

Magnetresonanztomographische Untersuchungen zur altersabhängigen Abbildung der Wachstumsknorpel des distalen Radius des Pferdes

Julien P. Troille², Walter Brehm¹, Katharina Flatz³ und Kerstin Gerlach¹

Chirurgische Tierklinik, Universität Leipzig¹, Orthogen Veterinary GmbH, Düsseldorf² und Ludwig-Maximilians-Universität München, Chirurgische und Gynäkologische Kleintierklinik³

Zusammenfassung

Eine magnetresonanztomographische Untersuchung des distalen Abschnittes des Radius wurde an 28 Gliedmaßenpräparaten von Pferden im Alter von zwei Tagen bis 17 Jahren durchgeführt. Die knorpeligen Wachstumsregionen des distalen Radius wurden mit besonderem Hinblick auf seine Epiphysenfuge deskriptiv erfasst und altersbedingte Unterschiede definiert. Die durchschnittliche Dicke des sich darstellenden Epiphysenfugenknorpels wurde in verschiedenen Sequenzen in zwei Ebenen vermessen und in Bezug zum Alter der Spendertiere gesetzt. Der hyaline Knorpel der untersuchten Region war mit den gewählten Sequenzen sehr gut zu beurteilen. Die knorpeligen Anteile der Epiphyse und Apophysenfuge konnten deutlich dargestellt werden. Angrenzende Strukturen wie die subchondrale Knochenplatte der Radiusepiphyse und die Mineralisationszone der Epiphysenfuge konnten ebenfalls abgebildet werden. Epiphysenfugennarben waren bis zu einem hohen Alter nachweisbar. Die Untersuchungsmaterialien waren auf Grund ähnlicher altersbedingter Unterschiede fünf Gruppen zuzuordnen. Die alterskorrelierende Abnahme der mittleren Epiphysenfugenknorpeldicke konnte mittels Vermessungen der Knorpelschichten graphisch dargestellt werden. Die Magnetresonanztomographie (MRT) hat sich als geeignetes Verfahren erwiesen, die knorpeligen Strukturen der Wachstumsregion des distalen Radius des Pferdes bildlich wiederzugeben. Altersabhängige strukturelle Unterschiede konnten im MRT dargestellt werden. Damit leistet die vorgestellte Studie einen Beitrag zur Darstellung der physiologischen anatomischen Verhältnisse der Wachstumsknorpel im Bereich des distalen Radius.

Schlüsselwörter: Pferd / Magnetresonanztomographie / Radius / Epiphysenfuge / Knorpel / bildgebende Diagnostik

MR Imaging of the cartilaginous growthstructures of the distal radius of the horse – an age related study

28 cadaver limb segments including the distal radius of 28 orthopedically sound horses of diverse breeds aged from 2 days to 17 years were examined by magnetic resonance imaging (MRI). The limbs were examined in four different sequences (T1w-SE, T2w-TSE, PD-SE, T2 DESS-GE) and in two planes (sagittal, dorsal). The region of growth with respect to the physis of the distal radial bone was documented descriptively. Age related changes regarding the cartilaginous structures within this region were distinguished. Consecutively the average thickness of the obtainable cartilage zone of the physis was measured using two sequences (T1w-SE, T2 DESS-GE). The results were compared among each other and to the increasing age of the examined samples. The hyaline cartilage of the examined area could be clearly defined by the sequences used. Cartilaginous structures of the epiphyses and apophysis were considered to be well assessable with MRI. In young foals proximal to the physal cartilage a zone of provisional calcification could be documented whereas a hypointense epiphysal subchondral bone plate was visible adjacent distally. In adult horses physal scars in that region of the growthplate were clearly detectable. The sample materials could be classified into 5 groups due to age related varieties. With the help of a correlation analysis a strong connection between the age of the evaluated individuals and the decreasing thickness of the cartilaginous physis could be demonstrated. MR Imaging turns out to be an applicative method to assess the cartilaginous structures of the growth region of the distal radial bone of the horse.

Keywords: horse / Magnetic Resonance Imaging / radius, growth plate / cartilage / diagnostic imaging

Einleitung

Lange Röhrenknochen bestehen aus der Diaphyse, den Metaphysen und den Epiphysen. Meta- und Epiphysen sind durch die knorpeligen Epiphysenfugen (Wachstumsfugen) voneinander getrennt (Smith 1968). Wachstumsknorpel befinden sich an den Enden der langen Röhrenknochen als Wachstumsgrundlage der primären, sekundären und tertiären Ossifikationszentren (Huskamp et al. 1996). Der Epiphysenfugenknorpel stellt die Grundlage für das Längenwachstum der Knochen dar. Solange dieses Knorpelband proliferiert, bleiben die Ossifikationszentren von Diaphyse und Epiphyse räumlich voneinander getrennt (Smith 1968) und der Knochen wächst. Knorpel ist grundsätzlich ein weiches und stoffwechselaktiveres Gewebe als Knochen und daher bei Belastungen besonders empfindlich (Hertsch und Kroll 1999).

Auf Grund des Gewichtes und des lang anhaltenden Wachstums bis zum 30. Lebensmonat ist die Epiphysenfuge des distalen Radius eine der am meisten gefährdeten Wachstumsfugen des Pferdes (Auer 1999, Meyer 2003, Knottenbelt et al. 2004). So befindet sich die am häufigsten beobachtete Lokalisation von Fehlstellungen in diesem Bereich (Auer 1983, Knottenbelt und Pascoe 2000). Die Untersuchung dieser Bereiche findet routinemäßig mittels Röntgen statt, wobei hier der Knorpel nur indirekt dargestellt werden kann (Zacher und Gursche 2001). Die MRT stellt durch ihren hervorragenden Weichteilkontrast die beste verfügbare Technik zur Darstellung von gesundem und geschädigtem Knorpel dar (Jaramillo und Shapiro 1998). Auf Grund der Bedeutung der Epiphysenfuge des distalen

Radius, ihrer Nutzung als Kriterium für den Reifegrad des Skelettsystems und der hier häufig vorkommenden pathologischen Veränderungen (Vulcano 1997, Adams 1974, Mamprim et al. 1992, Gabel und Spencer 1977, Auer 1999, Knottenbelt 2000) erscheint es sinnvoll, eine altersbezogene Betrachtung dieser Region anzufertigen (Vrba 1999).

Zielsetzungen dieser Arbeit waren Darstellung und Abgrenzbarkeit der distalen Radiusepiphyse, der distalen radiären Epiphysenfuge und der Apophysenfuge zwischen Radius und Ulna mit Hilfe der MRT. Mögliche altersbedingte, strukturelle Veränderungen in Aufbau und Darstellbarkeit der distalen radiären Region sollten nachvollzogen und beschrieben werden.

Material und Methoden

Im Zeitraum Januar 2006 bis Januar 2008 wurde jeweils eine Vordergliedmaße von 28 Pferden untersucht. Die genutzten Gliedmaßen wurden von euthanasierten Patienten ohne Karpalgelenkerkrankung der Klinik für Pferde der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie der Tierärztlichen Klinik für Pferde in Aschheim gewonnen, welche ohne Bezug zum Karpalgelenk euthanasiert wurden. Die Geschlechterverteilung belief sich auf elf Stuten, elf Hengste und sechs Wallache. Insgesamt wurden 15 linke und 13 rechte Vorderextremitäten untersucht, die von 16 Warmblutpferden, drei Englischen Vollblütern, einem Araber, einem Isländer, einem Quarterhorse, einem Painthorse, einem Deutsches Reitpony, einem Traber, einem Pura Raza Espaniol, einem Camargue Pony und einem Kaltblut stammten.

Die Extremitäten wurden nach Euthanasie der Pferde ca. zehn Zentimeter proximal der *Articulatio antebrachioarpea* und etwa zehn Zentimeter distal der *Articulatio carpometacarpea* abgesetzt.

Um die im MRT definierten Schichten sicher einordnen zu können, wurde eine histologische Überprüfung der Knorpelbereiche vorgenommen. Drei Gliedmaßen unterschiedlichen Alters (fünf Monate, 14 Monate, 48 Monate) wurden gewählt und im Institut für Veterinärpathologie der Universität Leipzig makroskopisch und histologisch untersucht (Hämatoxylin und Eosin und mit PAS Alzian Blau) (Welsch 2010) und den MRT Bildern gegenübergestellt.

Für die MRT-Untersuchungen wurden 14 der entnommenen Proben innerhalb von 24 Stunden nach Euthanasie untersucht. 14 Gliedmaßenabschnitte wurden tiefgefroren (-20°C) und nach einer Auftauphase untersucht. Dabei wurden gefrorene Karpalgelenke vor der Untersuchung 24 Stunden bei gleicher Temperatur wie die nicht gefrorenen gelagert. Die Untersuchung erfolgte mittels 1,5 Tesla Magnetom "Symphony" (Siemens, Erlangen, Deutschland) und Kniespule in der Klinik für Pferde der LMU München. Verwendet wurden Sequenzen (T1w-Spinecho [T1w], T2w Turbospinecho [T2w], Protonendichte-Spinecho [PD] und T2 DESS Gradientenecho [T2 DESS]) in sagittalen und dorsalen Schnittebenen (Tab. 1). Je Wachstumsfuge wurden neun reproduzierbare Messpunkte zur Ermittlung der Knorpeldicke angesetzt. Jeder dieser Messpunkte wurde achtmal vermessen. Aufgrund der sehr guten bis guten Abgrenzbarkeit und der Detaillierbarkeit wurden die Messungen ausschließlich in den Sagittal- und Dorsalschnitten der T1w und T2 DESS durchgeführt. Die Messung der Knorpeldicke der Epiphysenfugen erfolgte mit dem DICOM Viewer JiveX[®] (VISUS Technology Transfer GmbH, Bochum, Deutschland). Die Ergebnisse der Messungen in der jeweiligen Sequenz wurden miteinander verglichen. Die Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS 15 (SPSS Software GmbH München, Deutschland). Korrelationen und Kurvenanpassung mit linearer Regression T1w * T2 DESS sowie Korrelationen und Kurvenanpassung Alter * Schichtdicke wurden mit der Potenzfunktion berechnet.

Tab. 1 Untersuchungsparameter im Überblick / *Scan protocols*

Sequenz	T1w-Spinecho	T2w- Turbospinecho	Protonendichte- Spinecho	T2 DESS-Gradientenecho
FOV	200	200	160	180
Matrix	250*250	250*250	250*250	250*250
TE	3,93	108	32	5,56
TR	1550	5190	3960	19,85
Flip	90°	180°	180°	20°
Schichtdicke	3	3	3	1

(FOV = field of view in mm, TE = Echozeit in mms, TR = Repetitionszeit in mms, Flip = Flip angle in°, Schichtdicke in mm)
(TE=echo time in mms, TR=repitition time in mms, slice thickness in mm)

Tab. 2 Kriterien der Gruppeneinteilung und Gruppenzuordnung des Probenmaterials / *Criteria of mapping of groups of the sample material*

	Kriterien	Alter
Gruppe 1	Bipolarität der Wachstumsfuge des distalen Radius, unausgereifte Ossifikationszentren der distalen Radiusepiphyse und des Ulnarudiments	2 Tage - 4 Wochen
Gruppe 2	Eigentliche Wachstumsfuge des distalen Radius durchgängig, Ossifikationszentrum der distalen Radiusepiphyse mit proximaler subchondraler Knochenplatte, Ulnarudiment mit Apophysenfuge	6 Wochen - 18 Wochen
Gruppe 3	Eigentliche Wachstumsfuge des distalen Radius durchgängig, geschlossene Apophysenfuge zwischen Ulnarudiment und distaler Radiusepiphyse	22 Wochen - 20 Monate
Gruppe 4	Teilweise geschlossene Epiphysenfuge des distalen Radius	24 Monate - 28 Monate
Gruppe 5	Geschlossene Epiphysenfuge des distalen Radius	34 Monate -

Ergebnisse

Bei den makroskopisch und histologisch untersuchten Gliedmaßenabschnitten konnten die zu erwartenden anatomischen Strukturen und Gewebetypen mit den MRT-Bildern abgeglichen werden (Abb. 1a und b). Anhand der erhaltenen magnetresonanztomographischen Abbildungen der Wachstumsregion konnten die untersuchten Gliedmaßenabschnitte in einem Alter von zwei Tagen bis 17 Jahren in fünf Gruppen eingeteilt werden (Tab. 2). Dabei erwies sich die Einteilung anhand ähnlicher Kriterien für die Altersgruppen zwei Tage bis vier Wochen, sechs Wochen bis 18 Wochen (1,5 bis 4,5 Monate), 22 Wochen (5,5 Monate) bis 20 Monate, 24-28 Monate (2 bis 2,3 Jahre) und ab 34 Monate (2,8 Jahre) als optimal.

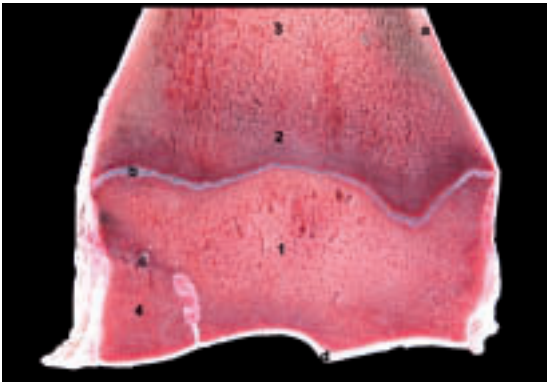


Abb. 1a Makroskopischer Schnitt eines rechten distalen Radius eines 14 Monate alten Pferdes. (links = lateral), 1 Epiphyse, 2 Metaphyse, 3 Diaphyse, 4 Ulnarudiment, a Kortikalis, b Epiphysenfugenknorpel, c Gelenknorpel.

Macroscopic section of a right distal radius of a 14 months old horse (left = lateral), 1 physis, 2 metaphysis, 3 diaphysis, 4 rudiment of ulna, a cortical bone, b cartilage of physis, c cartilage of joint

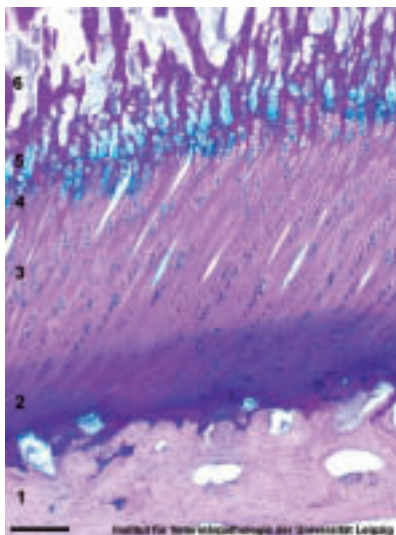


Abb. 1b Histologischer Schnitt der Epiphysenfuge eines distalen Radius eines 14 Monate alten Pferdes (Alcianblau-PAS; Bar = 200µm). 1 Epiphyse, 2 Reservezone, 3 Proliferationszone, 4 Hypertrophe Zone, 5 Mineralisationszone, 6 Öffnungszone. Die Mineralisationszone erscheint im MRT Bild hypointens.

Histologic section of the physis of a 14 months old horse. (Alcianblau-PAS; Bar = 200µm). 1 physis, 2 resting zone, 3 proliferative zone, 4 hypertrophic zone, 5 calcification zone, 6 erosion zone. The zone of provisional calcification is conspicuous hypointense.

Bei Pferden bis zu einem Alter von vier Wochen der Gruppe 1 stellte sich der knorpelige Anteil der Epiphyse in T1w mit homogenem hell-intermediärem Signal und in T2w wenig hyperintens zum Knochen In einigen Bereichen konnte dieser hyperintens erscheinende Knorpel der sphärischen Wachstumsfuge dargestellt werden. Eine gute Abgrenzbarkeit zur knöchernen Epiphyse und zum restlichen hell-intermediär bis intermediär erscheinenden Knorpel war nicht immer gegeben.

In der T1w konnte am distalen Radius ein leichter Intensitätsunterschied in der bipolaren Wachstumsfuge mit schlecht abgrenzbarem intermediärem Signal im proximalen Bereich gesehen werden. Nach proximal fand der Epiphysenfugenknorpel eine gute Abgrenzung durch das dunkel-intermediäre bis schwarze Signal der Mineralisationszone. Diese Zone konnte in allen Wichtungen bis auf T2 DESS dargestellt werden.

Das distale Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna erschien in der T1w der Abbildungen der Gruppe 1 solitär und von Wachstumsknorpel hell-intermediärer Signalintensität umgeben. In T2w nahm der Knorpel intermediäre Signalintensität an, in der PD hell-intermediäre und in T2 DESS intermediäre Intensität.

In Gruppe 2 entstand ab einem Alter von sechs Wochen mit fortschreitender Reife der Epiphysenfugen auf epiphysärer Seite eine subchondrale Knochenplatte. In der T1w und der T2w stellte sich der Epiphysenfugenknorpel als hell-intermediäres Band zwischen den schwarz erscheinenden Strukturen der Mineralisationszone und dem ebenfalls schwarzen Signal der subchondralen Knochenplatte dar. Das distale Ossifikationszentrum der rudimentären Ulna erschien in der T1w durch eine Apophysenfuge von der distalen Epiphyse des Radius getrennt. Das Signal des Apophysenfugenknorpels war von der gleichen Signalintensität wie das des Radius epiphysenfugenknorpels.

Die Epiphysenfuge des distalen Radius der Gruppe 3 der 22 Wochen bis 20 Monate alten Pferde stellte sich wie die der Gruppe 2 dar. Jedoch war eine Apophysenfugenarbe zwischen dem rudimentären Anteil der distalen Ulna und der distalen Epiphyse des Radius erkennbar, welche sich in der T1w mit hypointensem Signal und in der T2w mit dunkel-intermediärem bis hypointensem Signal abzeichnete. Die Darstellung des solitär liegenden Verknöcherungskerns der rudimentären Ulna gelang in allen angewandten Sequenzen.

In Gruppe 4 der 24-28 Monate alten Pferde erwies sich die Darstellung um den Schließungszeitpunkt sehr unterschiedlich. In den T1w und T2w konnten Teile des Knorpels in lateralen und medialen Bereichen der Epiphysenfugen nachvollzogen werden. Die PD eignete sich nicht zur Beschreibung der Epiphysenfuge um den Fusionszeitpunkt. In der T2 DESS war trotz klarer Abwesenheit von Epiphysenfugenknorpel im Zentrum der Fuge in den Grundsequenzen weiterhin ein durchgängiges hell-intermediäres Signal im Bereich der Wachstumsfuge zu erkennen.

Die Abbildungen der distalen Radii in der T1w und der T2w der Gruppe 5 wiesen ab einem Alter von 34 Monaten unter-

schiedlich schlecht abgrenzbare Epiphysenfugennarben mit dunkel-intermediärem bis hypointensem Signal auf. Bei PD erschien ein hell intermediäres Signal, während sie in der T2 DESS signallos und schlecht abgrenzbar oder gar nicht dargestellt werden konnten. Die geringe Darstellbarkeit ist der

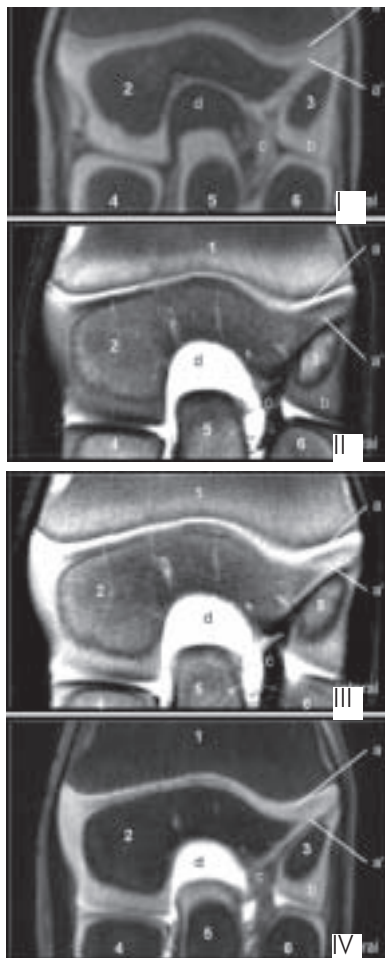


Abb.2 Dorsalschnitte der epiphysären Region in I) T1-, II) T2-, III) PD- und IV) T2 DESS-gewichteten Bildern, linke Vordergliedmaße einer 2 Tage alten Stute. 1 Radiäre Diaphyse, 2 Radiäre Epiphyse, 3 Rudimentäre Ulna, 4 Os carpi radiale, 5 Os carpi intermedium, 6 Os carpi ulnare, a+a' Bipolare Epiphysenfuge, a Eigentlicher Fugenknorpel, a' Wachstumsknorpel Epiphyse, b Wachstumsknorpel Ulna

Dorsal section of the physeal region in I) T1-, II) T2-, PD- and IV) T2 DESS-weighted images, left front limb of a two days old mare. 1 diaphysis of radius, 2 physis of radius, 3 rudiment of ulna, 4 radial carpal bone, 5 intermedial carpal bone, 6 ulnar carpal bone, a+a' bipolar physis, a physeal cartilage, a' epiphyseal cartilage, b cartilage of ulna

dunkel-intermediär erscheinenden Spongiosa des distalen Radius zuzuschreiben.

Die unterschiedlichen Strukturen in diesem Bereich werden in Tab. 3 anhand von Signalintensitäten charakterisiert. Dabei stellt sich der hyaline Knorpel des Gelenkes und der Wachstumsfugen hell intermediär in T1w und intermediär in den anderen Sequenzen dar und kann gut gegen den in allen Sequenzen hypointens erscheinenden subchondralen Knochen abgegrenzt werden.

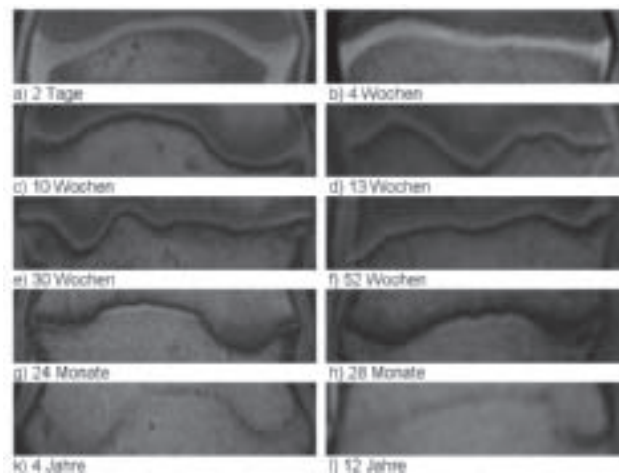


Abb. 3 Epiphysenfugen des distalen Radius unterschiedlichen Alters in der T1w, links = Dorsalschnitte, rechts = Sagittalschnitte. a und b Gruppe 1; c und d Gruppe 2; e und f Gruppe 3; g und h Gruppe 4; k und l Gruppe 5.

Physis of the distal radius in different ages in T1w, links = dorsal, right = sagittal. a and b group 1; c and d group 2; e and f group 3; g and h group 4; k and i group 5.

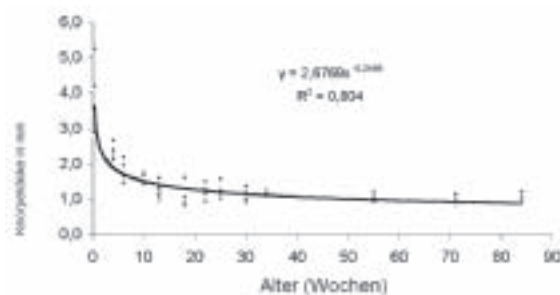


Abb. 4 Korrelationskurve der Dicke des Epiphysenfugenknorpels zum Alter der untersuchten Gliedmaßen (N=13). *Correlation curve of the physeal cartilage in relation to the age of the examined limb (n=13)*

Tab. 3 Signalintensitäten der verschiedenen Strukturen der karpalen Region in unterschiedlichen MRT Sequenzen
Signal intensities of the carpal structures in different mri sequences

	T1w SE	T2w TSE	PD SE	T2 DESS GE
Hyaliner Knorpel des Gelenkes und der Wachstumsfugen	HI - I	I	I	I
Subchondraler Knochen/Kortikalis	S	S	S	S
Spongiosa	I-HI	I	DI	DI
Synovia	DI	W	W	HI - W
Bindegewebe	W	HI - DI	HI - I	HI - DI
Bänder	HI - I	I - S	I - S	HI - DI

(W weiß/hyperintens, HI hell-intermediär, I intermediär, DI dunkel-intermediär, S schwarz/hypointens)

(W white/hyperintense, HI bright-intermediat, I intermediate, DI dark-intermediate, S black/hypointense)

Die Darstellungsmöglichkeit der untersuchten Gliedmaßen im MRT wird in Abb. 2 in vier Sequenzen gezeigt. In Abb. 3 erfolgt eine Übersicht der distalen radiären Region in den fünf zugeordneten Gruppen. Ab einem Alter von zwei Tagen bis 10 Wochen kann die Abnahme der Dicke des Epiphysenfugenknorpels von 3,8 mm auf 1 mm verfolgt werden. Dies ist graphisch in Abb. 4 dargestellt. Bis zu einem Alter von zehn Wochen ist eine schnelle Abnahme der Knorpeldicke nachzuvollziehen. Ab einem Alter von 13 Wochen nimmt die Dicke weiter kontinuierlich jedoch deutlich langsamer ab. Bei den Gliedmaßen bis zu einem Alter von 20 Monaten konnte der Epiphysenfugenknorpel als durchgängige Linie dargestellt werden.



Abb. 5 Vergleich eines rechten Karpalgelenkes eines 3 Wochen alten Warmblutpferdes im AP Röntgenbild (links) und im T1-gewichteten dorsalem MRT Schnittbild (rechts). a, a' Epiphysenfuge, b, b' Ulnarudiment, c, c' Gelenkhöhle.

Comparison of a right Carpus of a 3 year old Warmblood in an AP x-ray image (left) and a T1-weighted dorsal MRI slice (right). a, a' Physis, b, b' rudimentary Ulna, c, c' joint cavity.

genknorpels von 3,8 mm auf 1 mm verfolgt werden. Dies ist graphisch in Abb. 4 dargestellt. Bis zu einem Alter von zehn Wochen ist eine schnelle Abnahme der Knorpeldicke nachzuvollziehen. Ab einem Alter von 13 Wochen nimmt die Dicke weiter kontinuierlich jedoch deutlich langsamer ab. Bei den Gliedmaßen bis zu einem Alter von 20 Monaten konnte der Epiphysenfugenknorpel als durchgängige Linie dargestellt werden.

Diskussion

Die Wachstumsknorpel der distalen radiären Region des Pferdes konnten wie erwartet mit Hilfe der MRT hervorragend dargestellt werden. Generell kann hyaliner Knorpel im MRT gut abgebildet werden. Probleme entstehen beim Pferd dann, wenn er zu dünn ist und schlecht von der Synovia abgegrenzt werden kann (Olive 2010). Der große Vorteil der Abbildung von Fugenknorpel besteht darin, dass er nicht gegen Synovia abgegrenzt werden muss. Dadurch hat sich die MRT zu einer wichtigen Methode für die Evaluierung von Wachstumsfugen qualifiziert (Jaramillo und Shapiro 1998, Jaramillo et al. 1990a, 1990b, Jaramillo und Hoffer 1992, Harcke et al. 1992, Cairns 2003, Havesi et al. 2004, Stock 2005, Babyn et al. 1996, Brühshwein 2005, Lempe 2007, Vrba 1999).

Die in dieser Studie verwendeten Sequenzen werden in der Literatur für die Untersuchung von hyalinem Knorpel empfohlen (Fellner und Schmitt 2004) und waren für die ausgewählten Bereiche gut geeignet. Die PD-Sequenz wurde als sehr kontrastreiche Sequenz beschrieben, die gut zur Differenzierung von Weichteilstrukturen geeignet ist (Kleiter 1996, Latorre et al. 2006, Werby 2004). In den vorliegenden Untersuchungen konnte dieser gute Weichteilkontrast bestätigt werden. Die T2 DESS erwies sich als nützlich für die Defekterkennung im

Gelenkbereich (Imhof et al. 2002) und zum hoch spezifischen Nachweis von Frakturen unter Beteiligung der Wachstumsfuge (Stock 2005). Diese Sequenz kombiniert zwei Echos und verbessert den T2-Kontrast (Welsch et al. 2009). Der Epiphysenfugenknorpel konnte damit klar abgegrenzt werden, was besonders für weiterführende Untersuchungen an erkrankten Knorpelabschnitten beim Pferd von Interesse sein könnte.

Mit Hilfe dieser verwendeten Sequenzen konnte in Anlehnung an die Röntgenologie (Mason und Bourke 1973, Banks et al. 1969, Gabel et al. 1977) eine Gruppeneinteilung im Bereich der Wachstumszonen vorgenommen werden. Pferde bis zu einem Alter von vier Wochen wurden Gruppe 1 zugeordnet. Das homogene hell-intermediären Signal in T1w und das wenig hyperintens zum Knochen erscheinende in T2w stimmt mit Angaben aus der Literatur überein (Babyn et al. 1995, Cairns 2003, Jaramillo und Hoffer 1992, Jaramillo et al. 1998). Der von Jeffcot (1991) als articular epiphyseal cartilage complex (AECC) beschriebene knorpelige Anteil der Epiphyse ließ sich am distalen Radius gut darstellen. Dieser beinhaltet konzentrische Lagen hyalinen Knorpels, welche den Ossifikationskern umgeben (Ogden 1990) und gelenkwärts von Gelenkknorpel überzogen sind. Die innere knorpelige Lage ist dem Epiphysenfugenknorpel ähnlich und ist für das Wachstum des Ossifikationszentrums verantwortlich (Ogden 1990, Jeffcot 1991). Ogden (1990) benannte sie als sphärische Wachstumsplatte. In einigen Bereichen konnte dieser hyperintens erscheinende Knorpel der sphärischen Wachstumsfuge dargestellt werden.

Am distalen Radius konnte in T1w ein leichter Intensitätsunterschied in der bipolaren Wachstumsfuge im proximalen Bereich gesehen werden. Mit diesem Signalunterschied wurde die Wachstumsfuge bei Neugeborenen in verschiedenen Studien beschrieben (Jaramillo und Hoffer 1992, Jaramillo et al. 1998, Babyn 1995). Die bipolare Wachstumszone setzt sich aus epiphysärem Wachstumsknorpel der der Epiphyse zugewandten Seite sowie dem Epiphysenfugenknorpel der der Diaphyse zugewandten Seite zusammen (Frith 1996, Moss-Sallentijn 1976, Wasmer und Pförringer 1987). Beides besteht aus hyalinem Knorpel, wobei die T2 im Knorpel der der Diaphyse zugewandten Seite niedriger ist. Als Ursache wird ein Unterschied in der Wasserbindung oder Anteil von freiem Wasser und unterschiedlicher Zellgehalt vermutet (Brighton 1984, Jaramillo et al. 1998b).

In Gruppe 2 war der Epiphysenfugenknorpel in Übereinstimmung mit Jaramillo et al. (1990a, 1990b) als hell-intermediäres Band zwischen den Strukturen der Mineralisationszone und dem schwarzen Signal der subchondralen Knochenplatte sichtbar. Auch Havesi et al. (2004) beschrieben die Wachstumsbereiche bei ihren Untersuchungen an neugeborenen Fohlen als hell-intermediäre bis intermediäre Struktur. Die mit fortschreitender Reife der Epiphyse entstehende subchondrale Knochenplatte auf der epiphysären Seite der Wachstumsfuge (Frith 1996) war bei den untersuchten Pferden ab einem Alter von sechs Wochen zu erkennen, am deutlichsten in der T1w. Beim Fohlen wurde das Alter des Auftretens der Knochenplatte noch nicht festgelegt (Frith 1996). Die Ansicht von Frith (1996), dass der Zeitpunkt des Auftretens der Knochenplatte mit dem Verschwinden der Bipolarität der Epiphysenfuge gleichgesetzt wird, konnte insofern bestätigt werden, als dass sich der Epiphysenfugenknorpel bei den Untersuchungen ab

einem Alter von sechs Wochen vornehmlich mit homogenem hellen Signal darstellte.

Bis zu einem Alter von 18 Wochen konnte die Apophyse von der Epiphyse des Radius vollständig abgegrenzt werden. Die Fusion der beiden knöchernen Elemente lag damit geringfügig früher als röntgenologisch von Meyers und Emerson (1966) und weitaus später als anatomisch von Lesbre (1897) und Sisson (1914) festgestellt. Die Epiphysenfuge des distalen Radius der Gruppe 3 stellte sich wie die der Gruppe 2 dar. Die vorgefundene Apophysenfugennarbe wurde ebenfalls von Lempe (2007) und Brühshwein (2005) beschrieben.

In Gruppe 4 waren nur noch wenige Knorpelanteile in lateralen und medialen Bereichen der Epiphysenfugen nachweisbar, wie dies auch bei Cairns (2003) und Harcke et al. (1992) beschrieben wurden. Dies ist mit der Aussage zu erklären, dass die Fugen zuerst zentral fusionieren und später in der Peripherie (Gabel und Spencer 1977).

Die Abwesenheit von knorpeligen Strukturen im Bereich der Epiphysenfuge bei den untersuchten Materialien ab einem Alter von 34 Monaten der Gruppe 5 bestätigt den röntgenologisch festgelegten Zeitpunkt des Fugenschlusses des distalen Radius bis zu einem Alter von maximal 30 Monaten (Adams 1974). Der von einigen Autoren (Zietschmann und Krölling 1955, Lesbre 1897, Sisson 1914) mit ca. 42 Monaten anatomisch festgelegte Zeitpunkt des Fugenschlusses des distalen Radius kann durch die magnetresonanztomographischen Untersuchungen dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Alle untersuchten Materialien wiesen bereits ab einem Alter von 34 Monaten nur noch Epiphysenfugennarben auf.

Im Vergleich zu den in der Literatur beschriebenen röntgenologischen Darstellungen der Epiphysenfugen erscheint die MRT klar im Vorteil. Knorpelige Strukturen können genau dargestellt und teilweise in unterschiedliche Zonen eingeteilt werden. Außerdem ermöglicht die MRT eine überlagerungsfreie Abbildung der Epiphysenfugen (Abb. 5).

Laut Hartung (1999), Vulcano et al. (1997) sowie Meyers und Emmerson (1966) bestehen sowohl geschlechtsspezifische als auch rassespezifische Unterschiede im Schließungszeitpunkt der Epiphysenfugen. Da das Ziel der vorliegenden Studie nicht die Bestimmung des Schließungszeitpunktes der distalen Epiphysenfuge des Radius war, wurde kein Wert auf die Verteilung der Rasse und des Geschlechts gelegt.

Kritisch kann die ungleiche Vorbehandlung angemerkt werden. Es existieren Untersuchungen (Murray et al. 2006) bei denen keine Unterschiede in ante und post mortem Untersuchungen in der MRT Darstellung nach dem Einfrieren und Auftauen festgestellt wurden. Auch die Lagerung bei 4°C ergab keine subjektiven Änderungen des MRT-Bildes (Bolen et al. 2010).

Obwohl die am meisten beobachtete Lokalisation von Fehlstellungen im Bereich des Karpalgelenkes liegt (Auer et al. 1983, Knottenbelt und Pascoe 2000) erscheint es sinnvoll auch die physiologischen anatomischen Verhältnisse der Wachstumsknorpel weiterer Gelenke im MRT zu spezifizieren. Auch die Epiphysenfugen der Tarsal- und Fesselgelenke zeigen Anfälligkeiten für Wachstumsstörungen, Traumata und

Dysplasien, welche primär aber auch sekundär, aus fehlgeleiteten biomechanischen Kräften der ihr angeschlossenen Gelenke, entstehen können.

Durch den meist hohen personellen und technischen Aufwand einer MRT-Untersuchung in Narkose ist trotz der herausragenden Bildgebung eine genaue Abschätzung nötig, um die Wirtschaftlichkeit und den medizinischen Nutzen zu rechtfertigen. In Zukunft sind allerdings mehr Untersuchungen am stehenden Pferd zu erwarten, so dass Aussicht besteht, die MRT in die spezialisierte Diagnostik in einem weit größeren Umfang als bisher möglich einzuführen. Darstellung und Abgrenzbarkeit der distalen Radiusepiphyse, der distalen radiären Epiphysenfuge und der Apophysenfuge zwischen Radius und Ulna konnten qualitativ hochwertig mit Hilfe der Magnetresonanztomographie in allen verwendeten Sequenzen der vorliegenden Arbeit definiert werden. Altersbedingte, strukturelle Veränderungen im Aufbau und der Darstellbarkeit der distalen radiären Region wurden mit Hilfe der Magnetresonanztomographie erfasst. Die Diagnostik entwicklungsassoziierter Pathologien in dieser Region kann damit zukünftig revolutioniert werden.

Literatur

- Adams O. R. (1974) Radiographic determination of bone maturity as a guide to training horses. Adams' Lameness in the Horse, Adams O.R., Lea & Febriger Philadelphia, 3rd ed., 465-467
- Auer J. A., Martens R. J. und Morris E. L. (1983) Angular limb deformities in Foals - Part II. Developmental factors, Compend. Contin. Educ. Pract. Vet. 5, 527-535
- Auer J. A. (1999) Angular limb deformities. In., Auer J.A. und Stick J.A. Equine Surgery WB Saunders co. Philadelphia, 2nd ed., 736-752
- Babyn A., Kim H. K. W., Lemaire C., Gahunia H. K., Cross A., De Nanassy J. und Pritzker K. P. (1996) High-resolution magnetic resonance imaging of the normal porcine cartilaginous epiphyseal maturation. J. Magn. Reson. Imag. 6, 172-179
- Banks W.C., Kemler A. G., Guttridge H. und Kirkham W. (1969) Radiography of the Tuber calcis and its use in Thoroughbred training. Proc. Am. Ass. Equine Practnrs. 15, 273-293
- Bolen G., Haye D., Dondelinger R. und Busoni V. (2010) Magnetic resonance signal changes during time in equine limbs refrigerated at 4°C. Vet. Radiol. Ultras. 51, 19-24
- Brighton C. T. (1984) The growth plate. Orthop. Clin. North Am. 15, 571-595
- Brühshwein A. (2005) Anatomische Darstellung des caninen Karpalgelenkes mittels Magnetresonanztomographie und Computertomographie unter besonderer Berücksichtigung der Weichteilstrukturen [Dissertation med. vet.]. München: LMU München
- Cairns R. (2003) Magnetic resonance imaging of the growth plate: pictorial essay. Can. Assoc. Radiol. J. 54, 234-242
- Fellner F. und Schmitt R. (2004) Magnetresonanztomographie, Bildgebende Diagnostik der Hand. Schmitt, R. und Lanz U., Thieme Stuttgart, 2. Aufl., 73-94
- Frith E. C. (1996) Functional joint anatomy and its development. Joint disease in the horse, McIlwraith C.W. und Trotter G.W., WB Saunders Co. Philadelphia, 80-87
- Gabel A. A., Spencer C. P. und Pipers F. S. (1977) A study of correlation of closure of the distal radial physis with performance and injury in standardbred. J. Am. Vet. Med. Assoc. 170, 188-194
- Harcke H. T., Synder M., Caro P. A. und Bowen J. R. (1992) Growth plate off he normal knee: Evaluation with MR Imaging. Radiology 183, 119-123
- Hartung K. (1999) Röntgenuntersuchung, Handbuch Pferdepraxis. Dietz O. und Huskamp B., Enke Stuttgart, 15-25

- Havesi A., Staneck C. H., Garamvolgy R., Petrasi Z., Bogner P. und Repa I. (2004) Comparison of the navicular region of newborn foals and adult horses by magnetic resonance imaging. *J. Vet. Med. A* 51, 143-149
- Hertsch B. und Kroll S. (1999) Skelettreife bei Fohlen. *Göttinger Pferdetafeln* 1999, 215-222
- Huskamp B., Dämmrich K., Erbslöh J. und Jeffcott L. B. (1996) Skelettreife und Trainingsbeginn bei Vollblutpferden unter besonderer Berücksichtigung des Tierschutzgesetzes. HRSG.: Direktorium für Vollblutzucht und Rennen, wak Verlag und Kunstberatung München
- Imhof H., Nobauer-Huhmann I. M., Krestan C., Gahleitner A., Ulzbacher I., Marlovits S. und Trattnig S. (2002) MRI of the cartilage. *Eur. Radiol.* 12, 2781-2793
- Jaramillo D., Shapiro F., Hoffer F. A., Winaiski C. S., Koskinen M. F., Frasso R. und Johnson A. (1990a) Posttraumatic growth plate abnormalities: MR Imaging of bony-bridge formation in rabbits. *Radiology* 175, 767-773
- Jaramillo D., Hoffer F. A., Shapiro F. und Rand F. (1990b) MR imaging of fractures of the growth plate. *A. J. R.* 155, 1261-1265
- Jaramillo D. und Hoffer F. A. (1992) Cartilaginous epiphysis and growthplate: normal and abnormal MR imaging findings. *Am. J. Roentgenol.* 158, 1105-1110
- Jaramillo D. und Shapiro F. (1998) Growth cartilage: normal appearance, variants and abnormalities. *Magn. Reson. Imaging Clin. North Am.* 6, 455-471
- Jaramillo D., Connolly S. A., Mulkern R. V. und Shapiro F. (1998b) Developing epiphysis: MR imaging characteristics and histologic correlation in the newborn lamb. *Radiology*. 207, 647-645
- Jeffcott L. B. (1991) Osteochondrosis in the horse - searching for the key to pathogenesis. *Equine Vet. J.* 23, 331-338
- Kleiter M. (1996), Vergleich von Computertomographie, Magnetresonanztomographie und konventioneller Röntgenuntersuchung an der Zehe des Pferdes. *Diss. Med. Vet. Wien*
- Knottenbelt D. C. und Pascoe R. (2000) Entwicklungsstörungen. In: Knottenbelt D.C. und Pascoe R., *Farbatlas der Pferdekrankheiten*, Schlütersche Hannover, 2. Aufl., 209-217
- Knottenbelt D. C., Holdstock N. und Madigan J. (2004) Lahmheiten und andere Bewegungsstörungen. In: Knottenbelt D.C., *Neonatalogie der Pferde*, Urban & Fischer München, 1. Aufl., 369-391
- Laor T. und Jaramillo D. (2009) MR Imaging Insights into Skeletal Maturation: What Is Normal? *Radiology*, 250, 28-38
- Latorre R., Arencibia A., Gil F., Rivero M., Henry R. W., Ramirez G. und Vaquez J. M. (2006) Correlation of magnetic resonance images with anatomic features of the equine tarsus. *Am. J. Vet. Res.* 67, 756-761
- Lempe A. (2007) Vergleichende magnetresonanztomographische Untersuchung am plantaren Aspekt des Tarsus des Pferdes - Sonographische und histologische Korrelation des Musculus interosseus medius an der Hintergliedmasse des Pferdes. *Diss. Med. Vet. Leipzig*
- Lesbre M. F. (1897) Contribution à l'étude de l'ossification du squelette des mammifères domestiques, principalement aux points de vue de sa marche et de sa chronologie. *Ann. de la société d'agric. de sci. et d'indust.* 5, 7 série
- Mamprim M. J., Vulcano L. C. und Muniz L. M. R. (1983) Estudio radiográfico do fechamento da epífise distal do rtoio emportas da raça manga- larga, *Vet. E. Zoot.* 4, 59-62
- Mason T. A. und Bourke J. M. (1973) Closure of the distal radial epiphysis and its relationship to unsoundness in two year old thoroughbreds. *Aust. Vet. J.* 49, 221-228
- Meyer P. G. (2003) Genetische Analyse von angeborenen Anomalien der Gliedmaßen und der Osteochondrose (OC) beim Süddeutschen Kaltblut. *Diss. Med. Vet. Hannover*
- Meyers V. S. und Emmerson M. A. (1966) The age and manner of epiphyseal closure in the forelegs of two arabian foals. *Vet. Radiol. Ultras.* 7, 39-47
- Moss-Sallentijn A. G. M. (1976) The epiphyseal vascularisation of the growth plates : A developmental study in the rabbit [PHD-Thesis]. Utrecht: State University of Utrecht
- Murray R., Schramme M., Dyson S., Branch M. und Blunden T. (2006) Magnetic resonance imaging characteristics of the foot in horses with palmar foot pain and control horses. *Vet. Radiol. Ultras.* 47,1-16
- Nickel R., Schummer A., Wille K. H. und Wilkens H. (1992) Entwicklung und Wachstum des knöchernen Skeletts. *Lehrbuch der Anatomie der Haustiere*, Nickel R., Schummer A. und Seiferle E., Paul Parey Berlin, Band 1, 6. Aufl., 16-24
- Ogden J. A. (1990) Anatomy and physiology of skeletal development. *Skeletal injury in the child*, Ogden J.A., WB Saunders co. Philadelphia, 2nd ed., 23-63
- Olive J. (2010) Distal interphalangeal articular cartilage assessment using low-field Magnetic resonance imaging. *Vet. Radiol. Ultras.* 51, 259-266
- Sisson S. (1914) The bones of the thoracic limb. The anatomy of the domestic animals, Sisson S., WB Saunders co. Philadelphia, 2nd ed., 86-105
- Stock K. (2005) Die Magnetresonanztomographie beim Trauma des oberen Sprunggelenks im Kindesalter im Vergleich mit klinischem Befund und Röntgenbild. *Diss. Med. Halle*
- Smith R. N. (1968) The developing skeleton. First international conference of veterinary radiologists, Dublin, 30-36
- Vulcano L. C., Mamprim M. J. und Muniz L. M. R. (1997) Radiographic study of distal radial physeal closure in thoroughbred horses. *Vet. Radiol. Ultras.* 38, 352-354
- Vrba S. (1999) Magnetresonanztomographische Untersuchungen am Karpus des Pferdes. *Diss. Med. Vet. Wien*
- Wasmer G. und Pförringer W. (1987) Ultrastruktur und Biochemie der Epiphysenfugen. Die Epiphysenfugen, Pförringer W. und Rosmeyer B., Perimed Fachbuch-Verlagsgesellschaft Erlangen, 1. Aufl., 25-52
- Welsch G. H., Scheffler K., Mamisch T. C., Hughes T., Millington S., Deimling M. und Trattnig S. (2009) Rapid estimation of cartilage T2 based on double echo at steady state (DESS) with 3 Tesla, *Magn. Reson. Med.* 62, 544-549
- Welsch U. (2010) Färbemethoden. In: Mulisch M. und Welsch U. *Romeis Mikroskopische Technik*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 18 Aufl., 198-281
- Werby N. (2004) Magnetic resonance imaging for diagnosis of soft tissue and osseous injuries in the horse. *Clin. Tech. Equine Pract.* 3, 389-398
- Zacher J. und Gursche A. (2001) Diagnostik der Arthrose. *Orthopädie* 30, 841-847
- Zietschmann O. und Krölling O. (1955) Die Entwicklung des Bewegungsapparates. In: Zietschmann O. und Krölling O., *Lehrbuch der Entwicklungsgeschichte der Haustiere*. Paul Parey Berlin, 2. Aufl., 316-369

Dr. Kerstin Gerlach
Chirurgische Tierklinik der Universität Leipzig
An den Tierkliniken 21
04103 Leipzig
gerlach@vetmed.uni-leipzig.de