

Ville Jussila, Hannele Niiniviita, Mikko Nyman, Timo Paananen, Ville Tammilehto ja Kimmo Mattila

Kaksoisenergiatietokonetomografia – lisäarvoa päivystyskuvantamiseen?

Kaksoisenergiatietokonetomografia (KETT) on menetelmä, jossa tietokonetomografian (TT) tarkkuuteen havaita ja luokitella poikkeavia löydöksiä pystytään edelleen vaikuttamaan tehostamalla kudoserottelua. KETT:llä voidaan myös vähentää artefakteja tai kohinaa ja materiaalien erottelukyvyn perusteella esimerkiksi suoraan kuvantaa jodin kertymistä kudoksiin. KETT-sovelluksia on jo monipuolisesti, myös päivystyskuvantamiseen. Virtuaaliset natiivisarjat mahdollistavat sädeannoksen tutkimuskohtaisen vähentämisen. Samaan suuntaan vaikuttaa mahdollisten jatkotutkimusten väheneminen, kun diagnostiikka tarkentuu.

TT on noussut päivystyskuvantamisen tärkeimmäksi työjuhdeksi. Valtavat kuvausmäärät tuottavat paitsi tarkkaa diagnostiikkaa potilashoittoon myös epäselviä ja sattumalöydöksiä, jotka aiheuttavat lisätutkimuksia ja -kustannuksia. TT:n osuus kaikkien röntgentutkimusten ja toimenpiteiden aiheuttamasta väestön kokonaissädeannoksesta on jo 58 % (1).

Tavanomaisessa TT:ssä erotellaan anatomisia rakenteita niiden erilaisen röntgensäteilyn vaimenemiskyvyn mukaan polykromaattisessa säteilyssä. Vaimeneminen perustuu pääosin valosähköiseen ilmiöön ja Comptonin sirontaan, jotka energian lisäksi riippuvat ensi sijassa atomien järjestysluvusta ja elektronitiheydestä.

KETT laajentaa TT:n mahdollisuuksia kykenemällä erottelemaan tiheydeltään samat mutta vaimenemisominaisuuksiltaan erilaiset kudokset toisistaan (2). Kudosten erilaiseen käyttäytymiseen eri energiamäärien yhteydessä perustuvan materiaalierottelun avulla tuotetaan erilaisia kuvatiedostoja anatomisesta kohteesta.

Menetelmän fysikaaliset perusteet on kuvattu 1970-luvulla (3). Laajempaan käyttöön hidas ja potilaalle suuren säteilyannoksen tuottava tekniikka on kuitenkin otettu noin kymmenen viime vuoden aikana kuvanlaskennan ja tekniikan kehityttyä. Vasta viime aikoina markkinoille on tullut laitesukupolvi kliniseen

käytännön työhön (4). Nykyään valtaosa laitevalmistajista tarjoaa kaksoisenergiakuvauksen klinisiä sovelluksia, mutta menetelmän käyttöönotto tapahtuu Suomessa hitaasti.

Kaksoisenergiakuvaus voidaan toteuttaa fyysisesti usealla tavalla laitevalmistajan mukaan (2). Paremmat kuvantamisominaisuudet voidaan yleensä saavuttaa sädeannosta lisäämättä. Periaatteiden ja sudenkuoppien tunteminen on tärkeää, kun menetelmä leviää diagnostiseen kuvantamiseen. Esittelemme menetelmää ja sen mahdollisuuksia päivystyskuvantamisessa (5–7). KETT:n tekniikka selitetään **TIETOLAATIKOSSA** (4,8,9–11).

Keuhkoemboliadiagnostiikka

Päivystystilanteessa KETT:tä on yleisimmin hyödynnetty keuhkoemboliaepäilyjen yhteydessä. Emboliadiagnostiikka perustuu emboliamassan tukkiman keuhkovaltimon täyttödefektin havaitsemiseen, mihin keuhkovaltimoiden TT-angiografiassa tarvitaan riittävä valtimonsäinen varjoainepitoisuus. Keuhkovaltimoiden KETT-angiografiassa (keuhkoembolia-KETT) pienen energiamäärän virtuaalisilla yksiennergiaisilla kuvilla (VMK) voidaan parantaa varjoainekontrastia, joka vähentää laimeaksi jääneen varjoainepitoisuuden aiheuttamia uusintatutki-

TIETOLAATIKKO. Kaksoisenergiatietokonetomografian (KETT) tekniikka (4,8–11).

KETT:ssä hyödynnetään röntgensäteilyn spektriä, joka on pyritty jakamaan pieni- ja suurienergiaiseen osaan. Nämä osat pitäisi saada eroteltua toisistaan mahdollisimman selvästi samalla kun datan tulisi olla samanlaisista.

Energiaerottelu voidaan tehdä joko röntgenputken eteen laitetulla kaksiosaisella suodattimella, röntgenputken nopealla jännitteen vaihdoksella, käyttämällä kahta röntgenputkea eri jännitteellä tai jakamalla spektri kahteen osaan kerroksittaisella detektorilla.

KETT:n kuvanlaskennassa kuvatus materiaalin ajatellaan koostuvan vain kahdesta ennalta valitusta materiaalista eli materiaaliparista. Matemaattisesti pyritään määrittämään, kuinka paljon materiaaliparin materiaaleja kohteessa pitäisi olla, jotta vaimeneminen olisi yhtä suurta kuin mitatussa materiaalissa. Laskentaa varten kuvaus pitää tehdä kahdella eri energialla.

Useimmin käytetty materiaalipari ovat vesi ja jodi, koska ne ovat yleisiä kuvantamisessa ja röntgensäteiden vaimeneminen niissä on erilaista, joten ne voidaan erottaa helposti toisistaan. Muita vaihtoehtoisia materiaaleja ovat kalsium, rasva, kalsiumhydroksiapatiitti tai uraatti.

Materiaalipariesityksen pohjalta voidaan muodostaa kuvat, joista varjoaine on laskennallisesti poistettu eli virtuaaliset natiivikuvat. Niiden käyttö pienentää potilaan säteilyrasitusta.

Varjoainetta keräävissä kohteissa voidaan mitata jodipitoisuus.

Laskennan avulla saadaan myös yksiennergiaiset kuvat (VMK). Niissä on mahdollista saada enemmän kontrastia eri kudosten välille, vähemmän kohinaa tai metallista aiheutuvat kuvavirheet vähäisemmiksi.

muksia (**TIETOLAATIKKO**). Toisaalta kontrastin paraneminen mahdollistaa varjoaineen laimentamisen tai varjoainemäärän vähentämisen esimerkiksi munuaisten vajaatoimintapotilaiden osalta (12).

Suuren energiamäärän VMK:ita voidaan hyödyntää artefaktien vähentämisessä (varjoaine, metallit) (13). Keuhkoembolia-KETT:n virtuaalisia natiivikuvia voidaan hyödyntää embolian taustalla olevien (syöpä) syiden tai sattumalöydösten tulkinnessa. Keuhkoembolia-KETT pystyy erottamaan akuutin keuhkoembolian kroonisesta (14).

Keuhkoembolia-KETT:ssä saadaan angiografiakuvien lisäksi jodikartta, jossa mahdollinen tukoksen aiheuttama verenkiertopuutos näkyy tyypillisesti kiilamaisina perfuusiopuutosalueina, jotka korreloivat ventilaatio-perfuusiokuvauksen löydöksiin (15). Perfuusiokarttakuvat näyttävät tarkentavan erityisesti perifeeristen embolioiden diagnosointia. Laskentasovellusten avulla voidaan määrittää perfuusiopuutosalueiden tilavuutta. Keuhkoembolia-KETT:n ja perfuusiokartan yhdistelmällä diagnostinen tarkkuus on keuhkoembolian osalta yli 95 % (**KUVA 1**) (16).

Perfuusiopuutosten laajuus korreloi oikean kammion kuormitukseen, mutta tilavuusmittauksilla ei saavuteta tilastollista lisähyötyä kuolleisuuden ennustamisessa KETT-kuvista

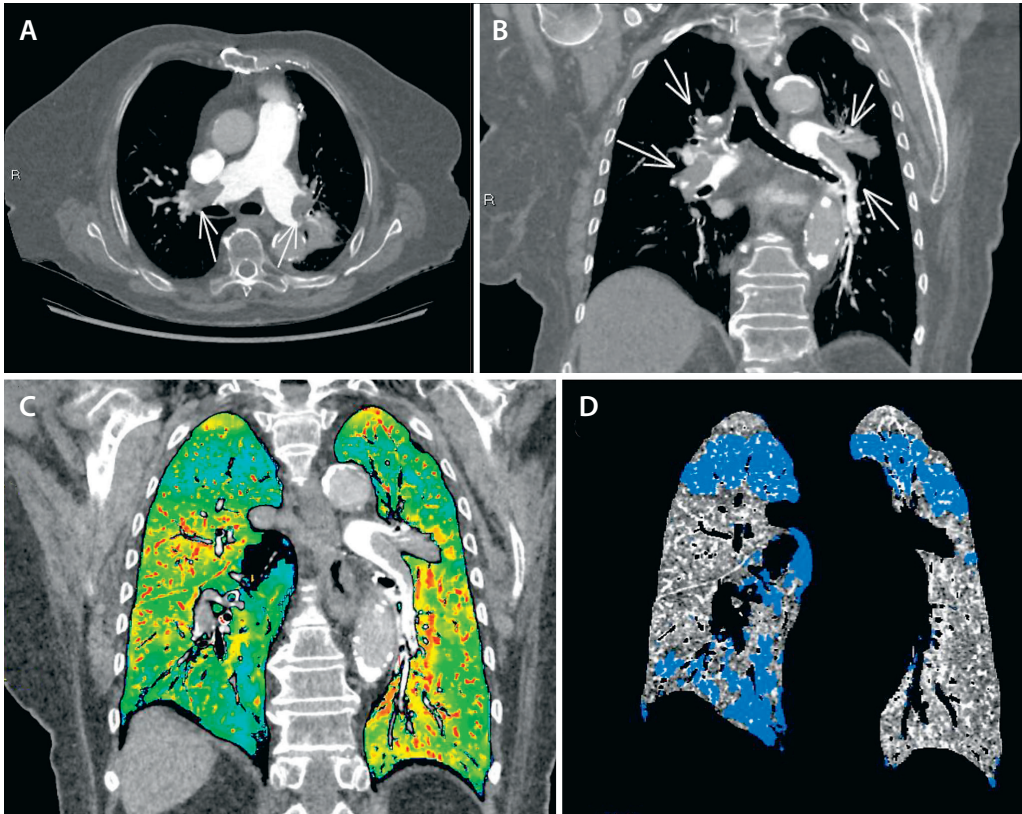
mitattuun kammioiden kokosuhteeseen verrattuna (17,18).

Keuhkoembolian ohella emfyseema, konsolidatiot, atelektaasi, kasvainmassat ja artefaktit voivat aiheuttaa perfuusiomuutoksia (19). Toisaalta keuhkoemboliat eivät aina aiheuta perfuusiopuutoksia, mikäli keuhkoveritulppa ei tuki keuhkovaltimoa kokonaan.

Muu verisuonikuvantaminen

Akuutissa aorttaoireyhtymässä seinämä vaurioituu äkillisesti aortan dissekoitumisen, intramuralisen hematooman tai aortan läpäisevän haavauman yhteydessä. Aorttaoireyhtymää epäiltäessä kuvantamisella pyritään löytämään oikea ja valeluumen tai intimakieleke. Tavanomaisesti otetaan natiivisarja seinämän hematooman osoittamiseksi ja plakkien sekä haavauman erottamiseksi toisistaan ennen varjoainokuvausta (20). KETT:ssä natiivikuvaus korvataan virtuaalinatiivikuvauksella. Pienienergisessä VMK:ssa seinämäplakin sisällä sekä aortan sivuhaaroissa varjoaine on paremmin erotettavissa, ja kontrasti paranee TT:hen verrattuna jopa 70 %.

Aortta-aneurysmissa KETT:tä voidaan hyödyntää seinämätrombin heterogeisuuden ja haavaumien osoittamiseen uhkaavan repeämän merkinä. Korjausoperaatioiden jälkeen voi-



KUVA 1. Monisairas 83-vuotias potilas tuli kuvaukseen hengenahdistuksen ja huonon saturaatin takia. KETT:ssä havaittiin massiivinen embolisatio molemmin puolin päärunkojen haarautumiskohdassa (A ja B, nuolet). Perfuusiopuutosalueet (C ja D) näkyivät molemmin puolin (sininen väri).

daan kolmivaiheisen tutkimuksen sijaan kuvata KETT:llä laskimovaiheessa, silti pienienergiaisessa VMK:ssa valtimoproteesien tai endovaskulaaristen stenttien endoleak-löydökset erottuvat paremmin. Säteannos pienenee kuvausfaasin vähetessä (21).

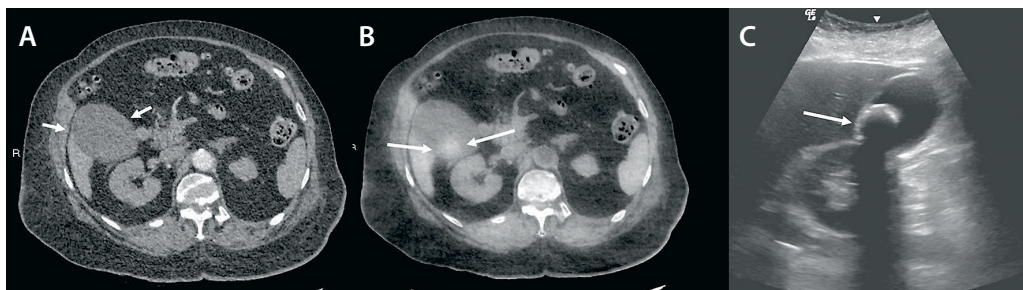
Alaraajaverisuonten akuuttiin kuvantamiseen johtavat ateroskleroottiset verenkiertohäiriöt. Usein näillä potilailla on lisäksi munuaisten vajaatoimintaa. KETT:llä voidaan vähentää potilaan varjoainemäärää kuvanlaadusta tinkimättä jopa 50 %, kun varjoainekontrasti parantuu jodimateriaalikuivissa tai pienienergiaisessa VMK:ssa (21,22). Subtraktio- eli vähennystekniikkaa käyttämällä voidaan poistaa alaraajaverisuonten kuvista luut ja seinämäplakit sekä saada avoin luumen erottumaan paremmin (21). Aneurysmakoilien ja stenttien aiheuttamaa artefaktia poistetaan subtraktiotekniikalla vähentämällä eri energiatasojen, 70 ja 140

kiloelektronivoltin (keV) kuvat toisistaan, tai käyttämällä suurempienergiasta VMK:ta (21).

Vatsan kuvantaminen

Tulehdukselliset tilat ja suoli-iskemia. Sappikiven aiheuttamasta tukoksesta johtuva sappirakotulehdus on yksi yleisimpiä akuutin vatsakivun syitä. Vaikka kaikukuvaus on ensisijainen tutkimusmenetelmä epäiltäessä sappirakotulehdusta, päätyvät potilaat usein epäspesifisten oireiden takia TT:hen, jossa merkittävä osa sappikivistä jää näkymättä. Sappikivien erottumista sappinesteestä voidaan KETT:ssä parantaa energiamäärää optimoimalla tai materiaaliparikuvin (**KUVA 2**) (23–25).

Sappirakon tulehdusmuutokset voivat pitkälle edenneessäkin taudissa näkyä TT:ssä huonosti. Tulehtuneen seinämän tai ympäröivän maksaparenkyymin tehostuminen saattaa pa-



KUVA 2. Seitsemänkymmentäkahdeksanvuotiaan potilaan keuhkoemboliaepäilyn takia tehty KETT. Keuhkoemboliaa ei löytynyt, mutta kuva-alassa näkyi pullea sappirakko (A, lyhyet nuolet). Siitä tehtiin materiaaliparikuvia, joissa erottui sappikivi (B, nuolet). Varmistettiin löydös vielä kaikukuvauksessa (C, nuoli). Sappirakotulehdukseen sopivia muutoksia tai siihen sopivaa palpaatioaristusta tai oireita ei ollut eli kyseessä oli sattumalöydös.

remmin erottua kontrastia korostavissa pienienergisissä VMK:issa tai jodikartassa, samoin gangrenoottisuuteen liittyvä paikallinen tai diffuusi seinämän tehostumattomuus (26).

Akuuttiin haimatulehdukseen liittyvä kudosturvotus näkyy harventumana (hypodensinen alue), normaalia haimakudosta huonompaa tehostumisena. Tehostumisero voi näkyä paremmin pienienergisessä VMK:ssa, kuten huono tehostuminen iskemiassa ja nekroosissa. Nekroosin voi erottaa komplisoitumattomaan haimatulehdukseen liittyvästä turvotuksesta jodikarttakuvien puutosalueena harventumassa. Virtuaalinatiivi- ja vesikuvia hyödyntämällä voidaan erottaa hyperdensinen verenvuoto säästyneestä tehostuvasta haimakudoksesta (27).

Vatsan päivystyksellisen TT:n tehostumisvaihe ei yleensä ole optimaalinen suolistosairauksien diagnosointiin, ja valmistelemattoman suolen nestetäytön puuttuminen ja liikeartefaktitkin saattavat haitata. Akuutisti tulehtuneen suolen seinämän kontrastia voidaan TT:hen verrattuna parantaa KETT:ssä jodia korostavin kuvasarjojen. Akuutin umpilisäketulehduksen poikkeava seinämätehostuminen saadaan myös paremmin näkyviin jodikuvasarjoissa. Usein vaikeasti havaittava umpilisäkkeen seinämän verenvuotoon häiriintyminen saattaa KETT:ssä erottua paremmin (28). Diagnostinen tarkkuus korostuu konservatiivista hoitoa harkittaessa.

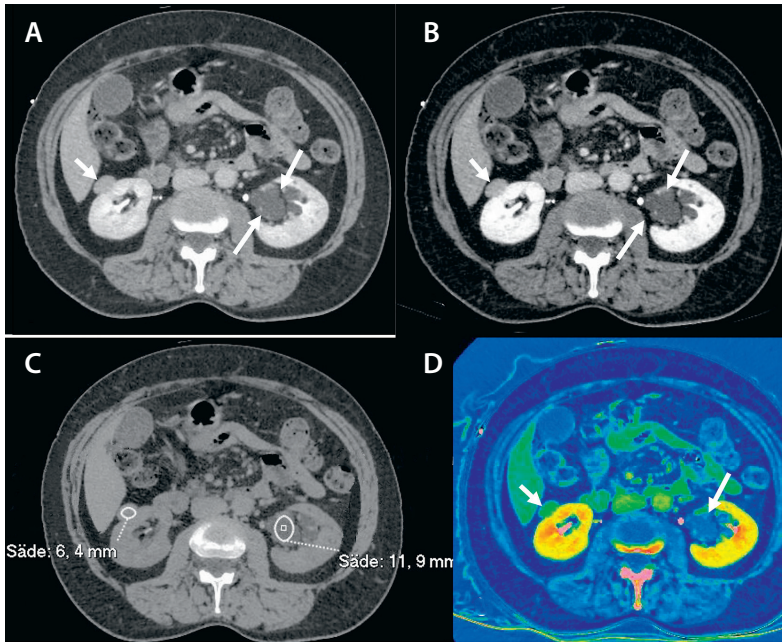
Suoli-iskemia voi liittyä valtimo- tai laskimovirtauksen estymiseen tromboosin, embolian, laskimoverentungoksen taikka okklusion ja strangulaation pohjalta, tai hypoperfuusioon

ilman suonitukosta. Diagnosoinnin hankaluus perustuu huonoon suolen seinämän tehostumisen osoittamiseen. Jodikarttakuvat parantavat suoli-iskemian diagnostiikkaa (29).

Edenneessä iskemiassa suolen sisäpinta voi vaurioitumisen ja verenvuodon vuoksi kuvautua hyperdensisenä sekä virheellisesti näyttää laskimovaiheen TT:ssä tehostuvalta. KETT:ssä virtuaalinatiivi-, vesi- ja jodikarttakuvia sekä jodipitoisuuden määrittämistä hyödyntämällä virhe voidaan välttää ja lisäksi erottaa TT:tä herkemmin syynä oleva suonitukos (30).

TT:ssä suolistovuodon erottaminen muuten hyperdensisistä kalkkiumista, vierasesineistä tai syödystä muusta materiaalista voi olla vaativaa tai mahdotonta, etenkin jos suolistovuotoa ei ole osattu epäillä ja tutkimus on tehty laskimovaiheessa. KETT:n virtuaalinatiivi- ja jodikarttakuvista erotetaan seinämänsisäinen verenvuoto tehostumisesta ja aktiivinen suoliston tai vatsaontelon vuoto muusta hyperdensisestä materiaalista (28).

Virtsatiekivi. TT:n kyky virtsatiekiven koostumuksen määrittämisessä on ollut rajallinen, koska erityyppisten kivien vaimenemisessa säteilyssä on päällekkäisyyttä. KETT on osoittautunut luotettavaksi virtsahappokivien erottamisessa muista kivistä. Yksityiskohtaisempikin kivianalyysi onnistuu KETT:ssä, jonka avulla saatetaan jopa pystyä ennustamaan kehonulkoisen kivenmurskauksen vastetta. Laskennallista virtuaalinatiivikuvausta voidaan käyttää rutiinimaisessa laskimovaiheen kuvauksessa tai TT-urografiassa varjoaineen alle peittyvän virtsatiekiven paljastamiseen (31).



KUVA 3. Kuusikymmentäkolmevuotias potilas tuli päivystykseen kolme päivää kestäneen vasemmanpuoleisen alavatsalle säteilevän kylkikivun vuoksi. Hän oli oksentanut, ripulia ei ollut esiintynyt. Bedside-kaikukuvauksessa oli havaittu vasemmalla puolella vaikutelmaa lievistä hydronefroosista. **A.** Tavanomainen TT-kuva TT-urografias- ta. **B.** KETT:n pienienergiainen virtuaalinen yksienergiainen kuva (huomaa parantunut kontrasti). Todettiin peripelviset kystat (**A** ja **B**, nuolet) ja oikealla puolella sattumalöydöksenä morfologisesti myös kystalta näyttävä muutos, joka kuitenkin oli hyperdensisempi (**A** ja **B**, lyhyt nuoli). **C.** Virtuaalinatiivikuvauksessa vasemmalla kystat olivat nesteen tiheyttä (2,1 HU), oikean munuaisen kortikaalinen muutos taas tiheä (44,1 HU), ja siihen kertyi jodikartassa selvästi jodia (**D**, lyhyt nuoli), päinvastoin kuin vasemman munuaisen allaskystat (pitkä nuoli). Oikean munuaisen muutosta pidettiin neoplastisena. Siitä otettiin kudoksenäyte ilman lisäkuvauksia, ja löydöksenä oli kromofobinen karsinooma.

Sattumalöydökset. Kuvantamismäärien lisääntyessä myös sattumalöydökset lisääntyvät. Jopa 50 %:ssa vatsan päivystyskuvauksista todetaan sattumalöydöksiä (32). Tämä johtaa usein jatkotutkimuksiin ja lisäkustannuksiin, potilaiden ahdistumiseen ja sädeannoksen suurenemiseen (33).

Lisämunuaisen ”insidentaloomat”, joista valtaosa on adenoomia, ovat yleisiä vatsan TT:n sivulöydöksiä. Jos kasvaimen tiheys natiivi-TT:ssä ei ylitä 10 Hounsfieldin yksikköä (HU), se voidaan diagnosoida hyvänlaatuisiksi rasvapitoiseksi adenoomaksi. Natiivikuvasarjan puuttuessa tai muutoksen ollessa tiheämpi joudutaan lisäkuvauksiin. KETT:n virtuaalinatiivikuvausten mittausten on osoitettu vastaavan todellisten natiivitutkimuksien mittausta, ja rasvapitoisten adenoomien jatkotutkimuksia voidaan vähentää. KETT:n materiaalispesifisen informaation perusteella saatetaan erottaa niu-

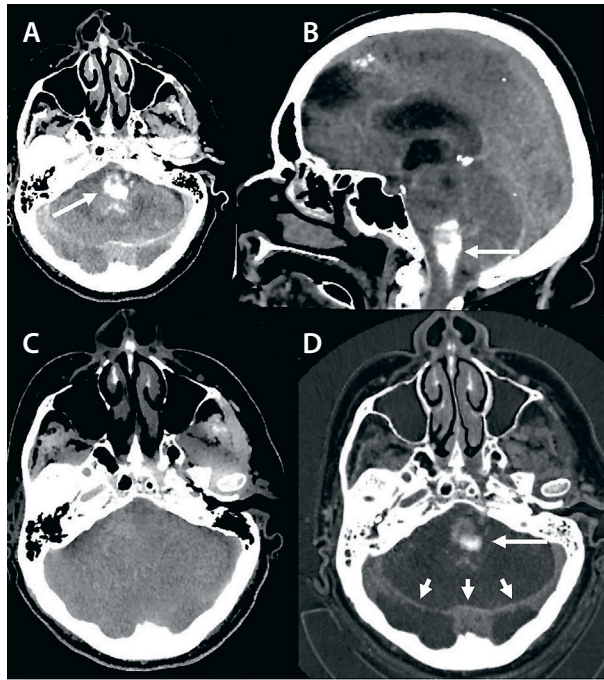
kasti rasvaa sisältävä adenooma pahanlaatuisista muutoksista (34).

Viatonta nestetäytteistä maksa- tai munuaiskystaa muistuttava, verenvuotoon tai proteiinipitoiseen sisältöön liittyvä nestettä tiheämpi muutos on yleinen sattumalöydös päivystyskuvauksissa, eikä sitä voida aina erottaa neoplasiasista. Jatkoselvittelyyn tarvitaan uusintatutkimuksia. KETT:ssä voidaan osoittaa tehostuminen tai sen puuttuminen virtuaalinatiivikuvissa sekä pienienergisissä VMK- ja jodikarttakuvissa ja näin välttää lisäkuvaukset (**KUVA 3**). Jodipitoisuuden määrittämisestä KETT:ssä on saatu lupaavaa näyttöä (35).

Neuroradiologia

Kaksoisenergiakuvausta on neuroradiologiassa laajimmin hyödynnetty vuotaneen veren erottamiseen varjoaineesta. Iskeemisessä aivohal-

KUVA 4. Kahdeksankymmentäyksivuotiaalla potilaalla oli todettu tuore kallonpohjavaltimeen tromboosi ja useita embolisia infarkteja. Hänet oli liuotushoidettu samana päivänä, ja tukoksen mekaanisessa poistamisessa oli onnistuttu. Potilas ei kuitenkaan herännyt anestesiasta. Toimenpiteen jälkeisessä TT:ssä ydinjatkeen alueella on selkäytimen yläosaan asti ulottuvaa huomattavan hyperdensistä löydöstä. TT-kuvissa alueen mahdollista verenvuotoa ei pystynyt erottamaan veri-aivoesteen vaurioon liittyvästä varjoaineen ”vuodosta” kudoksiin (A ja B). KETT:n vesikuvassa alueella ei näkynyt verenvuotoa (C), mutta jodivarjoaineen ekstravasaatio näkyi jodikuvassa (D, nuoli) samaan tapaan kuin toimenpiteen jälkeen vielä varjoaineen täyttämät laskimosinuksetkin (D, lyhyet nuolet).



vauksessa valtimotukoksen mekaanisen poiston mahdollisena komplikaationa on verenvuoto. Toisaalta akuuttiin iskemiaan liittyvä veri-aivoesteen vaurio saattaa aiheuttaa jodivarjoaineen ekstravasaatiota toimenpiteessä. Veri ja varjoaine näyttävät tavanomaisissa kuvissa samanlaisilta, mutta KETT:llä ne voidaan erotella materiaali-
parikuvien avulla (KUVA 4) (36).

Yksienergiakuvilla saatetaan aivojen natiivikuvauksessa pystyä parantamaan valkean ja harmaan aineen erottelukykyä (37). Tämä mahdollisuus jää käyttökelpoisten ohjelmistojen puutessa pääosin hyödyntämättä.

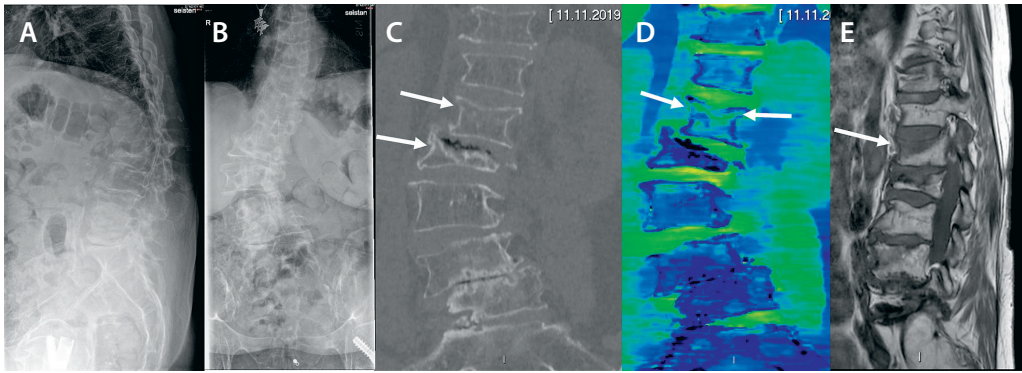
KETT:tä pystytään hyödyntämään metallikoilien aiheuttamien kuvausartefaktien vähentämisessä aneurysmakirurgian jälkeen, samoin selän metalli-implanttien osalta tai kallonpohjan tasolla poistamalla laskennallisesti luvangiografiakuvista. Menetelmien haasteena on saada ne osaksi sujuvaa työnkulkua ilman, että mukana poistuu esimerkiksi valtimorakenteita (38). Aivolaskimosinusten angiografiassa KETT:llä voidaan erottaa tiheet tukokset varjoaineesta materiaali-erottelukuvilla. Tuoreessa parenkymivuodossa varjoaineen ekstravasaatio aktiivivuodossa näkyy materiaali-
parikuvien avulla (36).

Aivoinfarktissa tukoksen koostumus saattaa kertoa etiologiasta tai ennustaa toimenpiteen onnistumista suonensisäisen liuotuksen tai mekaanisen poiston jälkeen. Runsaasti punasoluja sisältävät hyperdensiset tulpat liukenevat paremmin suonensisäisessä hoidossa ja soveltuvat mekaaniseen poistoon mahdollisesti paremmin kuin runsaan fibriniin tulpat. Tulpan rakenneanalyysia voidaan hyödyntää trombektomia-menettelyn ja välineistön valinnassa. KETT kykenee mahdollisesti tyypittämään tulpat paremmin kuin tavanomainen TT, mutta kliinisiä sovelluksia ei vielä ole.

Lukinkalvonalaisen verenvuodon yhteydessä yhdellä KETT-varjoainekuvauksella on saatu sekä osoitetuksi vuoto virtuaalinatiivikuvasarjassa että valtimokuvaus aneurysmadiagnostiikkaan (39). Menettelyn haasteina ovat virtuaalinatiivikuvan laatu ja oikeiden potilaiden valinta kuvaukseen. Kaikki laitevalmistajat eivät vielä tarjoa virtuaalinatiivikuvalaskentaa aivoista.

Tuki- ja liikuntaelinradiologia

Kihti on yleisin ja parhaiten validoitu KETT:n tuki- ja liikuntaelin kuvauskohde, sovelluksen herkkyyden ja tarkkuuden erottaa uraatti-niveleirei-



KUVA 5. Seitsemänkymmentäksivuotiaan naisen osteoporoosi oli paha hoidosta huolimatta. Hän oli tupakoinut vuosia. Vajaata kuukautta aiemmin hän oli kuullut pyyhettä ripustaessaan naksahduksen, ja selkä oli kiipeytynyt voimakkaasti. Aiemmin muualla tehdyssä röntgenkuvauksessa L1- ja L2-nikamat vaikuttivat kasaan painuneilta (A ja B). Jatkoselvityksenä tehtiin TT (C), jossa todettiin L1- ja L2-nikamien puristuminen (nuolet). KETT-vesikuvissa havaittiin L1-nikaman luuturvotusta, joka sopi tuoreeseen murtumaan (D, nuolet). L2-nikaman murtumassa taas ei turvotusta näkyntä, joten se tulkittiin vanhemmaksi. Magneettikuvauksessa tuoreeseen murtumaan liittyvä turvotus näkyi sagittaalisessa T1-painotteisessa kuvassa tummana (E, nuoli), L2-nikaman murtuma oli vanha.

silla on 80–90 %. Erilaisten vaimenemisominaisuuksien perusteella erotellaan pienen efektiivisen atomiluvun uraatti materiaalipareissa suuren atomiluvun kalsiumista. Kihtikiteet värikoodataan ja sijoitetaan laskennallisesti harmaasävykuvien ”päälle”.

KETT:n uraattilöydös nivelessä tai nivelen läheisyydessäkin on nykyään osa yhdysvaltalaisia ja eurooppalaisia luokituskriteereitä. KihtikETT:n hyöty korostuu vaativissa diagnostisissa tapauksissa, joissa kihdin erottaminen poikkeavan esiintymistavan takia septisestä niveltulehduksesta, nivelreumasta, valekihistä tai kasvaimista on vaikeaa, tai mikäli näytettä on vaikeaa aspiroida taikka aspiraatin löydös jää epäselväksi. KETT:tä voidaan käyttää kihdin vaikeuden määrittämiseen tai hoidon seurantaan. Vääriä positiivisia kihtilöydöksiä esiintyy kynsissä, kynsipesteissä ja ihomuutoksissa ja vääriä negatiivisia esiintyy erityisesti kihdin alkuvaiheessa eli alle kuuden viikon kuluessa sairauden alusta (40).

Luuturvotus vamman tai esimerkiksi tulehduksellisten niveltautiin yhteydessä näkyy KETT:llä nestekuvien ”luunpoisto-ominaisuuden” perusteella. Luuruhjetta todetaan noin 83 %:ssa lonkkamurtumista ja jopa 10 %:lla potilaista, joilta ei TT:ssä löytynyt murtumalinjaa. KETT onkin herkempi osoittamaan lonkkamur-

tuman kuin TT, ja luuturvotus auttaa osteoporoottisten rankamurtumien yhteydessä erottamaan tuoreen murtuman vanhoista (KUVA 5).

Algoritmi on herkkä mutta epäspesifinen eikä luotettavasti erota luuydinturvotusta infiltraatiosta tai edes punaisesta luuytimeistä, vaan toimii siis paremmin rasvoittuneessa luuytimessä. Kuvan morfologinen analysointi auttaa, jos etsitään esimerkiksi patologista murtumaa. KETT:ssä mahdollinen luuytimen neoplastinen pehmytosamassa erottuu poikkeavan vaimenemisensa tai parantuneen kontrastin takia kalsiumittomissa ja yksienergiakuvissa. Varjoaine-KETT:ssä syöpiin liittyy poikkeavaa jodikarttalöydöstä. Kudosnäytteen ottamisen ohjaamisessa KETT auttaa kohteiden parantuneen erottumisen ja rajautumisen takia (41,42).

TT:ssä metalli-implanttien aiheuttamien artefaktien poistoon kehitettyihin laskenta-algoritmeihin liittyy lisäannosta, paikkaresoluution ja kontrastin muuttumista tai rekonstruktion virheellisyyksiä. Etenkin polykromaattiseen säteilyyn liittyvät beam hardening -artefaktit ovat KETT:ssä suurienergisissä VMK:issa poistettavissa (43). Implanttien koko ja tiiviys vaikuttavat myös KETT-menetelmään, sillä isot esimerkiksi kromi-kobolttiproteesit vääristävät kuvaa enemmän kuin pienemmät ja kevyemmät, esimerkiksi titaani-implantit.

Ydinasiat

- ▶ Kaksoisenergiatietokonetomografialla (KETT) pyritään parempaan kuvakontrastiin sekä edistämään menetelmän materiaalierottelukykyä ja siten parantamaan diagnostista tarkkuutta.
- ▶ Päivystyskuvantaminen on erinomainen kohde KETT-sovelluksille, kun tavoitteena on saada yhdellä tutkimuksella tarvittava tieto ilman lisäkuvauksia ja potilaan sädeannoksen lisäämistä.
- ▶ Sovelluksia on tarjolla normaaliin käyttöön hankittaviin klinisiin kuvauslaitteisiin.
- ▶ Menetelmän tutkimus on vilkasta, ja se kehittyy vauhdikkaasti.

TT-artrografiakuvissa jodi ja luu erottuvat normaalisti huonosti toisistaan, mutta KETT:ssä ne saadaan materiaaliparikuvilla ja virtuaalinatiivikuvilla erotelluksi, ja esimerkiksi kolmiulotteiset kuvat onnistuvat paremmin (44). KETT saattaa myös mahdollistaa artrografiakuvauksissa ongelmallisten kalkkiumien erottumisen, ja pienien energiaiset VMK:t tehostavat pienten rustokierukkarepeämien erottumista. KETT on osoittautunut lupaavaksi myös luun mineraalitiheyden määrittämisessä ja jännepoikkeavuuksien selvittämisessä. KETT soveltuu selän välilevyjen kuivumisen, nikamavälilevyn esiinluisahduksen ja juuriaukkoahtaumien osoittamiseen, etenkin jos magneettikuvaus on vasta-aiheinen (44).

Lopuksi

KETT:llä on paljon etuja tavanomaiseen TT:hen verrattuna. Ne ilmenevät parantuneena diagnostiikkana, jatkotutkimusten tarpeen vähenemisenä ja todennäköisesti sädeannosten pienemisenä. Menetelmän kehittyttä käytännön tasolle se tulisi tutkimusnäytön perustella ottaa laajemmin käyttöön. Tuotettava kuvamateriaali on erilaista, ja sen hyödyntäminen edellyttää niin radiologeilta kuin potilaita

hoitavilta klinikoiltakin perehtymistä sekä osin tapojen ja käytäntöjen muuttamista.

Kaksoisenergiakuvauslaitteita on jo laajalti käytössä. Tietääksemme TYKS:n päivystyskuvantamisessa menetelmää hyödynnetään laajimmin, ja se on käytössä lähes kaikessa TT-kuvaustoiminnassa. Poikkeuksena ovat potilaat, joiden ylipaino haittaa menetelmän käyttöä tai joilla on metalli-implantteja kuvausalueella – nämä saattavat aiheuttaa häiritsevää kohinaa ja vähentää saavutettavia etuja. Tietojemme perusteella muualla menetelmää hyödynnetään pääosin vasta lähinnä keuhkoembolia- ja muissa verisuonitutkimuksissa, kihdin diagnosoinnissa ja satunnaisesti neuroradiologiassa.

Tutkimusnäytön mukaan KETT:n säteilyannos on yhtä suuri tai pienempi kuin tavanomaisen TT:n. Säteilyannoksia vertailtaessa pitää huomioida, että kaksoisenergiatutkimus saattaa antaa lisätietoa tavanomaiseen TT:hen verrattuna. Saatetaan pystyä myös vähentämään jatkotutkimuksia, joita tarvitaan sattuma- tai muiden löydösten luonnehtimiseen, kun tutkimus on puutteellinen kuvausfaasin valinnan takia (9–11).

Teknisen kehityksen hitaus sekä hankalasti opittava tekniikka – niin sen antamat mahdollisuudet kuin rajoituksetkin – ovat hidastaneet menetelmän käyttöönottoa Suomessa. ■

VILLE JUSSILA, päivystysradiologian erikoislääkäri ja yleislääketieteen erikoislääkäri
TYKS, päivystyskuvantaminen

HANNELE NIINIVIITA, FT, sairaalafysiikka
TYKS, lääketieteellinen fysiikka

MIKKO NYMAN, LT, neuroradiologian erikoislääkäri

TIMO PAANANEN, päivystysradiologian erikoislääkäri

VILLE TAMMILEHTO, päivystysradiologian erikoislääkäri

KIMMO MATTILA, LT, dosentti, radiologian erikoislääkäri
TYKS, päivystyskuvantaminen

VASTUUTOIMITTAJA
Helka Parviainen

SIDONNAISUUDET

Ville Jussila: Ei sidonnaisuuksia

Hannele Niiniviita: Ei sidonnaisuuksia

Mikko Nyman: Muut sidonnaisuudet (iRad Oy)

Ville Tammilehto: Luottamustoimet (SRY)

Kimmo Mattila: Luottamustoimet (Päivystys ja traumaradiologit), hankkeet (Käypä Hoito -työryhmä, Olkapään jännevaivat), muut sidonnaisuudet (MediShare Oy)

Timo Paananen: Ei sidonnaisuuksia

KIRJALLISUUTTA

- Järvinen H. Terveysthuonon säteilyn käytöstä (röntgendiagnostiikka ja toimenpideradiologia) väestölle aiheutuvan säteilyannoksen määrittäminen. Helsinki: Säteilyturvakeskus 2016.
- McCullough C, Leng S, Yu L, ym. Dual- and multi-energy CT: principles, technical approaches, and clinical applications. *Radiology* 2015;276:637–53.
- Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography). I. Description of system. *Br J Radiol* 1973;46:1016–22.
- Forghani R, De Man B, Gupta R. Dual-energy computed tomography: physical principles, approaches to scanning, usage, and implementation: part 1. *Neuroimaging Clin N Am* 2017;27:371–84.
- Aran S, Daftari Besheli L, Karcaaltincaba M, ym. Applications of dual-energy CT in emergency radiology. *AJR* 2014;202:314–24.
- McLaughlin P, Mallinson P, Lourenco P, ym. Dual-energy computed tomography. advantages in the acute setting. *Radiol Clin N Am* 2015;53:619–38.
- Punjabi GV. Multi-energy spectral CT: adding value in emergency body imaging. *Emerg Radiol* 2018;25:197–204.
- Patino M, Prochowski A, Agrawal M, ym. Material separation using dual-energy CT: current and emerging applications. *Radiographics* 2016;36:1087–105.
- Nagayama Y, Nakaura T, Oda S, ym. Dual-layer detector CT of chest, abdomen, and pelvis with a one-third iodine dose: image quality, radiation dose, and optimal monoenergetic settings. *Clinical Radiology* 2018;73:21–9.
- Wortman J, Shyu J, Dileo J, ym. Dual-energy CT for routine imaging of the abdomen and pelvis: radiation dose and image quality. *Emerg Radiol* 2020;27:45–50.
- Tao S, Li X, Schoepf U, ym. Comparison of the effect of radiation exposure from dual-energy CT versus single-energy CT on double-strand breaks at CT pulmonary angiography. *Eur J Radiol* 2018;101:92–6.
- Bhalla A, Das A, Naranje P, ym. Imaging protocols for CT chest: a recommendation. *Indian J Radiol Imaging* 2019;29:236–46.
- Delesalle M, Pontana F, Duhamel A, ym. Spectral optimization of chest CT angiography with reduced iodine load, experience in 80 patients evaluated with dual-source, dualenergy CT. *Radiology* 2013;267:256–66.
- Nallasamy N, Bullen J, Karim W, ym. Evaluation of vascular parameters in patients with pulmonary thromboembolic disease using dual-energy computed tomography. *J Thorac Imaging* 2019;34:367–72.
- Thieme S, Becker C, Hacker M, ym. Dual energy CT for the assessment of lung perfusion—correlation to scintigraphy. *Eur J Radiol* 2008;68:369–74.
- Okada M, Kunihiro Y, Nakashima Y, ym. Added value of lung perfused blood volume images using dual-energy CT for assessment of acute pulmonary embolism. *Eur J Radiol* 2015;84:172–7.
- Chae E, Seo J, Jang Y, ym. Dual-energy CT for assessment of the severity of acute pulmonary embolism: pulmonary perfusion defect score compared with CT angiographic obstruction score and right ventricular/left ventricular diameter ratio. *AJR* 2010;194:604–10.
- Im D, Hur J, Han K, ym. Acute pulmonary embolism: retrospective cohort study of the predictive value of perfusion defect volume measured with dual-energy CT. *AJR* 2017;209:1015–22.
- Kang M, Park C, Lee C, ym. Focal iodine defects on color-coded iodine perfusion maps of dual-energy pulmonary CT angiography images: a potential diagnostic pitfall. *AJR* 2010;195:325–30.
- Ratcliffe G, Kirkpatrick I. Stanford type A aortic dissection with pulmonary arterial intramural hematoma and pulmonary hemorrhage. *JCCCT* 2013;7:141–3.
- Vlahos I, Chung R, Nair A, ym. Dual-energy CT: vascular applications. *AJR* 2012;199:87–97.
- Almutairi A, Sun Z, Poovathumkadavi A, ym. Dual energy CT angiography of peripheral arterial disease: feasibility of using lower contrast medium volume. *PLoS One* 2015;10:e0139275.
- Uyeda J, Richardson I, Sodickson A, ym. Making the invisible visible: improving conspicuity of noncalcified gallstones using dual-energy CT. *Abdom Radiol (NY)* 2017;42:2933–9.
- Yang C, Zhang S, Jia Y, ym. Clinical application of dual-energy spectral computed tomography in detecting cholesterol gallstones from surrounding bile. *Acad Radiol* 2017;24:478–82.
- Soesbe T, Lewis M, Xi Y, ym. A technique to identify isoattenuating gallstones with dual-layer spectral CT: an ex vivo phantom study. *Radiology* 2019;292:400–6.
- Ratanaprasatporn L, Uyeda J, Wortman J, ym. Multimodality imaging, including dual-energy CT, in the evaluation of gallbladder disease. *Radiographics* 2018;38:75–89.
- Martin S, Trapp F, Wichmann J, ym. Dual-energy CT in early acute pancreatitis: improved detection using iodine quantification. *Eur Radiol* 2019;29:2226–32.
- Fulwadhva U, Wortman J, Sodickson A. Use of dual-energy CT and iodine maps in evaluation of bowel disease. *Radiographics* 2016;36:393–406.
- Olson M, Fletcher J, Nagpal P, ym. Mesenteric ischemia: what the radiologist needs to know. *Cardiovasc Diagn Ther* 2019;9:574–87.
- Potretzke T, Brace C, Lubner M, ym. Early small-bowel ischemia: dual-energy CT Improves conspicuity compared with conventional CT in a swine model. *Radiology* 2015;275:119–26.
- Kaza R, Ananthakrishnan L, Kambadakone A, ym. Update of dual-energy CT applications in the genitourinary tract. *AJR* 2017;208:1185–92.
- Thompson R, Wojcik S, Grant W, ym. Incidental findings on CT scans in the emergency department. *Emerg Med Int* 2011;2011:624847.
- Mileto A, Nelson R, Marin D, ym. Dual-energy multidetector CT for the characterization of incidental adrenal nodules: diagnostic performance of contrast-enhanced material density analysis. *Radiology* 2015;274:445–54.
- Wortman J, Bunch P, Fulwadhva U, ym. Dual-energy CT of incidental findings in the abdomen: can we reduce the need for follow-up imaging? *AJR Am J Roentgenol* 2016;207:58–38.
- Jacobsen M, Cressman E, Tamm E, ym. Dual-energy CT: lower limits of iodine detection and quantification. *Radiology* 2019;292:414–9.
- Postma A, Das M, Stadler A, ym. Dual-energy CT: what the neuroradiologist should know. *Curr Radiol Rep* 2015;3:16.
- Pomerantz SR, Kamalian S, Zhang D, ym. Virtual monochromatic reconstruction of dual-energy unenhanced head CT at 65–75 keV maximizes image quality compared with conventional polychromatic CT. *Radiology* 2013;266:318–25.
- Potter C, Vagal A, Goyal M, ym. CT for treatment selection in acute ischemic stroke: a code stroke primer. *Radiographics* 2019;39:1717–38.
- Ni Q, Tang C, Zhao Y, ym. Single phase dual-energy CT angiography: one-stop-shop tool for evaluating aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Sci Rep* 2016;6:26704.
- Gamala M, Jacobs J, Linn-Rasker S, ym. The performance of dual-energy CT in the classification criteria of gout: a prospective study in subjects with unclassified arthritis. *Rheumatology (Oxford)* 2020;59:845–51.
- Mallinson P, Coupal T, McLaughlin P, ym. Dual-energy CT for the musculoskeletal system. *Radiology* 2016;281:690–707.
- Wong W, Shah S, Murray N, ym. Advanced musculoskeletal applications of dual-energy computed tomography. *Radiol Clin North Am* 2018;56:587–600.
- Coupal T, Mallinson P, McLaughlin P, ym. Peering through the glare: using dual-energy CT to overcome the problem of metal artefacts in bone radiology. *Skeletal Radiol* 2014;43:567–75.
- Booz C, Nöske J, Martin S, ym. Virtual noncalcium dual-energy CT: detection of lumbar disk herniation in comparison with standard gray-scale CT. *Radiology* 2019;290:446–55.