

DE TOEPASSING EN DE TOEGEVOEGDE WAARDE VAN DUAL- ENERGY COMPUTER TOMOGRAFIE BIJ DE DIAGNOSE VAN DISTALE LIDMAAT PATHOLOGIE BIJ HET PAARD

DEEL 2: ONDERZOEKSARTIKEL

Aantal woorden: 3012

Bamsi van Diemen

Studentennummer: 02213406

Promotor: Prof. dr. Katrien Vanderperren

Promotor: Dierenarts Jolien Germonpré

Onderdeel van de Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad master in de diergeneeskunde

Academiejaar: 2024 – 2025

Universiteit Gent, haar werknemers of studenten bieden geen enkele garantie met betrekking tot de juistheid of volledigheid van de gegevens vervat in deze masterproef, noch dat de inhoud van deze masterproef geen inbreuk uitmaakt op of aanleiding kan geven tot inbreuken op de rechten van derden.

Universiteit Gent, haar werknemers of studenten aanvaarden geen aansprakelijkheid of verantwoordelijkheid voor enig gebruik dat door iemand anders wordt gemaakt van de inhoud van de masterproef, noch voor enig vertrouwen dat wordt gesteld in een advies of informatie vervat in de masterproef.

Woord vooraf

Het schrijven van deze masterproef was een intensief maar verrijkend proces, waarbij ik op veel steun heb mogen rekenen. Daarom wil ik graag enkele mensen in het bijzonder bedanken.

Graag wil ik mijn copromotor, Jolien Germonpré, in het bijzonder bedanken voor haar intensieve begeleiding, haar steeds snelle en behulpzame feedback, en haar aanhoudende betrokkenheid bij dit werk. Haar hulp is van onschatbare waarde geweest tijdens het hele proces.

Mijn promotor, Katrien Vanderperren, wil ik bedanken voor haar motiverende rol bij de keuze van het onderwerp en haar waardevolle input gedurende het traject.

Dank aan mijn vriendinnen voor de vele gezamenlijke masterproefsessies, de aanmoediging onderweg, en de humor op de juiste momenten. Dankzij jullie ben ik gemotiveerd gebleven.

Mijn moeder wil ik bedanken voor het zorgvuldige nalezen van mijn werk en haar hulp bij het scherpstellen van de tekst.

Tot slot een liefdevolle dank aan mijn hond – mijn trouwe studiemaatje – voor haar gezelschap en de eindeloze uren voetverwarming.

Aan iedereen die heeft bijgedragen: oprecht bedankt.

Bamsi van Diemen

Samenvatting

Deze masterproef onderzoekt de toepasbaarheid van **dual-energy computertomografie (DECT)** voor het detecteren van **beenmergoedeem** en **weke delen letsels** in de **distale ledematen van paarden**, in vergelijking met **magnetische resonantiebeeldvorming (MRI)** en conventionele CT. DECT maakt gebruik van twee fotonenergieën en laat via **virtual non-calcium (VNCA)**-beelden vochtaccumulatie in botstructuren zien. Daarnaast biedt het met **collageen mapping (cMap)** potentieel inzicht in bindweefselletsels.

Vijf voeten en twee kogelgewrichten van zes geëuthanaseerde paarden werden onderzocht met zowel MRI als DECT. MRI identificeerde bij drie gevallen beenmergoedeem; DECT bevestigde dit in twee van deze drie gevallen, en detecteerde bijkomende letsels die niet op MRI zichtbaar waren. De VNCA-techniek toonde zich in staat tot het visualiseren van beenmergoedeem, echter wel met beperkingen qua sensitiviteit.

In twee van de zeven gevallen werd er een weke delen defect geobserveerd op de referentiemodaliteiten (MRI en weke delen CT); deze werden niet gedetecteerd op de DECT cMap. In alle gevallen was de beeldkwaliteit van de DECT cMap ontoereikend om weke delen betrouwbaar te beoordelen.

Hoewel DECT potentie toont voor het opsporen van beenmergoedeem bij paarden, is de techniek voor het detecteren van weke delen letsels via cMap momenteel onvoldoende betrouwbaar. Optimalisatie van scaninstellingen en validatie met histologie zijn aanbevolen. Deze studie benadrukt de meerwaarde van DECT als aanvullende beeldvormingstechniek bij paarden, maar onderstreept ook de noodzaak van verdere ontwikkeling voordat klinische implementatie plaats vindt.

Beeldvorming – Beenmergoedeem – DECT – Paardenbenen – Zachtweefsel

English summery

This master's thesis investigates the added value of **dual-energy computed tomography (DECT)** compared to conventional CT and **MRI** for detecting **bone marrow edema** and **soft tissue lesions** in the **distal limbs of horses**. DECT is an advanced imaging technique that uses two different X-ray energy levels, allowing for improved tissue characterization. In human medicine, DECT has already proven effective in visualizing both bone and soft tissue injuries, particularly for detecting bone marrow edema using **virtual non-calcium (VNCA)** mapping and assessing connective tissue structures through **collagen mapping (cMap)**. In veterinary medicine, however, the use of DECT has been scarcely studied.

In this study, seven distal limbs from six post-mortem horses were examined using DECT, conventional CT, and low-field MRI. The VNCA images obtained through DECT indicated the presence of bone marrow edema in five out of seven limbs, of which two cases correlated with MRI findings. The cMap images, however, were of insufficient quality to reliably assess soft tissue lesions. Conventional CT was found to be effective in detecting certain soft tissue injuries.

While this study confirms the potential of VNCA-DECT for identifying bone marrow edema in equine patients, cMap currently offers no added value for evaluating soft tissues. Optimization of scanning parameters, post-processing, and validation through histopathology are necessary before clinical application. This research provides an important first step in evaluating DECT as a supplementary imaging modality in equine veterinary medicine.

Bone marrow edema – DECT – Equine limbs – Imaging – Soft tissue

1 Introductie

Een breed scala aan pathologieën aan de distale lidmaten bij paarden wordt gediagnosticeerd met cross-sectionele beeldvormingsmethoden. Hierbij is magnetische resonantiebeeldvorming (MRI) een veelgebruikte techniek die zowel bot- als zachte weefselstructuren in detail kan weergeven, bij een staand paard of onder algehele anesthesie (Dyson et al., 2003, 2008; Dyson en Murray, 2007; Vanderperren et al., 2008; Bolen et al., 2010; Werpy, 2012; Claerhoudt et al., 2014; Barrett et al., 2017; Vandekerckhove et al., 2021). Daarnaast wordt er steeds meer gebruik gemaakt van CT-beeldvorming, die door de korte acquisitietijd van slechts enkele seconden, steeds vaker staand onder sedatie, kan worden uitgevoerd (Desbrosse et al., 2008; Porter en Werpy, 2014; Dixon et al., 2016; Mageed, 2022; Moliner et al., 2022; Germonpré et al., 2024). Echter zien we dat de conventionele CT-beeldvorming minder ideaal is voor het evalueren van weke delen, doordat de beelden gevormd worden door verschillende attenuatiecoëfficiënten van gescande weefsels. Deze verzwakkingscoëfficiënt is niet voor elk weefsel uniek aangezien deze wordt bepaald door de massadichtheid en de fotonenergie die binnenkomt (Alvarez en Macovski, 1976; Avrin et al., 1978). Om de weefselkarakterisering te verbeteren, kan er een nieuwe beeldvormingsmethode, namelijk de dual-energy computertomografie (DECT), worden ingezet. DECT gebruikt twee verschillende fotonenergieën, waardoor per voxel twee verzwakkingscoëfficiënten worden verkregen. De verhouding tussen deze coëfficiënten maakt een betere differentiatie van weefsels mogelijk, ook van zachte weefsels (Alvarez en Macovski, 1976; Johnson et al., 2007; Fletcher et al., 2009; McCollough et al., 2015; Germonpré et al., 2024). Door de toepassing op zachte weefsels heeft DECT-technologie een meerwaarde bovenop de conventionele CT. Waar voorheen enkel MRI werd ingezet voor de detectie van weke delen letsels en beenmergoedeem, wordt in de humane geneeskunde nu ook DECT gebruikt (Chen et al., 2020; Cheong et al., 2024; Germonpré et al., 2024).

De term “beenmergoedeem” omvat diverse histopathologische veranderingen in het beenmerg, zoals necrose, fibrose, bloedingen en in zeldzame gevallen “echt” oedeem. De classificatie hiervan werd bij mensen voor het eerst geïntroduceerd door Wilson in 1988 (Wilson et al., 1988). Met MRI identificeerde hij afwijkingen in het beenmerg bij patiënten met pijnlijke gewrichten, ondanks het ontbreken van zichtbare afwijking op röntgenfoto's. Bij paarden met letsels aan de distale lidmaten, waarbij er op röntgenfoto's geen opvallende afwijkingen zichtbaar zijn, kan er ook gebruik worden gemaakt van MRI om beenmergoedeem aan te tonen. Dit kan bijdrage aan passende zorg en het voorkomen van verder letsel (Plenk et al., 1997; Zanetti et al., 2000; Martig et al., 2007; Thiryayi et al., 2008; Olive et al., 2009; Mizobe et al., 2019).

Naast MRI kan ook DECT worden gebruikt om beenmergoedeem op te sporen (Foti et al., 2019; Li et al., 2023). Hoewel beide technieken hetzelfde diagnostische doel hebben, verschillen ze fundamenteel in werkingsmechanisme. MRI detecteert veranderingen in signaalpatronen als gevolg van verhoogd watergehalte in het aangedane bot. Beenmergoedeem toont zich daarbij als een signaalverlaging op T1-gewogen beelden en als een signaalverhoging op T2-gewogen en vetonderdrukte reeksen zoals STIR (Short Tau Inversion Recovery). Hierdoor kunnen vochtige laesies duidelijk worden onderscheiden van het normaal vetrijke beenmerg (Hayes et al., 1993; Dyson et al., 2005; Starr et al., 2008; Schett, 2009; Chen et al., 2020; Germonpré et al., 2024).

Vetonderdrukking in deze sequenties vergemakkelijkt het herkennen van subtiele afwijkingen. De zogeheten XBONE-techniek visualiseert vet en water afzonderlijk via een gradiënt-echo-aanpak, die twee beeldsets genereert: één voor vet- en één voor watersignaal.

DECT werkt via een andere aanpak en gebruikt algoritmen die verschillende materiaalsamenstellingen onderscheiden. Voor het opsporen van beenmergoedeem wordt een drie-materialen decompositiemodel toegepast, waarbij calcium digitaal uit het beeld wordt gefilterd. Dit levert virtuele non-calcium (VNCa)-beelden op, waarmee vet- en vochtdistributie in het beenmerg nauwkeurig kan worden geanalyseerd (Johnson et al., 2007; Pache et al., 2010; Germonpré et al., 2024).

In de humane beeldvorming is DECT succesvol toegepast voor het opsporen van beenmergoedeem in gewrichten zoals pols, hand, heup, knie, enkel en wervelkolom (Booz et al., 2020; Foti et al., 2019;

Guggenberger et al., 2012; Jang et al., 2019; Jans et al., 2018; Pache et al., 2010; Son et al., 2020; Wang et al., 2013; Yadav et al., 2020).

Met een nauwkeurigheid van 90–91%, specificiteit van 91–98% en gevoeligheid van 81–94% in vergelijking met de gouden standaard MRI, blijkt DECT een betrouwbare methode voor het detecteren van botoedeem bij mensen (Germonpré et al., 2024; Wang et al., 2024). Botsclerose kan de nauwkeurigheid echter beperken, doordat deze moeilijk te onderscheiden is van botoedeem (Diekhoff et al., 2022).

Naast het opsporen van beenmergoedeem, biedt DECT ook mogelijkheden om collageen in weke delen in beeld te brengen. Recent onderzoek toont aan dat DECT effectief onderscheid maakt tussen weke delen letsels zoals vasculaire calcificaties en tendinitis (Omoumi et al., 2015; Patino et al., 2016; Wong et al., 2021; Cheong et al., 2024). Omdat collageen röntgenstraling anders absorbeert dan vet en water, kan het via DECT goed worden afgebeeld. Collageen mapping (cMap) is een geavanceerde techniek die via onder andere MRI en echografie veranderingen in collageenstructuur visualiseert. Dit is vooral nuttig bij gewrichten die gevoelig zijn voor degeneratie, zoals knie, schouder, heup en wervelkolom (Matzat et al., 2014; Peltola and Koskinen, 2015; Aghdam et al., 2022; Mallio et al., 2022; Zeldin et al., 2020; Cao et al., 2023). cMap helpt niet alleen bij diagnose, maar ook bij het volgen van ziekteprogressie en het evalueren van behandelingen (Banitalebi et al., 2021; El-Liethy and Kamal, 2021). De techniek toont veelbelovende resultaten voor zowel diagnostische als prognostische toepassingen (Peltola and Koskinen, 2015; Patino et al., 2016; Aghdam et al., 2022; Ulas et al., 2022; Gruenewald et al., 2023; Wilson et al., 2023; Bernatz et al., 2024).

DECT-software gebruikt een *material decomposition* model om weefsel-specifieke signaturen te analyseren en genereert op basis daarvan een cMap. Hiermee worden collageenrijke structuren visueel weergegeven via kleurcodering, wat de dichtheid en ruimtelijke verdeling van collageen gedetailleerd zichtbaar maakt (Ziegeler et al., 2021; Gruenewald et al., 2023). Dit ondersteunt de diagnostiek en differentiële diagnose van musculoskeletale aandoeningen.

Hoewel DECT zich binnen de humane geneeskunde al heeft bewezen als een waardevolle beeldvormingstechniek voor het detecteren van zowel botoedeem als weke delen letsels, blijft de toepassing ervan binnen de diergeneeskunde, en meer specifiek bij paarden, nog beperkt onderzocht. Bij het paard zijn tot nu toe enkele studies verschenen waarin DECT werd gebruikt voor het in beeld brengen van hoofstructuren, fracturen en collageenrijke weefsels zoals pezen. Zo werd er reeds gekeken naar de botstructuur in het distale paardenbeen, beenmergoedeem en mogelijke artefacten (Faulkner et al., 2023; Germonpré et al., 2024; Steiner et al., 2024). Echter zijn de klinische toepasbaarheid en standaardisatie nog beperkt. Tot op heden is het potentieel van DECT cMap voor het in kaart brengen van weke delen letsels bij paarden nog niet onderzocht. Dit gat in de literatuur vormde de aanleiding voor deze masterproef.

In deze studie werd de toepassing van DECT VNCA en cMap bestudeerd op het niveau van de distale ledematen, met als doel om enerzijds beenmergoedeem en anderzijds weke delen letsels op een niet-invasieve en gedetailleerde wijze in beeld te brengen. Gekeken wordt of er een meerwaarde kan worden verkregen ten opzichte van de conventionele CT. VNCA laat toe om vochtaccumulatie in botstructuren op te sporen, terwijl cMap meer inzicht biedt in de integriteit van bindweefselstructuren zoals pezen en ligamenten. Deze studie kan een bijdrage leveren aan de verdere klinische toepassing en validatie van DECT in de paardeneeskunde.

2 Materiaal en methoden

2.1 Verzamelen materiaal

Er werden zeven onderbenen van zes geëuthanaseerde paardenkadavers verzameld, waarvan de doodsoorzaak niet gerelateerd was aan deze studie. De paarden werden geëuthanaseerd wegens ernstige letsels aan de voet of elders met secundaire klachten in de distale ledematen, met een slechte prognose. De selectie gebeurde op basis van anamnese, met (vermoeden van) distale pathologie zoals beenmergoedeem of weke delen letsels. De benen werden afgezet ter hoogte van de metacarpus of

metatarsus. Leeftijd, geslacht, anamnese en het post-mortem interval tot DECT/MRI werden geregistreerd.

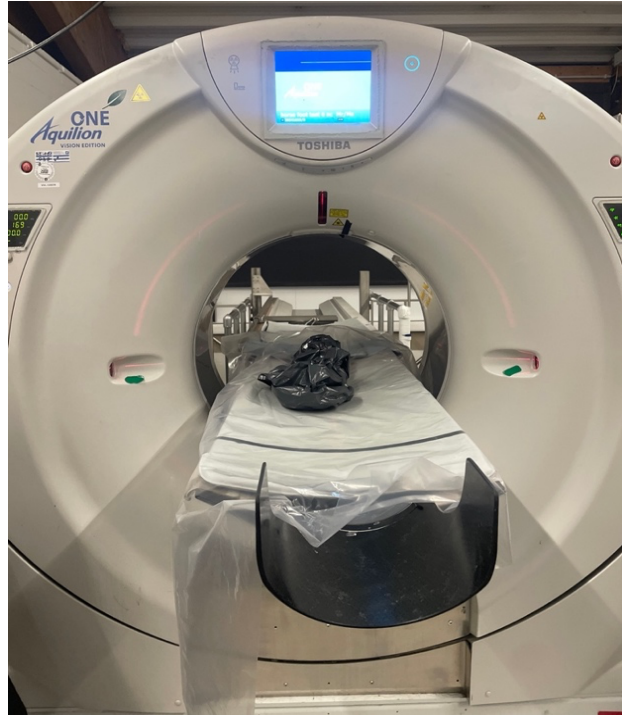
2.2 Diagnostische beeldvorming

2.2.1 Computer Tomografie

Van elk onderbeen werd een DECT-scan uitgevoerd met een 320-slice single source CT-scanner (Canon Aquilion ONE Vision Edition, Canon Medical Systems, Tochigi, Japan). De benen werden individueel in laterale decubitus gepositioneerd, in plastic coating, parallel aan de z-as en centraal in de gantry (zie figuur 1). Een voorafgaande helical scanogram bepaalde de optimale buisstroom (mA), waarbij denser te scannen materiaal leidde tot een hogere mA. De DECT-scan bestond uit opeenvolgende acquisities bij een lage dataset (80kVp) en een hoge dataset (150kVp), elk met een scanlengte van 16 cm en rotatietijd van 1,5 s.

Beide scans werden gecentreerd op het naviculaire bot, zonder wijziging in positie tussen de datasets.

2.2.1.1 De beeldreconstructie



Figuur 1 De 320-slice singlesource CT-scanner die gebruikt werd voor het maken van de scans met een van de gescande benen gecoat in plastic aanwezig in de gantry. Foto gemaakt door Bamsi van Diemen op de faculteit diergeneeskunde aan de Ugent.



Figuur 2 De gebruikte low-field MRI met een van de gescande benen in de plastic coating. Foto gemaakt door Bamsi van Diemen op de faculteit diergeneeskunde aan de Ugent.

Voor elk onderbeen werden automatisch conventionele bot- en weke delen reconstructies gegenereerd op de 135 en 80 kVp volume scan. De weke delen beelden werden verder verwerkt in de DECT post-processing module van de fabrikant, waaruit VNCa- en cMap-beelden werden verkregen. Deze verwerking is gebaseerd op een 'drie-materialen decompositie'-techniek, waarbij voor VNCa calcium, vet en water worden onderscheiden (multiplanaire hervormingen, slicedikte 0,5 mm). De dual-energy gradiënt voor calcium stond op 0,70; de materiaalformules op -136/-106 voor vet en 0/0 (80kV/135kV) voor water (Diekhoff et al., 2017; Germonpré et al., 2024). Alle beelden (CT (voor bot- en zachtweefselkernel), VNCa en cMap) werden naar PACS verzonden voor analyse.

2.2.2 De Magnetic Resonance Imaging

Elk been werd gescand met low-field MRI (Vet-MR Grande, 0,25-T Esaote, Italië). Elk been werd gescand met een plastic coating errond. Hiervoor werd elk

been in laterale decubitus in een kniespoel gepositioneerd. De centrering is geplaatst op het naviculaire bot. Op deze manier zijn er van elk been 4 sequenties verkregen: 3D SST1-weighted sequence (Slicedikte: 0,35 mm; TE: 9 ms; TR: 22 ms; flip angle: 50°), een 3D SST2-gewogen sequentie (slicedikte: 0,43 mm; TE: 10 ms; TR: 20 ms; fliphoek: 50°), een transverse fast proton density/T2 sequence (slicedikte: 4 mm; TE: 25 ms; echo train length: 8; TR: 4,260 ms; flip angle: 90°, slicedikte 4mm) en een sagittal STIR sequence (slicedikte: 4 mm; TE: 30 ms; TR: 4,340 ms; IT: 70 s; flip angle: 90°; slicedikte: 3.5 mm).

2.3 Analyse

Voor elke voet werd een gestandaardiseerd beoordelingsprotocol gevolgd. De beelden werden geblindeerd en in consensus geëvalueerd door een masterstudent diergeneeskunde en een doctoraatsstudent, zonder kennis van klinische gegevens of anamnese.

De beoordeling omvatte de volgende stappen:

- a. **CT-beelden (bone kernel):** Er werd een beschrijving gemaakt van aanwezige letsels. Daarnaast werd systematisch beoordeeld of sclerose aanwezig was (ja/nee) en of er beam hardening artefacten zichtbaar waren (ja/nee). Hierbij werden alleen post-mortem beelden zonder bewegingsartefacten in aanmerking genomen.
- b. **CT-beelden (soft tissue kernel):** Er werd vastgesteld of er weke delen letsels aanwezig waren (ja/nee).
- c. **Dual-energy CT (virtual non-calcium map):** Er werd beoordeeld of er sprake was van beenmergoedeem (ja/nee). De kwaliteit van de beelden werd gescoord met een score van 0-3. Tevens werd, indien van toepassing, een subjectieve inschatting van de diagnostische zekerheid ('diagnostic confidence') gegeven, gescoord als laag, matig of goed.
- d. **Dual-energy CT (cMap):** Ook hier werd gekeken naar de aanwezigheid van weke delen letsels (ja/nee), met aanvullend een optionele beoordeling van de diagnostische zekerheid (laag/matig/goed).

Na de beoordeling van de DECT-beelden werd de referentiestandaard MRI geanalyseerd:

- e. **MRI-beoordeling van het beenmerg:** Er werd vastgesteld of er sprake was van beenmergoedeem (ja/nee).
- f. **MRI-beoordeling van de weke delen:** Er werd bepaald of er letsels aanwezig waren in de weke delen (ja/nee).

3 Resultaten

3.1 Beschrijving studiegroep

Zeven uiteenlopende cases werden geselecteerd, met een gemiddelde leeftijd van 14 ± 6.4 jaar, waaronder vier merries en drie ruinen. De groep bestond uit diverse rassen, van pony's tot dravers; bij drie dieren was het ras onbekend. Het gemiddelde post-mortem interval bedroeg 5 ± 5 dagen voor MRI en $5,3 \pm 4,8$ dagen voor DECT. De kenmerken zijn samengevat in Tabel 1.

Tabel 1: Overzicht van de onderzochte cases: signalement en post-mortem (PM) interval (in dagen) voor MRI en DECT.

Deze tabel geeft de kenmerken weer van de zes onderzochte paarden, inclusief leeftijd (in jaren), geslacht (ruin (Ms), merrie (F)), ras (indien bekend) en de tijdsduur tussen het overlijden en de beeldvorming (PM interval) voor zowel MRI als DECT (in dagen).

Onderbeen	Leeftijd	Geslacht	Ras	PM interval MRI	PM interval DECT
I: Septische purulente artritis ten gevolge van een wonde aan de elleboog	17j	Ms	Draver	4d	4d
II: Koliek	17j	Ms	Pony	3d	3d

III: Hoefabces en laminitis	7j	F	Onbekend	4d	3d
IV: Secundaire laminitis ten gevolge van en wonde in de lies	5j	Ms	Draver	5d	5d
V: Ernstige hoefkanker	14j	F	Onbekend	3d	3d
VI: Ernstige hoefkanker	14j	F	Onbekend	3d	3d
VII: Nageltred	24j	F	Fjord	16d	16d

3.2 Virtual non-calcium mapping

Tabel 2 en 3 tonen de beoordeling van het beenmerg op MRI- en DECT-beelden en hun onderlinge vergelijking. MRI toonde bij drie van de zeven voeten beenmergoedeem, variërend van mild tot uitgesproken, telkens in de distale phalanx (P3). Bij voet IV bevond het zich rond de tip van P3, en bij voet VII ook in het straalbeen. Op de VNCA-DECT-beelden werd bij vijf voeten oedeem gezien; twee hiervan (voet III en VII) kwamen overeen met MRI. Eén geval werd vals negatief beoordeeld, mogelijk door de geringe hoeveelheid oedeem, gelokaliseerd aan de tip van P3 – een regio die ook bij niet-manke paarden verhoogd STIR-sigitaal kan vertonen, wat de interpretatie bemoeilijkt. Aan de hand van de MRI-beelden was dus niet met zekerheid te zeggen dat het hier zeker om beenmergoedeem ging.

Op de conventionele CT-scans (bone kernel) werden bij benen met op MRI vastgesteld beenmergoedeem wel letsels gezien. Er was geen sprake van sclerose of beam-hardening artefacten, wat de beeldinterpretatie niet hinderde.

3.3 Collageen mapping

Tabel 2 toont ook de beoordeling van de weke delen letsels. Op MRI werd slechts één letsel gezien, ter hoogte van de *m. extensor digitorum profundus*. De cMap-kwaliteit van de DECT-scans was echter onvoldoende: randen waren onregelmatig en beam-hardening verstoorde het beeld, waardoor betrouwbare beoordeling en vergelijking met MRI niet mogelijk was.

Op de soft tissue kernel van de conventionele CT waren de weke delen daarentegen wel goed te beoordelen. In twee gevallen werden letsels gezien: het letsel bij case VII, aan de *m. extensor digitorum profundus* kwam overeen met de MRI. Daarnaast werd bij case III een extra letsel vastgesteld dat op MRI niet zichtbaar was.

De VNCA werd beoordeeld met een slice thickness van 2 mm. De cMap werd beoordeeld met een slice thickness van 5 mm. Deze werd dikker gekozen om de ruis te verlagen.

Tabel 2 Beoordeling van beenmergoedeem en weke delen letsels op MRI, DECT (virtual non-calcium map en collageen map) en CT (bone kernel en soft tissue kernel). Deze tabel toont per case de aanwezigheid of afwezigheid van beenmergoedeem en weke delen letsels zoals vastgesteld op MRI, de verschillende DECT-modulaties (VNCA en cMap) en de conventionele CT (bone kernel en soft tissue kernel). Op de cMap van de DECT-scans waren de weke delen niet te beoordelen (NTB).

	Letsels (Bone kernel)	CT	Weke letsel (Soft kernel)	delen CT tissue	Beenmerg- oedeem DECT (Virtual non- calcium map)	Weke delen letsel DECT (Collageen map)	Beenmerg- oedeem MRI	Weke delen letsel MRI
I	Ondervoet	Nee	Nee		Nee	NTB	Nee	Nee
	Kogel	Nee	Nee		Nee	NTB	Nee	Nee
II	Ondervoet	Nee	Nee		Ja	NTB	Nee	Nee
	Kogel	Nee	Nee		Nee	NTB	Nee	Nee
III	Ja		Ja		Ja	NTB	Ja Matig tot	Nee

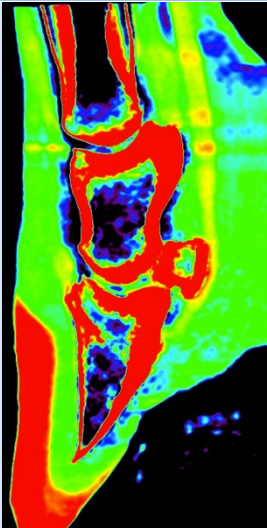
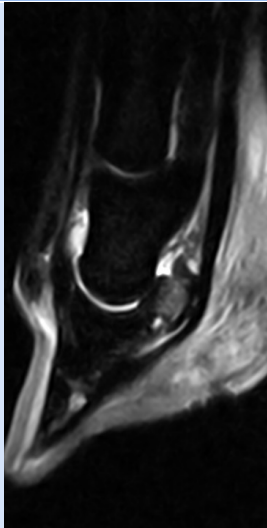
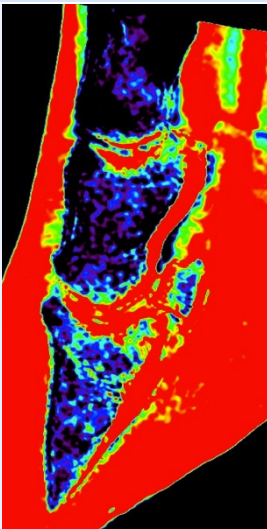
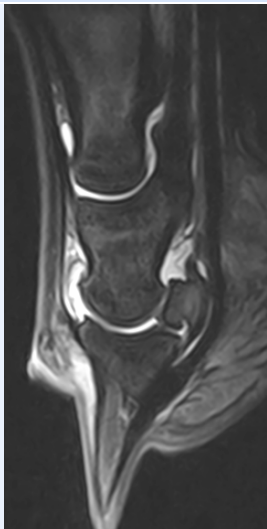
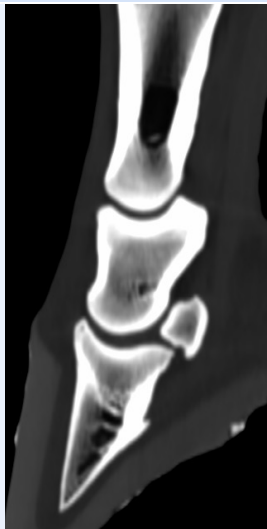
	Sinking hoefflamellen, corticale disruptie tip P3 door zool, abces in dorsale hoeffwand	Verbreding hoefflamellen			uitgesproken ter hoogte van P3	
IV	Ja Matige verwijding medullaire kanalen straalbeen	Nee	Nee	NTB	Ja Matig ter hoogte van de tip van P3	Nee
V	Nee P3 fysiologische hoge botdensiteit	Nee	Ja	NTB	Nee	Nee
VI	Nee P3 fysiologische hoge botdensiteit	Nee	Ja	NTB	Nee	Nee
VII	Ja Stuk achtergebleven metaal in zool, milde osteotyse hoeffgewricht	Ja Onderbreking M. extensor digitorum profundum	Ja	NTB	Ja Mild ter hoogte van P3 en uitgesproken ter hoogte van het straalbeen	Ja Ter hoogte van de M. extensor digitorum profundum

Tabel 3: Kruistabel van de vergelijking tussen de resultaten van DECT en de gouden standaard MRI

Beenmergoedeem	'ja' Aanwezig op MRI	'nee' Afwezig op MRI
'ja' Aanwezig op DECT	2 Terecht positief (TP)	3 Vals positief (VP)
'nee' Afwezig op DECT	1 Vals negatief (VN)	3 Terecht negatief (TN)

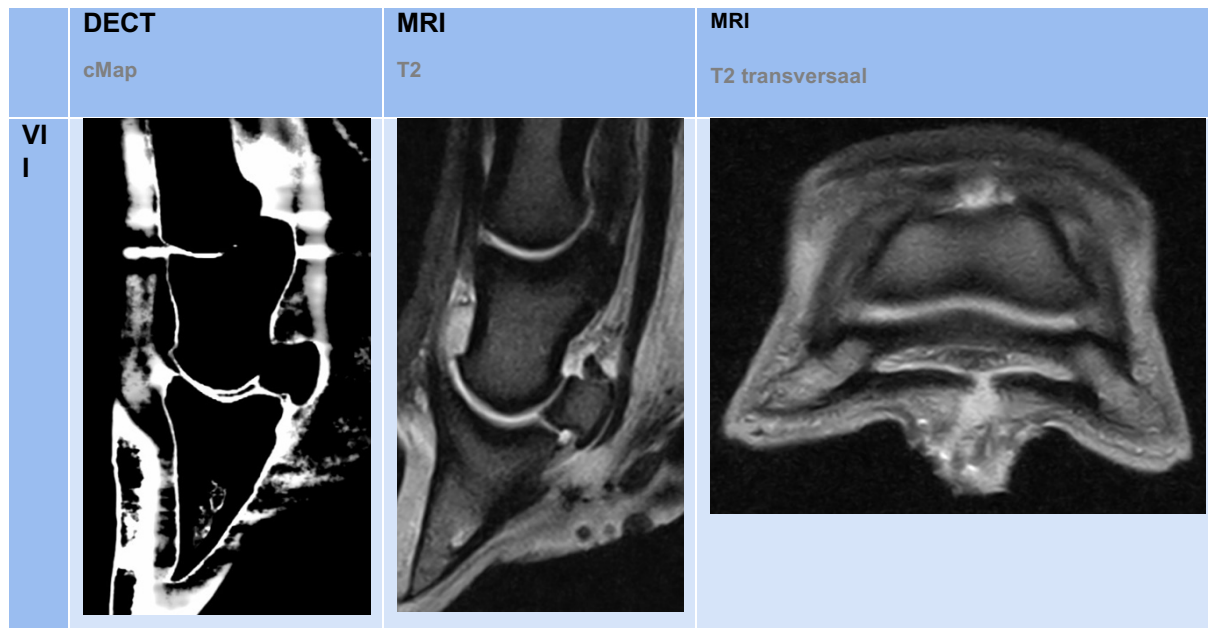
Een overzicht van de bevindingen op DECT VNCa-, MRI (T1- en STIR-sequentie) en CT-beelden van een aantal voeten is weergegeven in tabel 4.

Tabel 4: Virtual non-calcium (VNCa)-beelden van een aantal gescande voeten, in het midsagittale vlak, met de hierbij horende MRI beelden (T1 en STIR). Daarnaast zijn de bijbehorende CT beelden zichtbaar. Van voet VII is er een mooi VNCa DECT beeld te zien, met overeenkomende letsels op de MRI beelden. Het uitgesproken beenmergoedeem in het straalbeen is duidelijk zichtbaar op de VNCa DECT en MRI beelden. Bij voet II is bij het VNCa DECT beeld een mild beenmergoedeem zichtbaar ter hoogte van de aanhechting van het ligamentum impar op P3. Op de MRI beelden is dit niet te zien. Het gaat hier om een vals positief resultaat.

	DECT VNCa	MRI T1	MRI STIR	CT
VI I				
II				

In tabel 5 is er een overzicht te zien van de weke delen letsels van de DECT cMap en de T2 gewogen MRI.

Tabel 5: DECT cMap scan en T2 gewogen MRI beelden van voet VII. Saggitaal en transversaal georiënteerd. Op MRI is er een duidelijk letsel te zien ter hoogte van de aanhechting van de M. extensor digitorum profundum op P3. Op de DECT cMap zijn de weke delen onregelmatig afgelijnd door de geringe kwaliteit van de scan. Hierdoor kan er hier geen beoordeling gebeuren van de weke delen.



4 Discussie

In deze studie werd de diagnostische waarde van DECT, met name de VNCA en de cMap, onderzocht voor het detecteren van respectievelijk beenmergoedeem en weke delen letsels bij paarden. De resultaten werden vergeleken met de gouden standaard MRI en conventionele CT. Er werd gebruik gemaakt van een gelimiteerd aantal cases. Bij drie van de zeven voeten toonde MRI beenmergoedeem, waarvan VNCA DECT er twee bevestigde. DECT toonde ook enkele letsels die op MRI ontbraken, wat kan wijzen op vals-positieve bevindingen, mogelijk door post-mortem veranderingen, interpretatieverschillen of de beperkte resolutie van DECT.

De cMap leverde onvoldoende beeldkwaliteit voor de beoordeling van weke delen door artefacten en onduidelijke structuren, waardoor vergelijking met MRI niet mogelijk was. De soft tissue kernel van de conventionele CT bleek wel bruikbaar en toonde twee letsels: één gelijk aan het MRI-letsels en één aanvullend letsel dat op MRI niet zichtbaar was.

Deze bevindingen wijzen erop dat DECT wel potentie heeft voor beenmergoedeem, maar beperkingen kent bij het detecteren van weke delen letsels, vooral met cMap. Volgens deze studie biedt cMap geen meerwaarde ten opzichte van de conventionele CT voor de beoordeling van weke delen. Mogelijke oorzaken en klinische implicaties worden hieronder besproken.

4.1 Vergelijking met eerdere studies

Eerdere humane studies tonen aan dat DECT beenmergoedeem kan visualiseren, maar met lagere sensitiviteit en specificiteit dan MRI (Pache et al., 2010; Booz et al., 2019). Hoewel onderzoeken bij paarden schaars zijn, suggereren de huidige bevindingen vergelijkbare beperkingen in het paard.

Hoewel de cMap van DECT theoretisch nuttig is voor bindweefselstructuren, bleek de beoordeling van weke delen in deze studie onbetrouwbaar. Dit kan mogelijks te wijten zijn aan het feit dat de DECT cMap niet alleen collageen, maar ook andere dense structuren zoals het palmaire vetkussen, met hierin naast vet ook fibreuze en vasculaire componenten, visualiseert. Daarnaast kunnen artefacten zoals beam-hardening and verhoogde beeldruis leiden tot een verminderde beeldkwaliteit, vooral in grotere, dense structuren zoals bij het paard.

De beperkte betrouwbaarheid kan ook te wijten zijn aan het scanprotocol. Suboptimale instellingen, zoals lage buisspanning of ongunstige positionering, verlagen de signaal-ruisverhouding. Ook zijn de reconstructie-algoritmes mogelijk niet optimaal voor collageenrijke weke delen bij het paard, wat leidt tot foutpositieve signalen of detailverlies.

Biologische variatie in collageengehalte en weefselsamenstelling tussen individuele dieren bemoeilijkt bovendien de interpretatie. Optimalisatie van post-processing (zoals windowing of threshold-aanpassingen), verfijning van het scanprotocol en validatie met histologie zijn nodig om de diagnostische waarde van cMap bij paarden betrouwbaar te beoordelen.

4.2 Sterktes en beperkingen van de studie

Een belangrijke sterkte van deze studie is het gebruik van zowel MRI als conventionele CT als referentie, in combinatie met een gestandaardiseerd beoordelingsprotocol en blinde beoordeling. Hierdoor kon een objectieve vergelijking worden gemaakt tussen de verschillende beeldvormingstechnieken.

Een beperking is het kleine aantal cases ($n = 7$), wat de generaliseerbaarheid beperkt. Bovendien varieerde het post-mortem interval sterk, wat de weke delen en detectie van afwijkingen kan hebben beïnvloed. Bij drie dieren was het ras onbekend, waardoor mogelijke raseffecten op botdichtheid of weke delen eigenschappen niet zijn meegenomen.

Tijdens deze studie viel het kwaliteitsverschil tussen DECT-beelden van de verschillende paardenhoeven op. Dit wordt vooral veroorzaakt door anatomische en technische factoren. De hoof bestaat uit diverse weefsels met verschillende dichtheden, zoals hoorn, bot en zachte weefsels. Vooral dense botstructuren kunnen röntgenstraling verstrooien door een hoge dichtheid. Dit kan artefacten en contrastverlies veroorzaken. Ook post-mortem veranderingen zoals dehydratatie of gasinsluitingen kunnen beeldverstoringen geven.

Beam hardening artefacten speelden ook een rol. Door het sterke contrast tussen dicht bot en omgevende zachte weefsels of hoorn kan er kunstmatige vervorming in het beeld ontstaan. Verder kan variatie in scanparameters, positionering van de hoof en de gebruikte reconstructietechnieken van invloed zijn geweest op de uiteindelijke beeldkwaliteit. Ten slotte kunnen individuele verschillen tussen paarden, zoals ras, leeftijd, hoofvorm en mate van mineralisatie, bijdragen aan variatie in beeldvorming.

Deze combinatie van factoren maakt dat de beeldkwaliteit bij DECT van paardenhoeven sterk kan fluctueren. Dit vormt een belangrijke beperking bij de toepassing van deze techniek voor consistente diagnostiek en dient bij toekomstig onderzoek nader te worden onderzocht en technisch geoptimaliseerd.

Daarnaast dient te worden opgemerkt dat bepaalde anatomische structuren van de paardenvoet inherent minder geschikt zijn voor beoordeling met DECT. De sesambeentjes in de kogel en de condylus van het metacarpus/metatarsus bestaan grotendeels uit zeer dichte compacte bot. Enkel het beperkte trabeculaire gedeelte kan potentieel beoordeeld worden op tekenen van beenmergoedeem. Echter, dit trabeculaire deel is zodanig klein dat alleen bij zeer uitgesproken letsels met zekerheid een afwijking kan worden waargenomen. In de praktijk beperkt dit de meerwaarde van DECT voor de evaluatie van deze specifieke gebieden, omdat subtiele laesies onopgemerkt kunnen blijven. Dit vormt een inherente anatomische beperking van de techniek, die bij interpretatie in acht moet worden genomen.

4.3 Klinische implicaties

De resultaten suggereren dat DECT, met name de VNCa map, enige potentie heeft voor het detecteren van beenmergoedeem bij paarden, vooral in situaties waar MRI niet beschikbaar of haalbaar is. De conventionele CT (soft tissue kernel) bleek bovendien bruikbaar voor de beoordeling van sommige weke delen letsels. Echter, gezien de beperkte overeenstemming met MRI en de slechte kwaliteit van de cMap, moet DECT momenteel nog met voorzichtigheid worden toegepast voor weke delen diagnostiek in de diergeneeskundige praktijk. MRI blijft de gouden standaard in de detectie van beenmergoedeem.

4.4 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Aangezien het kwaliteitsverschil in DECT-beelden van paardenvoeten een duidelijke beperking vormde, is vervolgonderzoek naar optimalisatie van scanprotocol en/of post-processing parameters wenselijk. Toekomstige studies kunnen zich richten op geschikte scaninstellingen (zoals kVp-instellingen, energieparen en reconstructie-algoritmen) om artefacten zoals beam hardening te minimaliseren, en op het effect van post-mortem interval en weefselconditie. Daarnaast is het zinvol om variaties in hoefanatomie bij verschillende rassen en leeftijden te onderzoeken om de invloed op beeldkwaliteit beter te begrijpen.

Het kan waardevol zijn om ook de praktische aspecten van beeldvorming, zoals gebruiksgemak en kosteneffectiviteit, te onderzoeken. Hoewel dit buiten het bereik van deze studie viel, zijn dergelijke factoren essentieel voor een volledige beoordeling van de klinische toepasbaarheid van DECT ten opzichte van conventionele methoden.

5 Conclusie

Hoewel DECT potentie toont voor het opsporen van beenmergoedeem bij paarden, is de techniek voor het detecteren van weke delen letsels via cMap momenteel onvoldoende betrouwbaar. Optimalisatie van scaninstellingen en validatie met histologie zijn aanbevolen. Deze studie benadrukt de meerwaarde van DECT als aanvullende beeldvormingstechniek bij paarden, maar onderstreept ook de noodzaak voor verdere ontwikkeling alvorens klinische implementatie.

6 Literatuurlijst

Aghdam, Y.H., Moradi, A., Großterlinden, L.G., Jafari, M.S., Heverhagen, J.T., Daneshvar, K., 2022. Accuracy of magnetic resonance imaging in assessing knee cartilage changes over time in patients with osteoarthritis: A systematic review. *Northern Clinics of Istanbul* 9, 414–418.

Alvarez, R.E., Macovski, A., 1976. Energy-selective reconstructions in X-ray computerized tomography. *Physics in Medicine and Biology* 21, 733–744.

Avrin, D.E., Macovski, A., Zatz, L.E., 1978. Clinical application of Compton and photo-electric reconstruction in computed tomography: preliminary results. *Investigate Radiology* 13, 217–222.

Banitalebi, H., Owesen, C., Årøen, A., Tran, H.T., Myklebust, T.Å., Randsborg, P.-H., 2021. Is T2 mapping reliable in evaluation of native and repair cartilage tissue of the knee? *Journal of Experimental Orthopaedics* 8, 34.

Barrett, M.F., Frisbie, D.D., King, M.R., Werpy, N.M., Kawcak, C.E., 2017. A review of how magnetic resonance imaging can aid in case management of common pathological conditions of the equine foot. *Equine veterinary Education* 29, 683–693.

Bernatz, S., Hoppe, A.T., Gruenewald, L.D., Koch, V., Martin, S.S., Engelskirchen, L., Radic, I., Bucolo, G., Gotta, J., Reschke, P et al., 2024. Assessment of thoracic disc degeneration using dual-energy CT-based collagen maps. *European Radiology Experimental* 8, 95.

Bolen, G., Audigié, F., Spriet, M., Vandenberghe, F., Busoni, V., 2010. Qualitative Comparison of 0.27T, 1.5T, and 3T Magnetic Resonance Images of the Normal Equine Foot. *Journal of Equine Veterinary Science* 30, 9–20.

Booz, C., Nöske, J., Lenga, L., Martin, S.S., Yel, I., Eichler, K., Gruber-Rouh, T., Huizinga, N., Albrecht, M.H., Vogl, T.J et al., 2020. Color-coded virtual non-calcium dual-energy CT for the depiction of bone marrow edema in patients with acute knee trauma: a multireader diagnostic accuracy study. *European Radiology* 30, 141–150.

Cao, G., Gao, S., Xiong, B., 2023. Application of quantitative T1, T2 and T2* mapping magnetic resonance imaging in cartilage degeneration of the shoulder joint. *Scientific Reports* 13, 4558.

- Chen, M., Herregods, N., Jaremko, J.L., Carron, P., Elewaut, D., Van den Bosch, F., Jans, L., 2020. Bone marrow edema in sacroiliitis: detection with dual-energy CT. *European Radiology* 30, 3393–3400.
- Cheong, S.C.W., Yan, Y.Y., Sheikh, A., Ouellette, H.A., Munk, P.L., Murray, N., Mallinson, P.I., 2024. Dual-energy CT applications in musculoskeletal disorders. *British Journal of Radiology* 97, 705–715.
- Claerhoudt, S., Bergman, E.H.J., Saunders, J.H., 2014. Computed Tomographic Anatomy of the Equine Foot. *Anatomia, Histologia, Embryologia* 43, 395–402.
- Desbrosse, F.G., Vandeweerd, J.-M.E.F., Perrin, R. a. R., Clegg, P.D., Launois, M.T., Brogniez, L., Gehin, S.P., 2008. A technique for computed tomography (CT) of the foot in the standing horse. *Equine Veterinary Education* 20, 93–98.
- Diekhoff, T., Hermann, K.G., Pumberger, M., Hamm, B., Putzier, M., Fuchs, M., 2017. Dual-energy CT virtual non-calcium technique for detection of bone marrow edema in patients with vertebral fractures: A prospective feasibility study on a single- source volume CT scanner. *European Journal of Radiology* 87, 59–65.
- Diekhoff, T., Hermann, K.G.A., Lambert, R.G., 2022. Future of Low-Dose Computed Tomography and Dual-Energy Computed Tomography in Axial Spondyloarthritis. *Current Rheumatology Reports* 24, 198–205.
- Dixon, J., Müksch, G., Witte, T., Perkins, J., Weller, R., 2016. Standing Equine Computed Tomography: Technique and Clinical Use, in: *AEVDI Yearbook 2016*. European Association of Veterinary Diagnostic Imaging, Cambridge, pp. 31–50.
- Dyson, S., Blunden, T., Murray, R., 2008. The collateral ligaments of the distal interphalangeal joint: magnetic resonance imaging and post mortem observations in 25 lame and 12 control horses. *Equine Veterinary Journal* 40, 538–544.
- Dyson, S., Murray, R., 2007. Magnetic resonance imaging evaluation of 264 horses with foot pain: the podotrochlear apparatus, deep digital flexor tendon and collateral ligaments of the distal interphalangeal joint. *Equine Veterinary Journal* 39, 340–343.
- Dyson, S., Murray, R., Schramme, M., Branch, M., 2003. Magnetic resonance imaging of the equine foot: 15 horses. *Equine Veterinary Journal* 39, 340–343.
- Dyson, S.J., Murray, R., Schramme, M.C., 2005. Lameness associated with foot pain: results of magnetic resonance imaging in 199 horses (January 2001–December 2003) and response to treatment. *Equine Veterinary Journal* 37, 113–121.
- El-Liethy, N.E., Kamal, H.A., 2021. Advanced compositional imaging T2 mapping sequence in detection of stages of medial knee joint compartments articular cartilage degeneration. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine* 52, 46.
- Faulkner, J.E., Broeckx, B.J.G., Martens, A., Raes, E., Haardt, H., Vanderperren, K., 2023. Single energy metal artifact reduction performs better than virtual monoenergetic dual-energy reconstruction in CT of the equine proximal phalanx. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 64, 677–685.
- Fletcher, J.G., Takahashi, N., Hartman, R., Guimaraes, L., Huprich, J.E., Hough, D.M., Yu, L., McCollough, C.H., 2009. Dual-energy and dual-source CT: is there a role in the abdomen and pelvis? *Radiologic Clinics of North America* 47, 41–57.
- Foti, G., Beltramello, A., Catania, M., Rigotti, S., Serra, G., Carbognin, G., 2019. Diagnostic accuracy of dual-energy CT and virtual non-calcium techniques to evaluate bone marrow edema in vertebral compression fractures. *La radiologica Medica* 124, 487–494.
- Germonpré, J., Vandekerckhove, L.M.J., Raes, E., Chiers, K., Jans, L., Vanderperren, K., 2024. Post-mortem feasibility of dual-energy computed tomography in the detection of bone edema-like lesions in the equine foot: a proof of concept. *Frontiers in Veterinary Science* 10.

- Gruenewald, L.D., Koch, V., Martin, S.S., Yel, I., Mahmoudi, S., Bernatz, S., Eichler, K., Alizadeh, L.S., D'Angelo, T., Mazziotti, S et al., 2023. Diagnostic value of DECT-based colored collagen maps for the assessment of cruciate ligaments in patients with acute trauma. *European Radiology* 33, 6339–6350.
- Guggenberger, R., Gnannt, R., Hodler, J., Krauss, B., Wanner, G.A., Csuka, E., Payne, B., Frauenfelder, T., Andreisek, G., Alkadhi, H., 2012. Diagnostic performance of dual-energy CT for the detection of traumatic bone marrow lesions in the ankle: comparison with MR imaging. *Radiology* 264, 164–173.
- Hayes, C.W., Conway, W.F., Daniel, W.W., 1993. MR imaging of bone marrow edema pattern: transient osteoporosis, transient bone marrow edema syndrome, or osteonecrosis. *RadioGraphics* 13, 1001–1011.
- Jang, S.W., Chung, B.M., Kim, W.T., Gil, J.R., 2019. Nondisplaced fractures on hip CT: added value of dual-energy CT virtual non-calcium imaging for detection of bone marrow edema using visual and quantitative analyses. *Acta Radiologica (Stockholm, Sweden: 1987)* 60, 1465–1473.
- Jans, L., De Kock, I., Herregods, N., Verstraete, K., Van den Bosch, F., Carron, P., Oei, E.H., Elewaut, D., Jacques, P., 2018. Dual-energy CT: a new imaging modality for bone marrow oedema in rheumatoid arthritis. *Annals of the Rheumatic Diseases* 77, 958–960.
- Johnson, T.R.C., Krauß, B., Sedlmair, M., Grasruck, M., Bruder, H., Morhard, D., Fink, C., Weckbach, S., Lenhard, M., Schmidt, B et al., 2007. Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *European Radiology* 17, 1510–1517.
- Li, Z., Chen, X., Fang, H., Li, C., Shi, L., Fan, X., Xu, X., Gao, F., Sun, W., Qing, J., 2023. Diagnostic accuracy of dual-energy CT for bone marrow edema in patients with acute knee injury: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* 18, 826.
- Mageed, M., 2022. Standing computed tomography of the equine limb using a multi-slice helical scanner: Technique and feasibility study. *Equine Veterinary Education* 34, 77–83.
- Mallio, C.A., Bernetti, C., Agostini, F., Mangone, M., Paoloni, M., Santilli, G., Martina, F.M., Quattrocchi, C.C., Zobel, B.B., Bernetti, A., 2022. Advanced MR Imaging for Knee Osteoarthritis: A Review on Local and Brain Effects. *Diagnostics (Basel)* 13, 54.
- Martig, S., Boisclair, J., Konar, M., Spreng, D., Lang, J., 2007. Mri Characteristics and Histology of Bone Marrow Lesions in Dogs with Experimentally Induced Osteoarthritis. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 48, 105–112.
- Matzat, S.J., Kogan, F., Fong, G.W., Gold, G.E., 2014. Imaging Strategies for Assessing Cartilage Composition in Osteoarthritis. *Current rheumatology reports* 16, 462.
- McCollough, C.H., Leng, S., Yu, L., Fletcher, J.G., 2015. Dual- and Multi-Energy CT: Principles, Technical Approaches, and Clinical Applications. *Radiology* 276, 637–653.
- Mizobe, F., Nomura, M., Ueno, T., Yamada, K., 2019. Bone marrow oedema-type signal in the proximal phalanx of Thoroughbred racehorses. *Journal of Veterinary Medical Science* 81, 593–597.
- Moliner, L., Bolas, N., Pallas, E., Rodríguez-Álvarez, M.J., Benlloch, J.M., 2022. Development of a Standing Equine Leg CT (slCT). *Journal of Instrumentation* 17, C03003.
- Olive, J., Mair, T.S., Charles, B., 2009. Use of standing low-field magnetic resonance imaging to diagnose middle phalanx bone marrow lesions in horses. *Equine Veterinary Education* 21, 116–123.
- Pache, G., Krauss, B., Strohm, P., Saueressig, U., Blanke, P., Bulla, S., Schäfer, O., Helwig, P., Kotter, E., Langer, M et al., 2010. Dual-Energy CT Virtual Noncalcium Technique: Detecting Posttraumatic Bone Marrow Lesions—Feasibility Study. *Radiology* 256, 617–624.
- Patino, M., Prochowski, A., Agrawal, M.D., Simeone, F.J., Gupta, R., Hahn, P.F., Sahani, D.V., 2016. Material Separation Using Dual-Energy CT: Current and Emerging Applications. *Radiographics* 36, 1087–1105.
- Peltola, E.K., Koskinen, S.K., 2015. Dual-energy computed tomography of cruciate ligament injuries in acute knee trauma. *Skeletal Radiol* 44, 1295–1301.

- Plenk, H.J., Hofmann, S., Eschberger, J., Gstettner, M., Kramer, J., Schneider, W., Engel, A., 1997. Histomorphology and Bone Morphometry of the Bone Marrow Edema Syndrome of the Hip. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 334, 73–84.
- Porter, E.G., Werpy, N.M., 2014. New Concepts in Standing Advanced Diagnostic Equine Imaging. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice, Standing Surgery* 30, 239–268.
- Schett, G., 2009. Bone Marrow Edema. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1154, 35–40.
- Son, W., Park, C., Jeong, H.S., Song, Y.S., Lee, I.S., 2020. Bone marrow edema in non-traumatic hip: high accuracy of dual-energy CT with water-hydroxyapatite decomposition imaging. *European Radiology* 30, 2191–2198.
- Starr, A.M., Wessely, M.A., Albastaki, U., Pierre-Jerome, C., Kettner, N.W., 2008. Bone marrow edema: pathophysiology, differential diagnosis, and imaging. *Acta Radiologica (Stockholm, Sweden: 1987)* 49, 771–786.
- Steiner, J., Richter, H., Kaufmann, R., Ohlerth, S., 2024. Characterization of Normal Bone in the Equine Distal Limb with Effective Atomic Number and Electron Density Determined with Single-Source Dual Energy and Detector-Based Spectral Computed Tomography. *Animals* 14, 1064.
- Thiryayi, W.A., Thiryayi, S.A., Freemont, A.J., 2008. Histopathological perspective on bone marrow oedema, reactive bone change and haemorrhage. *European Journal of Radiology* 67, 62–67.
- Ulas, S.T., Ziegeler, K., Richter, S.-T., Ohrndorf, S., Proft, F., Poddubnyy, D., Diekhoff, T., 2022. Virtual Monochromatic Images from Dual-Energy Computed Tomography Do Not Improve the Detection of Synovitis in Hand Arthritis. *Diagnostics* 12, 1891.
- Vandekerckhove, L., Raes, E., Dumoulin, M., Martens, A., Vanderperren, K., 2021. The benefits of computed tomography imaging in the diagnosis, prognosis and treatment planning of equine orthopedic patients illustrated by six cases = De voordelen van computertomografie in de diagnose, prognose en behandeling van orthopedische aandoeningen bij het paard : zes casussen. *Vlaams Diergeneeskundig Tijdschrift* 90, 299–312.
- Vanderperren, K., Ghaye, B., Snaps, F.R., Saunders, J.H., 2008. Evaluation of computed tomographic anatomy of the equine metacarpophalangeal joint. *American Journal of Veterinary Research* 69, 631–638.
- Wang, C.-K., Tsai, J.-M., Chuang, M.-T., Wang, M.-T., Huang, K.-Y., Lin, R.-M., 2013. Bone marrow edema in vertebral compression fractures: detection with dual-energy CT. *Radiology* 269, 525–533.
- Wang, Y., Huang, K., Guo, Q., Hou, H., 2024. Diagnostic performance of dual-energy CT in detecting bone marrow edema in lower limb joint injuries: a meta-analysis. *Clinical Imaging* 114.
- Werpy, N.M., 2012. Recheck Magnetic Resonance Imaging Examinations for Evaluation of Musculoskeletal Injury. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice, Advances in Equine Imaging* 28, 659–680.
- Wilson, A.J., Murphy, W.A., Hardy, D.C., Totty, W.G., 1988. Transient osteoporosis: transient bone marrow edema? *Radiology* 167, 757–760.
- Wilson, R.L., Emery, N.C., Pierce, D.M., Neu, C.P., 2023. Spatial Gradients of Quantitative MRI as Biomarkers for Early Detection of Osteoarthritis: Data From Human Explants and the Osteoarthritis Initiative. *Journal of magnetic resonance imaging: JMIR* 58, 189–197.
- Yadav, H., Khanduri, S., Yadav, P., Pandey, S., Yadav, V.K., Khan, S., 2020. Diagnostic accuracy of dual energy CT in the assessment of traumatic bone marrow edema of lower limb and its correlation with MRI. *Indian Journal of Radiology and Imaging* 30, 59–63.
- Zanetti, M., Bruder, E., Romero, J., Hodler, J., 2000. Bone Marrow Edema Pattern in Osteoarthritic Knees: Correlation between MR Imaging and Histologic Findings. *Radiology* 215, 835–840.

Zeldin, L., Mosley, G.E., Laudier, D., Gallate, Z.S., Gansau, J., Hoy, R.C., Poeran, J., Iatridis, J.C., 2020. Spatial mapping of collagen content and structure in human intervertebral disk degeneration. *JOR Spine* 3, e1129.