

# Cone Beam-Computertomographie der Halswirbelsäule am stehenden Pferd – Teil 1: Befunde und Klinik

Birthe Fritsche<sup>1</sup>, Ina Lorenz<sup>1</sup>, Babara Busch-Tenter<sup>2</sup> und Kerstin Gerlach<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pferdeklinik Bargteheide

<sup>2</sup> Hamburg

<sup>3</sup> Klinik für Pferde, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig

**Zusammenfassung:** Erkrankungen der equinen Halswirbelsäule stellen aufgrund ihrer vielseitigen Symptome und ihrer komplexen Struktur eine diagnostische Herausforderung dar. Neben der röntgenologischen und szintigraphischen Diagnostik bietet die computertomographische Untersuchung eine überlagerungsfreie Beurteilung der knöchernen Strukturen. Für diese Studie wurde erstmalig ein Cone Beam-Computertomograph (CBCT) verwendet. Gegenstand dieser Arbeit war die Auswertung computertomographischer Veränderungen im Bereich der Halswirbelsäule am stehenden Pferd mittels eines CBCT. Es handelt sich um eine retrospektive sekundäre Datenanalyse, in welche 71 Pferde eingeschlossen wurden. Bei diesen Pferden wurde eine klinische Problematik im Bereich der Halswirbelsäule festgestellt und im CBCT untersucht. Die Pferde wurden nach einheitlichen Einschlusskriterien selektiert, die Bilder erneut verblindet ausgewertet und nach einem entwickelten Befundschema beurteilt. Aufgrund der Ergebnisse der klinischen Untersuchung wurden die Patienten drei Gruppen zugeordnet. Die Ergebnisse wurden deskriptiv beschrieben. Von den Halswirbelsäulen der 71 inkludierten Pferde wurden Wirbelanteile mit 236 Facettengelenken beidseits computertomographisch untersucht. Klinische Hauptsymptome stellten Unrittigkeiten (53), gefolgt von Lahmheiten der Vordergliedmaßen (21) und Ataxie (11 Pferde) bei Mehrfachvorkommen dar. 31 % der untersuchten Pferde waren jünger als 5 Jahre. Schwerpunkte der aufgetretenen Veränderungen stellten die Gelenke C 6/7 (59,3 %) dar. Die häufigsten Veränderungen traten mit 144 (61 %) Facettengelenken als Zubildungen der Processus articulares (Proc. art.) craniales auf, gefolgt von 114 (61 %) Einengungen der Foramina intervertebralia. Weitere Befunde stellten Zubildungen der Procc. art. caudales (25,4 %), zystische Läsionen (11,8 %), Frakturen oder Fragmente der Artikularprozesse (5,1 %), Verengung des knöchernen Wirbelkanals (13,6 %) oder inkongruente Gelenkflächen (21,2 %) dar. Eine Transdisposition des Processus transversus trat bei 21,1 % der untersuchten Pferde auf, weiterhin Verkalkungen im Bandscheibenbereich (5,6 %) sowie ein Achsenknick der Ausrichtung des Wirbelkanals zwischen C 6/7 (5,6 %). Veränderungen der Facetten traten häufig gemeinsam mit Frakturen auf, bei allen 12 Gelenken konnten Zubildungen der kaudalen gelenkbildenden Wirbel festgestellt und 91,7 % wiesen einen inkongruenten Gelenkspalt auf. Die CBCT der Halswirbelsäule ist am stehenden sedierten Pferd eine geeignete Zusatzuntersuchung vor allem der schwer zu erreichenden kaudalen Anteile. Durch die Ergebnisse lassen sich einige Befunde relativieren, wie die Bedeutung der Verschattung der Foramina intervertebralia oder die Transdisposition des Processus transversus. Das für diese Studie entworfene Befundschema ist zur Erfassung knöcherner Veränderungen geeignet.

**Schlüsselwörter:** Pferd, bildgebende Diagnostik, Cone beam-Computertomographie, Digitale Volumentomographie, Halswirbelsäule, Facettengelenke, Foramina

## Cone beam-computertomography of the cervical spine in the standing horse – Part 1: findings and clinic

Diseases of the equine cervical spine pose a diagnostic challenge due to their multiple symptoms and complex structure. In addition to radiological and scintigraphic diagnostics, computer tomographic examination offers a non-overlapping assessment of the bony structures. For this study, a cone beam computer tomograph (CBCT) was used for the first time. The subject of this study was the evaluation of computer tomographic changes in the area of the cervical spine in the standing horse by using a CBCT. Pre-selected areas were to be evaluated and assessed in a standardised manner. This is a retrospective secondary data analysis of 71 horses from the equine clinic Bartgeheide, Germany. In these horses, a clinical problem in the area of the cervical spine was detected and examined in CBCT. The horses were selected according to uniform inclusion criteria, the images were re-evaluated blind and assessed in accordance with a diagnostic scheme developed in-house. Based on the results of the clinical examination, patients were classified according to their symptoms into Group A for ataxia, hypermetria and proprioceptive disorders, Group U for non-rideability, stiff or painful neck and Group L for forelimb lameness. The results were described descriptively. Of the cervical spines of the 71 included horses, vertebral components with 236 facet joints on both sides were examined by computer tomography. The main clinical symptoms were non-rideability (53), followed by lameness of the forelimbs (21) and ataxia (11 horses) in multiple cases. Of the examined horses, 31 % were younger than five years. The main focus of the changes that occurred was on joints C 6/7 (59.3%). The most frequent changes occurred with 144 (61 %) facet joints, which showed a formation of the Processus articulares craniales (Proc. art. craniales), followed by constrictions of the intervertebral foramina in 114 cases (61%). Further findings included formations of the Proc. art. caudalis (25.4%), cystic lesions (11.8%), fractures or fragments of the articular processes (5.1%), narrowing of the bony spinal canal (13.6%), incongruent articular surfaces (21.2%). A transdisposition of the Processus transversus occurred in (21.1 %) of the examined horses, further calcifications in the intervertebral disc area (5.6%) as well as an axial kink in the alignment of the spinal canal between C 6/7 (5.6%). Changes in the facets often occurred together with fractures. Furthermore, in all 12 joints, formation of the caudal joint-forming vertebrae was observed and 91.7% showed an incongruent joint space. Cone-beam-computed tomography of the cervical spine is a valuable additional examination in a standing sedated horse, especially of the caudal parts which are difficult to reach. The results allow some findings to be put into perspective, such as the underestimated importance of the shadowing of the Foramina intervertebralia or the overestimated importance of the transdisposition of the Processus transversus. The diagnostic scheme designed for this study is suitable for recording bony changes.

**Keywords:** Cone beam computed tomography, digital volume tomography, cervical spine, facet joints, foramina

**Zitation:** Fritsche B., Lorenz I., Busch-Tenter B., Gerlach K. (2020) Cone Beam-Computertomographie-Untersuchung der Halswirbelsäule am stehenden Pferd – Teil 1: Befunde und Klinik. *Pferdeheilkunde* 36, 430–437; DOI 10.21836/PEM20200506

**Korrespondenz:** PD Dr. Kerstin Gerlach, Universität Leipzig, Veterinärmedizinische Fakultät, Klinik für Pferde, An den Tierkliniken 21, 04103 Leipzig, gerlach@vetmed.uni-leipzig.de

**Eingereicht:** 6. Juni 2020 | **Akzeptiert:** 23. Juli 2020

## Einleitung

Die Untersuchung der Halswirbelsäule ist bei Pferden mit Rittigkeitsproblemen, Schmerzen im Bereich der Halswirbelsäule, neurologischen Auffälligkeiten und Vorderhandlahmheiten ein wichtiger Bestandteil der Untersuchungen. Durch das vielseitige klinische Erscheinungsbild dieser Erkrankungen sowie die Komplexität der anatomischen Strukturen dieses Bereiches (Dyson 2003a, Martinelli et al. 2010, Munroe 2018) wird die Untersuchung und Diagnosestellung erheblich erschwert.

Die bildgebende Diagnostik mittels Röntgenaufnahmen ist aufgrund von Überlagerungen der komplexen Strukturen (Butler et al. 2016, Dyson 2003a, Engel 2010) sowie des Vorkommens von radiologischen Veränderungen als Zufallsbefund nicht immer einfach zu interpretieren (Lautenschläger et al. 2009). Eine übersichtliche und überlagerungsfreie Darstellung von knöchernen und komplexen Strukturen bietet die Computertomographie. Die CT-Untersuchung der Halswirbelsäule, insbesondere der kaudalen Wirbel, war bisher nur am liegenden Patienten möglich. Bildauflösung und Bewegungsartefakte sowie technische Gegebenheiten sind hier limitierend. Durch Modifizierungen der Gantrygröße wurde die Praktikabilität in der Pferdemedizin deutlich verbessert (Dyson 2003a, Hepburn 2015, Kinns und Pease 2012). In der Humanmedizin gab es schon seit den 1980er Jahren Versuche, größere Volumina mittels Bildverstärker und Fernsehkette dreidimensional darzustellen. Dies wurde durch Erweiterung der Software in der Nachbearbeitung erreicht, woraus sich die ersten CBCT-Systeme entwickelten. Mit der Anwendung dynamischer Flachdetektoren fand diese Technik vor allem in der Zahnmedizin beim Menschen starke Verbreitung. Die Cone Beam-Computertomographie (CBCT) oder Digitale Volumentomographie ist ein Verfahren, das mit einer um den Patienten rotierenden Kombination aus Röntgenröhre und Flachdetektor oder Bildverstärker dreidimensionale Bilddaten erzeugt (Strahlenschutzkommission 2015). Im Vergleich zum konventionellen CT läuft das CBCT aufgrund der kompakten Bauart, geringeren Strahlenbelastung und höheren Auflösung in der Humanmedizin dem CT den Rang ab (Eberspächer-Schweda 2020). Aus diesem Grund wurde ein spezielles Gerät für die Untersuchung von Pferden entwickelt.

Ziel dieser Arbeit ist die Aufarbeitung der in den Jahren 2017 und 2018 am stehenden Pferd mittels CBCT untersuchten Halswirbelgelenke und die Erarbeitung eines geeigneten Befundschemas zur Beurteilung.

## Material und Methoden

Für die Studie wurden retrospektiv Pferde mit Verdacht auf krankhafte Veränderungen im Bereich der Halswirbelsäule ausgewählt, welche in der Pferdeklinik Bargteheide untersucht

und behandelt wurden. Einschlusskriterien stellten dar: Rittigkeitsprobleme, steifer oder schmerzhafter Hals, Ataxie oder Propriozeptionsstörung der Gliedmaßen. Pferde mit Vorderhandlahmheiten wurden nur eingeschlossen, wenn negative diagnostische Anästhesien bis zum Nervus ulnarius/Nervus medianus und röntgenologisch sowie szintigraphisch keine abweichenden Befunde im Bereich des Ellbogen- und Schultergelenks vorlagen. Weiterhin mussten Röntgenaufnahmen der Halswirbelsäule vorliegen und eine szintigraphische Untersuchung erfolgt sein. Die vorher klinisch, röntgenologisch und/oder szintigraphisch als verdächtig ermittelten Bereiche der Halswirbelsäule wurden mittels CBCT untersucht.

Zu jedem Patienten wurde Rasse, Alter, Geschlecht, Nutzungsrichtung und die klinische Symptomatik erfasst.

Je nach klinischer Symptomatik wurden die Pferde in die folgenden drei Gruppen eingeteilt, Mehrfachbesetzungen waren möglich.

- Gruppe „A“: Pferde mit Ataxie, Hypermetrie und Propriozeptionsstörungen
- Gruppe „U“: Pferde mit Unrittigkeit, steifem oder schmerzhaften Hals
- Gruppe „L“: Pferde mit einer Lahmheit der Vordergliedmaße, unterteilt in „LVR“ wenn die rechte Vordergliedmaße und „LVL“ wenn die linke Vordergliedmaße betroffen ist.

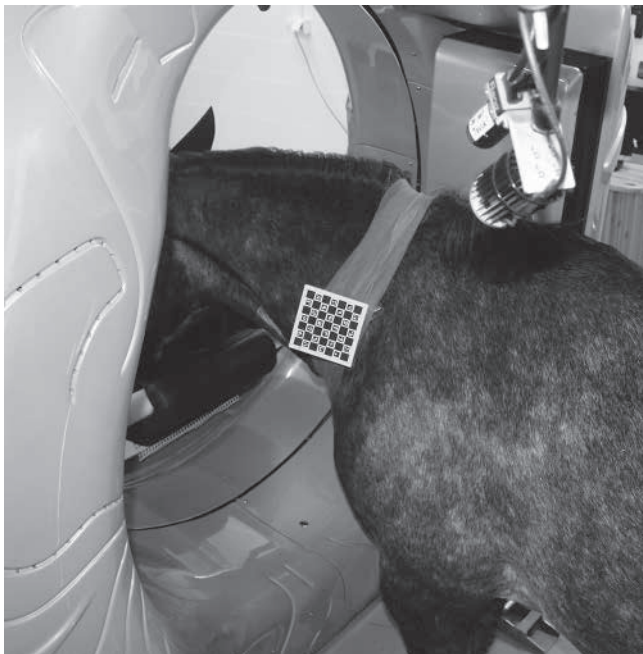
Die Sedation bei der Untersuchung erfolgte intravenös mit Detogestic® (Detomidinhydrochlorid, Zoetis; 0,01–0,04 mg/Kg Körpergewicht, Salo, Finnland), teilweise in Kombination mit Vetranquil® (Acepromazin, Ceva Tiergesundheit GmbH; 0,02–0,04 mg/Kg Körpergewicht, Düsseldorf, Deutschland) oder auch Sedivet® (Romifidinhydrochlorid, Boehringer Ingelheim; 0,04–0,08 mg/Kg Körpergewicht, Ingelheim, Deutschland).

Die Untersuchungen dieser Studie erfolgten mit dem Cone Beam-Computertomographen „PegasoTM“ der Firma Epica Medical Innovations (San Clemente, USA). Die Röntgenstrahlung wird in diesem Gerät durch die Röntgenröhre IAE-Modell RTM70 HS 0,3/0,5 erzeugt. Die gegenüberliegende Detektorplatte hat eine aktive Größe von 215 mm × 265 mm. Durch die Vielzahl an Projektionen der einzelnen Winkel kann das untersuchte Volumen in 2D, MRP (Multiplanarer Rekonstruktion) oder als dreidimensionale Volumenrekonstruktion betrachtet werden. Die Protokolle für die Untersuchungen der Halswirbelsäule werden teilweise an die Körperkondition des Pferdes angepasst (durchschnittlich 130 kV, 125 mAs, axial, Scan FOV 336,0 × 336,0 × 154,0 mm, Voxel 0,40 × 0,40 × 0,40, soft algorithm).

Der Innendurchmesser der Gantry beträgt 122,6 cm mit einer möglichen Neigung bis zu 10%. Um Bewegungsartefakte zu reduzieren, verfügt das verwendete Gerät über eine Bewe-



**Abb. 1** Untersuchung der kaudalen Halswirbelsäule eines Pferdes mittels Cone Beam-Computertomographie. Eine Person fixiert den Kopf hinter einer Bleiglaswand (Foto: Birthe Fritsche, Pferdeklinik Bargtheide). | Cone beam computed tomography examination of the caudal cervical region of a standing horse. One person, separated by a lead glass wall, secures the horse.



**Abb. 2** Für die Bewegungskompensation wird die Bewegung des Pferdes mittels einer auf eine Bildcodeplatte gerichteten Kamera ermittelt (Foto: Birthe Fritsche, Pferdeklinik Bargtheide). | For the movement correction, the movement of the horse is detected by a camera on an image code plate. (Photo: Birthe Fritsche, Equine Clinic Bargtheide, Germany).

gungskompensation von  $\pm 5$  cm. Diese erfolgt durch eine Kamera, welche auf eine am Pferdehals befestigte Bildcodeplatte gerichtet ist und die Bewegung während der Scanzeit mit den Aufnahmen verrechnet (Abb. 1). Die Aufnahmezeit beträgt 52 Sekunden für einen axialen Scan. Sehr kleine Pferde werden mit den Vorderbeinen hochgestellt, um den zu untersuchenden Halswirbelsäulenabschnitt ideal im Zentrum der Gantry positionieren zu können. Die Überprüfung der Positionierung erfolgt über eine in die Gantry integrierte Lichtlaser-Vorrichtung. Der Kopf des Pferdes wird auf einer Stütze abgelegt (Abb. 1 und 2).

Die computertomographischen Bilder wurden verblindet durch die gleiche erfahrene Untersucherin (IL) ausgewertet. Hierzu wurden die angefertigten Studien als sagittale, transversale und dorsale Rekonstruktionen betrachtet. Jedes in der Studie untersuchte Facettengelenk wurde isoliert bewertet und beurteilt. Die Untersuchung erfolgte nach Kriterien, welche für diese Studie zusammengestellt wurden (Abb. 3):

- Knöcherne Zubildung der Processus articulares craniales (Procc. art. craniales) des kaudal gelegenen gelenkbildenden Wirbels
- Knöcherne Zubildung der Processus articulares caudales (Procc. art. caudales) des kranial gelegenen gelenkbildenden Wirbels
- Einengungen eines Foramen intervertebrale (For. iv.)
- Zystische Läsionen der Procc. art.
- Frakturen oder Fragmente der Artikularprozesse
- Verengungen des knöchernen Wirbelkanals
- Inkongruente Gelenkflächen
- Transdisposition des Processus transversus (Proc. transversus)
- Weitere Veränderungen

Es handelt sich um eine sekundär deskriptive Studie. Die erhobenen Daten wurden mit Hilfe von Microsoft Excel® (Microsoft Corporation) erfasst und deskriptiv beschrieben.

## Ergebnisse

Von Januar 2017 bis Dezember 2018 erfüllten 71 Pferde die Einschlusskriterien. Dabei handelt es sich um 15 Stuten (21,1%), 43 Wallache (60,6%) und 13 Hengste (18,3%). Dabei konnten 62 Pferde (87,3%) den Warmblutpferden, zwei Pferde (2,8%) den Ponys und sieben (9,9%) weiteren Rassen (Traber, Friesen und ein Paint Horse) zugeordnet werden.

Das durchschnittliche Alter lag bei 7,75 Jahren (SD 3,36), wobei das jüngste Tier ein Alter von drei Jahren und das älteste Pferd ein Alter von 21 Jahren aufwies. Von 71 untersuchten Pferden waren 22 (31,0%) Pferde unter fünf Jahre und 49 (69,0%) Pferde über fünf Jahre alt.

Von den in dieser Studie untersuchten 71 Pferden wurden 22 (31,0%) Pferde im Dressursport eingesetzt, 13 (18,3%) springsportlich genutzt, 5 (7,0%) Pferde laufen Trabrennen und 31 (43,7%) Pferde haben eine unbekannte Nutzung oder werden als Freizeitpferde genutzt.

Aufgrund der Ergebnisse der klinischen Untersuchung wurden die 71 Pferde zugeordnet: 43 Pferde (60,6%) gehörten zur Symptomatikgruppe Gruppe „U“, 2 (2,8%) zu Gruppe „A“, 9 (12,7%) zur

Gruppe LVR, 4 (5,6%) zu Gruppe LVL, 8 (11,3%) in Gruppe „U“ und gleichzeitig in Gruppe „A“, 1 (1,4%) belegt die Gruppen „LVL“ und U, 1 (1,4%) zu LVR und U, 2 (2,8%) Pferde in „LVR“ und „LVL“, und ein Pferd (1,4%) zu „LVR“, „LVL“, „A“. Kein Pferd zeigt eine einseitige Lahmheit in Verbindung mit neurologischen Symptomen.

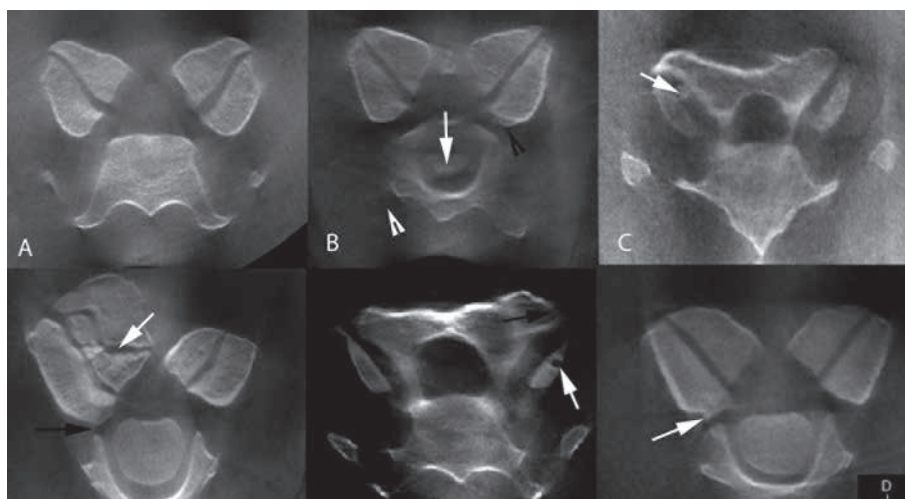
Durch die Möglichkeit der Doppelbelegung ergab sich, dass 11 Pferde der Studie Symptomatik „A“ alleine oder mit andern Symptomen zeigten und 53 Patienten der Studie lassen sich zur Symptomatik „U“ zählen. 18 Pferde zeigten die Symptomatik „L“, die sich bei 13 Pferden in „LVR“ und bei 8 Pferden zu „LVL“ unterteilen lässt.

Insgesamt wurden in dieser Studie 118 Bewegungseinheiten von Halswirbeln untersucht. Eine Bewegungseinheit ist der Übergang zweier Halswirbel und besteht aus einem Bandscheiben- oder Interzentralkgelenk sowie zwei Facettengelenken

rechts und links. Folglich wurden 236 Facettengelenke beider Seiten untersucht. Von 29 Pferden (40,8%) wurden je Pferd zwei, bei 37 Pferden (52,2%) je vier, bei fünf Pferden (7,0%) je sechs Facettengelenke untersucht. Die Verteilung auf die Regionen ist in Tab. 1 ersichtlich. Deutlich fällt dabei die hohe Anzahl im Bereich des 6. Halswirbels auf, gefolgt vom 5. Halswirbel.

Die häufigsten Veränderungen konnten als Zubildung des Proc. art. cranialis, des kaudal gelegenen, gelenkbildenden Wirbels gefolgt von Verengungen der Forr. iv. und den Zubildungen des Proc. art. caudalis des kranial gelegenen gelenkbildenden Wirbels festgestellt werden (Tab. 2).

Weiterhin wurde bei 15 (21,1%) Pferden eine Transdisposition des Proc. transversus festgestellt. Eine Verkalkung im Bandscheibenbereich wiesen 4 (5,6%) Pferde auf. Der sechste Wir-



**Abb. 3** Verschiedene Beispiele von Veränderungen im Transversalschnitt der Halswirbelsäule mittels Cone Beam-Computertomographie am stehenden Pferd; A: C6/7 ohne Befund; B: C6/7, fehlender Proc. transversus (weiße Pfeilspitze), Verkalkungen im Bandscheibenbereich (weißer Pfeil), leichte Zubildung des linken Processus articularis cranialis C7 mit Einengung des Foramen intervertebrale (schwarze Pfeilspitze); C: kranialer Anschnitt C6/7, Fragment im rechten Facettengelenk (weißer Pfeil); D: C5/6, Zubildung beider Artikularprozesse der rechten Facette, Fraktur des Processus articularis caudalis C5 (weißer Pfeil), Einengung des rechten Foramen intervertebrale (schwarzer Pfeil), inkongruenter Gelenkspalt; E: kranialer Anschnitt C6/7, Zyste im linken Processus articularis cranialis C7 (weißer

Pfeil), Zubildung des Processus articularis caudalis C6 (schwarzer Pfeil); F: C6/7, Zubildung des rechten Processus articularis cranialis C7 mit Einengung des Foramen intervertebrale (weißer Pfeil). | *Transversal cone beam computed tomography images of cervical vertebrae on standing horse. A: C6/7 without changes; B: C6/7 Asymmetric absence of the ventral lamina (white arrowhead), calcification spinal disc area (white arrow), slightly modelling of the left cranial articular process C7 with narrowing of the intervertebral foramen (black arrowhead); C: cranial image C6/7, fragment in the right facet joint (white arrow); D: C5/6, modelling of both articular processes of the right joint, fracture of the caudal articular process C5 (white arrow), narrowing of the right intervertebral foramen, incongruent joint line (black arrow); E: cranial image C6/7, cystic lesion in the cranial articular process C7 (white arrow), modelling of the caudal articular process C6; F: C6/7, modelling of the right cranial articular process C7 with narrowing of the intervertebral foramen (white arrow).*

**Tab. 1** Häufigkeitsverteilung der in der Cone Beam-Computertomographie untersuchten Lokalisationen der Halswirbelsäule (n = 71 Pferde, n = 236 Gelenke) | *Frequency distribution of examined regions of the cervical vertebrae (n = 71 horses, n = 236 facet joints) by cone beam computed tomography*

Halswirbel	C2/3	C3/4	C4/5	C5/6	C6/7	C7/Th1
Anteil der Pferde mit Erkrankungen der Lokalisation (%)	4,2	1,4	2,8	52,1	98,6	7,0

C: Halswirbel | C: cervical vertebra

**Tab. 2** Anzahl der Befundmerkmale der Cone Beam-Computertomographie-Untersuchung der Facettengelenke der Halswirbelsäule von C2/3 bis C7/Th1 (n=236 Gelenke) | *Number of changes by cone beam computed tomography of the facet joints of cervical spine from C2/3 to C7/Th1 (n = 236 facet joints)*

Befundmerkmal	Zubildung Proc. art. cran.	Zubildung Proc. art. caud.	Einengung For. iv.	Zystische Läsion	Frakturen/ Fragmente	Verengung WK	Gelenkspalt inkongruent
Anteil der Facettengelenke	144	60	114	28	12	32	50
(%)	61	25,4	61	11,8	5,1	13,6	21,2

C: Halswirbel; Proc. art. cran. = Processus articularis cranialis des kaudalen gelenkbildenden Wirbels; Proc. art. caud. = Processus articularis caudalis des kranial gelenkbildenden Wirbels; For. iv. = Foramen intervertebrale; WK = Wirbelkanal | C: cervical vertebra; Proc. art. cran. = cranial articular process of the caudal vertebrae; Proc. art. caud. = caudal articular process of the cranial vertebrae; For. iv. = intervertebral foramen; WK = spinal canal

belkörper zeigte bei vier (5,6%) Pferden eine zystische Läsion. Zwischen dem sechsten und siebten Halswirbel zeigten vier (5,6%) Pferde einen Achsenknick der Ausrichtung des Wirbelkanals. Diese vier Pferde gehörten der Gruppe „U“ an.

Bei 144 Facettengelenken mit Zubildungen der Procc. art. craniales trat in 109 (75,7%) Fällen ebenfalls ein eingeeengtes For. intervertebrale auf. Bei der Auswertung andersherum betrachtet ist von den 114 For. intervertebralia, die als eingeeengt beschrieben wurden, 109 (95,6%) der jeweilige Proc. art. craniale der dazugehörigen Gelenkfacette vergrößert (Tab. 3). Es fällt auch ein Zusammenhang zwischen eingeeengtem Wirbelkanal und den Zubildungen an den Facetten kranial, kaudal sowie einem verengtem For. intervertebrale auf.

Die 15 transdisponierten Procc. transversi gehen bei 8 (53,3%) Gelenkfacetten mit Zubildungen der Procc. art. craniales und 8 (53,3%) Facettengelenke mit eingeeengten For. intervertebralia einher (Tab. 3).

#### Auftreten der Befundmerkmale in Hinblick auf die Lokalisation

Hinsichtlich der Lokalisation aller Befunde betreffen diese C6/7 gefolgt von C5/6 (Tab. 4).

#### Befunde in Zusammenhang mit den klinischen Symptomen

Tab. 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Befundmerkmale der Facettengelenke zum Auftreten der klinischen Symptomatik der entsprechenden Pferde. Die häufigsten Befunde traten demnach bei Pferden mit Unrüttigkeit in Form von Zubildungen der Procc. art. craniales auf.

#### Diskussion

In dieser Studie wurde erstmals eine CBCT für die Untersuchung der Halswirbelsäule am stehenden Pferd beschrieben.

**Tab. 3** Anzahl der kombinierten Befundmerkmale der Cone Beam-Computertomographie der Halswirbelsäule (n = 71 Pferde) | Number of combined changes by cone beam computed tomography in the cervical spine (n = 71 horses)

Befundmerkmale	Zubildung Proc. art. cranialis	Zubildung Proc. art. caudalis	Einengung For. iv.	Zystische Läsion	Frakturen/ Fragmente	Verengung Wirbelkanal	Inkongruente Gelenkflächen	Transdisposition des Proc. transversus.
Zubildung Proc. art. cran	144	55	109	25	12	30	40	8
Zubildung Proc. art. caud.	55	60	46	15	9	29	27	2
Einengung For. iv.	109	46	114	21	10	28	33	8
Zystische Läsion	25	15	21	28	6	11	14	1
Frakturen/ Fragmente	12	9	10	6	12	7	11	0
Verengung Wirbelkanal	30	29	28	11	7	32	19	1
Inkongruente Gelenkflächen	40	27	33	14	11	19	50	0
Transdisposition des Proc. transversus	8	2	8	1	0	1	0	15

Proc. art. cranialis = Processus articularis cranialis des kaudalen gelenkbildenden Wirbels; Proc. art. caudalis = Processus articularis caudalis des kranial gelenkbildenden Wirbels; For. iv. = Foramen intervertebrale; WK = Wirbelkanal; Proc. = Processus | Proc. art. cranialis = cranial articular process of the caudal vertebrae; Proc. art. caudalis = caudal articular process of the cranial vertebrae; For. iv. = intervertebral foramen; WK = spinal canal; Proc. = Processus

**Tab. 4** Anzahl der Befundmerkmale der Cone Beam-Computertomographie im Bereich der Halswirbelsäule kombiniert mit der Lokalisation (n = 71 Pferde) | Number of changes by cone beam computed tomography in the cervical spine combined with location in the facet joints (n = 71 horses)

Halswirbel Befundmerkmal	C2/3	C3/4	C4/5	C5/6	C6/7	C7/Th1
Zubildung Proc. art. cranialis	4	1	0	38	97	4
Zubildung Proc. art. caudalis	0	0	0	12	48	0
Einengung For. iv.	4	1	0	34	75	0
Zystische Läsionen	1	0	0	5	22	0
Frakturen/Fragmente	1	0	0	4	5	2
Verengung Wirbelkanal	0	0	0	6	26	0
Inkongruente Gelenkflächen	1	0	0	12	36	1
Summe	11	3	0	111	309	7

C: Halswirbel; Proc. art. cran. = Processus articularis craniales des kaudalen gelenkbildenden Wirbels; Proc. art. caud. = Processus articularis caudales des kranial gelenkbildenden Wirbels; For. iv. = Foramen intervertebrale | C: cervical vertebrae; Proc. art. cranialis = cranial articular process of the caudal vertebrae; Proc. art. caudalis = caudal articular process of the cranial vertebrae; For. iv. = intervertebral foramen

Mit der Untersuchung von 71 Pferden stellt dies die größte Studie nach Kenntnis der Autorin dar, die sich erstmalig mit der Computertomographie im Bereich der kaudalen Halswirbelsäule von Pferden *intra vitam* befasst.

Lange Zeit wurden CT-Untersuchungen des Pferdes nur in Allgemeinanästhesie beschrieben (Bienert und Stadler 2006, Dyson 2003a, Kinns und Pease 2012), da Bewegungsartefakte und ein kleiner Innendurchmesser der Gantry die Untersuchungsmöglichkeiten stark limitieren (Kinns und Pease 2012, Pease et al. 2017, Porter und Werpy 2014, Saunders und Bergmann 2011). Bei bisher veröffentlichten Studien wurde die Halswirbelsäule entweder in Narkose (Pudert und Stadler 2018, Yamada et al. 2016, Zafra et al. 2012) oder am Präparat (Claridge et al. 2010, Janes et al. 2015, Sleutjens et al. 2014, 2010; Veraa et al. 2016) untersucht. In jüngerer Vergangenheit wurden diese an Kopf und kranialem Hals immer häufiger auch am stehenden sedierten Pferd durchgeführt (Pease et al. 2017, Porter und Werpy 2014, Saunders et al. 2011). Die ersten CBCT wurden von Klopstein Bregger et al. (2019) bei 68 Köpfen stehender Pferde angewendet.

In dieser Studie wurden drei klinische Symptomgruppen gebildet. Mit nur zwei Pferden der Gruppe Ataxie und neun weiteren Pferden, welche eine Ataxie gemeinsam mit anderen Symptomen zeigten, ist der Anteil der neurologisch auffälligen Pferde für eine Studie über Erkrankungen der Halswirbelsäule relativ gering. Das ist darauf zurückzuführen, dass szintigraphische Untersuchungen als Einschlusskriterium definiert wurden, diese aber bei ataktischen Pferden nur selten durchgeführt werden.

Symptomatiken der Gruppe Unrüttigkeit sind am häufigsten vertreten, sowohl einzeln als auch in Kombination mit anderen Symptomen. Der Zusammenhang von Lahmheiten mit Ursache in der Halswirbelsäule und zusätzlicher Steifheit oder Schmerz gibt in der klinischen Untersuchung Hinweise auf den Sitz der Erkrankung und ist von Dyson (2003b) und Munroe (2018) beschrieben.

Den häufigsten untersuchten Bereich stellten die Wirbelübergänge C6/7 (98,6%) gefolgt von C5/6 (52,1%) dar, so dass dort auch die häufigsten Veränderungen in Form von Zubildungen der Procc. art. caudales der kranialen gelenkbildenden Wirbel und Verengungen des knöchernen Wirbelkanals auftraten. Die klinische Relevanz dieser Abschnitte ist bekannt und wird vermutlich durch die Ausrichtung und biomechanische Belastung begünstigt (Powers et al. 1986, Zsoldos et al. 2010, Wilsman 2016)

Nur bei 7% der Patienten war es notwendig, mehr als zwei Wirbelübergänge zu untersuchen, bei keinem waren mehr als drei Wirbelübergänge zu scannen. Hierbei wird deutlich, wie wichtig es für die Untersuchung mittels CBCT ist, durch vorangegangene Diagnostik den zu untersuchenden Bereich einzugrenzen. Das mögliche Field of View ist im CBCT nur sehr klein. Daraus kann ein Nachteil entstehen, so dass abweichende Befunde in anderen Gelenken übersehen werden könnten. Auf diese Weise können auch keine Aussagen über die Relevanz der Befunde in einer Gesamtpopulation getroffen werden, dazu müssten zusätzlich klinisch unauffällige Pferde untersucht werden.

Veränderungen der Facettengelenke treten zum Großteil miteinander vergesellschaftet auf. So treten Einengungen der Forr. intervertebralia häufig, jedoch nicht immer durch Zubildungen der Procc. art. craniales des kaudalen gelenkbildenden Wirbels auf. Dieser scheint bei Veränderungen innerhalb des Facettengelenks zuerst mit Zubildung zu reagieren. Das gemeinsame Vorkommen von Zubildungen der Procc. art. craniales des kaudalen gelenkbildenden Wirbels mit einer Einengung des For. intervertebrale ist schlüssig. Der in der Facette ventral gelegene Proc. articularis ist Teil der Begrenzung des For. intervertebrale und steht somit stark mit ihm in Verbindung. Bei 109 Facetten wurde das For. intervertebrale durch die Zubildung des jeweiligen Proc. art. cranialis eingeengt. 95,6% der eingeengten Forr. intervertebralia wurden durch Zubildung des ventral gelegenen Proc. art. cranialis einge-

**Tab. 5** Anzahl der Befundmerkmale der Cone Beam-Computertomographie im Bereich der Halswirbelsäule kombiniert mit dem Auftreten klinischer Symptomatik (n = 71 Pferde) | Number of changes by cone beam computed tomography in the cervical spine combined with clinical symptoms (n = 71 horses)

Befundmerkmal Klinisches Symptom	Zubildung Proc. art. cranialis	Zubildung Proc. art. caudalis	Einengung For. iv.	Zystische Läsionen	Frakturen/ Fragmente	Verengung Wirbelkanal	Inkongruente Gelenkflächen
U	85	29	70	13	8	15	23
A	2	2	0	1	0	2	1
LVR	25	14	19	7	2	5	9
LVL	7	4	4	3	0	2	7
U, A	11	6	10	4	0	5	4
LVL, U	3	1	3	0	0	0	0
LVR, U	3	2	2	0	2	1	3
LVR, LVL	6	0	4	0	0	0	1
LVR, LVL, A	2	2	2	0	0	2	2
Gesamt	144	60	114	28	12	32	50

Proc. art. cranialis = Processus articularis cranialis des kaudalen gelenkbildenden Wirbels; Proc. art. caudalis = Processus articularis caudalis des kranial gelenkbildenden Wirbels; For. iv. = Foramen intervertebrale | C: cervical vertebrae; Proc. art. cranialis = cranial articular process of the caudal vertebrae; Proc. art. caudalis = caudal articular process of the cranial vertebrae; For. iv. = intervertebral foramen; U: symptom bad rideability, stiffness, pain; A: symptom atactic, hypermetric, proprioception; LVR: lameness right forelimb; LVL: lameness left forelimb

engt. Nur ein kleiner Anteil von 4,4 % wurde durch Zubildungen des Proc. art. caudalis verengt.

Gemeinsam mit Zubildungen des Proc. art. cranialis des kaudalen gelenkbildenden Wirbels treten zu 93,8% Verengung des knöchernen Wirbelkanals auf, gefolgt von Zubildungen des Proc. art. caudalis des jeweiligen kranialen Halswirbels, zystischen Läsionen und inkongruentem Gelenkspalt. Interessant ist, dass alle festgestellten Frakturen oder Fragmente mit diesen Zubildungen einhergehen.

Bei 15 Pferden dieser Studie konnte die anatomische Anomalie eines transdisponierten Proc. transversus beobachtet werden. Damit ist das Fehlen des ventralen Tuberkulums der Lamina ventralis des sechsten Halswirbels beschrieben. Stattdessen ist dieses Tuberkulum am Querfortsatz des siebten Halswirbels ausgeprägt (DeRouen et al. 2016, Veraa et al. 2016). Die 15 transdisponierten Procc. transversi gingen nur bei 53,3% der betroffenen Patienten mit einer Zubildung des Proc. art. cranialis und einem eingeengten For. intervertebrale einher.

Der Verdacht, dass eine Transdisponierung des Proc. transversus zu einem erhöhten Risiko von Facettengelenkarthrosen und CVM führt, wie in der Studie von DeRouen et al. (2016) beschrieben, kann nicht bestätigt werden. Auch der von den Autoren vermutete Zusammenhang von morphologischen Variationen mit anderen Entwicklungsstörungen kann in den eigenen Untersuchungen nicht bestätigt werden. Nur bei einem Pferd mit Ataxie konnte eine Transdisposition des Proc. transversus festgestellt werden. In der Literatur wird dies viel häufiger angegeben (May-Davis und Walker 2015). Unsere Ergebnisse werden von Veraa et al. (2020) bestätigt.

Durch die große Variation der Veränderungen der Halswirbelsäule des Pferdes resultieren Erkrankungen unterschiedlicher Symptomatik. In dieser Studie wurde die Symptomatik (Munroe 2018) in neurologische Symptome, schmerzhafte Einschränkungen der Halsbewegung und Vorderhandlahmheiten unterteilt. Veränderungen der Facettengelenke, beispielsweise im Rahmen einer Osteoarthritis, sind nicht in jedem Fall von klinischer Bedeutung, können jedoch ursächlich für die Symptome in Frage kommen (Martinelli et al. 2010, Ricardi und Dyson 1993). Je detaillierter Veränderungen erfasst werden können, umso mehr sollten sie in Einklang mit den Symptomen zu bringen sein. Lautenschläger et al. (2009) bringen Steifheit und Schmerz durch degenerative Facettengelenksveränderungen in Zusammenhang mit Pferden mit Rittigkeitsproblemen. In dieser Studie dominieren mit 53 Pferden die Patienten mit einer Symptomatik mit Steifheit, Schmerzen und Rittigkeitsproblemen.

Vorderhandlahmheiten, die Veränderungen der Halswirbelsäule zuzuschreiben sind, werden in der mittleren bis unteren Halswirbelsäule beschrieben (Marks 1999, Ricardi und Dyson 1993). Sie entstehen durch Kompression der Halsnerven, die den Plexus brachialis bilden sowie beim Durchtritt durch das Foramen intervertebrale durch Vergrößerungen oder Veränderungen der Artikularprozesse (Dyson 2011, 2003b; Ricardi und Dyson 1993). Innerhalb dieser Studie konnten bei 13 lahmen Pferden auf der gleichen Seite 15 eingeengte For. intervertebrale nachgewiesen werden, auf der anderen Halsseite nur sechs. Bei den verbleibenden zwei Pferden sind in der computertomographischen Untersuchung deutlich veränderte und vergrößerte Artikularprozesse

der Facettengelenke nachgewiesen worden. Die Befunde weisen auf ursächliche Zusammenhänge hin. Ob letztlich die Ursache auch genau darin besteht, kann nicht abschließend geklärt werden. In der Computertomographie können nur die knöchernen Strukturen bewertet werden, eine Kompression kann auch durch Weichteilveränderungen, zum Beispiel einem Gelenkerguss und Kapseldehnung des Facettengelenks, hervorgerufen werden. In solchen Fällen wäre Ultrasonographie ergänzend sinnvoll. Es ist nicht immer möglich, eine sichere Diagnose zu stellen. In den zwei Fällen dieser Studie wurde eine diagnostische Therapie durchgeführt, so dass die Ursache bestätigt werden konnte. Im Bereich der Halswirbelsäule kann bei Verdacht auf eine ursächliche Erkrankung wegen fehlender diagnostischer Anästhesien die Diagnose nicht so gut abgesichert werden, wie in den distalen Gliedmaßen. Ohne diagnostische Anästhesien ist bei den Patienten mit Lahmheit die Sicherheit der Diagnose immer fraglich. In vergleichbaren Untersuchungen wurden diagnostische Anästhesien mit der Szintigraphie gleichgesetzt (Barstow und Dyson 2015, Daniel et al. 2012), was allerdings fraglich ist. Eine weitere Auffälligkeit bestand darin, dass die Untersuchung von C7/Th1 keine Relevanz bei unseren Patienten hatte. In der computertomographischen Untersuchung stellen sich die For. intervertebrale bei C7/Th1 sehr weit dar. Einengungen und Kompression der Nerven erscheinen dadurch eher unwahrscheinlich und traten auch nicht auf.

Die bei vier Pferden festgestellten Verkalkungen innerhalb der Bandscheibe konnten nicht mit klinischen Symptomen in Verbindung gebracht werden. Bergmann et al. (2018) haben bei der pathologischen und histopathologischen Untersuchung der Bandscheiben von Warmblutpferden keine Verkalkungen feststellen können, bemängeln jedoch auch, dass es hier an Forschung mangelt.

Zystische Läsionen innerhalb des Wirbelkörpers konnten bei vier Pferden im sechsten Wirbelkörper der Gruppe Unrüttigkeit beobachtet werden. Einen Achsenknick zwischen dem sechsten und siebten Halswirbel zeigten vier Pferde dieser Studie, wovon kein Pferd neurologisch auffällig war.

Das CBCT wird in dieser Studie gleichwertig wie ein CT behandelt, gehört aber von der Funktionsweise eher zu einer Durchleuchtung und wird auch als digitale Volumetomographie bezeichnet. In der Humanmedizin hat sich das CBCT als Alternative zur Mehrspiral-CT zur Darstellung von Hartkontrasten etabliert, ist also für die Abbildung von Weichteilen ungeeigneter als ein CT (Schegerer et al. 2013).

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie bei Pferden sind vielversprechend und lassen Untersuchungen der Halswirbelsäule bis zum ersten Brustwirbel zu. Am stehenden Pferd ist das bisher mit einem CT nicht zu erreichen gewesen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die CBCT Technik für die vollständige Untersuchung der Halswirbelsäule am stehenden Pferd sehr gut geeignet ist. Die dreidimensionale Darstellung ist der Röntgenuntersuchung überlegen und momentan mit einem CT nicht möglich. Dabei können Veränderungen erfasst werden, die im Röntgenbild meist nicht erkennbar sind, wie Frakturen, Fragmente und auch zystoide Defekte.

Vorteile sind dabei die geringeren Strahlenbelastungen, Nachteile bestehen im kleineren Untersuchungsfeld und weniger guten Weichteilabbildungen.

Die häufigsten Veränderungen traten im Bereich der Wirbel C6/7 und C5/6 in Form von Zubildungen der kaudalen Gelenkfortsätze des kranialen gelenkbildenden Wirbels und Verengungen der Foramina intervertebralia auf. Diese Veränderungen konnten überwiegend bei unrüttigen und lahmen Pferden beobachtet werden. Weitere Untersuchungen auch an klinisch unauffälligen Pferden sind notwendig, um eine reelle Einschätzung der erhobenen Befunde und deren klinischer Relevanz vornehmen zu können. Das für diese Studie entworfene Befundschemata ist zur Erfassung knöcherner Veränderungen geeignet.

## Literatur

- Barstow A., Dyson S. (2015) Clinical features and diagnosis of sacroiliac joint region pain in 296 horses: 2004–2014. *Equine Vet. Educ.* 27, 637–647; DOI 10.1111/eve.12377
- Bergmann W., Bergknot N., Veraa S., Gröne A., Vernooij H., Wijnberg I. D., Back W., Grinwis G. C. M. (2018) Intervertebral Disc Degeneration in Warmblood Horses: Morphology, Grading, and Distribution of Lesions. *Vet. Pathol.* 55, 442–452; DOI 10.1177/0300985817747950
- Bienert A., Stadler P. (2006) Computertomographische Untersuchung am Bewegungsapparat des Pferdes – Eine Übersicht. *Pferdeheilkunde* 22, 218–226; DOI 10.21836/PEM20060218
- Butler J. A., Colles C. M., Dyson S. J., Kold S. E., Poulos P. W. (2016) The vertebral column, in: *Clinical Radiology of the Horse*. John Wiley & Sons Inc, Chichester, West Sussex, UK ; Ames, Iowa. 531–568
- Claridge H. A. H., Piercy R. J., Parry A., Weller R. (2010) The 3D anatomy of the cervical articular process joints in the horse and their topographical relationships to the spinal cord. *Equine Vet. J.* 42, 726–731; DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00114.x
- Daniel A. J., Judy C. E., Rick M. C., Saveraid T. C., Herthel D. J. (2012) Comparison of radiography, nuclear scintigraphy, and magnetic resonance imaging for detection of specific conditions of the distal tarsal bones of horses: 20 cases (2006–2010). *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 240, 1109–1114; DOI 10.2460/javma.240.9.1109
- DeRouen A., Spriet M., Aleman M. (2016) Prevalence of anatomical variation of the sixth cervical vertebra and association with vertebral canal stenosis and articular process osteoarthritis in the horse. *Vet. Radiol. Ultrasound* 57, 253–258; DOI 10.1111/vru.12350
- Dyson S. J. (2011) Lesions of the Equine Neck Resulting in Lameness or Poor Performance. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 27, 417–437; DOI 10.1016/j.cveq.2011.08.005
- Dyson S. J. (2003a) The Cervical Spine and Soft Tissues of the Neck, in: *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse*. W. B. Saunders, Philadelphia, Pa. ; London, 522–531
- Dyson S. J. (2003b) Unexplained Lameness, in: *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse*. W. B. Saunders, Philadelphia, Pa.; London, 141
- Eberspächer-Schweda M. (2020) Cone Beam CT (Volumentomographie). [https://forschungsinfrastruktur.bmbwf.gv.at/de/fi/cone-beam-ct-volumentomographie\\_4046](https://forschungsinfrastruktur.bmbwf.gv.at/de/fi/cone-beam-ct-volumentomographie_4046)
- Engel M. S. (2010) Untersuchung zum Zusammenhang zwischen röntgenologischen und knochenpräparatorischen Befunden an der kranialen Halswirbelsäule von Pferden. *Diss. Med. Vet. München*
- Hepburn R. (2015) Equine neurology. In: *Furr M., Reed S. M. (Eds.), Second edition*. John Wiley & Sons Inc, Ames, Iowa. 386–400
- Kinns J., Pease A. P. (2012) Computed Tomography, In: *Auer, J. A., Stick, J. A. (Eds.), Equine Surgery*. Elsevier, St. Louis, Mo., 979–985
- Janes J. G., Garrett K. S., McQuerry K. J., Waddell S., Voor M. J., Reed S. M., Williams N. M., MacLeod J. N. (2015) Cervical Vertebral Lesions in Equine Stenotic Myelopathy. *Vet. Pathol.* 52, 919–927; DOI 10.1177/0300985815593127
- Lautenschläger I., Baumann I., Schulze M., Martens I., Rohn K., Stadler P. (2009) Die röntgenologische Darstellung der kaudalen Facettengelenke der Halswirbelsäule beim Warmblutpferd. *Pferdeheilkunde* 25, 544–553; DOI 10.21836/PEM20090601
- Marks D. (1999) Cervical nerve root impingement in a horse, treated by epidural injection of corticosteroids. *J. Equine Vet. Sci.* 19, 399–401; DOI 10.1016/S0737-0806(99)80304-9
- Martinelli M. J., Rantanen N. W., Grant B. D. (2010) Cervical arthropathy, myelopathy or just a pain in the neck? *Equine Vet. Educ.* 22, 88–90; DOI 10.1111/j.0957-7730.2009.00027.x
- May-Davis S., Walker C. (2015) Variations and Implications of the Gross Morphology in the Longus colli Muscle in Thoroughbred and Thoroughbred Derivate Horses Presenting With a Congenital Malformation of the Sixth and Seventh Cervical Vertebrae. *J. Equine Vet. Sci.* 35, 560–568; DOI 10.1016/j.jevs.2015.03.002
- Munroe G. A. (2018) Clinical Examination, In: *Henson, F. M. D. (Ed.), Equine Neck and Back Pathology: Diagnosis and Treatment*. Wiley, Hoboken, NJ, 81–94
- Pease A., Mair T., Spriet M. (2017) Imaging the equine head and spine. *Equine Vet. J.* 49, 13–14; DOI 10.1111/evj.12640
- Porter E. G., Werypy N. M. (2014) New Concepts in Standing Advanced Diagnostic Equine Imaging. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 30, 239–268; DOI 10.1016/j.cveq.2013.11.001
- Powers B. E., Stashak T. S., Nixon A. J., Yovich J. V., Norrdin R. W. (1986) Pathology of the Vertebral Column of Horses with Cervical Static Stenosis. *Vet. Pathol.* 23, 392–399; DOI 10.1177/030098588602300408
- Pudert T., Stadler P. (2018) Die vergleichende Darstellbarkeit von knöchernen Veränderungen der zervikalen Facettengelenke mittels Röntgen, Ultrasonographie und Computertomographie beim Warmblutpferd, 1. Auflage, 2018. ed. Wissenschaftliche Reihe der Klinik für Pferde. Cuvillier Verlag, Göttingen
- Ricardi G., Dyson S. J. (1993) Forelimb lameness associated with radiographic abnormalities of the cervical vertebrae. *Equine Vet. J.* 25, 422–426
- Saunders J., Bergman H.-J. (2011) Equine Neck and Spine, in: *Veterinary Computed Tomography*. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex, UK ; Ames, Iowa, pp. 451–456
- Saunders J., Nelson A., Vanderperren K. (2011) Particularities of Equine CT, in: *Veterinary Computed Tomography*. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex, UK; Ames, Iowa, pp. 421–426
- Schegerer A., Lechel U., Ritter M., Weissner G., Fink C., Brix G. (2013): Vergleich von Cone-Beam-CT mit konventionellen Mehrschichtspirale-CT bezüglich Strahlendosis und Bildqualität. *Fortschr. Röntgenstr.* 185, VO318\_4; DOI 10.1055/s-0033-1346462
- Sleutjens J., Cooley A. J., Sampson S. N., Wijnberg I. D., Back W., van der Kolk J. H., Swiderski C. E. (2014). The equine cervical spine: comparing MRI and contrast-enhanced CT images with anatomic slices in the sagittal, dorsal, and transverse plane. *Vet. Q.* 34, 74–84; DOI 10.1080/01652176.2014.951129
- Sleutjens J., Voorhout G., van der Kolk J. H., Wijnberg I., Back W. (2010) The effect of ex vivo flexion and extension on intervertebral foramina dimensions in equine cervical spine. *Equine Vet. J.* 42, 425–430; DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00226.x
- Strahlenschutzkommission (2015) Cone Beam-Computertomografie (CBCT) und Mammatomosynthese. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. 277. Sitzung am 02./03. Juli 2015, Geschäftsstelle der Strahlenschutzkommission, Postfach 120629, D-53048 Bonn, <http://www.ssk.de>
- Veraa S., Bergmann W., van den Belt A.-J., Wijnberg I., Back W. (2016) Ex vivo computer tomographic evaluation of the morphology variations in equine cervical vertebrae. *Vet. Radiol. Ultrasound* 57, 482–488; DOI 10.1111/vru.12393
- Veraa S., De Graaf K., Wijnberg I. K., Back W., Vernooij H., Nielen M., Belta A. J. M. (2020) Caudal cervical vertebral morphological variation is not associated with clinical signs in Warmblood horses. *Equine Vet. J.* 52, 219–224; DOI 10.1111/evj.13140
- Wilmann F. (2016) Statistische Erhebung zur Prävalenz röntgenologisch erfassbarer Befunde an der Halswirbelsäule des Pferdes. *Diss. Med. Vet. München*
- Zafra R., Carrascosa C., Rivero M., Pena S., Teresa F., Suarez-Bonnet A., Jaber J. R. (2012) Analysis of equine cervical spine using three-dimensional computed tomographic reconstruction. *J. Appl. Anim. Res.* 40, 108–111; DOI 10.1080/9712119.2011.621532
- Zsoldos R. R., Groesel M., Kotschwar A. B., Licka T., Peham C. (2010) A preliminary modelling study on the equine cervical spine with inverse kinematics at walk. *Equine Vet. J.* 42, 516–522; DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00265.x