

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Dreidimensionale Modellierung einer Pferdewirbelsäule basierend auf CT-Scans

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Margit Gföhler

E307

Institut für Konstruktionswissenschaft und Technische Logistik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Grösel Martin

0125634

Plenergasse 24/17

1180 Wien

Wien, im Juni 2008

Vorwort

Diese Arbeit ist in Kooperation zwischen der Technischen Universität Wien und der Veterinärmedizinischen Universität Wien entstanden. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mir bei der Erarbeitung dieser Diplomarbeit geholfen haben.

Mein herzlicher Dank gilt in erster Linie Frau Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Margit Gföhler vom Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik für die Betreuung meiner Arbeit.

Ebenso bedanken möchte ich mich bei Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Grafinger für die Bereitstellung der Bearbeitungssoftware und für seine wertvolle Hilfe bei diversen Unklarheiten in Bezug auf die eingesetzte CAD-Software.

Außerdem gilt mein Dank Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Peham von der Movement Science Group der Veterinärmedizinischen Universität Wien für die Bereitstellung dieser Diplomarbeit. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Cand. Vet. Med. Alexander Kotschwar von der VMU für sein hilfreiches Entgegenkommen beim Lösen aller veterinärmedizinischen Fragen, sowie für seine Unterstützung beim Optimieren der grafischen Eigenschaften an den konstruierten Pferdewirbeln, bedanken.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meiner Freundin Regina Stöcklmaier für das Korrekturlesen dieser Arbeit und für ihre hilfreichen Anmerkungen.

Ein ganz besonderer Dank gilt natürlich meinen Eltern für ihre Geduld, ihr Vertrauen und nicht zu vergessen ihre finanzielle Unterstützung. Ohne sie wäre dieses Studium nie möglich gewesen.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der dreidimensionalen Modellierung von Pferdewirbeln basierend auf CT-Scans. Ziel ist es später aus den konstruierten Wirbeln ein biomechanisches Modell der Pferdewirbelsäule zu erstellen, um das mechanische Verhalten der Wirbelsäule genauer untersuchen zu können. Einwirkende Kräfte, Lasten und Momente sollen so aufgezeigt und Spitzenbelastungen lokalisiert werden.

Aus den einzelnen CT-Scanserien einer präparierten Pferdewirbelsäule werden zuerst die Konturen der Wirbel nachgezeichnet, bevor diese anschließend in einem 3D-Konstruktionsprogramm im korrekten Abstand zu einander als Gerüst für die Erstellung der Wirbelstrukturen dienen. Durch den geringen Abstand von nur 3mm zwischen den Scans sind die Wirbel höchst detailliert und für die weitere Verwendung anatomisch mehr als ausreichend korrekt gezeichnet.

Durch die Erstellung eines biomechanischen Modells erhofft man sich tiefere Einblicke in die Pathologie der thorakolumbalen Erkrankungen zu erhalten, um einerseits das Auftreten von Rückenproblemen bei Pferden zu erklären und andererseits vernünftige Prinzipien für eine Therapie festlegen zu können.

Abkürzungsverzeichnis

Cy	Schwanzwirbel (<i>Vertebrae coccygeae</i> , Cy ₁ = erster Schwanzwirbel)
For.	Foramen
Inc.	Incisura
L	Lumbalwirbel (L ₁ = erster Lendenwirbel)
Proc.	Processus
Procc.	Processi
S	Sakralwirbel (S ₁ = erster Kreuzwirbel)
T	Thoraxwirbel (T ₁ = erster Brustwirbel)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
2. Anatomie der Pferdewirbelsäule	10
2.1 Allgemeiner Aufbau	10
2.2 Brustwirbelsäule	12
2.3 Lendenwirbelsäule	13
2.4 Kreuzbein	15
2.5 Ursachen von Rückenproblemen	16
3. Konstruktion der Wirbel	18
3.1 CT-Aufnahmen	18
3.2 Erstellung der zweidimensionalen Konturen	22
3.3 Erstellung der dreidimensionalen Wirbel	28
3.3.1 Wireframe- & Surface Design Modus	28
3.3.2 Part Design Modus	32
3.3.3 Assembly Design Modus	34
4. Resultate	36
4.1 Lendenwirbelmodelle	36
4.2 Kreuzwirbelmodell	42
4.3 Gesamtansicht aller Wirbel	44
4.4 Modifizierte Brustwirbelmodelle	45
5. Diskussion	49
6. Literaturverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Gesamtansicht einer Pferdewirbelsäule [6]	10
Abbildung 2-2 Halbschema eines Wirbels [7]	11
Abbildung 2-3 Achter und neunter Brustwirbel [7]	12
Abbildung 2-4 Dritter Lendenwirbel, Kranialansicht (li.) & Kaudalansicht (re.) [7]	13
Abbildung 2-5 Ventrale Ansicht von L ₅ , L ₆ , S ₁ - S ₅ sowie Cy ₁ [6]	14
Abbildung 2-6 Os sacrum; linke kraniodorsale Ansicht [7]	15
Abbildung 2-7 Kissing-Spine-Syndrom [13]	17
Abbildung 3-1 Schnittbild im <i>eFilm</i>	19
Abbildung 3-2 Seitenansicht (li.) und Ansicht von oben (re.) im <i>eFilm</i>	19
Abbildung 3-3 3D-Modell der Wirbelsäule ab T ₁	20
Abbildung 3-4 CT-Aufnahme im <i>eFilm</i> von Knochen & Gewebe	23
Abbildung 3-5 CT-Aufnahme im <i>eFilm</i> vom Knochen alleine	23
Abbildung 3-6 Definition der Knochenstruktur im <i>eFilm</i>	24
Abbildung 3-7 Konturen durch geschlossene Splines im <i>ME10</i>	27
Abbildung 3-8 Wirbelskelett von L ₁ von vorne	29
Abbildung 3-9 Wirbelskelett von L ₁ von der Seite schräg oben	29
Abbildung 3-10 Definition einer Fläche mit Mehrfachschnitt	30
Abbildung 3-11 Fläche mit Mehrfachschnitt	30
Abbildung 3-12 Fehler bei Flächenkonstruktion	31
Abbildung 3-13 Fehlerbehebung mit Führungselementen	31
Abbildung 3-14 Einfügen von Zusatzsplines bei abzweigenden Konturen	32
Abbildung 3-15 Teilentfernung aus einem Volumenkörper	33
Abbildung 3-16 Bedingungen im Assembly Design L ₁ bis L ₄	34
Abbildung 4-1 Vorderansicht L ₁	36
Abbildung 4-2 Seiten- und Schrägansicht L ₁	37
Abbildung 4-3 Vorderansicht L ₂	37
Abbildung 4-4 Seiten- und Schrägansicht L ₂	38
Abbildung 4-5 Vorderansicht L ₃	38
Abbildung 4-6 Seiten- und Schrägansicht L ₃	39
Abbildung 4-7 Vorderansicht L ₄	39
Abbildung 4-8 Seiten- und Schrägansicht L ₄	40
Abbildung 4-9 Vorderansicht verwachsene L ₅ & L ₆	40
Abbildung 4-10 Schrägansicht L ₅ & L ₆	41

Abbildung 4-11 Trennung in L ₅ (li.) und L ₆ (re.).....	41
Abbildung 4-12 Vorderansicht <i>Os sacrum</i>	42
Abbildung 4-13 Seitenansicht <i>Os sacrum</i>	43
Abbildung 4-14 Schrägansicht <i>Os sacrum</i>	43
Abbildung 4-15 Zusammenbau L ₁ bis S ₅	44
Abbildung 4-16 Gesamtansicht Lenden- & Kreuzwirbelsäule.....	45
Abbildung 4-17 Fünfter Brustwirbel; Vorder- & Seitenansicht [17]	46
Abbildung 4-18 T ₄ bis T ₁₀ der ursprünglichen Brustwirbel [17]	47
Abbildung 4-19 modifizierte Brustwirbelsäule	48

1. Einleitung

Die Erkrankungen der Wirbelsäule des Pferdes stellen ein ernst zu nehmendes Problem in der Veterinärorthopädie dar. Oft sind sie Resultate lang andauernder Prozesse von Über- oder Fehlbelastung des Rückens und nicht immer zeigen sie sich als Lahmheit oder Schmerz, sondern vielmehr nur in Form von mangelnder Leistung in verschiedenster Form [1], [2].

Der Einsatz von bildgebenden diagnostischen Verfahren wie MRI, CT, Röntgen oder Ultraschall sind nur bedingt anwendbar oder oft ganz unmöglich. Der Hauptgrund ist, dass die knöchernen Anteile der Wirbelsäule in viel Weichteilgewebe, sprich Muskelmassen, mit unterschiedlich großer, von proximal nach distal stark zunehmender Schichtdicke, eingebettet liegen [1]. Als Ausweg sieht man hier die Erschaffung eines entsprechenden biomechanisch, mathematischen Modells und dessen Untersuchung in einer digitalen Simulationsumgebung [2].

Das Ziel dieser Diplomarbeit liegt darin ein dreidimensionales Modell des Pferderückens zu erstellen. Basierend auf CT-Aufnahmen einer Pferdewirbelsäule sollen zuerst auf zweidimensionalen Scans die Konturen der einzelnen Wirbel bestimmt werden und anschließend die Strukturen mit der CAD-Software *CATIA* dreidimensional modelliert werden. Daraus soll später ein biomechanisches Modell des Pferderückens, basierend auf den tatsächlichen anatomischen Gegebenheiten entstehen, um das mechanische Verhalten der Wirbelsäule mit höchster Detail- und Wirklichkeitsgetreue untersuchen zu können. Die einzeln konstruierten Pferdewirbel werden als 3D-Modelle in eine dynamische Simulationssoftware importiert und die Wirbelsäule „nachgebaut“ um dort das biomechanische Verhalten zu simulieren.

Durch dieses CT-basierte Modell soll man später in der Lage sein Kräfte, Lasten und Drehmomente, die auf die verschiedenen Strukturen des Pferderückens einwirken, aufzuzeigen und ihre genaue Lokalisation sowie deren Spitzenbelastungen zu identifizieren. Damit sollen neue Einsichten in die Pathogenese des chronischen Rückenschmerzes geschaffen werden [2].

In der folgenden Arbeit sollen zuerst die Grundlagen der Anatomie der Pferdewirbelsäule sowie die Hauptursachen von Rückenproblemen erläutert werden.

Danach erfolgt eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Konstruktionsschritte im 2D- sowie im 3D-Modus und es werden Lösungen zu den dabei auftretenden Problemen gezeigt. Anschließend sollen die fertig modellierten Wirbel präsentiert werden und in einer abschließenden Diskussion die Vor- und Nachteile dieser Methode angeführt werden.

2. Anatomie der Pferdewirbelsäule

2.1 Allgemeiner Aufbau

Die Wirbelsäule (*Columna vertebralis*) des Pferdes besteht aus 7 Halswirbeln, in der Regel 18 (17-19) Brust-, 6 (5–7) Lenden-, 5 Kreuz- und 20 (15–21) Schwanzwirbeln [3] (Abbildung 2-1). Die Klammerziffern beziehen sich auf häufig vorkommende Variationen.

Die Wirbelsäule hat mehrere Aufgaben zu erfüllen. Einerseits dient sie als Schutz für das Rückenmark und dessen austretende Nervenäste, andererseits hat sie die Last des Kopfes und Halses sowie die des Rumpfes mit den darin befindlichen Eingeweiden zu tragen. Sie überträgt zusätzlich in der Bewegung den Impuls der Hintergliedmaßen auf die übrigen Körperteile. Die morphologische Struktur zeigt, dass der Pferderücken verhältnismäßig starr ist [4].

Der Bau der Pferdewirbelsäule spiegelt die spezielle Anpassung an die schnelle Fortbewegung zu Land wider. Stabilität überwiegt gegenüber freier Beweglichkeit und die Wirbelsäule bildet dabei die knöcherne Körperachse [5].

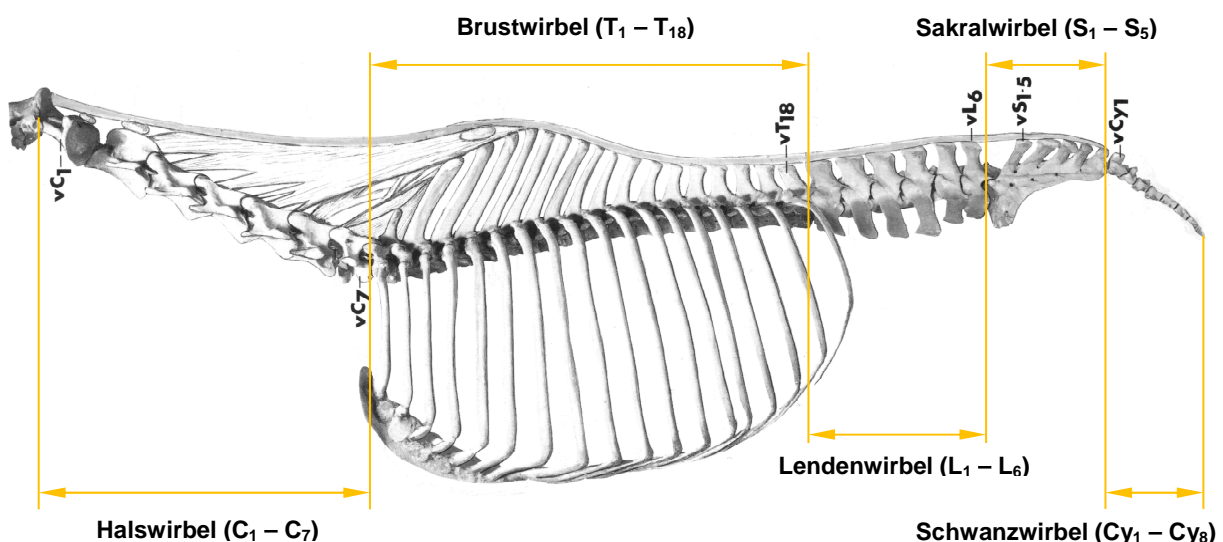


Abbildung 2-1 Gesamtansicht einer Pferdewirbelsäule [6]

vC... Halswirbel; vT... Brustwirbel; vL... Lendenwirbel; vS... Sakralwirbel; vCy... Schwanzwirbel

Da die Hals- und Schwanzwirbel bei den zukünftigen simulierten Bewegungsabläufen des dreidimensionalen biomechanischen Modells zunächst keine Rolle spielen, werden sie in den folgenden Beschreibungen und Angaben nicht näher dargestellt.

Alle Wirbel besitzen eine ähnliche morphologische Struktur, welche in Form und Größe je nach Körperregion stark variieren kann.

Die einheitliche Grundform ist wie folgt aufgebaut (Abbildung 2-2):

- 1 Wirbelkörper (*Corpus vertebrae*)
- 2 kraniale Endfläche des Wirbelkörpes (*Extremitas cranialis*)
- 3 bauchseitige Leiste (*Crista ventralis*)
- 4 Bandleiste
- 5 Venenloch
- 6 Wirbelbogen (*Arcus vertebrae*)
- 7 Dornfortsatz (*Proc. spinosus*)
- 8 Querfortsätze (*Procc. transversi*)
- 9 kraniale Gelenksfortsätze (*Procc. articulares craniales*)
- 10 kaudale Gelenksfortsätze (*Procc. articulares caudales*)
- 11 kraniale Zitzenfortsätze (*Procc. mammillares*)
- 12 kaudale Hilfsfortsätze (*Procc. accessori*)
- 13 Wirbelloch (*Foramen vertebrale*)
- 14 kraniale Wirbelbogeneinkerbung (*Inc. vertebralis cranialis*)
- 15 kaudale Wirbelbogeneinkerbung (*Inc. vertebralis caudalis*)

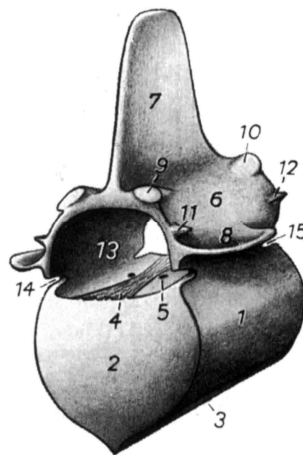


Abbildung 2-2 Halbschema eines Wirbels [7]

2.2 Brustwirbelsäule

Als besonderes Kennzeichen der Brustwirbel gelten die Rippengelenkflächen, *Foveae costales craniales et caudales* (Abbildung 2-3). Sie sind im kranialen Bereich der Brustwirbelsäule tief und werden kaudal flacher. An den letzten Wirbeln verschmilzt die *Fovea costalis cranialis* mit der *Fovea costalis transversalis* der *Procc. transversi* [5].

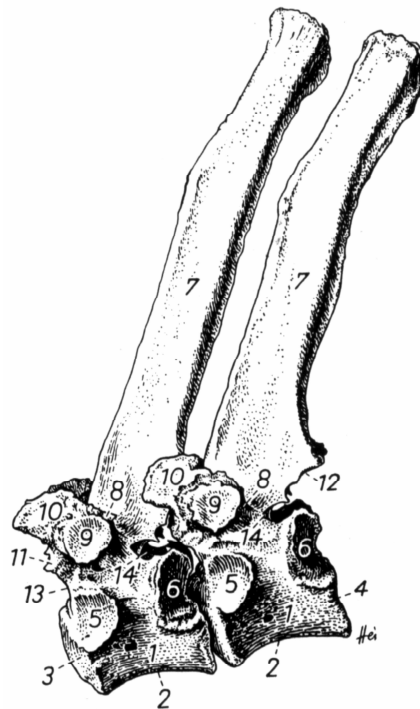


Abbildung 2-3 Achter und neunter Brustwirbel [7]

1 Corpus vertebrae; 2 Crista ventralis; 3,4 Extremitas cranialis bzw. caudalis; 5,6 Fovea costalis cranialis bzw. caudalis; 7 Proc. spinosus; 8 Proc. transversus, 9 seine Fovea costalis; 10 Proc. mamillaris; 11, 12 Proc. articularis cranialis bzw. caudalis; 13, 14 Inc. vertebralis cranialis bzw. caudalis, 14' For. intervertebrale

Wie in Abbildung 2-1 ersichtlich sind die Dornfortsätze der vorderen Thoraxwirbel sehr hoch. Die Wirbel zwischen T₃ und T₁₂ bilden die knöcherne Grundlage des Widerristes. Die Länge der *Procc. spinosi* nimmt beim Pferd in der Regel bis zu T₄ oder T₅ zu und danach bis zu T₁₂ (T₁₃) wieder ab. Im kaudalen Gebiet der Brustwirbelsäule sind die *Procc. spinosi* annähernd gleich groß und nahezu senkrecht zueinander ausgerichtet. Die Dornfortsätze der kranialen Brustwirbel sind dagegen nach kaudal geneigt.

Hinter dem Mittelpunkt des Rückens (T_{13}) kann fast keine laterale oder rotatorische Beweglichkeit der Wirbelsäule festgestellt werden [4], da die Gelenksflächen der *Procc. articulares* im kranialen Bereich der Brustwirbelsäule tangential stehen und an den beiden letzten Brustwirbeln sagittal [1].

2.3 Lendenwirbelsäule

Die beginnende Bewegungseinschränkung der kaudalen Brustwirbel zueinander setzt sich in der Lendenwirbelsäule fort [4]. Grund dafür sind die ineinander verzahnten *Proc. articularis cranialis* bzw. *caudalis*. Im Vergleich zu den Brustwirbeln sind die Lumbalwirbel etwas länger und massiger und die Wirbelbögen bilden einen größeren Wirbelkanal, um dem im Lendenbereich anschwellenden Rückenmark Platz zu bieten. Die *Procc. spinosi* sind nach kranial geneigt, platt, nahezu gleich lang und am freien Ende zu einem Kamm verdickt. Die *Crista ventralis* ist ab L_4 , manchmal erst ab L_5 nicht mehr vorhanden und die *Extremitas cranialis* und *caudalis* sind kaudal zunehmend flacher.

Die Querfortsätze, *Procc. costarii*, stellen Rippenrudimente dar, sind an ihren Rändern scharfkantig und reichen weit nach lateral (Abbildung 2-4). Die kürzesten Querfortsätze sind am ersten Lumbalwirbel zu finden, die längsten am 3. oder 4.

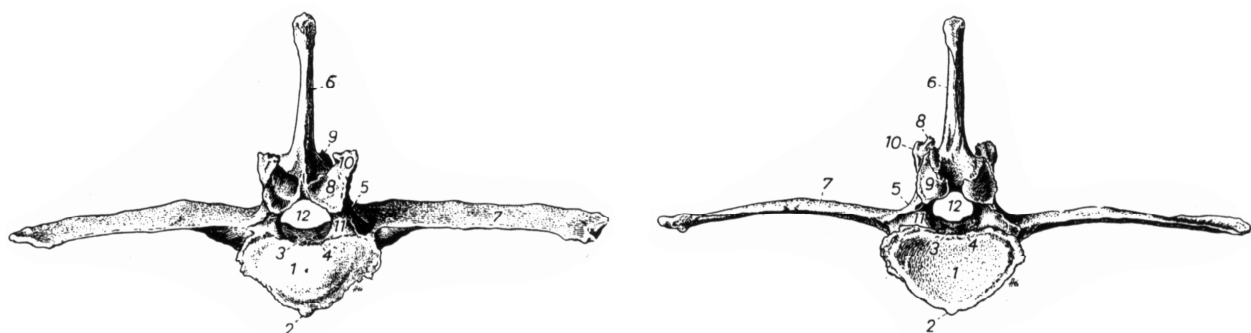


Abbildung 2-4 Dritter Lendenwirbel, Kranialansicht (li.) & Kaudalansicht (re.) [7]

1 Corpus vertebrae; 2 Crista ventralis; 3 Bandleiste; 4 Venenloch; 5 Arcus vertebrae; 6 Proc. spinosus; 7 Proc. costalis seu transversus; 8, 9 Proc. articularis cranialis bzw. caudalis; 10 Proc. mamillaris; 11 Inc. vertebralis cranialis; 12 For. vertebrale

Als Besonderheit beim Pferd sind zwischen den Querfortsätzen des 5. und 6. Lendenwirbels, als auch zwischen dem 6. Lendenwirbel und dem 1. Kreuzwirbel sog. Intertransversalgelenke ausgebildet. Sie sollen diesem Bereich eine höhere Stabilität verleihen. In manchen Fällen sind diese Gelenke auch ineinander verwachsen, wie zum Beispiel in Abbildung 2-5.

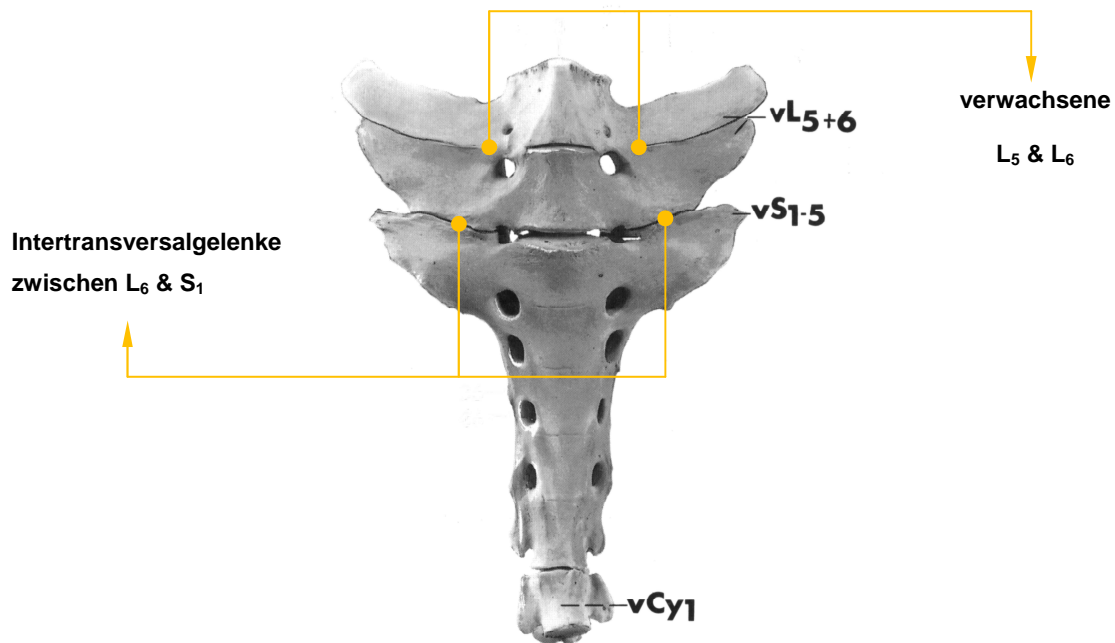


Abbildung 2-5 Ventrale Ansicht von L₅, L₆, S₁ - S₅ sowie Cy₁ [6]

2.4 Kreuzbein

Das Pferd besitzt, wie auch der Mensch, fünf Kreuzwirbel, *Vertebrae sacrales*, die, aufgrund der Verknöcherung der Zwischenwirbelscheiben und Verbindung weiterer knöcherner Wirbelkonturen, das Kreuzbein, *Os sacrum*, bilden. Bereits im 4. oder 5. Lebensjahr sind die Sakralwirbel beim Pferd fest verwachsen (Abbildung 2-5).

Im Vergleich zu den Lendenwirbeln sind beim Kreuzbein die *Procc. spinosi* nach kaudal gerichtet (Abbildung 2-6). Ausschlaggebend dafür sind kräftige Gesäß- und Sitzbeinmuskeln, die auf die Formung der Dornfortsätze große Einwirkung haben [7].

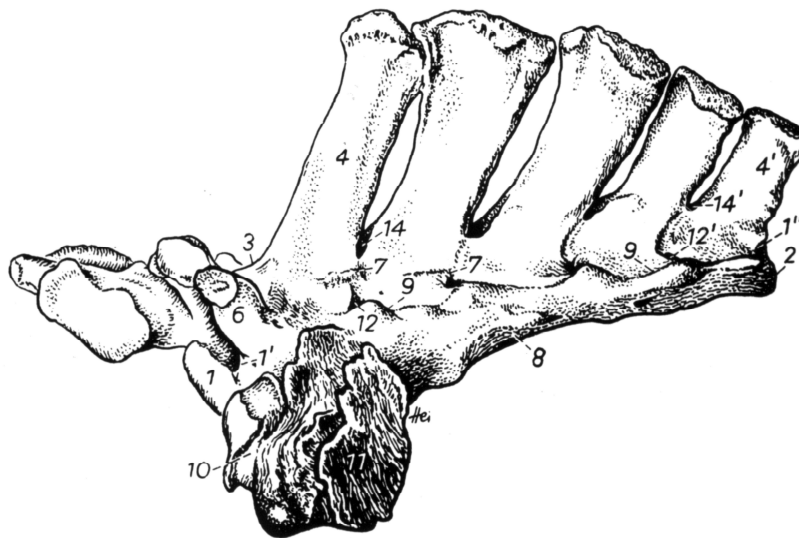


Abbildung 2-6 Os sacrum; linke kraniodorsale Ansicht [7]

1 Extremitas cranialis; 1', 1'' Inc. vertebralis cranialis bzw caudalis; 2 Extremitas caudalis; 3 Arcus vertebrae des ersten Kreuzwirbels; 4, 4' erster bzw. letzter Proc. spinosus; 6 Proc. articularis cranialis; 7 rudimentäre Procc. articulares; 8 Pars lateralis; 9 Crista sacralis lateralis; 10 Ala sacralis, 11 ihre Facies auricularis; 12, 12' linkes erstes bzw. letztes For. sacrale dorsale; 14, 14' erstes bzw. letztes Spatium interarcuale

Beim ersten Kreuzwirbel stehen die Kreuzbeinflügel, *Ala sacralis*, nach kranial lateral. Sie weisen an ihrer kranialen Seite große Gelenksflächen auf, welche zum Querfortsatz des letzten Lendenwirbels gerichtet sind (Abbildung 2-5). Während zwischen den Lumbalwirbeln die Hohlräume, *Spatia interarcualia*, sehr eng sind, ist der Spalt zwischen dem letzten Lenden- und dem ersten Kreuzwirbel, *Spatium*

interarcuale lumbosacrale, größer. Dieser Zwischenwirbelbereich ist als Injektions- bzw. Punktionsstelle des Wirbelkanals von großer Bedeutung.

Das Kreuzbein besitzt eine dreieckige Form und artikuliert auf beiden Seiten mit dem Darmbein. Es besitzt vier *Foramina sacralia dorsalia* durch die die Dorsaläste der Kreuznerven heraustreten. Die Beckenfläche ist der Länge nach konkav gewölbt, kranial verbreitert und kaudal schmal. Sie weist vier *Foramina sacralia ventralia* für den Durchtritt der Ventraläste der Kreuznerven auf [8].

2.5 Ursachen von Rückenproblemen

Zum besseren Verständnis soll noch eine kurze Übersicht über die verschiedenen Ursachen von Rückenproblemen bei Pferden gegeben werden.

Die Krankheitsursachen können in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden [9]:

- Weichteilverletzungen (Myopathien, Zerrungen)
- Knochenveränderungen (degenerative Erkrankungen, Frakturen, Entzündungen, Verformungen)

Von Weichteilverletzungen wird gesprochen wenn Muskelverletzungen (z.B. durch Untertrainiertheit oder insuffizientes Aufwärmen) oder Bänderzerrungen (z.B. durch Sturz oder Überschlag) auftreten. Hauptursache sind meist Myopathien des *M. longissimus dorsi* [10], [11] und/oder Weichteilschäden im supraspinalen Band des kaudalen Widerristes und der vorderen Lumbalregion. Ebenso schwerwiegend und regelmäßig anzutreffende Schäden zeigen sich an den interspinalen Bändern [12], welche zwischen den Dornfortsätzen korrespondieren. Aber auch chronische sacroiliacale Zerrungen können Rückenleiden verursachen [13]. Im kranialen Abschnitt der Lendenwirbelsäule sind Bänderzerrungen am häufigsten [14].

Die anderen Ursachen von Rückenproblemen lassen sich auf Veränderungen der knöchernen Anteile der Wirbelsäule zurückführen. So kommt es in vielen Fällen zu Berührungen und/oder Übereinandergreifen der Dornfortsätze, meist im hinteren

Bereich der Brust- und vorderen Bereich der Lendenwirbelsäule, also im Bereich der Sattellage. Diese knöcherne Veränderung wird als Kissing-Spine-Syndrom (KSS) (Abbildung 2-7) bezeichnet und kann in manchen Fällen so weit führen, dass es zur Gelenkbildung zwischen den Dornfortsatzenden kommt [15].

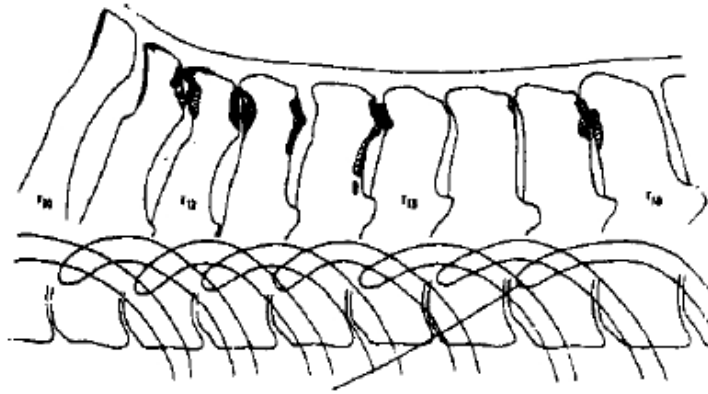


Abbildung 2-7 Kissing-Spine-Syndrom [13]

Frakturen der Wirbelkörper und/oder ihrer Fortsätze sowie Frakturen im Beckenbereich treten fast ausschließlich in Folge eines Traumas auf. Als weitere Ursache von Rückenproblemen zählen Verformungen der Wirbelsäule, wie die Seitwärtskrümmung (*Skoliose*), die ventrale Absenkung des Rückens (*Lordose*) oder die dorsale Aufkrümmung (*Kyphose*). Solche Veränderungen sind meist angeboren, in manchen Fällen kann ein Senkrücken aber auch erst bei älteren Pferden beobachtet werden [13].

3. Konstruktion der Wirbel

3.1 CT-Aufnahmen

Als Informationsgrundlage für die Konstruktion der Pferdewirbel mit einer CAD-Software kommen computertomografische Aufnahmen der Wirbelsäule zum Einsatz. Im Gegensatz zum klassischen Röntgenverfahren, wo das abzubildende Objekt von einer Röntgenquelle durchleuchtet und auf einem Röntgenfilm abgebildet wird, kreist bei der Computertomografie die Röntgenröhre um das betreffende Objekt. Auf diese Weise werden mehrere Bilder aus den unterschiedlichsten Richtungen erstellt, um so, mittels komplizierter computerunterstützter Rechengvorgänge, Schnittbilder erzeugen zu können. Aber auch 3D-Ansichten in beliebigen Ebenen können danach rekonstruiert werden. Zur Untersuchung eines beliebigen Objektes wird in der Praxis meist eine Serie von Schnittbildern angefertigt.

Die CT-Aufnahmen für die Konstruktion der Wirbel entstanden an der Klinik für bildgebende Diagnostik an der Veterinärmedizinischen Universität Wien im Juli 2007 unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Sibylle Kneissl. Die Wirbelsäule des zur Verfügung gestellten Pferdekadavers wurde durch zwei separate Serien von axialen Scans abgelichtet. In der ersten Aufnahmeserie wurde ausschließlich die Halswirbelsäule gescannt. Dafür wurde die Wirbelsäule hinter dem Schädel sowie zwischen dem letzten Hals- und dem ersten Brustwirbel durchtrennt. Da der Durchmesser der Röntgenröhre beschränkt ist, musste für die zweite Untersuchung der gesamte Restkadaver unterhalb der restlichen Wirbelsäule entfernt werden.

So entstanden jeweils im Abstand von 3mm 250 Schnittbilder der Halswirbelsäule und 506 Schnittbilder der restlichen Wirbelsäule. Alle Schnittbildaufnahmen wurden im *DICOM*-Format gespeichert.

Zur weiteren Bearbeitung am Computer kommt ein Programm namens *eFilm* der Firma *Merge Healthcare* zum Einsatz. Diese Software ist geeignet um die im *DICOM* (*Digital Imaging and Communications in Medicine*)-Format gespeicherten Bilddaten zu betrachten. *DICOM* ist weltweit ein Standard zum Austausch von digitalen Bildern in der Medizin.

Da bei dieser Diplomarbeit die CT-Aufnahmen der Halswirbelsäule nicht zum Einsatz kommen, wird ausschließlich mit dem Bildmaterial der zweiten Untersuchung gearbeitet. Neben den hintereinander abrufbaren axialen Schnittbildern (Abbildung 3-1) stehen noch zwei weitere Ansichten zur Verfügung, die die Position des jeweils aktuellen Schnittes in der Gesamtansicht verdeutlichen (Abbildung 3-2).

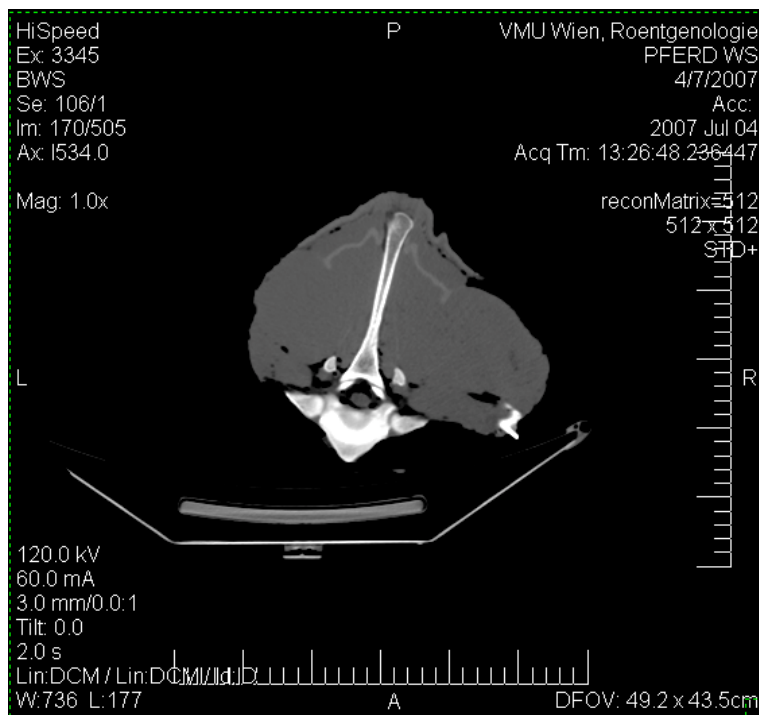


Abbildung 3-1 Schnittbild im eFilm

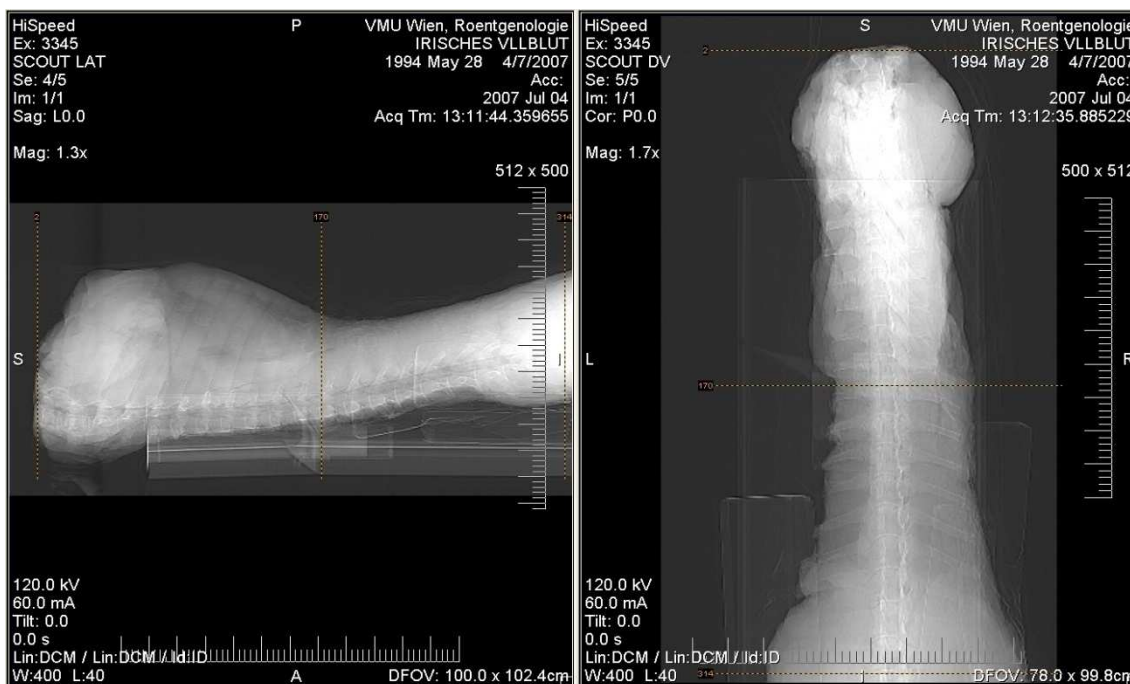


Abbildung 3-2 Seitenansicht (li.) und Ansicht von oben (re.) im eFilm

Wie in Abbildung 3-1 zu erkennen ist, werden verschiedene Gewebestrukturen als unterschiedliche Grauwerte dargestellt. Die einzelnen Bildpunkte werden als Voxel bezeichnet, die oben gezeigte Aufnahme hat eine Auflösung von 512 x 512 Bildpunkten. Je heller ein Voxel dargestellt ist, desto mehr Strahlung ist lokal absorbiert worden. Dies lässt auf hartes Gewebe, wie z.B. Knochen, schließen. Weiches Gewebe ist strahlendurchgängiger, absorbiert demnach weniger und wird dunkler dargestellt. Die Intensität der Graustufenanzeige kann im *eFilm* jederzeit manuell geändert werden. So lässt sich zum Beispiel nur mehr hartes Knochengewebe darstellen (siehe Kapitel 3.2), um später die Konturen des Wirbels leichter identifizieren und nachzeichnen zu können.

Wie schon früher angesprochen, ist es durch spezielle Rechenverfahren möglich auch dreidimensionale Modelle zu erstellen (Abbildung 3-3).

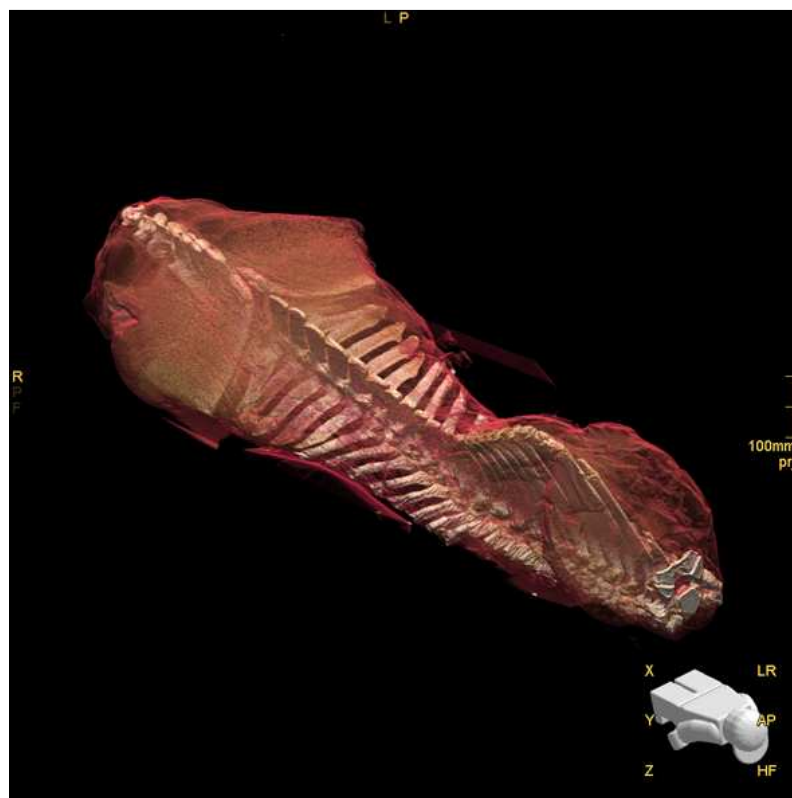


Abbildung 3-3 3D-Modell der Wirbelsäule ab T₁

Diese Ansicht in Abbildung 3-3 der zweiten CT-Aufnahme zeigt sehr detailliert die Pferdwirbelsäule vom ersten Brustwirbel (T₁) bis zum ersten Schwanzwirbel (Cy₁). Deutlich zu erkennen ist auch wo die Rippen, bis einschließlich die von T₁₈, durchtrennt wurden, um den unteren Teil des Rumpfes entfernen zu können. Dabei

musste darauf geachtet werden, dass die Querfortsätze der Lendenwirbel nicht beschädigt werden.

Die Ausrichtung der Wirbelsäule im Raum wird durch die Lage der Figur im Bild rechts unten beschrieben. Demnach beginnt das Modell rechts unten mit den kranialen Brustwirbeln und endet links oben, also kaudal, mit dem *Os sacrum* bzw. dem ersten *Vertebrae coccygeae*. Ebenfalls vorhanden sind die *Ossa coxarum*, die beiden großen Beckenknochen, welche Teile des Kreuzbeins sowie der letzten Lendenwirbel umschließen.

3.2 Erstellung der zweidimensionalen Konturen

Für die Erstellung und die Konstruktion der Skelettkonturen in der Ebene wurde ein 2D-Zeichenprogramm namens *CoCreate ME10 Release 10.50* aus dem Jahr 2001 gewählt. Mit diesem CAD-Programm ist es möglich Bilder im *.tiff* Format (*tagged image file format*, ein Dateiformat zur Speicherung von Bilddaten) zu importieren und weiter zu bearbeiten. Dieser Zwischenschritt ist notwendig, weil das Importieren der *.tiff*-Bilder im CAD-Programm *CATIA* (*Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application*), ein von der französischen Firma *Dassault Systèmes* entwickeltes Programm, welches für die weitere dreidimensionale Bearbeitung zum Einsatz kommt, nicht möglich ist.

Dabei muss allerdings beachtet werden, dass die Unix-Version von *ME10* das Importieren von *.tiff* Dateien bzw. von Bildern allgemein nicht unterstützt. Deswegen sollte für diesen Vorgang die Windows-Version eingesetzt werden [16].

Bevor nun die Bilder einzeln in *ME10* geladen werden um die Konturen des betrachteten Wirbels zu bestimmen und zeichnen zu können, ist eine Konvertierung des im *eFilm* verwendeten Dateiformats *DICOM*, siehe Kapitel 3.1, notwendig. Da es möglich war die Pferdewirbelsäule axial in nur zwei Scanserien abzubilden, nämlich 250 Bilder der Halswirbelsäule und 506 Bilder für die restliche Wirbelsäule, ist es von großem Vorteil, wenn die Konvertierung der *DICOM*-Bilder ins *.tiff*-Format mit denselben Einstellungen, in bezug auf Kontrast, Schärfe und Zoomfaktor, ausgeführt wird. Durch die manuelle Wahl einer geeigneten Lage der Wirbel im *eFilm*, sind die Positionsangaben in x- und y-Richtung somit automatisch für alle im *ME10* gezeichneten Konturen festgelegt. Diese Positionsangaben bleiben natürlich auch im *CATIA* erhalten, was das Aufbauen der *geschlossenen Splines* übereinander in der richtigen Position erst möglich macht.

Bei der Wahl des Kontrastes und der Schärfe der CT-Aufnahmen im *eFilm* ist es notwendig darauf zu achten, dass das umliegende Gewebe (Abbildung 3-4) so weit wie möglich „unsichtbar“ wird und nur noch die hellgrau aufleuchtenden Knochenstrukturen erkennbar sind. Dabei sollten sowohl das spongiöse wie auch das kompakte Knochengewebe sichtbar sein (Abbildung 3-5).

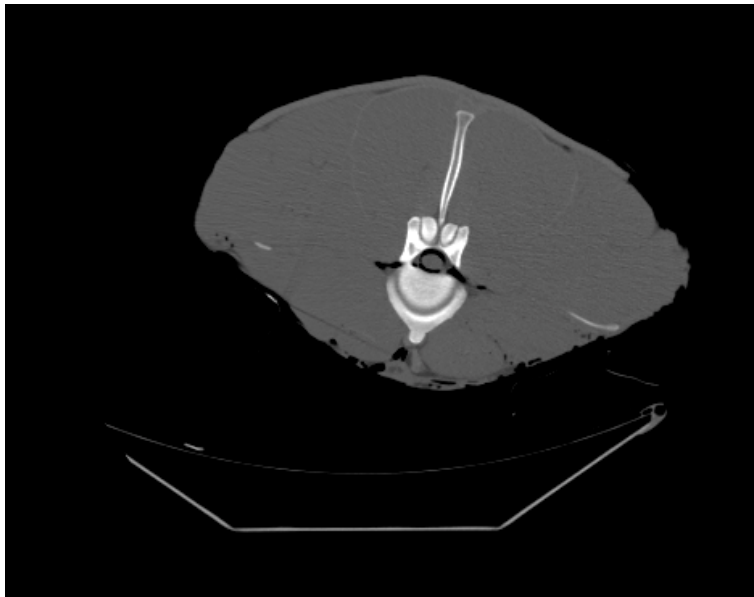


Abbildung 3-4 CT-Aufnahme im *eFilm* von Knochen & Gewebe

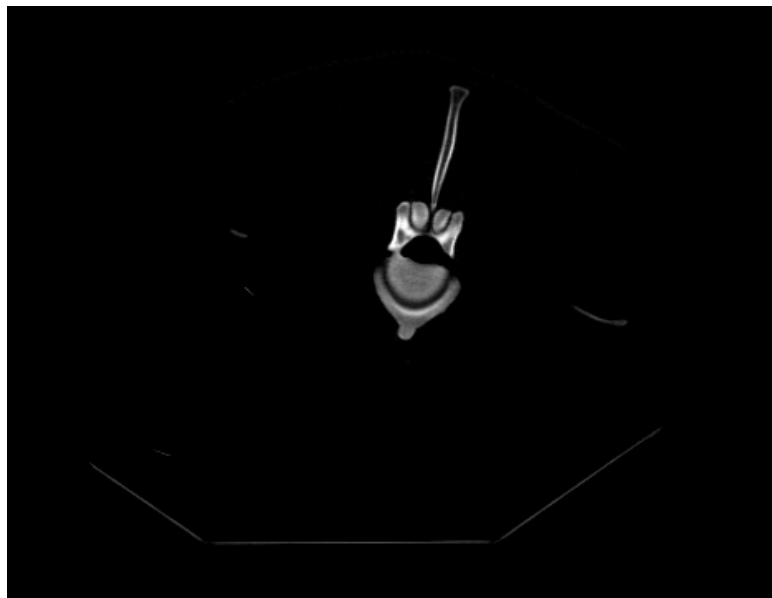


Abbildung 3-5 CT-Aufnahme im *eFilm* vom Knochen alleine

Bevor mit dem Nachzeichnen der Knochenkonturen im *ME10* begonnen werden kann, ist es ratsam die Zugehörigkeit der einzelnen Knochenstrukturen zu bestimmen. Um die Wirbel später im *CATIA* als einzelne dreidimensionale Modelle darstellen zu können, ist eine Gliederung der zugehörigen Knochenelemente bereits im *ME10* zu empfehlen, da die konstruierten *Splines* später in den vorgesehenen Ebenen zu Oberflächenkonturen geschlossen werden sollen.

Die genaue Definition der Strukturen erfolgt daher bereits im *eFilm* (Abbildung 3-6):

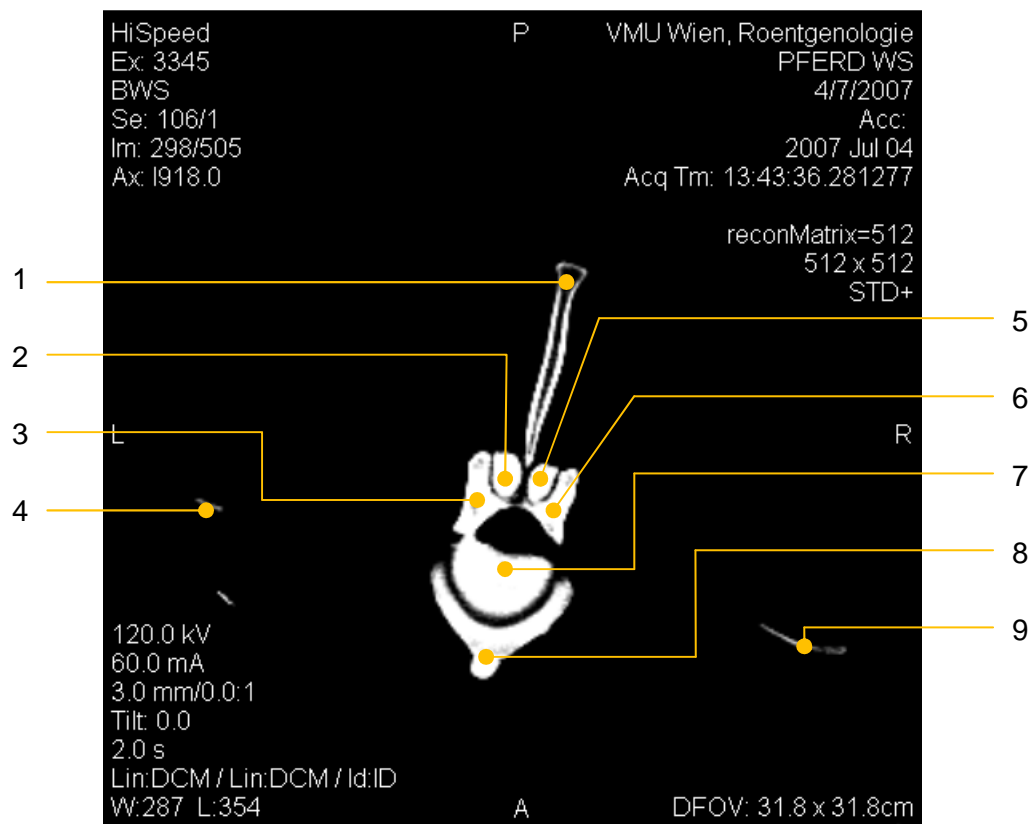


Abbildung 3-6 Definition der Knochenstruktur im *eFilm*

- 1 *Proc. spinosus* von L₂
- 2 linker *Proc. articularis caudalis* von L₁
- 3 linker Teil des Wirbelbogens von L₂ mit ausgeprägtem Höcker
(linker *Proc. articularis cranialis*)
- 4 erste Ansicht des linken *Proc. transversus* von L₂
- 5 rechter *Proc. articularis caudalis* von L₁
- 6 rechter Teil des Wirbelbogens von L₂ mit ausgeprägtem Höcker
(rechter *Proc. articularis cranialis*)
- 7 *Corpus vertebrae* von L₂ (bereits mit (3) verbunden)
- 8 ventraler Teil des Wirbelkörpers von L₁ mit deutlich erkennbarer *Crista ventralis*
- 9 vorletzte Ansicht des rechten *Proc. transversus* von L₁

Um sowohl die Lumbalwirbel als auch das *Os sacrum* aus denselben *DICOM*-Schnittbildern zeichnen zu können, ist auch die Wahl der Positionierung der Wirbelkörper vor der Konvertierung in das *.tiff*-Format entscheidend. Es wurde eine 2,5 fache Vergrößerung im *eFilm* gewählt um den zur Verfügung stehenden Bildausschnitt optimal nutzen zu können. Bei größerer Ausdehnung würden gegen Ende der Aufnahmen hin die Knochenkonturen nicht mehr im sichtbaren Bildausschnitt erscheinen, weil die Wirbelsäule gegen kaudal hin leicht gekrümmt ist.

Nach sorgfältiger Studie der Knochenstruktur lässt sich bei den vorliegenden CT-Schichtbildern folgende Einteilung nach Tabelle 1 treffen.

Tabelle 1: Einteilung der Wirbel in die betreffenden Schnittbilder

	Erste sichtbare Kontur in Aufnahme-Nr:	Letzte sichtbare Kontur in Aufnahme-Nr:
L ₁	268	301
L ₂	285	319
L ₃	304	336
L ₄	322	353
L ₅ & L ₆ ¹	337	388
S ₁ bis S ₅ ²	364	449

Sobald also der optimale Vergrößerungsfaktor gefunden ist und die benötigten Aufnahmen im *eFilm* zur Konvertierung markiert sind, können die *DICOM*-Bilder ins *.tiff*-Format mittels Befehl im Menü *File* → *Export* → *as Image(s)*... exportiert werden.

Beim Importieren eines Bildes in *ME10* wird zunächst nach einem Namen für das Rasterbild gefragt (z.B. '268'), anschließend kann die Position des Bildes eingegeben werden. Für jeden Scan sollte die gleiche Koordinate (idealerweise (0,0)) eingegeben werden, damit später bei der Erstellung des 3D-Modells die entsprechenden Konturen auf gleicher vertikaler Achse liegen.

¹ der 5. und 6. Lumbalwirbel sind bei dieser untersuchten Pferdewirbelsäule ineinander verwachsen.

² *Os sacrum*

Während der Konvertierung in das .tiff-Format wird das Rasterbild um einen konstanten Faktor vergrößert. Dieser Faktor muss durch Vergleichen der Abmessungen von ausgewählten Knochenstrukturen im *eFilm* mit denen im *ME10* bestimmt werden um die tatsächliche Abmessung bestimmen zu können.

Zur Ermittlung des konstanten Komprimierungsfaktors wurden an zwei beliebig gewählten Bildern im *eFilm* (Originalgröße) und parallel im *ME10* (vergrößert) folgende Abstände gemessen:

(1) Bild 293: Abstand der Enden der *Procc. transversi* von L₁:

im *eFilm*: 268mm

im *ME10*: 10831,68mm

$$1. \text{ Maßstab: } \frac{268}{10831,68} = \frac{1}{40,4167}$$

(2) Bild 340: Abstand der Spitze von *Proc. spinosus* zur *Crista ventralis* bei L₄:

im *eFilm*: 138mm

im *ME10*: 5624,09mm

$$2. \text{ Maßstab: } \frac{138}{5624,09} = \frac{1}{40,7543}$$

$$\text{aus (1) \& (2) gemittelter Maßstab: } \frac{1}{40,5855}$$

Mit diesem gemittelten Maßstab können nun im *ME10* mit Hilfe des *PIXMAP_EDITORS* und der Funktion *EDIT_PIXMAP* die betreffenden Scans einzeln in die richtige Größe gebracht werden. Dabei wird mit der Editieroption *SCALE* die Geometrie über den frei wählbaren „Scalemittelpunkt“ (z.B. (0,0)) mit dem Skalierungsfaktor in x-Richtung und y-Richtung mit 1/40,5855 verkleinert.

Sobald das Rasterbild im *ME10* im korrekten Maßstab angezeigt wird, kann mit dem Zeichnen der Konturen begonnen werden. Dabei bedient man sich der Funktion *geschlossene Splines* im Menü *Geometrie*.

Die gezeichneten Konturen werden anschließend als *.igs* (*Initial Graphics Exchange Format*) gespeichert um nachher die Zeichnungen im *CATIA* laden zu können.

Als Beispiel sollen dabei die Konturen für L_2 des Schnittbildes Nr. 298, wie schon in Abbildung 3-6 dargestellt, gezeigt werden (Abbildung 3-7).

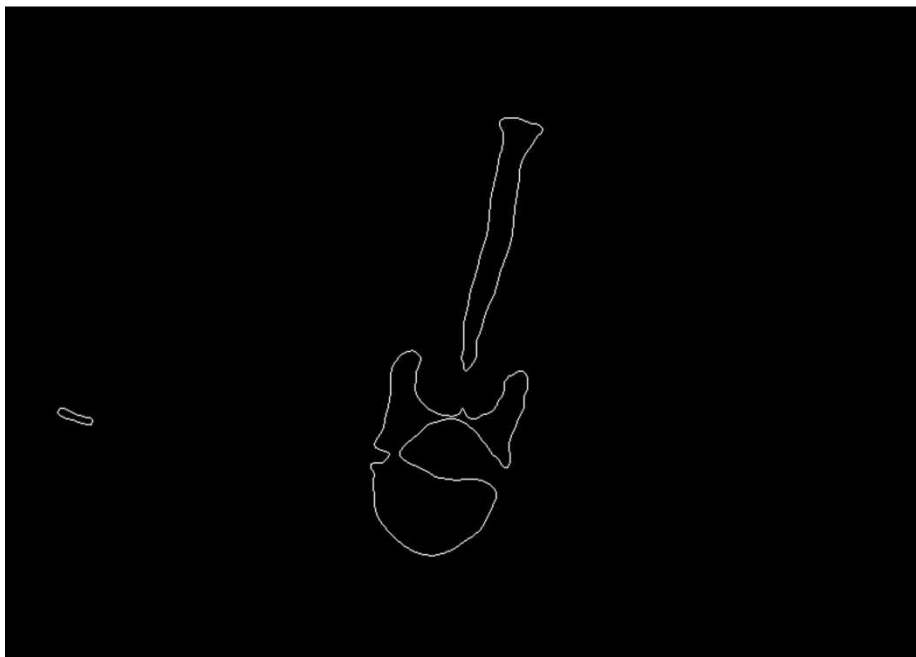


Abbildung 3-7 Konturen durch geschlossene Splines im *ME10*

Beim Sichern der Zeichnungen im *.igs*-Format geht das nicht mehr benötigte Rasterbild im Hintergrund verloren.

3.3 Erstellung der dreidimensionalen Wirbel

Für die 3D-Erstellung der einzelnen Wirbel wurde, wie schon in Kapitel 3.2 erwähnt, das CAD-Programm *CATIA V5R16* gewählt.

Die Beschreibung zur Konstruktion der Wirbelmodelle wird in folgende Schritte unterteilt:

- *Wireframe- & Surface Design:* Erstellung der Oberflächenkontur
- *Part Design:* Füllen der Umhüllungen & Entstehung eines Volumenkörpers
- *Assembly Design:* Zusammenbau der einzelnen Wirbel & Kollisionskontrolle

3.3.1 Wireframe- & Surface Design Modus

Zu Beginn wird im *CATIA* ein neues *Part*-Fenster geöffnet, welches als grundlegende Arbeitsoberfläche für die einzeln einzufügenden Wirbelkonturen dienen soll. Die im *ME10* abgespeicherten *.igs*-Files werden nun im *CATIA* geöffnet, die gewünschten Konturen markiert und einzeln ins *Part*-Fenster kopiert. Dabei ist zu beachten, dass alle Splines die gleiche z-Koordinate³ aufweisen, nämlich $z = 0$. Daher muss jede neueingefügte Kontur um einen, dem Schnittbildes zugehörigen, Abstand verschoben werden. Wenn also beispielsweise mit der Konstruktion von L_1 begonnen wird, ist laut Tabelle 1 die Aufnahme mit der Nummer 268 die erste Kontur. Sie dient als Basisebene. Die Aufnahme Nummer 269 muss demnach um $z = 3\text{mm}$ versetzt eingefügt werden, Nummer 270 um $z = 6\text{mm}$ usw...

³ die Ausrichtung nach z entspricht der axialen Achse der Wirbelsäule

Dieser Kopier- und Verschiebevorgang wird so lange ausgeführt bis alle geschlossenen Splines im *Part*-Fenster an ihrem Platz sind. Das fertige „Wirbelskelett“ (Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9) lässt bereits die zukünftige dreidimensionale Oberflächenkontur erahnen.

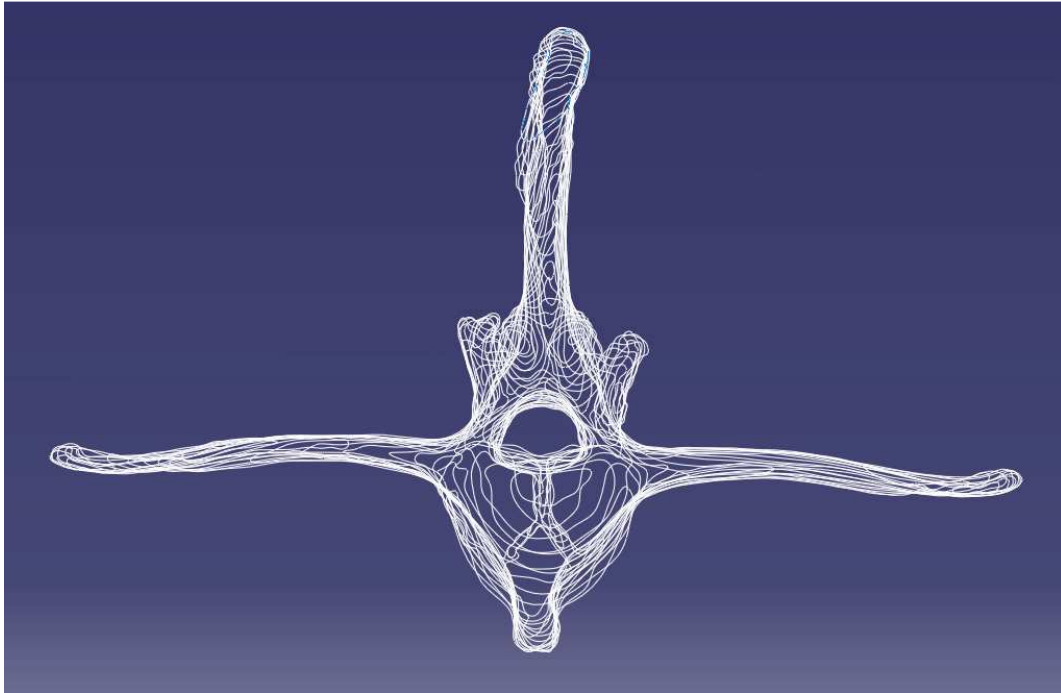


Abbildung 3-8 Wirbelskelett von L₁ von vorne

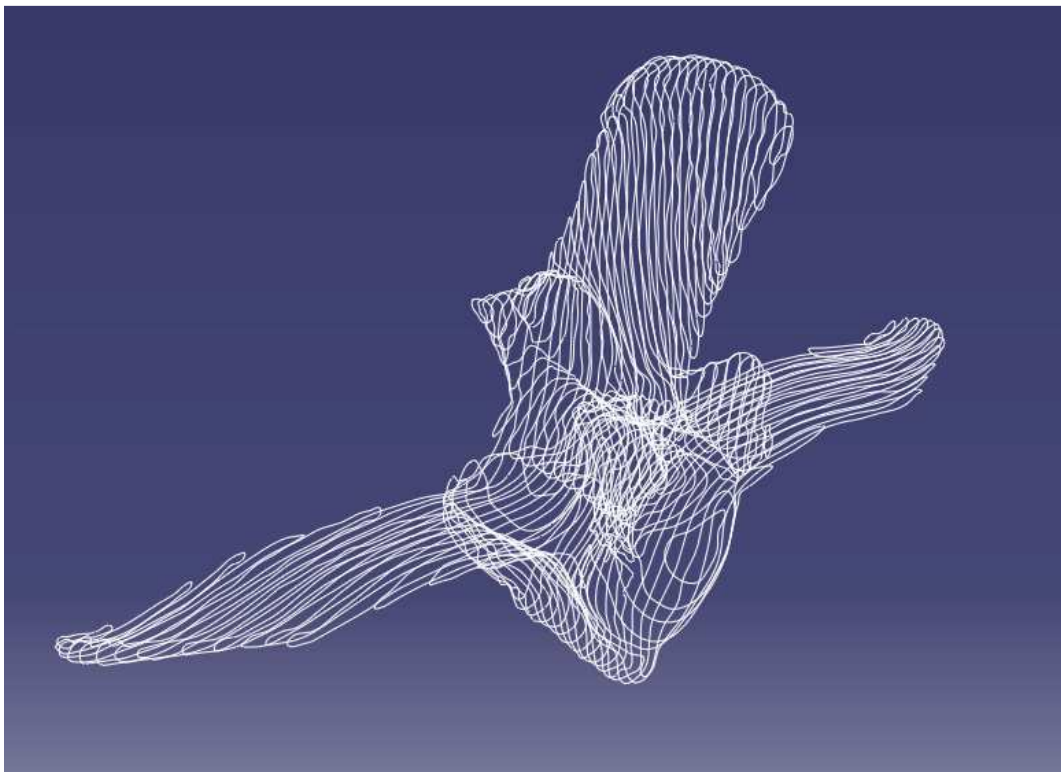


Abbildung 3-9 Wirbelskelett von L₁ von der Seite schräg oben

Für das Erstellen der Oberflächenkontur wird die Option *Fläche mit Mehrfachsnitten* benutzt. Wenn sich die benachbarten Splines nicht allzu sehr unterscheiden, können mehrere Ebenen bzw. Konturen gleichzeitig bearbeitet werden. Es ist zu beachten, dass die Richtungspfeile (rot) aller Konturen in die gleiche Richtung zeigen (Abbildung 3-10).

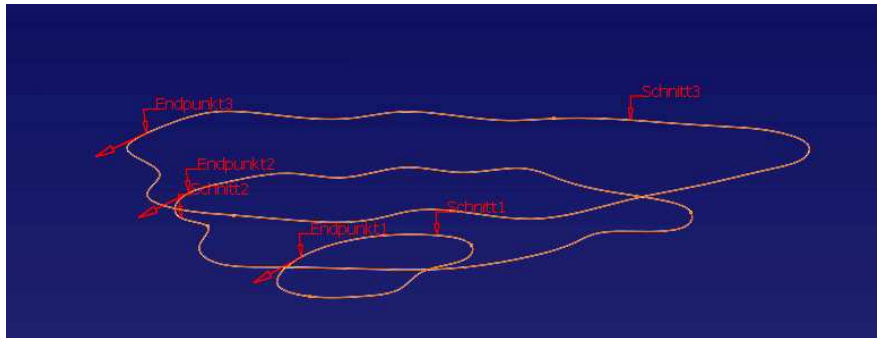


Abbildung 3-10 Definition einer Fläche mit Mehrfachschnitt

Dabei werden die ausgewählten Splines mit einem „Mantel“ umschlossen (Abbildung 3-11).

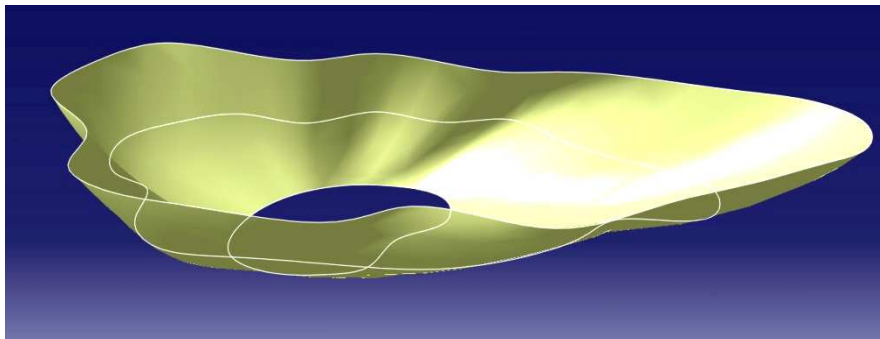


Abbildung 3-11 Fläche mit Mehrfachschnitt

Sobald sich aber die benachbarten Konturen, zum Beispiel in ihren Umfängen, zu stark voneinander unterscheiden, kann es passieren, dass entweder gravierende Oberflächenunebenheiten die Konstruktion unbrauchbar machen oder eine Erstellung der Oberfläche erst gar nicht möglich ist (Abbildung 3-12). Um dem entgegenzuwirken ist es notwendig zwischen den Splines Führungselemente zu definieren, welche CATIA zur Oberflächenerstellung als Orientierungshilfe verwenden kann. Unter Führungselementen versteht man Hilfsgerade, die

freidefinierbare Punkte an den beiden übereinanderliegenden Splines verbinden (Abbildung 3-13). Diese Punkte werden idealerweise an Stellen platziert deren Position in beiden Ebenen eindeutig zu bestimmen sind, beispielsweise die Kante am Ende des *Proc. spinosus*, die Enden der *Procc. transversi* oder der unterste Rand der *Crista ventralis*.

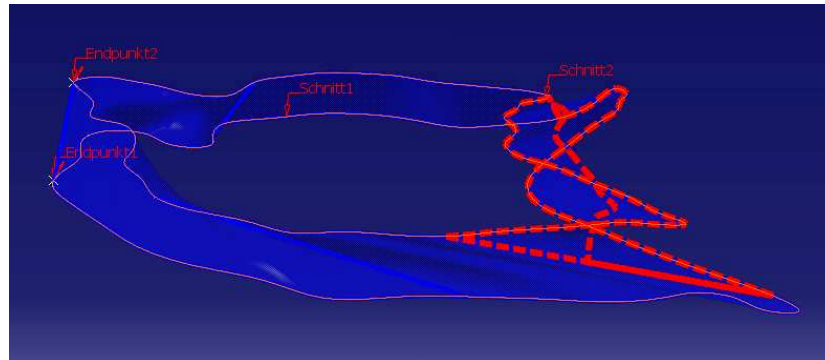


Abbildung 3-12 Fehler bei Flächenkonstruktion

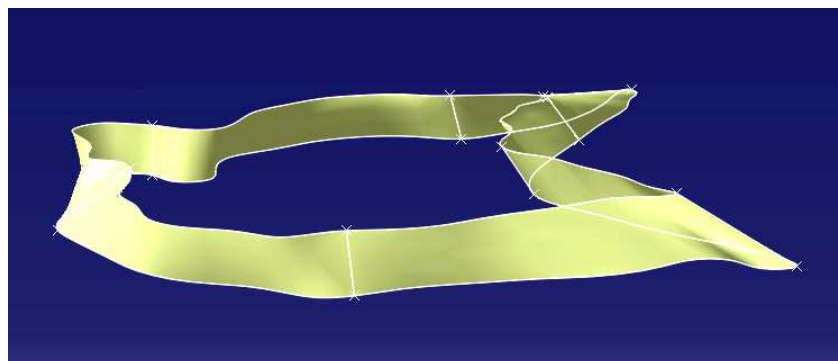


Abbildung 3-13 Fehlerbehebung mit Führungselementen

An manchen Stellen am Wirbelknochen sind übereinanderliegende Splines derart verschieden, dass eine herkömmliche Umhüllung, wie oben beschrieben, gar nicht möglich ist. Dieser Fall tritt z.B. am oberen Wirbelbogen auf, wo sich die Kontur in zwei Gelenksfortsätze auftrennt. Die Auftrennung in zwei unterschiedliche Oberflächenkonturen kann nur durch das Einfügen einer oder mehrerer Hilfssplines, in Abbildung 3-14 als orangene Splines dargestellt, gelöst werden. Dabei sollte die Zusatzkontur in der eingefügten Ebene perfekt mit der Kontur der Originalebene übereinstimmen, abgesehen natürlich von den freigewählten aber notwendigen

Hilfssplines in der Mitte, um überstehende Kanten durch unterschiedliche Splines in der selben Ebene zu verhindern.

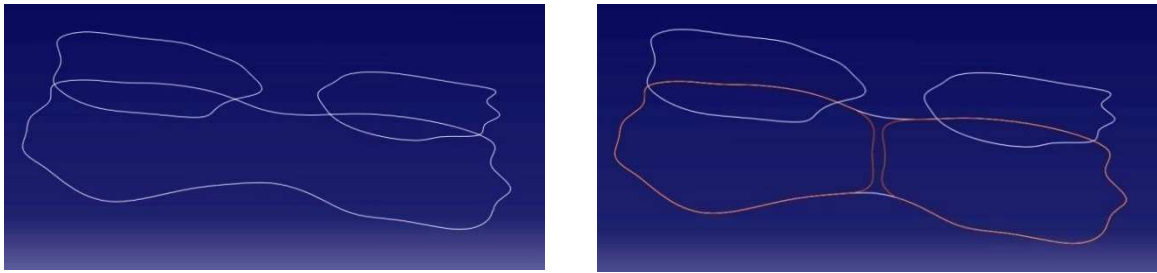


Abbildung 3-14 Einfügen von Zusatzsplines bei abzweigenden Konturen

Die beiden Querverbindungen rechts in Abbildung 3-14 sind selbstverständlich frei gewählt und entsprechen nicht den korrekten Trennungslinien am realen Wirbel. Die Aufteilung in die beiden Gelenksfortsätze liegt klarerweise im 3mm-Bereich zwischen den einzelnen Aufnahmen. Da aber keine Informationen über die Oberflächenbeschaffenheit zwischen den einzelnen Scans vorliegen, bedient man sich hier einer Behelfslösung und nimmt einen angenäherten Verlauf an. Da das Umhüllen von übereinander liegenden Splines ohnehin immer nur eine fiktive Annäherung an die tatsächliche Oberfläche darstellt, wird die Abweichung der freigewählten Trennung von der realen hier als vernachlässigbar angesehen.

Ein Schließen der Boden- oder Deckflächen ist grundsätzlich in keiner Ebene notwendig, da im nächsten Arbeitsschritt, wie in Abschnitt 3.3.2 genauer erklärt, das Volumen zwischen den *Flächen mit Mehrfachschnitten* geschlossen wird.

3.3.2 Part Design Modus

Sobald der gesamte Wirbel mit einzelnen Oberflächen umhüllt ist, kann mit der Konstruktion eines einheitlichen Volumenkörpers begonnen werden. Dafür muss im *CATIA* in den *Part Design* Modus gewechselt werden. Hier kann mit dem Befehl *Fläche schließen*, welcher im Menü *Auf Flächen basierende Komponenten* zu finden ist, die im *Wireframe & Surface Design* gezeichneten Oberflächenkonturen gefüllt werden. Alle Operationen werden nur am aktiven Körper (im *CATIA* weiß

unterstrichen) ausgeführt. So werden alle einzelnen *Geometrischen Sets* nach und nach in den Hauptkörper integriert.

In manchen Fällen muss bei den gefüllten Volumina wieder ein Teil entfernt werden, z.B. wie in Abbildung 3-15 ersichtlich beim Freischneiden des in orangener Farbe markierten Wirbellochs. Verwendet wird dafür der Befehl *Entfernter Volumenkörper mit Mehrfachsnitten* aus dem Menü *Auf Skizzen basierende Komponenten*. Dabei wird durch Verbindung von zwei oder mehreren 2D-Profilen ein Abzugskörper erzeugt.

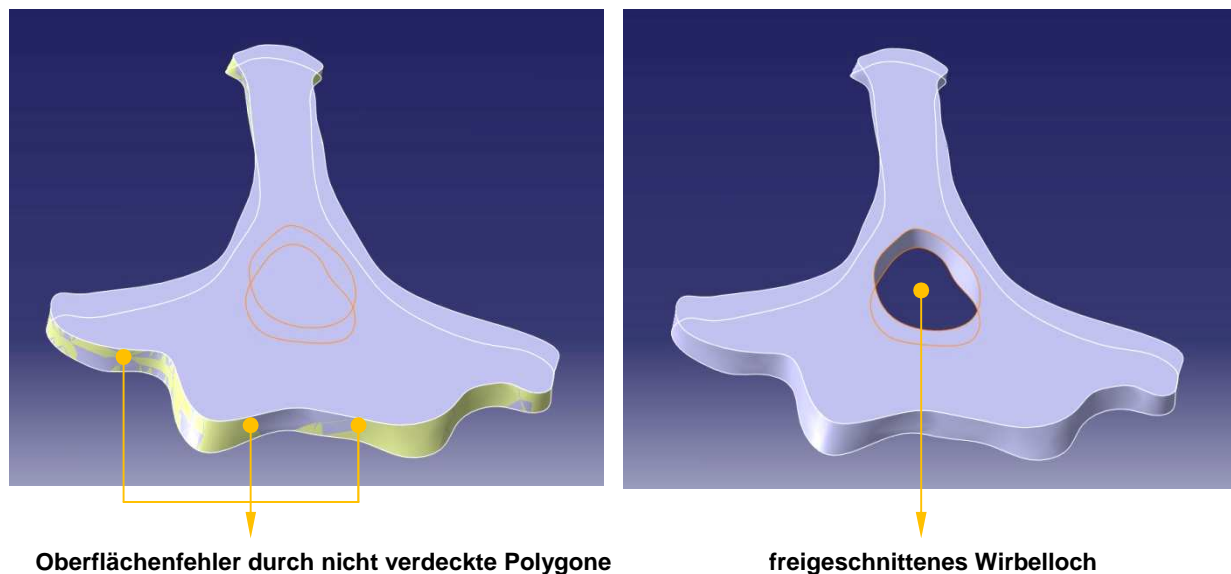


Abbildung 3-15 Teilentfernung aus einem Volumenkörper

Ein weiterer wichtiger Arbeitsschritt ist, nach dem Füllen des Körpers, das Verdecken der *Flächen mit Mehrfachsnitten*, da es sonst, wie in Abbildung 3-15 links zu erkennen, zu Grafikfehlern an den Rändern kommt.

Wenn alle Flächen geschlossen sind und der Wirbel fertig konstruiert ist, kann das File, für die weitere Verwendung außerhalb von *CATIA*, als *.stp*-Datei gespeichert werden. Das „*Standard for the Exchange of Product model data*“-Format eignet sich gut für den Datenaustausch zwischen verschiedenen Systemen. Die *.stp*-Files werden in ein Konvertierungsprogramm, z.B. in *Polytrans*, geladen, die Oberfläche geglättet und als *.dxf*-Format gespeichert, bevor es anschließend im *Simm 4.0* (*Software für Interactive Musculoskeletal Modeling*) weiter verwendet werden kann.

3.3.3 Assembly Design Modus

Im *Assembly Design* können alle konstruierten Wirbel in eine Arbeitsoberfläche geladen und so die Wirbelsäule „nachgebaut“ werden. Dieser Schritt dient im Prinzip nur mehr der Kontrolle, um mögliche Kollisionen durch das Aneinanderreihen der Wirbelknochen in ihren im *eFilm* eindeutig definierten z-Koordinaten zu erkennen, und, wenn benötigt, 3D-Schnitte in beliebiger Ausrichtung zu erstellen.

Die Lagepositionen der einzelnen Wirbel zueinander werden durch *Bedingungen* definiert. Es wird nur die relative Lage der Teile zueinander festgelegt, während die Beziehung der Teile zu ihrem Ursprungskoordinatensystem erhalten bleibt. Da in diesem Fall alle Konturen dieselbe Achsausrichtung und dasselbe Koordinatensystem haben, sind beim Einfügen der Wirbel ihre Ausrichtungen im Raum identisch. Eine Änderung der Position, auch *Manipulation* genannt, ist demnach nur entlang der z-Achse auszuführen.

Es ist hilfreich, wenn der erste geladene Wirbel durch die Bedingung *Komponente fixieren* im Raum verankert wird, in Abbildung 3-16 am Ankersymbol erkennbar, und somit zum Bezugs- bzw. Referenzkörper für alle weiteren Wirbelkörper wird.

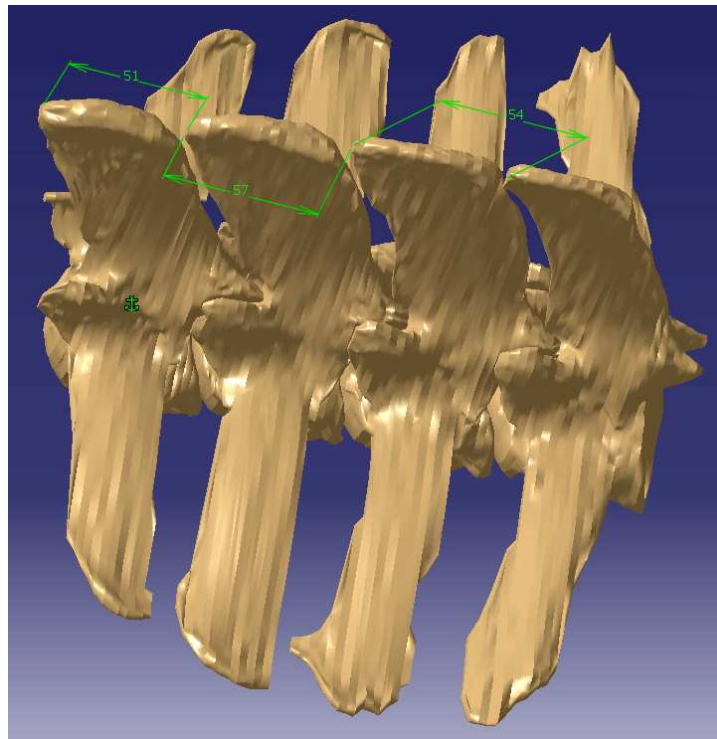


Abbildung 3-16 Bedingungen im Assembly Design L₁ bis L₄

Die genau definierten Abstände zwischen den einzelnen Wirbeln können mit der *Offsetbedingung* erstellt werden. Dabei nehmen zwei verschiedene Elemente (Punkt, Linie, Fläche,...) einen frei wählbaren Abstand nach Wahl der Ausrichtung zueinander ein. Die korrekt vergebene *Offsetbedingung* wird durch ein Maß im Modell, in Abbildung 3-16 als grüne Bemaßung, angezeigt.

Mit der Funktion *Schnitte* können einfach und schnell beliebige Schnitte im Raum durch ein oder mehrere Wirbel gelegt werden. Zusätzlich können, bei den korrekten Einstellungen, auch Überschneidungen angezeigt werden, die in der Schnittvorschau sofort durch Anzeigen eines roten Kreises gemeldet werden.

4. Resultate

In diesem Kapitel werden alle dreidimensionalen Wirbelmodelle vorgestellt und eventuelle anatomische Besonderheiten kurz dokumentiert.

4.1 Lendenwirbelmodelle

In Abbildung 4-1 ist der erste Lumbalwirbel in der Vorderansicht abgebildet. Gut zu erkennen ist neben den großen Fortsätzen die deutlich ausgeprägte *Crista ventralis* und der dicke Kamm am Ende des *Proc. spinosus*. Auch das *Foramen vertebrae* ist gut sichtbar.

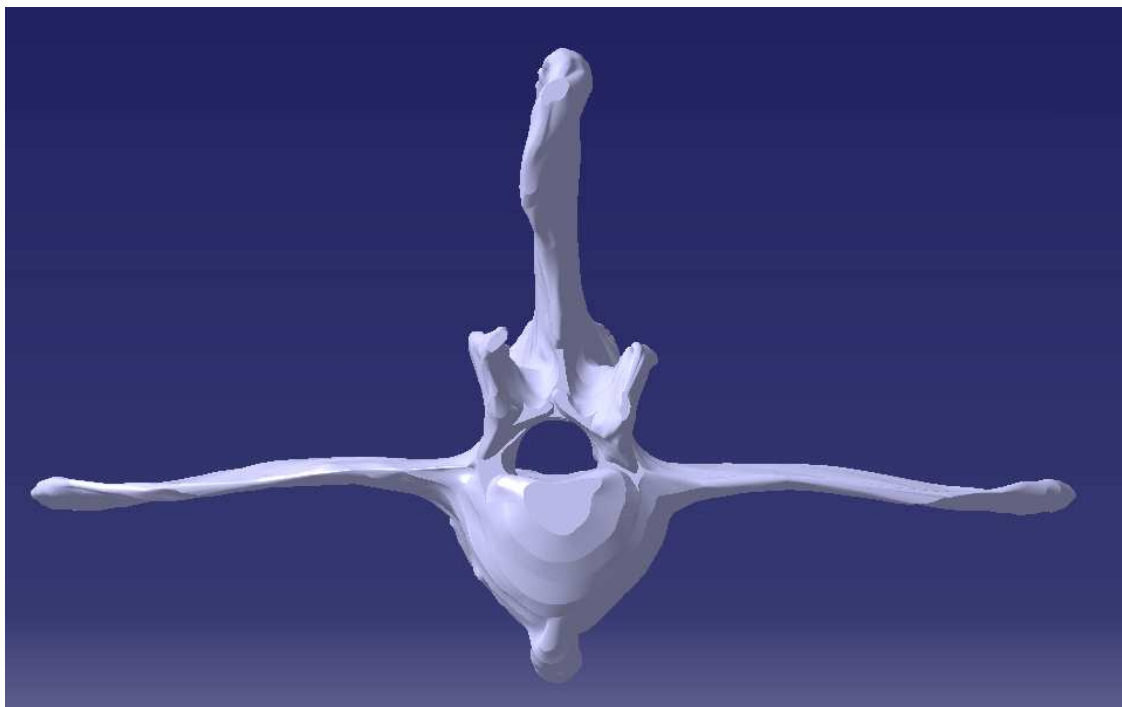


Abbildung 4-1 Vorderansicht L₁

In Abbildung 4-2 ist L₁ links von lateral zu sehen, rechts von schräg oben. Durch den geringen Abstand von nur 3mm zwischen den Aufnahmen, ist die Oberfläche des modellierten Wirbels sehr detailgetreu.

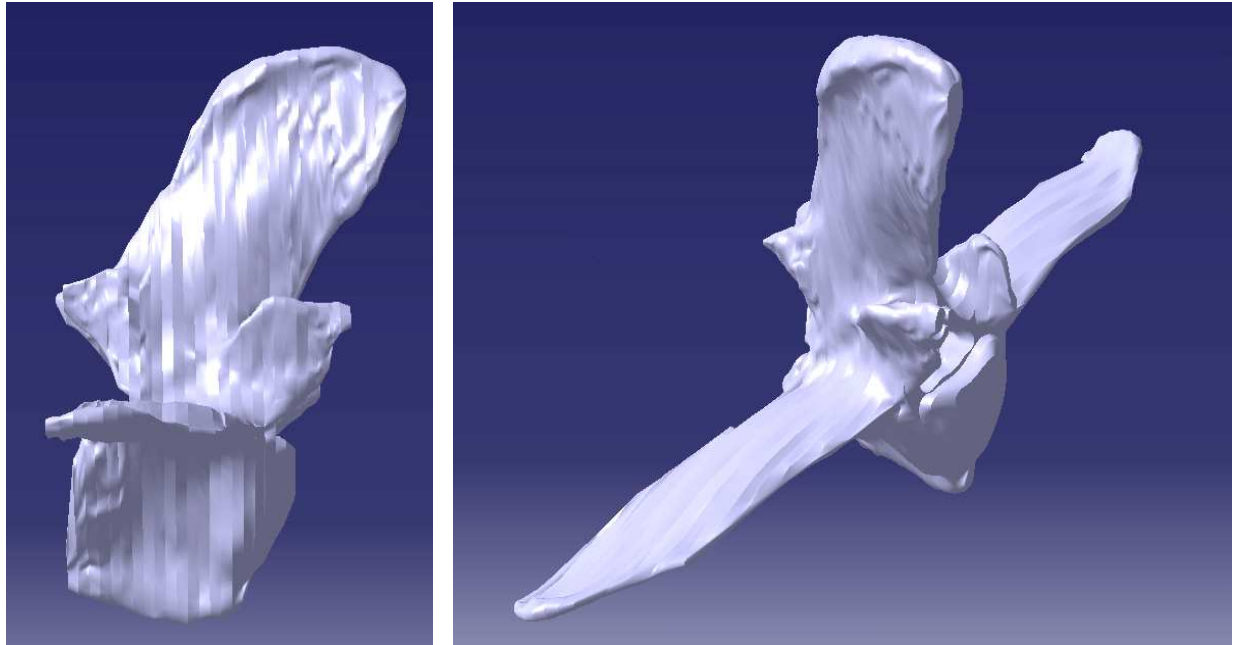


Abbildung 4-2 Seiten- und Schrägansicht L₁

Abbildung 4-3 zeigt den zweiten Lendenwirbel. Die beiden Querfortsätze zeigen weiter nach lateral als beim ersten Lumbalwirbel.

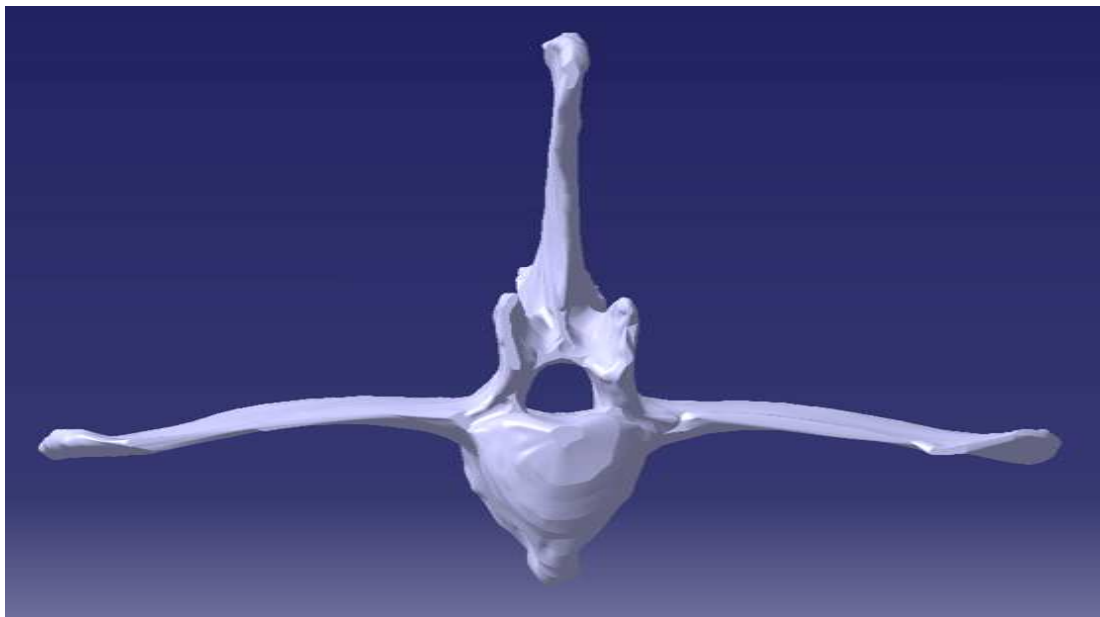


Abbildung 4-3 Vorderansicht L₂

In Abbildung 4-4 wird L_2 von der Seite und schräg oben gezeigt. Wie auch schon in Abbildung 4-2 zu sehen sind sogar die kranialen und kaudalen Wirbelbogeneinkerbungen deutlich erkennbar.

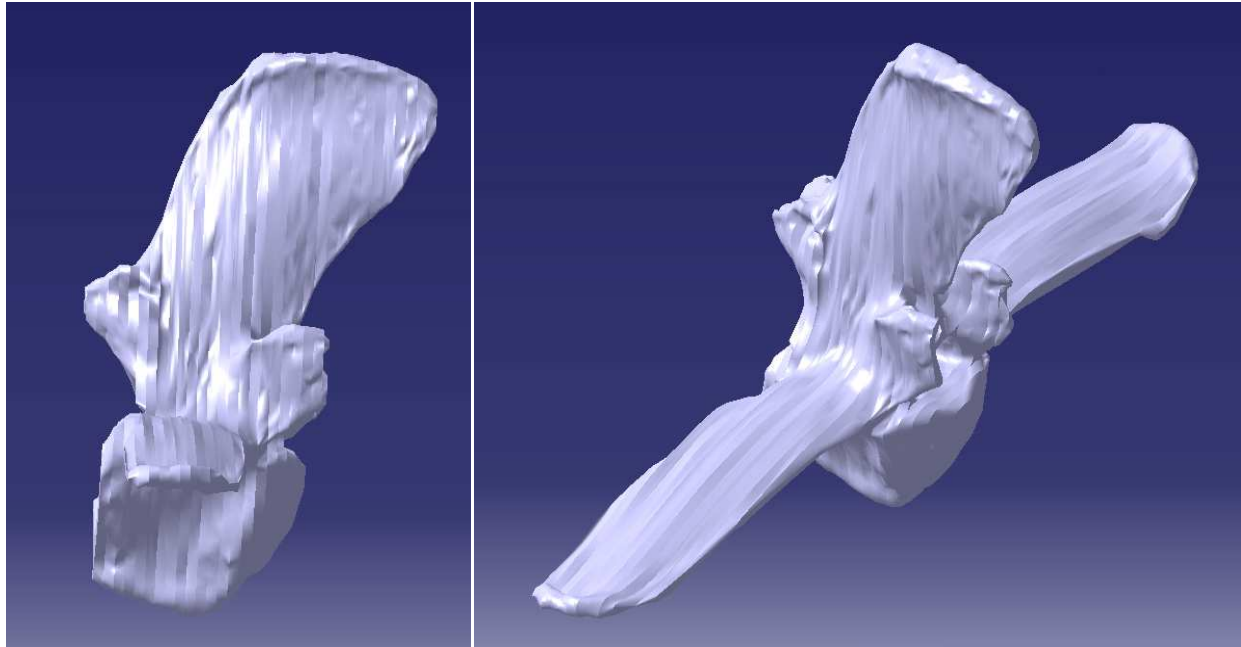


Abbildung 4-4 Seiten- und Schrägansicht L_2

In Abbildung 4-5 sind in der Vorderansicht von L_3 keine nennenswerten Abweichungen gegenüber L_2 oder L_1 ersichtlich.

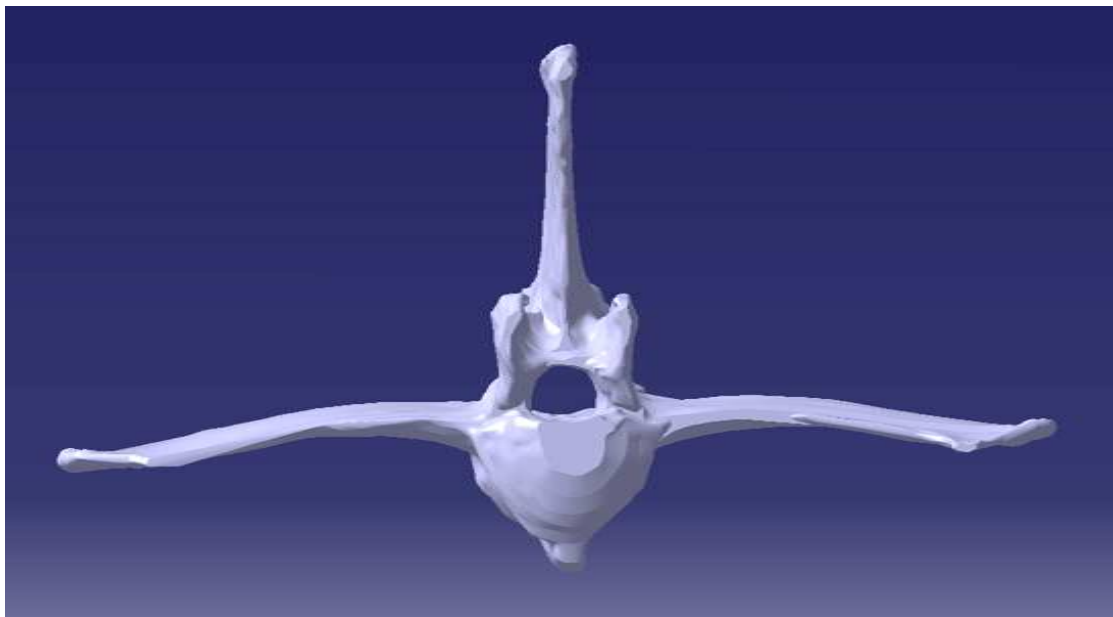


Abbildung 4-5 Vorderansicht L_3

In Abbildung 4-6 ist in der Ansicht von schräg oben auf L₃ am rechten Ende des *Proc. transversus* eine ungewöhnliche Knochenkontur in kraniale Richtung zu erkennen.

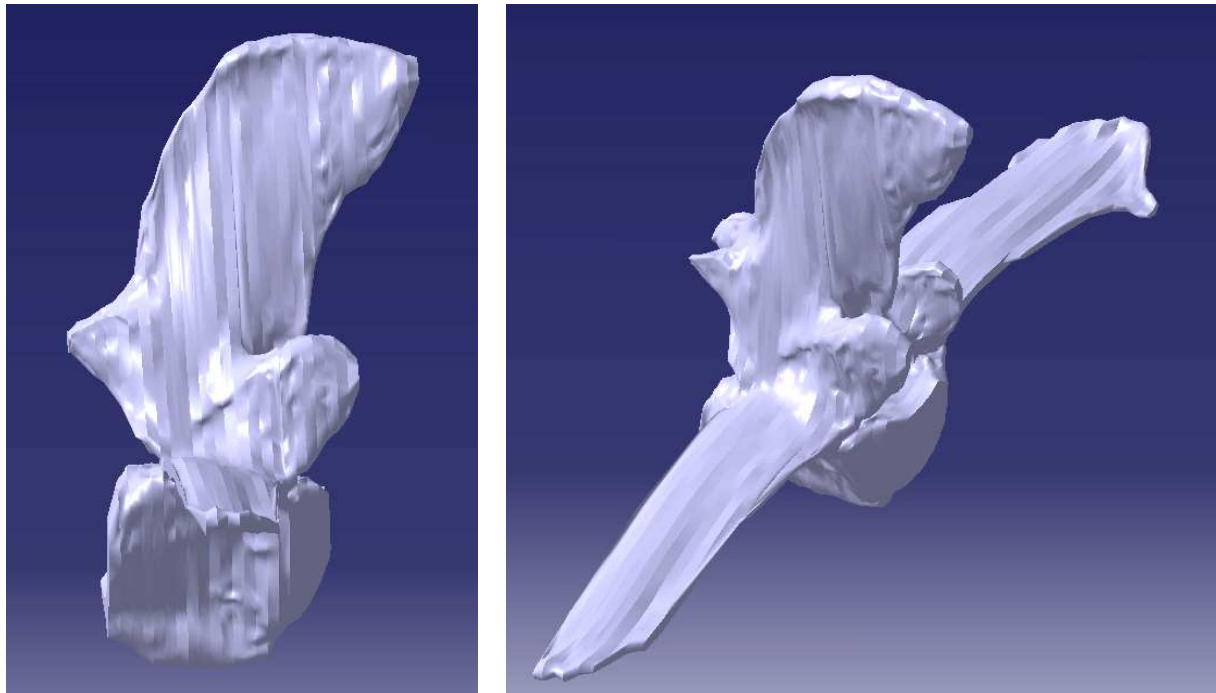


Abbildung 4-6 Seiten- und Schrägansicht L₃

Abbildung 4-7 zeigt L₄ von vorne. Auffällig dabei ist der von kranial links gelegene Querfortsatz mit seinem scharfen kantigen Ende.

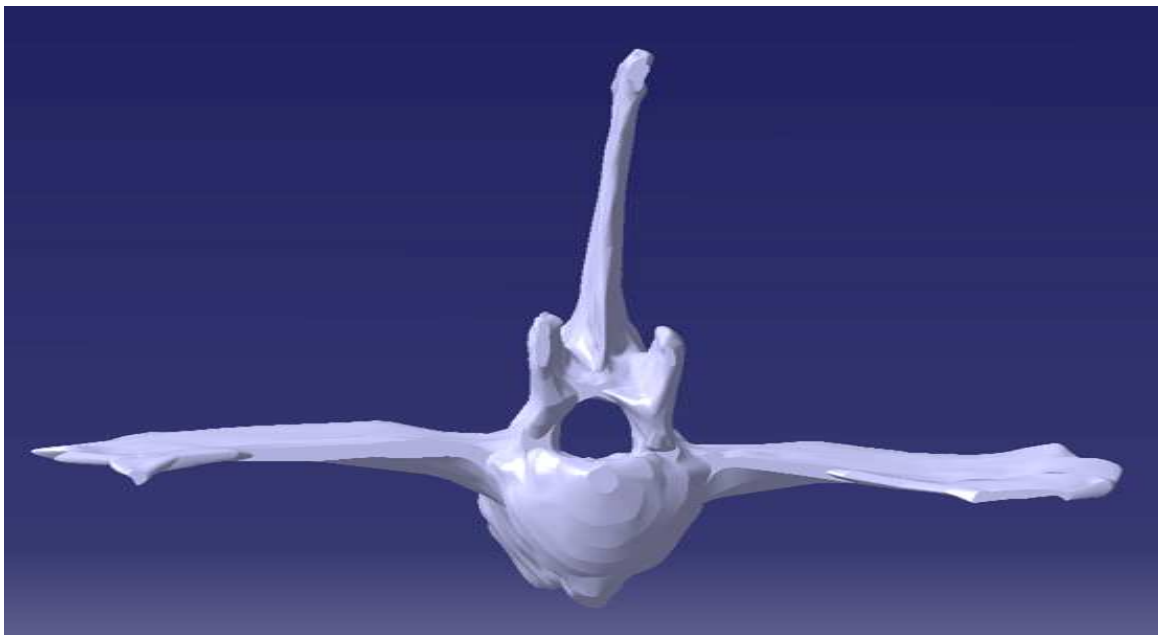


Abbildung 4-7 Vorderansicht L₄

Auch in Abbildung 4-8 ist in der Ansicht von schräg oben ein kleiner knöcherner Zuwachs am „unteren“ Querfortsatz zu erkennen.

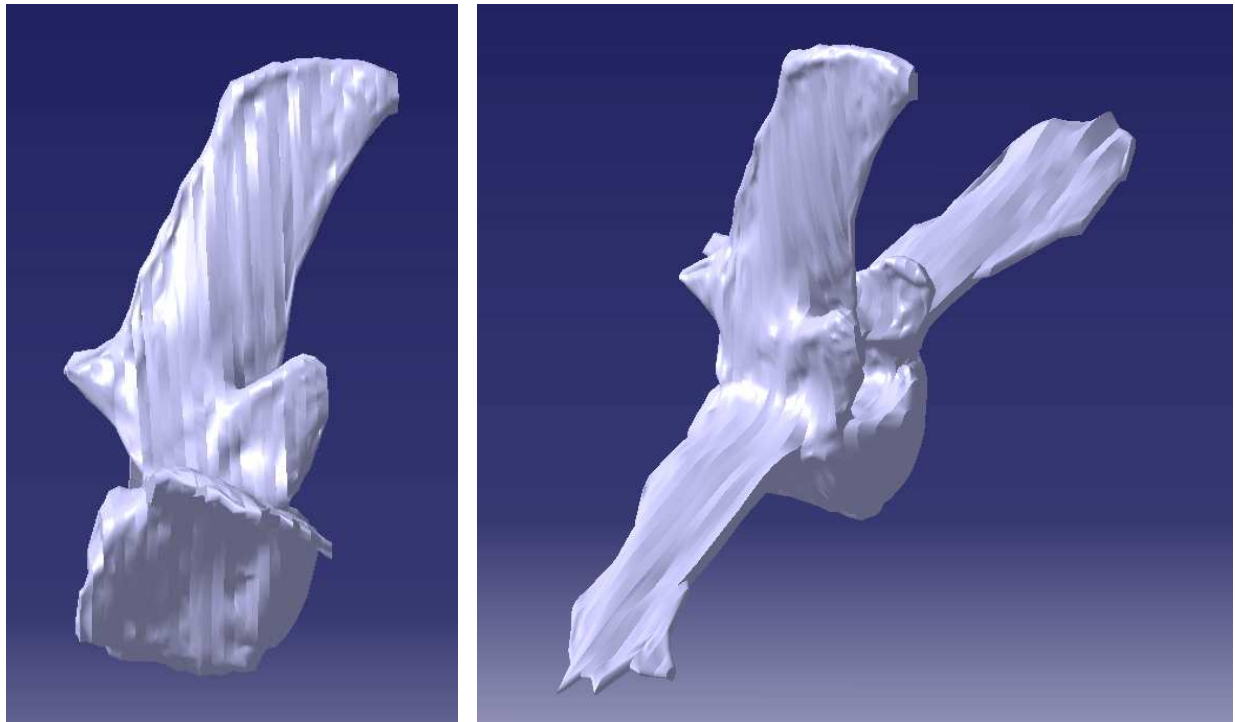


Abbildung 4-8 Seiten- und Schrägansicht L₄

In Abbildung 4-9 sind die verwachsenen beiden letzten Lendenwirbel von vorne abgebildet. Die Querfortsätze sind bereits deutlich kürzer und kaudal durch die Intertransversalgelenke wesentlich dicker. Die *Crista ventralis* ist ab L₅ nicht mehr vorhanden.

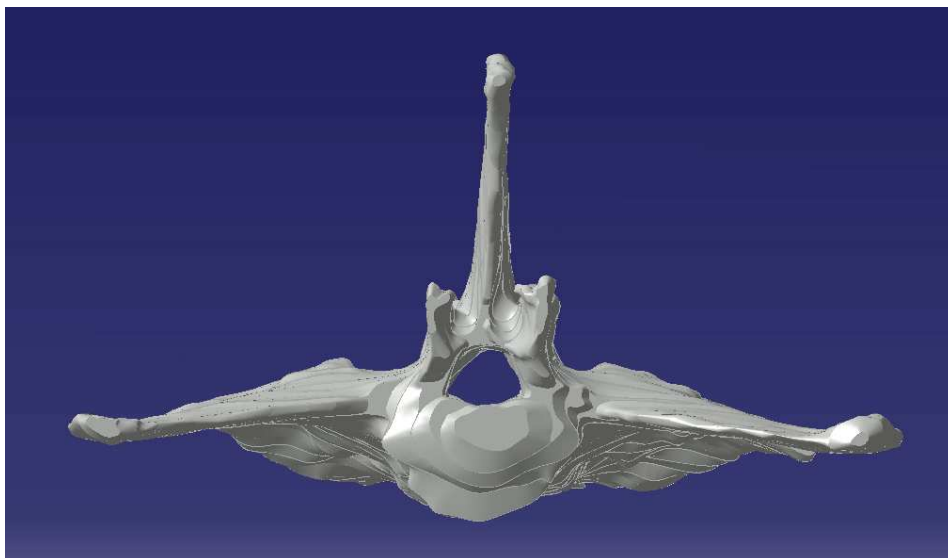


Abbildung 4-9 Vorderansicht verwachsene L₅ & L₆

Abbildung 4-10 zeigt die verwachsenen Lumbalwirbel L₅ und L₆ von schräg oben.

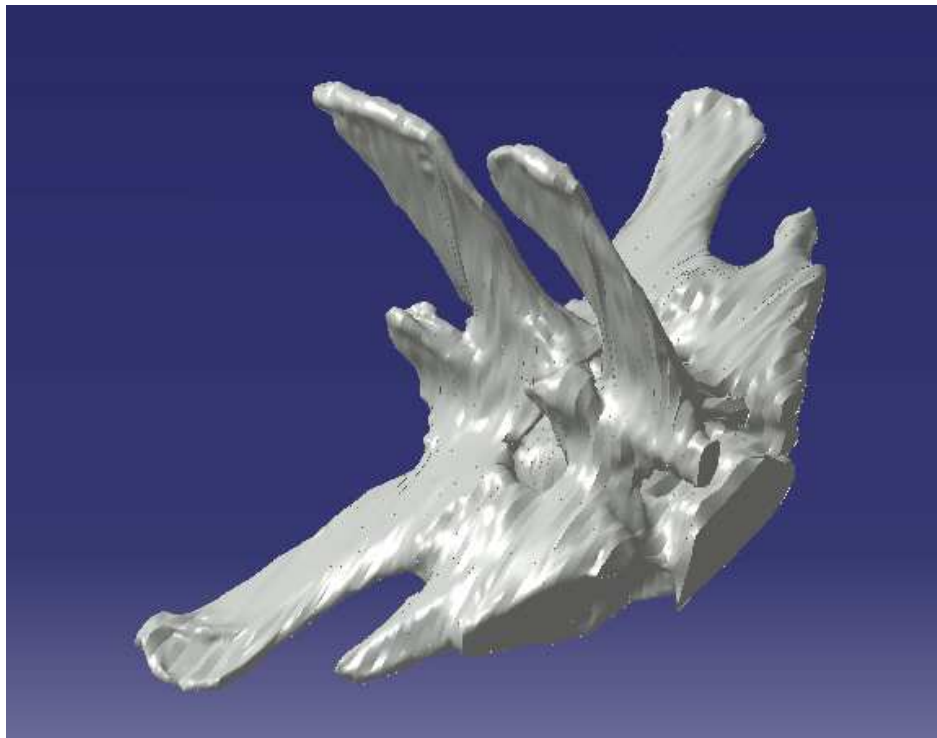


Abbildung 4-10 Schrägansicht L₅ & L₆

Diese wurden manuell durch Zeichnen eigens angepasster Splines im *ME10* getrennt und im *CATIA* zu zwei eigenständigen Wirbeln geformt (Abbildung 4-11).

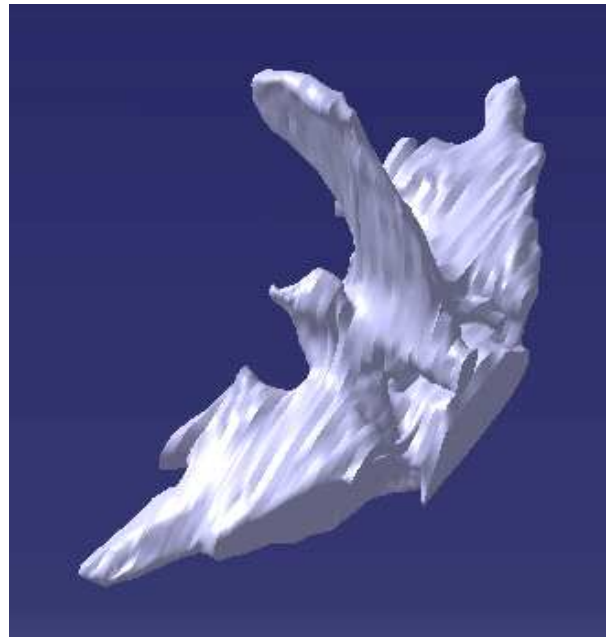
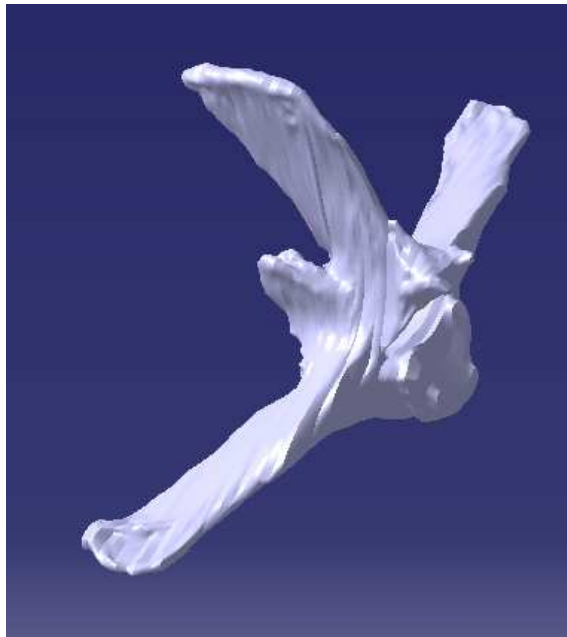


Abbildung 4-11 Trennung in L₅ (li.) und L₆ (re.)

In Abbildung 4-11 sind am kaudalen Ende des sechsten Lendenwirbels die Gelenksflächen der Intertransversalgelenke deutlich sichtbar.

4.2 Kreuzwirbelmodell

In Abbildung 4-12 ist das Kreuzbein von kranial zu sehen. Markant zu erkennen sind die beiden Kreuzbeinflügel mit ihren nach kranial zeigenden Intertransversalgelenken. Durch die konkave Beugung des *Os sacrum* ist der Wirbelkanal nicht mehr so deutlich sichtbar wie bei den Lendenwirbeln.

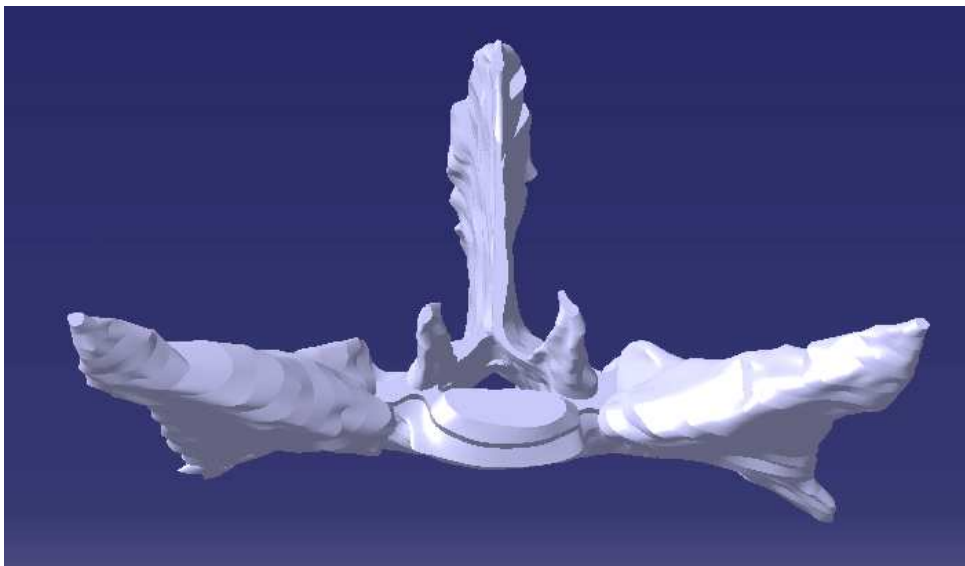


Abbildung 4-12 Vorderansicht *Os sacrum*

Bei der Seitenansicht in Abbildung 4-13 fällt auf, dass die Kämme an den Enden der *Procc. transversi* an vielen Stellen ursprünglich verwachsen waren. Um später für das biomechanische Modell die Lage der Enden der einzelnen Dornfortsätze leichter bestimmen zu können, wurden einige wenige Zwischenkonturen nicht vollständig ausgefüllt. Dadurch kommen die parallelen Kerben zwischen den *Procc. transversi* in Abbildung 4-13 zu Stande.

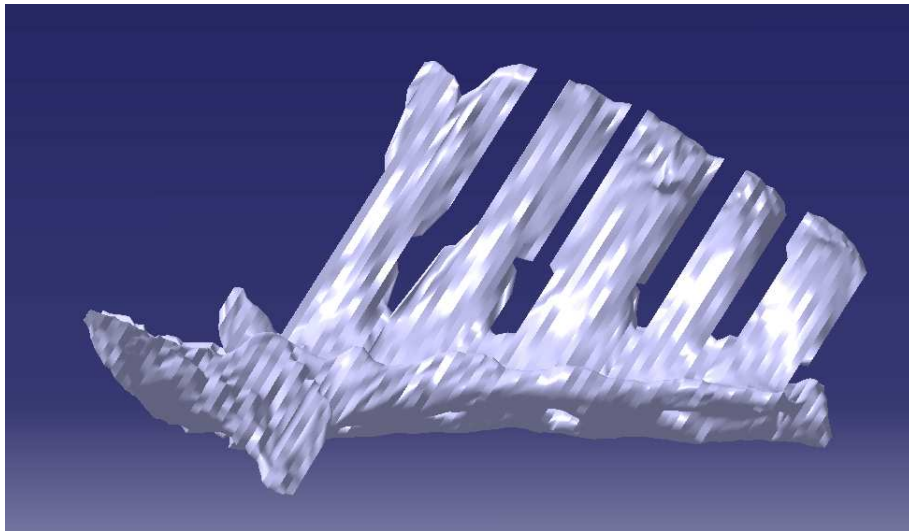


Abbildung 4-13 Seitenansicht *Os sacrum*

Als letzte Ansicht des Kreuzwirbelmodells dient Abbildung 4-14. An der *Ala sacralis* ist kaudal die gelenkige Verbindung mit dem Darmbeinflügel, die überknorpelte *Fascies auricularis*, zu erkennen. Auch die vier *Foramina sacralia dorsalia* sind deutlich sichtbar.

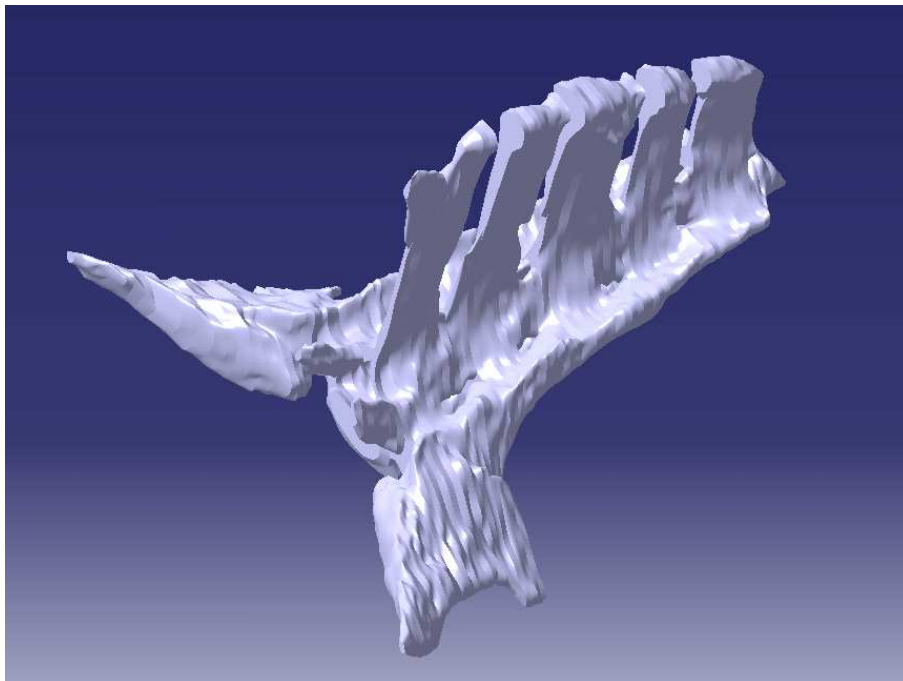


Abbildung 4-14 Schrägansicht *Os sacrum*

4.3 Gesamtansicht aller Wirbel

In diesem Kapitel sollen die gezeichneten Lenden- und Kreuzwirbel als zusammengesetztes Wirbelsäulenmodell dargestellt werden (Abbildung 4-15, Abbildung 4-16).

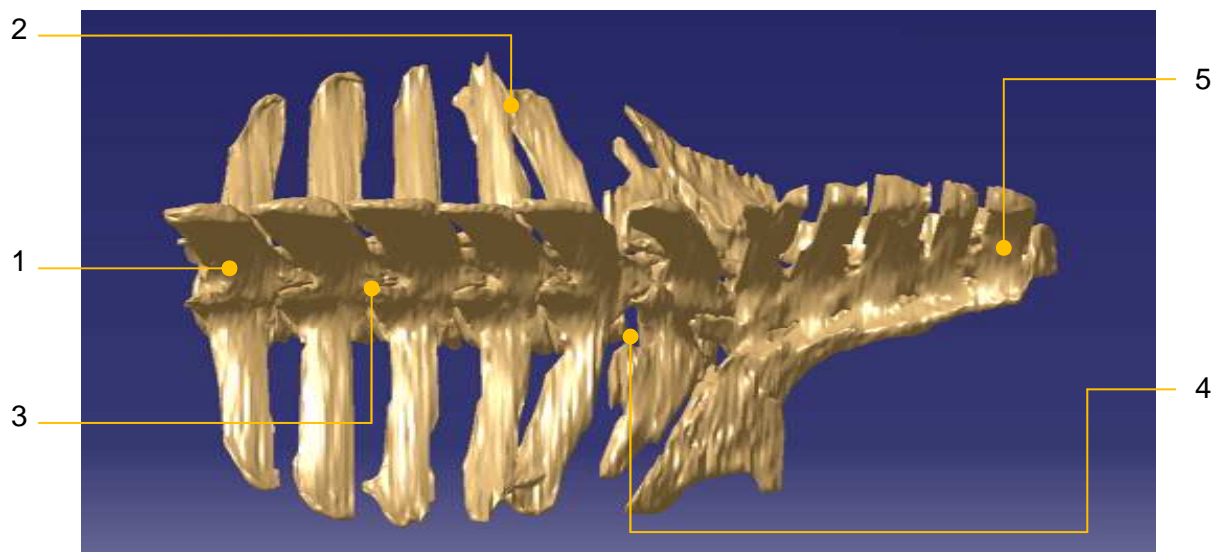


Abbildung 4-15 Zusammenbau L₁ bis S₅

In Abbildung 4-15 ist eine Gesamtansicht des ersten Lumbalwirbels (1) bis zum letzten Sakralwirbel (5) abgebildet. Kritische Stellen, wie die übereinanderliegenden Querfortsätze (2) von L₄ und L₅ wurden vorher auf Überschneidungen kontrolliert. Auch die Spalträume zwischen den gegenüberliegenden Gelenksfortsätzen (3) dürfen keinen Kontakt zulassen. Auffällig ist der etwas größere Spalt zwischen L₅ und L₆ (4). Wie in Kapitel 4.1 genauer dargestellt, wurden die beiden letzten Lendenwirbel nachträglich getrennt, da die Originalwirbel der gescannten Wirbelsäule dort miteinander verwachsen waren. Beim manuellen Auftrennen der Wirbel wurde ein verhältnismäßig großer Sicherheitsabstand eingehalten um ein Kollidieren der beiden Knochen in der Gesamtansicht zu verhindern.

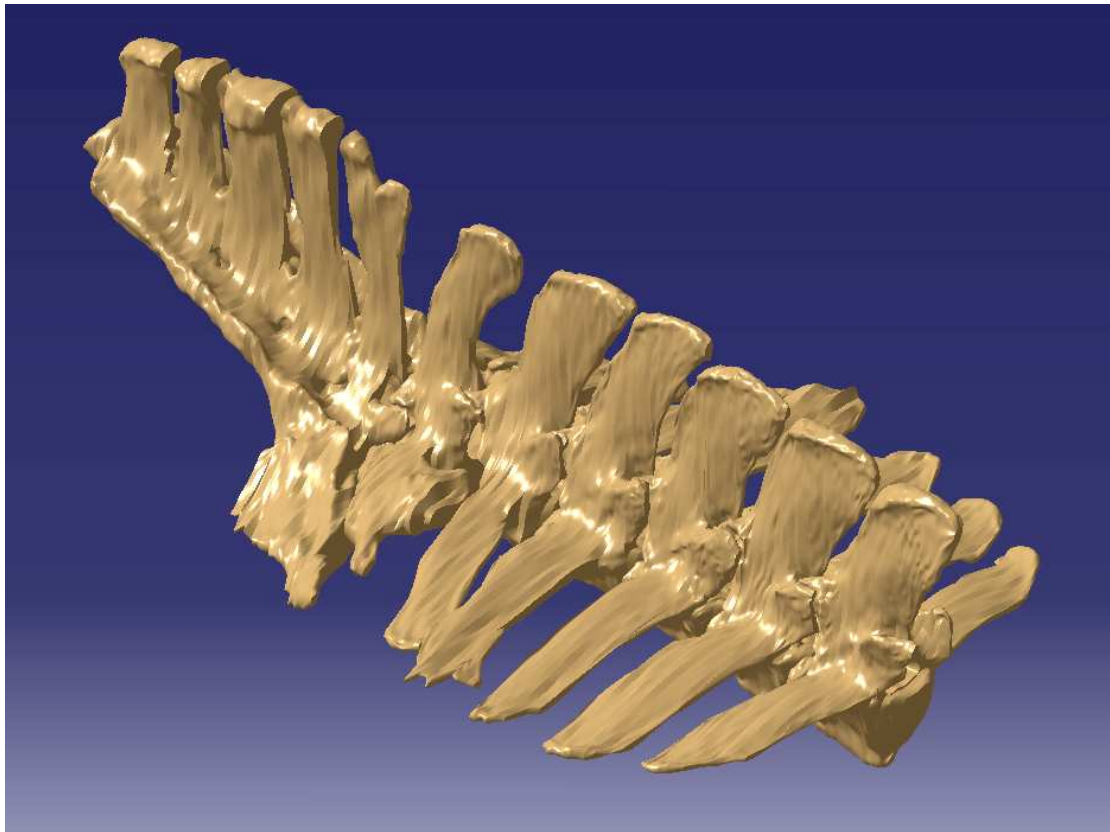


Abbildung 4-16 Gesamtansicht Lenden- & Kreuzwirbelsäule

4.4 Modifizierte Brustwirbelmodelle

Ziel des laufenden Projektes an der Veterinär Medizinischen Universität in Wien ist es ein komplettes biomechanisches Modell des Pferderückens zu erstellen. Benötigt wird dafür die Wirbelsäule von T₁ bis S₅. Die Brustwirbel wurden bereits in einer früheren Diplomarbeit von Juan Antonio Castells Ramón im Rahmen einer Diplomarbeit in Kooperation mit der Technischen Universität Wien im Jahr 2005 konstruiert [17]. Dabei wurden allerdings lediglich T₄ bis T₁₀ modelliert.

Wie in Abbildung 4-17 zu sehen ist, sind die 3D-Wirbel weitaus weniger detailliert dargestellt. Grund dafür ist vermutlich einerseits der Zustand der Informationsquellen, da damals 7 unterschiedliche MRI-Aufnahmeserien zum Einsatz kamen mit unterschiedlicher Schnittdicke und die Wirbel daher aus mehreren einzeln gezeichneten Wirbelkörperteilen zusammengesetzt wurden. Andererseits möglicherweise auch durch den Umstand, dass im CATIA meistens die Oberflächen

durch Einbeziehen von mehr als zwei Konturen gleichzeitig erzeugt wurden. Diese Methode ist zwar schneller und einfacher, hat aber den Nachteil, dass die Detailschärfe stark darunter leidet (Abbildung 4-17). Viele Konturen werden total verzerrt und mit gravierenden Oberflächenfehlern versehen.

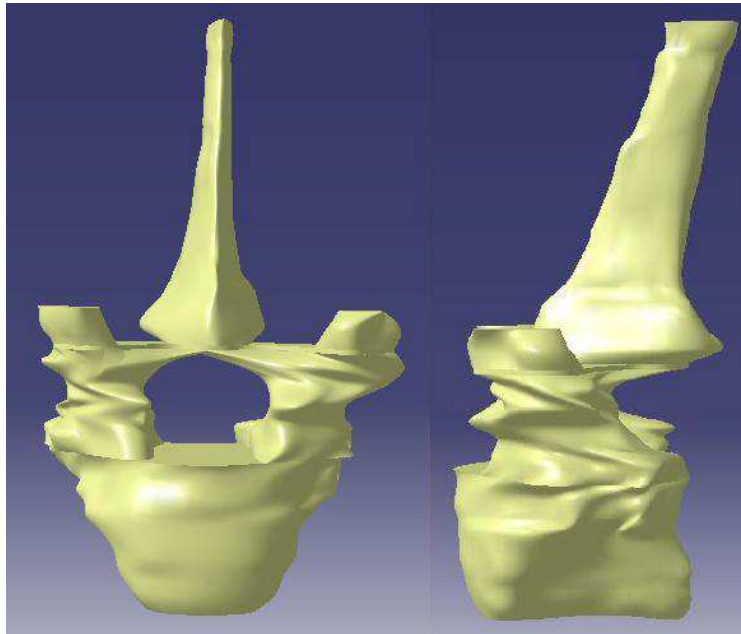


Abbildung 4-17 Fünfter Brustwirbel; Vorder- & Seitenansicht [17]

Um jedoch ein aussagekräftiges biomechanisches Modell der Pferdewirbelsäule erstellen zu können, müssen alle Wirbel von gleich hoher Qualität sein. Wenn später die Oberflächenkonturen nicht eindeutig identifizierbar sind, ist es sehr schwierig bis nahezu unmöglich die richtigen Positionen für Muskel-, Sehnen- und Bandansätze zu lokalisieren. Alle Brustwirbel sollen im Laufe des aktuellen mehrjährigen Projektes an der VMU Wien, anschließend an diese Diplomarbeit, mit der gleichen Methode aus den selben CT-Aufnahmen neu konstruiert werden, damit alle im Wirbelsäulenmodell eingesetzten Wirbel von dem selben Pferd stammen. Damit bis dahin trotzdem an einer vollständigen, wenn auch nur provisorischen, Wirbelsäule gearbeitet werden kann, werden die vorhandenen Thoraxwirbel lediglich modifiziert.

Eine Neukonstruktion aller Brustwirbel wurde in dieser Diplomarbeit nicht als Aufgabe gesetzt, da sie den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Die beste Möglichkeit die bestehenden Brustwirbel anzupassen ist die Modifikation ihrer *Procc. spinosi*. Außerdem sollen $T_1 - T_3$ sowie $T_{11} - T_{18}$ auch zur Verfügung

gestellt werden. Dazu werden T_4 dreimal und T_{10} siebenmal kopiert, bevor ihre Dornfortsätze in der Höhe einzeln angepasst werden, um einen passenden Widerrist zu bekommen.

Abbildung 4-18 zeigt die zusammengesetzte Brustwirbelsäule der bestehenden Wirbelmodelle von T_4 bis T_{10} . Man sieht deutlich, dass die Enden der *Procc. spinosi* keinen zusammenhängenden Widerrist bilden und unzureichend lang gezeichnet wurden.

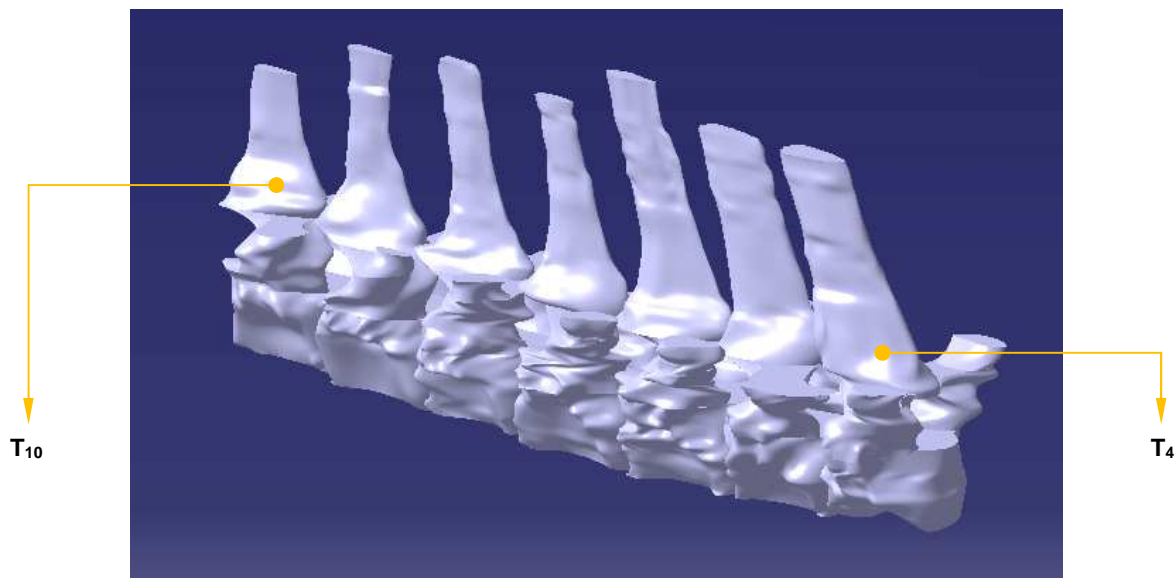


Abbildung 4-18 T_4 bis T_{10} der ursprünglichen Brustwirbel [17]

Daher werden die Höhen der Brustwirbel, welche von der *Crista ventralis* bis zur Spitze des *Proc. spinosus* gemessen werden, mit der des ersten neukonstruierten Lendenwirbels verglichen. In Tabelle 2 sind alle Längenänderungen aufgelistet. Die Neigung bezeichnet dabei die Abweichung des Dornfortsatzes von der senkrechten Ausrichtung nach dorsal. Die Anpassung wird bei T_{18} begonnen, da die Höhe der Brustwirbel an die der neuen Lendenwirbel angepasst wird. Dabei sollen, von dorsal begonnen, die Dornfortsätze bis T_{15} kleiner werden, von T_{14} bis T_5 anwachsen und schließlich bis T_1 wieder schrumpfen. So entsteht ein fließender Übergang zwischen den Wirbeln in Bezug auf ihre Höhe.

Tabelle 2: Modifikation der Brustwirbel

	Wirbelhöhe vor Anpassung [mm]	Wirbelhöhe nach Anpassung [mm]	Neigung [°]
T₁	136	136	25
T₂	136	206	25
T₃	136	272	25
T₄	136	294	25
T₅	136	316	25
T₆	148	294	25
T₇	132	272	25
T₈	132	250	20
T₉	128	228	20
T₁₀	108	206	10
T₁₁	108	184	10
T₁₂	108	162	10
T₁₃	108	151	10
T₁₄	108	140	10
T₁₅	108	140	10
T₁₆	108	145	10
T₁₇	108	150	10
T₁₈	108	155	10
L₁	158	158	-

Die veränderte Brustwirbelsäule mit formschönem Widerrist ist in Abbildung 4-19 dargestellt.

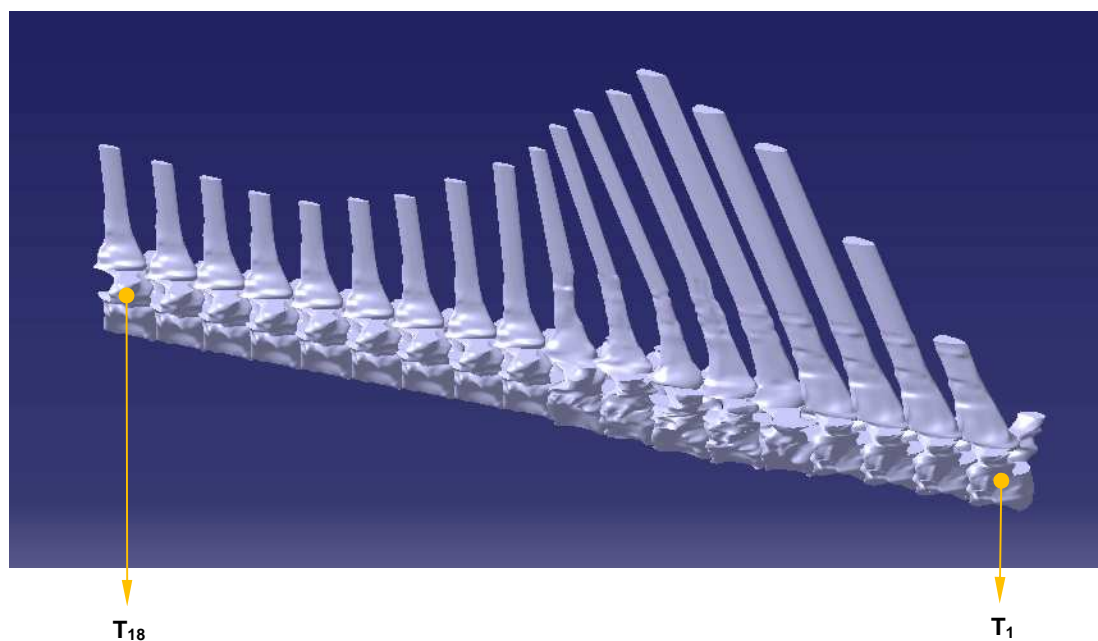


Abbildung 4-19 modifizierte Brustwirbelsäule

5. Diskussion

In diesem Kapitel sollen die Zuverlässigkeit der konstruierten CAD-Modelle und Verbesserungsvorschläge diskutiert werden.

Die Modelle, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, geben die tatsächlichen anatomischen Oberflächen der Pferdewirbel mit beeindruckender Genauigkeit wieder. Grund dafür ist einerseits die hervorragende Qualität der CT-Aufnahmen und der gering gewählte Abstand von nur 3mm zwischen den einzelnen Schnittbildern, andererseits auch die sorgfältige Modellierung der Oberflächenkonturen zwischen den geschlossenen Splines mit Hilfe von künstlich gesetzten Hilfselementen. Ein noch geringerer Abstand von unter 3mm ist demnach nicht unbedingt notwendig. Einziger Vorteil wären genauere Informationen beim Auftrennen von Knochenstrukturen in mehrere Einzelformationen und damit die einfachere Positionierung der notwendigen Hilfssplines. Die Wahl der Lage der Hilfsebenen bleibt dem Einfallsreichtum des Konstrukteurs überlassen. Da die Oberflächenbeschaffenheit der konstruierten 3D-Wirbel zur Bestimmung der Ansatzpunkte von Muskeln, Sehnen und Bändern zufriedenstellend genug ist, ist eine aufwändigere Konstruktion nicht erforderlich.

Einzig die Neu-Modellierung der Brustwirbel sollte in Betracht gezogen werden, um ein aussagekräftiges biomechanisches Modell anfertigen zu können. Die CT-Bilder dafür stehen bereits zur Verfügung und die Art der Gestaltung ist nun erprobt.

Allgemein müssen für die gesamte Konstruktion eines Wirbels zwischen 20 und 25 Stunden eingeplant werden, je nach Wahl der Anzahl von Hilfsgeraden zwischen den Splines. Oft müssen die einzeln geschlossenen Flächen mehrmals hintereinander korrigiert werden, da nach jedem Einfügen von Hilfselementen die Oberfläche neu berechnet wird und somit an anderen Stellen neue Unebenheiten auftreten, welche natürlich auch wieder beseitigt werden müssen.

Besonders entscheidend für erfolgreiche biomechanische Untersuchungen wird das Setzen von Muskeln und Bändern zwischen den einzelnen Wirbeln sowie die richtige Wahl der Muskelansätze größerer Muskel. Ein besonderer Muskelkomplex im Pferderücken ist der des *M. longissimus dorsi*, dessen Hauptaufgabe es ist den

Rücken zu strecken (Dorsoflexion) oder bei einseitiger Belastung, die laterale Krümmung der Wirbelsäule. Die Steifigkeit der Wirbelsäule ist maßgeblich, wenn auch nicht ausschließlich, von diesem Muskelpaket abhängig.

Abschließend lässt sich sagen, dass die gewählte Art der Erstellung der Wirbelkörper mehr als ausreichend in Bezug auf ihre Detailschärfe ist. Leider lassen sich Computertomographien an lebenden Pferden zur Untersuchung auf Anomalitäten der Wirbelsäule noch nicht realisieren, da der Durchmesser von CT-Röhren beschränkt ist. Durch die Erstellung und Untersuchung eines biomechanischen Modells der Pferdewirbelsäule erhofft man sich aber in Zukunft eine bessere Erkenntnis über die Pathologie der thorakolumbalen Erkrankungen zu erhalten, um einerseits das Auftreten von Rückenproblemen bei Pferden zu erklären und andererseits vernünftige Prinzipien für eine Therapie festlegen zu können.

6. Literaturverzeichnis

- [1] RANNER, W., Das "Rückenproblem" beim Pferd - Eigene Untersuchungen und kritische Betrachtungen, (Ludwig-Maximilians-Universität, 1997).
- [2] FWF, Projektantrag 2006 Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, (Locomotion Research Group of the Clinic of Orthopedics in Ungulates of the Veterinary University of Vienna/Austria).
- [3] BUDRAS, K. und RÖCK, S., *Atlas der Anatomie des Pferdes: Lehrbuch für Tierärzte und Studierende*, (2004).
- [4] JEFFCOTT, L. B., Natural rigidity of horse's backbone, *Equine Vet. J.* (4) 12 (1980), 101-108.
- [5] HOLMER, M., Röntgenbefunde an den Dornfortsätzen klinisch rückengesunder Warmblutpferde, (Ludwig-Maximilians-Universität, 2005).
- [6] BUDRAS, K. und SACK, W., *Anatomy of the Horse - An Illustrated Text*, no. 3 (2001).
- [7] NICKEL, R., SCHUMMER, A. und SEIFERLE, E., *Lehrbuch der Anatomie der Haustiere*, (Frewein, J, 2001).
- [8] RIEGEL, R. J. und HAKOLA, S., *Bild-Text-Atlas zur Anatomie und Klinik des Pferdes; Band 1*, (2006).
- [9] JEFFCOTT, L. B., Klinische und röntgenologische Diagnostik der Wirbelsäulenerkrankungen des Pferdes, *Der praktische Tierarzt* 4 (1978), 272-278.
- [10] JEFFCOTT, L. B., The examination of a horse with a potential back problem, *Proc. AAEP* 31 (1985a), 271-284.
- [11] JEFFCOTT, L. B., Conditions causing thoracolumbar pain and dysfunction in horses, *Proc. AAEP* 31 (1985b), 285-296.
- [12] DÄMMRICH, K. R., A, Zur Pathologie der Wirbelsäule des Pferdes, *Tagung Pferdekrankheiten (Essen)*, (1991).
- [13] JEFFCOTT, L. B., Disorders of the thoracolumbar spine of the horse - a survey of 443 cases, *Equine Vet. J.* (4) 12 (1980), 197-210.
- [14] JEFFCOTT, L. B., Rückenprobleme des Athleten "Pferd", *Pferdeheilkunde* 9 (1993), 143-150; 223-236.

-
- [15] DÄMMRICH, K. R., A; WEBER, B, Ein morphologischer Beitrag zur Biomechanik der thorakolumbalen Wirbelsäule und zur Pathogenese des Syndroms sich berührender Dornfortsätze (Kissing-Spines-Syndrom) bei Pferden, *Pferdeheilkunde* 5 (1993), 267-273, 276-281.
- [16] BOJANIC, N., Erstellung eines 3D-CAD Modells der unteren Extremitäten eines Kindes basierend auf Magnetresonanzaufnahmen, (TU Wien, 2004).
- [17] CASTELLS RAMÓN, J., Obtaining a 3D model of atlas and the thoraxical column in horses, (TU Wien, 2005).