

Szent István Egyetem
Állatorvos-tudományi Doktori Iskola

**A lovak hármás metacarpalis és csüdcsontjainak
csontsűrűség-mérése, valamint összehasonlító
denzitometriás, morfometriai és törésvizsgálata**

PhD értekezés tézisei

Dr. Tóth Péter

2013

Szent István Egyetem
Állatorvos-tudományi Doktori Iskola

Témavezető:

.....

Dr. Bodó Gábor, PhD, habil., Dipl. ECVS

Universität Bern, Departement für klinische Veterinärmedizin. Tierspital,
Pferdeambulanz

Témabizottsági tagok:

Prof. Dr. Sótonyi Péter, DSc

tanszékvezető, egyetemi tanár

Szent István Egyetem, Állatorvos-tudományi Kar, Anatómiai és Szöveti
Tanszék

Prof. Dr. Szenci Ottó, DSc

tanszékvezető, egyetemi tanár

Szent István Egyetem, Állatorvos-tudományi Kar, Nagyállatklinika

.....

Dr. Péter Tóth

Bevezetés

A csonttörések, melyek nagyobb trauma vagy folyamatos használatból adódó strukturális sérülések hatására következnek be, jelentős gazdasági veszteségeket okoznak a ló- és lovassportban. A töréskockázat-bebecslés lovon ennek ellenére még nem kidolgozott.

A kettős energiájú röntgenfoton-abszorpciometria (*dual-energy X-ray absorptiometry*, DXA), mely az utóbbi két évtizedben a kutatók és klinikusok érdeklődésének középpontjába került, a töréskockázat-bebecslésben jelentős szerepet kaphat. A humán gyógyászatban már rutinszerűen alkalmazott eljárás az állatorvosi és lógyógyászati gyakorlatban még kevéssé elterjedt. Eddig főként *ex vivo* tanulmányokhoz alkalmazták, az *in vivo* vizsgálatra alkalmas technológia kifejlesztése és pontosítása napjainkban is zajlik.

A biomechanika a test tartószerkezeteinek mechanikai tulajdonságait vizsgáló és működésének mechanikai modellezésével foglalkozó tudomány, melynek keretein belül vizsgálják például a csontok törési, hajlíthatósági, nyújthatósági, rotálthatósági tulajdonságait.

A vizsgálatokat befolyásoló különböző tényezők nagy száma és a mérési technikák alapvető korlátai miatt a csont biomechanikai tulajdonságainak elemzése igen nagy nehézségekbe ütközik. Bár a vizsgálatok során igyekeznek az *in vivo* terhelési környezet paramétereit reprodukálni, ezen tesztek során számos nehézséget – többek közt a fizikai tulajdonságok heterogén mivoltát és a csontok aszimmetriájából eredő komplikációkat – kell leküzdeni.

A tanulmányok számos esetben a csontok tulajdonságainak leegyszerűsítésén alapulnak és csak egy adott paramétert vesznek figyelembe a vizsgálatnál. *In vivo* körülmények között azonban a tényezők komplex együttállása a jellemző, így ha a vizsgálat során az *in vivo* környezetet akarjuk reprodukálni, számos paramétert kell figyelembe vennünk. Több kutatócsoport foglalkozik a ló csontjának vizsgálatával, eredményeik – a fentiek miatt – is, igen eltérőek.

Ennek ellenére jelentős előrelépés történt az *in vivo* körülmények leírásában és megértésében.

A hármás metacarpalis csont felépítése révén inkább fokozza és modulálja a függőleges hajlítást, semmint ellenállna annak. A csonton belüli anyageloszlás is azt célozza, hogy terhelés alatt a csont minél ellenállóbban viselkedjen. Továbbá feltételezik, hogy a csont természetes kiképzése is olyan, hogy optimálisan ötvözze a lehető legnagyobb terhelést és teljesítményt a csont maximális ellenálló képességével, eltérő terhelési feltételek mellett is.

Angliai vizsgálatok szerint a lateralis condylus törése a leggyakoribb a halálos kimenetelű metacarpalis csont törések között, valószínűleg a csont proximo-distalis tengelyére ható állandó nyomóerő következtében a condylaris árokban fellépő folyamatos és koncentrált feszültség miatt. Ez helyileg stimulálja a csontátépülési folyamatot, aminek következtében a condylaris régióban az ásványanyag-sűrűség csökken, emiatt pedig megnövekszik a törés kockázata.

A stressztörést a versenyló-ipart ért anyagi károk egyik legmarkánsabb okaként tartják számon. Átfogó retrospektív vizsgálatok szerint a versenylóvak csont-izomrendszeri sérülései az esetek nagy részében fatális kimenetelűek. A csüdcsont (P1) törése a tréningek során következik be leggyakrabban, valamint a lóklinikákon elvégzett csontműtétek közül is az egyik leggyakoribb oszteosintézis. A legsúlyosabb egyszerű hosszanti és romtörések is a csüdcsontot érintik. A legtöbb törés „spontán” bekövetkezésűnek tűnik, annak ellenére, hogy valójában egy sor tényezőből összeálló komplex folyamat végeredménye. A fentiek miatt a töréskockázat-becslés a lógyógyászat egyik fontos kérdésévé válik. Jelen tanulmány elsődleges célja, hogy a lovak hármás metacarpalis és csüdcsontjainak vizsgálati eredményeivel hozzájáruljon a minél pontosabb töréskockázat-becslés kidolgozásához.

Célkitűzések

1. A lovak hármás metacarpalis és csüdcsontjainak ex vivo denzitometriás vizsgálatának kidolgozása. Célunk volt, hogy kimutassuk, van-e összefüggés a csontok BMD- és BMC-értékei, valamint a mérési irányok között.
2. Méréseink megbízhatósági adatainak tesztelése, valamint összefüggések keresése a csontok BMD- és BMC-értékei valamint a fajta, kor, nem, használati mód között. Kérdésként merült fel az oldalak közötti esetleges különbség leírása is.
3. Arra a kérdésre is kerestük a választ, hogy a hármás metacarpalis csontok és csüdcsontok egyes csontsűrűség-értékei vagy inkább a morfológiai paraméterei függenek össze a törési tulajdonságokkal. A CT vizsgálatok segítségével váltak mérhetővé a csontok morfológiai paraméterei. A törésvizsgálatok alkalmával a hármás metacarpalis csontokat hárompontos hajlítással, míg a csüdcsontokat függőleges irányú nyomóerővel teszteltük.

Anyag és módszer

1., A ló hármás metacarpalis és csüdcsontjainak denzitometriás vizsgálata, a módszer kidolgozása és tesztelése, egyéb összefüggések

Az összes állatot a Szent István Egyetem Állatorvos-tudományi Karának üllői Nagyállatklinikáján altattuk el, a jelen kutatást nem érintő egyéb okok miatt. A hármás metacarpalis- és csüdcsontokat az őket fedő lágy szövetek eltávolítása után 70%-os alkoholban tároltuk. Minden csont esetében feljegyeztük az állat korát, ivarát, fajtáját és használati módját, illetve hogy az adott csont mely oldali végtagból származik.

A csontokat *post mortem* denzitometriás vizsgálat alá vetettük a budapesti Semmelweis Orvostudományi Egyetem I. sz. Belgyógyászati Klinika ODM

Laboratóriumának Norland XR-26 típusú denzitométere segítségével (Norland XR-26, gyártó: Norland Corporation, Fort Atkinson, WI, USA).

Első lépésben a kilenc ló tizenegy hármás metacarpalis csontját dorsopalmaris (DP), palmarodorsalis (PD), lateromedialis (LM) és mediolateralis (ML) irányból vizsgáltuk, a „spine” üzemmódot alkalmazva. A csontokat a vizsgálat során egy 20mm vastagságú plexilapra helyeztük.

A mérések releváns tartományaként (ROI, *region of interest*) az egész csontot jelöltük ki, illetve mind a BMD, mind pedig a BMC értékét mértük, hasonlóan egy korábbi, más állatfajokon végzett vizsgálathoz. Ismételt vizsgálatok során átlagos és szóráserőteket számoltunk, majd páros t -próbával összevetettük a különböző irányokból végzett mérésekből kapott értékeket.

A munka második részében 17 ló 34 darab hármás metacarpalis csontját és csüdcsontját vizsgáltuk háromszor ismételt méréssel dorsopalmaris (DP) irányból.

A mérések célja az volt, hogy meg tudjuk állapítani a saját méréseink megbízhatóságát a vizsgált metacarpalis és csüdcsontok eredményei közötti variációs koefficiens kiszámításával, mivel meg akartunk bizonyosodni arról, hogy a csontok BMD- és BMC-értékeit megbízhatóan meg tudjuk határozni ismételt vizsgálatok nélkül is. A BMD- és BMC-adatokat kiértékeljük, továbbá összefüggéseket kerestünk az oldaliság, a lovak életkora, ivara és fajtája szerint is. Kiszámoltuk a variációs koefficienseket (CV%), majd a páros t -próba alkalmazásával elvégeztük a metacarpalis (McIII) és csüdcsontok (P1) csontsűrűség-értékeinek statisztikai összehasonlítását. Az adateloszlást Shapiro-Wilk teszttel vizsgáltuk. A BMD- és BMC-értékek, valamint a csonttípus (McIII vagy P1), az életkor, az ivar és a fajta összefüggéseinek vizsgálatához általános lineáris modellt és Tukey-tesztet alkalmaztunk. A statisztikai adatok elemzését az R 2.6.0 programmal (gyártó: R Development Core Team 2007) végeztük.

2., A ló hármás metacarpalis csontjainak összehasonlító denzitometriás, CT és törésvizsgálata

Mintavétel

A tanulmányban használt mintákat a Szent István Egyetem Állatorvostudományi Karának üllői Nagyállatklinikáján a jelen kutatást nem érintő egyéb okok miatt véglegesen elaltatott lovakból vettük. 13 ló 26 elülső végtagjából származó csontokkal dolgoztunk. A csontokról a kiboncolást követően manuálisan eltávolítottuk a lágyszöveteket, majd 70%-os etilalkoholba helyeztük és így tároltuk azokat a mérések elvégzéséig.

A csontok ásványianyag-sűrűségének mérése

A *post mortem* vizsgálatokat egy, a Norland Corporation (Fort Atkinson, WI, USA) által gyártott Norland XR-26 típusú denzitométerrel végeztük a budapesti Semmelweis Orvostudományi Egyetem I. sz. Belgyógyászati Klinikájának ODM Laboratóriumában. A mérések közben a csontokat 20mm-es plexiüveg lapra helyeztük. A csontokat három alkalommal mértük dorsopalmaris (DP) irányból, majd az eredményeket átlagoltuk. A vizsgálat releváns tartományaiként (ROI) az egész csontot, a mediális cortex régióját (1), a laterális cortexet (2), a hosszirányú középpont keresztirányú felszínét (3), valamint a függőleges mediális cortexet (4) jelöltük meg. A releváns tartományokat a vizsgált csontok megterhelt területein jelöltük ki, mivel tanulmányunk a BMD és a meghibásodási erő közötti korreláció meghatározását célozta.

CT-vizsgálat

A csontokat egy Siemens Somatom Emotion 6 Multislice CT (130 kV, 20 mAs, 2 mm-es szeletvastagság, gyártó: Siemens AG, Erlangen, Németország) berendezéssel szkenneltük a Kaposvári Egyetem Onkoradiológiai Központjában. A kortikális vastagságokat háromszor ismételve mértük le, minden releváns tartománynál átlagot számoltunk, majd a Siemens SIENET

szoftver (gyártó: Siemens AG, Erlangen, Németország) segítségével kiszámoltuk a csontok keresztmetszetének területét is.

Terheléssel vizsgálat

A csontok törésvizsgálatát egy INSTRON 8872 típusú szervohidraulikus univerzális tesztberendezés (UTM; gyártó: Instron, Norwood, MA, USA) segítségével hajtottuk végre a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Biomechanikai Kutatólaboratóriumában. A mintákat a hárompontos hajlítás során proximális és disztális irányból támasztottuk ki egy-egy fémrúddal, melyek közt 180mm távolságot hagytunk. A harmadik, géposzlophoz rögzített rúdon keresztül fejtettük ki a terhelést a palmáris közép-diafizialis cortexre, 90mm távolságra a proximális és disztális rudaktól palmarodorsalis irányban, 25 mm/mp-es sebességgel, amíg a törés be nem következett.

Statisztikai adatelemzés

A vizsgálatokból származó adatok statisztikai elemzését a kereskedelmi forgalomban kapható Minitab 16 (gyártó: Minitab Inc., PA, USA) programmal végeztük. Leíró statisztikai analízist végeztünk minden egyes változó középértékének, szórásának, mediánjának és terjedelmének megállapításához. Az adateloszlást Shapiro-Wilk teszttel vizsgáltuk. Pearson-féle lineáris regresszióanalízis segítségével vizsgáltuk a csonthossz, a megjelölt releváns tartományok BMD-értékei, valamint a csontok mechanikai paraméterei (törési erő, rugalmassági modulusok és törésszilárdság) közötti korrelációkat. Pearson-féle lineáris regresszióanalízist alkalmaztunk a CT-vizsgálatokkal nyert morфомetriás paraméterek (laterális, mediális, dorzális és palmáris szélesség és területnagyság) és a fenti mechanikai paraméterek közötti összefüggések feltárásához is. A korrelációk megállapításához a statisztikai szignifikanciát mindegyik esetben a $P < 0,05$ értékben határoztuk meg, illetve egy adott modell két változója között lineáris összefüggést feltételeztünk, ha a korrelációs koefficiensük (r) nagyobb volt, mint 0,6.

3., A ló csüdcsontjainak összehasonlító denzitometriás, CT és törésvizsgálata

Mintavétel

A tanulmányban használt mintákat a Szent István Egyetem Állatorvostudományi Karának üllői Nagyállatklinikáján a jelen kutatást nem érintő egyéb okok miatt véglegesen elaltatott lovakból vettük. A tanulmányban hét ló elülső végtagjainak csüdcsontjait vizsgáltuk. A csontokat a kiboncolást és a lágyszövetek manuális eltávolítását követően etilalkoholba helyeztük és szobahőmérsékleten tároltuk a mérések elvégzéséig.

A csontok ásványianyag-sűrűségének (BMD) mérése

A *post mortem* vizsgálatokat Norland XR-26 (Fort Atkinson, WI, USA) típusú denzitométerrel végeztük a budapesti Semmelweis Orvostudományi Egyetem I. sz. Belgyógyászati Klinikájának ODM laboratóriumában. A BMD-mérésekhez használt szoftver algoritmusához szükség volt a csontokat körülvevő lágyszövet helyettesítésére, ezért egy 20mm-es plexiüveg lapot alkalmaztunk. A csontokat egy alkalommal mértük dorsopalmaris (DP) irányból. Első lépésben az egész csont, majd három 1x1 cm-es releváns tartomány (ROI) BMD-értékét mértük. Releváns tartományként jelöltük meg a mediális cortexet és a laterális cortexet a csontok középső harmadában húzható horizontális tengely vonalában; valamint a proximális harmad sagittális síkjának trabekuláris régióját, 3 mm-re disztálisan a metacarpophalangeális ízület felszínének legmélyebb pontja alatt.

Computer-tomográfias (CT) mérések

A csontokat szintén a Kaposvári Egyetemen teszteltük Siemens Somatom Emotion 6 Multislice CT-berendezéssel (130 kV, 20 mAs, 2 mm-es szeletvastagság, gyártó: Siemens AG, Erlangen, Németország). A csüdcsontok morfometriás paramétereit közép-diafizialis síkban mértük a Siemens SIENET programjával. A cortex vastagságát dorzális, laterális, mediális és palmáris oldalról mértük, majd megállapítottuk a csont teljes vastagságát mind

dorsopalmaris, mind pedig lateromedialis irányból. A kortikális területet a kapott adatokból számítottuk ki a Sherman és munkatársai (1995) által leírt egyenlet segítségével. A CT-felvételeket a terheléses teszt után megismételtük a törési helyek feltérképezése céljából.

Terheléses vizsgálat

A csüdcsontok biomechanikai tulajdonságait a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Biomechanikai Kutatólaboratóriumában vizsgáltuk. A terheléses vizsgálathoz egy univerzális csonttörő berendezést (ZD-20 univerzális tesztberendezés) használtunk. Mivel a csüdcsont törésszilárdságáról korábbi *ex vivo* vizsgálatok adatai nem álltak rendelkezésre, a tesztnél a humán lumbális csigolyára vonatkozó előzetes beállításokat adtuk meg, tekintve, hogy annak kuboid alakja hasonló a csüdcsontéhoz. Annak érdekében, hogy a csontokat a törőgépből megfelelően tudjuk elhelyezni, szalagfűrésszel eltávolítottuk azok proximális és disztális ízületi peremét a csüdízületi (proximális) és pártáízületi (disztális) felszín legmélyebb pontjának síkjában. A csontokat proximodistalis irányból vetettük alá terhelésnek, mivel ez az irány az *in vivo* erőhatásokhoz közel áll. A törésszilárdságot a nyomóerő értéke alapján számítottuk ki.

Statisztikai elemzés

A vizsgálatokból származó adatok statisztikai elemzését a kereskedelmi forgalomban is kapható Minitab 16 programmal végeztük. A csontásványianyag-sűrűség, kortikális terület, cortexvastagság, csontvastagság, töréserő és törésszilárdság megállapításához középértéket, szórást, mediánt és terjedelmet számítottunk. Az adateloszlást Shapiro-Wilk teszttel állapítottuk meg. Pearson-féle lineáris regresszióanalízis segítségével vizsgáltuk a BMD-értékek (teljes csont BMD, trabekuláris BMD, laterális cortex BMD, mediális cortex BMD), a kortikális terület, a laterális, mediális, dorzális és palmáris régiók kortikális vastagsága, a sagittális és keresztirányú

csontvastagság, valamint a törésszilárdság és a nyomási erő közötti összefüggéseket. A korrelációk megállapításához a $P < 0,05$ értéket határoztuk meg a statisztikai szignifikancia értékeként, illetve lineáris összefüggést tételeztünk abban az esetben, ha a regressziós koefficiens (r) nagyobb volt, mint 0,6 ($r > 0,6$).

Eredmények és értelmezésük

1., A ló hármás metacarpalis és csüdcsontjainak denzitometriás vizsgálata, a módszer kidolgozása és tesztelése, egyéb összefüggések

Tanulmányunk első részében bebizonyítottuk, hogy a metacarpalis csont dorsopalmaris (DP) és palmarodorsalis (PD), valamint lateromedialis (LM) és mediolateralis (ML) irányainak BMD- és BMC-értékei között nincs jelentős eltérés, azaz az ellenoldali irányokból mért BMD- és BMC-értékek között nem mutatható ki szignifikáns különbség ($P > 0,05$). A különböző irányok tekintetében mért BMD-különbségek a hármás metacarpalis csont geometriájával magyarázhatók. Javasoljuk, hogy a jövőbeni vizsgálatok azonos pozicionálást alkalmazzanak annak érdekében, hogy a csontok közötti biológiai különbségek feltérképezhetőek legyenek. Fontosnak tartjuk a mérési módszer standardizálását a jövőbeni mérések pontosságának fenntartásához és biztosításához.

Következő lépésként tizenhét ló 34 db hármás metacarpalis csontját és 34 db csüdcsontját mértük háromszor ismételt méréssel dorsopalmaris (DP) irányból. Megállapítottuk, hogy nincsenek szignifikáns eltérések az ugyanazon csontra vonatkozó ismételt mérésekkel kapott értékek között, így arra a következtetésre jutottunk, hogy egy mérés is elegendő a hármás metacarpalis (McIII) és csüdcsontok (P1) DXA-módszerrel történő kiértékeléséhez.

A metacarpalis csont dorsopalmaris ásványianyag-sűrűségi értékeihez (g/cm^2) tartozó variációs koefficiensek (CV%) 0,09 és 0,55 között, míg az ásványianyag-tartalom értékeihez (g) tartozók 0,05 és 0,89 között mozognak. A

csüdcsont dorsopalmaris ásványianyag-sűrűségi értékeihez (g/cm^2) tartozó variációs koefficiensek (CV%) 0,10 és 0,76 között, míg az ásványianyag-tartalom értékeihez (g) tartozók 0,07 és 0,76 között mozognak.

A bal és a jobb oldali végtagból származó azonos csontok BMD- és BMC-értékeinek összehasonlításakor sem találtunk statisztikailag szignifikáns eltérést a két különböző oldali végtag között ($P > 0,05$). A humán tudományokból már ismert „oldalíság” jelenségét mi nem tudtuk igazolni lovakon, igaz a mintáink között összesen egy angol telivér versenylő szerepelt. Mivel a jobb és a bal oldali csontok BMD- és BMC-értékei között nem mutatkozott szignifikáns különbség, a továbbiakban csak a jobb oldali végtagokból nyert csontminták adataival dolgoztunk.

Munkánk során kimutattuk, hogy lovakban a hármás metacarpalis csont sűrűsége nagyobb, mint a csüdcsonté, mindemellett a ló csüdcsontjának vizsgálatára első ízben alkalmazhattuk a DXA-módszert.

Vizsgálataink alapján a ló hármás metacarpalis és csüdcsontjainak BMD- és BMC-értékei nem korrelálnak sem az állat életkorával ($P = 0,053$ a BMD és $P = 0,192$ a BMC esetében), sem a fajtájával ($P = 0,227$ a BMD és $P = 0,071$ a BMC esetében). Kimutattuk viszont, hogy a ló ivara nagymértékben befolyásolja a csontok BMD- és BMC-értékeit ($P = 0,005$ a BMD és $P = 0,015$ a BMC esetében). Mind az ásványianyag-sűrűség, mind pedig az ásványianyag-tartalom szignifikánsan nagyobb a herélt lovak csontjaiban, mint a kancák ($P = 0,002$ a BMD és $P = 0,0004$ a BMC esetében) vagy mének ($P = 0,003$ a BMD és $P = 0,012$ a BMC esetében) csontjaiban. A kancák és mének BMD és BMC értékei között azonban nem mutatkozik szignifikáns eltérés ($P = 0,923$ a BMD és $P = 0,999$ a BMC esetében). A kapott eredmények azt mutatják, hogy további, nagyobb mintán való BMD-vizsgálatok szükségesek.

2., A ló hármás metacarpalis csontjainak összehasonlító denzitometriás, CT és törésvizsgálata

A legnagyobb ásványianyag-sűrűségi értéket a keresztirányú ROI-ban mértük (középvérték \pm SD=2,4225 \pm 0,2637g/cm²), ahol a csont hosszanti középpontjánál vett keresztmetszete átfogja mind a négy kvadránst, amibe beletartozik a palmáris régió is. A humán orvostudományban közölt tanulmányok ez utóbbit tartják a legnagyobb sűrűségűnek, mivel fiziológiai terhelés alatt ez a régió nyomófeszültségnek van kitéve.

A humán orvostudományi kutatásokhoz hasonlóan mi is a mediális kortex ásványianyag-sűrűségi értékeit találtuk a második legnagyobbak a mérések során (2,3767 \pm 0,2581g/cm²). Az összes releváns tartomány közül a teljes csontonál mértük a legkisebb ásványianyag-tartalmat (2,1630 \pm 0,2181g/cm²), ami azzal magyarázható, hogy a vizsgálatok során az egész csontba belevettük az alacsonyabb sűrűségű epifízist is.

A vizsgálatok során a leginkább szignifikáns korrelációt a csont ásványianyag-sűrűsége és a törési erő között találtuk. A teljes csont és a mediális kortex BMD-értékei mutatkoztak a csonterősség legjelentősebb indikátorainak (előbbinél $P<0,001$, $r=0,72$; utóbbinál $P<0,001$, $r=0,68$). A teljes csont BMD-értéke és a töréserő közötti jelentős korreláció egyik lehetséges magyarázata, hogy bár regionális szemcsézetről nem beszélhetünk, a teljes csont BMD-értékében tükröződik az a tény, hogy a csont teljes hosszát tekintve nem homogén összetételű. A mediális kortextet illető korreláció részben valószínűleg annak tudható be, hogy a vizsgált minták közül ebben a régióban a legvastagabb a kortex, így az adja a teljes csont sűrűségének és stabilitásának jelentős részét.

A töréserő korrelál emellett a keresztirányú ROI BMD-értékével ($P<0,001$, $r=0,61$), a laterális kortex ROI BMD-értékével ($P<0,001$, $r=0,59$), illetve a függőleges mediális kortex ROI BMD-értékével ($P<0,001$, $r=0,6$) is.

A rugalmassági modulus szintén korrelál a csont átmérőjével ($P < 0,001$, $r = 0,67$), valamint – a töréserőhöz hasonló általános regressziós mintát követve – kismértékben korrelál a dorzális kortex vastagságával ($P = 0,004$, $r = 0,55$).

A metacarpalis csont e tanulmányban vizsgált méretei nem mutattak szignifikáns korrelációt a törésszilárdsággal.

Csak kismértékű pozitív korrelációt találtunk a töréserő és a kortikális terület között ($P = 0,006$, $r = 0,52$). A csont átmérője szintén csak kismértékű pozitív korrelációt mutat a törési erővel ($P = 0,003$, $r = 0,5$). Az egyes kortikális kvadránsok vastagságai és a csont többi mechanikai tulajdonsága között sem sikerült statisztikai korrelációt kimutatnunk. A törésszilárdság továbbá nem korrelált szignifikánsan sem a kvadránsok kortikális vastagságával, sem pedig a csonthosszal.

Vizsgálati eredményeink szerint a törésszilárdság a csont átmérőjével korrelál ($P < 0,001$, $r = 0,7$). Más tanulmányok is kimutattak hasonló összefüggéseket.

Az egyes kortikális kvadránsok vastagságai és a csont többi mechanikai tulajdonsága között sem sikerült statisztikai korrelációt kimutatnunk. Ez ellentmond néhány korábbi tanulmánynak, melyek különbségeket találtak a kortikális kvadránsok között szilárdság és merevség tekintetében, és amelyek a laterális kvadránst találták a legszilárdabbnak. Ezekben a tanulmányokban gyakran eltérő kortikális régiókból vett mintákat elemeztek, és nem az egész csont teljes keresztmetszetét.

A keresztmetszetek paramétereinek elemzése során a kapocscsontokkal összenőtt metacarpalis csontot nem számítottuk a kortikális területbe, és nem tekintettük a csontszilárdságot befolyásoló specifikus változónak vagy tulajdonságnak. Korábbi kutatások alapján azonban valószínűsíthető, hogy a kapocscsontjukkal összenőtt metacarpalis csontok befolyásolják a hajlítószilárdságot és a csont rugalmasságát. További vizsgálatok szükségesek annak megállapításához, hogy a területkülönbségek mennyiben befolyásolják a terület és a törésszilárdság vagy hajlítószilárdság közötti korrelációt.

A tanulmányban használt terhelési teszt módszer során a csontok hosszanti középpontjára fejtettünk ki mesterséges erőbehatást palmarodorsalis irányból. Azonban figyelembe kell venni, hogy versenylovaknál a törések leggyakrabban a laterális condylusban mennek végbe. Ezért a jövőbeni kutatásokban érdemes ezt a régiót is releváns tartományként kijelölni.

3., A ló csüdcsontjainak összehasonlító denzitometriás, CT és törésvizsgálata

A tanulmányban hét lóból vett összesen 14 db csüdcsontot vizsgáltunk. Egy csüdcsont eredményeit nem számítottuk be a statisztikai értékekbe, mivel a terhelési teszt után a CT-felvételeken nem tudtuk beazonosítani a csont törésének helyét.

A ló csüdcsontjának ODM vizsgálata során a legalacsonyabb BMD-értéket a trabekuláris ROI-ban mértük. Lóban a trabekuláris régió anatómiája és fiziológiája egyaránt eltér a kortikális régiótól. A trabekuláris régió alacsony ásványianyag-tartalmú kis csontgerendákból áll és a kortikális régióval ellentétben ezt a területet nemcsak a D-vitamin, a calcitonin és a mellékpajzsmirigy-hormon, hanem a helyi erőbehatások is befolyásolják, melyek kifejezett csontátépülést indukálhatnak, amivel a régió közvetlenül képes reagálni a mechanikai behatásokra. Ezzel egybehangzóan a humán orvostudományban számos esetben leírták, hogy az immobilizáció trabekuláris csontvesztést okoz, ami a csontgerendák elvékonyodásával vagy teljes elvesztésével jár.

A tizennégy csontmintából tizenhárom esetében (13/14, 92,86%) a törésvonalak a sagittális síkban keletkeztek. A tizenhárom csontból öt esetében (5/13, 38,46%) a törésvonalak a proximális és középső harmadban helyezkedtek el, hatnál (6/13, 46,15%) a középső és a disztális harmadban jöttek létre, illetve kettőnél (2/13, 15,38%) a sagittális sík középső harmadában keletkeztek.

In vitro tanulmányunk során szignifikáns pozitív lineáris korrelációt ($P=0,023$, $r=0,62$) mutatottunk ki a trabekuláris régió BMD-értéke és a törési erő nagysága között. A többi paraméter nem mutatott szignifikáns korrelációt sem a nyomásslárdással, sem a töréserővel.

Ez az eredmény egybeesik azzal a klinikai tapasztalattal, miszerint a csüdcsont törése a trabekuláris régióban a leggyakoribb. Jelen tanulmányunkban a törést követő CT-felvételek alapján kimutattuk, hogy a csüdcsont törésvonala a legtöbb esetben a sagittális sík proximális és disztális trabekuláris régiójában keletkezett. Ez egybevág egy korábbi retrospektív tanulmány eredményeivel. A jövőben érdemes lenne nagyobb hangsúlyt fektetni erre a régióra, mivel a trabekuláris régió kulcsfontosságú a csüdcsont sagittális töréseiben.

Az egybevágó eredmények ellenére hangsúlyoznunk kell, hogy a sagittális trabekuláris töréseket jelenleg a hármás metacarpalis csont sagittális taraja által kifejtett mechanikai hatásnak tulajdonítják, amire tanulmányunk *in vitro* modellje nem tért ki.

Tanulmányunk összefoglalásaként elmondhatjuk, hogy a trabekuláris régió az egyetlen olyan ROI, amely a csüdcsont meghibásodását előre jelzi. A jövőbeni vizsgálatokban tehát javasolt a törésvonalak beazonosítása és a BMD-értékek mérése is ebben a régióban. Emellett további vizsgálatok szükségesek annak feltárására, hogy a trabekuláris BMD-értékek alkalmazhatók-e indikátorként a ló csüdcsontját érintő törések kockázatának meghatározására.

Új tudományos eredmények

1. A lovak *ex vivo* csontsűrűség-vizsgálata kapcsán a lágyszövetek helyettesítését egy kényelmes, egyszerű és hasznos metodikai módszerrel sikerült megoldanunk, valamint a ló csüdcsontjának vizsgálatára első ízben alkalmazhattuk a DXA-módszert.
2. Bebizonyítottuk, hogy a hármás metacarpalis csont ellenoldali (DP-PD és LM-ML) irányból mért BMD- és BMC-értékei között statisztikailag nem mutatható ki különbség ($P > 0,05$). Ugyancsak megállapítottuk, hogy nincsenek szignifikáns eltérések az ugyanazon csontra vonatkozó ismételt mérésekkel kapott értékek között. Így arra a következtetésre jutottunk, hogy egy mérés is elegendő a hármás metacarpalis (McIII) és csüdcsontok (P1) DXA-módszerrel történő kiértékeléséhez.
3. Megállapítottuk, hogy a hármás metacarpalis csont sűrűsége nagyobb mint a csüdcsonté, valamint eredményeink szerint a BMD- és BMC-értékeket csak az állat ivara befolyásolja szignifikánsan ($P > 0,005$).
4. A hármás metacarpalis csont összehasonlító vizsgálata során a teljes csont és a mediális cortex BMD-értékei mutatkoztak a csonterősség legjelentősebb indikátorainak (előbbinél $P < 0,001$, $r = 0,72$; utóbbinál $P < 0,001$, $r = 0,68$). Bebizonyosodott, hogy a hármás metacarpalis csont esetében a törésszilárdság a csont átmérőjével korrelál ($P < 0,001$, $r = 0,7$). A rugalmassági modulus szintén korrelál a hármás metacarpalis csont átmérőjével ($P < 0,001$, $r = 0,67$), valamint – a töréserőhöz hasonló általános regressziós mintát követve – kismértékben korrelál a dorzális cortex vastagságával ($P = 0,004$, $r = 0,55$).
5. A csüdcsont esetében a legalacsonyabb BMD-értéket a trabekuláris ROI-ban mértük, ill. szignifikáns pozitív lineáris korreláció van a trabekuláris régió BMD-értéke és a törési erő nagysága között.

A doktori kutatás eredményeinek közlései

***Lektorált, impakt faktorral bíró tudományos folyóiratban
megjelent/elfogadott publikációk***

Tóth P., Horváth Cs., Ferencz V., Szenci O., Bodó G.: A kettős energiájú röntgenfoton-abszorpciometria (DXA) alkalmazása az állatgyógyászatban. *Magy. Áo. Lapja* 2011. szeptember 562- 569. **IF: 0,201**

Tóth P., Horváth Cs., Ferencz V., Nagy K., Gligor N., Szenci O., Bodó G.: Assessment of the mineral density and mineral content of the equine third metacarpal and first phalanx bone by dual energy x-ray absorptiometry. *Acta Vet. Hung.* 2010. 58. 317-329. **IF: 1,268**

P. Tóth, C. Horváth, V. Ferencz, B. Tóth, A. Váradi, O. Szenci, G. Bodó: Bone mineral density (BMD) and computer tomographic measurements of the equine proximal phalanx in correlation with breaking strength. *Pol. J. Vet. Sci.* 2013. 16. 3-8. **IF: 0,565**

Konferencia prezentációk

Tóth P., Ferencz V., Végh Zs., Szenci O., Borbás L., Kiss R., Bodó G., Horváth Cs.: Lovak hármás metacarpalis- és csüdcsontjainak *ex vivo* törésvizsgálata. *Ca és Csont.* 2009. 12. (2) 74. (előadás és absztrakt)

Tóth P., Ferencz V., Vandrus B., Mészáros Sz., Szenci O., Bodó G., Horváth Cs.: Lovak hármás metacarpalis- és csüdcsontjainak *ex vivo* törésvizsgálata. *Ca és Csont.* 2010. 13. (1) 30-31. (előadás és absztrakt)

Tóth P., Bodó G.: A csontsűrűség vizsgálata kettős energiájú röntgenfoton abszorpciometria (DEXA) módszerrel a ló metacarpalis csontjain 2008. január MTA Állatorvos-Tudományi Bizottsága, Akadémiai beszámoló (előadás és absztrakt)

Tóth P., Horváth Cs., Ferencz V., Bodó G.: A csontsűrűség vizsgálata kettős energiájú röntgenfoton abszorpciometria (DEXA) módszerrel a ló metacarpalis és csüdcsontjain IX. Magyar Osteológiai Kongresszus. 2008. május 21-24., Balatonfüred (előadás és absztrakt)

Tóth P., Horváth Cs., Ferencz V., Nagy K., Gligor N., Bodó G.: A csontsűrűség vizsgálata kettős energiájú röntgenfoton abszorpciometria (DEXA) módszerrel a ló metacarpalis és csüdcsontjain A Magyar Lógyógyász Állatorvosok Egyesületének Országos Konferenciája 2008. Hortobágy (előadás és absztrakt)

Tóth P., Horváth Cs., Ferencz V., Nagy K., Gligor N., Szenci O., Bodó G.: A csontsűrűség vizsgálata kettős energiájú röntgenfoton abszorpciometria (DEXA) módszerrel a ló metacarpalis és csüdcsontjain 2009. január MTA Állatorvos-Tudományi Bizottsága, Akadémiai beszámoló (előadás és absztrakt)

Tóth P., Ferencz V., Végh Zs., Szenci O., Borbás L., Kiss R., Bodó G., Horváth Cs.: Lovak hármás metacarpalis- és csüdcsontjainak *ex vivo* törésvizsgálata. X. Magyar Osteológiai Kongresszus. 2009. május 20-23., Balatonfüred (előadás és absztrakt)

Tóth P., Ferencz V., Vandrus B., Mészáros Sz., Szenci O., Bodó G., Horváth Cs.: Lovak hármás metacarpalis- és csüdcsontjainak *ex vivo* törésvizsgálata. XI. Magyar Osteológiai Kongresszus. 2010. május 19-22., Balatonfüred (előadás és absztrakt)

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Bodó Gábornak, hogy támogatta a munka elkészülését.

Köszönöm a Szent István Egyetem Állatorvos-tudományi Kar, Üllői Nagyállatklinikája vezetőjének Prof. Szenci Ottónak, a klinika állatorvosainak és minden dolgozójának a segítségét.

Köszönöm a Semmelweis Egyetem I. sz. Belgyógyászati Klinikájának: Dr. Horváth Csaba tanár úrnak, Dr. Ferencz Viktória egyetemi tanársegédnek, Dr. Mészáros Szilvia egyetemi adjunktusnak; valamint az ODM labor asszisztenseinek: Arany Zoltánnának, Gálné Szántó Erikának, Geréné Csordás Ildikónak és Csákvári Tímeának, hogy önzetlen segítségükkel támogattak.

Köszönöm Budapesti Műszaki Egyetem Biomechanikai Kutató Laboratóriumának: Dr. Kiss Ritának és Dr. Borbás Lajos tanár úrnak és a Kaposvári Onkoradiológiai Központ dolgozóinak: Dr. Petrási Zsoltnak és Dr. Donkó Tamásnak a munkáját.

Külön köszönettel tartozom Dr. Nagy Krisztinának és Dr. Tóth Baláznak a statisztika területén nyújtott elengedhetetlen segítségét.

Köszönettel tartozom a témában dolgozó volt szakdolgozatosaimnak és volt TDK hallgatóimnak is a munkában nyújtott segítségükért, akik ma már végzett állatorvosok: Dr. Gligor Noémi, Dr. Végh Zsófia, Dr. Jankó Kata, Dr. Grace Hinton és Dr. Várad Anna.

Végül, de nem utolsósorban pedig szeretném megköszönni feleségemnek Edinának, szüleimnek, testvéreimnek és az egész családomnak, hogy kitartásukkal, folyamatos biztatásukkal és türelmükkel segítették a munka elkészültét.