

Aus dem Institut für Klinische Epidemiologie und Biometrie
der Universität Würzburg

Vorstand: Prof. Dr. Peter U. Heuschmann

**Ist eine Berechnung der Geometrie der Halswirbelkörper
anhand ihrer Morphologie im Kindesalter und somit eine
Individualisierung der CVM-Methode möglich?**

Inauguraldissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von
Julia Magdalena von der Heide
aus Würzburg

Würzburg, Oktober 2023

Referentenblatt

Referentin bzw. Referent: Prof. Dr. Dr. Götz Gelbrich

Koreferentin bzw. Koreferent: Priv.-Doz. Dr. med. dent. Felix Kunz

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 21.05.2024

Die Promovendin ist Zahnärztin

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wachstum des Kindes	1
1.2	Biochemisch	2
1.3	Radiologisch	2
1.3.1	Die Handröntgenaufnahme.....	3
1.3.1.1	Analyse nach Greulich-und-Pyle-Atlas	3
1.3.1.2	Analyse nach Fishman.....	3
1.3.2	Orthopantomogramm.....	5
1.3.2.1	Dentale Altersbestimmung nach Demirjian.....	5
1.3.3	Kephalogramm	7
1.3.3.1	Kephalometrie.....	7
1.3.3.2	Aufbau der Halswirbel.....	7
1.3.3.3	Entwicklung der Wirbelkörper	8
1.3.3.4	Analyse nach Lamparski.....	9
1.3.3.5	Analyse nach Hassel und Farman	10
1.3.3.6	Analyse nach Baccetti.....	12
1.4	Fragestellung	15
2	Material und Methoden	17
2.1	Material	17
2.2	Methoden	17
2.2.1	Metrische Auswertung	17
2.2.2	Fallauswahl für die Berechnung des skelettalen Alters	25
2.2.3	Berechnung des skelettalen Alters	26
2.2.4	Graphische Darstellung der altersabhängigen Entwicklung der HWK.....	30
3	Ergebnisse.....	31
3.1	Ergebnisse der Berechnung für das C3: Höhen-Breiten-Verhältnis	31
3.2	Ergebnisse der weiteren Parameter	43
3.3	Streudiagramme zum C3: Höhen-Breiten-Verhältnis.....	51
3.3.1	Auf der Anpassungslinie verlaufend – männlich.....	52
3.3.2	Über der Anpassungslinie verlaufend – männlich.....	53

3.3.3	Unter der Anpassungslinie verlaufend – männlich.....	54
3.3.4	Auf der Anpassungslinie verlaufend – weiblich.....	55
3.3.5	Über der Anpassungslinie verlaufend – weiblich	56
3.3.6	Unter der Anpassungslinie verlaufend – weiblich	57
3.3.7	Die Anpassungslinie kreuzend – männlich	58
4	Diskussion	59
4.1	Material	59
4.2	Methode	59
4.2.1	Altersschätzung mittels linearer Regression.....	62
4.2.2	Metrische Auswertung	64
4.3	Ergebnisse.....	68
4.3.1	Schätzfehler	68
4.3.2	Praktische Konsequenz	69
4.3.3	Minimum, Maximum und Mittelwert	71
4.3.4	Illustrierte Beispiele.....	74
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	77
6	Literaturverzeichnis.....	79
7	Anhang	82

Abkürzungsverzeichnis

CVM	cervical vertebral maturation
CVMI	cervical vertebral maturation index
CVMS	cervical vertebral maturation stage
FRS	Fernröntgenseitenbild
OPG	Orthopantomogramm
HWK	Halswirbelkörper
SMI	skeletal maturity indicators
C2	zweiter Halswirbel
C3	dritter Halswirbel
C4	vierter Halswirbel

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Legende der Messpunkte im FRS	18
Tabelle 2: Legende der Strecken im FRS.....	20
Tabelle 3: Legende der Winkel im FRS	22
Tabelle 4: Tendenz der Variablen während des Wachstums	24
Tabelle 5: Parameterschätzung für die Variable C3: Höhen-Breiten-Verhältnis vor dem Wachstumspeak.....	32
Tabelle 6: Parameterschätzung für die Variable C3: Höhen-Breiten-Verhältnis nach dem Wachstumspeak.....	34
Tabelle 7: Parameterschätzung für die Variable prädizierte Differenz	37
Tabelle 8: Quotient zwischen tatsächlicher und vorhergesagter Änderung.....	41
Tabelle 9: Quotient zwischen tatsächlicher und vorhergesagter Änderung.....	42
Tabelle 10: Faktoren zu den geometrischen Parametern.....	44
Tabelle 11: P-Werte der jeweiligen Parameter beim Test bezüglich des Geschlechtereffekts	45
Tabelle 12: P-Werte des Shapiro-Wilk-Tests für die jeweiligen Parameter	46
Tabelle 13: Standardabweichung, Mittelwert und 95%-Intervall des Schätzfehlers für die jeweiligen Parameter	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der HWK.....	8
Abbildung 2: CVMI-Kategorien nach Hassel und Farman	11
Abbildung 3: Kephalometrische Auswertung der HWK nach Baccetti	13
Abbildung 4: Stadien der CVM-Methode nach Baccetti.....	14
Abbildung 5: Analyseschema der computerbasierten Datenauswertung	19
Abbildung 6: Analyseschema, gemessene Strecken.....	21
Abbildung 7: Analyseschema, gemessene Winkel	23
Abbildung 8: Diagramm der Wachstumskurve nach Grave und Brown.....	25
Abbildung 9: Schematische Darstellung	26
Abbildung 10: Streudiagramm für die Variable C3: Höhen-Breiten-Verhältnis vor dem Wachstumspcak.....	31
Abbildung 11: Streudiagramm für die Variable C3: Höhen-Breiten-Verhältnis nach dem Wachstumspcak.....	33
Abbildung 12: Streudiagramm mit den beiden normierten Werten	35
Abbildung 13: Streudiagramm für die Werte vor dem Wachstumspcak und die tatsächliche Differenz.....	36
Abbildung 14: Schätzfehler für C3: Höhen-Breiten-Verhältnis.....	39
Abbildung 15: Quotientenverteilung für C3:Höhen-Breiten-Verhältnis – weiblich und männlich.....	40
Abbildung 16: Quotientenverteilung für C3:Höhen-Breiten-Verhältnis – gesamt.....	42
Abbildung 17: Quotientenverteilung für C4: Höhen-Breiten-Verhältnis	48
Abbildung 18: Quotientenverteilung für C3: anterior-posteriores Höhenverhältnis.....	48
Abbildung 19: Quotientenverteilung für C4: anterior-posteriores Höhenverhältnis.....	48
Abbildung 20: Quotientenverteilung für C2: Winkel der inferioren Konkavität	49

Abbildung 21: Quotientenverteilung für C3: Winkel der inferioren Konkavität	49
Abbildung 22: Quotientenverteilung für C4: Winkel der inferioren Konkavität	49
Abbildung 23: Quotientenverteilung für das Minimum der Werte	50
Abbildung 24: Quotientenverteilung für das Maximum der Werte	50
Abbildung 25: Quotientenverteilung für den Mittelwert der Werte	51
Abbildung 26: Patient 80071	52
Abbildung 27: Patient 80172	53
Abbildung 28: Patient 85001	54
Abbildung 29: Patientin 80055	55
Abbildung 30: Patientin 80127	56
Abbildung 31: Patientin 85060	57
Abbildung 32: Patient 80073	58
Abbildung 33: Ausschnitt der Messung an C4 aus dem Programm OnyxCeph	65
Abbildung 34: Ausschnitt der Messung an C4 aus dem Programm OnyxCeph	66
Abbildung 35: Ausschnitt der Messung an C4, C3 aus dem Programm OnyxCeph	67
Abbildung 36: Streudiagramm zum Höhen-Breiten-Verhältnis an C4, Patient 80138 ..	75

1 Einleitung

„Time, [is] the fourth dimension in dentofacial orthopedics“ [1]. Baccetti et al. beschreiben, wie wichtig in der Kieferorthopädie, neben den drei räumlichen Dimensionen – Sagittale, Transversale und Vertikale – der genaue Zeitpunkt für den Behandlungsbeginn ist. Es ist maßgebend zu wissen, wann sich das Kind in seinem größten Wachstum befindet [1]. Nur so lässt sich die Entwicklung der Kiefer effektiv durch Funktionskieferorthopädie beeinflussen.

1.1 Wachstum des Kindes

Beim Kind unterscheidet man drei verschiedene Wachstumsphasen: die präpuberale, erstpuberale und die zweitpuberale. Jede dieser Phasen tritt zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Entwicklung auf. Die präpuberale Phase dauert vom sechsten bis zum zehnten Lebensjahr und ist gekennzeichnet durch den „ersten Gestaltwandel“ [2]. Daraufhin folgt die erstpuberale Phase (Pubeszenz), auch „zweite(r) Gestaltwandel“ genannt – hier findet der größte Wachstumsschub statt. Diese Phase tritt bei Mädchen im Alter von 11 – 13 und bei Jungen zeitlich verzögert mit 12 bis 14 Jahren auf. Dabei steht das Wachstum der Mandibel und Maxilla in einem zeitlichen Zusammenhang zum Wachstum des Körpers [3, 4]. Zu guter Letzt kommt die zweitpuberale Phase, auch Adoleszenz genannt. In dieser Phase findet nur noch geringes Wachstum statt [2].

Da es nicht möglich ist, aus dem chronologischen Alter eines Kindes die skelettale Reife vorherzusagen, wurden verschiedene Ansätze untersucht, diese zu bestimmen [5].

Man kann sie in biochemische und radiologische Ansätze unterteilen [6]. Es wurden noch weitere Möglichkeiten – beim Mädchen das Einsetzen der Menarche und beim Jungen der Stimmbruch – beschrieben, welche hier jedoch nicht weiter ausformuliert werden [7].

1.2 Biochemisch

Es können drei biochemische Marker im Speichel, Serum oder Urin gemessen werden. Dies sind der IGF-1, Kreatinin und die alkalische Phosphatase [6].

IGF-1 ist ein Wachstumshormon, welches dem Insulin in seiner Struktur ähnelt. Es ist unter anderem an der Förderung des Wachstums von Skelett, Muskulatur und der inneren Organe beteiligt. IGF-1 lässt sich im Serum und im Speichel nachweisen [6]. Bereits 1994 konnten Juul et al. zeigen, dass die IGF-1-Konzentration präpuberal gering ist, während des Wachstums ansteigt und im Erwachsenenalter wieder stark abfällt. Sie erreicht dann wieder den präpuberalen Wert [8]. Durch diese Konzentrationsänderungen kann man die skelettale Reife bestimmen [9]. Kreatinin ist ein harnpflichtiges Abbauprodukt aus dem körpereigenen Stoff Kreatin und wird über den Urin ausgeschieden. Die Kreatininkonzentration, gemessen im Urin, nimmt circa ab dem 14. Lebensjahr ab. Die Konzentrationsabnahme ist reifegradabhängig und wird vermutlich hormonell gesteuert [6]. Die alkalische Phosphatase ist ein Enzym, welches im nichtsauren, alkalischen Milieu arbeitet und Phosphat-Gruppen abspaltet. Sie befindet sich unter anderem im gingivalen Fluid. Perinetti et al. verglichen die Konzentration der alkalischen Phosphatase mit den cervical stages im FRS [10]. Sie beobachteten, dass die alkalische Phosphatase während der Phasen des größten Wachstums der Mandibel – CS3 und CS4 – [11], einen doppelten Peak hat und danach wieder abfällt [10].

1.3 Radiologisch

Zur radiologischen Bestimmung der skelettalen Reife können drei verschiedene Aufnahmetechniken – die Handröntgenaufnahme, das Orthopantomogramm und das Cephalogramm – und damit verbundene Methoden genutzt werden [6].

1.3.1 Die Handröntgenaufnahme

Bei der Handröntgenaufnahme wird meist die linke Hand des Patienten geröntgt. Im Folgenden werden der Greulich-und-Pyle-Atlas und die SMI-Methode nach Fishman dargestellt.

1.3.1.1 Analyse nach Greulich-und-Pyle-Atlas

Greulich und Pyle entwickelten 1959 einen Atlas mit vereinheitlichten Handröntgenaufnahmen, jeweils für Mädchen und Jungen. Dazu setzten sie spezielle Reifeindikatoren fest, welche regelmäßig in einer bestimmten Reihenfolge auftreten. Es wurden über tausend Handröntgenaufnahmen verglichen, um zu bestimmen, in welchem chronologischen Alter der Indikator auftritt. Durch Vergleichen einer Handröntgenaufnahme eines Patienten mit den Standards des Atlanten kann somit das skelettale Alter des Kindes bestimmt werden [12, 13].

1.3.1.2 Analyse nach Fishman

Fishman veröffentlichte 1982 die SMI-Methode. Er beschrieb vier Reifestadien, welche man an sechs anatomischen Strukturen der Hand findet. Diese befinden sich im Bereich des Sesamoids am Daumen, an der proximalen, mittleren und distalen Phalanx des Mittelfingers, an der mittleren Phalanx des kleinen Fingers und am Radius. Dazu legte er elf verschiedene Indikatoren fest. Diese treten während der Entwicklung nacheinander auf [4]. Es gibt vier Verknöcherungsstadien: das Breiterwerden der Epiphyse bis auf Diaphysenbreite, die Ossifikation des Sesamoids, „Capping“ der Epiphyse und schließlich die Fusion von Epiphyse und Diaphyse. Diese treten an den genannten sechs Strukturen auf und kennzeichnen jeweils eines der elf Reifestadien.

SMI-Stadien nach Fishman

A Epiphysenbreite genauso groß wie Diaphysenbreite

1. Dritter Finger – proximale Phalanx
2. Dritter Finger – mittlere Phalanx
3. Fünfter Finger – mittlere Phalanx

B Ossifikation

4. Sesamoid des Daumens

C „Capping“ der Epiphyse

5. Dritter Finger – distale Phalanx
6. Dritter Finger – mittlere Phalanx
7. Fünfter Finger – mittlere Phalanx

D Fusion von Epiphyse und Diaphyse

8. Dritter Finger – distale Phalanx
9. Dritter Finger – proximale Phalanx
10. Dritter Finger – mittlere Phalanx
11. Radius

Fishman vereinfachte die Methode, indem er empfahl, immer erst nach der Ossifikation des Sesamoids – Stadium 4 – zu suchen, denn das größte Wachstum finde in den Stadien 5 und 6 statt. Mit dieser Studie zeigte Fishman, dass aus Handröntgenaufnahmen Informationen zum Wachstum und Reifestatus gezogen werden können und, dass das Gesichtswachstum, gemessen am Ober- und Unterkiefer, mit dem Körperwachstum und der skelettalen Reife im Zusammenhang steht [4].

1.3.2 Orthopantomogramm

Das OPG ist eine Aufnahmetechnik der dentalen Radiologie, bei welcher eine Panoramaschichtaufnahme des Kopfes erstellt wird. Mit Hilfe dieser Aufnahme lassen sich dentoalveoläre und skelettale Strukturen radiologisch untersuchen. Im Folgenden wird die dentale Reifebestimmung nach Demirjian et al. beschrieben.

1.3.2.1 Dentale Altersbestimmung nach Demirjian

Demirjian et al. entwickelten ein System zur Beurteilung des dentalen Alters, mit Reifestadien, welche jeder Zahn durchläuft und die einfach erkennbar sind. Sie nutzten die Tanner-Whitehouse-Methode, eine auf einem Punktesystem basierende Alterseinschätzung auf Grundlage der Hand und des Handgelenks [14], um daraus einen Score für das dentale Alter abzuleiten. Dafür wurde für jeden Zahn und für jedes Stadium eine Zahl zugeordnet. Sie sammelten Informationen aus OPGs von 1482 vollbezahnten Mädchen und 1446 Jungen im Alter von 2 bis 20 Jahren. Es wurden die Unterkieferzähne der linken Seite in folgender Reihenfolge untersucht: zweiter Molar, erster Molar, zweiter Prämolare, erster Prämolare, Eckzahn, seitlicher Schneidezahn, mittlerer Schneidezahn. Bei fehlender Kalzifikation wird die Zahl 0 angegeben. Es gibt acht Stadien (A – H), welche die Entwicklungsreife widerspiegeln. Untersucht wurden dafür verschiedene Kriterien – darunter „die Menge an Zahnschicht, Veränderungen der Form, [und die] Pulpenkammer“ [15]. Jeder Zahn erhält eine Bewertung, welche mittels einer geschlechtsspezifischen Tabelle in einen Score umgewandelt wird. Die Ergebnisse aller bewerteten Zähne zusammengezählt ergeben den Reifescore, welcher daraufhin an Perzentilenkurven – in denen das Alter des Kindes bekannt ist – aufgetragen werden. Der Reifescore kann dann direkt in der Kurve oder in einer Tabelle umgewandelt und abgelesen werden [15].

Reifestadien nach Demirjian

- A Beginnende Kalzifikation der Höckerspitzen in ein- und mehrwurzligen Zähnen, ohne Fusion dieser
- B Fusion der Höckerspitzen
- C
 - a. okklusal vollständige Schmelzbildung – sichtbare Ausdehnung Richtung zervikal
 - b. erste beginnende Dentinablagerung
 - c. okklusaler Umriss der Pulpenkammer ist sichtbar
- D
 - a. Zahnkrone ist bis zur Schmelz-Zement-Grenze ausgebildet
 - b. einwurzelige Zähne: Obergrenze der Pulpenkammer mit genau definierter Form, nach zervikal hin konkav; Pulpenkammerhörner bei einwurzeligen Zähnen schirmförmig, bei mehrwurzeligen Zähnen trapezförmig
 - c. Beginnende Wurzelbildung in Form von einer Nadel
- E einwurzelige Zähne:
 - a. Pulpenkammerwände formen gerade Linien, werden durch das Pulpenhorn unterbrochen
 - b. Wurzellänge ist geringer als die KronenlängeMolaren:
 - a. Beginnende Bildung der radikulären Bifurkation sichtbar als kalzifizierter Punkt oder in Halbmondform
 - b. Wurzellänge ist geringer als die Kronenlänge
- F einwurzelige Zähne:
 - a. Pulpenkammerwände bilden gleichschenkliges Dreieck; Apex endet in Trichterform
 - b. Wurzellänge ist größer oder gleich der KronenlängeMolaren:
 - a. Kalzifizierte Region der Bifurkation hat sich bereits weiter nach unten bewegt, um den Wurzeln mehr Form zu geben und trichterförmig zu enden
 - b. Wurzellänge ist größer oder gleich der Kronenlänge
- G die Wände des Wurzelkanals sind parallel und apical noch teilweise offen (distale Wurzel der Molaren)
- H
 - a. Wurzeln sind apical komplett geschlossen (distale Wurzel der Molaren)
 - b. Periodontale Membran hat eine gleichförmige Breite um die Wurzel und den Apex herum

1.3.3 Kephalogramm

Im Folgenden werden die Kephalometrie, der anatomische Aufbau der HWK und die Entwicklung der CVM-Methode erläutert.

1.3.3.1 Kephalometrie

Die Kephalometrie ist ein wichtiger Bestandteil der kieferorthopädischen Diagnostik. Sie wurde um 1931 von Hofrath und Broadbent eingeführt. Dabei wird vom Patienten eine Röntgenaufnahme in der Norma Lateralis, das heißt in der Seitenansicht, mit möglichst großem Fokus-Film-Abstand und geringem Film-Objekt-Abstand erstellt. Daraus resultiert eine fast maßstabsgetreue Abbildung des Patientenprofils. Dabei ist es wichtig, die Position des Patientenkopfes in einem Kephalostat zu fixieren und nach der Frankfurter Horizontalen auszurichten, ebenso sollte die Pupillarlinie horizontal ausgerichtet sein [16]. Nur so können ungewollte Überlagerungen und Doppelkonturen vermieden werden.

Meist werden während der kieferorthopädischen Therapie zu Beginn, während der Behandlung zur Verlaufskontrolle und bei Bedarf zum Behandlungsabschluss FRS-Aufnahmen angefertigt.

Diese Röntgenaufnahmen werden in der Kieferorthopädie unter anderem dazu verwendet, den Einbau der Kieferbasen, die skelettale Klasse, die Wachstumsrichtung des Schädels und die Metrik der Kiefer zu beurteilen.

1.3.3.2 Aufbau der Halswirbel

Die HWK werden von kranial nach kaudal mit C1 bis C7 durchnummeriert. Ihr Aufbau ist einheitlich, lediglich die ersten beiden weichen morphologisch von dem sonst sehr ähnlichen Aufbau ab. Der Wirbel C1 (Atlas) bildet mit seinem *Articulatio atlantooccipitalis* die Verbindung zwischen Wirbelsäule und Kopf. Dieser Wirbel hat einen ringförmigen Aufbau. Der Wirbel C2 (Axis) besitzt einen Zapfen – *Dens axis* – welcher in C1 hineinragt. Die weiteren HWK (C3-C7) sind folgendermaßen aufgebaut: Der *Corpus vertebrae* und der *Arcus vertebrae*

bilden zusammen das dreieckige Foramen vertebrale [17]. Am Wirbelbogen befinden sich der paarige Processus transversus und der mittige Processus spinosus. Zwischen den Wirbelkörpern befinden sich die Bandscheiben (Disci intervertebrales), welche an den hyalinen Facies intervertebrales superiores und inferiores an den Ober- und Unterseiten der HWK befestigt sind. Die Facies intervertebrales werden umrandet von einer knöchernen Epiphysis anularis. Jeder HWK hat einen Processus articularis inferior und eine Facies articularis superior – über diese Strukturen sind die Wirbelkörper als Gelenke miteinander verbunden [18].

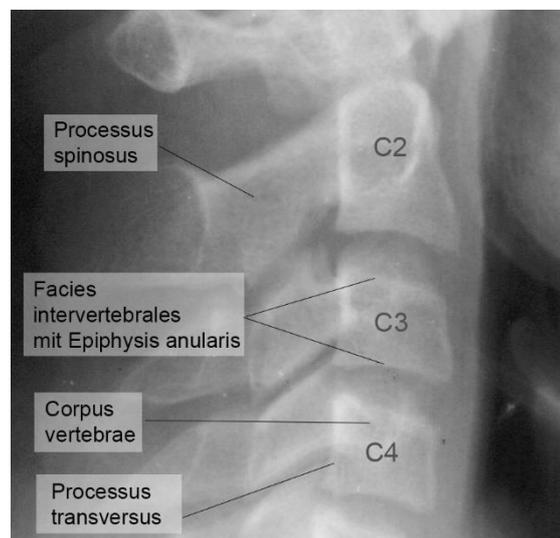


Abbildung 1: Aufbau der HWK

1.3.3.3 Entwicklung der Wirbelkörper

Die HWK entwickeln sich aus Mesenchymsegmenten, deren Verknorpelung und anschließende Ossifikation ab dem 3. Fetalmonat beginnt. Ab dem 10. Lebensjahr bilden sich knöcherne Randleisten und sekundäre Ossifikationszentren, welche sich an den Spitzen der Querfortsätze und des Dornfortsatzes befinden. Bis zum 20. Lebensjahr verbleiben zum weiteren Wachstum an der Ober- und Unterseite der HWK knorpelige Deckplatten. Diese verknöchern später voll-

ständig, sodass erst im Alter von circa 25 Jahren ein zusammenhängender Knochen ausgebildet ist [17].

1.3.3.4 Analyse nach Lamparski

1975 wurde die CVM-Methode von Lamparski das erste Mal beschrieben. Er führte eine Studie durch, bei welcher FRS-Aufnahmen von Mädchen und Jungen im Alter von 10 bis 15 Jahren verwendet wurden. Daraus wählte er speziell die Patienten aus, bei denen sich das chronologische und skelettale Alter um maximal sechs Monate vom untersuchten Alter unterschied. Aus diesen Aufnahmen legte er geschlechtsspezifisch sechs Stadien fest, welche die Kinder im Alter zwischen 10 und 15 Jahren durchlaufen. Daraufhin verglich er Hand-Röntgen-Aufnahmen mit FRS-Aufnahmen und stellte fest, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen der Beurteilung des skelettalen Alters anhand beider Röntgenaufnahmen bestehen. Als Hinweis für die Reife setzte er die Entwicklung einer Konkavität am unteren Rand der HWK und die Zunahme der vertikalen Höhe der HWK fest [19].

Daraufhin untersuchten O'Reilly und Yanniello im Jahr 1988 die Beziehung zwischen den CVM-Stadien und den Wachstums-Veränderungen in der Mandibula. Dafür verwendeten sie jährlich erstellte FRS-Aufnahmen von 13 Mädchen im Alter von 9 bis 15 Jahren und vermaßen diese in Bezug auf die Mandibularlänge, Korpuslänge und die Ramushöhe. Des Weiteren ordneten sie den FRS-Aufnahmen das passende, von Lamparski definierte, Stadium zu. Dabei sollen die Stadien zwei bis drei direkt im Jahr vor dem größten Wachstumsschub auftreten. Dieser findet zwischen dem dritten und vierten Stadium statt. Die Stadien 1 bis 3 sind von einer beschleunigten Wachstumsphase (sog. accelerative Phase), die Stadien 4 bis 6 hingegen von einer verlangsamteten Wachstumsphase (sog. decelerative Phase) gekennzeichnet [20].

1.3.3.5 Analyse nach Hassel und Farman

Im Jahr 1995 entwickelten Hassel und Farman die CVM-Methode weiter. Dazu wurden 220 Patienten mit FRS-Aufnahmen und Handröntgenaufnahmen mit dem jeweils gleichen Aufnahmedatum ausgewählt. Sie teilten die Handröntgenaufnahmen nach den SMI-Stadien von Fishman ein und verglichen diese mit den dazugehörigen FRS-Aufnahmen. Daraus entwickelten sie einen Index mit sechs Stadien, den CVMI-Kategorien 1-6, in dem jede Kategorie mit einem oder zwei SMI-Stadien korreliert. Dabei wurden nur die HWK C2-C4 betrachtet, welche auch trotz eines Schutzschildes für die Thyroidea auf dem FRS gut beurteilbar sind. Durch das Schutzschild kann die effektive Dosis auf die sehr strahlensensible Thyroidea von 1.80 μSv auf 0.32 μSv reduziert werden [21]. Die HWK C2, C3 und C4 wurden auf eine Krümmung an deren Unterrand hin untersucht. Außerdem wurde die Form der HWK C3 und C4 und der intervertebrale Raum beurteilt [22].

CVMI-Kategorien nach Hassel und Farman

Category I INITIATION	Inferiorer Rand von C2, C3 und C4 flach, die Körper sind keilförmig, der superiore Rand ist von posterior nach anterior abgeflacht
Category II ACCELERATION	Am inferioren Rand von C2 und C3 entwickelt sich eine Konkavität, der inferiore Rand von C4 ist flach, C3 und C4 sind fast rechteckig
Category III TRANSITION	Ausgeprägte Konkavität am inferioren Rand von C2 und C3, am inferioren Rand von C4 entwickelt sich eine Konkavität, C3 und C4 sind rechteckig
Category IV DECELERATION	Ausgeprägte Konkavität am inferioren Rand von C2, C3 und C4, C3 und C4 werden mehr quadratisch

Category V
MATURATION

Stärker betonte Konkavität am inferioren Rand von C2, C3 und C4, C3 und C4 sind fast (ganz) quadratisch

Category VI
COMPLETION

Tiefe Konkavität am inferioren Rand von C2, C3 und C4, C3 und C4 sind quadratisch oder in der vertikalen Dimension höher als in der horizontalen



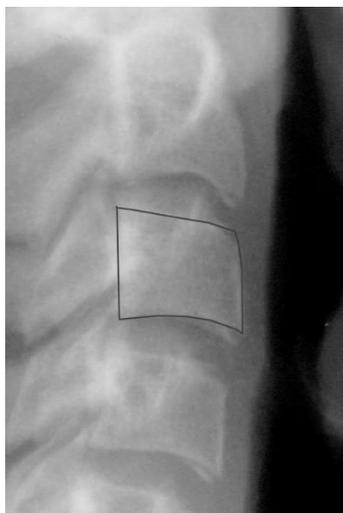
1 Initiation



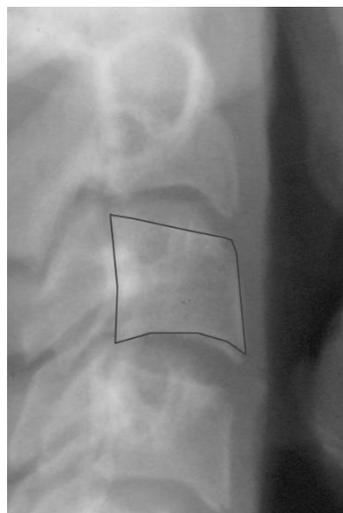
→ 2 Acceleration



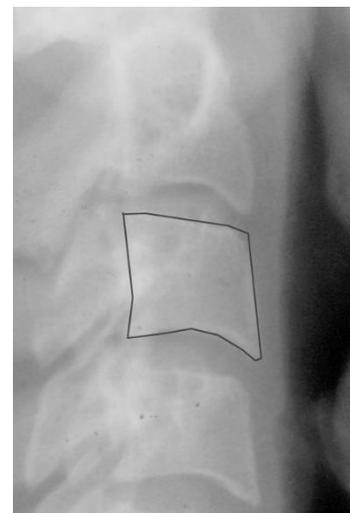
→ 3 Transition



→ 4 Deceleration



→ 5 Maturation



→ 6 Completion

Abbildung 2: CVMI-Kategorien nach Hassel und Farman

Im Jahr 2000 fanden Franchi et al. heraus, dass das körperliche, kraniofaziale und mandibuläre Wachstum zwischen den Lamparski-Stadien Cvs3 und Cvs4 am größten ist. Aus ihren Untersuchungen ging die CVM als geeignete Methode hervor, die skelettale Reife zu beurteilen, da es möglich ist daraus den Wachstums-Peak zu bestimmen [5]. Auch Pancherz und Szyska untersuchten die Validität der Halswirbelkörperanalyse. Dazu verglichen sie FRS-Aufnahmen und Handröntgenaufnahmen mit einer Wachstumskurve des jeweiligen Patienten. Die FRS-Aufnahmen wurden in Bezug auf den HWK C3 gemäß der Methode nach Hassel und Farman zugeteilt. Die Handröntgenaufnahmen wurden nach der Einteilung von Hagg und Taranger, einer Methode, die auf verschiedenen radiologisch erkennbaren Reifestadien der Hand beruht [23], eingestuft. Pancherz und Szyska kamen zu dem Schluss, dass die Analyse der Halswirbel die gleiche Validität wie die Analyse der Handknochen besitzt [24].

1.3.3.6 Analyse nach Baccetti

Baccetti et al. wiederum entwickelten 2002 die Methode weiter. Dazu wurden Serien von FRS-Bildern verwendet, welche aus sechs aufeinanderfolgenden, jährlich erstellten Aufnahmen bestanden. Auf allen Röntgenbildern wurde die Länge des Unterkiefers gemessen und die Aufnahmen ermittelt, zwischen welchen die größte Längenzunahme der Mandibel stattgefunden hatte. Daraufhin beurteilte man die Morphologie der HWK C2, C3 und C4. Visuell untersuchte man, ob eine Konkavität vorhanden ist und ob und auf welche Art und Weise sich die Form der HWK ändert. Kephalometrisch wurden unterschiedliche Punkte festgelegt (siehe Abbildung 3), mit denen man die Tiefe der Konkavität an C2, C3 und C4, das Verhältnis zwischen der Länge der Basis (Distanz zwischen C3lp-C3la) und der vorderen Höhe, sowie das Verhältnis zwischen der hinteren Höhe (Distanz zwischen C3up-C3lp) und der vorderen Höhe messen kann. Anhand ihrer Ergebnisse kamen sie zu dem Schluss, dass zwischen den Messungen der ersten zwei Bilder kein signifikanter Unterschied zu erkennen ist. Sie reduzierten die Stadien von sechs auf fünf und nannten sie die „improved CVM method“ [25].



Abbildung 3: Kephalometrische Auswertung der HWK nach Baccetti

Stadien der CVM-Methode nach Baccetti.

CVMS I	Der untere Rand von C2-C4 ist flach, an C2 kann bereits eine Konkavität in der Hälfte der Fälle vorhanden sein. Die Körper von C3 und C4 sind trapezförmig.
CVMS II	Es ist eine Konkavität sowohl am unteren Rand von C2 als auch C3 vorhanden. Die Körper von C3 und C4 sind entweder trapezförmig oder horizontal rechteckig.
CVMS III	Die Konkavität ist am unteren Rand von C2, C3 und C4 vorhanden. Die Körper von C3 und C4 sind horizontal rechteckig.
CVMS IV	Die Konkavität ist am unteren Rand von C2, C3 und C4 vorhanden. Mindestens einer der HWK C3 oder C4 ist quadratisch. Wenn einer der beiden nicht quadratisch ist, dann ist er noch horizontal rechteckig.
CVMS V	Deutliche Konkavität am unteren Rand von C2, C3 und C4. Mindestens einer der HWK C3 oder C4 ist vertikal rechteckig. Wenn einer der beiden nicht vertikal rechteckig ist, dann ist er quadratisch.

Das stärkste Wachstum findet zwischen CVMS II und CVMS III statt [25]. Die Abbildung 4 zeigt die Stadien nach Baccetti, die blaue Linie veranschaulicht hier die möglichen oben genannten Variationen.

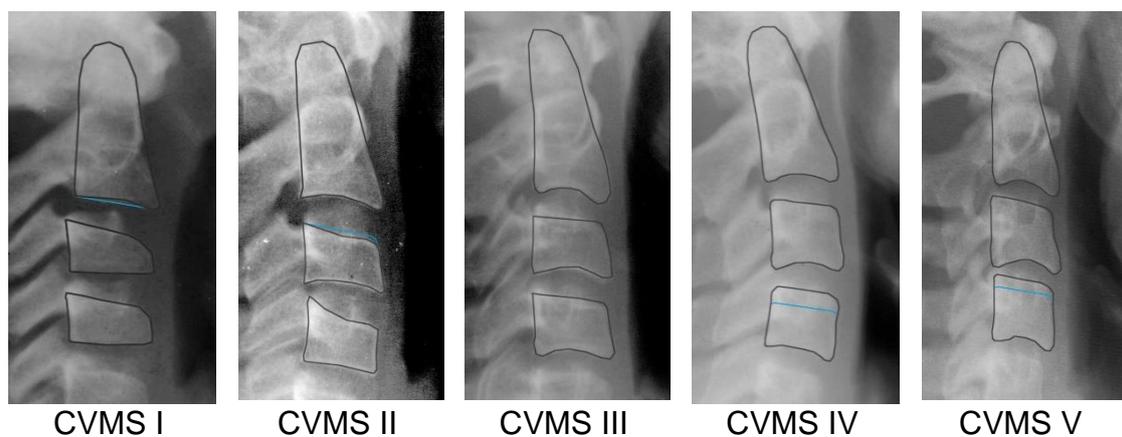


Abbildung 4: Stadien der CVM-Methode nach Baccetti

1.4 Fragestellung

Im Bereich der Kieferorthopädie ist es von besonderem Interesse, das skelettale Alter des Patienten zu kennen, um somit einschätzen zu können, wie viel Wachstum noch erwartet werden kann oder ob es bereits abgeschlossen ist. Nur so kann die Indikation für eine Therapie mit funktionskieferorthopädischen Apparaturen oder für eine kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgische Behandlung richtig gestellt werden [26].

Wie bereits beschrieben, wurden in den vergangenen Jahrzehnten zur Bestimmung der skelettalen Reife verschiedene Ansätze konzipiert und weiterentwickelt. So wird nach der Methode von Demirjian im OPG an den Zähnen der geschlossene Apex [15] oder bei Fishman in den Handröntgenaufnahmen die Fusion von Epiphyse und Diaphyse zur Bestimmung der endgültigen Reife angewandt [4]. Hier wird deutlich, dass ein sicher vorhersagbarer Endpunkt im Wachstum der untersuchten Strukturen existiert, welcher zur Reifebestimmung genutzt wird.

Bei der CVM-Methode sollen in FRS-Aufnahmen HWK analysiert und zur Bestimmung des skelettalen Alters genutzt werden. Diese Methode setzt allerdings voraus, dass sich alle Wirbelkörper gleich entwickeln und das gleiche Endstadium erreichen. In einer Studie mit FRS-Röntgenaufnahmen von 320 Erwachsenen im Alter von über 20 Jahren und 100 Kindern im Alter von 8 bis 10 Jahren wurde die Form der HWK C2, C3 und C4 beurteilt. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Geometrie der HWK – definiert durch die Merkmale Höhen-Breiten-Verhältnis, rechteckige Form und die Konkavität am unteren Rand des HWK – sehr unterschiedlich darstellt. Obendrein kamen Überschneidungen der Form zwischen Erwachsenen und Kindern vor [27]. Diese Variabilität der Geometrie adulter HWK erschwert eine korrekte Alters-einschätzung des untersuchten Patienten. Daraus ergibt sich die Problematik, dass hier ein sicher vorhersagbarer Endpunkt im Wachstum fehlt.

Ziel der vorliegenden Studie war daher die Untersuchung, inwiefern anhand geometrischer Merkmale der Wirbelkörper im Kindesalter Vorhersagen auf die Morphologie der Wirbelkörper nach Abschluss der Entwicklung möglich sind. Hierdurch könnte die oben beschriebene CVM-Methode individualisiert und eine patientenbezogene Einschätzung des bereits verstrichenen Wachstums ermöglicht werden.

2 Material und Methoden

2.1 Material

Es wurden insgesamt 1377 FRS-Aufnahmen von 267 Patienten – 110 weibliche und 157 männliche – verwendet. Die Daten stammen aus dem Archiv der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Würzburg und wurden mit einem MICROTEK MII Medi-2200 plus Scanner und einem Lineal als Maßstab (Normierung) mit dem Programm „Scan Wizard Medi“ asserviert. Daraufhin wurden die Röntgenbilder anonymisiert und mit einer Patienten-ID versehen. Es wurden 235 Patienten mit mindestens 5 FRS-Aufnahmen ausgewählt, wobei die erste Aufnahme im Alter von maximal 8 Jahren, die letzte im Alter von mindestens 20 Jahren durchgeführt wurde. Des Weiteren wurden 32 Patienten mit 2 Aufnahmen mit den genannten Kriterien ausgesucht. Bei allen Aufnahmen wurde vorausgesetzt, dass C2, C3 und C4 vollständig und ihre Konturen ausreichend scharf dargestellt waren. Unscharfe, verschwommene und überlagerte Aufnahmen wurden aussortiert. Außerdem wurden sowohl Patienten mit kraniofazialen Syndromen als auch mit Fehlbildungen nicht miteinbezogen.

2.2 Methoden

2.2.1 Metrische Auswertung

Die HWK wurden mit dem Programm OnyxCeph (Herst.: Image Instruments GmbH) metrisch ausgewertet. OnyxCeph ist ein Programm für die Bearbeitung und Bewertung von zwei- und dreidimensionalen Bildern und Röntgenaufnahmen. Dabei wurde ein gesondert vom Hersteller bereitgestelltes Modul verwendet – das nicht Bestandteil des kommerziellen Produkts ist – bei welchem die aus Tabelle 1 zu entnehmenden Punkte vermessen wurden.

Damit das Modul angewendet werden konnte, mussten alle FRS-Aufnahmen so ausgerichtet sein, dass das rechte Profil des Patienten zu sehen ist. War dies nicht der Fall, wurde die Röntgenaufnahme mit Hilfe des Programms gespiegelt.

Um die Strukturen auf dem Röntgenbild besser erkennen zu können, wurden bei Bedarf Helligkeit und Kontrast mit dem Bearbeitungsprogramm von OnyxCeph modifiziert. Mit Hilfe des Zoom-Werkzeugs konnten die Punkte besser ausgewählt werden. Durch das mitgescannte Lineal konnten die gemessenen Strecken normiert werden, dazu wurden zwei Normierungspunkte im Abstand von 50mm gesetzt (Normierungspunkt A und B).

Folgende Punkte (siehe Tabelle 1 und Abbildung 5) wurden in der Röntgenaufnahme entsprechend der Beschreibung im Programm OnyxCeph gekennzeichnet.

Tabelle 1: Legende der Messpunkte im FRS

Bezeichnung	Beschreibung des Punktes
C2pi	Inferiorer Punkt der posterioren Kontur des C2
C2ai	Inferiorer Punkt der anterioren Kontur des C2
C2conc	Konkavität der inferioren Kontur des C2
C3ps	Superiorer Punkt der posterioren Kontur des C3
C3as	Superiorer Punkt der anterioren Kontur des C3
C3pi	Inferiorer Punkt der posterioren Kontur des C3
C3ai	Inferiorer Punkt der anterioren Kontur des C3
C3conc	Konkavität der inferioren Kontur des C3
C3pm	Mittlerer Punkt der posterioren Kontur des C3 – konstruiert
C3ms	Mittelpunkt der superioren Kontur des C3
C4ps	Superiorer Punkt der posterioren Kontur des C4
C4as	Superiorer Punkt der anterioren Kontur des C4
C4pi	Inferiorer Punkt der posterioren Kontur des C4

Bezeichnung	Beschreibung des Punktes
-------------	--------------------------

C4ai	Inferiorer Punkt der anterioren Kontur des C4
C4conc	Konkavität der inferioren Kontur des C4
C4pm	Mittlerer Punkt der posterioren Kontur des C4 – konstruiert
C4ms	Mittelpunkt der superioren Kontur des C4

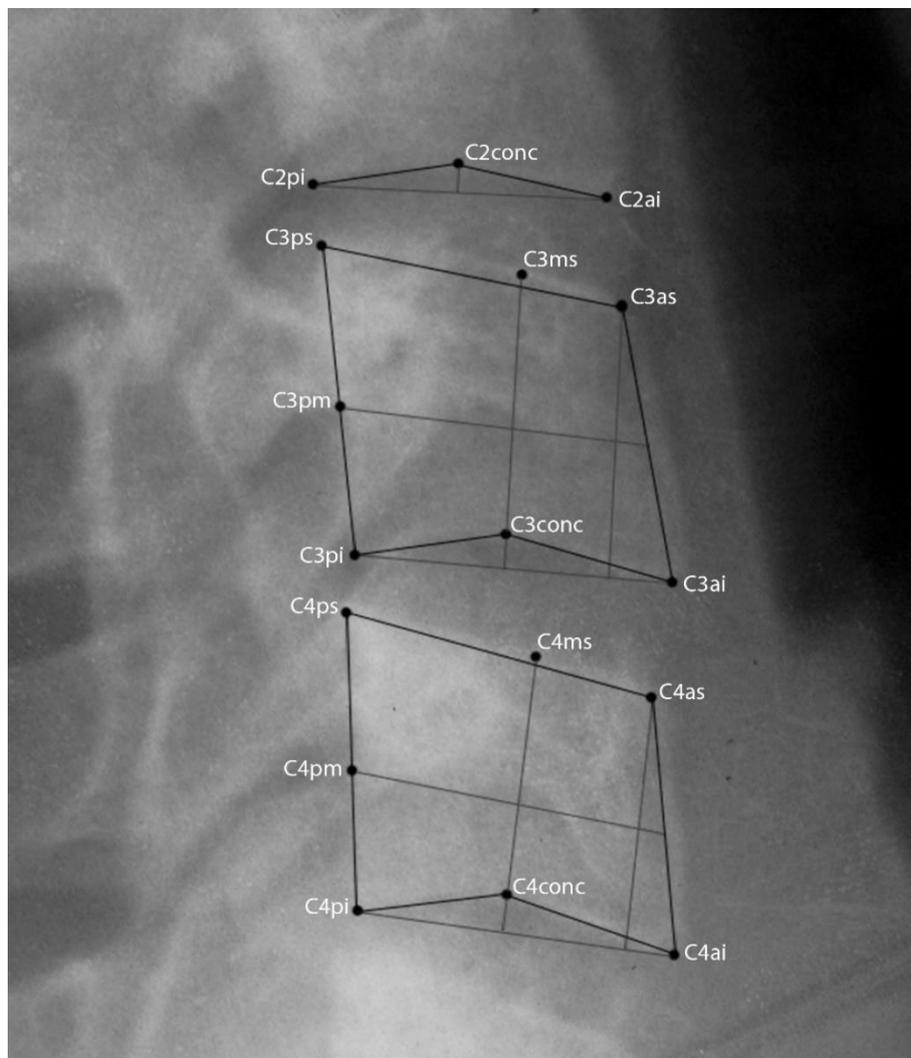


Abbildung 5: Analyseschema der computerbasierten Datenauswertung

Mit Hilfe dieser Punkte konnten die Strecken aus Tabelle 2 gemessen werden (siehe dazu Abbildung 6)

Tabelle 2: Legende der Strecken im FRS

Bezeichnung	Beschreibung der Strecke
C2Tconc	Tiefe der Konkavität an C2, Lot vom Punkt C2conc auf die Strecke C2pi-C2ai
C3Tconc	Tiefe der Konkavität an C3, Lot vom Punkt C3conc auf die Strecke C3pi-C3ai
C3AH	Anteriore Wirbelkörperhöhe an C3, Strecke C3as-C3ai
C3AH'	Konstruierte anteriore Wirbelkörperhöhe an C3, Strecke C3as-C3ai unter Berücksichtigung von C3ms
C3H	Konstruierte mediane Wirbelkörperhöhe an C3, Strecke C3ms-C3conc
C3PH	Posteriore Wirbelkörperhöhe an C3, Strecke C3ps-C3pi
C3PH'	Konstruierte posteriore Wirbelkörperhöhe an C3, Strecke C3ps-C3pi unter Berücksichtigung von C3pm
C3B	Konstruierte mittlere Wirbelkörperbreite an C3, Streckenhalbierende C3as-C3ai mit Begrenzung C3pm
C4Tconc	Tiefe der Konkavität an C4, Lot vom Punkt C4conc auf die Strecke C4pi-C4ai
C4AH	Anteriore Wirbelkörperhöhe an C4, Strecke C4as-C4ai
C4AH'	Konstruierte anteriore Wirbelkörperhöhe an C4, Strecke C4as-C4ai unter Berücksichtigung von C4ms
C4H	Konstruierte mediane Wirbelkörperhöhe an C4, Strecke C4ms-C4conc

- C4PH** Posteriore Wirbelkörperhöhe an C4, Strecke C4ps-C4pi
- C4PH'** Konstruierte posteriore Wirbelkörperhöhe an C4,
Strecke C4ps-C4pi unter Berücksichtigung von C4pm
- C4B** Konstruierte mittlere Wirbelkörperbreite an C4,
Streckenhalbierende C4as-C4ai mit Begrenzung C4pm

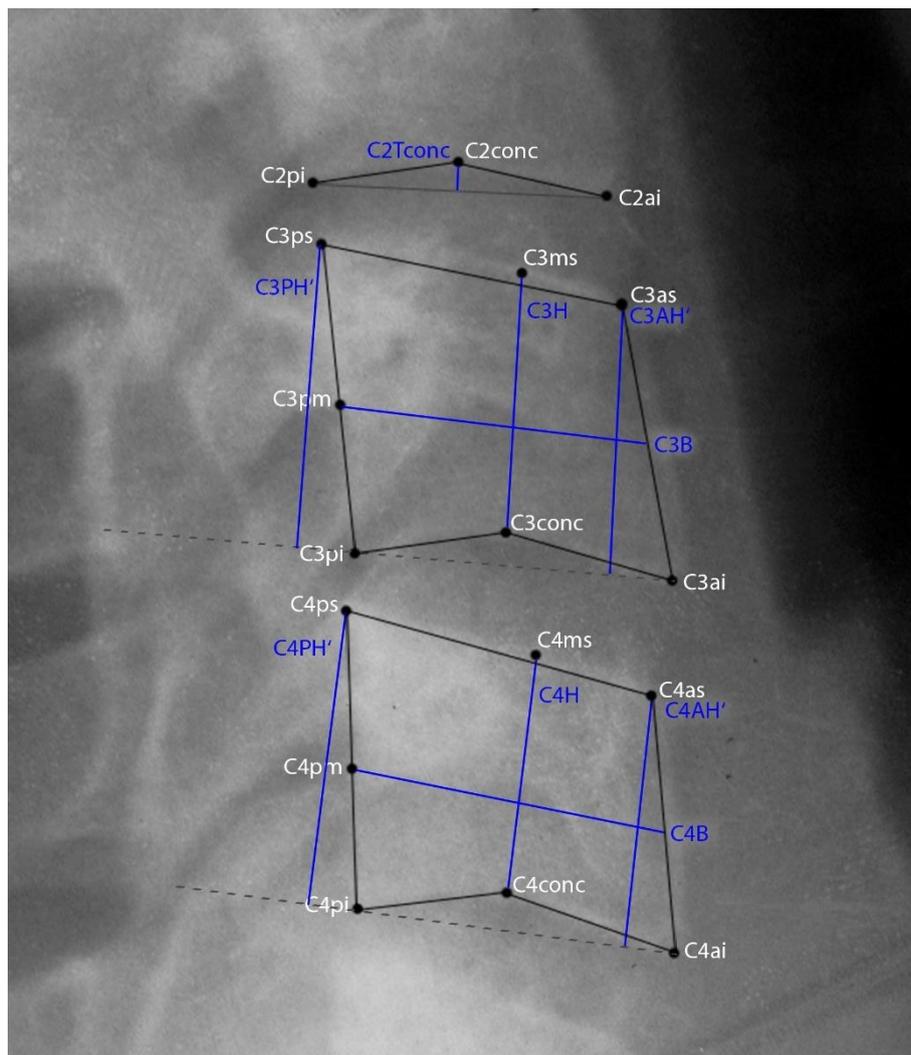


Abbildung 6: Analyseschema, gemessene Strecken

Daraufhin wurden die Winkel aus Tabelle 3 konstruiert und gemessen. Diese sind in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 3: Legende der Winkel im FRS

Bezeichnung	Beschreibung des Winkels
<C2conc	Konkavitätenwinkel C2, Winkel zwischen den Punkten C2pi, C2conc und C2ai
<C3conc	Konkavitätenwinkel C3, Winkel zwischen den Punkten C3pi, C3conc und C3ai
<C3as	Anteriorer superiorer Innenwinkel C3, Winkel zwischen den Punkten C3ps, C3as, C3ai
<C3ps	Posteriorer superiorer Innenwinkel C3, Winkel zwischen den Punkten C3pi, C3ps, C3as
<C4conc	Konkavitätenwinkel C4, Winkel zwischen den Punkten C4pi, C4conc und C4ai
<C4as	Anteriorer superiorer Innenwinkel C4, Winkel zwischen den Punkten C4ps, C4as, C4ai
<C4ps	Posteriorer superiorer Innenwinkel C4, Winkel zwischen den Punkten C4pi, C4ps, C4as

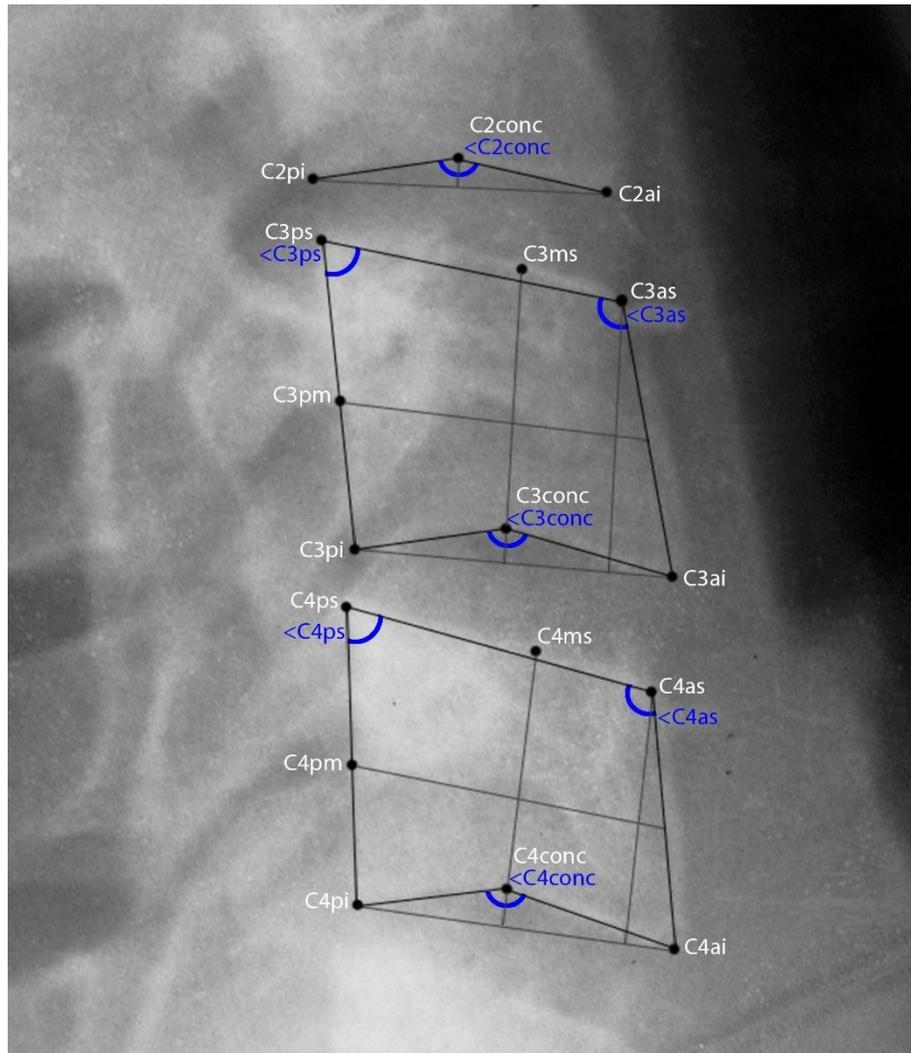


Abbildung 7: Analyseschema, gemessene Winkel

Mit den beschriebenen Punkten, Strecken und Winkeln konnte anschließend die Morphologie der HWK metrisch beschrieben werden.

Die Ergebnisse dieser Analyse wurden mit dem Modul OnyxStat exportiert. Daraufhin wurden sie mit dem Statistikprogramm SPSS statistisch ausgewertet und darauf basierend folgende Variablen (siehe Tabelle 4) berechnet. Diese ändern während des Wachstums ihre Größe. Die Tendenz der Wachstumsänderung ist Tabelle 4 zu entnehmen.

Legende für die Tabelle: ↑ = wird größer, ↓ = wird kleiner

Tabelle 4: Tendenz der Variablen während des Wachstums

Variable	Beschreibung	Tendenz
wC2c	Konkavitätenwinkel an C2 (<C2conc)	↓
wC3c	Konkavitätenwinkel an C3 (<C3conc)	↓
wC4c	Konkavitätenwinkel an C4 (<C4conc)	↓
xhb3	Höhen-Breiten-Verhältnis an C3 (C3H/C3B)	↑
xhb4	Höhen-Breiten-Verhältnis an C4 (C4H/C4B)	↑
xap3	Verhältnis der anterioren zur posterioren Höhe an C3 (C3AH'/C3PH')	↑
xap4	Verhältnis der anterioren zur posterioren Höhe an C4 (C4AH'/C4PH')	↑
wC3as	Anteriorer superiorer Winkel an C3 (<C3as)	↓
wC4as	Anteriorer superiorer Winkel an C4 (<C4as)	↓
wC3ps	Posteriorer superiorer Winkel an C3 (<C3ps)	↑
wC4ps	Posteriorer superiorer Winkel an C4 (<C4ps)	↑

2.2.2 Fallauswahl für die Berechnung des skelettalen Alters

Zuerst wurden die Patienten ausgewählt, bei denen es FRS-Aufnahmen gibt, die sowohl vor dem Wachstumsgipfel aufgenommen wurden als auch zu einem Zeitpunkt, zudem die Patienten annähernd bis vollständig ausgewachsen waren. Gemäß der Wachstumskurve nach Grave und Brown (siehe Abbildung 8) befindet sich dieser Wachstumsspeak bei Mädchen im Alter von 12, bei Jungen im Alter von 14 Jahren. Die Altersgrenze für nahezu adulte Patienten wurde durch die Wachstumskurve am Punkt „Ru“, welcher durch die Fusion von Epiphyse und Diaphyse am Radius das Ende des Wachstums beschreibt, festgelegt. Dieser befindet sich bei Mädchen bei 16,5 Jahren und bei Jungen bei 17,5 Jahren [28].

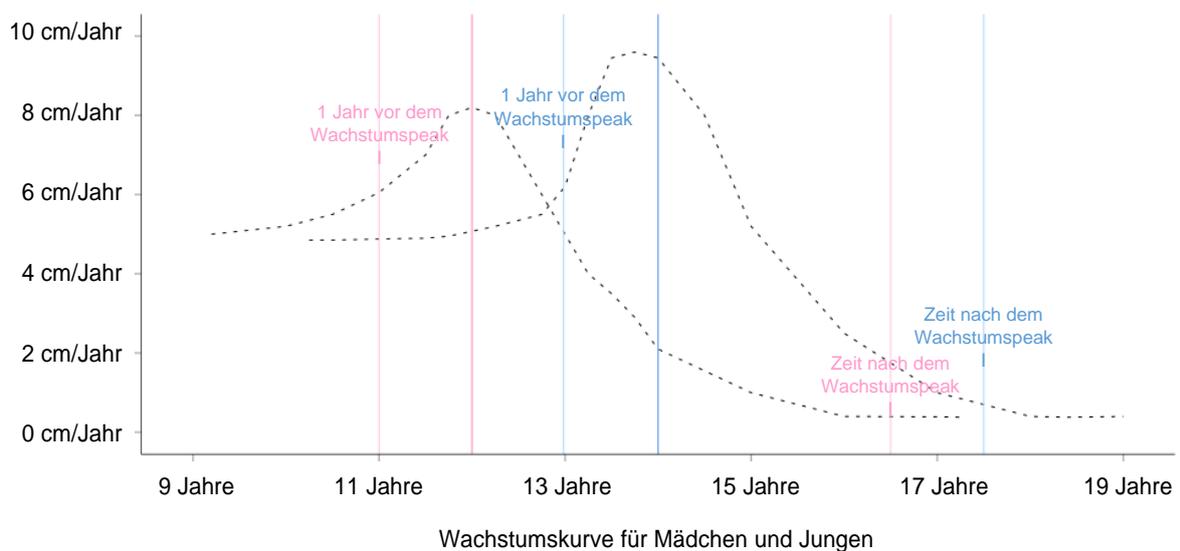


Abbildung 8: Diagramm der Wachstumskurve nach Grave und Brown

Mit Hilfe des Programms SPSS (Statistics 27) wurden folglich die Patienten ausgewählt, deren Alter während der FRS-Aufnahme kleiner gleich 11 Jahre für weibliche Patienten und kleiner gleich 13 Jahre für männliche Patienten war – dies entspricht dem Zeitpunkt „ein Jahr vor dem Wachstumsspeak“ – und größer gleich 16,5/17,5 (w/m) Jahre (dies entspricht dem Zeitraum „Zeit nach dem Wachstumsspeak“). Für die Auswahl der Patienten mussten beide beschriebenen Kriterien erfüllt sein, dies war bei 59 weiblichen und 95 männlichen Patienten der Fall.

2.2.3 Berechnung des skelettalen Alters

Die Berechnung der geometrischen Merkmale am Ende der Entwicklung anhand ihrer Ausprägung im Kindesalter wurde in vier Schritten durchgeführt. Zur Veranschaulichung wurde folgendes Schaubild (siehe Abbildung 9) erstellt.

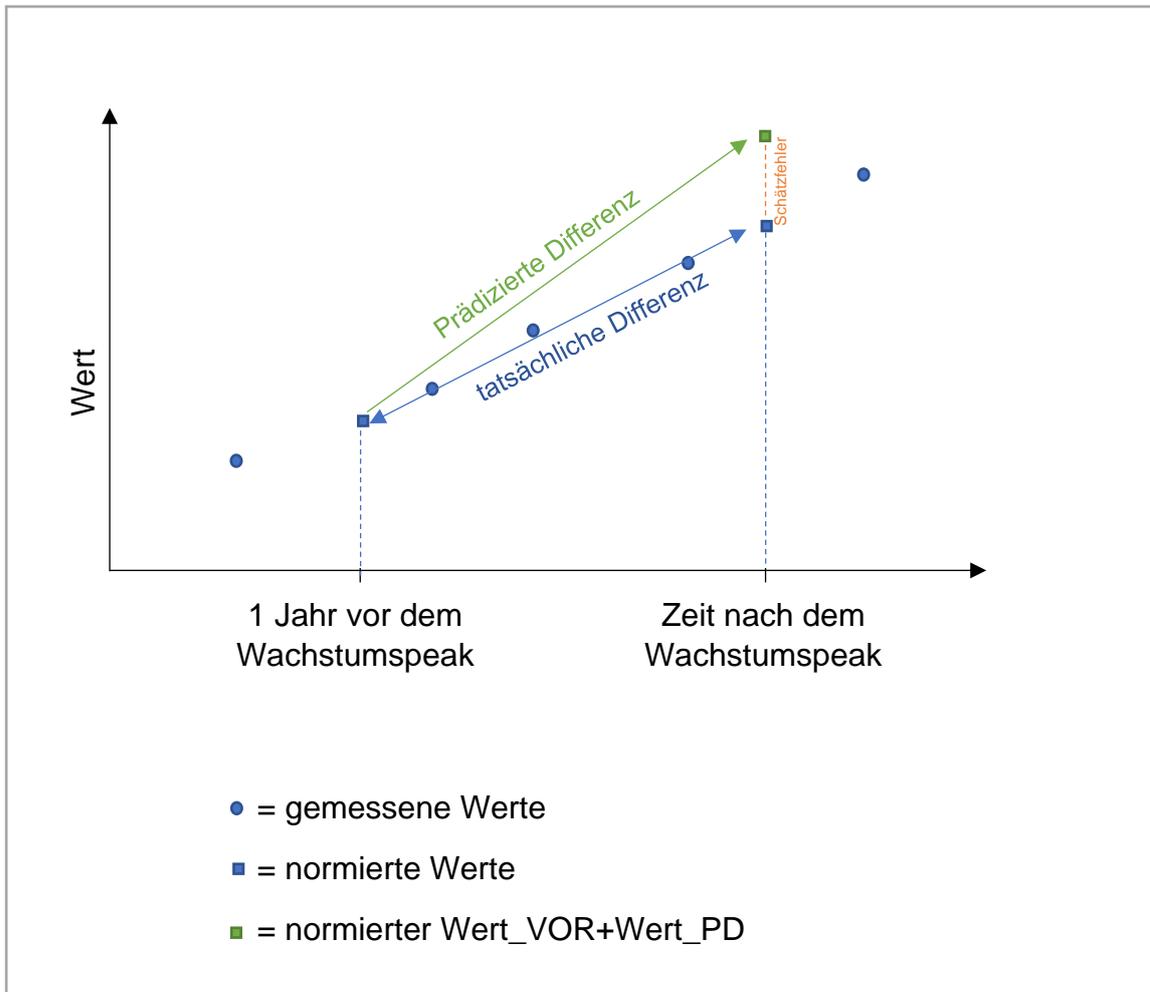


Abbildung 9: Schematische Darstellung

Diese vier Schritte wurden jeweils für die geometrischen Kriterien Höhen-Breitenverhältnis an C3 und C4, anterior-posteriores Höhenverhältnis an C3 und C4 und für den Winkel der inferioren Konkavität an C2-C4 berechnet.

Schritt 1 (Normierte Werte)

- a. Normierte Werte für ein geometrisches Kriterium zum Zeitpunkt „1 Jahr vor dem Wachstumspeak“

Da die vorhandenen Daten der Patienten nicht alle exakt dem Zeitpunkt „1 Jahr vor dem Wachstumspeak“ entsprechen, war es notwendig normierte Werte zum genannten Zeitpunkt zu ermitteln. Durch die über einen Zeitraum gemessenen Werte, kann man einen Wert zu einem bestimmten Zeitpunkt mittels linearer Regression bestimmen. Dies wurde mit dem Programm SPSS (Statistics 27) durchgeführt.

Die Regressionsanalyse wurde mit der abhängigen Variable „normierte Werte“ und „1 Jahr vor dem Wachstumspeak“ als unabhängige Variable durchgeführt. Dazu wurde zuerst der lineare Zusammenhang zwischen den beiden Variablen mittels Streudiagramm und einer Regressionsgeraden ermittelt. Mit der Gleichung der Geraden konnten daraufhin die „normierten Werte“ mit SPSS berechnet werden.

- b. Normierte Werte für ein geometrisches Kriterium zum Zeitpunkt „Zeit nach dem Wachstumspeak“

Da ebenfalls die vorhandenen Daten der Patienten nicht alle exakt dem Zeitpunkt „Zeit nach dem Wachstumspeak“ entsprechen, war es hier ebenfalls notwendig „normierte Werte“ am genannten Zeitpunkt zu ermitteln. Diese Berechnung wurde analog zum oben beschriebenen Schritt durchgeführt.

Diese normierten Werte werden im Folgenden als Werte_VOR (Werte zum Zeitpunkt „1 Jahr vor dem Wachstumspeak“) und Werte_NACH (Werte zum Zeitpunkt „Zeit nach dem Wachstumspeak“) bezeichnet.

Schritt 2 (Abhängigkeiten der Variablen und Berechnung der geschätzten Änderung während des Wachstums)

Im darauffolgenden Schritt wurde ermittelt, um wie viel sich die Werte tatsächlich während des Schubs ändern. Dazu wurde die Differenz (als „Werte_DIFF“ bezeichnet) zwischen den normierten Werten_VOR und Werte_NACH gebildet:
$$\text{Werte_DIFF} = \text{Werte_NACH} - \text{Werte_VOR}$$

Des Weiteren wurden mittels Streudiagrammen die Korrelationen zwischen den Werten_VOR und den Werten_NACH und zwischen den Werten_VOR und den Werten_DIFF überprüft.

Anschließend wurde berechnet, welche Änderung im Wachstum aus dem Wert_VOR vorhergesagt werden kann. Diese sogenannte prädizierte Differenz (als „Werte_PD“ bezeichnet) wurde erneut mittels linearer Regression berechnet. Die abhängige Variable war die prädizierte Differenz, die unabhängige Variable die Werte_VOR. Aus der Gleichung lässt sich schließlich der Faktor ablesen, um wie viel weniger oder mehr Wachstum vorausgesagt wurde.

Anschließend untersuchte man, ob ein Geschlechtereffekt vorliegt, das heißt, ob es nötig wäre für weibliche und männliche Patienten unterschiedliche Formeln aufzustellen.

Schritt 3 (Schätzfehler)

Durch die Werte der tatsächlichen und prädizierten Änderungen konnte schließlich der Schätzfehler berechnet werden. Dafür wurde die Differenz zwischen den Werten_DIFF und den Werten_PD gebildet:
$$(\text{Schätzfehler} = \text{Werte_DIFF} - \text{Werte_PD})$$

Mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests wurde überprüft, ob der Schätzfehler normalverteilt ist und daraufhin die Verteilung in einem Balkendiagramm bildhaft dargestellt.

Schritt 4 (Praktische Konsequenz)

Als praktische Konsequenz der durchgeführten Berechnungen wurde nun überprüft, welche Auswirkung der Schätzfehler hat, das heißt, wie viel Prozent des vorhergesagten Wachstums zur Verfügung steht.

Dazu wurde der Quotient aus der tatsächlichen Änderung und der vorhergesagten Änderung berechnet. Erhält man bei diesem Quotienten einen Wert größer als 1,0, dann ist die tatsächliche Änderung größer als das, was vorhergesagt wurde, der Patient wird unterschätzt. Umgekehrt wird der Patient überschätzt, wenn der Quotient kleiner als 1,0 ist. Zur besseren Darstellung wurde die Differenz zu 100% verwendet. Fälle mit Werten, deren Quotient kleiner als +/-10% waren, wurden dabei nicht betrachtet, da ein Quotient dieser Größe nicht aussagekräftig wäre. Bei den Winkelmaßen gilt gleiches für Werte kleiner als 10°. Die daraus resultierende Anzahl von fehlenden Werten wird bei den Ergebnissen genannt.

Außerdem wurde für jeden Fall durch Vergleichen der Quotienten der sieben Parameter derjenige herausgesucht, welcher am kleinsten geschätzt wurde. Diese Quotienten wurden dann ebenfalls in einem Balkendiagramm eingetragen. Das gleiche wurde daraufhin für den größten Wert innerhalb eines Falls und auch für den Mittelwert der Quotienten durchgeführt. Diese wurden ebenfalls in einem Balkendiagramm graphisch dargestellt.

2.2.4 Graphische Darstellung der altersabhängigen Entwicklung der HWK

Zur Veranschaulichung der Abhängigkeitsstruktur von Alter zum jeweiligen geometrischen Kriterium wurden Streudiagramme erstellt. Die resultierende Punktwolke gibt Hinweise auf die altersabhängige Entwicklung der HWK.

Im gesamten Datensatz von 1377 FRS-Aufnahmen wurden die Daten gesondert für weibliche und für männliche Patienten untersucht, indem die Fälle nach Geschlecht gefiltert wurden. Im Diagramm wurden die Werte des betrachteten Kriteriums gegen das Alter geplottet und die Loess-Anpassungslinie mit 55% Anpassung und der Kernfunktion nach Epanechnikov erstellt. Diese soll das Mittel der Werte graphisch darstellen.

Daraus wurden folgende spezielle Patienten herausgesucht: mit Werten genau auf der Anpassungslinie, oberhalb und unterhalb der Anpassungslinie – und schließlich noch Patienten, die die Kurve während des Wachstums kreuzen. Zu diesen Patienten wurden daraufhin neue Streudiagramme mit der beschriebenen Anpassungslinie erstellt. Die Werte aller männlichen Patienten wurden als graue nicht ausgefüllte Punkte und die Werte des speziellen Patienten wurden als schwarze größere Punkte dargestellt.

Dieser Vorgang wurde für alle sieben geometrischen Kriterien der männlichen und weiblichen Patienten wiederholt. Aus den FRS-Aufnahmen der jeweiligen betrachteten Patienten wurden hierzu passende Ausschnitte erstellt. Diese wurden als Bilderserie chronologisch sortiert.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Berechnung für das C3: Höhen-Breiten-Verhältnis

Schritt 1

Das Streudiagramm (Abbildung 10) zeigt die lineare Beziehung zwischen den zwei Variablen Höhen-Breiten-Verhältnis an C3 (y-Achse) als absolute Werte und der Zeit vor 1 Jahr vor Wachstumspeak in Jahren (x-Achse). Rosa zeigt hier die weiblichen, blau die männlichen Patienten. Mit steigendem Alter steigt der Wert für xhb3.

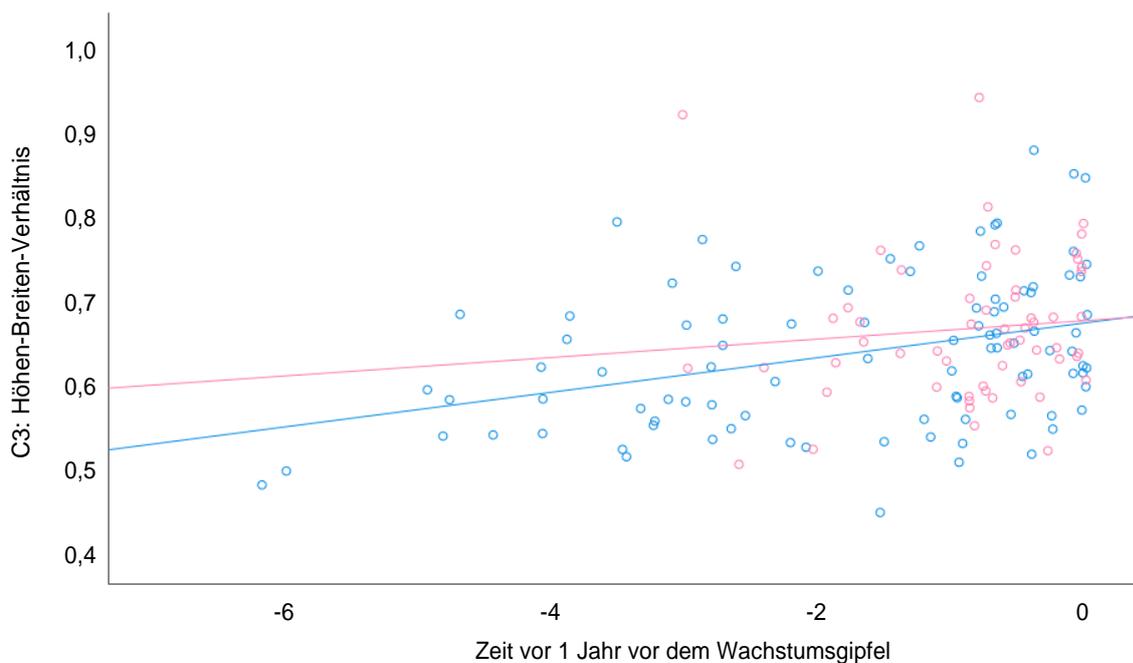


Abbildung 10: Streudiagramm für die Variable C3: Höhen-Breiten-Verhältnis vor dem Wachstumspeak

Durch lineare Regression und Ablesen der Parameter aus Tabelle 5 lässt sich die Gleichung zur Berechnung des Werts xhb3_VOR erstellen:

$$\mathbf{xhb3_VOR = xhb3 + 0.020*age1d}$$

Die Variablen der Formel werden wie folgt beschrieben: **xhb3_VOR** ist der normierte Werte zum Zeitpunkt „1 Jahr vor dem Wachstumspak“, **xhb3** ist der gemessene Wert für das C3: Höhen-Breiten-Verhältnis zum Zeitpunkt age1d und **age1d** ist die Zeit vor dem Zeitpunkt „1 Jahr vor dem Wachstumsgipfel“.

Tabelle 5: Parameterschätzung für die Variable C3: Höhen-Breiten-Verhältnis vor dem Wachstumspak

Parameterschätzungen

Abhängige Variable: xhb3_VOR

Parameter	Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	T	Sig.	95% Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
Konstanter Term	0.672	0.013	52.658	0.000	0.647	0.697
age1d	-0.020	0.005	-3.712	0.000	-0.031	-0.009

Dieses Streudiagramm (Abbildung 11) veranschaulicht die lineare Beziehung zwischen den zwei Variablen Höhen-Breiten-Verhältnis an C3 (y-Achse) als absolute Werte und der Zeit nach Wachstumsspeak in Jahren (x-Achse). Mit steigendem Alter steigt der Wert für xhb3.

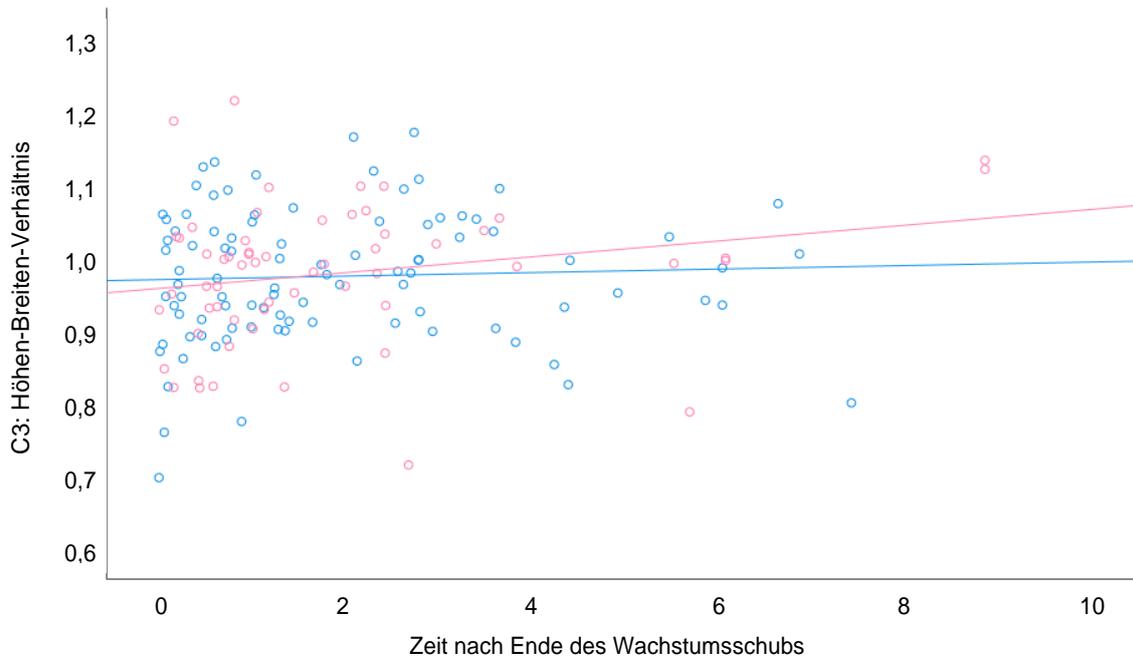


Abbildung 11: Streudiagramm für die Variable C3: Höhen-Breiten-Verhältnis nach dem Wachstumsspeak

Durch lineare Regression und Ablesen der Parameter aus Tabelle 6 ergibt sich die Gleichung zur Berechnung des Werts xhb3_NACH:

$$\mathbf{xhb3_NACH = xhb3_2 - 0.002*age2d}$$

Dabei beschreibt die Variable **xhb3_NACH** die normierten Werte zum Zeitpunkt „Zeit nach dem Wachstumsspeak“, **xhb3_2** ist der gemessene Wert für das C3: Höhen-Breiten-Verhältnis zum Zeitpunkt age2d und **age2d** die „Zeit nach dem Wachstumsspeak“.

Tabelle 6: Parameterschätzung für die Variable C3: Höhen-Breiten-Verhältnis nach dem Wachstumspeak

Parameterschätzungen

Abhängige Variable: xhb3_NACH

Parameter	Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	T	Sig.	95% Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
Konstanter Term	0.969	0.014	71.368	0.000	0.942	0.996
age2d	0.002	0.005	0.458	0.648	-0.008	0.013

Daraus ergibt sich die Berechnung der tatsächlichen Differenz:

$$\mathbf{xhb3_DIFF=xhb3_NACH-xhb3_VOR}$$

Dabei beschreibt die Variable **xhb3_DIFF** den Wert, um wie viel sich die Werte tatsächlich während des Schubs ändern, **xhb3_VOR** die normierten Werte zum Zeitpunkt „1 Jahr vor dem Wachstumspeak“ und **xhb3_NACH** die normierten Werte zum Zeitpunkt „Zeit nach dem Wachstumspeak“.

Schritt 2

Im Folgenden wurde die Abhängigkeit von xhb3_VOR zu xhb3_NACH untersucht und ein Streudiagramm erstellt.

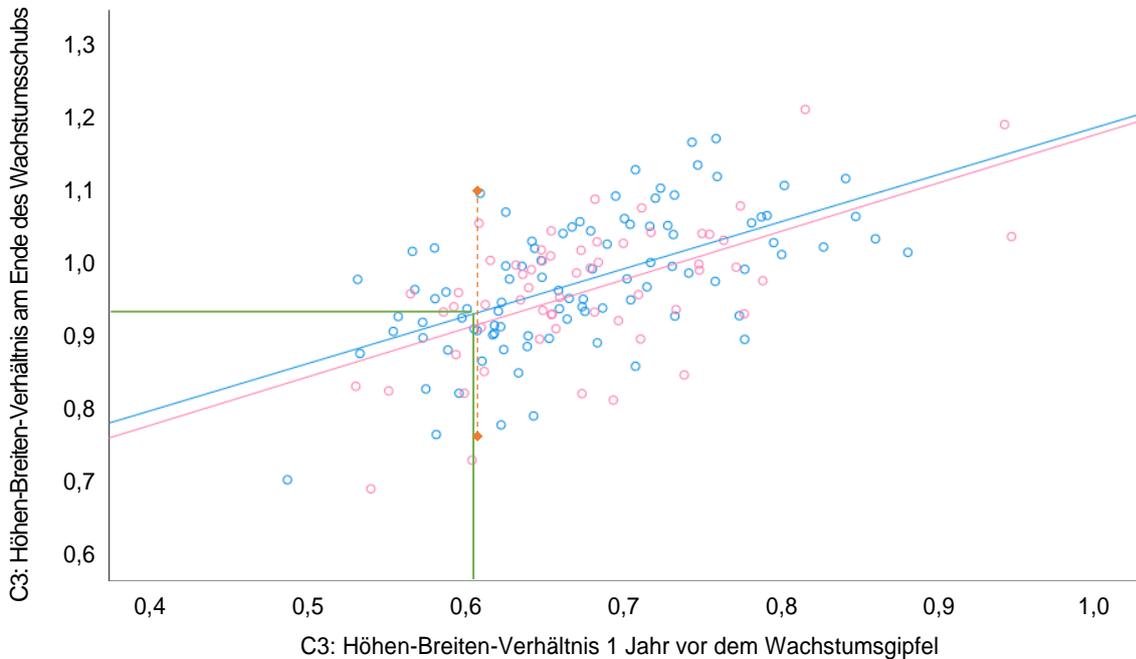


Abbildung 12: Streudiagramm mit den beiden normierten Werten

Es wurde das Streudiagramm mit den beiden normierten Werten xhb3_VOR (x-Achse) und xhb3_NACH (y-Achse) erstellt. Die beiden Linien entsprechen den linearen Anpassungslinien – rosa für weibliche, blau für männliche Patienten. Es ist eine Korrelation zwischen xhb3_VOR und xhb3_NACH zu erkennen. Bei einem größer geschätzten Wert für xhb3 vor dem Wachstumsspeak wird ebenfalls ein größerer Wert für xhb3 nach dem Wachstum geschätzt. Bei bekanntem xhb3_VOR kann der entsprechende Wert für xhb3_NACH abgelesen werden. So findet man für einen männlichen Patienten bei xhb3_VOR=0,6 den entsprechenden Wert 0,93 für xhb3_NACH. Dadurch, dass sich nicht alle Punkte streng an der Linie orientieren, sondern eine Punktwolke abbilden, ist zu erkennen, dass das 95%-Konfidenzintervall – also der Bereich, in dem der wahre Mittelwert mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit liegt – sehr groß ist. Die Werte können zwischen 0,75 und 1,10 variieren.

Im Folgenden wurde die Abhängigkeit von xhb3_DIFF zu xhb3_VOR untersucht, um den Einfluss von xhb3_VOR auf das Maß der Änderung während des Wachstums herauszufinden. Die Ergebnisse sind im folgenden Streudiagramm dargestellt (siehe Abbildung 13).

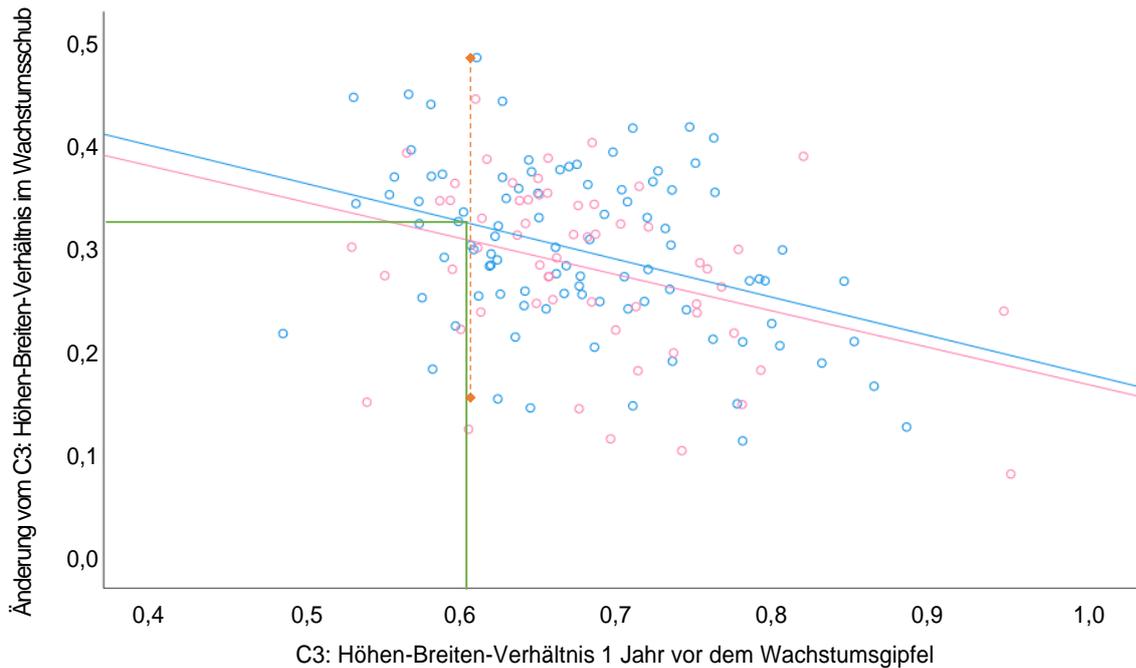


Abbildung 13: Streudiagramm für die Werte vor dem Wachstumsspeak und die tatsächliche Differenz

Im Streudiagramm sind an der x-Achse die Werte für xhb3_VOR und an der y-Achse die Werte für xhb3_DIFF abzulesen. Die linearen Anpassungslinien entsprechen – wie im vorherigen Diagramm – den weiblichen und den männlichen Patienten. Zu erkennen ist eine negative Korrelation zwischen den untersuchten Variablen. Das bedeutet, dass bei einem kleinen Wert für xhb3_VOR mehr Wachstum, bei einem großen Wert von xhb3_VOR weniger erwartet wird. Bei einem männlichen Patienten mit einem Wert 0,6 für xhb3_VOR beträgt das zu erwartende Wachstum circa 0,33. Betrachtet man das 95%-Konfidenzintervall, können diese Werte zwischen 0,15 oder 0,48 liegen. Mit der gerechneten linearen Regression lässt sich die prädizierte Differenz

(= xhb3_PD), also der Wert um wie viel weniger oder mehr das Wachstum geschätzt wird, berechnen. Man erhält aus der Tabelle für die Parameterschätzung die Werte und kann folgende Gleichung aufstellen:

$$\mathbf{xhb3_PD = 0.301 - 0.037 * xhb3_VOR}$$

Dabei beschreibt die Variable **xhb3_PD** die prädizierte Differenz des Wertes für das C3: Höhen-Breiten-Verhältnis und **xhb3_VOR** die normierten Werte zum Zeitpunkt „1 Jahr vor dem Wachstumspeak“.

Tabelle 7: Parameterschätzung für die Variable prädizierte Differenz

Parameterschätzungen

Abhängige Variable: xhb3_DIFF

Parameter	Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler	T	Sig.	95% Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
Konstanter Term	0.301	0.008	39.533	0.000	0.286	0.316
xhb3_VOR	-0.037	0.009	-3.965	0.000	-0.055	-0.018

Mit einem steigenden geschätzten Wert für xhb3_VOR wird ein Vielfaches von 0.037 weniger Wachstum vorausgesagt. Zusammenfassend wurde bei einem höheren xhb3_VOR ein höheres xhb3_NACH, bei kleinerer erwarteter Änderung, geschätzt.

Geschlechtereffekt

Es wurden sowohl weibliche als auch männliche Patienten ausgewählt, um zu überprüfen ob es einen Geschlechtereffekt gibt, das heißt ob es notwendig ist verschiedene Formeln für Mädchen und Jungen aufzustellen. Dafür wurde

folgende Nullhypothese formuliert: „das Wachstum unterscheidet sich bei Jungen und Mädchen nicht in den Koeffizienten“.

Das Signifikanzniveau war für die Werte vor dem Wachstumsspeak ($P = 0,542$), gegen Ende des Wachstums ($P = 0,301$) und für die Abhängigkeit von $xhb3_DIFF$ zu $xhb3_VOR$ ($P = 0,913$) nicht signifikant. Die Nullhypothese wird nicht abgelehnt. Das Wachstum unterscheidet sich also nicht in den Koeffizienten, verschiedene Formeln zur Schätzung der Werte für Mädchen und Jungen sind somit nicht notwendig.

Schritt 3

Zuerst wurde die Nullhypothese – der Schätzfehler ist normalverteilt – aufgestellt und mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests überprüft. Der P-Wert fiel dabei sowohl bei den männlichen ($P = 0,563$) als auch bei den weiblichen Patienten ($P = 0,091$) und auch in der Gesamtheit betrachtet ($P = 0,128$) deutlich höher aus als das Signifikanzniveau. Die Nullhypothese kann somit nicht abgelehnt und die Werte können als ungefähr normalverteilt angenommen werden. Die Verteilung des Schätzfehlers ist in einem Balkendiagramm dargestellt (siehe Abbildung 14). Die x-Achse zeigt den Schätzfehler als absolute Zahl in den 0,1er Schritten. Auf der y-Achse wird die absolute Verteilung des Schätzfehlers von 0 bis 20 in 5er-Schritten dargestellt.

Die Standardabweichung beträgt 0,074. Somit liegen 95% der Werte im Bereich $0,074 \cdot (1,96)$ und $0,074 \cdot (-1,96)$. Daraus ergibt sich ein 95%-Bereich für die Schätzfehler von $\pm 0,145$. In der Schätzung wird für das mediane Höhen-Breiten-Verhältnis 1 Jahr vor Wachstumsgipfel im Mittel eine Zunahme von etwa 0,3 vorhergesagt. Betrachtet man dazu das 95%-Intervall kann dieser Wert zwischen 0,445 und 0,155 schwanken (Median \pm 95%-Konfidenzintervall $\rightarrow 0,3 \pm 0,145$). Der Medianwert für das Höhen-Breiten-Verhältnis an C3 vor dem Wachstumsspeak beträgt 0,66.

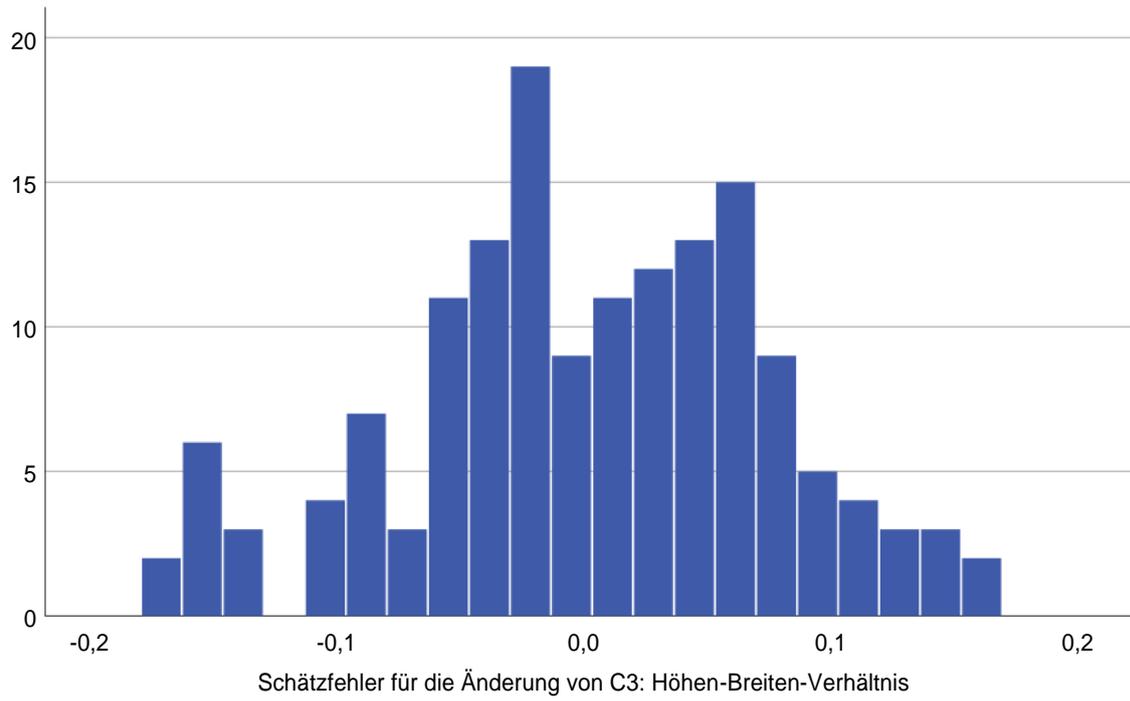


Abbildung 14: Schätzfehler für C3: Höhen-Breiten-Verhältnis

Schritt 4

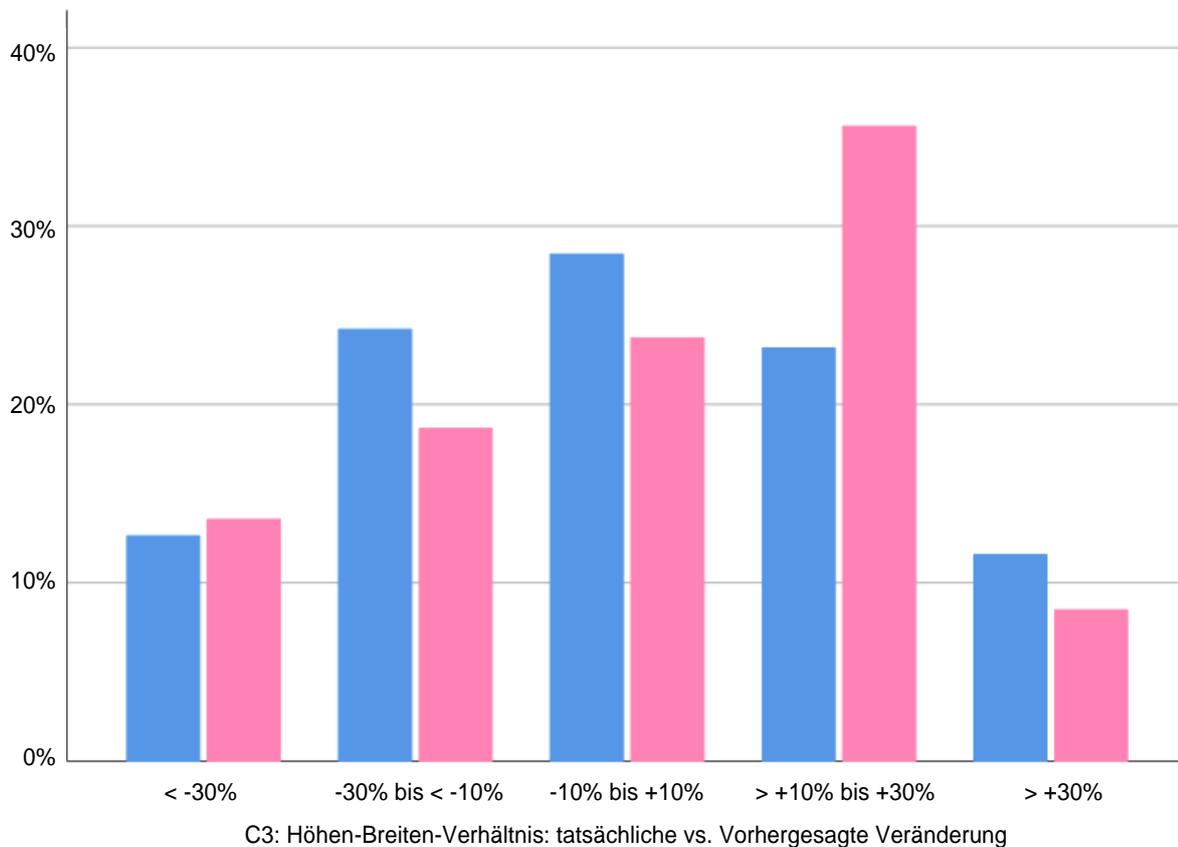


Abbildung 15: Quotientenverteilung für C3:Höhen-Breiten-Verhältnis – weiblich und männlich

Dieses Balkendiagramm gibt Auskunft über die Verteilung des Quotienten zwischen tatsächlicher und vorhergesagter Änderung. Die x-Achse zeigt diesen Quotienten in Prozent, auf der y-Achse wird dessen Verteilung dargestellt. Die blauen Balken geben dabei den Wert der männlichen, die rosa Balken den der weiblichen Patienten an. Im Diagramm wurden die Fälle, deren Quotient weniger als +/-10% beträgt nicht mit einbezogen, da eine Fehleinschätzung dieser Größenordnung vernachlässigbar für die Einschätzung des Wachstums ist. Die Anzahl der fehlenden Fälle beträgt beim beobachteten Kriterium 0. Die genauen Werte sind in einer Tabelle (Tabelle 8) angegeben.

Tabelle 8: Quotient zwischen tatsächlicher und vorhergesagter Änderung

C3: Höhen-Breiten-Verhältnis: tatsächliche vs. vorhergesagte Veränderung

Geschlecht			Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
männlich	Gültig	< -30%	12	12.6	12.6	12.6
		-30% ... < -10%	23	24.2	24.2	36.8
		-10% ... +10%	27	28.4	28.4	65.3
		> +10% ... +30%	22	23.2	23.2	88.4
		> +30%	11	11.6	11.6	100.0
		Gesamt	95	100.0	100.0	
weiblich	Gültig	< -30%	8	13.6	13.6	13.6
		-30% ... < -10%	11	18.6	18.6	32.2
		-10% ... +10%	14	23.7	23.7	55.9
		> +10% ... +30%	21	35.6	35.6	91.5
		> +30%	5	8.5	8.5	100.0
		Gesamt	59	100.0	100.0	

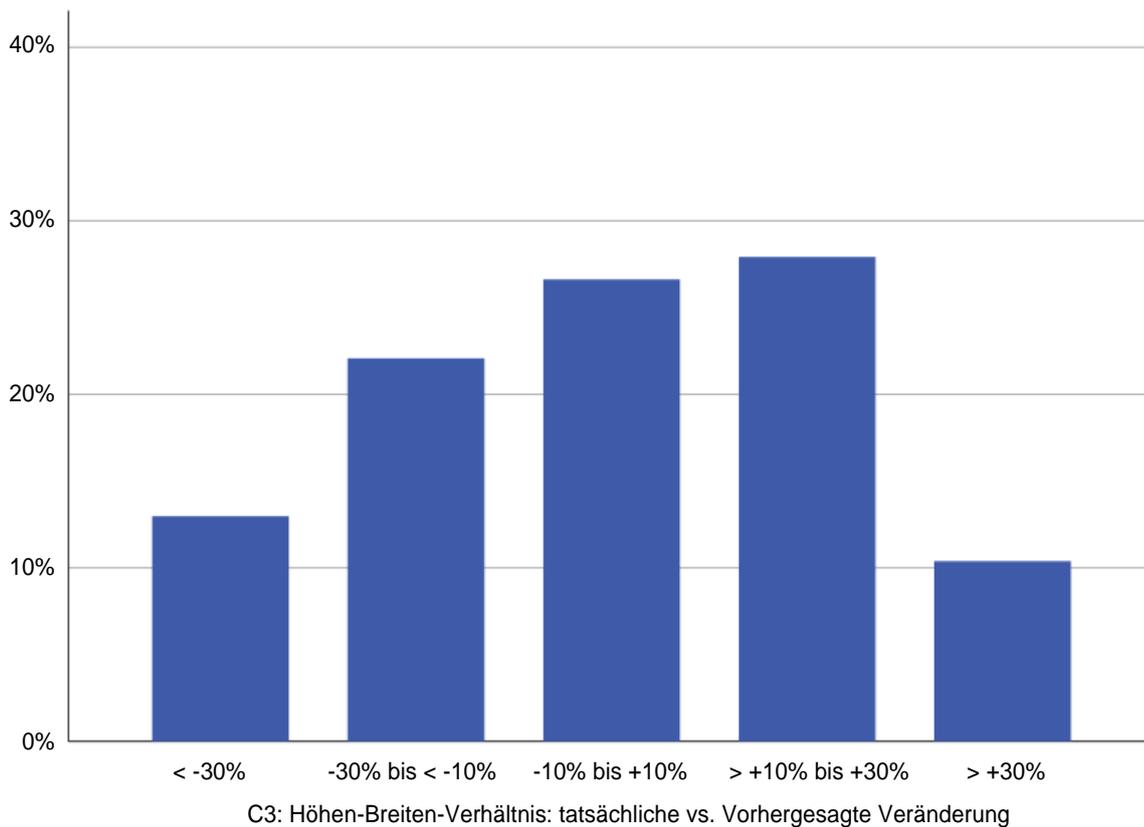


Abbildung 16: Quotientenverteilung für C3:Höhen-Breiten-Verhältnis – gesamt

Dieses Balkendiagramm ist wie Abbildung 15 aufgebaut. Es spiegelt die Verteilung der männlichen und weiblichen Fälle gemeinsam als dunkelblauen Balken wider. Die genauen Werte sind Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Quotient zwischen tatsächlicher und vorhergesagter Änderung

C3: Höhen-Breiten-Verhältnis: tatsächliche vs. vorhergesagte Veränderung

		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
Gültig	< -30%	20	13.0	13.0	13.0
	-30% ... < -10%	34	22.1	22.1	35.1
	-10% ... +10%	41	26.6	26.6	61.7
	> +10% ... +30%	43	27.9	27.9	89.6
	> +30%	16	10.4	10.4	100.0
	Gesamt	154	100.0	100.0	

3.2 Ergebnisse der weiteren Parameter

Die Berechnungen der weiteren Kriterien wurden analog zu C3: Höhen-Breiten-Verhältnis durchgeführt.

Schritt 1

Für die Parameter Höhen-Breiten-Verhältnis an C4, anterior-posteriores Höhenverhältnis an C3 und an C4 sowie für den Winkel der inferioren Konkavität an C2, C3 und C4 wurden die normierten Werte analog zum Höhen-Breiten-Verhältnis von C3 berechnet. Daraus ließ sich wiederum die tatsächliche Änderung während des Wachstums errechnen.

Schritt 2

Bei der Untersuchung der Abhängigkeiten der normierten Werte untereinander konnten bei allen geometrischen Parametern Korrelationen zwischen den Werten_VOR und den Werten_NACH und eine negative Korrelation zwischen den Werten_VOR und den Werten_DIFF festgestellt werden.

Bei der Berechnung der prädizierten Differenz wurde bei den jeweiligen Parametern mit steigenden Werten_VOR weniger Wachstum vorausgesagt. Die entsprechenden Faktoren sind Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Faktoren zu den geometrischen Parametern

Geometrischer Parameter	Faktor
C4: Höhen-Breiten-Verhältnis	0.037
C3: anterior-posteriores Höhenverhältnis	0.074
C4: anterior-posteriores Höhenverhältnis	0.076
C2: Winkel der inferioren Konkavität	0.677
C3: Winkel der inferioren Konkavität	0.618
C4: Winkel der inferioren Konkavität	0.572

Geschlechtereffekt

Es wurde bei keinem Parameter ein Geschlechtereffekt festgestellt. Die dazu aufgestellte Nullhypothese wurde nicht abgelehnt. Die Signifikanz war in allen Fällen größer als 0,05 – somit gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Die Tabelle 11 zeigt die Parameter und das dazugehörige Signifikanzniveau P:

Tabelle 11: P-Werte der jeweiligen Parameter beim Test bezüglich des Geschlechtereffekts

	C4: Höhen-Breiten-Verhältnis		
vor dem Wachstumspk	P = 0,752		
Ende des Wachstums	P = 0,972		
Abhängigkeit von den Werten_DIFF zu Werten_VOR	P = 0,251		
	C3: anterior-posteriores Höhenverhältnis	C4: anterior-posteriores Höhenverhältnis	
vor dem Wachstumspk	P = 0,649	P = 0,195	
Ende des Wachstums	P = 0,012	P = 0,123	
Abhängigkeit von den Werten_DIFF zu Werten_VOR	P = 0,205	P = 0,352	
	C2: Winkel der inferioren Konkavität	C3: Winkel der inferioren Konkavität	C4: Winkel der inferioren Konkavität
vor dem Wachstumspk	P = 0,743	P = 0,921	P = 0,123
Ende des Wachstums	P = 0,134	P = 0,304	P = 0,610
Abhängigkeit von den Werten_DIFF zu Werten_VOR	P = 0,612	P = 0,248	P = 0,609

Schritt 3

Bei allen Parametern konnte mittels Shapiro-Wilk-Test bestätigt werden, dass der Schätzfehler normalverteilt ist. Der P-Wert fiel deutlich höher aus als das Signifikanzniveau. Die Werte der einzelnen Parameter werden tabellarisch zusammengefasst (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: P-Werte des Shapiro-Wilk-Tests für die jeweiligen Parameter

	C4: Höhen-Breiten-Verhältnis		
männlich	P = 0,919		
weiblich	P = 0,271		
gesamt	P = 0,788		
	C3: anterior-posteriores Höhenverhältnis	C4: anterior-posteriores Höhenverhältnis	
männlich	P = 0,471	P = 0,944	
weiblich	P = 0,977	P = 0,953	
gesamt	P = 0,593	P = 0,980	
	C2: Winkel der inferioren Konkavität	C3: Winkel der inferioren Konkavität	C4: Winkel der inferioren Konkavität
männlich	P = 0,370	P = 0,511	P = 0,914
weiblich	P = 0,431	P = 0,199	P = 0,632
gesamt	P = 0,936	P = 0,099	P = 0,688

Die Standardabweichung, Mittelwert und 95%-Intervall des Schätzfehlers der jeweiligen Parameter sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Standardabweichung, Mittelwert und 95%-Intervall des Schätzfehlers für die jeweiligen Parameter

	Standard- abweichung	Mittelwert des Wachstums	95%-Bereich des Schätzfehlers
C4: Höhen-Breiten- Verhältnis	0,084	0,27	+/-0,165
C3: anterior-posteriores Höhenverhältnis	0,066	0,17	+/-0,129
C4: anterior-posteriores Höhenverhältnis	0,065	0,18	+/-0,127
C2: Winkel der inferioren Konkavität	5,971	-15,2	+/-11,703
C3: Winkel der inferioren Konkavität	5,621	-17,4	+/-11,017
C4: Winkel der inferioren Konkavität	6,646	-16,7	+/-13,026

Schritt 4

Die Auswirkung des Schätzfehlers bei den verschiedenen Parametern wird im Folgenden in Balkendiagrammen dargestellt.

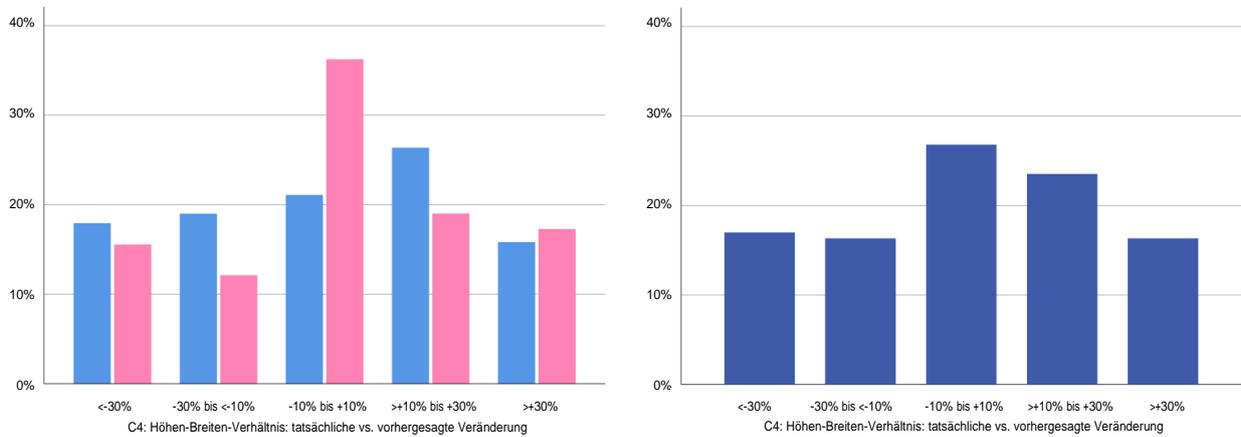


Abbildung 17: Quotientenverteilung für C4: Höhen-Breiten-Verhältnis

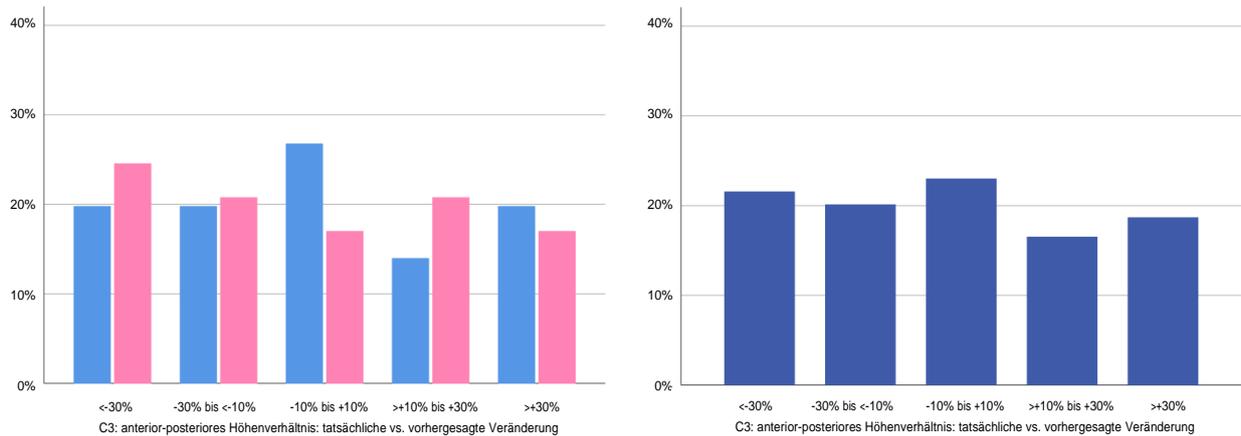


Abbildung 18: Quotientenverteilung für C3: anterior-posteriores Höhenverhältnis

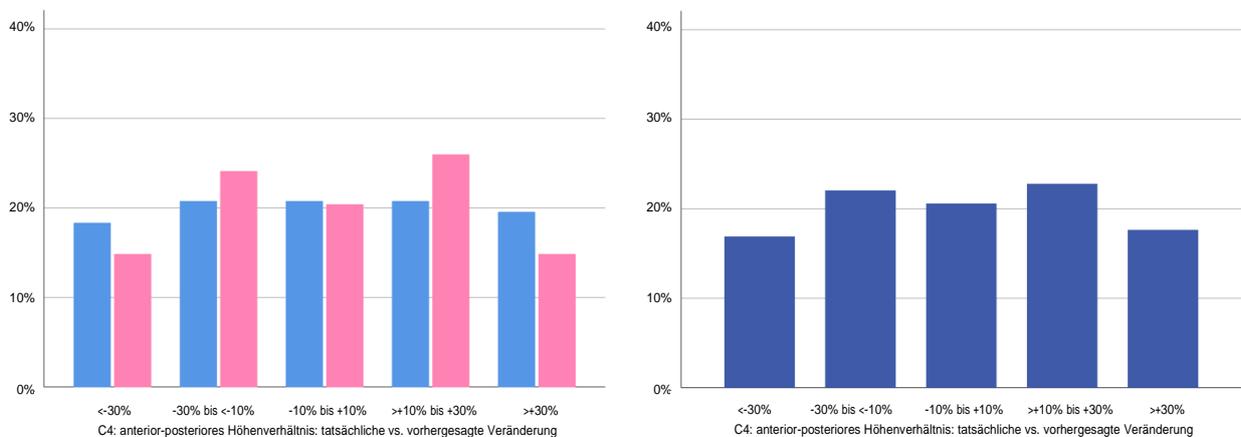


Abbildung 19: Quotientenverteilung für C4: anterior-posteriores Höhenverhältnis

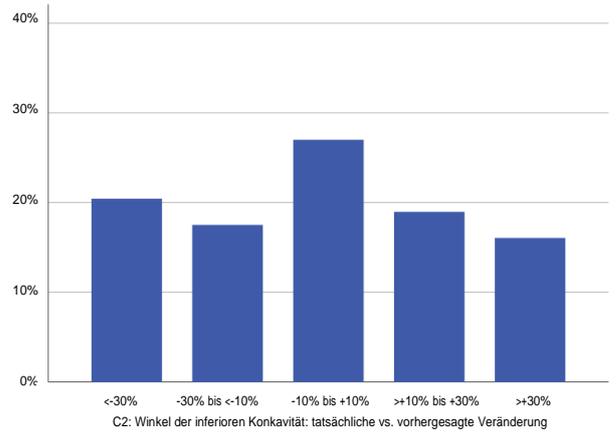
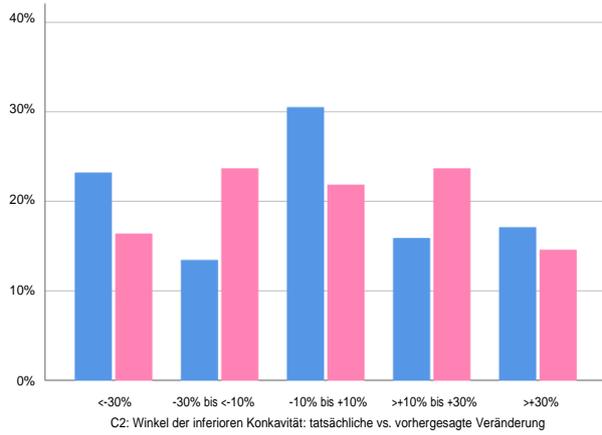


Abbildung 20: Quotientenverteilung für C2: Winkel der inferioren Konkavität

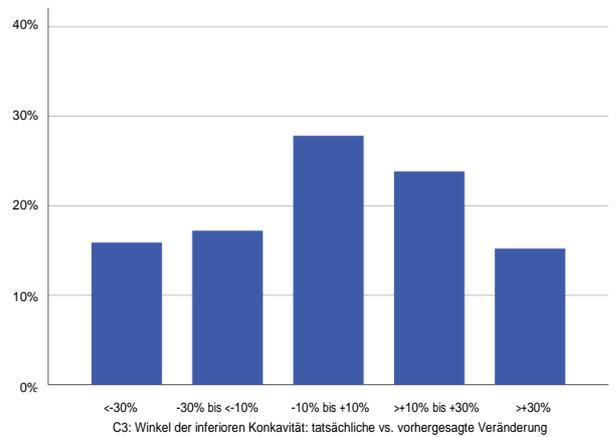
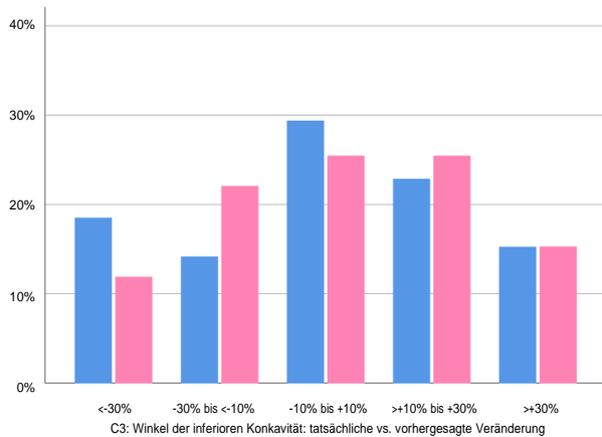


Abbildung 21: Quotientenverteilung für C3: Winkel der inferioren Konkavität

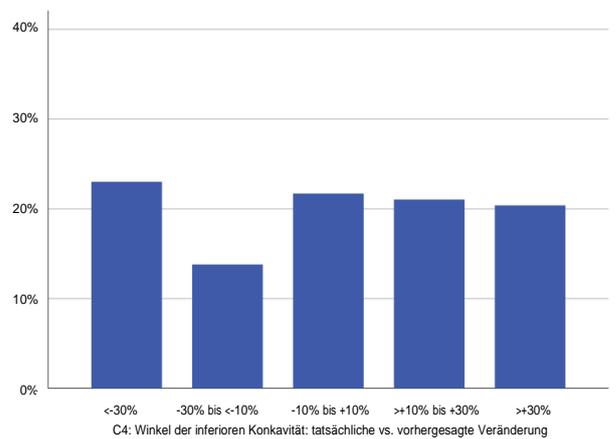
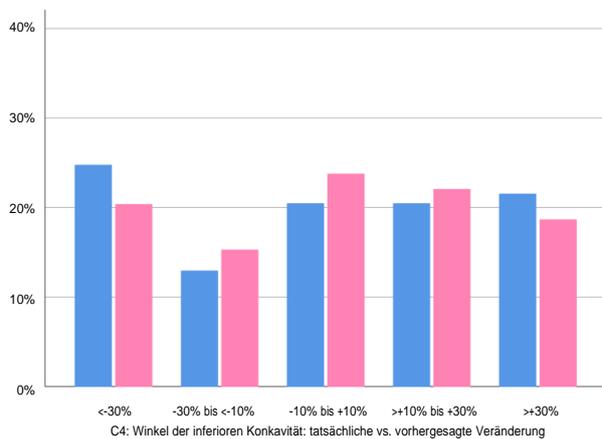


Abbildung 22: Quotientenverteilung für C4: Winkel der inferioren Konkavität

Minimum, Maximum und Mittelwert

Minimum

Im Schnitt fällt auf, dass von den 95 männlichen Fällen 60% ein Kriterium besitzen, welches überschätzt wird (-30%), bei den 59 weiblichen Fällen sind dies 54,2%.

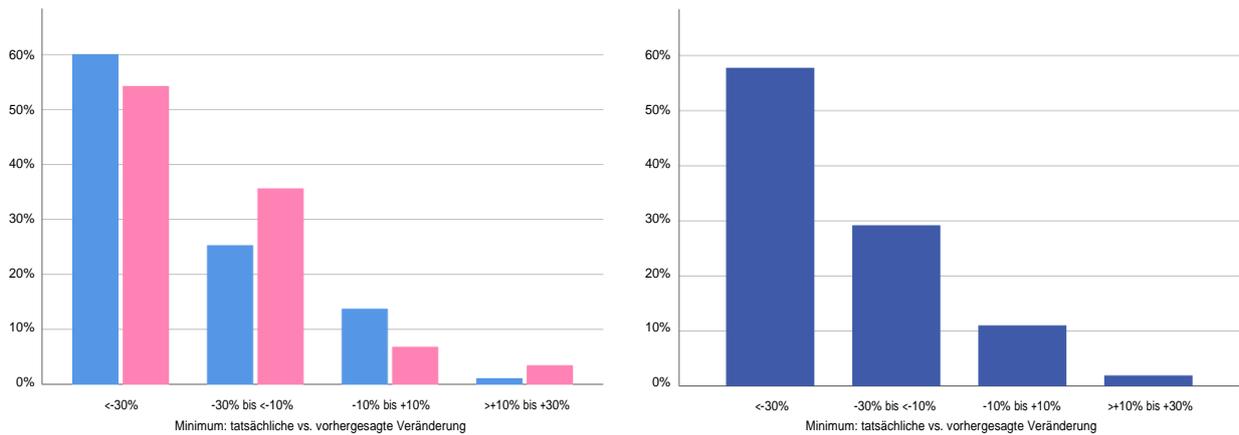


Abbildung 23: Quotientenverteilung für das Minimum der Werte

Maximum

Beim ausgewählten Maximum des Quotienten findet man bei den männlichen Fällen 62,1% +30%; bei den weiblichen Patienten 59,3%. Das heißt zu knapp 60% werden die Patienten in einem Kriterium unterschätzt.

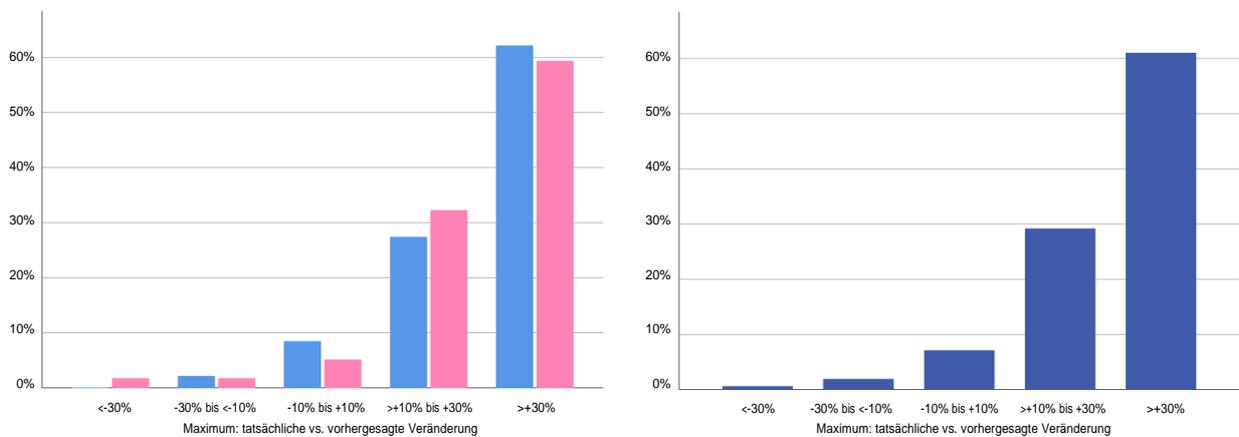


Abbildung 24: Quotientenverteilung für das Maximum der Werte

Mittelwert

Der Mittelwert des Quotienten sammelt sich sowohl bei den männlichen als auch bei den weiblichen Patienten im Bereich -10% +10%.

42,1% der männlichen Patienten und 39% der weiblichen Patienten werden im Durchschnitt entweder um 10% über- oder unterschätzt.

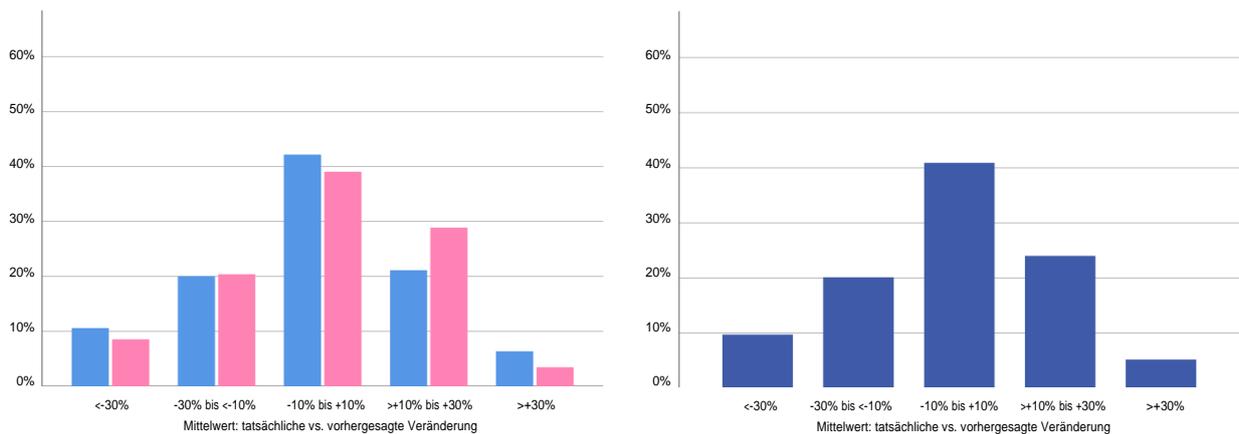
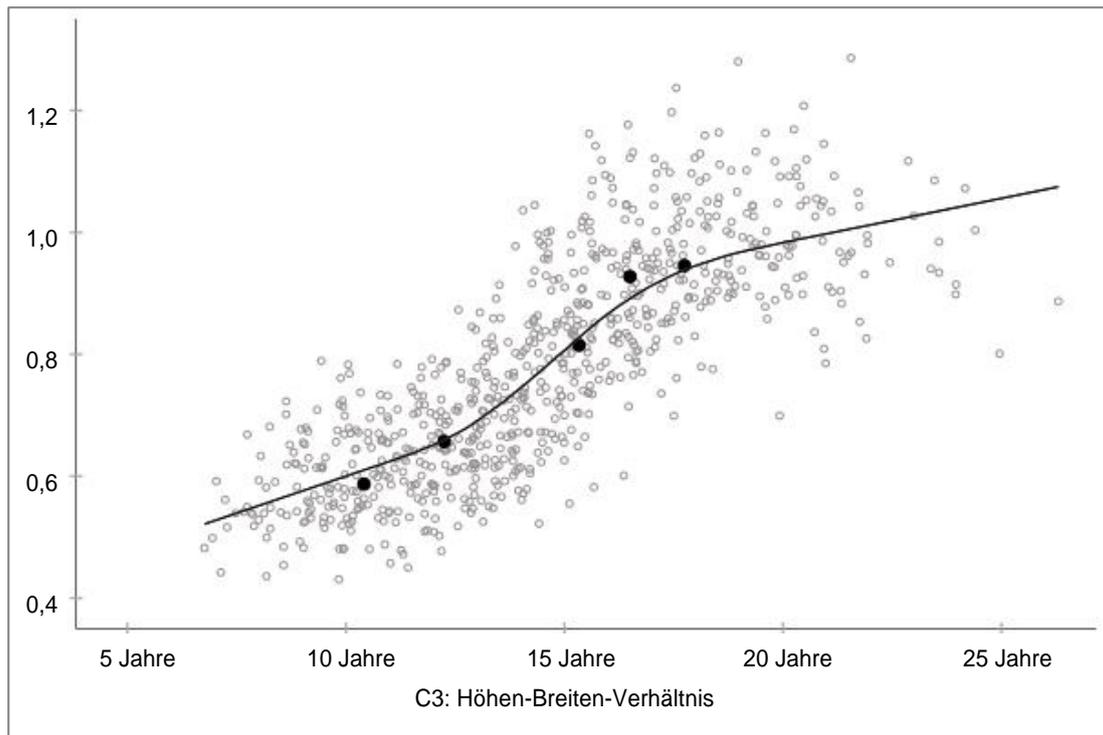


Abbildung 25: Quotientenverteilung für den Mittelwert der Werte

3.3 Streudiagramme zum C3: Höhen-Breiten-Verhältnis

Nachfolgend exemplarisch die Streudiagramme für den Parameter C3: Höhen-Breiten-Verhältnis mit Werten auf, über und unter der Anpassungslinie zuerst für männliche Patienten, dann für weibliche. Als letztes wird noch das Streudiagramm mit den zugehörigen Ausschnitten der Röntgenbilder zu einem Patienten, der die Linie kreuzt, dargestellt. Die Diagramme und Aufnahmen zu den weiteren Parametern sind im Anhang zu finden.

3.3.1 Auf der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



10,4 Jahre



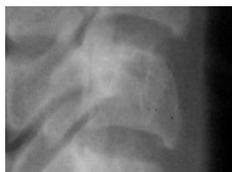
12,3 Jahre



15,3 Jahre



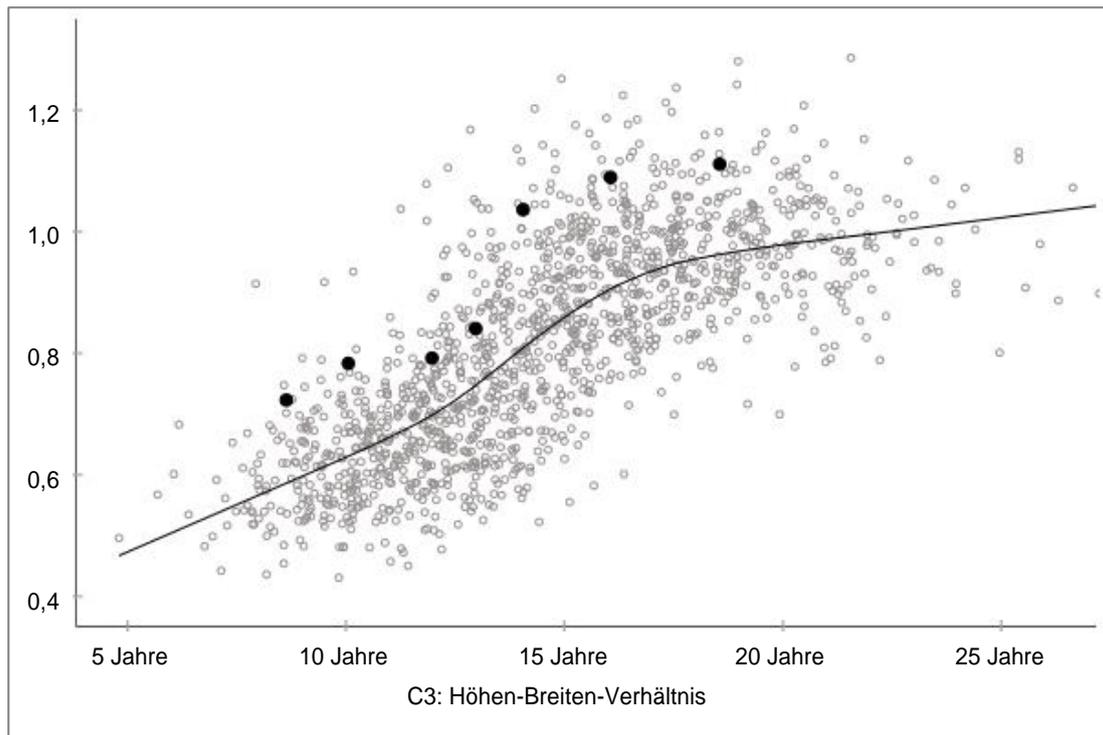
16,5 Jahre



17,7 Jahre

Abbildung 26: Patient 80071

3.3.2 Über der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



8,6 Jahre



10,1 Jahre



12,0 Jahre



13,0 Jahre



14,1 Jahre



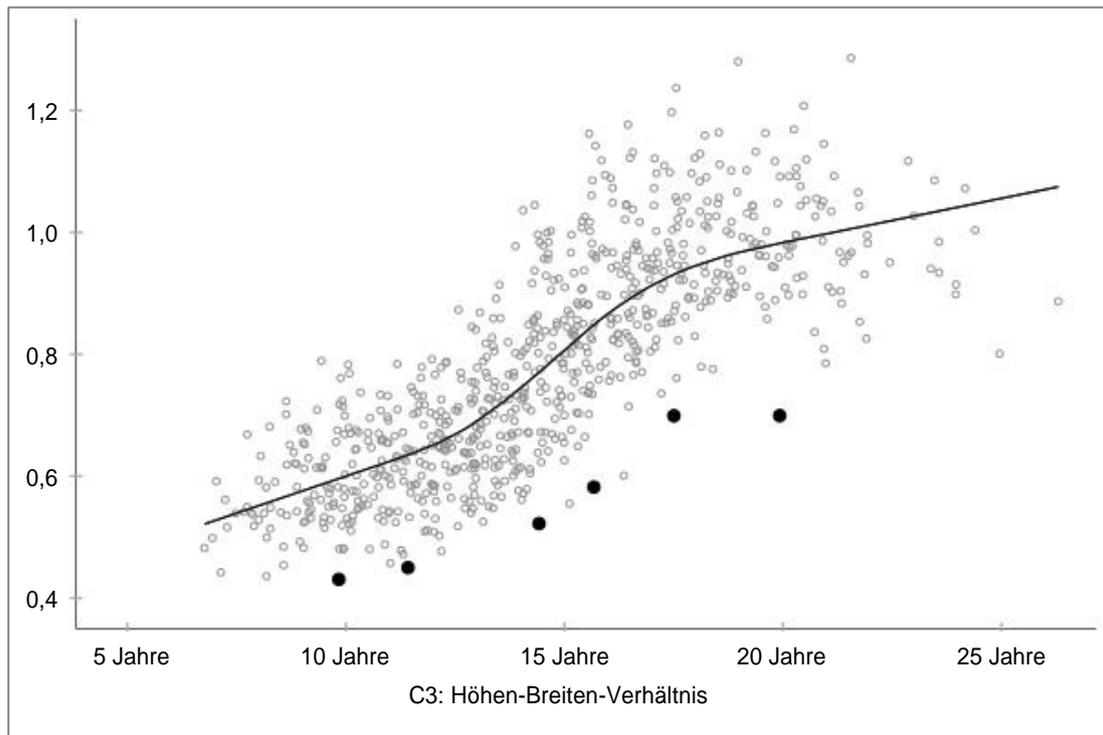
16,1 Jahre



18,6 Jahre

Abbildung 27: Patient 80172

3.3.3 Unter der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



9,8 Jahre



11,4 Jahre



14,4 Jahre



15,7 Jahre



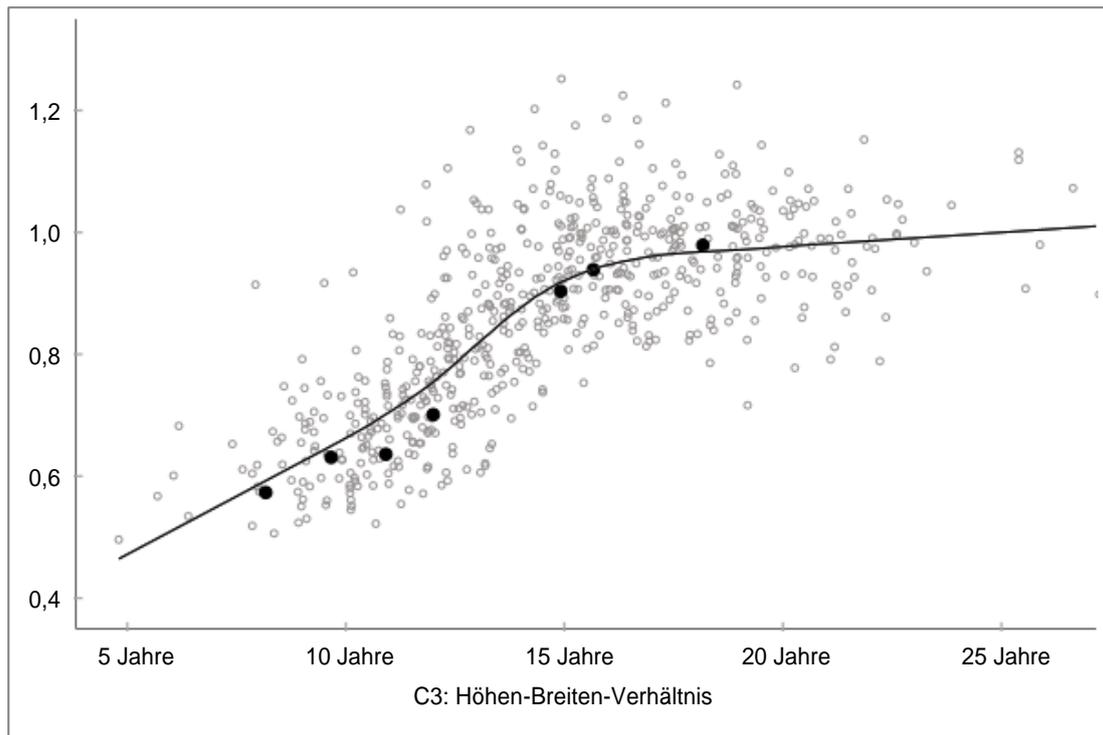
17,5 Jahre



19,9 Jahre

Abbildung 28: Patient 85001

3.3.4 Auf der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



8,2 Jahre



9,7 Jahre



10,9 Jahre



12,0 Jahre



14,9 Jahre



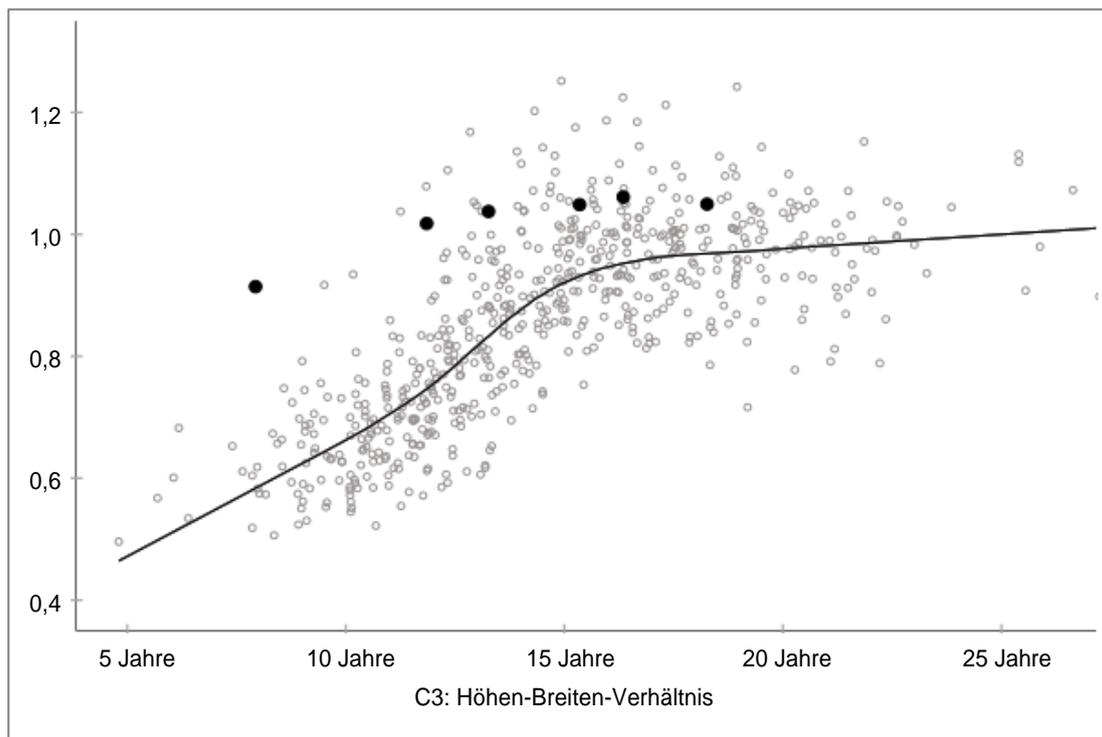
15,7 Jahre



18,2 Jahre

Abbildung 29: Patientin 80055

3.3.5 Über der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



7,9 Jahre



11,9 Jahre



13,3 Jahre



15,4 Jahre



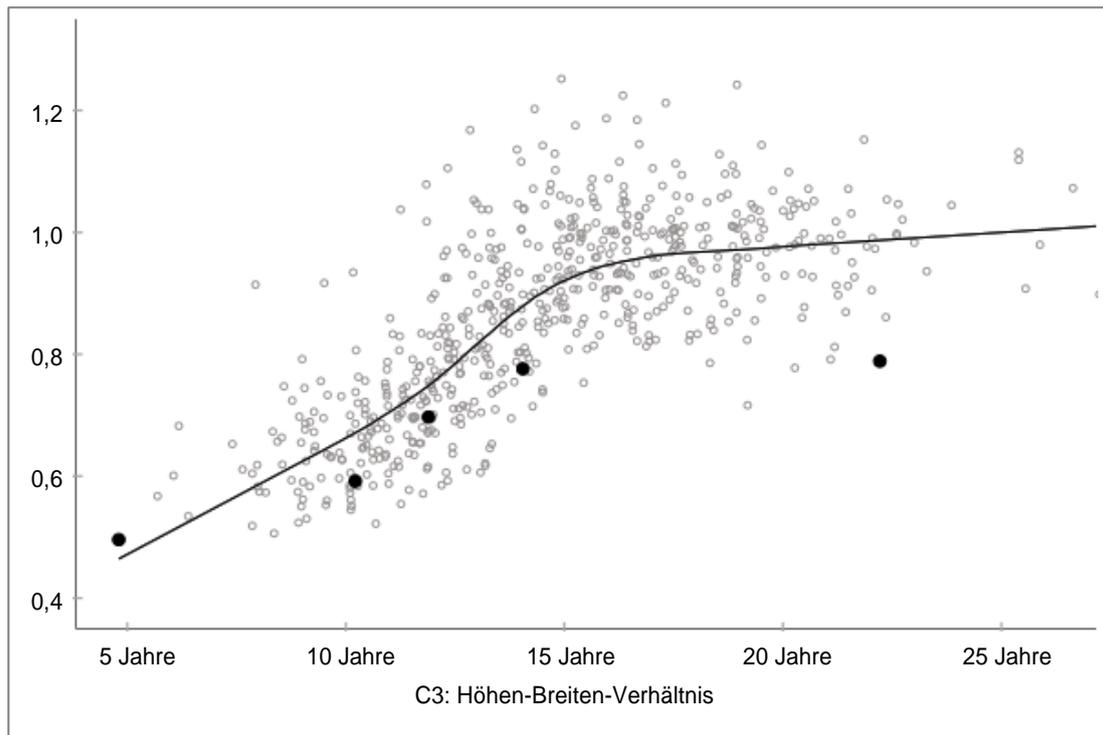
16,4 Jahre



18,3 Jahre

Abbildung 30: Patientin 80127

3.3.6 Unter der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



4,2 Jahre



10,2 Jahre



11,9 Jahre



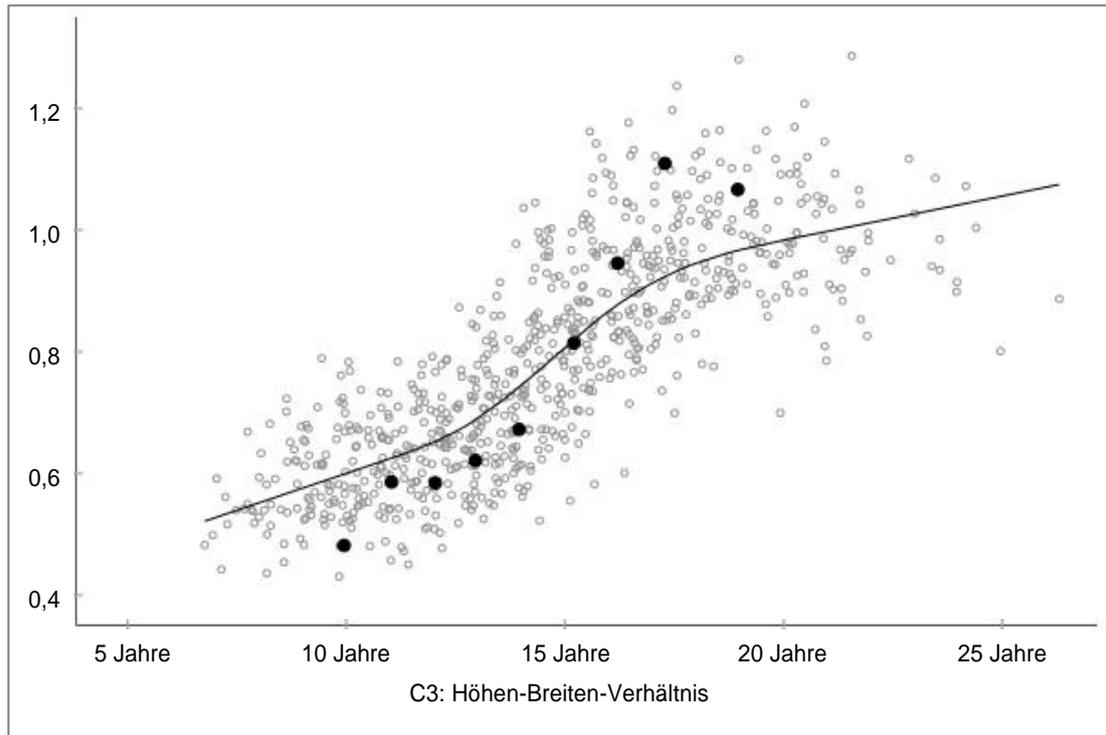
14,1 Jahre



22,2 Jahre

Abbildung 31: Patientin 85060

3.3.7 Die Anpassungslinie kreuzend – männlich



Röntgenbilder



10,0 Jahre



11,0 Jahre



12,0 Jahre



13,0 Jahre



14,0 Jahre



15,2 Jahre



16,2 Jahre



17,3 Jahre



19,0 Jahre

Abbildung 32: Patient 80073

4 Diskussion

4.1 Material

In unserer retrospektiven Längsschnittstudie wurden aus insgesamt 1377 FRS-Aufnahmen von 267 Patienten – 110 weibliche und 157 männliche – verwendet. Bei der ersten Aufnahme musste der Patient jünger als 8 Jahre sein, bei der letzten älter als 20. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Patienten ausgewachsen sind. Die große Fallzahl bietet hier eine gute Auswahl vor allem hinsichtlich der variablen Geometrie der HWK. Durch aufeinanderfolgende Röntgenaufnahmen konnten die Fälle über einen langen Zeitraum beobachtet werden, damit eine Aussage über die Entwicklung und Reifestufen der HWK getroffen werden kann. Für die Auswertung der FRS-Aufnahmen hinsichtlich der Morphologie und die Erstellung der Streudiagramme wurden alle Aufnahmen genutzt. Für die Altersschätzung mittels linearer Regression wurden die Fälle auf 95 männliche und 59 weibliche Patienten eingegrenzt.

4.2 Methode

Aufgrund des individuellen und unterschiedlichen Ausmaßes des Wachstums ist die Bestimmung der skelettalen Reife in verschiedenen Bereichen von großer Bedeutung. So kann die Korrektur einer Kieferfehlage im Rahmen einer kieferorthopädischen Behandlung nur dann erfolgsversprechend durchgeführt werden, wenn abgeschätzt werden kann, in welcher Wachstumsphase sich der Patient befindet [26].

Außerdem wird die skelettale Reifebestimmung mittels Röntgenaufnahmen auch in der Forensik immer bedeutungsvoller. Es kann beispielsweise aus verfahrensrechtlichen Gründen notwendig sein, das Alter eines Jugendlichen zu bestimmen, wenn durch fehlende Ausweispapiere keine Aussage getroffen werden kann. Ab einem Alter von 14 Jahren gilt ein Kind in Deutschland als strafmündig, ab Vollendung des 21. Lebensjahres wird das Erwachsenenstrafrecht angewandt. Es wird somit deutlich, dass hier eine genaue Alters-

einschätzung notwendig ist [29]. Des Weiteren kann eine radiologische Reifebestimmung auch bei der Identifizierung von Unfallopfern hilfreich sein.

Es wurden in den letzten Jahren bereits diverse Herangehensweisen zur radiologischen Alterseinschätzung entwickelt.

Zu den bekanntesten und am meisten genutzten Verfahren gehört die Auswertung von Handröntgenaufnahmen. Eine Methode ist das Vergleichen der Röntgenbilder mit Standards eines Atlanten [13]. Eine weitere ist die Beurteilung spezieller Reifeindikatoren (SMI) nach Fishman, die während der Entwicklung der Handknochen in einer speziellen regelmäßigen Reihenfolge auftreten und röntgenologisch nachweisbar sind. Diese Methode vereinfachte Fishman durch einen Algorithmus, der besagt, immer zuerst nach dem Stadium 4, der Ossifikation des Sesamoids zu suchen. Das größte Wachstum findet im Stadium 5 bis 6 statt. Hierdurch ist es möglich, durch eine einfache, standardisierte Methode nachzuweisen, ob noch Wachstum zu erwarten ist. Nach dem Stadium 11 (Fusion von Epiphyse und Diaphyse am Radius) ist nahezu kein Wachstum mehr zu erwarten, der Patient ist schließlich ausgewachsen [4]. Bei der Reifebestimmung mittels Handröntgenaufnahme gilt somit die Ossifikation des metacarpalen Sesamoids des Daumens als zuverlässiges und einheitliches Zeichen kurz vor dem Wachstumspeak [3, 28, 30-33].

Des Weiteren wurden Methoden zur dentalen Altersbestimmung entwickelt. Hier nutzt man spezifische Entwicklungsstadien, die jeder Zahn bei der Bildung durchläuft und beurteilt diese anhand von OPGs. Jeder beurteilte Zahn erhält hierbei eine Bewertung, welche mittels einer geschlechterspezifischen Tabelle in einen Score umgewandelt wird. Durch diesen Wert kann dann das Alter schlussendlich ermittelt werden [15]. Darüber hinaus ist eine Kombination mit der Handröntgenmethode zur genaueren Alterseinschätzung möglich [34].

Eine dritte Methode ist die CVM-Methode, bei der die Einschätzung des skelettalen Alters mittels HWK durchgeführt wird. Die Idee ist hier im Sinne des ALARA-Prinzips eine Röntgenaufnahme zu nutzen, die standardmäßig bei der

kieferorthopädischen Behandlung angefertigt wird, um somit die Anfertigung einer weiteren Aufnahme – wie die der Hand – zu vermeiden. Dabei werden die HWK C2-C4 hinsichtlich der Konkavität und C3, C4 bezüglich ihrer Form beurteilt und in Reifestadien eingeteilt. Diese Methode wurde das erste Mal von Lamparski beschrieben und später von Baccetti et. al. modifiziert. Dabei soll bei den jährlich wechselnden Stadien, zwischen CVMS II und CVMS III das stärkste Wachstums stattfinden [19, 25].

In der Literatur gibt es kontroverse Diskussionen bezüglich der Verlässlichkeit der CVM-Methode [5, 22, 24, 25, 27, 35-52]. Meist sind die Aussagen der vorliegenden Studien aufgrund der Untersuchung von nur geringen Altersspannen [43-46, 48-50], geringen Fallzahlen [24, 25, 46, 47, 52] oder dem Fehlen longitudinaler Daten limitiert [45, 48, 50]. Der Vorteil longitudinaler Daten ist jedoch, dass aufgrund des Beobachtungszeitraumes eine bessere Aussage zur Entwicklung und Reifestufen der HWK getroffen werden kann und über eine vergrößerte Probandenanzahl die Diversität der Morphologie von HWK besser wiedergespiegelt werden könnte.

Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass sich die HWK nach einem bestimmten Schema entwickeln und einen genauen Endpunkt in der Entwicklung einnehmen. In einem jüngst publizierten Leitfaden zur Bestimmung der CVM-Stadien wird die Geometrie der HWK als standardisiert angenommen. Es wird von einem Wachstumsprozess gesprochen, was die Einteilung in Stadien erschweren kann. Dennoch wird dargestellt, dass die HWK stets bestimmte Formen einhalten. So sollen C2, C3 und C4 beispielsweise im vorletzten Stadium alle eine Konkavität am unteren Rand haben oder im letzten Stadium C3 und C4 eine vertikale rechteckige oder quadratische Form annehmen [53]. Hier wird also die anatomische Varianz der HWK außer Acht gelassen.

Eine genaue Vorhersage zur Altersbestimmung kann allerdings nur dann getroffen werden, wenn sich die beobachteten Strukturen, über die Menschheit verteilt, gleichmäßig entwickeln und von einem fixen Endstadium ausgegangen werden kann. Dies ist sowohl beim Zuwachsen der Epiphysenfuge, bei der

Ossifikation des Sesamoids als auch beim Verschluss des Apex beim Zahn der Fall [4, 15]. Die HWK hingegen unterliegen während des Wachstums einer fortdauernden morphologischen Änderung und zeigen im Erwachsenenalter eine sehr variable Geometrie.

4.2.1 Altersschätzung mittels linearer Regression

Da die Ermittlung des skelettalen Alters an den HWK mittels rein visueller Beurteilung zu einer beobachterabhängigen subjektiven Einschätzung führt, gab es bereits Ansätze, ein objektives Verfahren zu nutzen [36, 43-45, 48, 54, 55]. Mito et. al. ermittelten 2002 anhand mehrerer morphologischer Merkmale an C3 und C4 – gemessen in FRS-Aufnahmen von 176 Mädchen – eine Formel zur Bestimmung des skelettalen Alters. Dabei untersuchten sie die Form der HWK hinsichtlich der Höhe und Breite (vordere Höhe, hintere Höhe, Höhe gemessen in der Mitte des HWK und die Breite zwischen dem anterioren und posterioren Rand). Sie nutzten diese Formel, um das Knochenalter von weiteren 66 Mädchen zu berechnen und verglichen die Ergebnisse mit dem ermittelten Alter anhand einer Handröntgenaufnahme [48]. Caldas et. al. sammelten ebenfalls Daten zur Höhe und Breite von C3 und C4, um eine Formel zur Berechnung des skelettalen Alters zu berechnen [43, 44]. In diesen Studien wurden die Ergebnisse der Formel mit Ergebnissen der Handröntgenanalyse verglichen. Sie beurteilten die Methode als aussagekräftig genug.

Weitere Studien befassten sich mit dem Quotienten aus der vorderen und hinteren Höhe an C4 [54], mit der Geometrie der HWK C1-C4 [55], mit der Konkavität, vorderen Höhe an C2-C4 und dem Winkel zwischen den oberen und unteren Rändern an C3 und C4 [36] und mit der Konkavität an C2-C6, Höhe und Form der HWK C3-C6 [50].

In unserer Studie wurden hingegen verschiedene geometrische Parameter einzeln betrachtet. Bei der Altersschätzung nach der CVM ist es schwierig, sich zu entscheiden, welchem Parameter die größte Bedeutung beigemessen werden

soll [51]. Somit konnte untersucht werden, ob es einen speziellen Parameter gibt, durch welchen eine genaue Einschätzung des Wachstums möglich ist.

Dabei sollte nicht direkt das skeletale Alter vorhergesagt werden, sondern eine Aussage darüber getroffen werden, ob es möglich ist, aus der Geometrie vor dem Wachstumsschub auf die Geometrie nach dem Wachstumsschub zu schließen und dadurch die CVM-Methode zu individualisieren. Aus diesem Grund wurde in unserer Studie der Ansatz gewählt, die Metrik individuell zu berechnen, um eine objektive Herangehensweise zu ermöglichen. Dadurch soll vermieden werden, dass die HWK durch die rein visuelle Betrachtung subjektiv beurteilt werden.

Es wurde also berechnet, wie viel Wachstum noch vorhanden ist. Besonders die Kieferorthopädie könnte davon stark profitieren, da hier im Laufe einer Behandlung häufig mehrere FRS-Aufnahmen angefertigt werden. So könnte mittels linearer Regression individuell für jeden Patienten der Endpunkt des Wachstums berechnet werden. Dadurch könnte präzise vorhergesagt werden, welcher prozentuale Anteil des Wachstums noch verbleibt oder ob die Wachstumsreserve bereits erschöpft ist und der Patient somit skelettal ausgewachsen ist. Diese Modifizierung der CVM-Methode könnte dazu beitragen, die Strahlenexposition eines Patienten möglichst gering zu halten und weitere Röntgenaufnahmen, wie beispielsweise Handröntgenaufnahmen, zu vermeiden, um somit genau voraussagen zu können, in welchem Maße das Wachstum noch beeinflussbar ist.

Zur Veranschaulichung wurde in den Ergebnissen das Kriterium des Höhen-Breiten-Verhältnisses an C3 gewählt, da dieses Verhältnis einfach und klar eine Aussage trifft, ob der HWK horizontal rechteckig, quadratisch oder vertikal rechteckig ist. In der Literatur wird die visuelle Beurteilung der Form der HWK als schwierig einschätzbar beschrieben [38]. Dennoch lässt sich eine Formänderung leichter erkennen als beispielsweise die Einschätzung der Tiefe der Konkavität. Trotzdem wurden die anderen Kriterien ebenfalls berechnet und ausgewertet, da erst durch die Gesamtheit der Kriterien eine vollständige Aussage zur Geometrie getroffen werden kann.

4.2.2 Metrische Auswertung

Die metrische Vermessung der HWK erfolgte computergestützt mit Hilfe des Programms OnyxCeph, bei der die Referenzpunkte manuell ausgewählt wurden. Durch das auf jedem Röntgenbild mitgescannte Lineal konnte mithilfe von Normierungspunkten die Skala kalibriert werden. So konnten die HWK mit dem Modul „Leipzig Halswirbel“ ausgewertet und Winkel und Strecken, durch festgelegte Punkte berechnet werden. Da die Punkte händisch ausgewählt werden, kann es zu folgenden Fehlern kommen:

- Anteriore Länge falsch gemessen
- Unterschiedliche Werte für die anteriore Höhe
- Falsche Höhe gemessen – Doppelkonturen

Anteriore Länge falsch gemessen (c4as falsch gesetzt)

Da der vordere obere Bereich des HWK oft abgerundet ist, kann es hier schwierig sein, den obersten und vordersten Punkt genau zu definieren (siehe Abbildung 33).

Daraus resultiert eine veränderte anteriore Länge.

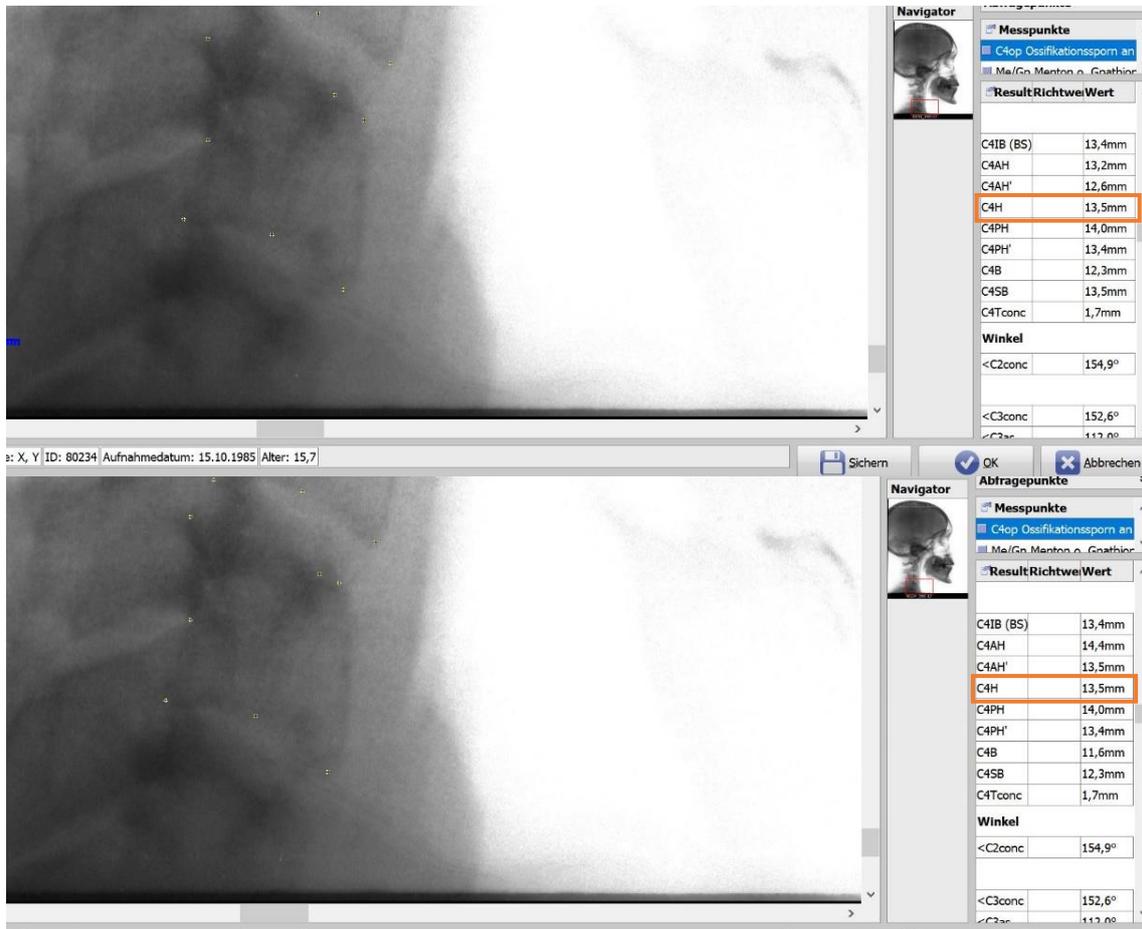


Abbildung 33: Ausschnitt der Messung an C4 aus dem Programm OnyxCeph

Unterschiedliche Werte für die anteriore Höhe

Durch das oben genannte Problem mit der genauen Positionierung des Punktes c3as oder c4as kann es zu unterschiedlichen Werten für die anteriore Höhe (siehe Abbildung 34) und somit auch für das anterior-posteriore Höhenverhältnis kommen. Im oberen Bild resultiert ein anterior-posteriore Höhenverhältnis von 0,78, im unteren von 0,60.

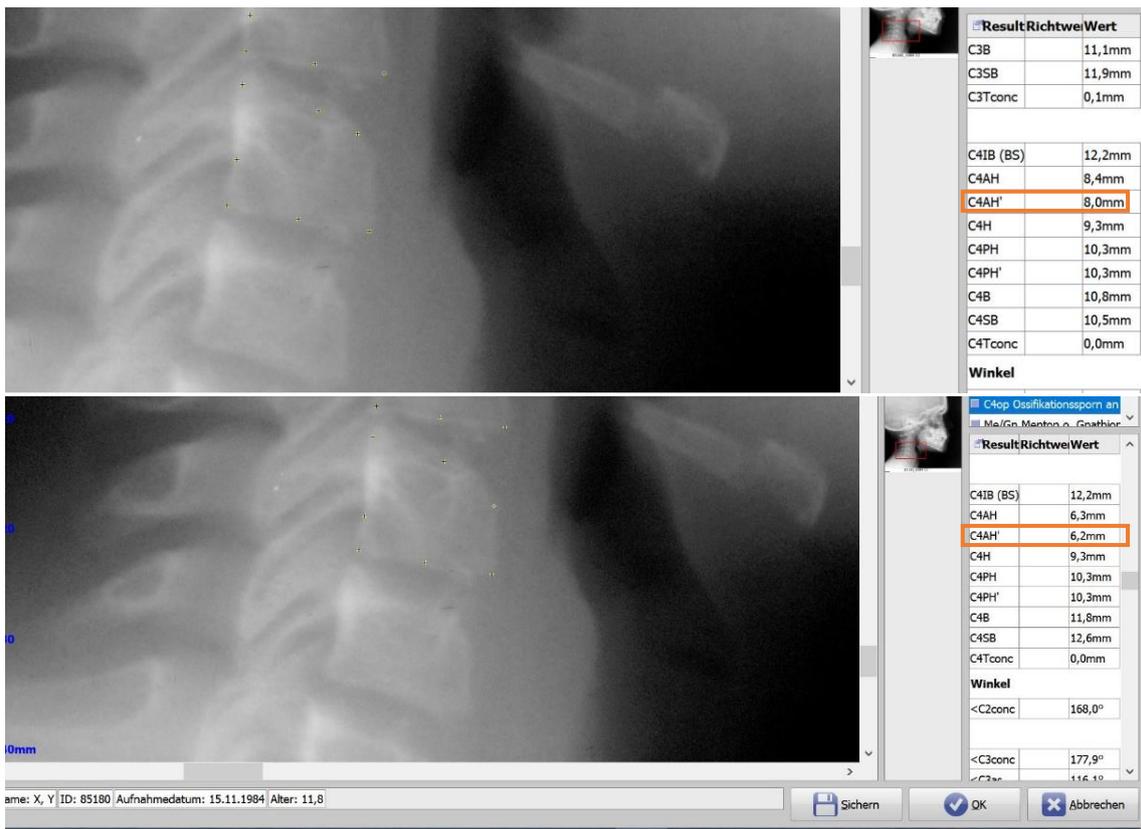


Abbildung 34: Ausschnitt der Messung an C4 aus dem Programm OnyxCeph

Falsche Höhe gemessen – Doppelkonturen

Durch Doppelkonturen kann es schwierig sein sich zu entscheiden, wo der Punkt genau zu setzen ist (siehe Abbildung 35). Dadurch kann es zu veränderten Werten für Strecken und Winkel kommen. Daraus resultiert schließlich ein veränderter Wert für das Höhen-Breiten-Verhältnis – im oberen Bild 0,77, im unteren Bild 0,65.

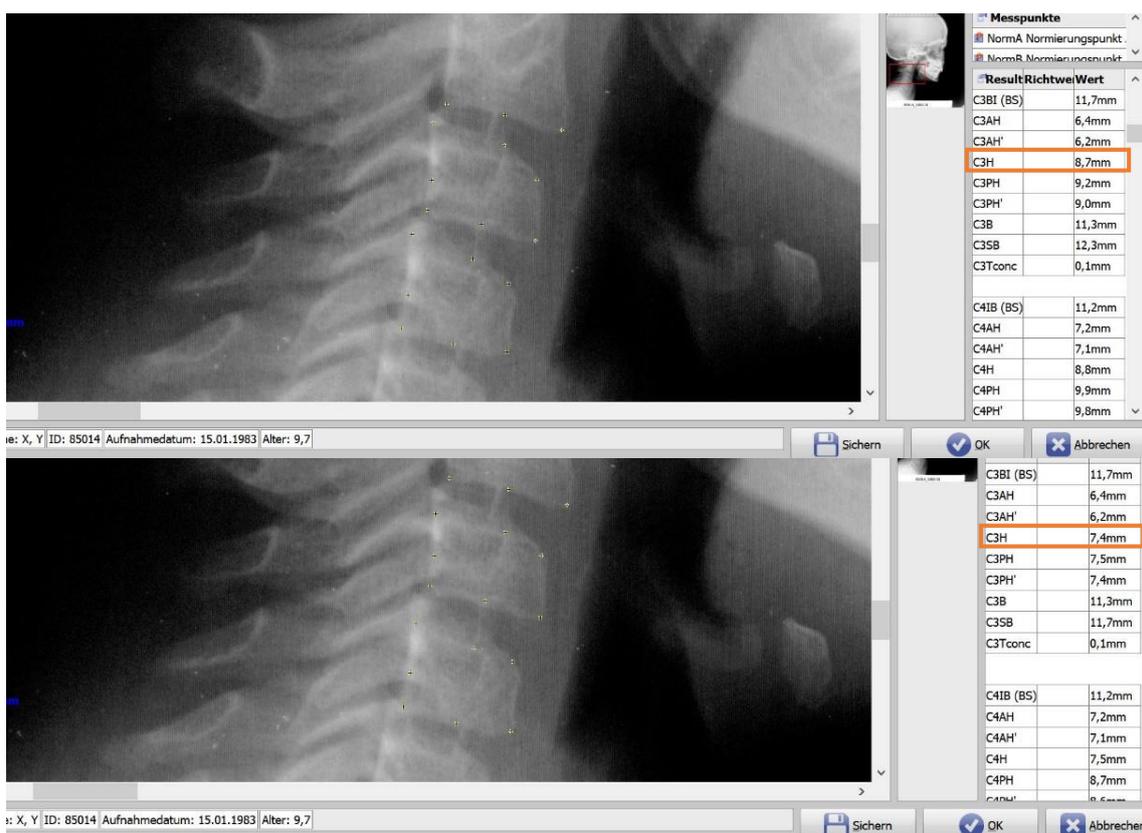


Abbildung 35: Ausschnitt der Messung an C4, C3 aus dem Programm OnyxCeph

Grund hierfür ist einerseits die individuelle manuelle und visuelle Auswahl der Punkte, welche durch die nicht immer perfekte Form der HWK erschwert wird – andererseits auch die Qualität und Aussagekraft der Röntgenaufnahmen. Durch Überlagerungen, Doppelkonturen und Verformungen kann das Setzen der Punkte erschwert werden. Diese Fehler im Röntgenbild entstehen meist durch Einstellungsfehler oder Bewegung des Kopfes. Ein weiterer nicht unbedeutender Grund ist die Tatsache, dass dreidimensionale Strukturen auf ein zweidimensionales Röntgenbild reduziert werden.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Schätzfehler

Am Beispiel von C3: Höhen-Breiten-Verhältnis wird die Streuung des Schätzfehlers beleuchtet. Die Standardabweichung beträgt 0,074, der 95%-Bereich für den Schätzfehler liegt bei +/-0,145. Es wird im Mittel eine Zunahme von etwa 0,3 vorhergesagt. Diese kann, das 95%-Intervall betrachtet, zwischen 0,445 und 0,155 schwanken. (Median +/- 95%-Konfidenzintervall $\rightarrow 0,3 \pm 0,145$).

Der Medianwert für das Höhen-Breiten-Verhältnis an C3 vor dem Wachstumspeak beträgt 0,66. Würde dieser Wert nun während des Wachstumsschubs beispielsweise einen Wert von 0,81 annehmen ($0,81 - 0,66 = 0,15$), hätte ein Wachstum von 0,15 stattgefunden. Betrachtet man das 95%-Intervall der mittleren Zunahme, wird geschätzt, ob und wie viel Wachstumsreserve noch vorhanden ist. An der 95%-Untergrenze orientiert, erhält man einen Wert von 0,97, was bedeutet, dass das Wachstum schon fast beendet ist (95%-Untergrenze $(0,81 - 0,66) / 0,155 = 97\%$). Umgekehrt betrachtet, an der 95%-Obergrenze orientiert, erhält man einen Wert von 0,34, was bedeutet, dass noch 66% Wachstum zu erwarten wäre (95%-Obergrenze $0,15/0,445 = 34\%$). Die daraus resultierende Schwankung zwischen 3% und 66% ist für die kieferorthopädische Behandlung erheblich, da dadurch ein Patient falsch eingeschätzt werden könnte. Somit könnte ein Patient mit bereits fast abgeschlossenem Wachstum falsch bewertet und folglich eine inadäquate kieferorthopädische Behandlung begonnen werden. Umgekehrt könnte ein Patient für bereits ausgewachsen gehalten werden, obwohl noch 66% Wachstumsreserve vorhanden sind.

Vergleichbare Ergebnisse wurden ebenfalls für die weiteren Parameter gefunden. Die Spanne der Schwankungen im übrigbleibenden Wachstum war so groß, dass die Information keine verlässliche Aussagekraft für die Kieferorthopädie geben kann. Keiner der beobachteten Parameter konnte also für die

Altersschätzung zuverlässige Informationen liefern. Es ist nun interessant zu wissen, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Schätzfehler schwankt.

4.3.2 Praktische Konsequenz

Aus den Balkendiagrammen zu C3: Höhen-Breiten-Verhältnis ist der Quotient aus tatsächlicher und vorhergesagter Änderung als Prozentwert abzulesen. Ist der Quotient größer als 1,0, wurde der Patient unterschätzt. Umgekehrt wurde der Patient überschätzt, wenn der Quotient kleiner als 1,0 ist. Zur besseren Darstellung wurde die Differenz zu 100% verwendet.

28,4% der männlichen Patienten werden fälschlicherweise entweder für ausgewachsen gehalten, obwohl noch 10% Restwachstum vorhanden sind oder überschätzt – es wird noch 10% Wachstum erwartet – obwohl der Patient ausgewachsen ist. Bei den weiblichen Patienten tritt dies zu 23,7% zu.

Unterschätzt

Bei den männlichen Patienten werden 23,2% unterschätzt, obwohl noch ein Wachstum von 10-30% stattfindet und sogar bei 11,6% der Patienten ist noch mehr als 30% Wachstum zu erwarten. Bei den weiblichen Patienten sind ähnliche Werte zu sehen. Hier werden 35,6% als ausgewachsen beurteilt, obwohl noch 10-30% Restwachstum stattfindet, bei 8,5% sind es noch mehr als 30% Wachstum. Bei diesen Patienten würde eine funktionskieferorthopädische Behandlung unter Umständen fälschlicherweise nicht in Betracht gezogen werden, da davon ausgegangen wird, dass sie bereits ausgewachsen sind. Des Weiteren könnte man sich irrtümlich dafür entscheiden, einen Patienten kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgisch zu behandeln und dabei zu riskieren, dass das Kieferwachstum noch lange nicht abgeschlossen ist.

Überschätzt

24,2% der männlichen Patienten werden überschätzt, das heißt, man geht davon aus, dass noch 10-30% Wachstum vorhanden sind, obwohl der Patient bereits ausgewachsen ist. Zu 12,6% wird sogar noch eine Entwicklung von über 30% erwartet. Bei weiblichen Patienten wird zu 18,6% noch ein Restwachstum von 10-30% erwartet, bei 13,6% sogar eine Zunahme von über 30%. Diese Patienten würden möglicherweise mit funktionskieferorthopädischen Apparaturen behandelt, um das Kieferwachstum zu beeinflussen, obwohl sie bereits ausgewachsen sind. Außerdem würde man sich bei diesen Patienten spät für kieferchirurgische Maßnahmen entscheiden.

Sowohl bei den männlichen als auch bei den weiblichen Patienten gab es keinen Fall mit einem Quotienten kleiner als 10%. Dieser wäre für die Einschätzung des Wachstums vernachlässigbar. Das heißt, jeder Patient wurde entweder über- oder unterschätzt. Somit ist die Schätzung des Restwachstums und folglich der Berechnung des skelettalen Alters, anders als in einigen Studien beschrieben [43, 44, 48], nicht aussagekräftig. In den erwähnten Studien wurden nur die Altersspannen 7,0-14,9 oder 7,0-15,9 betrachtet. Um sicher zu gehen, dass das Wachstum abgeschlossen ist, wurden in unserer Studie ausschließlich Fälle ausgewählt, die über dieses Alter hinausgehen. Es wurden die Fälle ausgewählt, die mindestens das Stadium Ru erreicht haben, das heißt bei Mädchen mindestens 16,5 Jahre, bei Jungen mindestens 17,5 Jahre [28]. Dadurch wurden auch die Fälle eingeschlossen, welche relativ spät ausgewachsen sind.

Bei gemeinsamer Betrachtung der weiblichen und männlichen Patienten ist diese Verteilung ebenfalls gut zu erkennen. 26,6% werden entweder zu 10% über- oder unterschätzt. 27,9% werden zu 10-30%, 10,4% sogar zu über 30% unterschätzt. 22,1% werden zu 10-30%, 13,0% zu mehr als 30% überschätzt. Es ist deutlich zu erkennen, dass fast ein Viertel der Patienten so falsch eingeschätzt werden würde, dass entweder noch mehr als fast ein Drittel Restwachstum übrig wäre oder beim Patienten fälschlicherweise noch annähernd ein Drittel Wachstum erwartet würde.

Auch bei den übrigen Parametern gab es kaum Fälle, die nur eine vernachlässigbare Fehleinschätzung des Wachstums hatten. C4: Höhen-Breiten-Verhältnis 1 Fall, C3: anterior-posteriores Höhenverhältnis 15 Fälle, C4: anterior-posteriores Höhenverhältnis 18 Fälle, C2: Winkel der inferioren Konkavität 17 Fälle, C3: Winkel der inferioren Konkavität 3 Fälle, C4: Winkel der inferioren Konkavität 2 Fälle. Somit ist weder die Form der HWK noch die Tiefe der Konkavität – welche als aussagekräftigstes Kriterium [50] beschrieben wurde – für die Einschätzung des Wachstums von Nutzen.

4.3.3 Minimum, Maximum und Mittelwert

Minimum

Beim Vergleich der Parameter, gab es bei den männlichen Patienten 60% der Fälle, bei denen das Wachstum um über 30% überschätzt wurde. Bei 25,3% gab es eine Überschätzung von 10-30%. 13,7% wurden zu 10% entweder über- oder unterschätzt. Nur 1,1% wurde zu 10-30% unterschätzt. Würde also der Parameter gewählt werden, bei dem der Quotient am kleinsten berechnet wurde, würden über 85% der Fälle überschätzt werden.

Bei den weiblichen Patienten gab es 54,2%, bei denen das Wachstum um über 30% überschätzt wurde. Bei 35,6% gab es eine Überschätzung von 10-30%. 6,8% wurden zu 10% entweder über- oder unterschätzt und 3,4% wurde zu 10-30% unterschätzt. Würde man bei den weiblichen Patienten demzufolge den Parameter mit dem kleinsten Quotienten wählen, würden über 89% der Fälle überschätzt werden.

Bei keinem Fall wurde ein Quotient mit vernachlässigbarer Fehleinschätzung des Wachstums (unter 10%) gefunden.

Maximum

Den größten Quotienten betrachtet, wurden 62,1% der männlichen Patienten zu über 30% unterschätzt, 27,4% der Patienten zwischen 10 und 30% unterschätzt.

Bei den weiblichen Patienten kam es bei 59,3% der Fälle zu einer Unterschätzung von 30%, bei 32,3% zu einer Unterschätzung von 10-30%. Es würden also bei den männlichen Patienten, das Maximum der Quotienten betrachtet, über 89% der Fälle unterschätzt werden. Bei den weiblichen Patienten wären es sogar über 91% der Fälle.

Bei keinem Fall wurde ein Quotient mit vernachlässigbarer Fehleinschätzung des Wachstums (unter 10%) gefunden.

Weder durch die Betrachtung des Minimums noch des Maximums, könnte eine sichere und aussagekräftige Einschätzung des Wachstums getroffen werden.

Mittelwert

Den Mittelwert der Quotienten betrachtet, fällt auf, dass 42,1% der männlichen Fälle und 39,0% der weiblichen Fälle zu 10% über- oder unterschätzt werden würden. Die Verteilung der Mittelwerte ähnelt einer Normalverteilung. Die prozentualen Anteile der Fehleinschätzungen sammeln sich im Bereich 10% und verteilen sich abnehmend zu den Überschätzungen von 10-30% und über 30% und zu den Unterschätzungen von 10-30% und über 30%.

Es gab keinen Fall, bei dem der Mittelwert des Quotienten eine vernachlässigbare Fehleinschätzung des Wachstums (unter 10%) ergeben hätte. Somit gäbe es bei jeder Schätzung der Geometrie mindestens eine Über-/Unterschätzung von 10%. Daher könnte man auch keine sichere Aussage über das Restwachstum treffen, würde man alle Parameter im Mittel betrachten.

Schließlich führt auch die Betrachtung mehrerer kombinierter Parameter [43-45, 48, 50] zu keiner sicheren Auskunft über die skelettale Reife. Eine Berechnung des skelettalen Alters mit Hilfe der Morphologie der HWK ist somit nicht möglich [36].

Die meisten Studien befassen sich bisher mit der Verlässlichkeit der CVM [35, 37-39, 41, 42, 49, 52] oder vergleichen zwischen chronologischem Alter, ske-

letztalem Alter mittels Handröntgenaufnahme [36, 40, 43-48, 50, 51, 55] und dem Reifegrad der HWK. In unserer Studie wurde der Ansatz gewählt, ob eine individualisierte Berechnung der Werte im Erwachsenenalter aus bekannten Werten im Kindesalter möglich ist. Soweit bekannt, wurde zu einem solchen Verfahren der Beurteilung der CVM keine vergleichbare Studie in der Literatur gefunden.

4.3.4 Illustrierte Beispiele

In den Streudiagrammen ist zu erkennen, dass sich – die **Gesamtheit** betrachtet – die Konkavität und Form ändern.

Beim Höhen-Breiten-Verhältnis an C3 und C4 verläuft die Anpassungslinie in einem steigenden Verlauf, der bei den weiblichen Patienten in ein Plateau übergeht. Dieses Plateau ist bei den männlichen Patienten weniger stark ausgeprägt. Man kann – **allgemein** betrachtet – also annehmen, dass die HWK im Laufe der Entwicklung größer werden [40]. Auch beim anterior-posterior-Verhältnis von C3 und C4 steigt die Linie und geht in ein Plateau über. Somit kann – auf die **Gesamtheit** bezogen – von einer Formänderung von trapezoid zu rechteckig gesprochen werden. Auch Gray et. al. stellten fest, dass sich die HWK auf diese Weise ändern [40]. Der Winkel der inferioren Konkavität C2-C4 wird über die Zeit kleiner, was bedeutet, dass die Tiefe der Konkavität zunimmt [40, 50]. Die Anpassungslinie hat hier einen abfallenden Verlauf.

Wie bereits erwähnt, sind diese Ergebnisse auf die Gesamtheit der Auswertung bezogen. Die Auswertungspunkte sammeln sich jedoch nicht exakt an der Linie, sondern bilden eher eine Punktwolke, die sich an der Tendenz der Linie ausrichtet. Es fällt deutlich auf, dass es Fälle gibt, die sich entweder streng an der Linie orientieren oder über oder unter der Linie entwickeln. Diese Fälle würden somit dem oben beschriebenen Trend folgen. Bei den Fällen, die schon im geringen Alter kleine Werte aufweisen, würden die Maße im Erwachsenenalter ebenfalls klein ausfallen. Gleiches gelte für Patienten mit großen Werten. Würden sich alle Patienten streng der beschriebenen Tendenz folgend entwickeln, könnte man durch eine Berechnung ermitteln, wie die Geometrie im Erwachsenenalter wäre. Somit wäre es möglich die CVM zu individualisieren.

Da es jedoch auch Fälle gibt, die sich nicht nach dem Verlauf der Anpassungslinie orientieren oder sie gar schneiden, ist es nicht möglich sicher vorherzusagen, wie sich das Wachstum eines Patienten entwickeln wird.

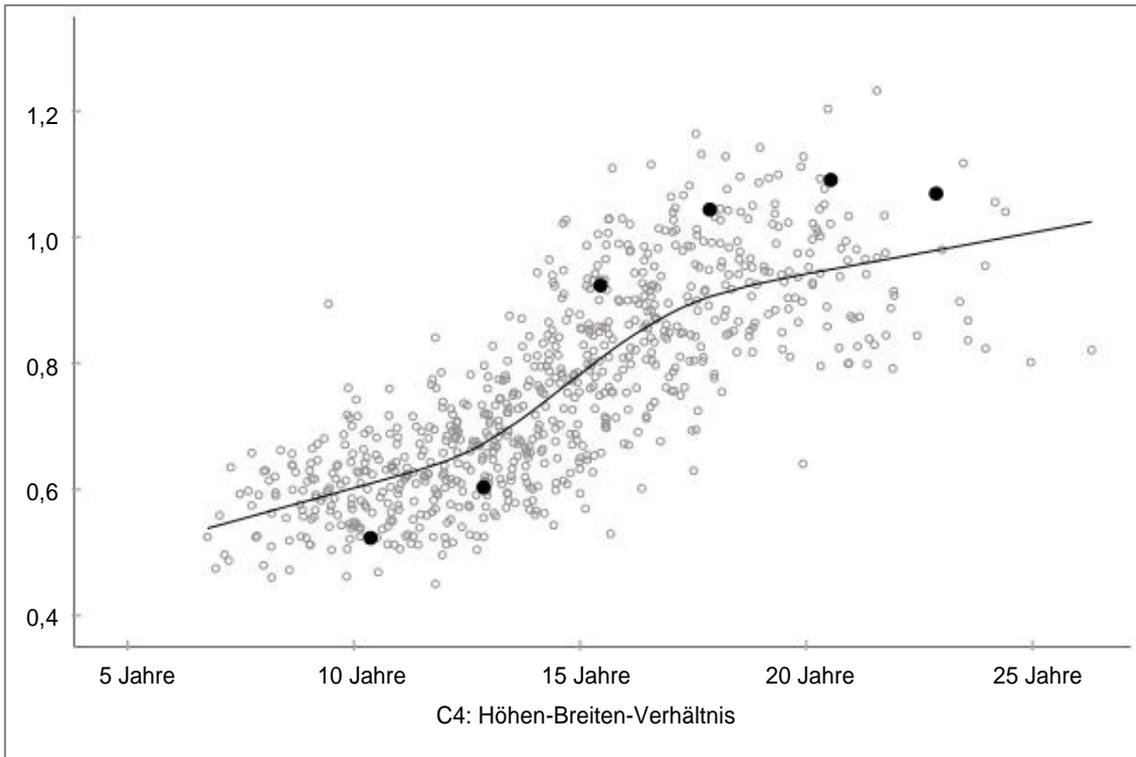


Abbildung 36: Streudiagramm zum Höhen-Breiten-Verhältnis an C4, Patient 80138

Dies lässt sich am Höhen-Breiten-Verhältnis von C4 des männlichen Patienten 80138 gut erkennen (siehe Abbildung 36). Im Alter von 10 Jahren würde der Wert im Bereich 0,5 liegen, die Anpassungslinie gibt hier einen Wert von 0,6 vor. Das heißt, er liegt unter der Linie, auch im Alter von circa 13 Jahren liegt der Wert noch unter der Linie. Der Wachstumsspeak findet bei Jungen mit circa 14 Jahren statt [28]. Der nächste Wert im Alter von 15 Jahren – also nach dem Wachstumsschub – befindet sich nun über der Linie. Die weiteren Werte mit circa 17, 20 und 24 Jahren befinden sich auch allesamt darüber. Dieser Patient hat beim Quotienten aus tatsächlicher und geschätzter Änderung einen Wert von 1,52 und fällt somit in die Kategorie der zu über 30% unterschätzten Patienten. Genauer gesagt, hätte man bei diesem Patienten 52% des Wachstums nicht ausgenutzt. Oder man hätte den Patienten bereits als ausgewachsen betrachtet und vielleicht sogar kieferchirurgisch behandelt, obwohl noch ein Restwachstum von über 50% erfolgt wäre.

An solchen Fällen ist demnach deutlich zu erkennen, dass es nicht möglich ist sicher vorherzusagen, wie sich das Wachstum eines Patienten entwickeln wird. Außerdem wird durch diese Beispiele die These der variablen Geometrie der HWK im Erwachsenenalter erneut bestätigt.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ziel der vorliegenden Studie war es zu untersuchen, ob anhand geometrischer Merkmale der HWK im Kindesalter eine sichere individuelle Vorhersage der Morphologie der HWK zum Ende der Entwicklung möglich ist. Hierdurch könnte eine Individualisierung der CVM-Methode und somit eine Einschätzung des bereits verstrichenen Wachstums erfolgen.

Zu diesem Zweck wurden insgesamt 1377 FRS-Aufnahmen von 267 Patienten – 110 weibliche und 157 männliche – aus dem Archiv der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Würzburg digitalisiert und untersucht. Zu allen Patienten gab es mehrere Aufnahmen, wobei die erste im Alter von maximal 8 Jahren und die letzte im Alter von mindestens 20 Jahren durchgeführt wurde. Die HWK wurden im Programm OnyxCeph (Herst.: Image Instruments GmbH) quantifiziert und die berechneten Werte mit der Software SPSS statistisch ausgewertet. Mittels linearer Regressionen wurde versucht, anhand der Morphologie der Wirbelkörper vor dem puberalen Wachstumsschub auf die Geometrie der HWK im Erwachsenenalter zu schließen. Zur Illustrierung wurden Streudiagramm und die dazugehörigen Abfolgen von Röntgenbildern dargestellt.

Eine Schätzung der Geometrie der HWK im Erwachsenenalter würde bei den separat betrachteten Parametern kaum zu korrekten Einschätzungen führen – bei xhb3 zu 0%, xhb4 zu 0,65%, xap3 zu 10,8%, xap4 zu 13,2%, wC2c zu 12,4%, wC3c zu 0,02% und wC4c zu 0,01%. Auch bei einer gemeinsamen Betrachtung der Parameter kann keine sichere Aussage über das Restwachstum getroffen werden.

Die Streudiagramme mit den Bilderabfolgen stützen diese These ebenfalls und illustrieren die mögliche Fehleinschätzung der Geometrie.

Die Ergebnisse der Studie zeigen erneut, dass die Geometrie der HWK im Erwachsenenalter sehr variabel ist [27], wie komplex die Entwicklung der HWK

ist und dass anhand ihrer Geometrie im Kindesalter keine sichere Einschätzung der skelettalen Reife möglich ist [35-42].

Eine Individualisierung der CVM-Methode ist anhand der in dieser Studie untersuchten Parameter nicht möglich. Somit lässt sich schlussfolgern, dass die CVM-Methode nicht als alleinige Methode zur präzisen skelettalen Alters-einschätzung verlässlich genutzt werden kann, sondern für eine sichere Beurteilung weitere Reifeindikatoren hinzugezogen werden sollten [52]. Allerdings sollten hierzu zusätzliche radiologische Untersuchungen, wie beispielsweise die Handröntgenaufnahme, nur dann durchgeführt werden, wenn diese dem ALARA-Prinzip entsprechen. Eine individuelle Indikationsstellung und eine vorherige fachliche Einschätzung der zu erwartenden therapeutischen Relevanz des zusätzlich angefertigten Röntgenbildes, z.B. im Rahmen einer kieferorthopädischen Therapie, ist hierfür essenziell erforderlich.

6 Literaturverzeichnis

1. Baccetti, T., Franchi, L., *The Fourth Dimension in Dentofacial Orthopedics: Treatment Timing for Class II and Class III Malocclusions*. World J Orthod 2001. **2**(2): p. 159-167.
2. Buckup, K., *Kinderorthopädie*. Vol. 2. 2001: Thieme. 293.
3. Bergersen, E.O., *The male adolescent facial growth spurt: its prediction and relation to skeletal maturation*. Angle Orthod, 1972. **42**(4): p. 319-38.
4. Fishman, L.S., *Radiographic evaluation of skeletal maturation. A clinically oriented method based on hand-wrist films*. Angle Orthod, 1982. **52**(2): p. 88-112.
5. Franchi, L., Baccetti, T., McNamara, J. Jr., *Mandibular growth as related to cervical vertebral maturation and body height*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2000. **118**(3): p. 335-40.
6. Tarvade, S., Ramkrishna, S., *Skeletal maturity indicators*. Journal of Orthodontic Research, 2015. **3**(3): p. 158-161.
7. Hägg, U., Taranger, J., *Menarche and voice change as indicators of the pubertal growth spurt*. Acta Odontol Scand, 1980. **38**(3): p. 179-86.
8. Juul, A., et al., *Serum insulin-like growth factor-I in 1030 healthy children, adolescents, and adults: relation to age, sex, stage of puberty, testicular size, and body mass index*. The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 1994. **78**(3): p. 744-752.
9. Ishaq, R.A.R., et al., *Insulin-like growth factor I: A biologic maturation indicator*. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2012. **142**(5): p. 654-661.
10. Perinetti, G., et al., *Gingival crevicular fluid alkaline phosphatase activity as a non-invasive biomarker of skeletal maturation*. Orthodontics & Craniofacial Research, 2011. **14**(1): p. 44-50.
11. Baccetti, T., Franchi, L., McNamara, J. Jr., *The Cervical Vertebral Maturation (CVM) Method for the Assessment of Optimal Treatment Timing in Dentofacial Orthopedics*. Seminars in Orthodontics, 2005. **11**(3): p. 119-129.
12. Kahl-Nieke, B., *Einführung in die Kieferorthopädie: Diagnostik, Behandlungsplanung, Therapie*. Vol. 3. 2009, Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag.
13. Greulich, W.W., Pyle, S. I., *Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist*. Vol. 2. 1959: Stanford University Press. 272.
14. Cameron, N., *The Tanner-Whitehouse II Skeletal Maturity Method: Rationale and Applicability*. Clinical Pediatric Endocrinology, 1993. **2**: p. 9-18.
15. Demirjian, A., Goldstein, H., Tanner, J. M., *A new system of dental age assessment*. Human biology, 1973. **45**(2): p. 211-27.
16. Ehrenfeld, M., Sander, F.G., Schwenger, N., *Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde: Kieferorthopädie*. Vol. 2. 2011, Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.
17. Schiebler, T.H., Korf, H.-W., *Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie*. Vol. 10. 2007, Heidelberg: Steinkopff Verlag.
18. Benninghoff, A., Drenckhahn, D., *Taschenbuch Anatomie*. 2007: Urban & Fischer in Elsevier.
19. Lamparski, D.G., *Skeletal Age Assessment Utilizing Cervical Vertebrae*. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 1975. **67**: p. 458-459.
20. O'Reilly, M.T., Yanniello, G. J., *Mandibular growth changes and maturation of cervical vertebrae--a longitudinal cephalometric study*. Angle Orthod., 1988. **58**(2): p. 179-84.

21. Patcas, R., et al., *Is the use of the cervical vertebrae maturation method justified to determine skeletal age? A comparison of radiation dose of two strategies for skeletal age estimation.* European Journal of Orthodontics, 2013. **35**(5): p. 604-609.
22. Hassel, B., Farman, A. G., *Skeletal maturation evaluation using cervical vertebrae.* American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 1995. **107**(1): p. 58-66.
23. Hägg, U. and J. Taranger, *Skeletal stages of the hand and wrist as indicators of the pubertal growth spurt.* Acta Odontol Scand., 1980. **38**(3): p. 187-200.
24. Pancherz, H., Szyska, M., *Analyse der Halswirbelkörper statt der Handknochen zur Bestimmung der skelettalen und somatischen Reife.* Informationen aus Orthodontie und Kieferorthopädie, 2000. **32**(02): p. 151-161.
25. Baccetti, T., Franchi, L., McNamara, J. Jr., *An improved version of the cervical vertebral maturation (CVM) method for the assessment of mandibular growth.* Angle Orthod., 2002. **72**(4): p. 316-23.
26. Kirschneck, C., Lux, C. J., *Ideale Behandlungszeitpunkte kieferorthopädischer Anomalien.* DGKFO, DGZMK, 2021.
27. Gelbrich, B., Fischer, M., Stellzig-Eisenhauer, A., Gelbrich, G., *Are cervical vertebrae suitable for age estimation?* J Forensic Odontostomatol, 2017. **35**(2): p. 66-78.
28. Grave, K.C., Brown, T., *Skeletal ossification and the adolescent growth spurt.* Am J Orthod, 1976. **69**(6): p. 611-9.
29. Schmelting, A., et al., *Forensic age estimation—methods, certainty, and the law.* Dtsch Arztebl Int 2016. **113**(4): p. 44-50.
30. Björk, A., Helm, S., *Prediction of the age of maximum puberal growth in body height.* Angle Orthod, 1967. **37**(2): p. 134-43.
31. Chapman, S.M., *Ossification of the adductor sesamoid and the adolescent growth spurt.* Angle Orthod, 1972. **42**(3): p. 236-44.
32. Demirjian, A., et al., *Interrelationships among measures of somatic, skeletal, dental, and sexual maturity.* Am J Orthod, 1985. **88**(5): p. 433-8.
33. Onat, T., Numan-Cebeci, E., *Sesamoid bones of the hand: relationships to growth, skeletal and sexual development in girls.* Hum Biol, 1976. **48**(4): p. 659-76.
34. Gelbrich, B., Frerking, C., Weiss, S., Schwerdt, S., Stellzig-Eisenhauer, A., Tausche, E., Gelbrich, G., *Combining wrist age and third molars in forensic age estimation: how to calculate the joint age estimate and its error rate in age diagnostics.* Ann Hum Biol, 2015. **42**(4): p. 389-96.
35. Ball, G., et al., *Relationship between cervical vertebral maturation and mandibular growth.* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2011. **139**(5): p. e455-61.
36. Beit, P., et al., *Evaluating the agreement of skeletal age assessment based on hand-wrist and cervical vertebrae radiography.* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2013. **144**(6): p. 838-47.
37. Engel, T.P., et al., *The cervical vertebrae maturation (CVM) method cannot predict craniofacial growth in girls with Class II malocclusion.* Eur J Orthod, 2016. **38**(1): p. 1-7.
38. Fudalej, P., Bollen, A. M., *Effectiveness of the cervical vertebral maturation method to predict postpeak circumpubertal growth of craniofacial structures.* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010. **137**(1): p. 59-65.
39. Gabriel, D.B., et al., *Cervical vertebrae maturation method: poor reproducibility.* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009. **136**(4): p. 478.e1-480.
40. Gray, S., et al., *Morphometric analysis of cervical vertebrae in relation to mandibular growth.* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2016. **149**(1): p. 92-8.
41. Nestman, T.S., et al., *Cervical vertebrae maturation method morphologic criteria: poor reproducibility.* Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2011. **140**(2): p. 182-8.

42. Perinetti, G., et al., *Cervical vertebral maturation method and mandibular growth peak: a longitudinal study of diagnostic reliability*. Eur J Orthod, 2018. **40**(6): p. 666-672.
43. Caldas M.deP., A., G. M., Haiter Neto, F., *New formula to objectively evaluate skeletal maturation using lateral cephalometric radiographs*. Braz Oral Res, 2007. **21**(4): p. 330-5.
44. Caldas M.deP., A., G. M., Haiter Neto, F., *Computer-assisted analysis of cervical vertebral bone age using cephalometric radiographs in Brazilian subjects*. Braz Oral Res, 2010. **24**(1): p. 120-6.
45. Chandrasekar, R., et al., *Development and validation of a formula for objective assessment of cervical vertebral bone age*. Prog Orthod, 2020. **21**(1): p. 38.
46. Durka-Zajac, M., Marcinkowska, A., Mituś-Kenig, M., *Bone age assessment using cephalometric photographs*. Pol J Radiol, 2013. **78**(2): p. 19-25.
47. Gandini, P., Mancini, M., Andreani, F., *A comparison of hand-wrist bone and cervical vertebral analyses in measuring skeletal maturation*. Angle Orthod, 2006. **76**(6): p. 984-9.
48. Mito, T., Sato, K., Mitani, H., *Cervical vertebral bone age in girls*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2002. **122**(4): p. 380-5.
49. Rainey, B.J., Burnside, G., Harrison, J. E., *Reliability of cervical vertebral maturation staging*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2016. **150**(1): p. 98-104.
50. San Román, P., et al., *Skeletal maturation determined by cervical vertebrae development*. Eur J Orthod, 2002. **24**(3): p. 303-11.
51. Stiehl, J., Müller, B., Dibbets, J., *The development of the cervical vertebrae as an indicator of skeletal maturity: comparison with the classic method of hand-wrist radiograph*. J Orofac Orthop, 2009. **70**(4): p. 327-35.
52. Zhao, X.G., et al., *Validity and reliability of a method for assessment of cervical vertebral maturation*. Angle Orthod, 2012. **82**(2): p. 229-34.
53. McNamara, J.J., Franchi, L., *The cervical vertebral maturation method: A user's guide*. Angle Orthod, 2018. **88**(2): p. 133-143.
54. Cameriere, R., et al., *Age estimation in children and young adolescents for forensic purposes using fourth cervical vertebra (C4)*. Int J Legal Med, 2015. **129**(2): p. 347-55.
55. Chatzigianni, A., Halazonetis, D. J., *Geometric morphometric evaluation of cervical vertebrae shape and its relationship to skeletal maturation*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009. **136**(4): p. 481.e1-483.

7 Anhang

Danksagung

Streudiagramme zu den weiteren Kriterien

Danksagung

Mein größter Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr. Dr. Götz Gelbrich, stellvertretender Leiter des Lehrstuhls für Epidemiologie und Biometrie der Universität Würzburg, für die interessante Themenstellung und die kompetente wissenschaftliche Betreuung während dieser Dissertation.

Des Weiteren danke ich Herrn PD Dr. med. dent. Felix Kunz, leitender Oberarzt in der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Würzburg, für die Übernahme des Zweitgutachtens.

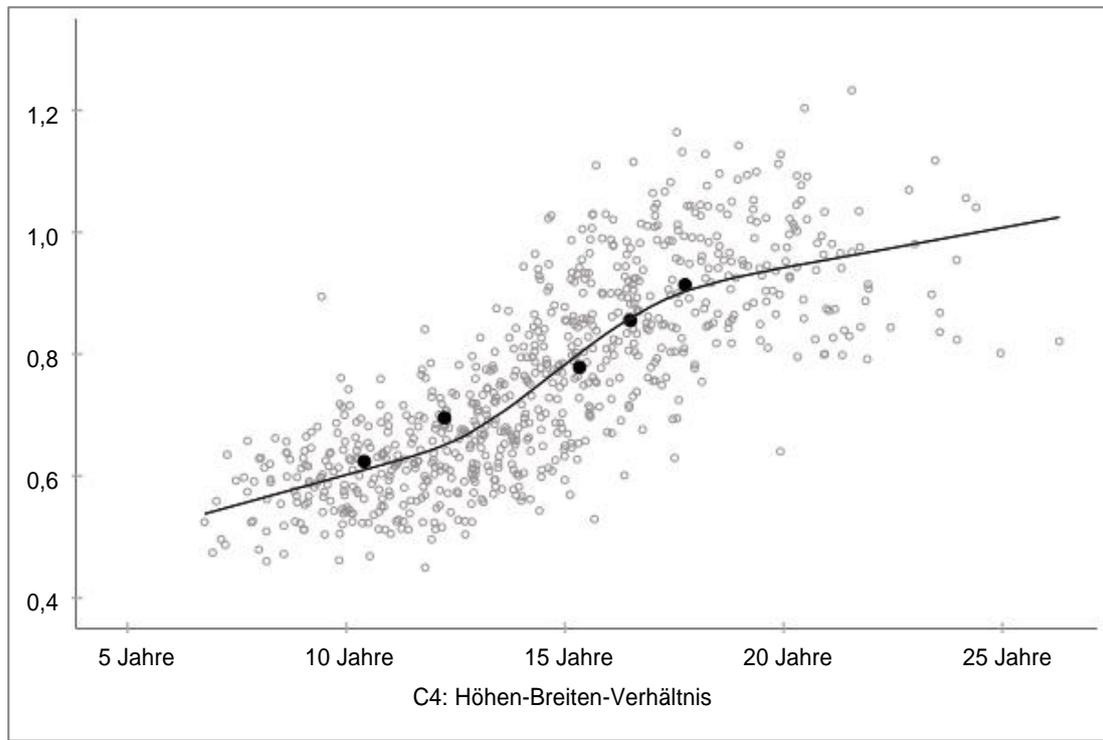
Vielen Dank auch an Frau Prof. Dr. med. dent. Angelika Stellzig-Eisenhauer, Direktorin der Poliklinik für Kieferorthopädie der Universität Würzburg für die freundliche Bereitstellung der Röntgenaufnahmen der kieferorthopädischen Abteilung und für die Möglichkeit, in den Räumlichkeiten ihrer Einrichtung die Arbeiten zur Datenzusammenstellung und Anonymisierung auszuführen.

Darüber hinaus gilt mein Dank Frau Dr. med. dent. Bianca Gelbrich, Oberärztin der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Leipzig, für die Ausarbeitung des Dissertationsthemas vor dessen Überlassung sowie für die umfangreichen Beiträge zur Prüfung der Datenqualität.

Zuletzt danke ich ganz besonders meinem Ehemann, Manuel von der Heide, für die uneingeschränkte Unterstützung und Motivation, meinen Eltern Ewa und Sebastian Zgraja, meinem Bruder Adam für den Rückhalt in allen Phasen meines Studiums und dieser Arbeit und meinen Schwiegereltern Caroline und Georg von der Heide für den hilfreichen Einsatz.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich immer motivierten und mir meinen bisherigen Lebensweg uneingeschränkt ermöglichten.

C4: Höhen-Breiten-Verhältnis – auf der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



10,4 Jahre



12,3 Jahre



15,3 Jahre



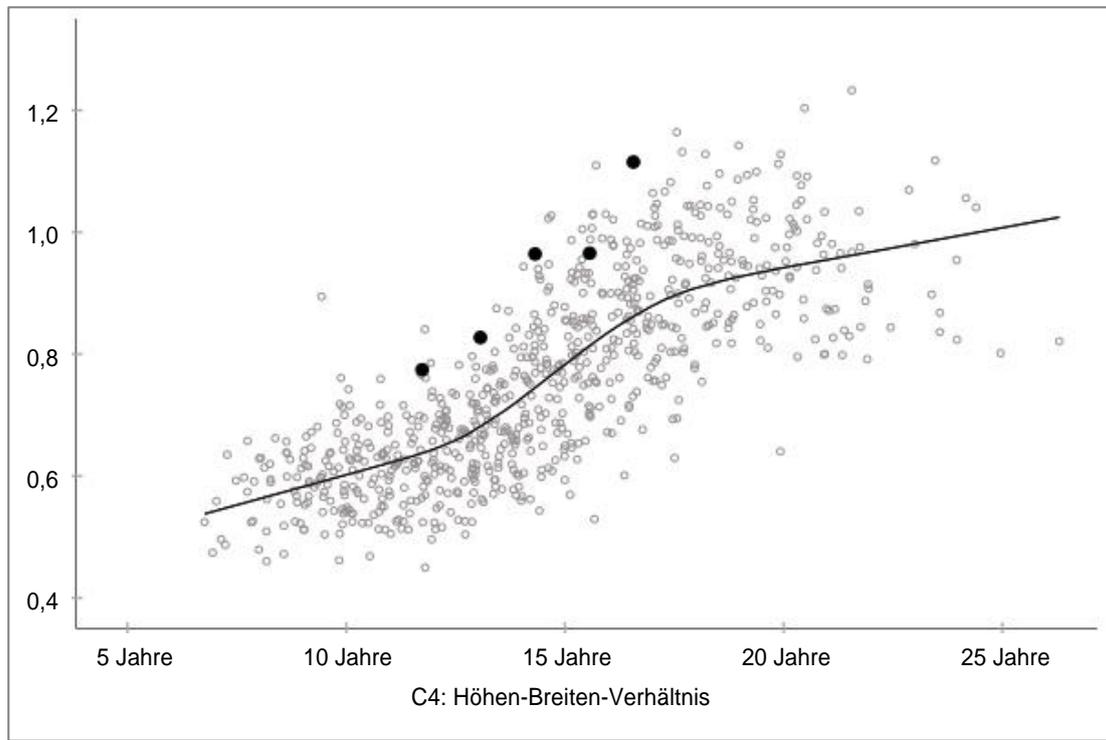
16,5 Jahre



17,7 Jahre

Patient 80071

C4: Höhen-Breiten-Verhältnis – über der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



11,7 Jahre



13,1 Jahre



14,3 Jahre



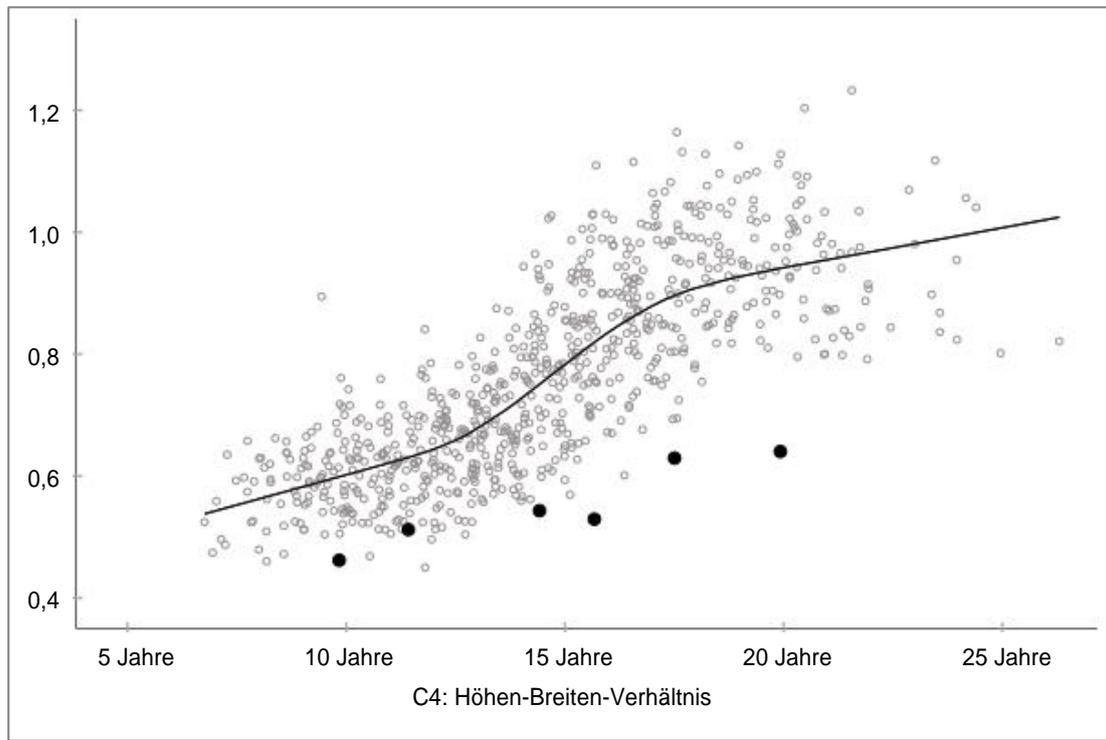
15,6 Jahre



16,6 Jahre

Patient 80036

C4: Höhen-Breiten-Verhältnis – unter der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



9,8 Jahre



11,4 Jahre



14,4 Jahre



15,7 Jahre



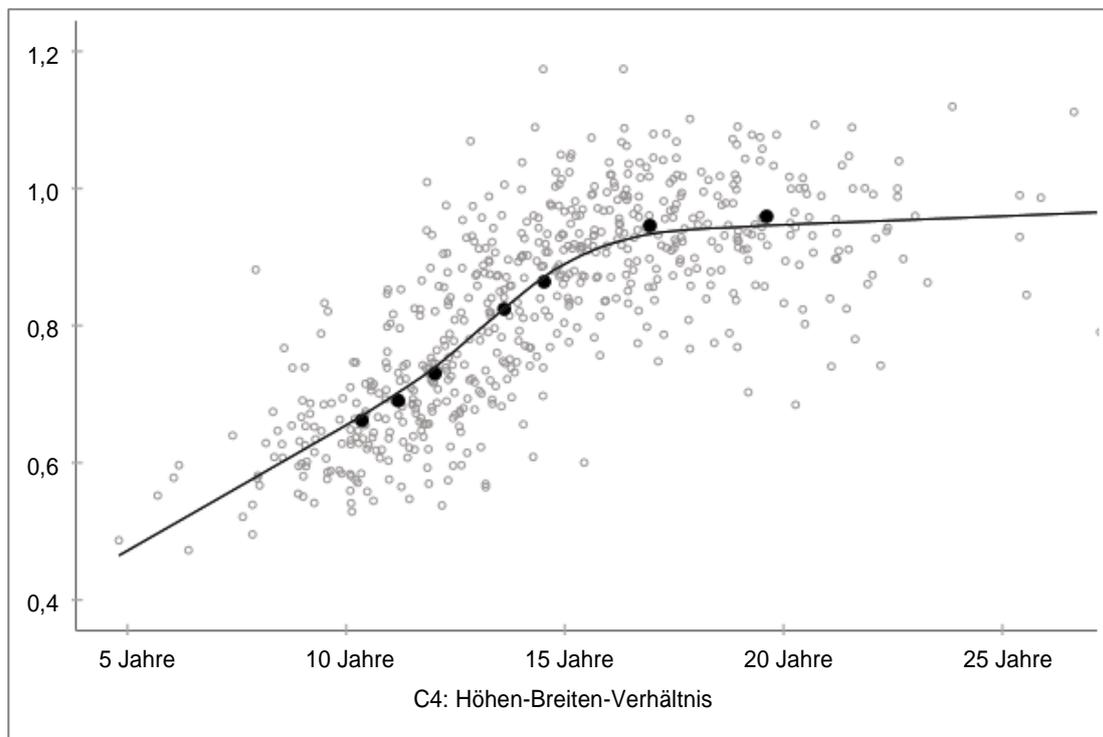
17,5 Jahre



19,9 Jahre

Patient 85001

C4: Höhen-Breiten-Verhältnis – auf der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



10,4 Jahre



11,2 Jahre



12,0 Jahre



13,6 Jahre



14,5 Jahre



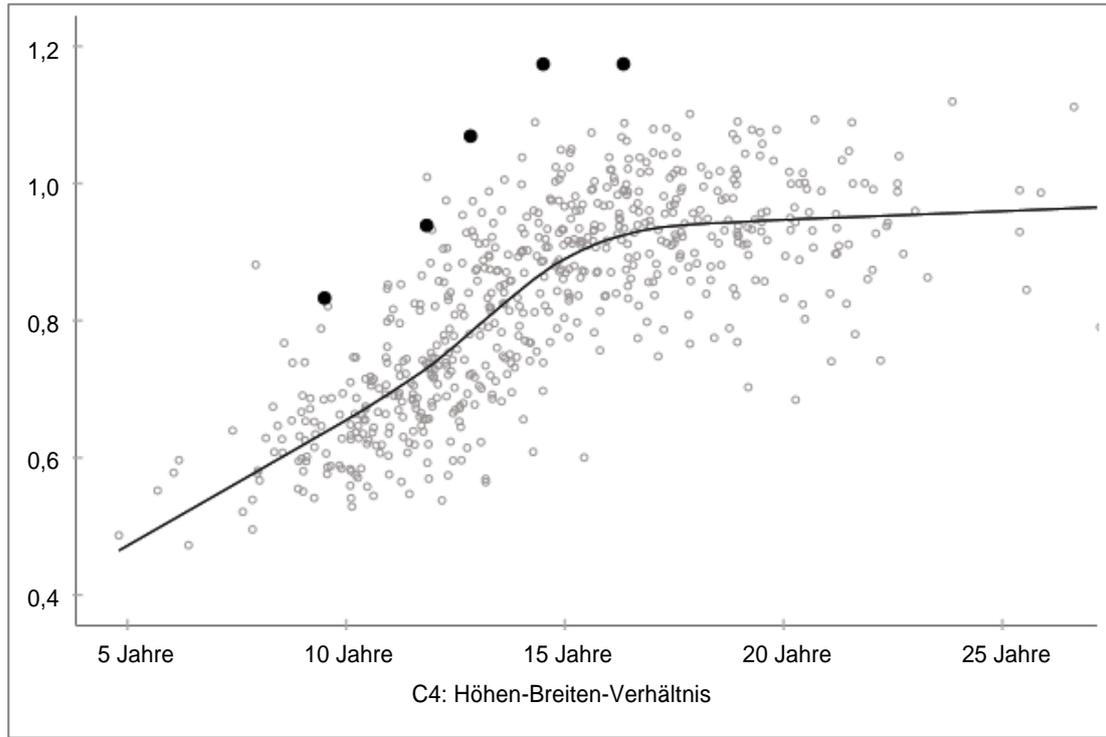
16,9 Jahre



19,6 Jahre

Patientin 85208

C4: Höhen-Breiten-Verhältnis – über der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



9,5 Jahre



11,8 Jahre



12,8 Jahre



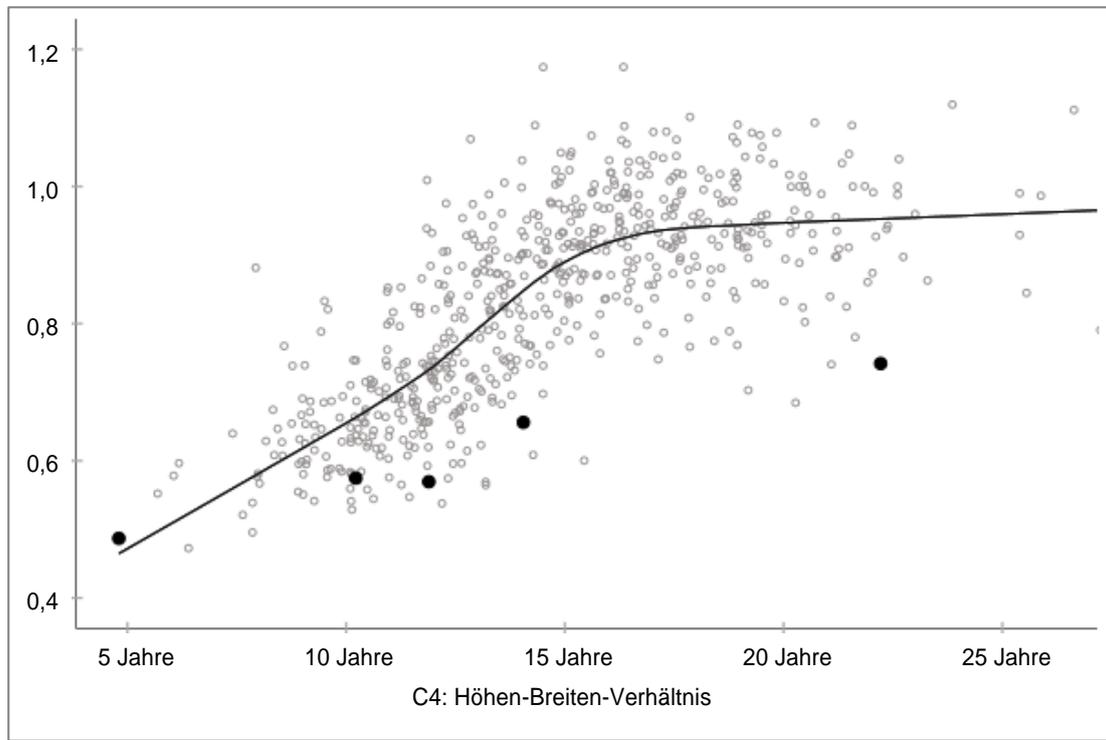
14,5 Jahre



16,3 Jahre

Patientin 85210

C4: Höhen-Breiten-Verhältnis – unter der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



4,8 Jahre



10,2 Jahre



11,9 Jahre



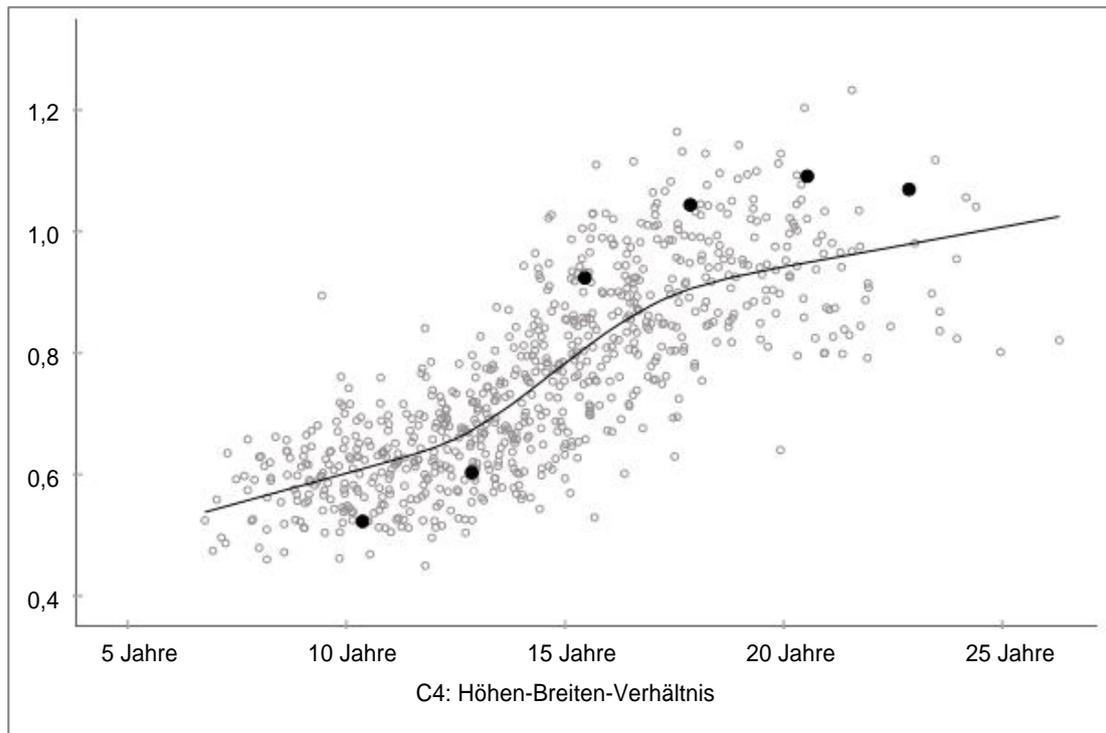
14,1 Jahre



22,2 Jahre

Patientin 85060

C4: Höhen-Breiten-Verhältnis – die Anpassungslinie kreuzend – männlich



Röntgenbilder



10,4 Jahre



12,9 Jahre



15,5 Jahre



17,9 Jahre



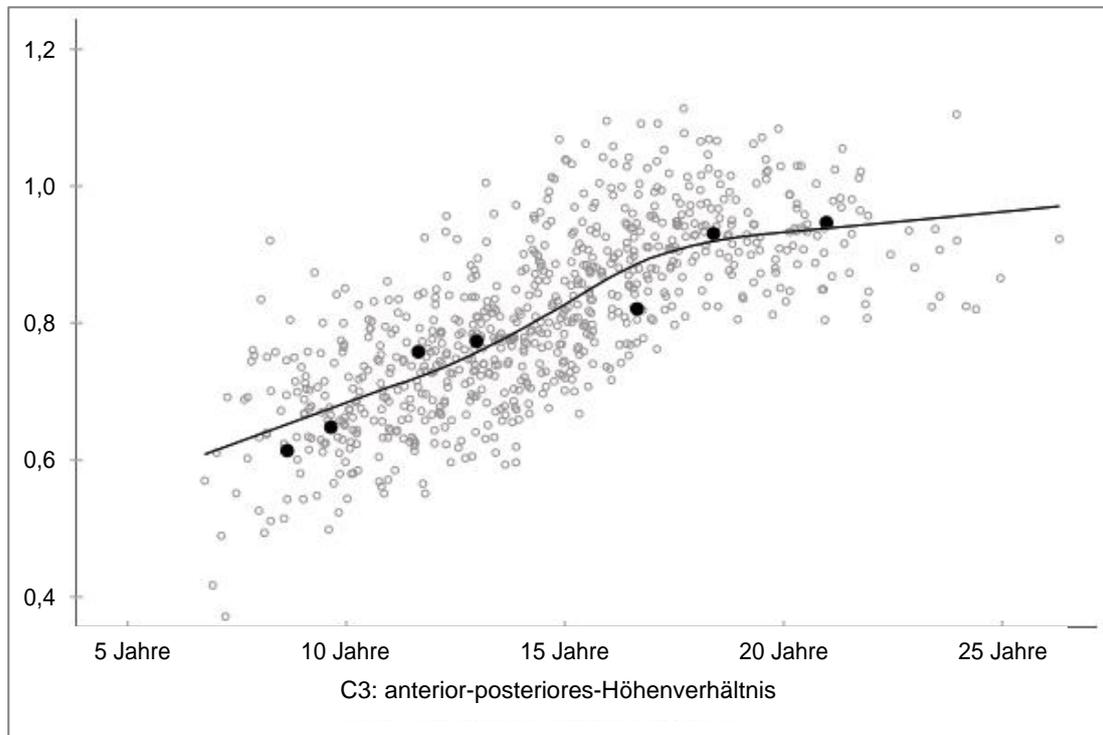
20,5 Jahre



22,9 Jahre

Patient 80138

**C3: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – auf der Anpassungslinie
verlaufend – männlich**



Röntgenbilder



8,7 Jahre



9,7 Jahre



11,6 Jahre



13,0 Jahre



16,7 Jahre



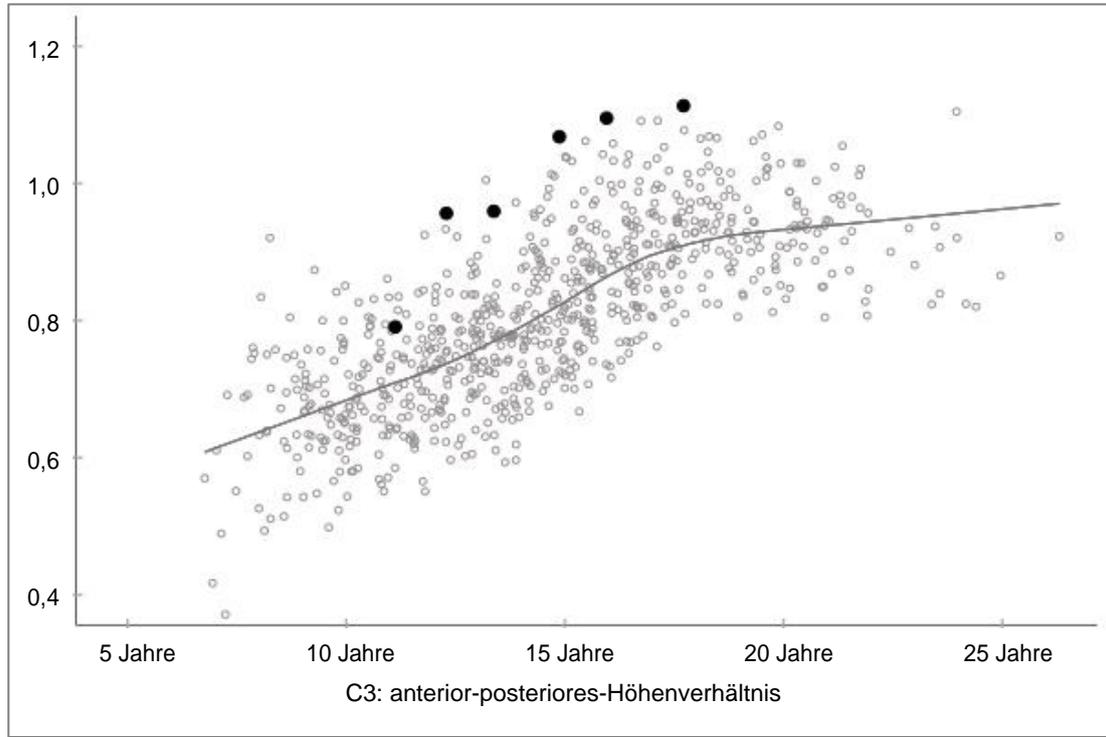
18,4 Jahre



21,0 Jahre

Patient 80045

C3: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – über der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



11,1 Jahre



12,3 Jahre



13,4 Jahre



14,9 Jahre



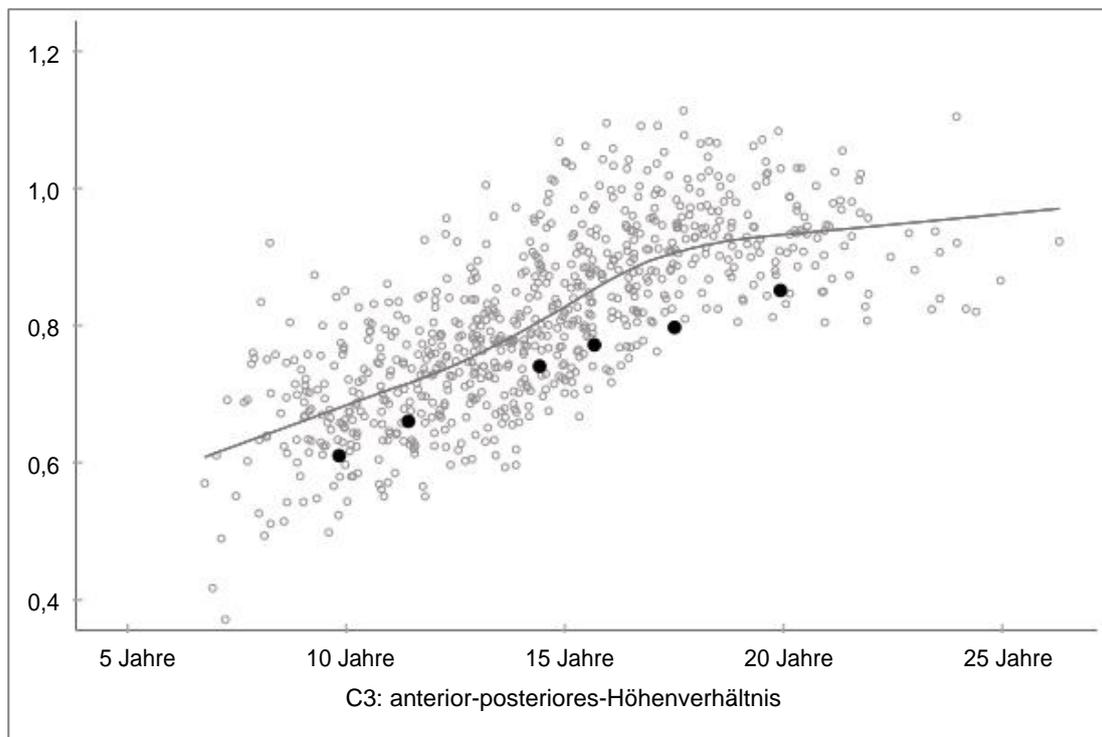
16,0 Jahre



17,7 Jahre

Patient 80086

C3: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – unter der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



9,8 Jahre



11,4 Jahre



14,4 Jahre



15,7 Jahre



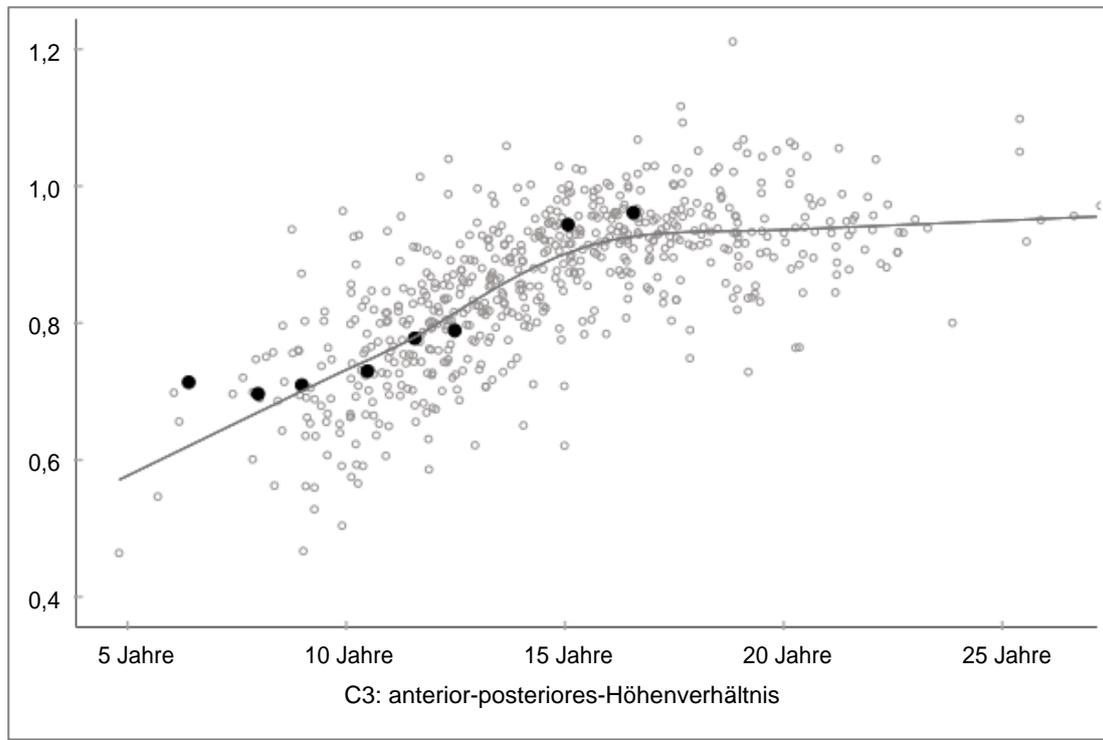
17,5 Jahre



19,9 Jahre

Patient 85001

**C3: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – auf der Anpassungslinie
verlaufend – weiblich**



Röntgenbilder



6,4 Jahre



8,0 Jahre



9,0 Jahre



10,5 Jahre



11,6 Jahre



12,5 Jahre



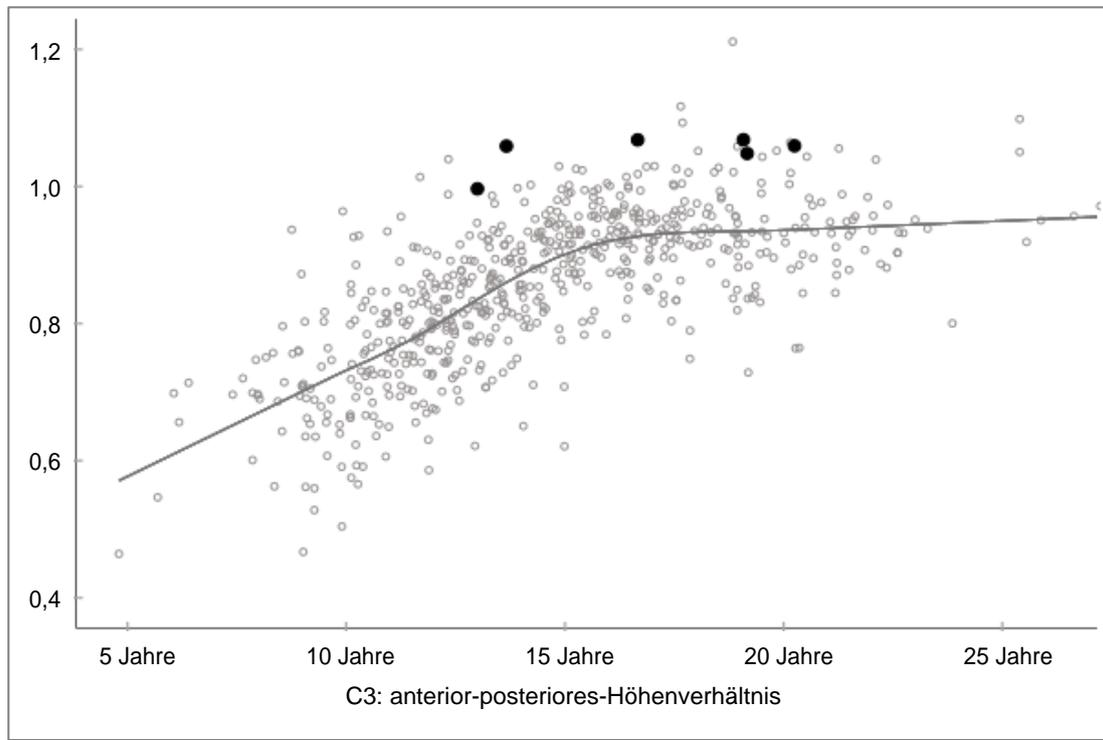
15,1 Jahre



16,6 Jahre

Patientin 80085

C3: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – über der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



13,0 Jahre



13,7 Jahre



16,7 Jahre



19,1 Jahre



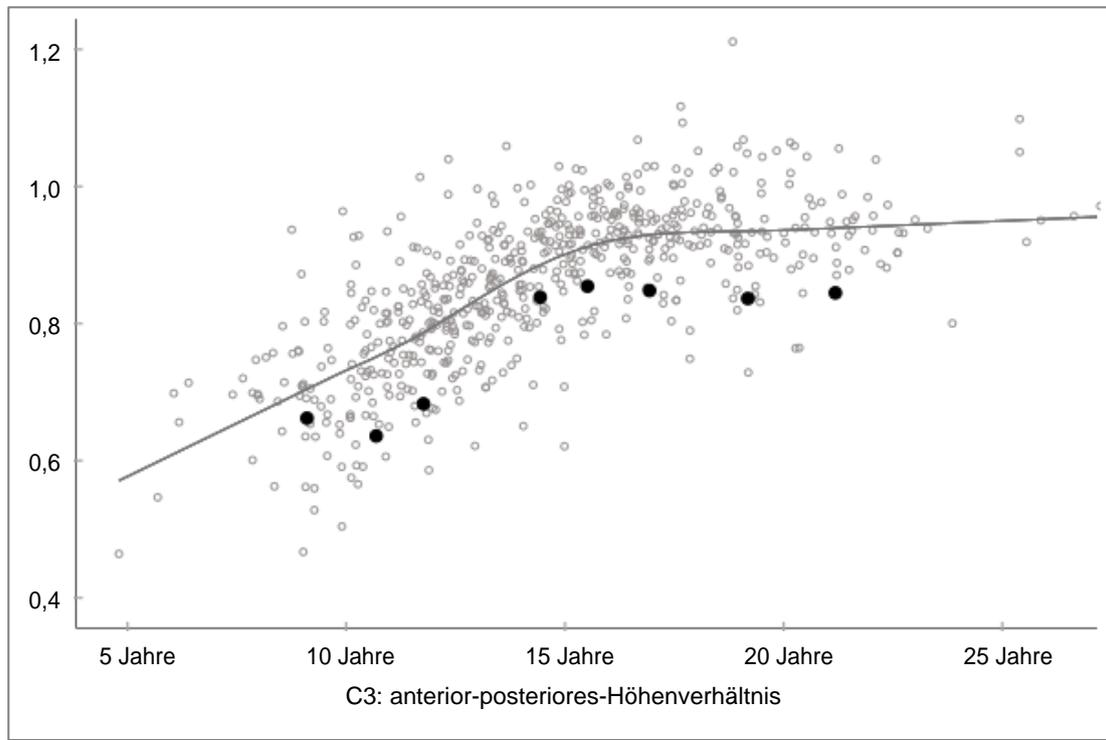
19,2 Jahre



20,2 Jahre

Patientin 80052

C3: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – unter der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



9,1 Jahre



10,7 Jahre



11,8 Jahre



14,4 Jahre



15,5 Jahre



16,9 Jahre



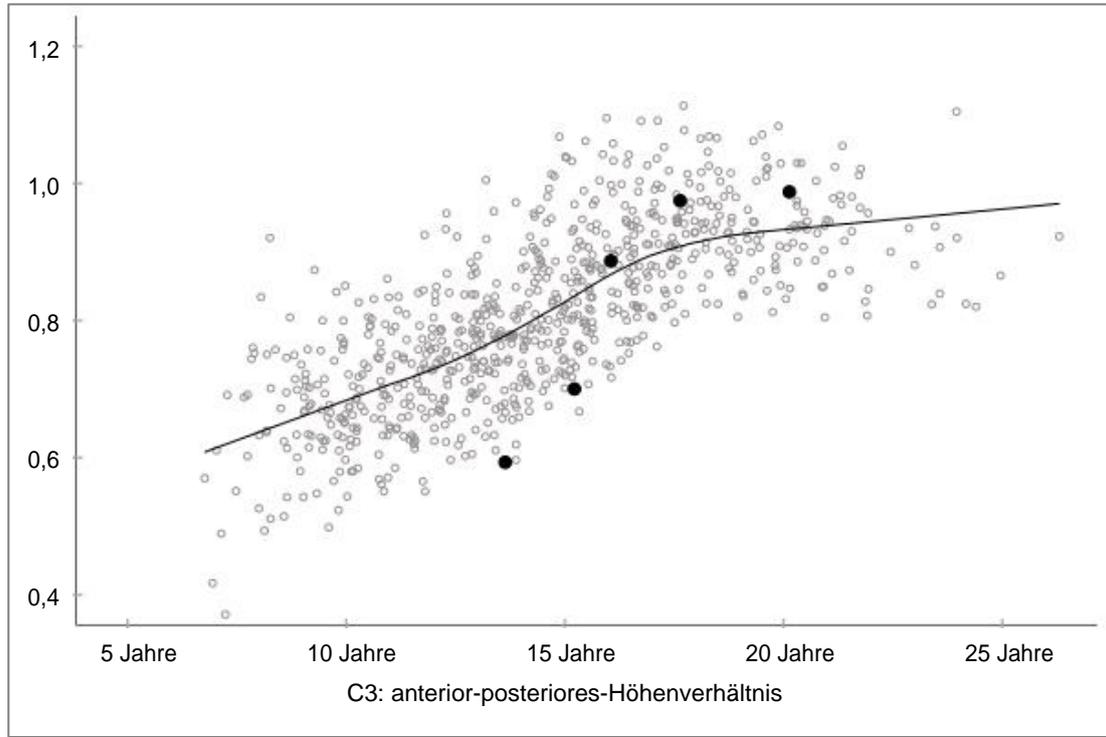
19,2 Jahre



21,2 Jahre

Patientin 80057

**C3: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – die Anpassungslinie kreuzend
– männlich**



Röntgenbilder



13,6 Jahre



15,2 Jahre



16,1 Jahre



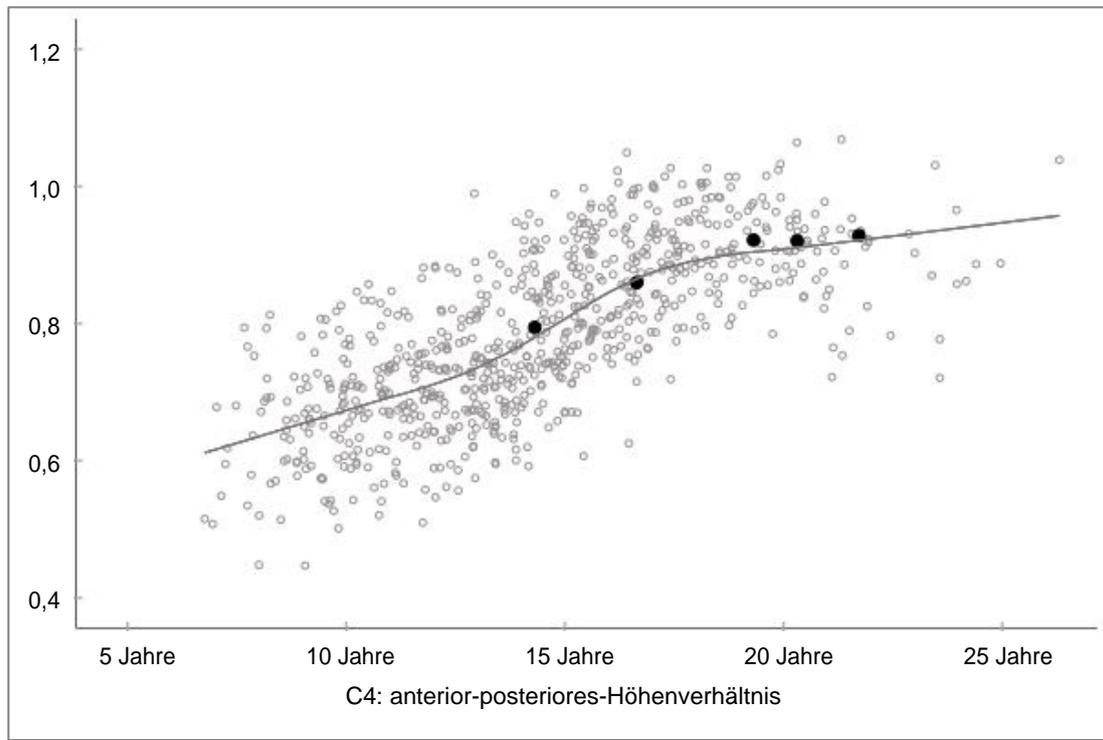
17,6 Jahre



20,1 Jahre

Patient 85201

**C4: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – auf der Anpassungslinie
verlaufend – männlich**



Röntgenbilder



14,3 Jahre



16,6 Jahre



19,3 Jahre



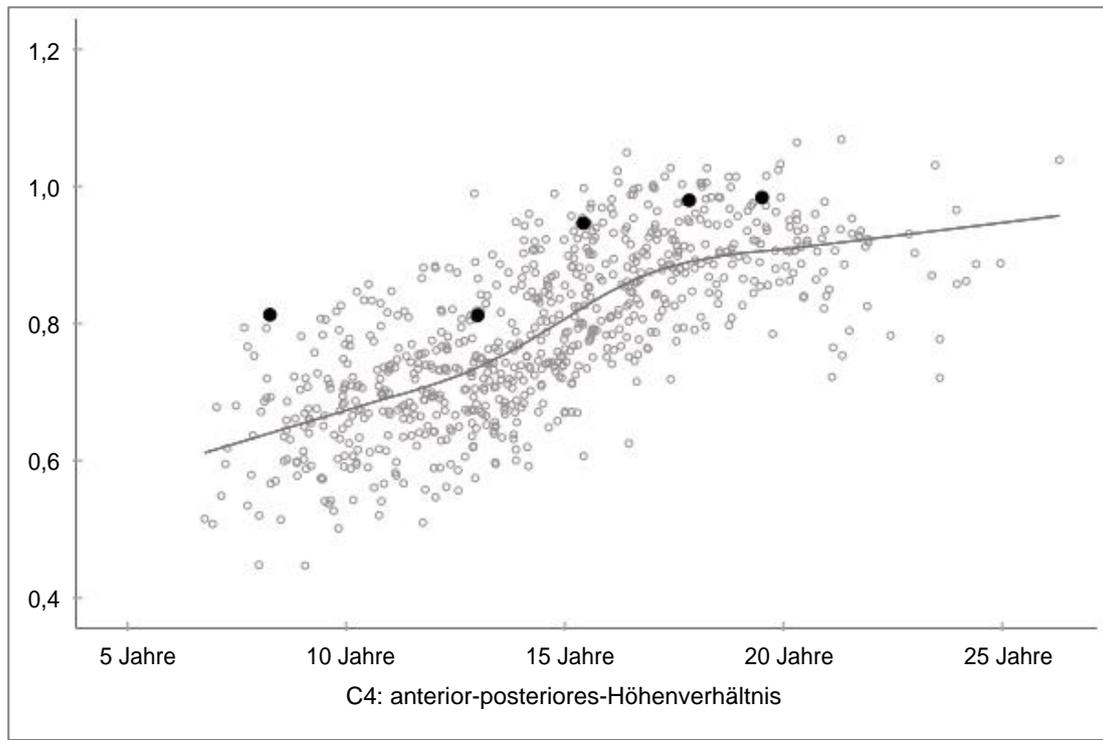
20,3 Jahre



21,7 Jahre

Patient 80051

C4: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – über der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



8,3 Jahre



13.0 Jahre



15,4 Jahre



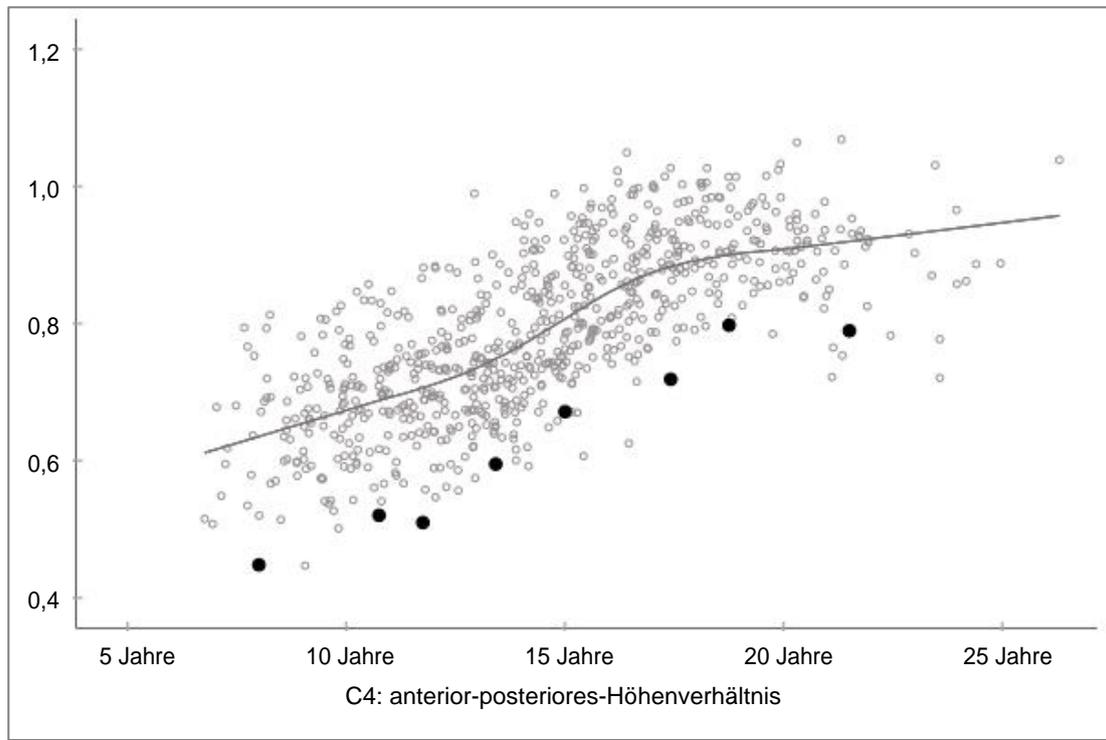
17,8 Jahre



19,5 Jahre

Patient 85008

C4: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – unter der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



8,0 Jahre



10,8 Jahre



11,8 Jahre



13,4 Jahre



15,0 Jahre



17,4 Jahre



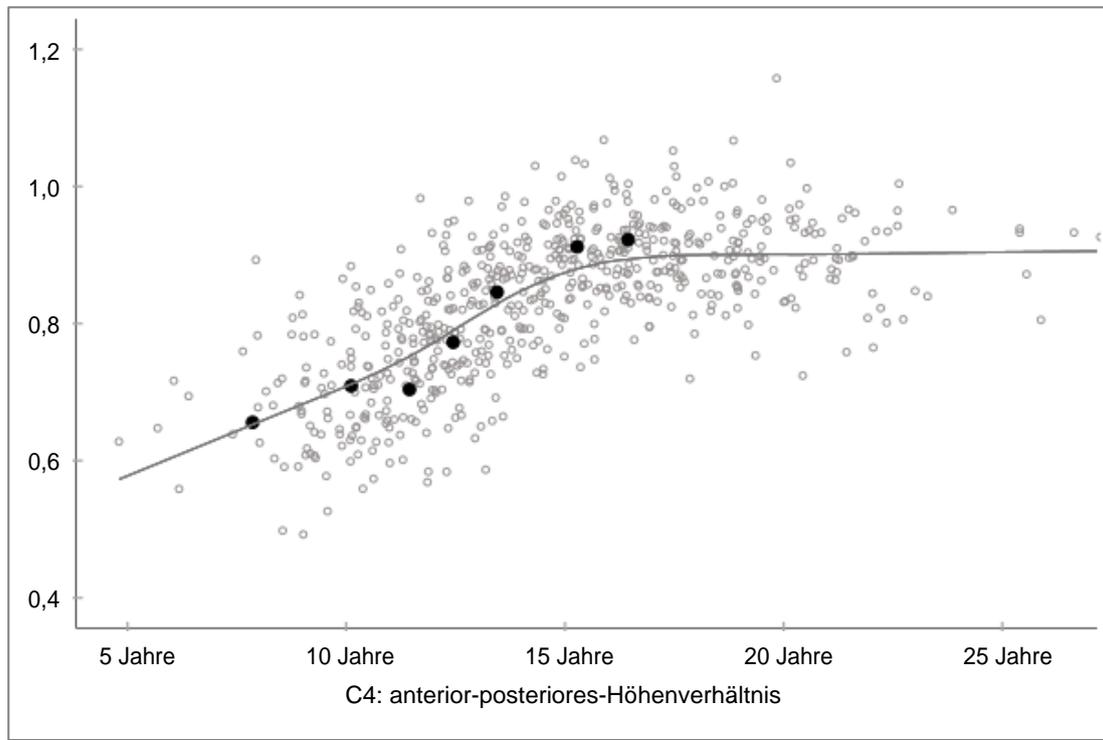
18,8 Jahre



21,5 Jahre

Patient 85143

C4: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – auf der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



7,9 Jahre



10,1 Jahre



11,4 Jahre



12,4 Jahre



13,5 Jahre



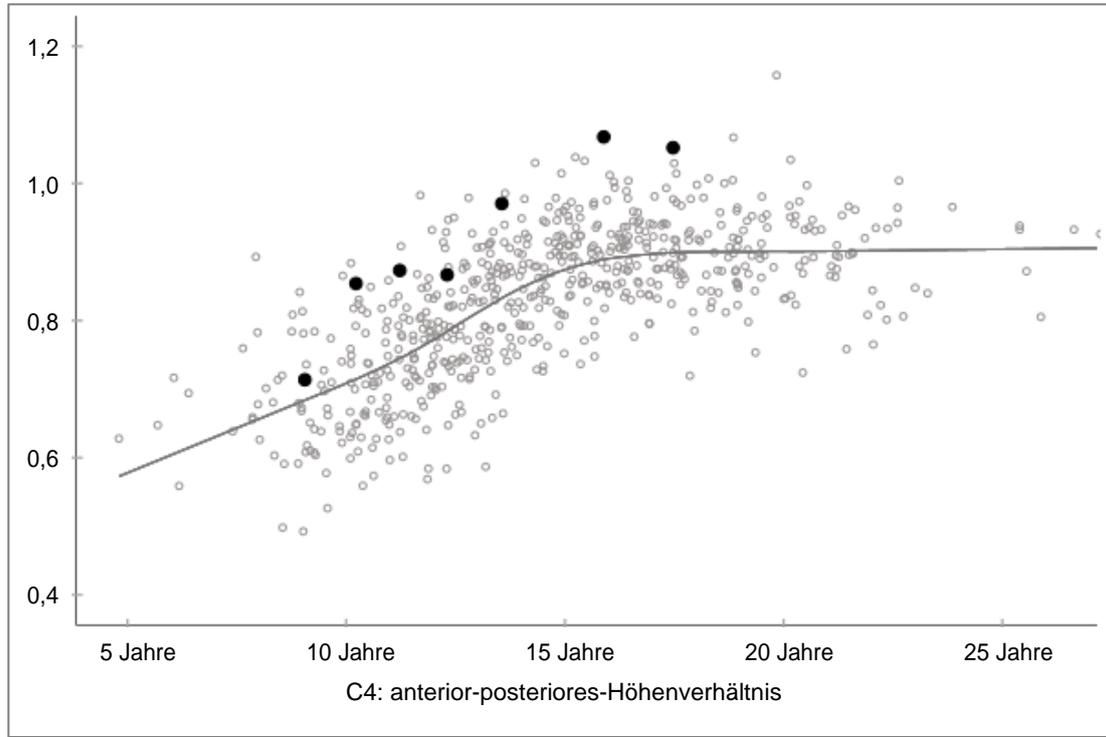
15,3 Jahre



16,4 Jahre

Patientin 80150

C4: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – über der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



9,1 Jahre



10,2 Jahre



11,2 Jahre



12,3 Jahre



13,6 Jahre



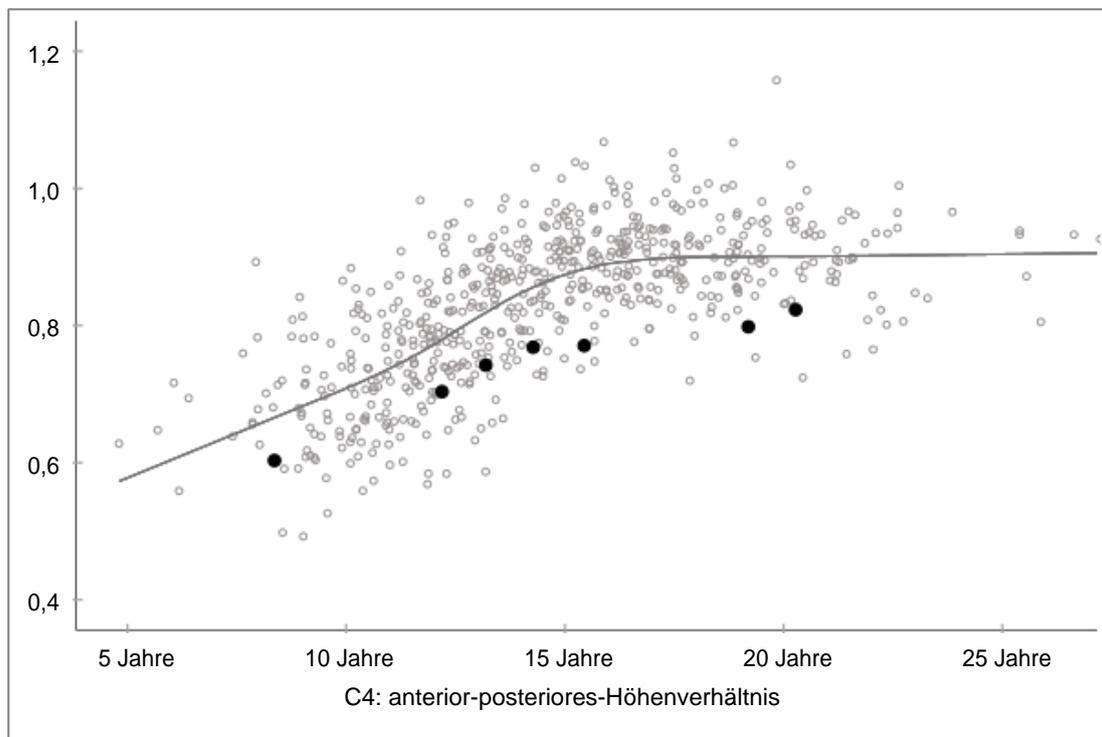
15,9 Jahre



17,9 Jahre

Patientin 85238

C4: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – unter der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



8,4 Jahre



12,2 Jahre



13,2 Jahre



14,3 Jahre



15,4 Jahre



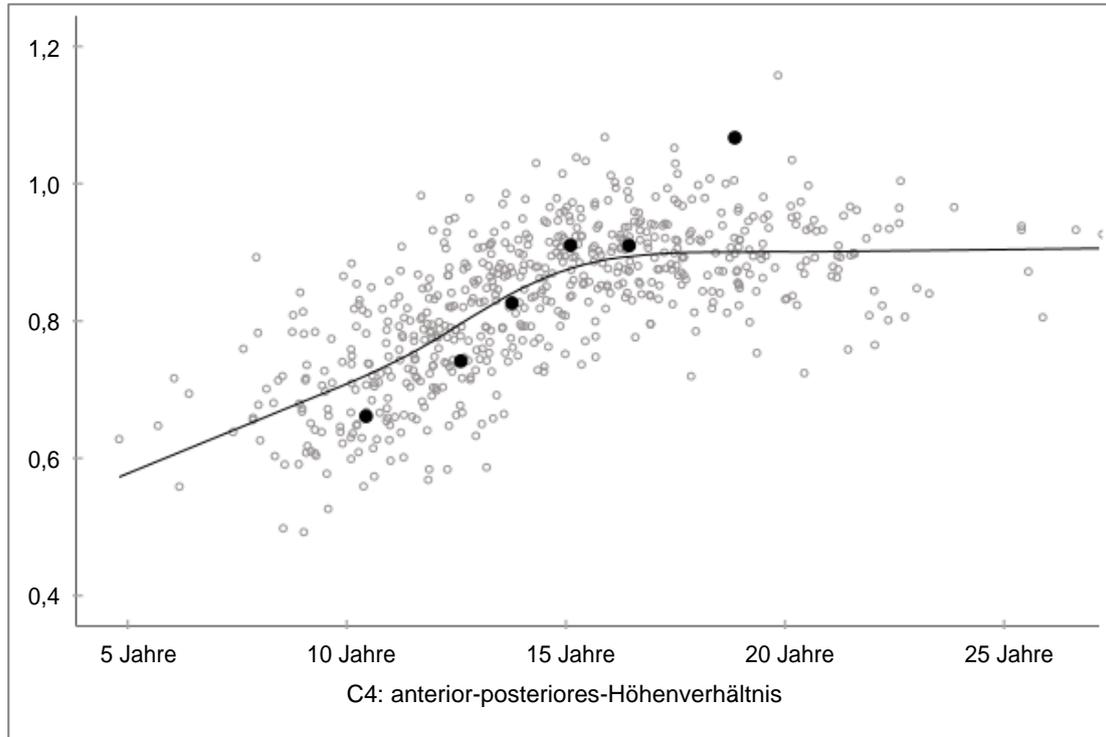
19,2 Jahre



20,3 Jahre

Patientin 90097

**C4: anterior-posteriores-Höhenverhältnis – die Anpassungslinie kreuzend
– weiblich**



Röntgenbilder



10,4 Jahre



12,6 Jahre



13,8 Jahre



15,1 Jahre



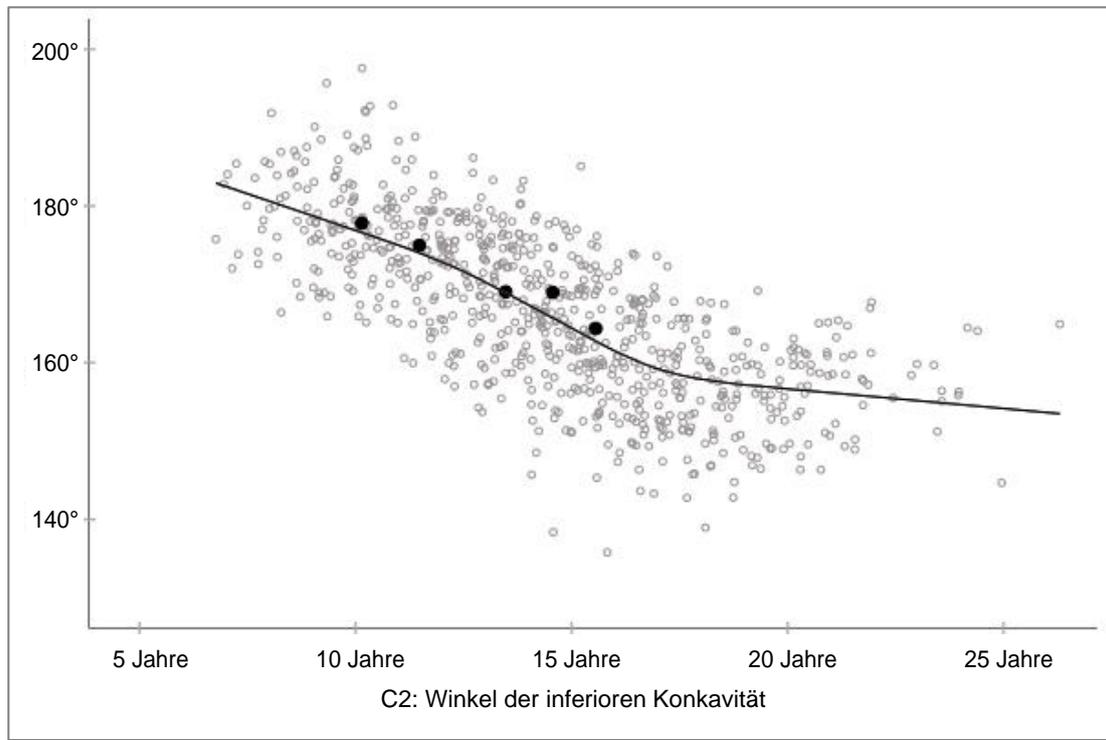
16,4 Jahre



18,9 Jahre

Patientin 80111

**C2: Winkel der inferioren Konkavität – auf der Anpassungslinie verlaufend
– männlich**



Röntgenbilder



10,1 Jahre



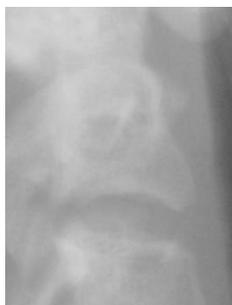
11,5 Jahre



13,5 Jahre



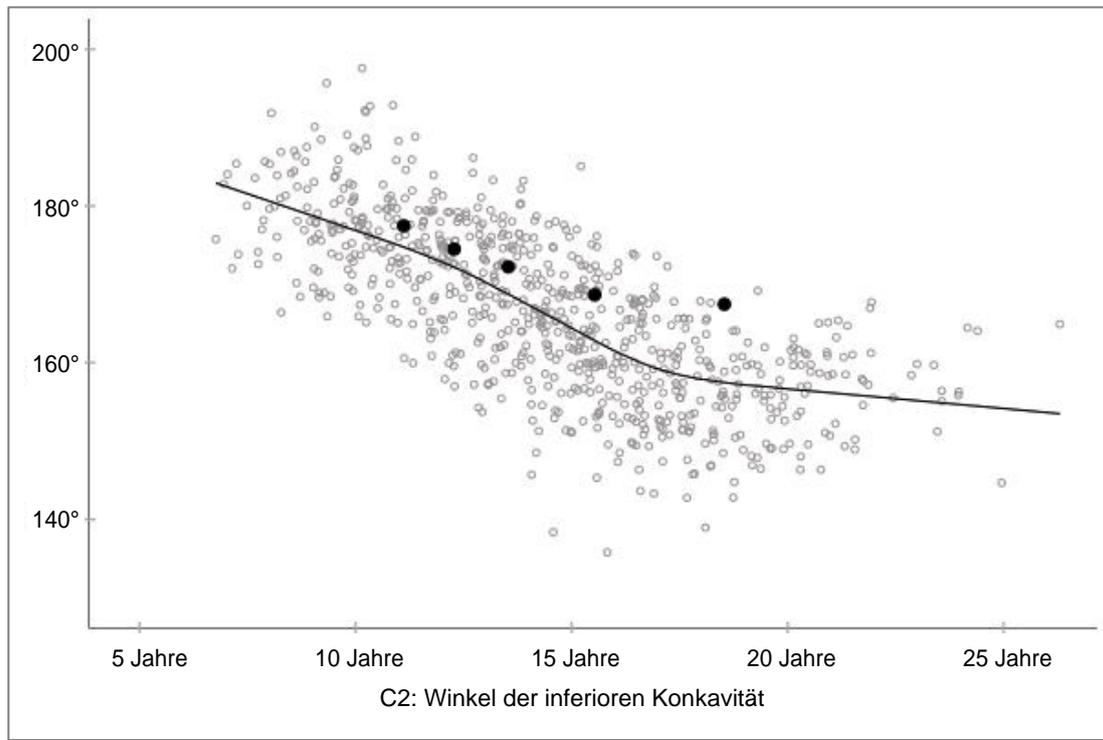
14,6 Jahre



15,6 Jahre

Patient 85052

**C2: Winkel der inferioren Konkavität – über der Anpassungslinie
verlaufend – männlich**



Röntgenbilder



11,1 Jahre



12,3 Jahre



13,5 Jahre



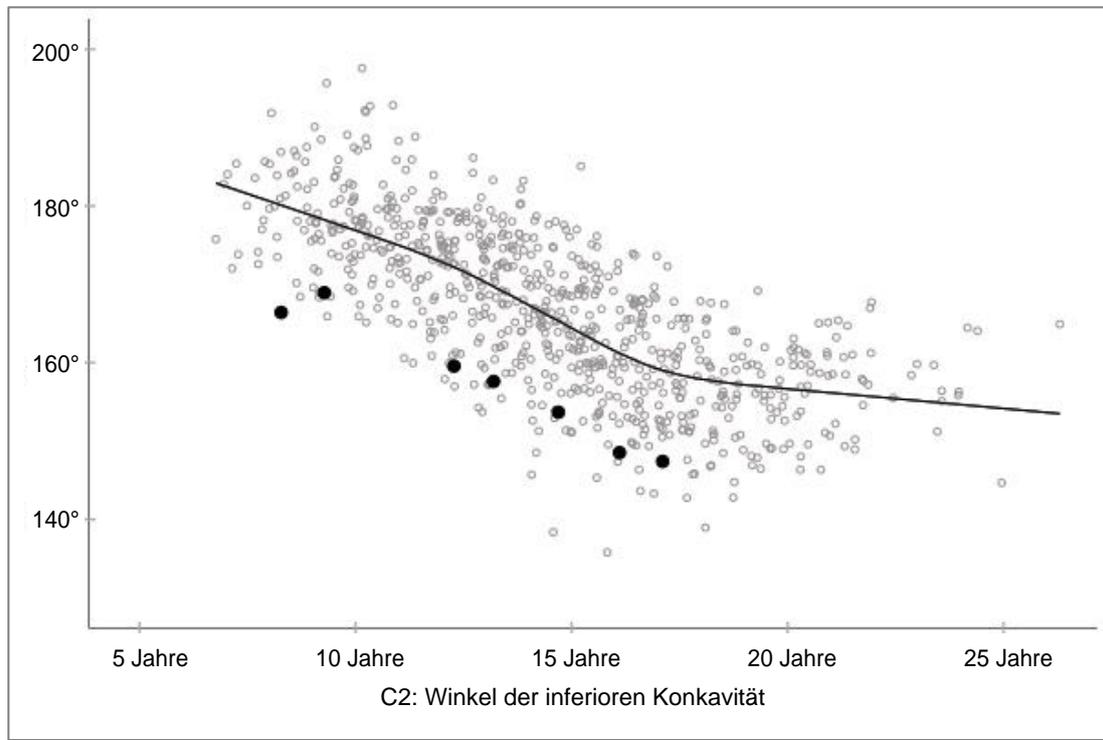
15,5 Jahre



18,5 Jahre

Patient 80190

**C2: Winkel der inferioren Konkavität – unter der Anpassungslinie
verlaufend – männlich**



Röntgenbilder



8,3 Jahre



9,3 Jahre



12,3 Jahre



13,2 Jahre



14,7 Jahre



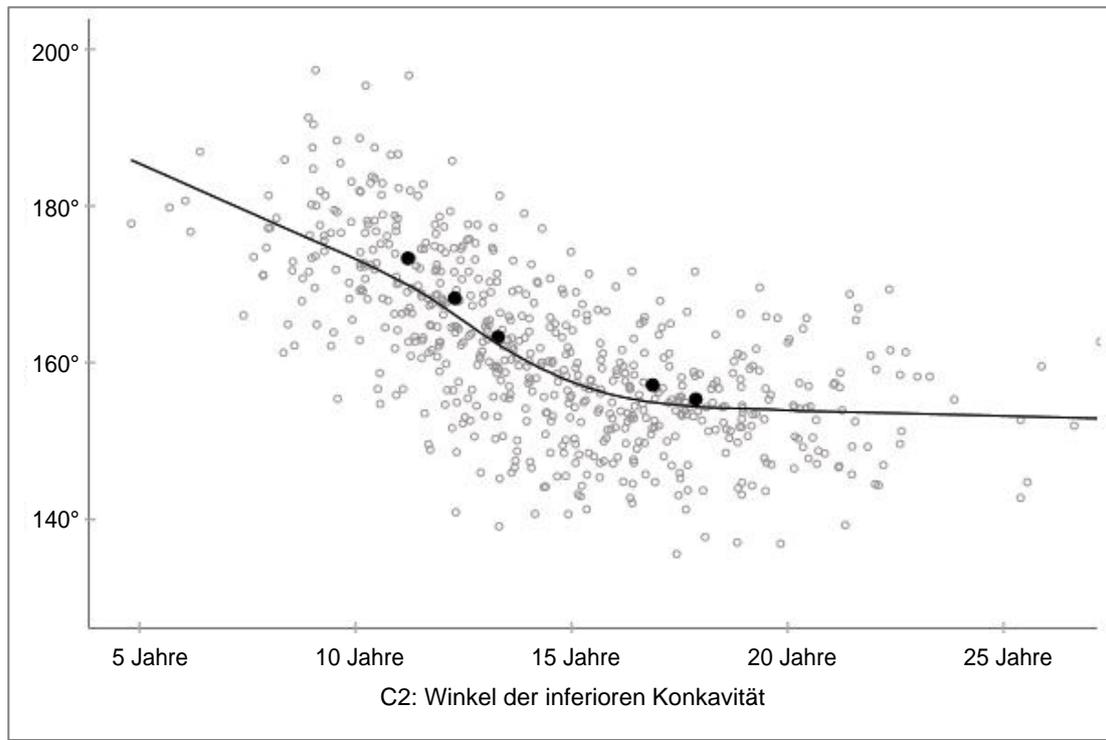
16,1 Jahre



17,1 Jahre

Patient 85199

**C2: Winkel der inferioren Konkavität – auf der Anpassungslinie verlaufend
– weiblich**



Röntgenbilder



11,2 Jahre



12,3 Jahre



13,3 Jahre



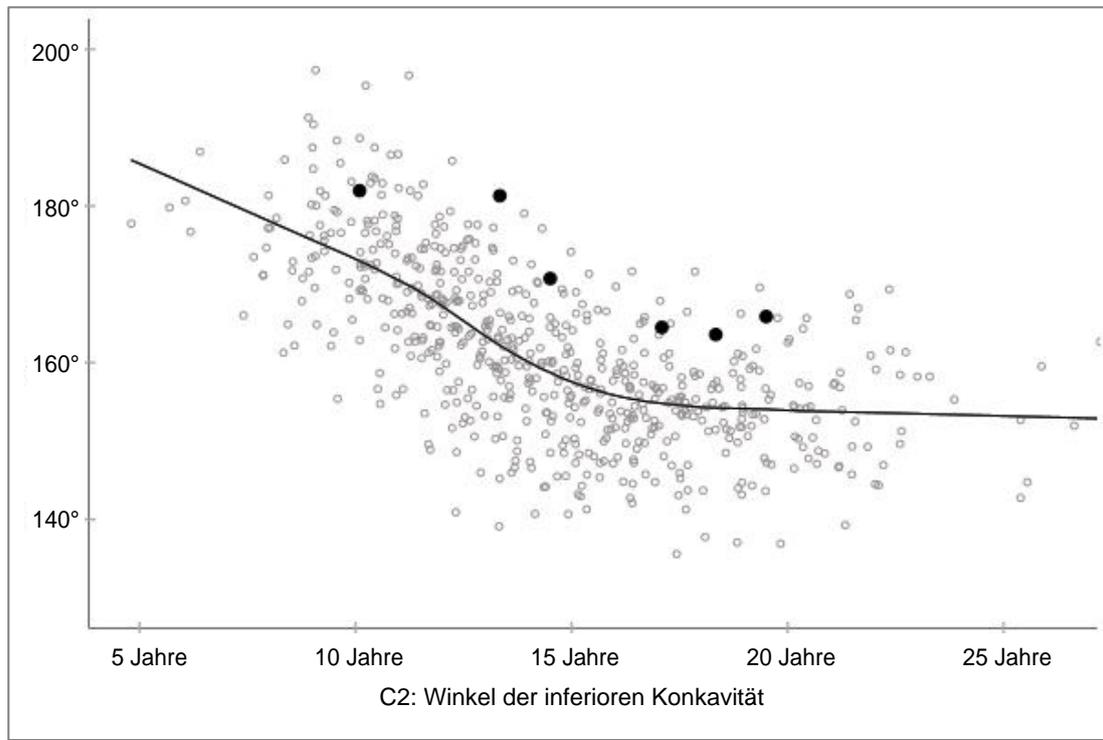
16,9 Jahre



17,9 Jahre

Patientin 85054

C2: Winkel der inferioren Konkavität – über der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



10,1 Jahre



13,3 Jahre



14,5 Jahre



17,1 Jahre



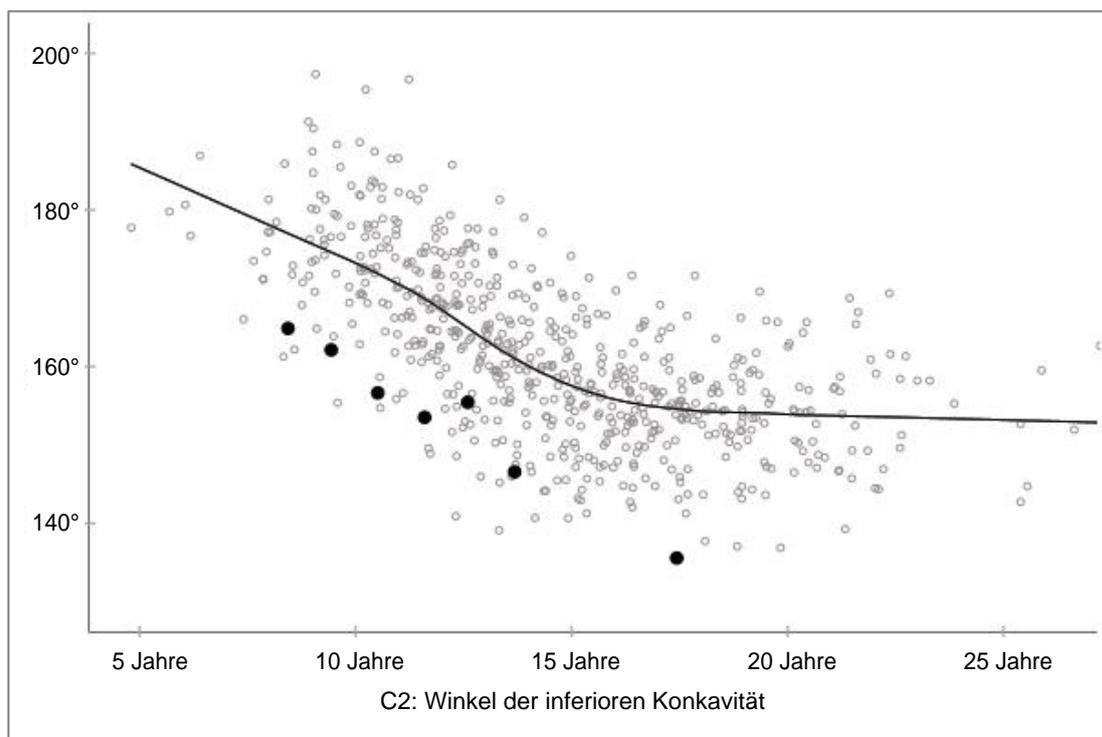
18,3 Jahre



19,5 Jahre

Patientin 85250

**C2: Winkel der inferioren Konkavität – unter der Anpassungslinie
verlaufend – weiblich**



Röntgenbilder



8,4 Jahre



9,4 Jahre



10,5 Jahre



11,6 Jahre



12,6 Jahre



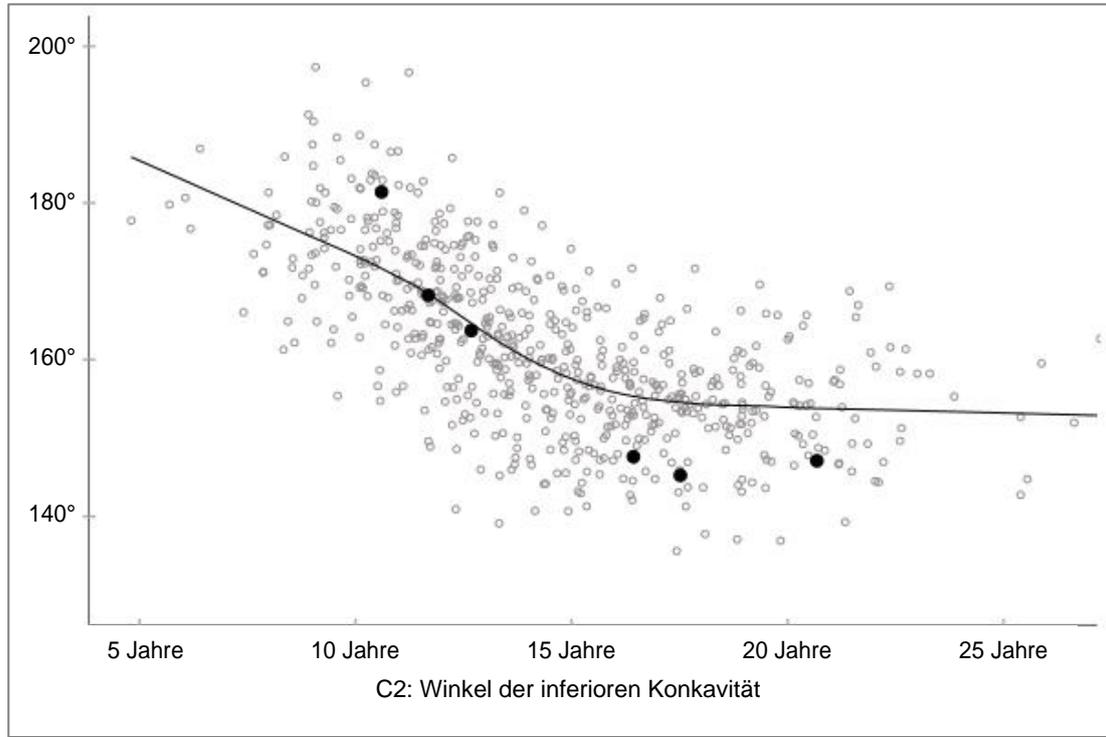
13,7 Jahre



17,4 Jahre

Patientin 85161

C2: Winkel der inferioren Konkavität – die Anpassungslinie kreuzend – weiblich



Röntgenbilder



10,6 Jahre



11,7 Jahre



12,7 Jahre



16,4 Jahre



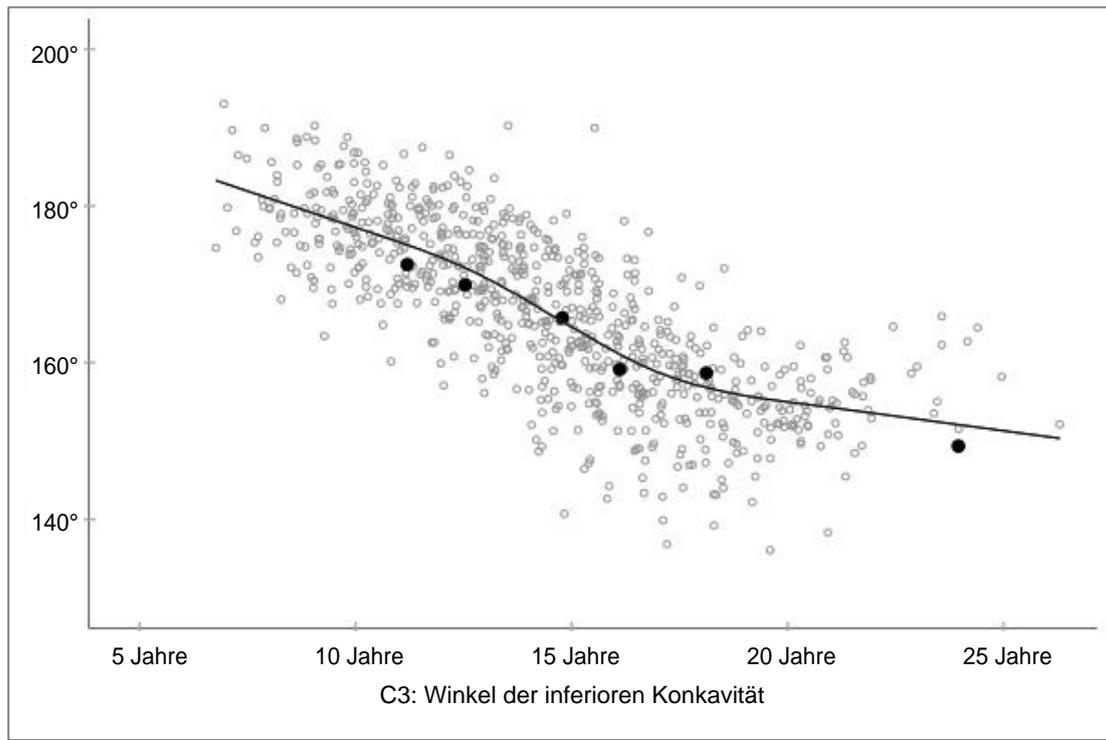
17,5 Jahre



20,7 Jahre

Patientin 85134

**C3: Winkel der inferioren Konkavität – auf der Anpassungslinie verlaufend
– männlich**



Röntgenbilder



11,2 Jahre



12,5 Jahre



14,8 Jahre



16,1 Jahre



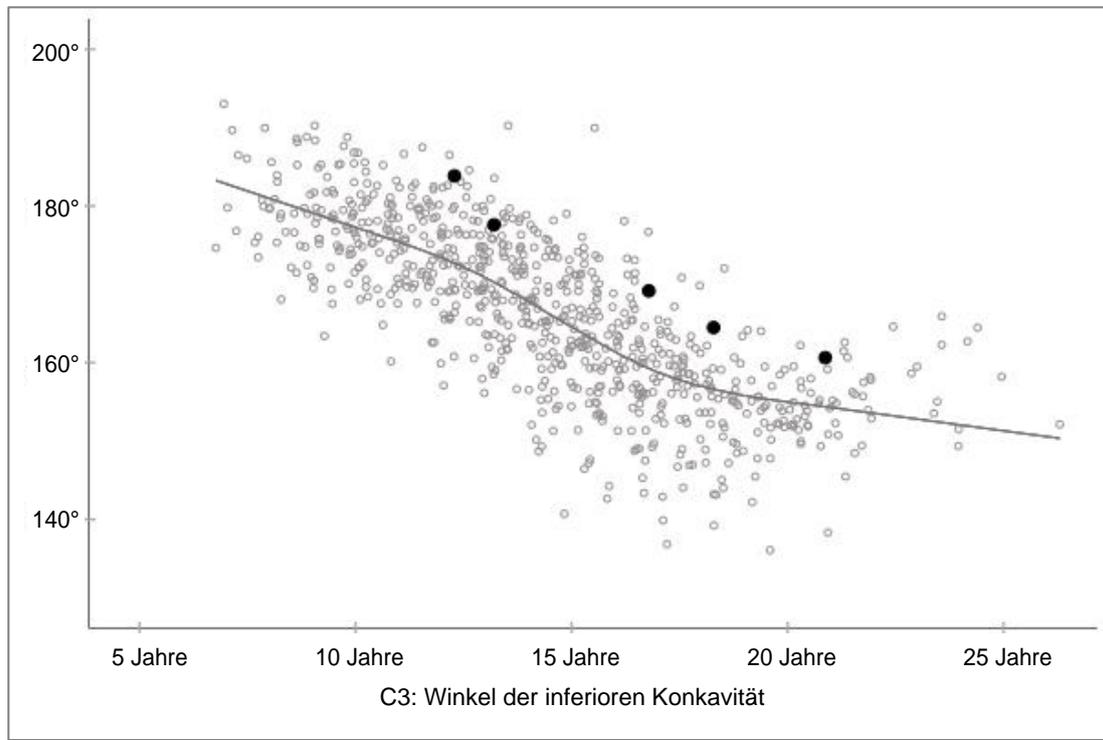
18,1 Jahre



24,0 Jahre

Patient 85185

C3: Winkel der inferioren Konkavität – über der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



12,3 Jahre



13,2 Jahre



16,8 Jahre



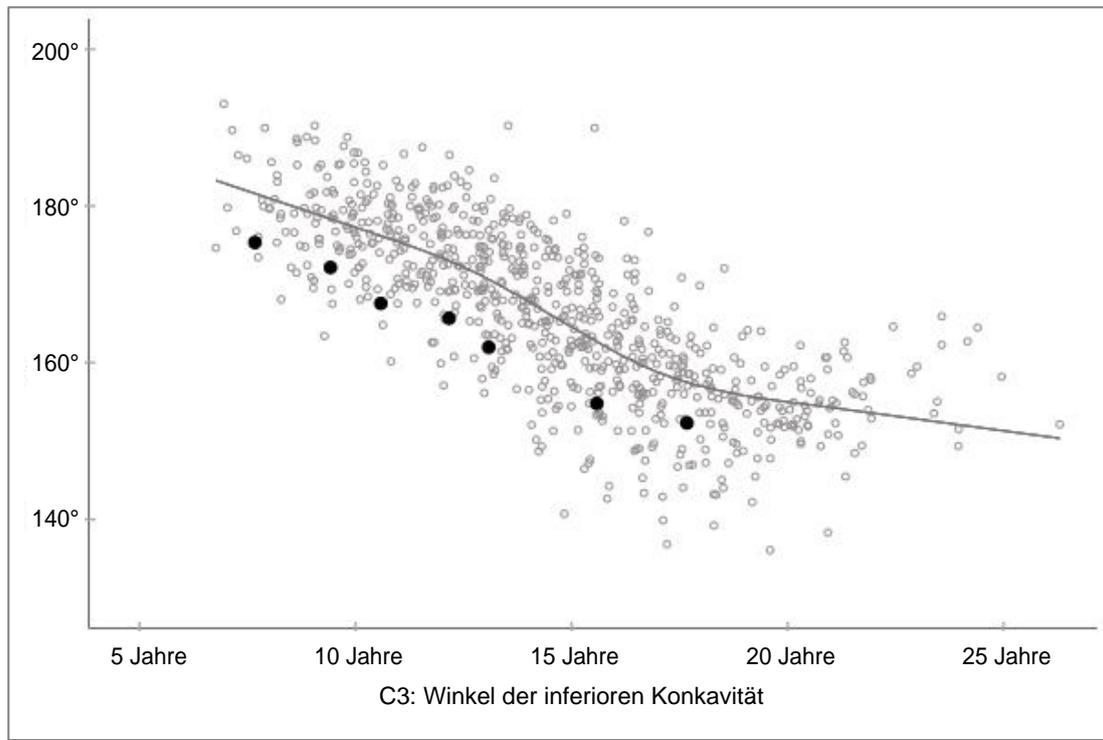
18,3 Jahre



20,9 Jahre

Patient 85076

C3: Winkel der inferioren Konkavität – unter der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



7,7 Jahre



9,4 Jahre



10,6 Jahre



12,2 Jahre



13,1 Jahre



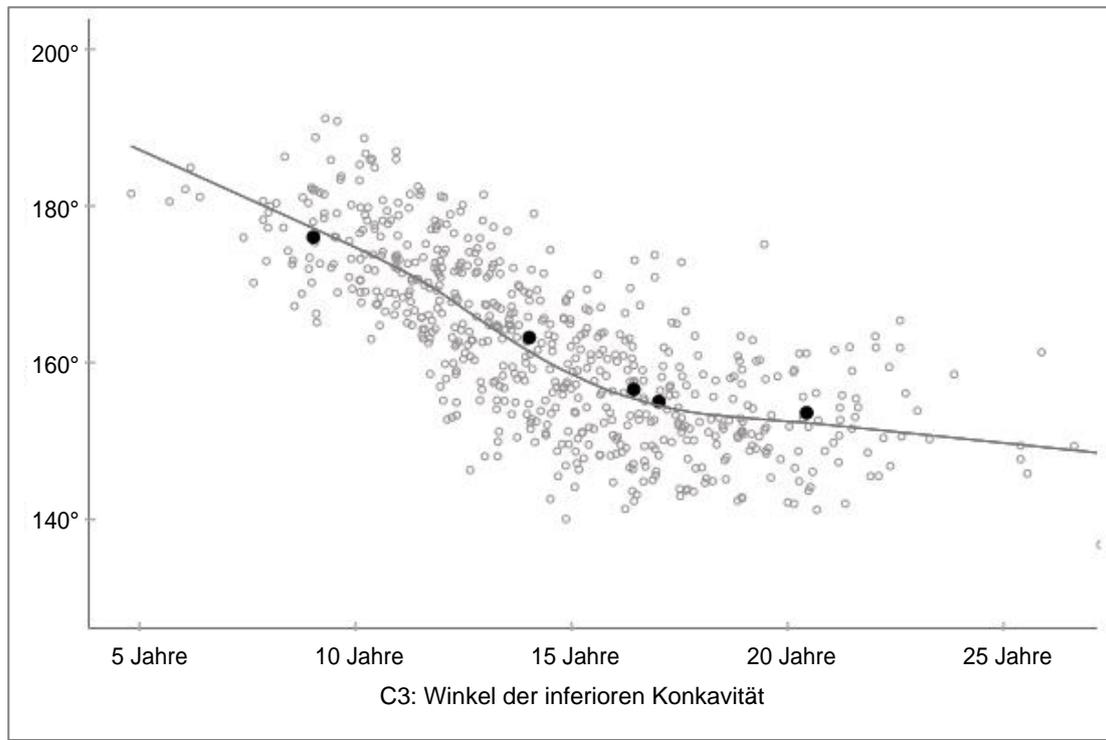
15,6 Jahre



17,7 Jahre

Patient 80191

**C3: Winkel der inferioren Konkavität – auf der Anpassungslinie verlaufend
– weiblich**



Röntgenbilder



9,0 Jahre



14,0 Jahre



16,7 Jahre



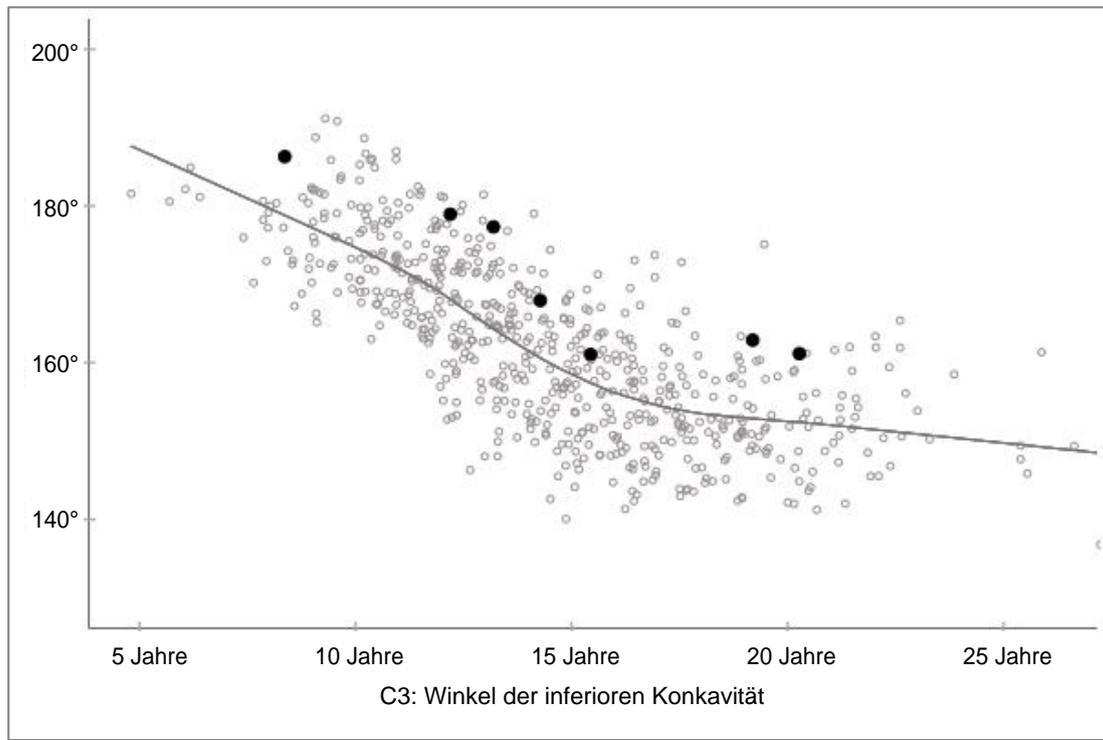
17,0 Jahre



20,4 Jahre

Patientin 90349

C3: Winkel der inferioren Konkavität – über der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



8,4 Jahre



12,2 Jahre



13,2 Jahre



14,3 Jahre



15,4 Jahre



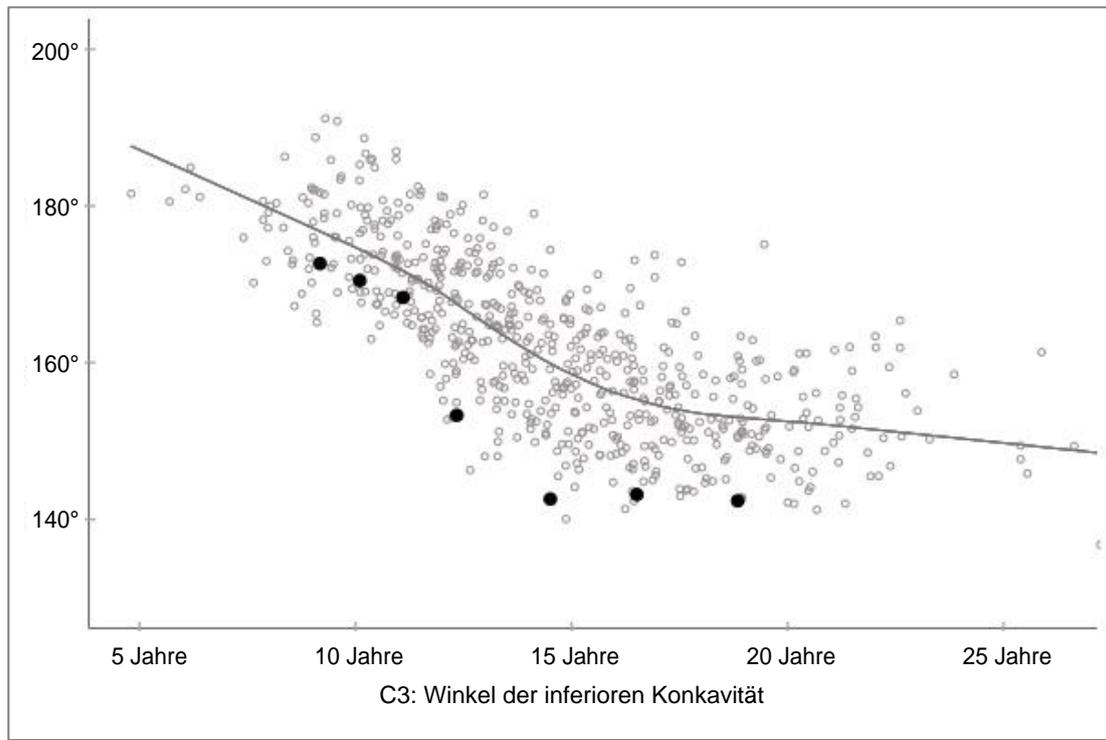
19,2 Jahre



20,3 Jahre

Patientin 90097

C3: Winkel der inferioren Konkavität – unter der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



9,2 Jahre



10,1 Jahre



11,1 Jahre



12,3 Jahre



14,5 Jahre



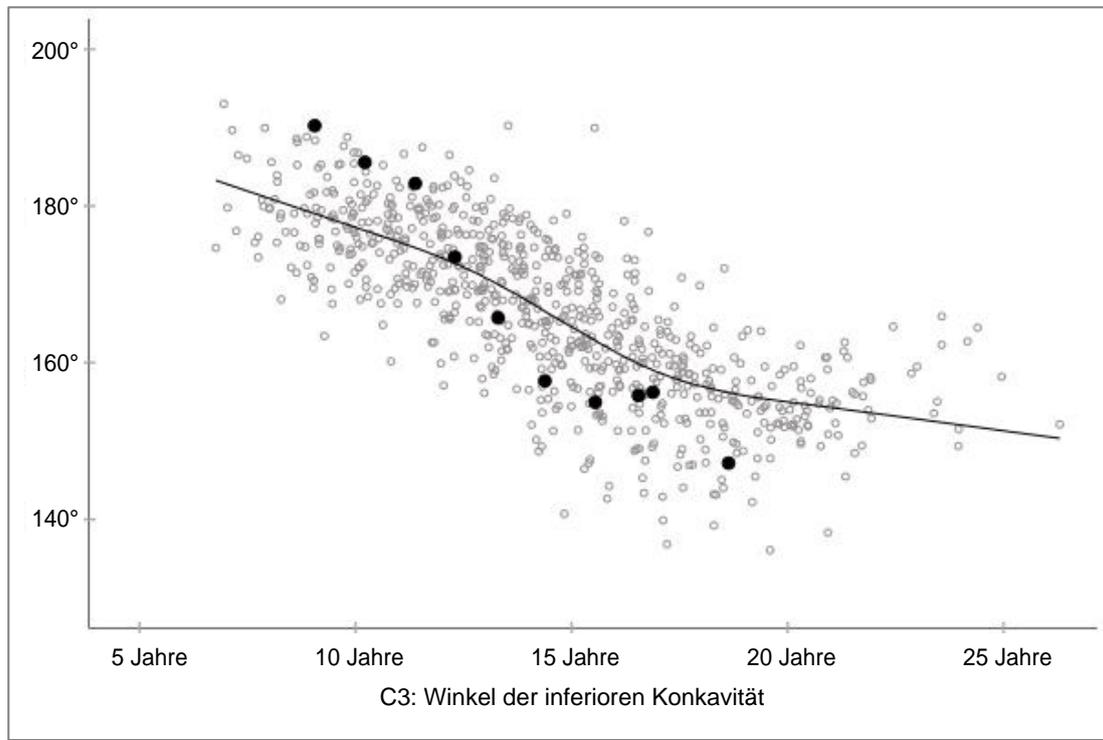
16,5 Jahre



18,8 Jahre

Patientin 80233

C3: Winkel der inferioren Konkavität – die Anpassungslinie kreuzend – männlich



Röntgenbilder



9,1 Jahre



10,2 Jahre



11,4 Jahre



12,3 Jahre



13,3 Jahre



14,4 Jahre



15,6 Jahre



16,6 Jahre



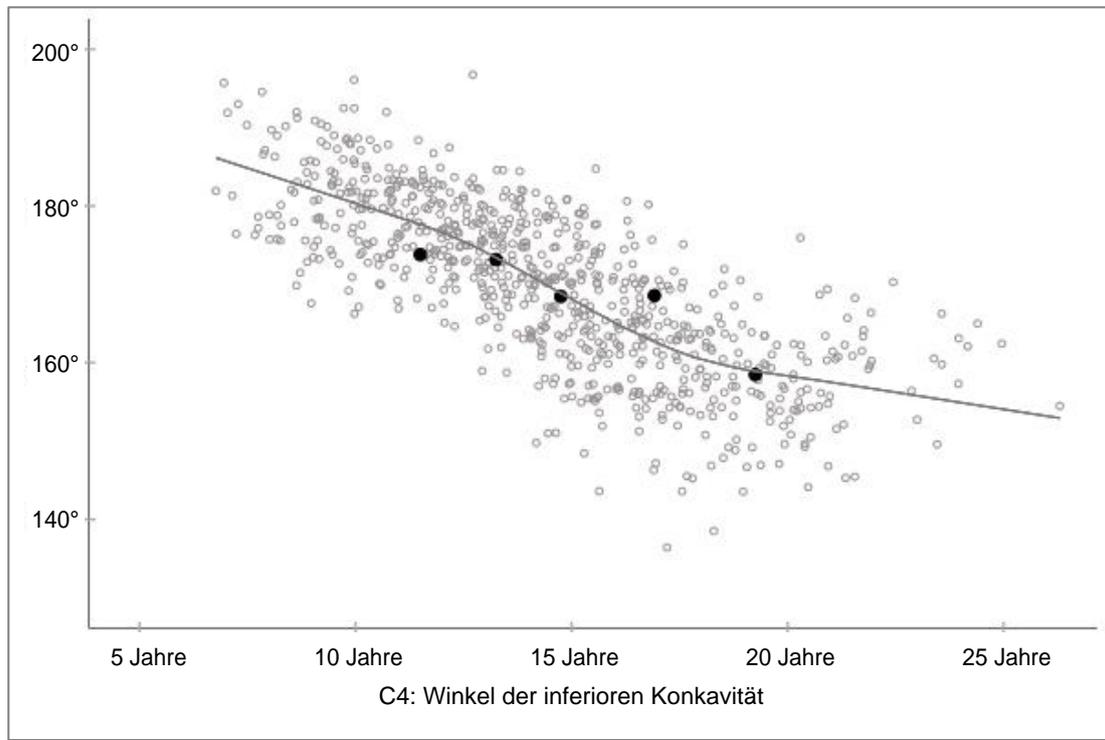
16,9 Jahre



18,6 Jahre

Patient 80093

**C4: Winkel der inferioren Konkavität – auf der Anpassungslinie verlaufend
– männlich**



Röntgenbilder



11,5 Jahre



13,3 Jahre



14,8 Jahre



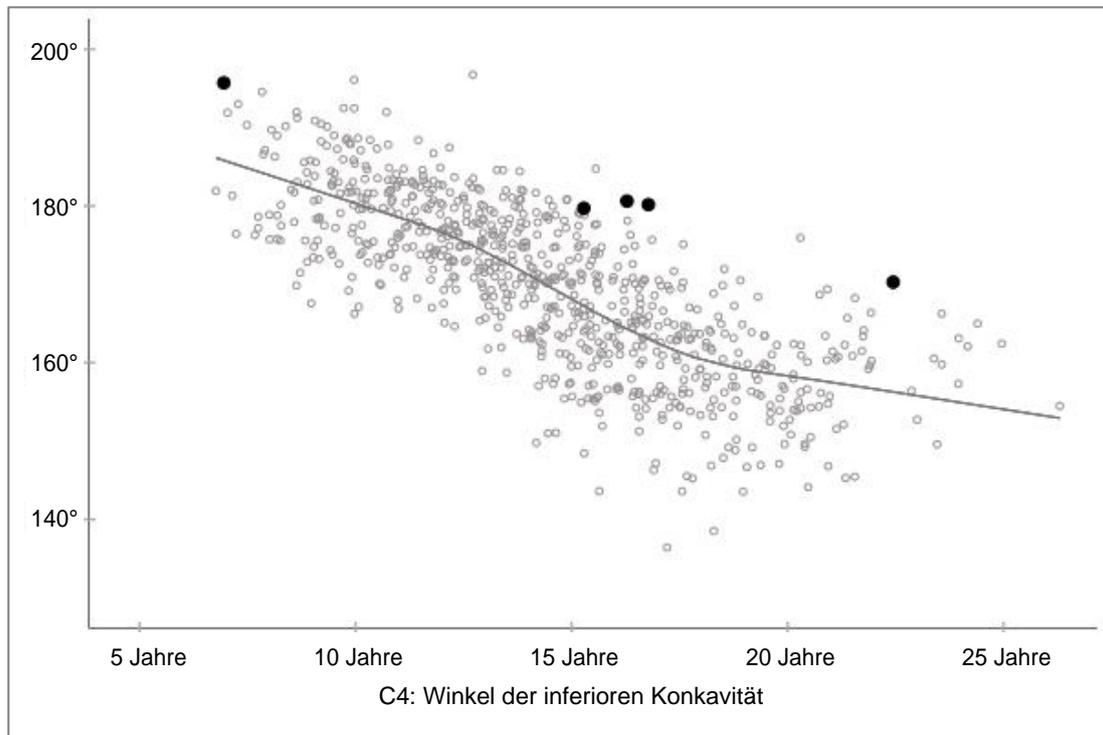
16,9 Jahre



19,3 Jahre

Patient 85050

C4: Winkel der inferioren Konkavität – über der Anpassungslinie verlaufend – männlich



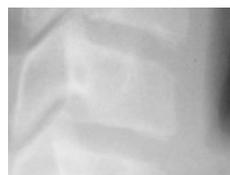
Röntgenbilder



7,0 Jahre



15,3 Jahre



16,3 Jahre



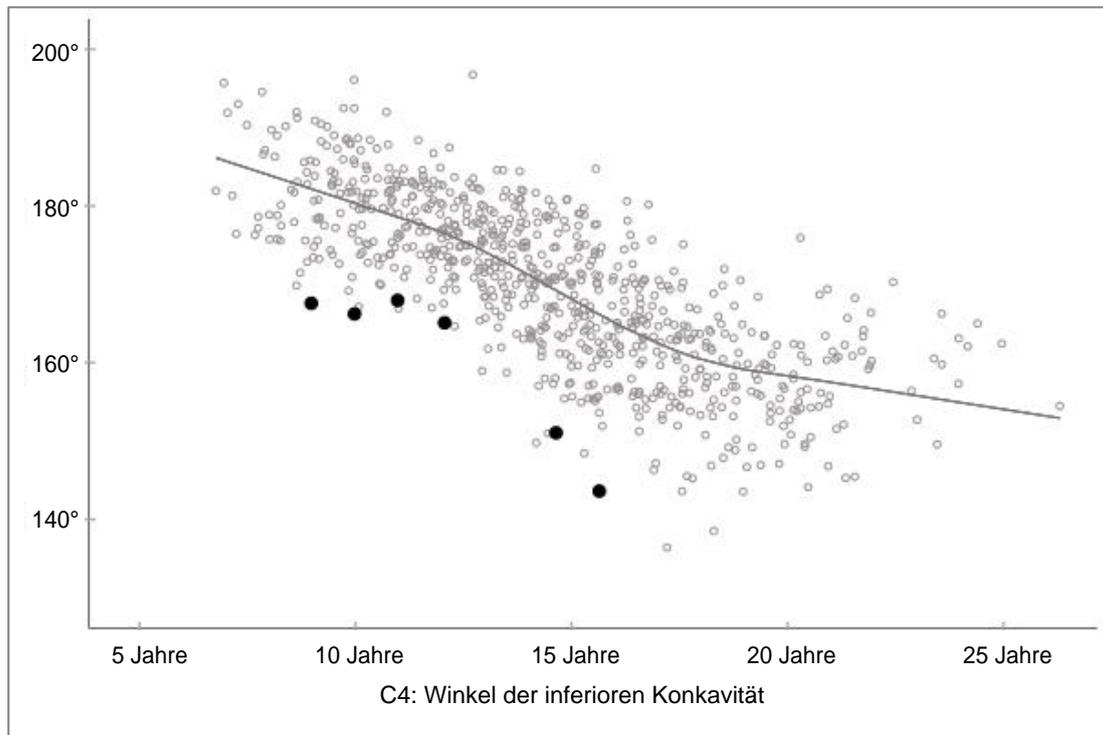
16,8 Jahre



22,4 Jahre

Patient 80134

C4: Winkel der inferioren Konkavität – unter der Anpassungslinie verlaufend – männlich



Röntgenbilder



9,0 Jahre



10,0 Jahre



11,0 Jahre



12,1 Jahre



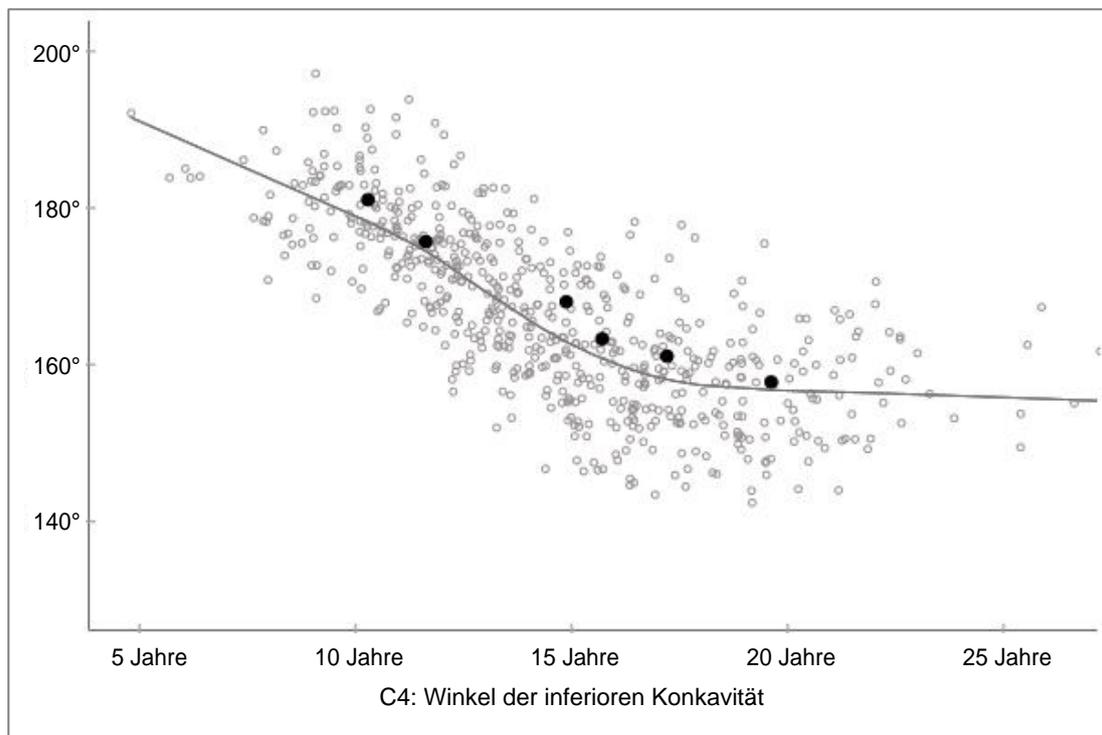
14,6 Jahre



15,6 Jahre

Patient 80143

**C4: Winkel der inferioren Konkavität – auf der Anpassungslinie verlaufend
– weiblich**



Röntgenbilder



10,3 Jahre



11,6 Jahre



14,9 Jahre



15,7 Jahre



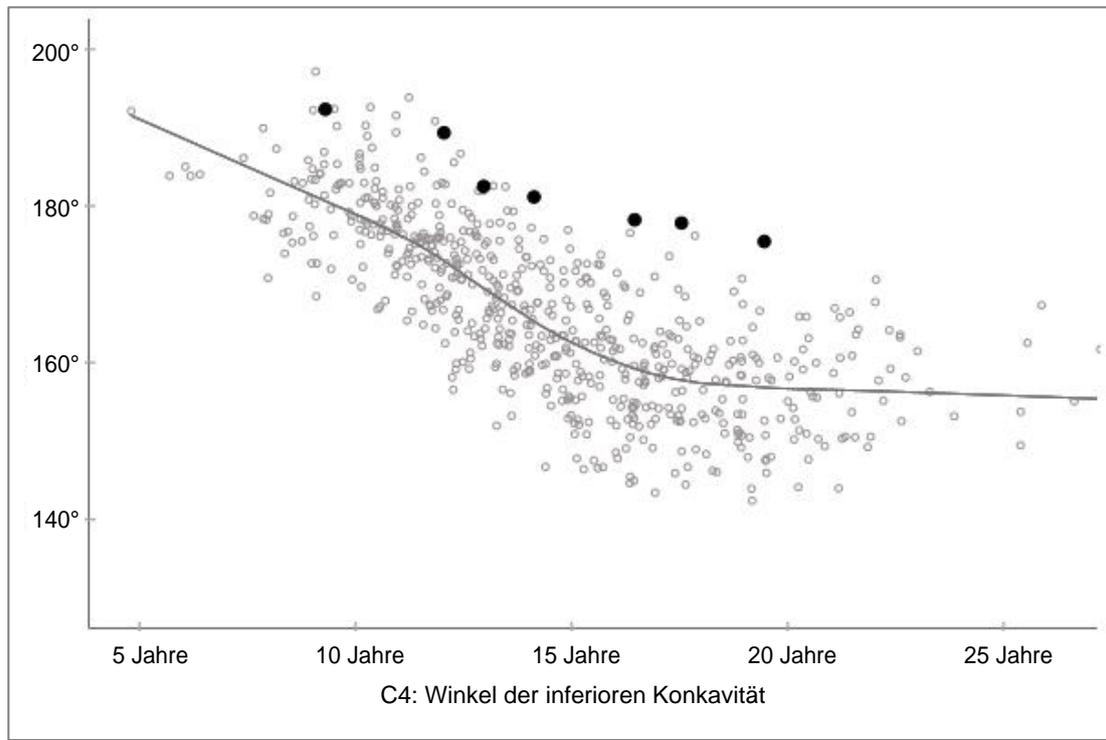
17,2 Jahre



19,6 Jahre

Patientin 85152

**C4: Winkel der inferioren Konkavität – über der Anpassungslinie verlaufend
– weiblich**



Röntgenbilder



9,3 Jahre



12,0 Jahre



13,0 Jahre



14,1 Jahre



16,5 Jahre



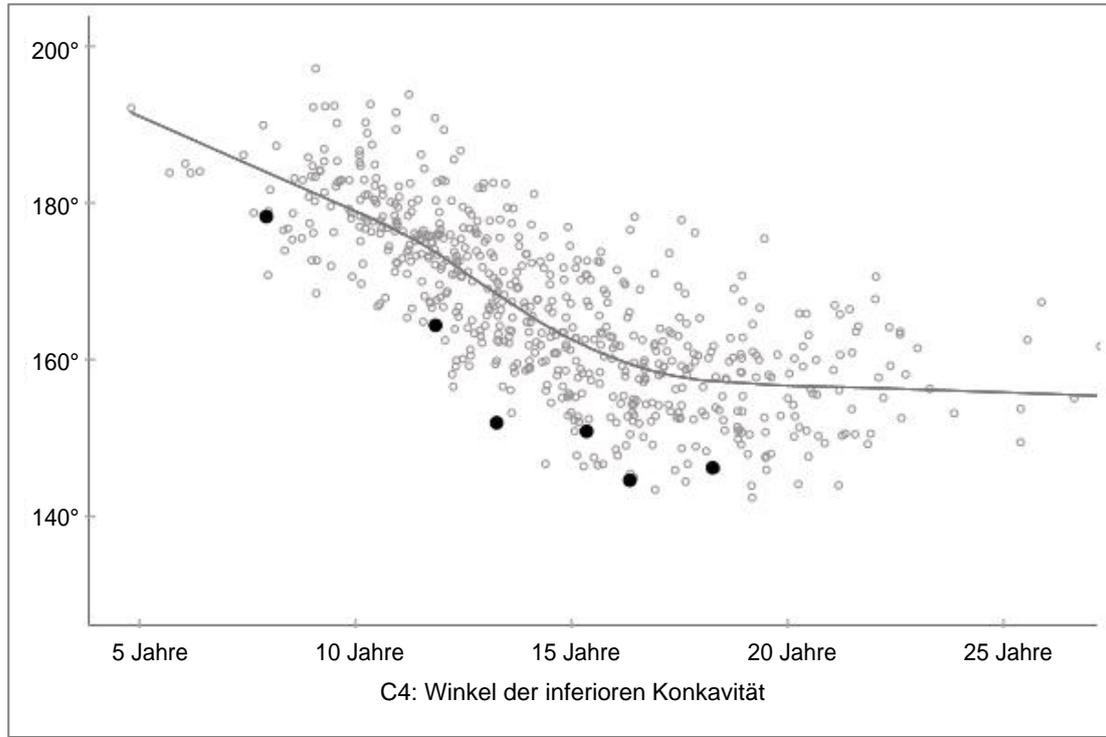
17,5 Jahre



19,5 Jahre

Patientin 80116

C4: Winkel der inferioren Konkavität – unter der Anpassungslinie verlaufend – weiblich



Röntgenbilder



7,9 Jahre



11,9 Jahre



13,3 Jahre



15,4 Jahre



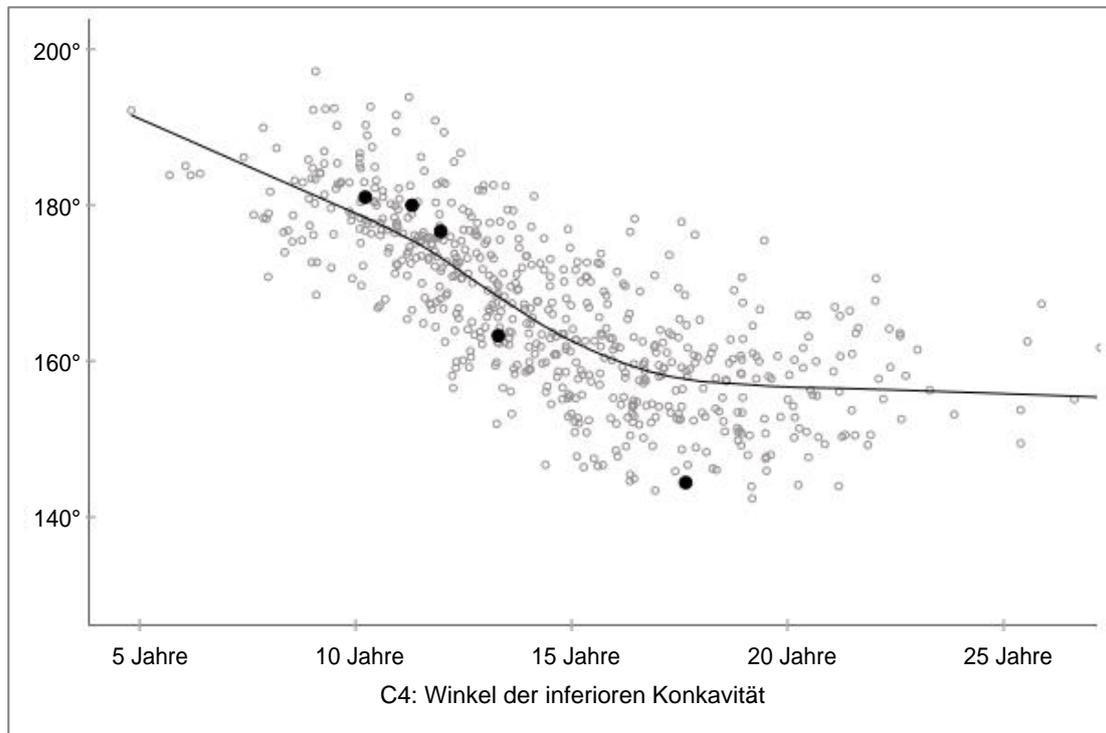
16,4 Jahre



18,3 Jahre

Patientin 80127

C4: Winkel der inferioren Konkavität – die Anpassungslinie kreuzend – weiblich



Röntgenbilder



10,2 Jahre



11,3 Jahre



12,0 Jahre



13,3 Jahre



17,6 Jahre

Patientin 85244