermutlich weniger ausgeprägt sind. Ferner waren wir bei den Referenzarealen, die den Frontzahnbereich aussparten, davon ausgegangen, dass eine Ausweitung auf die Lingual- wie auch die Bukkalflächen des seitlichen Alveolarkammes (Referenzareal 3) zuverlässigere Überlagerungen liefern würde als eine Beschränkung auf die Lingualflächen (Referenzareal 1). Da jedoch letztlich kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Überlagerungsmodi zu verzeichnen war, ist zu bezweifeln, ob eine Einbindung der seitlichen Bukkalflächen nützlich ist. Die medianen Differenzen zwi-





**Fig. 6** ◀ Medians of the differences between the measurements on cephalograms and 3D digital models of the patients with torus.

**Abb. 6** ◀ Patienten mit Tori: mediane Unterschiede zwischen den Messergebnissen auf FRS und 3-D-Digitalmodellen je nach Referenzareal für die Überlagerungen (Area 1, 2, 3, 4)



**Fig. 7** ◀ Maximum differences between measurements on cephalograms and 3D digital models of the patients with torus.

**Abb. 7** ◀ Patienten mit Tori: maximale Unterschiede zwischen den Messergebnissen auf FRS und 3-D-Digitalmodellen je nach Referenzareal für die Überlagerungen (Area 1, 2, 3, 4)

cant difference in superimposition between Areas 1 and 3, and we are doubtful of the benefit of including the buccal alveolar surface of the posterior teeth in the reference area. Although the median differences between the cephalograms and 3D digital models superimposed on Areas 1 and 3 were modest (range 1.0–2.0 mm), the maximum differences ranged from 3.0–4.0 mm, which is clinically significant. Thus, the superimposition of 3D digital models of mandibular casts on the alveolar surfaces (Areas 1, 2 and 3) cannot be considered a reliable procedure in patients without mandibular torus. This most likely does not just apply to the adult patients as investigated in this study; it is even less reliable in growing patients.

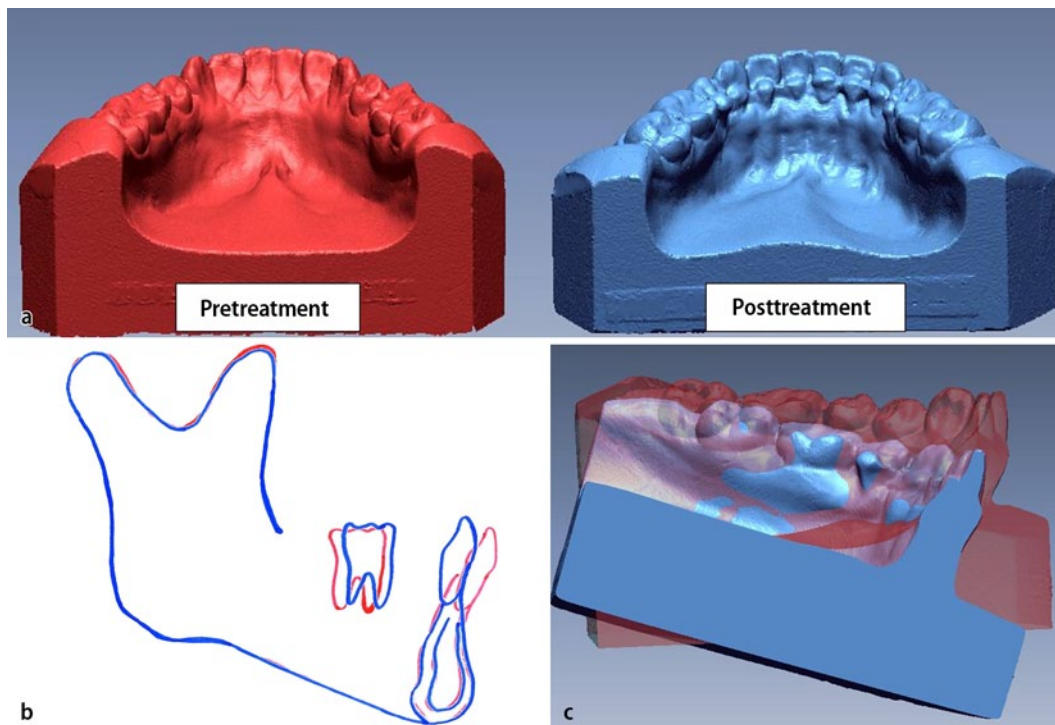
For patients without torus, the difference in vertical incisor movement was greater than the difference in horizontal movement of incisors (Fig. 4). The errors along the y-axis may be more substantial than those in the x-axis because of the morphological characteristics of alveolar bone, namely its rather flat, vertically oriented surfaces which more or less fit into each other in different vertical positions. In comparison to the cephalograms, distal movements of the anterior teeth were underestimated and mesial molar movements overestimated in the superimposition of 3D digital models in patients without mandibular torus (Tab. 2). Interpremolar and intermolar widths generally decrease during orthodontic treatment in patients having undergone four premolar extractions [9]. The decreased arch width in the posttreatment models may provide a reason to shift the posttreatment model more anteriorly during best-fit superimposition.

Interestingly, mandibular tori might be used as stable reference areas in 3D mandibular digital models of orthodontic patients. The median differences in measurements between cephalograms and 3D digital models of the patients with mandibular tori were smaller than those in the patients without mandibular torus. Moreover, when mandibular tori were used as reference areas (Area 4), the differences between the meas-

ures between the FRS and the superimposed 3-D-Digitalmodellen gingen nicht über moderate 1,0–2,0 mm hinaus, während sich jedoch die maximalen Differenzen in einem klinisch durchaus signifikanten Bereich von 3,0–4,0 mm bewegten. Insgesamt bilden die Oberflächenmerkmale des Alveolarknochens bei erwachsenen Patienten ohne Tori mandibulares (also die Referenzareale 1, 2, 3) keine zuverlässige Basis zur Überlagerung von prä- und posttherapeutischen Unterkiefermodellen, und diese Zuverlässigkeit wäre bei Heranwachsenden mit hoher Wahrscheinlichkeit noch weniger gegeben.

Bezogen auf die Patienten ohne Tori verzeichneten wir größere Differenzen bei den vertikalen als bei den horizontalen Schneidezahnbewegungen (Abb. 4). Vielleicht führt die Morphologie des Alveolarknochens mit seinen recht flachen (auf unterschiedlichen vertikalen Kieferpositionen mehr oder weniger ineinander passenden) Oberflächen zu größeren Fehlern entlang der y-Achse als der x-Achse. Verglichen mit den Messungen auf den FRS ergaben jene auf den überlagerten 3-D-Digitalmodellen bei den Patienten ohne Tori zu niedrige Werte für die Distalisierung der Frontzähne und zu hohe Werte für die Mesialisierung der Molaren (Tab. 2). Generell verringern sich nach Extraktion von 4 Prämolaren bei kieferorthopädischen Behandlungen die Interprämolaren- und Intermolarenabstände [9]. Diese reduzierten Bogenbreiten in posttherapeutischen Modellen könnten bei Best-Fit-Überlagerungen zu Frontalverschiebungen führen.

Interessant ist, dass Tori mandibulares bei kieferorthopädischen Patienten tatsächlich nützliche, stabile Referenzareale zur Überlagerung von digitalen 3-D-Unterkiefermodellen darstellen könnten. Erstens verzeichneten wir in unserer Torusgruppe kleinere mittlere Messdifferenzen zwischen den digitalen 3-D-Modellen und den FRS als in der Gruppe ohne Tori, und zweitens waren diese Differenzen bei Überlagerung der 3-D-Digitalmodelle auf Basis der Tori (Referenzareal 4) auch innerhalb der Torusgruppe selbst mit <1 mm am kleinsten. Es handelt sich bei



**Fig. 8** ▲ Superimposition of cephalograms and 3D digital models in a patient without mandibular tori. **a** Lingual view of pretreatment (*red*) and posttreatment (*blue*) 3D digital models. The lingual alveolar surface has obviously been remodeled after retraction, making the scalloped surface clearly visible. **b** The incisors moved distally and were extruded during treatment according to the cephalometric superimposition. **c** However, the superimposition of 3D digital models registered on Area 2 showed quite a different movement, indicating that Area 2 is not a reliable reference area for superimposition.

**Abb. 8** ▲ Überlagerungen von FRS und 3-D-Digitalmodellen in einem Fall ohne Tori mandibulares: Die linguale Ansicht der prä-/posttherapeutischen 3-D-Digitalmodelle (*rot/blau*) macht deutlich, dass die Retraktion offenbar eine Remodellierung des Alveolarknochens nach sich gezogen und die Girlandenform seiner Lingualfläche freigelegt hat (**a**). Die kephalometrische Überlagerung zeigt neben der Distalbewegung der Inzisivi auch eine Extrusion (**b**). Dagegen zeigt die Überlagerung der digitalen 3-D-Modelle auf Referenzareal 2 eine ganz andere Bewegung der Inzisivi, sodass Areal 2 zur Überlagerung bei Patienten mit Prämolarenextraktion ungeeignet erscheint. Die beiden anderen Bilder zeigen die FRS-Überlagerung (**b**) und die Überlagerung der 3-D-Digitalmodelle nach Maßgabe von Referenzareal 2 (**c**)

urements on cephalograms and 3D digital models were the smallest, namely less than 1.0 mm.

Mandibular tori consist of a primarily nodular mass of dense, cortical lamellar bone covered with a thin layer of soft tissue [18] which is not likely to be affected by orthodontic treatment or artifacts caused by compression or shifting of movable soft tissue which may occur in other areas. Even if mandibular tori were to change progressively in size or morphology due to local factors such as masticatory forces [10, 12], this is unlikely to occur within 2 or 3 years of orthodontic treatment in adult patients. However, the prevalence of mandibular tori varies by ethnic origin from 0.2–61% [14]. They can therefore only be used for superimposition in a limited number of patients.

In addition to the mandibular tori, the mylohyoid ridge also has a distinctive morphology, but this can only be utilized when using the functional impression technique. On the other hand, if mandibular models are three-dimensionally registered in occlusion with maxillary casts, the displacement of mandibular teeth could be measured by superimposing on maxillary anatomical landmarks (patent DE102007051833 B4). However,

diesen Tori um vorwiegend noduläre, dünnlagig von Weichgewebe bedeckte Massen aus dichtem kortikalem Lamellenknochen [18], der von kieferorthopädischen Behandlungen sowie auch von Artefakten, die andernorts durch Kompression oder Verlagerung der beweglichen Weichteile entstehen können, weitestgehend unbeeinflusst bleiben dürfte. Selbst wenn sich Größe oder Morphologie eines Torus durch einwirkende Faktoren, etwa durch Kaukräfte, sukzessive verändern sollten [10, 12], wird sich dieser Prozess bei Erwachsenen kaum innerhalb von 2–3 Jahren nach einer kieferorthopädischer Behandlung bemerkbar machen. Allerdings ist der mögliche Umfang einer Nutzung von Tori mandibulares insofern eingeschränkt, als die Prävalenz dieser Strukturen je nach Ethnie zwischen 0,2 und 61% schwankt [14].

Neben den Tori hätte auch die Crista mylohyoidea eine markante Morphologie, deren Nutzung jedoch eine Funktionsabformung erfordern würde. Auch könnte man, um Lageveränderungen der unteren Zähne zu messen, Referenzstrukturen des Oberkiefers durch dreidimensionales Registrieren von Unterkiefermodellen auf Oberkiefermodelle nutzen (Patent

these measurements reflect not only dental movements but also mandibular repositioning.

In the present study, the sagittal plane on the 3D digital model was constructed on the midpalatal suture of the maxilla subsequently transferred to the mandible. To reduce systematic error occurring from the different coordinate systems of cephalograms and 3D digital models, we excluded patients with skeletal asymmetry or functional shift of the mandible as well as children, as the mandible may grow substantially during the treatment course.

Although the number of patients in this pilot study was small, it became obvious that the areas investigated as offering stable reference for mandibular 3D best-fit superimposition were unreliable unless the patients had mandibular tori. However, this is not to say that Areas 1, 2, or 3 might not be used for patients undergoing nonextraction therapy or limited orthodontics.

## Conclusion

The buccal and lingual alveolar surfaces near the dentition seem to be inappropriate as stable reference areas for superimposing mandibular digital models in patients without mandibular torus. The alveolar bone of the lower anterior teeth is subject to more remodeling than that of the posterior teeth in orthodontic patients undergoing the extraction of premolars. The mandibular torus in adult patients is a potential reference area for the superimposition of 3D mandibular digital models.

## Compliance with ethical guidelines

**Conflict of interest.** Kiyong An, Insan Jang, Dong-Soon Choi, Paul-Georg Jost-Brinkmann, and Bong-Kuen Cha state that there are no conflicts of interest.

The accompanying manuscript does not include studies on humans or animals

## References

- Almeida MA, Phillips C, Kula K et al (1995) Stability of the palatal rugae as landmarks for analysis of dental casts. *Angle Orthod* 65:43–48
- Ashmore JL, Kurland BF, King GJ et al (2002) A 3-dimensional analysis of molar movement during headgear treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 121:18–29
- Bailey LTJ, Esmailnejad A, Almeida MA (1996) Stability of the palatal rugae as landmarks for analysis of dental casts in extraction and nonextraction cases. *Angle Orthod* 66:73–78
- Björk A, Skieller V (1972) Facial development and tooth eruption. An implant study at the age of puberty. *Am J Orthod* 62:339–383
- Björk A, Skieller V (1983) Normal and abnormal growth of the mandible. A synthesis of longitudinal cephalometric implant studies over a period of 25 years. *Eur J Orthod* 5:1–46
- Cha BK, Lee JY, Jost-Brinkmann P-G et al (2007) Analysis of tooth movement in extraction cases using three-dimensional reverse engineering technology. *Eur J Orthod* 29:325–331
- Choi JI, Cha BK, Jost-Brinkmann P-G et al (2012) Validity of palatal superimposition of 3-dimensional digital models in cases treated with rapid maxillary expansion and maxillary protraction headgear. *Korean J Orthod* 42:235–241
- Choi DS, Jeong YM, Jang I et al (2010) Accuracy and reliability of palatal superimposition of three-dimensional digital models. *Angle Orthod* 80:497–503
- Gardner SD, Chaconas SJ (1976) Posttreatment and postretention changes following orthodontic therapy. *Angle Orthod* 46:151–161

DE102007051833 B4). Die so gewonnenen Messwerte würden neben Zahnbewegungen auch Lageveränderungen des Unterkiefers umfassen.

Für unsere Studie konstruierten wir die Sagittalebene auf dem digitalen 3-D-Modell zunächst auf der medianen Gaumennaht und übertrugen sie dann auf den Unterkiefer. Um einen systematischen Fehler aufgrund der unterschiedlichen, für die FRS und die digitalen 3-D-Modelle verwendeten Koordinatensysteme zu reduzieren, blieben Patienten mit skelettalen Asymmetrien oder funktionalen Verlagerungen des Unterkiefers ausgeschlossen. Dasselbe galt aufgrund ihres potenziell erheblichen Unterkieferwachstums während der Behandlung auch für Kinder. Die vorliegende Pilotstudie macht trotz der kleinen Zahl an ausgewerteten Patienten dennoch die Unzuverlässigkeit der (auf ihre Eignung als stabile Referenzstrukturen für 3-D-Überlagerungen im Best-Fit-Verfahren) untersuchten Oberflächenareale deutlich. Nur bei Vorliegen von Tori mandibulares verbesserte sich die Zuverlässigkeit. Damit soll jedoch nicht gesagt sein, dass die Referenzareale 1, 2 oder 3 zwangsläufig auch für Überlagerungen bei Nichtextraktionstherapien bzw. eingeschränkten kieferorthopädischen Behandlungen ungeeignet sind.

## Schlussfolgerungen

Die Bukkal- und Lingualflächen des nahe der Bezahnung gelegenen Alveolarknochens scheinen – bei Patienten ohne Tori mandibulares – keine bedarfsgerecht stabilen Referenzareale zur Überlagerung von Unterkiefermodellen darzustellen. Bei kieferorthopädischen Behandlungen mit Extraktion von Prämolaren durchläuft der Alveolarknochen in der Unterkieferfront eine stärkere Remodellierung als in den Seitensegmenten. Tori mandibulares hingegen dürfen bei Erwachsenen durchaus als potenzielles Referenzareal zur Überlagerung von 3-D-Unterkiefermodellen gelten.

## Einhaltung ethischer Richtlinien

**Interessenkonflikt.** Kiyong An, Insan Jang, Dong-Soon Choi, Paul-Georg Jost-Brinkmann und Bong-Kuen Cha geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine Studien an Menschen oder Tieren.

10. Hooton EA (1918) On certain Eskimoid characters in Icelandic skulls. *Am J Phys Anthropol* 1:53–76
11. Houston WJ (1983) The analysis of errors in orthodontic measurements. *Am J Orthod* 83:382–390
12. Hrdlicka A (1940) Mandibular and maxillary hyperostoses. *Am J Phys Anthropol* 27:1–67
13. Jang I, Tanaka M, Koga Y et al (2009) A novel method for the assessment of three-dimensional tooth movement during orthodontic treatment. *Angle Orthod* 79:447–453
14. Kim BM, Lee SH (1990) Statistical study of torus palatinus and torus mandibularis in 1758 dental patients. *J Kyungpook Univ Sch Dent* 7:85–94
15. Lucien De Coster B (1953) A new line of reference for the study of lateral facial telerradiographs. *Am J Orthod* 39:304–306
16. Luppapanornlarp S, Johnston LE (1993) The effects of premolar-extraction: a long-term comparison of outcomes in “clear-cut” extraction and nonextraction Class II patients. *Angle Orthod* 63:257–272
17. Mulie RM, Hoeve AT (1976) The limitations of tooth movement within the symphysis, studied with laminagraphy and standardized occlusal films. *J Clin Orthod* 10:882–893
18. Neville BW, Damm DD, Allen CM, Bouquot JE (2009) *Oral and Maxillofacial Pathology*, 3. Aufl. Saunders Elsevier, St. Louis
19. Pancherz H (1982) The mechanism of Class II correction in Herbst appliance treatment. A cephalometric investigation. *Am J Orthod* 82:104–113
20. Trpkova B, Major P, Prasad N et al (1997) Cephalometric landmarks identification and reproducibility: a meta analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 112:165–170
21. Wehrbein H, Bauer W, Diedrich P (1996) Mandibular incisors, alveolar bone, and symphysis after orthodontic treatment. A retrospective study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 110:239–246

### Correspondence Address

Prof. Dr. Bong-Kuen Cha  
Department of Orthodontics,  
College of Dentistry,  
Gangneung-Wonju National University  
120, Gangneung Daehangno,  
210-702 Gangneung  
Korea  
korth@gwnu.ac.kr