

Das Hufkissen des Pferdes: Eine federnd-elastische Struktur im Zehenendorgan

Judith Wilhelm¹, Alexander Probst², Kirsti Witter¹, Rudolf Macher², Zbynek Tonar³, Klaus-Dieter Budras⁴ und Horst Erich König²

Department für Pathobiologie (Institut für Histologie und Embryologie¹ und Institut für Anatomie² der Veterinärmedizinischen Universität Wien, Institut für Histologie und Embryologie, Medizinische Fakultät Pilsen der Karls-Universität Prag³ und Institut für Veterinär-Anatomie der Freien Universität Berlin⁴)

Zusammenfassung

Das Hufkissen gehört neben Hufkapsel und Hufknorpel zu den stoßbrechenden Einrichtungen des Pferdehufes. Es ist durch Bänder und derbe Faserzüge fest in den umliegenden Strukturen verankert. Der zwischen den Trachten gelegene Teil des Hufkissens, das Ballenkissen, ist aufgrund der Hufmechanik wesentlich stärkeren Formveränderungen unterworfen als das Strahlkissen. Es ist nicht bekannt, ob sich die unterschiedliche mechanische Belastung der Abschnitte des Hufkissens in unterschiedlicher Verankerung und unterschiedlichem Aufbau widerspiegelt. Die Beantwortung dieser Fragen war Ziel dieser Arbeit. Jeweils 20 Zehenendorgane von 0,5-28 Jahre alten Pferden wurden makroskopisch und histologisch untersucht. Die quantitative Zusammensetzung von Strahl- und Ballenkissen bei jungen und alten Pferden wurde mit der Cavalieri-Methode, einer auf Schnittanalysen basierenden stereologischen Methode zur Volumenschätzung, bestimmt. Das derbe Strahlkissen und das weiche, elastische Ballenkissen unterschieden sich bereits makroskopisch. Vorwiegend in Richtung der Zehenchse verlaufende Faserplatten fanden sich auf der palmaren bzw. plantaren Seite des Strahlkissens. Das Ballenkissen war durch Ligg. chondropulvinalia und durch fingerförmige Verzahnungen mit dem Hufknorpel verbunden. Das Hufkissen setzte sich aus 39,3% straffem, kollagenem Bindegewebe, 37,6% Gewebe mit hyaluronsäurereicher Matrix, 17,4% elastischem Fasermaterial und 5,7% Fett zusammen. Kollagenes Bindegewebe befand sich vorwiegend im Strahlkissen. Das Ballenkissen von Fohlen enthielt mehr Fettgewebe als das adulter Pferde, wo es durch straffes kollagenes Bindegewebe und Gewebe mit hyaluronsäurereicher Matrix ersetzt wurde. Elastische Fasern befanden sich vorwiegend im Ballenkissen und in der Übergangszone zum Strahlkissen. Die Zusammensetzung des Hufkissens variierte individuell stark, vermutlich in Zusammenhang mit der unterschiedlichen Arbeitsbelastung der untersuchten Pferde. Um Aussagen zu belastungsbedingten Umbauvorgängen im Hufkissen treffen zu können, sind weitere Untersuchungen an möglichst gleichartig genutzten Tieren notwendig.

Schlüsselwörter: Pferd, Hufkissenbänder, myxoides Gewebe, Stereologie, Cavalieri-Methode.

Digital cushions in horses: An elastic component of the equine digital organ

The digital cushion in horses, hoof, and hoof cartilage are structures reducing mechanical loads. The digital cushion is fixed to adjacent structures by ligaments and thick fibre bundles. The pars torica of the digital cushion is localised between the heels, the pars cunealis is underlying the frog. Due to the hoof mechanism during locomotion, the pars torica undergoes more significant deformation than the pars cunealis. It is unknown whether different mechanical loads result in a different structure and fixation of the individual parts of the digital cushion. The aim of our study was to answer these questions. Digital organs of horses with an age of 0.5-28 years were examined macroscopically (n=20) and microscopically (n=20). The quantitative composition of the pars cunealis and the pars torica of the digital cushion in young and adult horses was assessed by the Cavalieri method, a stereological method for volume estimation based on section analysis. The compact pars cunealis and the soft-elastic pars torica already differed macroscopically. On the palmar/plantar side of the pars cunealis, massive fibre layers were predominantly directed towards the toe axis. The pars torica was fixed to the hoof cartilages by chondropulvinal ligaments and finger-shaped interdigitations. The digital cushion contained 39.3% dense, irregular, connective tissue, 37.6% tissue with matrix rich in hyaluronic acid, 17.4% elastic fibres and 5.7% adipose tissue. Dense connective tissue was found mainly in the pars cunealis. In foals, the pars torica contained more adipose tissue than in adult horses, where it was replaced by dense connective tissue and tissue with a hyaluronic-acid rich matrix. Elastic fibres were mainly detected in the pars torica and the transition zone between pars torica and pars cunealis. The composition of the digital cushion varied individually, probably due to different work loads and purposes of use of the examined horses. Further studies, preferentially in horses under the same training conditions are necessary to obtain information on the influence of mechanical loads on the inner structure of digital cushions.

Keywords: horse, ligaments of the digital cushion, myxoid tissue, stereology, Cavalieri-Method.

Einleitung

Das Pferd, ein Zehenspitzenrandgänger, benötigt effektivere Einrichtungen zur Stoßbrechung als andere Spezies, die mit mehreren Zehen Bodenkontakt aufnehmen. Dabei kommt dem vollständig von der Hufkapsel ummantelten Hufkissen in Verbindung mit den Hufknorpeln eine herausragende Rolle zu (Egerbacher et al. 2005, König et al. 2003).

Das Hufkissen gliedert sich in das apikal gelegene Strahl- und das palmar bzw. plantar gelegene Ballenkissen (Pars cunealis und Pars torica) (Dyce et al. 2002, Habermehl 1996, König und Liebich 2005). Das Hufkissen schützt zudem die tiefe Beugesehne, das Strahlbein und die Bursa podotrochlearis bei Belastung. Anders als beim Rind, dessen Klauenkissen beim Stehen permanent als Stützvorrichtung genutzt wird,

belastet das Pferd sein Hufkissen nur temporär bzw. unter besonderen Umständen, und zwar in Abhängigkeit vom Hufbeschlag (mit oder ohne Stollen, von der Bodenbeschaffenheit und von der Hufform (Höhe der Trachten) Das Strahlkissen des Pferdes schiebt sich apikal geringfügig zwischen Hornsohle und Hufbein vor. Palmar bzw. plantar verbreitert es sich zwischen tiefer Beugesehne und Strahlbein einerseits und dem Hornstrahl andererseits und geht in das Ballenkissen über. Es ist dabei an den umliegenden Strukturen durch Faserzüge und Bänder verankert (König und Liebich 2005). Diese beeinflussen die mechanische Funktion des Hufkissens wesentlich. Der palmare bzw. plantare Teil des Strahlkissens und das Ballenkissen werden seitlich von den elastischen Hufknorpeln und den Trachten der Hufkapsel begrenzt. Durch diese Lage des Hufkissens wird deutlich, dass sich seine apikalen Abschnitte während der Belastung bei Lokomotion sehr viel weniger verbreitern können als die der Trachtenmechanik unterworfenen palmar bzw. plantar gelegenen Bereiche (Woergetter 2003, Taylor et al. 2005).

Es stellte sich damit die Frage, ob das Hufkissen in all seinen Abschnitten eine gleichartige quantitative histologische Zusammensetzung besitzt. Die Beantwortung dieser Frage bildet die Grundlage für eine spätere Überprüfung einer Dauerbelastbarkeit im Zuge der orthopädischen Behandlung des Hufes. Diese Frage und die Untersuchung der Verankerungen des Hufkissens an umliegenden Strukturen war Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Material und Methodik

Material

Zur Untersuchung gelangten 40 Zehenendorgane von 22 Pferden, die an der Veterinärmedizinischen Universität Wien aus zwingenden medizinischen Gründen euthanasiert wurden, sowie von Tieren, die am Schlachthof Linz geschlachtet wurden. Die Zehen wiesen keine sichtbaren pathologischen Veränderungen auf, und auch in der Anamnese war kein Hinweis auf Huferkrankungen feststellbar. Rasse, Geschlecht und Alter der Tiere sowie die vorgenommenen weiteren Untersuchungen sind in Tabelle 1 ersichtlich.

Tab 1 Untersuchungsmaterial. Alter in Jahren (a), VE Vorderextremität, HE Hinterextremität.
Specimens. Age in years (a), VE forelimb, HE pelvic limb.

| Num. | Rasse | Geschlecht | Alter | Gliedmaße | Verwendung | Fixierung |
|------|-------------------|------------|-------|-----------|------------|-----------|
| 1 | Haflinger | Wallach | 21a | VE | Histologie | gefroren |
| 2 | Gidran | Wallach | 8a | VE + HE | Histologie | gefroren |
| 3 | Holl. Warmblut | Hengst | 18a | VE + HE | Histologie | frisch |
| 4 | Kleinpferd | Stute | 28a | VE + HE | Histologie | gefroren |
| 5 | Österr. Warmblut | Wallach | 15a | VE + HE | Histologie | gefroren |
| 6 | Haflinger | Wallach | 19a | VE | Histologie | gefroren |
| 7 | Zuchtstute | Stute | 15a | VE + HE | Histologie | frisch |
| 8 | Noriker | Hengst | 0,5a | VE + HE | Histologie | Formalin |
| 9 | Österr. Warmblut | Wallach | 16a | VE + HE | Histologie | frisch |
| 10 | Haflinger | Hengst | 0,6a | VE + HE | Histologie | frisch |
| 11 | Haflinger | Stute | 1a | HE | Histologie | frisch |
| 12 | Noriker | Hengst | 1a | HE | Histologie | Formalin |
| 13 | Warmblut | Stute | 12a | 2xVE | Anatomie | gefroren |
| 14 | Warmblut | Stute | 25a | 2xVE | Anatomie | gefroren |
| 15 | Warmblut | Stute | 14a | 2xVE | Anatomie | gefroren |
| 16 | Warmblut | Stute | 18a | 2xVE | Anatomie | gefroren |
| 17 | Lippizaner | Wallach | 14a | 2xVE | Anatomie | gefroren |
| 18 | Warmblut | Stute | 4a | 2xVE | Anatomie | gefroren |
| 19 | Irish Sportshorse | Stute | 8a | 2xVE | Anatomie | gefroren |
| 20 | Ungar. Warmblut | Stute | 7,5a | 2xVE | Anatomie | gefroren |
| 21 | Shetlandpony | Stute | 20,5a | 2xVE | Anatomie | gefroren |
| 22 | Traber | Hengst | 11,5a | 2xVE | Anatomie | gefroren |

Anatomische Sektion

20 Zehenendorgane von Vordergliedmaßen von 4-25 Jahre alten Pferden wurden für die makroskopische Untersuchung des Hufkissens und dessen Bänder verwendet. Die Autopodien wurden in gefrorenem Zustand in der Zehenachse mittels einer Bandsäge durchschnitten und nach dem Auftauen bei Raumtemperatur sezirt.

Histologische Untersuchung

Proben des Hufkissens von 20 Zehenendorganen von Pferden mit einem Alter zwischen 0,5 und 28 Jahren wurden für histologische Untersuchungen vorbereitet. Die Probenentnahme erfolgte sofort nach dem Tod der Tiere (9 Zehenendorgane), nach vorhergehender fünftägiger Lagerung der Autopodien bei -18°C (8 Zehenendorgane) oder nach vorheriger Fixierung der halbierten Zehenendorgane in toto in gepufferter 10%iger Formalinlösung (3 Zehenendorgane). Die Proben wurden aus der Spitze (Pars cunealis), dem Übergangsbereich und aus dem palmaren bzw. plantaren Teil des Hufkissens (Pars torica) entnommen (Abb. 1), für 24 Stunden in gepuf-

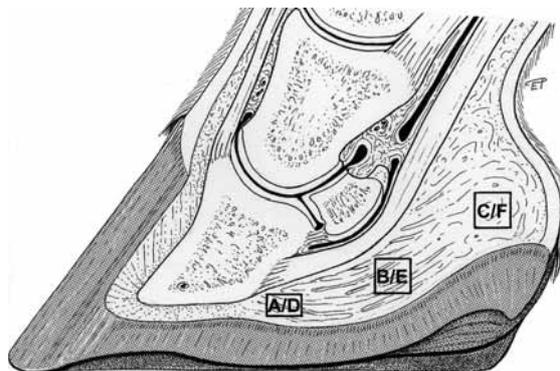


Abb 1 Zeichnung eines in der Zehenachse durchschnittenen Zehenendorganes des Pferdes. Entnahmestellen der Proben aus dem Hufkissen. A, B und C (Vorderextremität), D, E und F (Hinterextremität), A/D Strahlkissen, B/E Übergangsbereich, C/F Ballenkissen.

Drawing of an equine digit, axial section. Sampling areas of the digital cushion. A, B, C (forelimb), D, E, F (pelvic limb), A/D apex of digital cushion (pars cunealis), B/E transition zone, C/F base of digital cushion (pars torica).

ferter Formalinlösung nach Lillie (Romeis 1989) fixiert, entwässert und in Paraplast® (SPI Supplies, München, Deutschland) eingebettet. Danach wurden 5 µm dicke Schnitte aller Gewebeprobe mit Hämatoxylin-Eosin zur Übersicht, mit Resorcinfuchsin zur Darstellung der elastischen Fasern, nach Van Gieson zur Darstellung kollagener Fasern und mit Alzianblau (pH 4,0) oder Safranin O zum Nachweis von Hyaluronsäure bzw. sulfatierten Proteoglykanen der Matrix gefärbt. Bis auf die Färbung mit Safranin O (Lillie 1954) erfolgten alle Färbemethoden wie bei Romeis (1989) beschrieben. Die Präparate wurden lichtmikroskopisch untersucht.

Quantifizierung der Gewebszusammensetzung des Hufkissens

Die Menge der wichtigsten am Aufbau des Hufkissens beteiligten Gewebe (straffes kollagenes Bindegewebe, Gewebe

mit alzanophiler Matrix, elastisches Material und Fettgewebe) wurde mit Hilfe der stereologischen Volumenbestimmung nach Cavalieri geschätzt (Howard und Reed 1998). Diese Methode erlaubt den statistischen Rückschluss auf das Volumen einer dreidimensionalen Struktur anhand von Flächenmessungen in einzelnen Schnitten.

Es wurden jeweils 72 histologische Serienschritte aller Proben hergestellt (Dicke 5 μm) und mit Alzianblau (pH 4,0), Resorcinfuchsin und Kernechtrot gefärbt. Jeder 9. Schnitt wurde zur Analyse herangezogen, also insgesamt 8 Schnitte pro Serie. Der Abstand zwischen den einzelnen analysierten Schnitten betrug damit 45 μm (Nachtigal et al. 2002). Es wurde keine Methode zur zufälligen Bestimmung des ersten analysierten Schnittes angewandt, da durch die zufällige Probenentnahme im Rahmen der einzelnen Abschnitte des Hufkissens und das vorherige Einbetten und Anschneiden für die allgemeine histologische Untersuchung bereits eine zufällige Position des ersten Schnittes gegeben war.

Als Referenzvolumen diente ein arbiträrer Quader. Alle Schnitte wurden deckungsgleich im Mikroskop (Polyvar, Leica, Wien, Österreich) eingestellt und somit immer die gleiche, zufällig gewählte Stelle im Präparat mit einer digitalen Videokamera (Nikon DN 100, Nikon, Tokio, Japan) fotografiert. Das bei einer Objektivvergrößerung von 4x fotografierte Gesichtsfeld entsprach der Grundfläche des arbiträren Quaders.

Die Grundfläche des arbiträren Quaders sowie die Fläche, die auf den analysierten Schnitten durch die einzelnen Gewebetypen eingenommen wurde, bestimmten wir stereologisch mit Hilfe eines Testrasters. Die Dichte des Testrasters wurde nach Gundersen und Jensen (1987) festgelegt. Die vom kollagenen Bindegewebe, vom elastischen Material und vom Fettgewebe eingenommene Fläche wurde nach folgender Gleichung errechnet:

$$\text{est}A = a \cdot P$$

Dabei repräsentiert estA die geschätzte Fläche des vermessenen Gewebes, a die einem Punkt des Testrasters zugeordnete Fläche und P die Anzahl der auf dem vermessenen Gewebe liegenden („positiven“) Testpunkte. Die Fläche, die vom Gewebe mit alzanophiler Matrix eingenommen wurde, ermittelten wir aus der Differenz der Grundfläche des arbiträren Quaders und den von den drei anderen Gewebetypen eingenommen Flächen. Die Flächenbestimmungen erfolgten mit Hilfe des Computerprogramms Ellipse 3D (ViDiTo, Kosice, Slowakei). Die von den einzelnen Gewebetypen eingenommenen Volumina wurden nach folgender Gleichung errechnet:

$$\text{est}V = T \cdot \sum_{i=1}^n A_i$$

Dabei repräsentiert estV das geschätzte, vom entsprechenden Gewebe eingenommene Volumen, T den Abstand der analysierten Schnitte voneinander (45 μm) und A_i die vom Gewebe eingenommene Fläche in den einzelnen analysierten Schnitten.

Der relative Anteil der einzelnen Gewebearten (alle Angaben in Volumenprozent) wurde aus den absoluten, nach der Cavalieri-Methode bestimmten Volumina der Gewebe und dem Volumen des arbiträren Quaders rechnerisch ermittelt.

Ergebnisse

Anatomischer Bau des Hufkissens und dessen Verankerung in den umliegenden Strukturen

Das Hufkissen, eine Modifikation der Subkutis, gliederte sich in das apikal gelegene Strahl- und das palmar bzw. plantar davon gelegene Ballenkissen. Das Hufkissen war fest mit den umliegenden Strukturen verbunden, insbesondere mit den beiden Hufknorpeln. Die Hufknorpel-Hufkissenbänder (Ligg. chondropulvinalia) verbanden das Ballenkissen mit der Axialfläche der Hufknorpel. Von dieser Fläche strahlten die Bänder nahezu horizontal in Richtung Zehennachse in das Hufkissen ein.

Auf frischen Anschnitten war das Hufkissen gelblich-weiß, wobei besonders im Strahlbereich weiße und gelbe Stränge einander abwechselten. Im Ballenbereich war die Schnittfläche eher weiß glänzend. Bei der Präparation zeigte sich das Gewebe des Strahlkissens fester und derber, während das Ballenkissen weicher, schwammartig und elastischer wirkte. Der Übergang zwischen beiden Bereichen war fließend. In jenen Abschnitten des Ballens, die dem Hufknorpel benachbart waren, wurden Fortsätze der Hufknorpel vorgefunden. Sie ragten „fingerförmig“ in das Innere des Hufkissens und verzahnten sich mit diesem innig, so dass in diesen Bereichen das Hufkissen nur schwer vom Hufknorpel unterschieden werden konnte. In Höhe des Strahlpolsters war eine besondere Anordnung der Fasern zu bemerken. Diese waren vorwiegend horizontal, parallel zur Fußungsfläche ausgerichtet und vereinigten sich zu übereinander liegenden Faser-

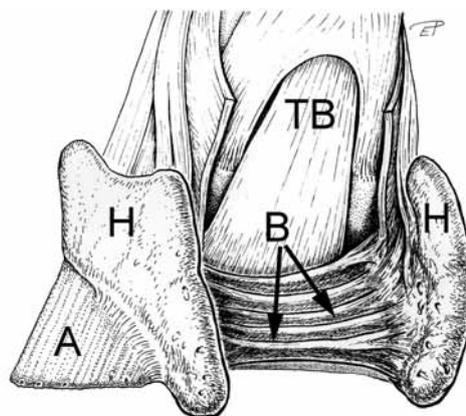


Abb 2 Zeichnung eines Zehenendorganes eines Pferdes. Ansicht von mediopalmar. A Hufbein, B Horizontal zur Fußungsfläche verlaufende Faserblätter, H Hufknorpel, TB Tiefe Beugesehne. Drawing of an equine digit. Mediopalmar view. A coffin bone, B fibrous layers running horizontally to the foot pad, H joint cartilage, TB deep flexor tendon.

blättern (Abb. 2). In unmittelbarer Nähe der tiefen Beugesehne verdichteten sich diese Blätter und formten durch Fusion eine kompakte Faserplatte, die mit der tiefen Beugesehne verwachsen war. Durch diese Anordnung war das Strahlkissen zwischen dem lateralen und medialen Hufknorpel ausgespannt und im axialen Abschnitt des Hufes mit der Insertion der tiefen Beugesehne verankert. Parallel zur Fußungsfläche verkehrten zusätzliche schräge Faserblätter im Strahl. Besonders an Schnitten durch die Zehennachse war ersichtlich, dass diese Faserblätter sich palmar bzw. plantar aufspalteten und untereinander durch vertikale Fortsätze verzahnten. Der Abstand zwischen den schrägen Faserblättern

vergrößerte sich von der tiefen Beugesehne ausgehend zur Fußungsfläche der Hufkapsel (Abb. 3).

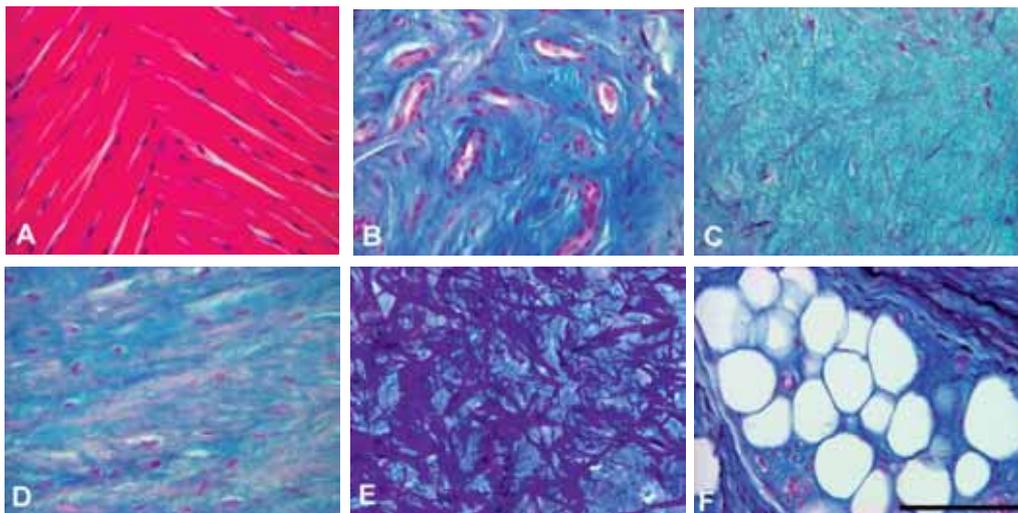


Abb 3 Axialschnitt durch das Zehenendorgan eines Pferdes. A Hufbein, B Kronbein, C Fesselbein, D Strahlbein, E Ligamentum sesamoideum distale impar, F Verzahnung der Faserblätter, G Tiefe Beugesehne.

Axial section through the equine digit. A coffin bone, B pastern bone, C compedal bone, D navicular bone, E impar distal sesamoid ligament, F interdigitation of the fibrous layers, G deep flexor tendon.

Gewebliche Zusammensetzung des Hufkissens

In den histologisch untersuchten Proben wurden folgende Gewebearten gefunden: straffes geflechtartiges kollagenes Bindegewebe, Gewebe mit alzianophiler Matrix mit oder ohne elastische Fasern, Fettgewebe und wenig lockeres Bindegewebe (Abb. 4).



gefärbte Faserzüge) im Gewebe mit hyaluronsäurereicher Matrix, F Fettgewebe. Lichtmikroskopische Aufnahme, Färbung Hämatoxylin/Eosin A bzw. Alzianblau (ph 4,0)/Resorcinfuchsin/Kernechtrot B-F, Maßstab = 100µm.

Tissues in the digital cushion of the horse. A Dense irregular connective tissue with few blood vessels and nerves; B Fibrillar tissue with alcianophilic matrix rich in hyaluronic acid, with spindle-shaped fibrocytes and many blood vessels and nerves; C Myxoid tissue with matrix rich in hyaluronic acid, with stellate cells and very few blood vessels and nerves; D Fibrous cartilage with matrix rich in hyaluronic acid, with typical chondrocytes and very few blood vessels and nerves; E Elastic material (dark fibre bundles) in tissue with matrix rich in hyaluronic acid; F Adipose tissue. Micrograph, staining haematoxylin/eosin A or alcian blue (ph 4.0)/resorcin fuchsin/nuclear fast red B-F, bar = 100µm.

Das straffe geflechtartige kollagene Bindegewebe war durch gekreuzte kräftige Bündel kollagener Fasern charakterisiert, wobei entweder vorwiegend horizontal gerichtete Faserblätter dominierten (v.a. Pars cunealis) oder die Faserbündel völlig ungeordnet in allen Richtungen des Raumes verliefen, ohne Faserblätter zu bilden (v.a. Pars torica). Innerhalb der Kollagenfaserbündel lagen vergleichsweise wenige, spindelförmige Fibrozyten. Blutgefäße und Nerven konnten mit den angewendeten histologischen Übersichtsfärbungen nicht nachgewiesen werden. Zwischen den Kollagenfaserbündeln fanden sich spärlich elastische Fasern, alzianophile Matrix mit vereinzelt Fettzellen sowie Gefäße und zarte, unmyelinisierten Nerven (Abb. 4A).

Bereiche mit alzianophiler Matrix (bei Färbung mit Alzianblau pH=4,0) stellten sich nicht als einheitliches Gewebe dar. Es handelte sich einmal um ein fibrilläres Gewebe mit spindelförmigen Fibrozyten, das reichlich Blutgefäße und Nerven enthielt und das lockere interstitielle Bindegewebe als Füllgewebe zu ersetzen schien (Abb. 4B). Zum zweiten kam myxoides Gewebe vor, das durch sternförmig verzweigte Zellen und Armut an Blutgefäßen charakterisiert war. Nerven waren hier ebenfalls nicht nachzuweisen (Abb. 4C). Eine dritte Gewebeform mit alzianophiler Matrix war der gelegentlich vorhandene Faserknorpel, der durch ovale Chondrozyten und Fehlen von Gefäßen und Nerven charakterisiert war (Abb. 4D). Das Gewebe mit der alzianophilen Matrix füllte die Maschenräume zwischen den kollagenen Faserbündeln aus und enthielt vereinzelte oder in kleinen Gruppen angeordnete univakuoläre Fettzellen, wobei die drei beschriebenen Gewebsformen kontinuierlich ineinander übergingen.

Kräftige, verzweigte elastische Fasern kamen in einigen Abschnitten des Gewebes mit alzianophiler Matrix vor (Abb. 4E). In Höhe des Ballens waren die elastischen Fasern in manchen Fällen zu „elastischen Faserstraßen“ gebündelt, begleitet von Fettzellen und Blutgefäßen. Zarte elastische Fasern umhüllten die einzelnen Kollagenfaserbündel des straffen Bindegewebes. Einzeln gelegene, univakuoläre Fett-

Abb 4 Gewebe im Hufkissen des Pferdes. A Straffes geflechtartiges kollagenes Bindegewebe mit wenig Blutgefäßen und Nerven, B Feinfaseriges hyaluronsäurereiches Gewebe (alzianophile Matrix) mit spindelförmigen Fibrozyten und reichlich Blutgefäßen und Nerven, C Myxoides Gewebe mit hyaluronsäurereicher Matrix, sternförmigen Zellen und kaum Blutgefäßen und Nerven, D Faserknorpel mit hyaluronsäurereicher Matrix, typischen Chondrozyten und kaum Blutgefäßen und Nerven, E Elastisches Material (dunkel

zellen und die nur spärlich auftretenden Fettläppchen waren unregelmäßig verteilt. Erstere befanden sich in der Regel im lockeren Bindegewebe mit alzianophiler Matrix zwischen den derben Kollagenfaserbündeln eingebettet. Zarte Gefäße fanden sich regelmäßig diesen Fettzellen benachbart, konnten aber auch unabhängig davon nachgewiesen werden (Abb. 4F). Im lockeren perivaskulären Gewebe lagen vereinzelt kleine Fettläppchen.

Lockeres kollagenes Bindegewebe ohne alzianophile Matrix fand sich nur in geringen Mengen, meist in der Umgebung von Blutgefäßen und Nerven oder in den Randbereichen des Hufkissens.

Quantitative Zusammensetzung des Hufkissens

Die Mengenrelation der an der Bildung des Hufkissens beteiligten Gewebearten (kollagenes Bindegewebe, Gewebe mit alzianophiler Matrix, elastisches Material, Fettgewebe) variierte innerhalb eines Hufkissens je nach Position zwischen Strahlspitze, Übergangsbereich und Ballen. Zusätzlich war die quantitative Zusammensetzung des Hufkissens von Fohlen und adulten Pferden unterschiedlich.

Wir analysierten den prozentuellen Anteil der vier Hauptbestandteile des Hufkissens in der Pars cunealis (Strahlkissen), der Pars torica (Ballenkissen) und der Übergangszone, jeweils getrennt für Vorder- und Hinterextremität sowie für junge und adulte Pferde. Die Zusammensetzung des Hufkissens variierte individuell sehr stark, so dass alle im Folgenden angegebenen Mittelwerte nur als Näherungswerte zu verstehen sind und von einer statistischen Analyse der Daten abgesehen werden musste.

Das Hufkissen des Pferdes enthielt durchschnittlich 39,3% straffes kollagenes Bindegewebe, 37,6% Gewebe mit alzianophiler Matrix, 17,4% elastisches Fasermaterial und 5,7% Fettgewebe. Die Volumenanteile dieser Gewebe in den ein-

Abb 5 Unterschiede in der Zusammensetzung des Hufkissens von Fohlen A-B und adulten Pferden C-D. A und C Strahlkissen (Pars cunealis), B und D Ballenkissen (Pars torica). Während das Strahlkissen bei jungen und adulten Tieren gleichermaßen vorwiegend straffes kollagenes Bindegewebe enthält, werden die Fettläppchen in der Pars torica des Fohlens mit zunehmendem Alter des Pferdes von Gewebe mit hyaluronsäurereicher, alzianophiler Matrix ersetzt. Lichtmikroskopische Aufnahme, Färbung Alcianblau (pH 4.0)/Resorcinfuchsin/Kernechtrot, Maßstab=500µm.
Different composition of the digital cushion of foals A-B and adult horses C-D. A, C Pars cunealis, B, D Pars torica. The pars cunealis contains in both young and adult animals mainly dense connective tissue. In the pars torica, tissue with matrix rich in hyaluronic acid replaces the adipose tissue with increasing age of the horse. Micrograph, staining alcian blue (pH 4.0)/resorcin fuchsin/nuclear fast red, bar=500µm.

zelnen Abschnitten des Hufkissens bei jungen und alten Pferden sind in Tabelle 2 angegeben.

Derbe kollagene Faserbündel dominierten bei allen untersuchten Tieren im Bereich der Strahlspitze. Die Dominanz der Faserbündel trat in Richtung Ballenkissen zurück (Abb. 5). Der

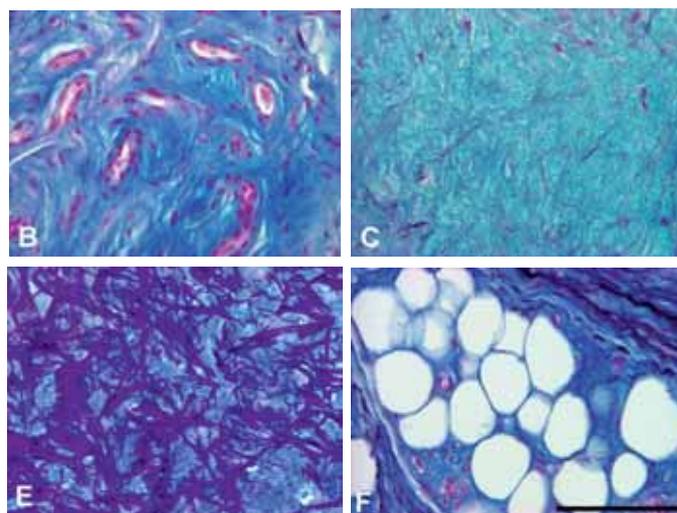
Anteil von Gewebe mit alzianophiler Matrix war im Ballenbereich des Hufkissens höher als an der Strahlspitze. Elastische Fasern traten in Höhe der Strahlspitze nur spärlich auf. Sie waren im Übergangsbereich zwischen Strahl und Ballen sowie im Ballen selbst deutlich häufiger. Das von Fettgewebe eingenommene Volumen war, ähnlich wie beim Gewebe mit der alzianophilen Matrix, tendenziell im Ballenbereich und in der Übergangszone größer als in der Pars cunealis des Hufkissens.

Bei Fohlen überwogen im Strahlkissen wie auch bei erwachsenen Tieren kollagene Fasern (Abb. 5A und 5C). In den weiter palmar bzw. plantar gelegenen Abschnitten nahm die Menge des Fettgewebes deutlich zu. Das Hufkissen des Fohlens schien demnach mehr Fettgewebe (Abb. 5B) als das adulter Pferde (Abb. 5D) zu enthalten. Beim Fohlen war das Fettgewebe in Form von Zellgruppen oder als vaskularisierte Fettläppchen zu finden, während bei erwachsenen Tieren nur vereinzelt Fettzellen vorkamen. Die Fettläppchen im Hufkissen des Fohlens wurden zum Teil von elastischen „Faserstrahlen“ voneinander getrennt. Das Hufkissen des Fohlens ähnelte damit dem Aufbau der Ballenkissen anderer Tierarten.

Zwischen Vorder- und Hinterextremität bestanden nur geringe Unterschiede in der Zusammensetzung des Hufkissens. Das Hufkissen der Vorderextremität schien etwas mehr straffes Bindegewebe und etwas weniger Gewebe mit alzianophiler Matrix zu enthalten als jenes der Hinterextremität.

Diskussion

Aufbau und Verankerung des Hufkissens des Pferdes sind dessen Funktion als stoßbrechende Einrichtung angepasst. Das Hufkissen ist mit allen umliegenden Strukturen fest verbunden. Von der Axialfläche der Hufknorpel ziehen feine Bandstrukturen in das Hufkissen, die als Hufknorpel-Hufkissenbänder bezeichnet werden. Sie verbinden sich nicht mit jenen der Gegenseite, wie von Breit (1994), Schaller (1992) und König und Liebich (2005) beschrieben. Sie sind auch nicht für die



gelbe Farbe des Hufkissens verantwortlich, welche vom Gelb des Elastins herrührt. Im Hufkissen befinden sich hauptsächlich die in vorliegender Untersuchung beschriebenen plattenartigen Faserblätter. Von König et al. (2003) werden diese als gekreuzte Hufknorpelbänder angesehen, während Zietzschmann (1943) sie als Hufknorpel-Hufkissenbänder bezeich-

Tab 2 Volumenanteile (alle Angaben in Volumenprozent) der Gewebe in den einzelnen Abschnitten des Hufkissens bei jungen und alten Pferden. *Estimated volume density (percent by volume) of tissues in the individual parts of the digital cushion in young and adult horses.*

| Abschnitt des Hufkissens | Kollagenes Bindegewebe | | | Gewebe mit hyaluronsäurereicher Grundsubstanz | | | Elastisches Material | | | Fettgewebe | | |
|--------------------------|------------------------|--------------|--------|---|--------------|--------|----------------------|--------------|--------|------------|--------------|--------|
| | Jungtiere | adulte Tiere | gesamt | Jungtiere | adulte Tiere | gesamt | Jungtiere | adulte Tiere | gesamt | Jungtiere | adulte Tiere | gesamt |
| Pars cunealis | | | | | | | | | | | | |
| Vorderextremität | 60,5 | 54,0 | 55,3 | 23,6 | 30,6 | 29,2 | 9,7 | 14,2 | 13,3 | 6,2 | 1,2 | 2,2 |
| Hinterextremität | 33,6 | 55,7 | 46,9 | 50,6 | 30,5 | 38,6 | 12,5 | 11,4 | 11,8 | 3,3 | 2,3 | 2,7 |
| gesamt | 42,6 | 54,8 | 51,1 | 41,6 | 30,6 | 33,9 | 11,5 | 13,0 | 12,5 | 4,3 | 1,7 | 2,5 |
| Übergangszone | | | | | | | | | | | | |
| Vorderextremität | 27,5 | 41,7 | 38,8 | 32,9 | 37,2 | 36,4 | 18,4 | 18,2 | 18,2 | 21,2 | 2,9 | 6,6 |
| Hinterextremität | 51,5 | 52,7 | 51,6 | 23,4 | 31,3 | 28,1 | 10,6 | 15,5 | 13,5 | 14,5 | 1,6 | 6,7 |
| gesamt | 43,5 | 45,9 | 45,2 | 26,6 | 34,7 | 32,2 | 13,2 | 17,0 | 15,9 | 16,7 | 2,6 | 6,7 |
| Pars torica | | | | | | | | | | | | |
| Vorderextremität | 24,7 | 22,5 | 23,0 | 36,2 | 49,2 | 46,6 | 17,0 | 25,9 | 24,1 | 22,0 | 2,4 | 6,3 |
| Hinterextremität | 12,6 | 25,3 | 20,2 | 44,6 | 48,3 | 46,8 | 22,9 | 24,0 | 23,5 | 19,9 | 2,5 | 9,5 |
| gesamt | 16,6 | 23,7 | 21,6 | 41,8 | 48,8 | 47,7 | 20,9 | 25,0 | 23,8 | 20,6 | 2,5 | 7,9 |

net. Gekreuzte Hufknorpelbänder (König und Liebich 2005, Koch u. Berg 1992, Schaller 1992) konnten im vorliegenden Untersuchungsmaterial jedoch nicht nachgewiesen werden. Nickel et al. (2001) und Zietzschmann (1943) beschreiben, dass die gekreuzten Hufknorpelbänder von der tiefen Beugesehne bedeckt werden. Dies ist jedoch nicht möglich, da in diesem Bereich die Bursa podotrochlearis, das Strahlbein und dessen Bänder liegen. Zum gleichen Schluss kam auch Breit (1994). Die bei der makroskopischen Untersuchung feststellbaren Konsistenzunterschiede der einzelnen Abschnitte des Hufkissens lassen sich mit deren unterschiedlichen Gewebszusammensetzung erklären.

Die Gewebe des Hufkissens wurden rezent detailliert beschrieben (König et al. 2003, Egerbacher et al. 2005), ohne dass jedoch Angaben zur quantitativen Zusammensetzung des Hufkissens und deren Abhängigkeit vom Alter des Pferdes gemacht wurden. Die Ergebnisse unserer Studie bestätigten den in diesen Arbeiten angegebenen geringen Fettgehalt des Hufkissens. Im Gegensatz zu anderen Tierarten, z.B. zur Katze (Liebich 1999) und zum Rind (Räber et al. 2004), scheint die stoßbrechende Funktion des Hufkissens beim Pferd also nicht vorwiegend von zwischen Kollagenfaserbündeln eingelagerten Fettläppchen realisiert zu werden. Die Aufgabe des Fettes wird beim adulten Pferd möglicherweise von der hyaluronsäurereichen, alzanophilen Matrix zwischen den Kollagenfaserbündeln übernommen. Myxoides Gewebe, welches durch solch eine Matrix charakterisiert ist, entsteht häufig in Folge von kontinuierlichen oder sich ständig wiederholenden mechanischen Belastungen (Egerbacher et al. 2005). Die von uns mit zunehmendem Pferdealter beobachtete Verminderung des Fettgehalts und die gleichzeitige Volumenzunahme des Gewebes mit alzanophiler Matrix (Abb. 5B und 5D) unterstützen diese Hypothese.

Die reversible Verformbarkeit des Hufkissens wird vermutlich durch das elastische Fasermaterial gewährleistet. Für diese Hypothese spricht der erhöhte Gehalt an dicken elastischen Fasern im Ballenbereich und in der Übergangszone. Diese Regionen sind während der Bewegung wesentlich größeren Formveränderungen ausgesetzt als die Strahlspitze (Trachtenmechanik) (Woergetter 2003, Taylor et al. 2005). Das Ballenkissen muss also in jeder Hangbeinphase von einer plattgepressten Form in seine ursprüngliche Gestalt zurückkehren, was mit geringstem Energieaufwand durch elastisches Material realisiert werden kann. Diese reversible Verformbarkeit ist nur möglich, wenn ähnliche Materialeigenschaften sowohl für das Hufkissen als auch für die darüber liegende pulvine Hufkapsel zutreffen. Tatsächlich nehmen in beiden Komponenten Festigkeit und Härte ballenwärts in dem Maße ab, wie die Verformbarkeit zunimmt. Die elastischen Polster werden im Hufkissen von Fettzellen und alzanophilem Gewebe und im Ballen- und Strahlhorn von intra- und interzellulären Fetttropfen vertreten (Frohes und Budras 2001). Die umgebende faserig-filamentöse Stützkomponente wird im Hufkissen von Kollagenfaserbündeln und im Hornüberzug von Keratinfilamenten vertreten.

Der Fettgehalt des Hufkissens ist von allen Gewebearten am deutlichsten vom Alter des Pferdes abhängig. Das Hufkissen von Fohlen enthält im Vergleich mit erwachsenen Tieren mehr Fettgewebe, das in deutlichen Fettläppchen angeordnet ist (Abb. 5B). Bei adulten Tieren kommen nur mehr einzelne Fettzellen vor (Abb. 5D). Zusätzlich ist die Zunahme des Fettgewebes vom Strahl- zum Ballenkissen nicht so deutlich ausgeprägt wie beim Fohlen. Wie bereits erwähnt, wird die stoßdämpfende Funktion des Fettgewebes beim adulten Pferd vermutlich von der hyaluronsäurereichen, wasserbindenden Matrix zwischen den Kollagenfaserbündeln übernommen. Ob

das Fettgewebe dabei direkt zur Bildung dieses Gewebes mit alzianophiler Matrix beiträgt, bleibt zu prüfen. Zumindest das chondrogene Potential von Stammzellen des Fettgewebes und deren Fähigkeit zur Produktion von Proteoglykanen sind bekannt (Im 2005).

Die von uns festgestellten großen individuellen Unterschiede in der Gewebszusammensetzung des Hufkissens lassen sich möglicherweise durch die unterschiedliche Nutzung der untersuchten Tiere, d.h. die unterschiedliche mechanische Beanspruchung des Hufkissens erklären. Aus veterinärmedizinischer Sicht wäre es wünschenswert, diese Hypothese zu testen und darüberhinaus festzustellen, wie rasch die Anpassungsvorgänge in den Geweben ablaufen. Ein, solchen Erkenntnissen angepasster Trainingsverlauf, könnte helfen, die Anzahl der durch Überbelastung bedingten Erkrankungen des Zehenendorgans zu senken.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der lamellenförmige Bau des Strahlkissens und die unterschiedliche histologische Zusammensetzung von Strahl- und Ballenkissen im Laufe der Evolution das Hufkissen des Pferdes zu einer Struktur optimaler Anpassungsfähigkeit zur Stoßdämpfung entwickelt hat. Wie in einem modernen Sportschuh, in dem Luft- oder Geleinsparungen zur Stoßdämpfung eingebaut sind, finden sich im Hufkissen des Pferdes zwischen den kollagenen Faserzügen elastische Fasern, hyaluronsäurereiche, wasserbindende Matrix und Fettzellen. Die variable Gewebszusammensetzung des Hufkissens passt sich dabei vermutlich der mechanischen Beanspruchung des Pferdes bei der Bewegung an.

Literatur

- Breit S. (1994): Untersuchungen zur topographischen Anatomie von Hufgelenk und Bursa podotrochlearis beim Pferd. Diss., Veterinärmedizinische Universität Wien
- Dyce K. M., W. O. Sack und C. J. G. Wensing (2002): Anatomie der Haustiere. Stuttgart, Enke
- Egerbacher M. und P. Böck (1997a): Lingual Papillae. Am. J. Surg. Pathol. 21, 360
- Egerbacher M. und P. Böck (1997b): Myxoid Tissue: Its Morphology, Histochemistry, and Relationship with Other Supporting Tissues. Arch. Histol. Cytol. 60, 121-131
- Egerbacher M., P. Franz und P. Böck (1997): Expression of glial and neuronal marker proteins (S-100, glial fibrillary acidic protein, and neuron-specific enolase) by myxoid cells in the human larynx. Eur. Arch. Otorhinolaryngol. 254, 449-452
- Egerbacher M., M. Helmreich, A. Probst, H. E. König und P. Böck (2005): Digital Cushion in Horses Comprise Coarse Connective Tissue, Myxoid Tissue, and Cartilage but Only Little Unilocular Fat Tissue. Anat. Histol. Embryol. 34, 112-116
- Egerbacher M., R. Krestan und P. Böck (1995): Morphology, Histochemistry, and Differentiation of the Cat's Epiglottic Cartilage: A Supporting Organ Composed of Elastic Cartilage, Fibrous Cartilage, Myxoid Tissue, and Fat Tissue. Anat. Rec. 242, 471-482
- Frohnes A.-K. und K.-D. Budras (2001): Endogene Einflussfaktoren auf die Hornqualität im Sohlen- und Ballen-Strahlsegment des Pferdehufes. Pferdeheilkunde 17, 437-443
- Habermehl K.-H. (1996): Haut und Hautorgane. In: Nickel R., A. Schummer und E. Seiferle (eds.). Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. Band IV. 3. Aufl., Berlin, Parey, 488-570
- Howard C. V. und M. G. Reed (1998): Unbiased stereology. Three-dimensional measurement in microscopy. Bios. Scientific Publisher, Oxford, 246pp. (Kapitel über Cavalieri, 39-53)
- Im G.-I. (2005): Chondrogenesis from mesenchymal stem cells derived from adipose tissue on the fibrin scaffold. Current Applied Physics 5, 438-443
- Koch T. und R. Berg (1992): Lehrbuch der Veterinär-anatomie. 5. Aufl., Jena, Fischer
- König H. E. und H.-G. Liebich (2005): Anatomie der Haussäugetiere. 3. Aufl., Stuttgart, Schattauer
- König H. E., R. Macher, E. Polsterer-Heindl, C.-M. Sora, C. Hinterhofer, M. Helmreich und Böck P. (2003): Stoßbrechende Einrichtungen am Zehenendorgan des Pferdes. Wien. Tierärztl. Mschr. 90, 267-273
- Liebich H.-G. (1999): Funktionelle Histologie der Haussäugetiere. 3. Aufl., Stuttgart, Schattauer, 303-324
- Lillie R. D. (1954): Histopathologic Technic and Practical Histochemistry. New York, Blakiston Division, McGraw-Hill Company
- Nickel R., A. Schummer und E. Seiferle (2001): Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. Band I. 7. Aufl., Berlin, Parey, 254-257
- Räber M., C. J. Lischer, H. Geyer und P. Ossent (2004): The bovine digital cushion - A descriptive anatomical study. Vet. J. 167, 258-264
- Romeis B. (1989): Mikroskopische Technik. 17. Aufl., München, Urban&Schwarzenberg
- Schaller O. (1992): Illustrated Veterinary Anatomical Nomenclature. Stuttgart, Enke
- Taylor D. D., D. M. Hood, G. D. Potter, H. A. Hogan und C. M. Honnas (2005): Evaluation of displacement of the digital cushion in response to vertical loading in equine forelimbs. Am. J. Vet. Res. 66, 623-629
- Woergetter C. M. (2003): Zur digitalen Darstellung der equinen Hufmechanik. Diss. Wien
- Zietzschmann O. (1943): Das Skelettsystem. In: Ellenberger W. und Baum H. (eds.). Handbuch der vergleichenden Anatomie der Haustiere. 18. Aufl., Berlin, Springer, 152-158

Dr. Alexander Probst
 Institut für Anatomie
 Departments für Pathobiologie
 Veterinärmedizinischen Universität Wien
 Veterinärplatz 1
 1210 Wien
 Österreich.
 alexander.probst@vu-wien.ac.at

Pferdeheilkunde Curriculum Berlin

Kaufuntersuchung

Hartmut Gerhards, Arthur Grabner und Dietrich Plewa

14.-15. Januar 2006

www.pferdeheilkunde.de