

Hammasfantomit radiologian opetuksessa ja tutkimuksessa

Lääketieteellinen tiedekunta
Hammaslääketieteen laitos
Suupatologian ja suurradiologian oppiaine
opinnäytetyö

Laatija:
Tiia Sigfrids

15.8.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Syventävien opintojen opinnäyte

Oppiaine: Suupatologian ja suurradiologian oppiaine

Tekijä: Tiia Sigfrids

Otsikko: Hammasfantomit radiologian opetuksessa ja tutkimuksessa

Ohjaaja: EHL, HLT Niina Kuusisto

Sivumäärä: 21 sivua

Päivämäärä: 15.8.2025

Röntgenkuvantaminen on keskeinen menetelmä suun sairauksien diagnosoinnissa. Hammasfantomeja eli -harjoitusmalleja käytetään radiologian opetuksessa ja tutkimuksessa, sillä röntgensäteilyä ei ole indikoitu käyttää opetustilanteissa ihmisiin. Tämän takia kuvantamisen harjoittelu fantomeilla on välttämätöntä ja fantomeja on oltava erilaisia eri kuvantamismenetelmien ja laitteiden käytön opetukseen. Kuvattavasta fantomista täytyy löytyä ne elementit, jotka tekevät fantomista realistisen eli ihmismäisen. Mahdollisimman realistisen fantomin rakentaminen ei kuitenkaan ole helppoa muun muassa materiaalien saatavuusongelmien takia. Markkinoilla on tarjolla erilaisia fantomeja eri kuvantamistarkoituksiin, mutta nämä ovat hinnaltaan melko kalliita eivätkä ole yleensä muutettavissa eri kuvantamismenetelmiin tai tutkimuskäyttöön.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, millaisilla materiaaleilla saadaan opetus- ja tutkimuskäyttöön (intraoraalilaite, PTG-laite, KKTT-laite) hyvä ja kustannustehokas fantom rakennettua. Opinnäytetyössä tehtiin kirjallisuuskatsaus eri kuvantamismenetelmissä käytetyistä hammasfantomeista. Lisäksi valmistettiin neljä erilaista yksilöllistä hammasfantomia prekliinisen vaiheen hammaslääketieteen opiskelijoiden intraoraalikuvausharjoituksiin osaksi suurradiologian opetusta Turun yliopistossa. Fantomeissa käytetyt poistetut hampaat tekivät siitä realistisen, joten fantomeista otetuista röntgenkuvista pystyy hyvin havainnoimaan hampaiden anatomiaa ja patologiaa. Kustannuksiltaan kyseisten fantomien valmistaminen oli edullista ja valmistusprosessi yksinkertainen. Hammasfantomien avulla intraoraalikuvausharjoituksiin saatiin teknisen suorittamisen lisäksi kuvantulkintaa, mikä oli opiskelijoiden mielestä opettavaista.

Avainsanat: fantom, intraoraalikuva, suurradiologia

Sisällysluettelo

1	Johdanto	5
2	Hammasfantomit opetuksessa, tutkimuksessa ja laadunvarmistuksessa	7
2.1	Hammasfantomien materiaalit	7
2.2	Kirjallisuuskatsaus	7
2.3	Hammasfantomien käyttö eri kuvantamismenetelmissä	9
2.3.1	Intraoraalikuvaus	9
2.3.2	Panoraamatomografia	10
2.3.3	Kartiokeilatietokonetomografia ja tietokonetomografia	12
3	Materiaalit ja menetelmät	14
4	Tulokset	17
5	Pohdinta	19
6	Yhteenveto	21
	Lähteet	22

Lyhenteet

DLP	digital light processing
FMD	fused deposition modeling
HU	Hounsfieldin yksikkö
KKTT	kartiokeilatietokonetomografia
MAR	metal artifact reduction
PMMA	polymetyylimetakrylaatti
POM	polyoksimetyleeni
PTFE	polytetrafluorieteeni
PTG	panoraamatomografia
STL	stereolitografia

1 Johdanto

Terveydenhuollon koulutuksen hyvän laadun saavuttamiseksi on välttämätöntä, että potilastyötä, sairauksien diagnosointia sekä hoitoa opiskellaan käytännössä (Reymus ym., 2018). Hammaslääketieteen peruskoulutuksen prekliiniseen eli kliinisiä opintoja edeltävään vaiheeseen kuuluu lääketieteellisen yleistiedon kartuttaminen. Kliininen vaihe alkaa kolmantena opiskeluvuonna ja siihen kuuluu muun muassa hammaslääkärin työssä tarvittavien taitojen harjoittelua ja sairauksien diagnosointia. Kuvantaminen on keskeinen menetelmä suun sairauksien diagnosoinnissa. Hammasröntgentutkimuksissa usein potilasta hoitava hammaslääkäri toteaa kuvaustarpeen, suorittaa kuvauksen ja kirjaa lausunnon. Intraoraali- ja panoraamatomografiakuvien (PTG) tulkinta vaatii hyvää ymmärrystä normaalianatomiasta, sen variaatioista, tautien patofysiologiasta sekä kuvantamismenetelmien rajoitteista.

Radiologia perustuu pitkälti visuaaliseen oppimiseen (Kumar & Gadbury-Amyot, 2019). Röntgenkuvissa eri kudokset ja materiaalit näkyvät harmaan eri sävyissä. Mitä tiheämpää materiaali on, sitä vaaleampana se näkyy röntgenkuvassa. Esimerkiksi ilma näkyy röntgenkuvassa mustana. (Mallya & Lam, 2019) Hammasfantomeja eli harjoitusmalleja käytetään radiologian opetuksessa ja tutkimuksessa, sillä röntgensäteilyä ei ole indikoitu käyttää opetustilanteissa ihmisiin (Säteilylaki 2018/859). Tämän takia kuvantamisen potilastöitä edeltävä harjoittelu fantomeilla on välttämätöntä (Giacomini ym., 2023). Hammasfantomeja on oltava erilaisia eri kuvantamismenetelmien opetukseen ja laitteen käytön opastukseen. On tärkeää, että kuvattavassa fantomissa on elementit, jotka tekevät siitä realistisen eli ihmismäisen. Näitä elementtejä ovat etenkin anatomia sekä fantomissa käytetyt materiaalit, jotka muistuttavat luu- ja pehmytkudoksia.

Markkinoilla on tarjolla erilaisia kaupallisia fantomeja pään kokoisesta koko vartalon fantomiin, mutta nämä ovat hinnaltaan melko kalliita. Sen lisäksi nämä eivät yleensä ole muutettavissa eri kuvantamismenetelmiin, -indikaatioihin tai tutkimuskäyttöön. Mahdollisimman realistisen fantomin rakentaminen ei kuitenkaan ole yksinkertaista. Fantomiin tarvittavia materiaaleja voi olla haastava saada, ne voivat olla kalliita, fantomin valmistaminen vie aikaa ja vaatii luovuutta sekä asianmukaisia välineitä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, millaisilla materiaaleilla saadaan rakennettua opetus- ja tutkimuskäyttöön (intraoraalilaite, PTG-laite, kartiokeilatietokonetomografia (KKTT)-laite) optimaalinen ja kustannustehokas fantom. Työssä toteutetaan kirjallisuuskatsaus hammasfantomien käytöstä radiologian opetuksessa ja tutkimuksessa nykypäivänä. Tavoitteena on lisäksi valmistaa neljä kappaletta hammasfantomeita radiologian opetusmateriaaliksi Turun yliopiston hammaslääketieteen perustutkinon opiskelijoille suurradiologian peruskurssin intraoraaliharjoituksiin. Hammasfantomien

avulla pyritään simuloimaan opiskelijoille pysyvien hampaiden röntgenanatomia, kariksen aiheuttamat muutokset, juurihoidetun hampaan tulkinta sekä erilaiset paikkamateriaalit intraoraalikuivissa. Hammasfantomit jäävät valmistuttuaan Turun yliopiston käyttöön.

2 Hammasfantomit opetuksessa, tutkimuksessa ja laadunvarmistuksessa

2.1 Hammasfantomien materiaalit

Opetukseen ja tutkimukseen tarvitaan erilaisia fantom-materiaaleja ja ne toimivat eri tarkoituksissa. Opetuksessa on tärkeä saada simuloitua mahdollisimman todellisia tilanteita, kun taas tutkimuksissa kysymyksen asettelu määrittää pitkälti fantomin tarvittavat ominaisuudet. Lääketieteellisissä tutkimuksissa toisinaan käytetäänkin eläin- tai ihmisperäistä kudoksia (Nitsche & Brost, 2013; Nolting ym., 2016) tai vainajia (Inboriboon & Lumlertgul, 2013). Tällaisten fantomien käyttö ei välttämättä ole juridisesti mahdollista ja vaatii lisäksi olosuhteet, joissa fantomien hygieeninen käsittely on mahdollista. Orgaaninen kudospohjainen materiaali asettaa haasteita myös fantomien säilyvyyteen, säilytykseen ja käsittelyyn. Fantom-materiaaleja on mahdollista myös valmistaa itse nopeasti ja hygieenisesti 3D tulostimien avulla. Kustannukset ovat näissä alhaiset riippuen tarvittavien mallien koosta ja lukumäärästä. Akryylipohjaiset tulostukset eivät kuitenkaan vastaa täysin todellista näkymää röntgenkuvissa, vaikka anatomia saadaankin simuloitua näihin hyvin valmiiden stereolitografia (STL) -tiedostojen avulla.

Röntgenkuvaus perustuu röntgensäteilyn absorptioon ja säteilyn vaimenemiseen kehossa. Muodostuva (2D) röntgenkuva on siis kolmiulotteisen kohteen läpi kulkeneen säteilyn jättämä kaksiulotteinen varjokuva. Röntgenkuvissa materiaalit näkyvät eri harmaan sävyissä. Parhaiten näkyvät tiheyksiltään toisistaan huomattavasti poikkeavat rajapinnat, kun taas tiheydeltään samankaltaiset kudokset erottuvat toisistaan huonosti. Kuvanmuodostukseen liittyen on kehitetty Hounsfieldin yksikkö (HU), joka kuvaa pikselien harmaasävyarvoja. HU-arvo kuvaa kudoksien absorptiokykyä verrattuna veden HU-arvoon, joka on määritelty nollassa. Kun HU-arvo on suurempi kuin nolla, on kudoksen tiheys ja säteilyn vaimenemiskyky suurempi kuin veden. Tyypillisesti kortikaaliluu saa HU-arvon +3000, hohkaluu +200, lihaskudos välillä +40 – +80, rasvakudos välillä -60 – -100 ja ilma -1000. (Mallya & Lam, 2019)

2.2 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsaus hammasfantomien materiaaleista tutkimus- ja opetustarkoitukseen suoritettiin PubMedissä käyttäen seuraavia hakusanoja: phantom, cone beam CT, CBCT, education, intraoral imaging, dental, radiology, panoramic imaging. Kirjallisuushaussa keskityttiin viimeisen 20 vuoden ajanjaksoon ja pyrittiin keskittymään uusimpiin ja ajankohtaisiin tutkimuksiin. Taulukkoon 1 on koottu tuloksia kirjallisuuskatsauksesta. Tutkimuksissa käytettyjen fantomien valmistusmateriaaleja on koottu kuvantamismenetelmien mukaisesti. Hammasfantomien käytöstä opetustarkoituksiin oli niukemmin uutta kirjallisuutta saatavilla. Tutkimusten kohteet KKTT-kuvantamisessa olivat diagnostinen

kuvanlaatu ja artefaktat, PTG-kuvauksissa ja intraoraalikuvauksissa opetuskäyttöön valmistettavat fantomit. Kirjallisuuskatsauksessa esiintyi useita samankaltaisia tutkimuksia, joista valikoitiin erilaisia esimerkkejä taulukkoon.

Taulukko 1: Eri tutkimuksissa käytetyt fantom-materiaalit

Tutkimus	Tutkimuksen tarkoitus	Fantomin materiaali	Kuvantamis- menetelmä
Kuusisto ym., 2023	Tutkia implanteissa keinojuurimateriaaleina käytettyjen titaanin, zirkonian ja kuitulujitteiden komposiitin aiheuttamia artefaktoja ja niiden aiheuttamia haittoja KKTT-kuvien diagnostiikassa.	Possun alaleuka, johon istutettiin implanttien keinojuuret.	KKTT
Chang ym., 2024	Tutkia titaani- ja zirkoniaimplantteihin liittyvää diagnostista luukatoa KKTT-kuvantamisessa.	Ihmisen leukaluu, johon asennettiin kaupalliset implantit sekä Bonefill-keinoluuta. Pehmytkudosten simulointi ballistisella geelillä.	KKTT
Salemi ym., 2021	Tutkia peri-implantiittidiagnostiikassa MAR-algoritmin vaikutusta KKTT-kuvantamisessa.	Naudan kylkiluu, johon istutettiin titaani-implanteja.	KKTT
Yeom ym., 2023	Valmistaa fantom kuvantamisharjoituksiin.	Ihmisen pääkallo, jossa olemassa olevat hammasperäiset vauriot ja sairaudet säilytettiin ja muita merkityksellisiä leesioita luotiin keinotekoisesti tarpeen mukaan.	Periapikaali- kuvaus, PTG sekä KKTT
Giacomini ym., 2023	Valmistaa 3D-tulostettu kallofantom prekliiniseen opetuskäyttöön.	Termoplastinen polyylaktidi.	BW- ja periapikaali- kuvaus
Munhoz ym., 2024	Valmistaa maksillan hohkaluuta simuloiva fantom radiologista tutkimusta ja kuvantamisharjoitusta varten.	Jauhetun valkoisen riisin ja erikoiskovan tyyppin 4 kipsin sekoitus.	Periapikaali- kuvaus
de Mello ym., 2024	Valmistaa 3D-tulostettu kallofantom prekliiniseen opetuskäyttöön.	Termoplastinen polyylaktidi sekä resiini.	BW- ja periapikaali- kuvaus

2.3 Hammasfantomien käyttö eri kuvantamismenetelmissä

2.3.1 Intraoraalikuvaus

Yleisin hammaslääketieteellinen röntgentutkimus on yksittäisen tai muutaman vierekkäisen hampaan intraoraaliröntgentutkimus (Säteilyturvakeskus STUK, 2025a). Intraoraaliröntgenkuvauksessa kuvalevy asetellaan suun sisäpuolelle. Intraoraalikuviin kuuluvat bitewing-, periapikaaliset ja okklusaaliset röntgenkuvat. Nämä kuvausmenetelmät antavat oikein aseteltuina ja käsiteltyinä merkittäviä diagnostisia tietoja kliinisen tutkimuksen tueksi muun muassa kariologisessa, endodontisessa ja parodontologisessa diagnostiikassa. Bitewing-kuvausta käytetään pääsääntöisesti kariksen diagnosointiin, minkä lisäksi sillä saa informaatiota paikka-aineen yli- ja alimääristä, marginaalisesta luutasosta sekä hammaskivestä. Bitewing-kuvauksessa hyvän kuvan kriteereihin kuuluu kuvan rajaus niin, että alveoliluuta näkyy ylä- ja alaleuassa saman verran. Hampaat kuvautuvat lyhentymättöminä tai venymättöminä, eivätkä ne kuvaudu toistensa kanssa horisontaalisesti päällekkäin. Kiilteen ja hammasluun välillä tulisi olla riittävä kontrasti. Periapikaalikuvausta käytetään muun muassa periapikaaliparodontiitin, resorptioiden, kruunu- ja juurifraktuuroiden, alveolimurtumien sekä marginaalisen parodontiitin diagnosointiin. Periapikaalikuvauksessa hyvässä kuvassa näkyvät kaikki halutut hampaat mukaan lukien niiden kruunut ja juuret sekä vähintään 2 millimetriä hampaan apikaalialuetta. Hampaat kuvautuvat projektiossa lyhentymättöminä tai venymättöminä. Kiilteen ja hammasluun välillä tulisi olla riittävä kontrasti ja parodontaaliraon erottua. (Mallya & Lam, 2019)

Giacomini työryhmineen kehitti ensimmäisten joukossa 3D-tulostukseen perustuvan fantomprototyypin intraoraalisten radiologisten menetelmien harjoitteluun. Tutkimuksessa valmistettiin kaksi kallofantomia hampaineen polylaktidifilamenteista FMD (fused deposition modeling) ja DLP (digital light processing) 3D-tulostusmenetelmää käyttäen. Fantomit suunniteltiin hammaslääketieteen opiskelijoiden käyttöön prekliinisiin intraoraalikuvausharjoituksissa. KKTT-kuvantamisen pohjalta data voidaan muuttaa STL-muotoon, joka mahdollistaa tulostuksen. Fantomit rakennettiin yhdistämällä toisiinsa printatut kallon luut, mandibula kiinnitettiin ruuveilla ohimoluuhun ja muovihampaat kiinnitettiin alveoliluuhun ilman liimausta. Fantomista otetuista intraoraalikuvista oli tunnistettavissa anatomisia rakenteita, kuten parodontaalirako, intermaksillaarisutura, maksillan tuberalue ja processus zygomaticus. Itse hampaiden anatomiaa ei tällä fantomilla pystytty simuloimaan. (Giacomini ym., 2023)

De Mello työryhmineen suunnitteli ja valmisti kaksi 3D-printattua kallofantomia brasilialaisten neljännen vuoden hammaslääketieteen opiskelijoiden prekliiniseen opetuskäyttöön. Opiskelijoilla ei ollut entuudestaan kokemusta intraoraalisen radiologisten kuvantamisen tekniikoista. Fantomit valmistettiin KKTT- kuvatiedoston pohjalta anonymisti aikuispotilaasta, jolla oli kaikki pysyvät

hampaat eikä mitään patologisia muutoksia hampaistossa. Kyseinen tiedosto kopioitiin ja sitä lähdettiin muokkaamaan niin, että toisella fantomilla oli puhkeamaton kolmas molaari sekä hampaaton alue suussa. KKTT-datan perusteella kallon luut 3D-tulostettiin termoplastisesta polyaktidista ja hampaat 3D-tulostukseen käytetystä resiniästä, jotta rakenteet saataisiin erottumaan toisistaan röntgenkuvista. Irtonaisten kappaleiden tulostuksen jälkeen vasen ja oikea puoli maksillasta kiinnitettiin yhteen syanoakrylaattioadhesiivilla. Maksilla ja mandibula kiinnitettiin toisiinsa neljällä puristusjousella. Hampaat kiinnitettiin kuoppiinsa kuumentamalla polyaktidi joustavaksi. Valmis fantom kiinnitettiin hoitotuoliin elastisella nauhalla, jonka jälkeen se oli valmis opetuskäyttöön. Opiskelijat ottivat harjoituksen aikana yhteensä 18 bitewing- ja periapikaalikuvaa koko fantomin hampaistosta. Mallinnus sai opiskelijoilta positiivista palautetta realistisesta simulaatiosta ja mahdollisuudesta harjoitella kuvantamista jo prekliinisessä vaiheessa. Kritiikkinä puolestaan oli pehmytkudosten ja muiden anatomisten rakenteiden, kuten hampaan pulpan ja juurikanavien, puuttuminen. (de Mello ym., 2024)

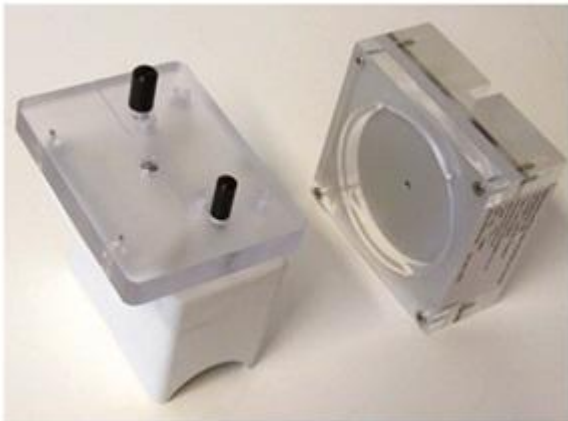
Munhoz työryhmineen puolestaan valmisti tutkimuksissaan vaihtoehdoisen leukaluufantomien radiologista tutkimusta ja periapikaalista kuvantamisharjoitusta varten käyttämällä hammaskipsiä ja riisiä. Fantomi valmistettiin negatiivista silikonimuottia apuna käyttäen. Hohkaluuta simuloitiin murskatun valkoisen riisin ja tyyppin 4 erikoiskovakipsin sekoituksella. Fantomissa käytettiin poistettuja hampaita, joiden juuret oli käsitelty kahdella kerroksella parafiinivahaa parodontaaliligamentin simuloimiseksi. Fantomien ja röntgenputken välissä käytettiin 15 mm paksuista vertikaalista akryyliestettä pehmytkudosten mallinnukseen. Tällaisessa fantomissa ei kuitenkaan pystytty todellistamaan maksillan luisia rakenteita periapikaalikuvaan, kuten poskiontelon pohjaa tai processus zymomaticusta. Hohkaluun mallintamiseksi riisin ja kipsin seos todettiin potentiaalisiksi vaihtoehtomateriaaliksi. (Munhoz ym., 2024)

2.3.2 Panoraamatomografia

Panoraamatomografialla saadaan kuvattua koko hampaisto, maxilla ja mandibula, leukanivelet, poskiontelot sekä orbitan alaosat. Panoraamakuvaus on kerroskuvantamiseen perustuva ekstraorallinen röntgenkuvaustekniikka, jossa kuvauksen aikana säteilylähde ja kuvareseptori pyöriivät potilaan pään ympäri synkronoidusti. Tarkoituksena on saada leuat tarkkana kuvautuvaan leukojen muotoiseen kerrokseen. Muilla syvyyksillä olevat rakenteet kuvautuvat epätarkkoina tai pyyhkiytyvät pois. Kuvausindikaatioita on useita, muun muassa potilaan kokonaishoidon suunnittelu, leukaluiden muutokset kuten kystat, tuumorit ja infektiot, leukojen alueen traumat sekä viisaudenhampaiden että pysyvien hampaiden puhkeamisen arvioiminen.

PTG-kuvauksessa hyvän kuvan kriteereihin kuuluu kuvan rajausta leukanivelten yläpuolelta leuan kärjen alapuolelle ja nivelten lateraalipuolelta toiselle. Kaularanka kuvautuu suorassa ja symmetrisesti kuvan reunoille eikä häiritsevästi kuvan keskelle. Hampaiden juuret erottuvat samalla tavalla molemmin puolin. Juurten parodontaaliraot ovat erotettavissa. Kiille ja dentiini erottuvat toisistaan. Ylä- ja alaetuhampaat kuvautuvat tarkasti ja etuhampaat ovat kärkipurennassa. Kieli on kontaktissa suulakeen eikä häiritse ylähampaiden apikaalialueiden diagnostiikkaa. PTG-kuvassa on runsaasti päällekkäin projisoituvia rakenteita sekä artefaktoja kuvaustekniikan takia, jonka takia kuvausta usein täydennetään vielä intraoraalikuvin. (Mallya & Lam, 2019)

Fantomeita käytetään panoraamakuvantamisessa lähinnä laadunvarmistuksessa, asettelussa ja säteilyannosten seurannassa. Kuvanlaadun arvioimiseksi fantomista otetaan testikuva aina samalla tavalla, samaa kuvaustekniikkaa ja kuvausarvoja käyttäen mitä tyypillisessä kliinisessä tutkimuksessa. Testikuvaa verrataan silmämääräisesti vertailukuvaan. Kliinisessä työssä laitekohtaiset fantomit saa laitetoimituksen yhteydessä. (Säteilyturvakeskus STUK, 2025b) Laadunvarmistukseen käytetyistä fantomeista on esitetty esimerkit kuvissa 1 ja 2. Tutkimuksissa ja opetuksessa käytetään myös kaupallisia, aikuispotilasta vastaavia fantomeita (Kitai ym., 2017; Wahid ym., 2017).



Kuva 1. Kuvassa vasemmalla esimerkki testikappaleesta, jonka avulla voidaan tarkistaa, että PTG-laitteen kuvautuvan kerroksen paikka on oikein säädetty ja kerros kuvautuu symmetrisesti. Oikealla esimerkki testikappaleesta, jota voidaan käyttää intraoraali- ja PTG-röntgenlaitteen kuvan laadun tekniseen testaukseen. (Kuva STUK, Hammasröntgentoiminnanlaadunvalvonta ja kuvaushuoneen säteilysuojaus, 2011)



Kuva 2. Intraoraalilaitteen laadunvarmistuksessa käytetty fantom. (Kuva STUK, Hammasröntgentoiminnanlaadunvalvonta ja kuvaushuoneen säteily suojaus, 2011)

Shin työryhmineen valmisti fantomin panoraamakuvantamisen kontrastin erotuskyvyn tutkimista varten. Fantomissa käytettiin taustamateriaalina suorakulmaista polymetyylimetakrylaattilevyä (PMMA), johon upotettiin viisi halkaisijaltaan 6 mm kokoista ympyrälieriötä 5 mm syvyyteen. Jokainen lieriö oli valmistettu eri testimateriaalista. Kiillettä vastaavana materiaalina käytettiin posliinia, kortikaaliluuna alumiinia, hohkaluuna polytetrafluorieteenia (PTFE), pehmytkudoksina polyoksimetyyleeniä (POM) ja vettä vastaavana polymetyylimetakrylaattia (PMMA). Kyseiset kontrastifantomit asetettiin tutkimusta varten valmistettuun leukaluuta jäljittävään fantomialustaan etuhampaiden, premolaarien, molaarien ja leukanivelen kohdille. (Shin ym., 2016).

2.3.3 Kartiokeilatietokonetomografia ja tietokonetomografia

Kartiokeilatietokonetomografia (KKTT) on leukojen ja hampaiston alueen tutkimuksiin kehitetty kolmiulotteinen röntgentutkimusmenetelmä. Laitteiston kolmiulotteinen grafiikka antaa erittäin tarkan informaation varsinkin nenän sivuonteloiden ja hampaiston alueelta, minkä takia se on vakiinnuttanut asemansa hammaslääketieteellisessä radiologiassa. Kuvantamismenetelmää käytetään pääsääntöisesti

kovakudosrakenteiden tarkempaan tutkimiseen sellaisissa tilanteissa, joita ei voida ratkaista edellä mainittujen tavanomaisten hammasröntgentutkimusten avulla. Kuvausindikaatioita ovat esimerkiksi oikomishoidossa purentavirheiden ja puhkeamattomien hampaiden tilan arviointi, kirurgiassa hampaiden poistojen suunnittelu sekä parodontologiassa hankalien luutaskujen diagnostiikka. Lisäksi dentoalveolaariset traumat ja luustomuutokset, odontogeeniset kasvaimet ja kystat voidaan tutkia KKTT:lla. (Suomalainen & Koskinen, 2013) Tavanomaisiin kuvantamismenetelmiin verrattuna KKTT on kuvantamismenetelmänä uusin tulokas, minkä takia siihen liittyy paljon tutkimus- ja kehitystyötä.

Kliinisessä käytössä olevan KKTT-laitteen toimintakunnon varmistaminen edellyttää muun muassa laadunvalvontafantomeja. Tämä vaatii teknistä erityisosaamista ja erityisvälineitä, jolloin varmistuksen tekee yleensä laitetoimittajan huolto tai muu huoltopalvelu. Heiltä saa myös laitekohtaiset fantomit. (Suomalainen & Koskinen, 2013) KKTT-tutkimuksia on tehty runsaasti hammasimplantteihin ja kuvanlaatuun liittyen. Potilaan metalliset rekonstruktiot, kuten metalli-implantit, usein aiheuttavat ns. artefaktia eli häiriötä KKTT-kuvaan. Metallikappaleiden aiheuttamat artefaktat ilmenevät kuvassa kirkkaina ja tummina varjoina sekä juovina metallikappaleen ympärillä. Metalliartefaktat heikentävät kuvan laatua ja rajoittavat kuvasta saatavaa diagnostista arvoa. (Zhang ym., 2021) Laittevalmistajat ovat kehittäneet erilaisia keinoja kuvanlaadun parantamiseksi, esimerkiksi metalliartefaktien poistoalgoritmeja (Bayrak ym., 2020).

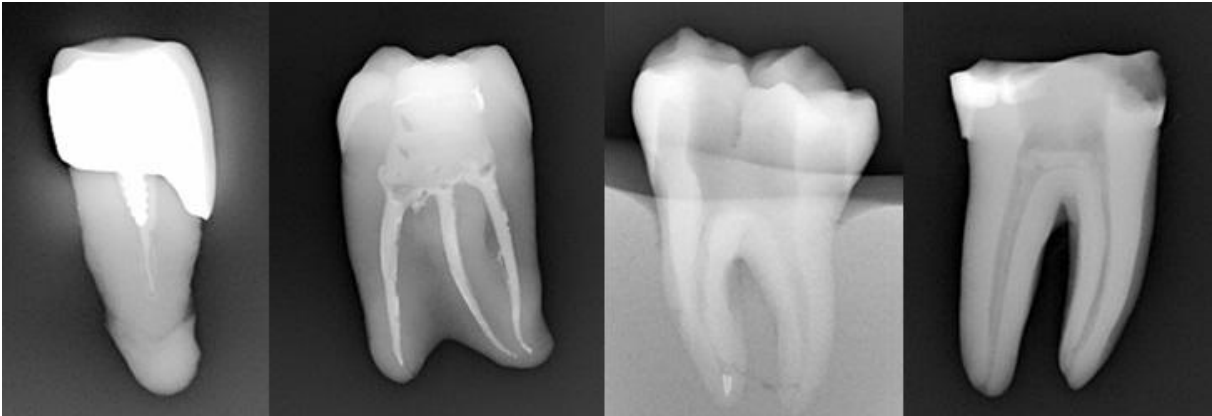
Pääosin KKTT-tutkimuksiin tarvittavat fantomit on valmistettu itse tutkijoiden toimesta, vaikka joitain kaupallisia fantomeita on myös saatavilla (Hur ym., 2023). Taulukosta 1 nähdään, että KKTT-kuvantamistutkimuksissa fantomina on usein käytetty ihmis- tai eläinperäistä luuta. Kuusisto työryhmineen käyttivät tutkimuksessaan fantomina sian mandibulaa. Luuhun istutettiin kooltaan 3.3 x 10 mm kokoiset kaupalliset titaani- ja zirkonia-implantit sekä itse valmistettu kuitulujitteinen komposiitti-implantti 5 mm välein toisistaan. Kutakin implanttimateriaalia oli kaksi kappaletta, joista toiseen tehtiin peri-implantiittia simuloiva defekti ja toinen implantti toimi kontrollina. Leuan pehmytkudokset poistettiin ennen implanttien asettamista ja implantit asetettiin luuhun valmistajien protokollan mukaisesti. (Kuusisto ym., 2023) Auguston työryhmän tutkimuksessa KKTT-kuvantamiseen suunnitellun levyfantomin materiaalina oli käytetty polymetyylimetakrylaattia (PMMA). Fantom simuloi kooltaan hammaskaarta ja siihen asetettiin tutkittavia titaanisylintereitä ja kudosreferenssiksi naudan hohka- ja kortikaaliluusta peräisin olevia luusylintereitä. Polymeerin käyttö loi homogeenisen ympäristön metalliartefaktien kvantifioinnille KKTT-kuvissa. (Augusto ym., 2020)

3 Materiaalit ja metodit

Fantomeissa käytettiin poistettuja ihmishampaita 16 kappaletta, jotka oli luovutettu opetuksen käyttöön (kuva 3, kuva 4). Neljään hampaaseen tehtiin kavumavaus ja juurikanavien laajennus ja puoleen näistä hampaista tehtiin pysyvä juurentäyte ja restaurointi. Liukupolut preparoitiin manuaalisesti teräs K-viiloilla koot #06, #08, #10 ja Flekso K-viilalla #15. Koneellinen laajennus tehtiin Protaper Gold S1, S2, F1 ja F2. Kahteen hampaaseen katkesi käsineula juurikanavan apikaaliosaan. Muut kanavat laajennettiin normaalisti ja hampaat lisättiin fantomiin tällaisenaan. Kaksi muuta juurihoidettua hammasta täytettiin guttaperkalla lateraalikondensaatiotekniikalla sealerina AH-Plus. Pysyvä paikka tehtiin käyttämällä materiaaleina Scotchbond Universal Adhesive, G-aenial Flo ja 3M™ Filtek™ Supreme.



Kuva 3. Fantomeissa käytettyjä poistettuja hampaita.



Kuva 4. Erilliset hammasröntgenkuvat endodonttiseen fantomiin käytetyistä hampaista. Toinen hammas vasemmalta juurihoidettiin ja täytettiin sekä kolmanteen hampaaseen vasemmalta tehtiin kanavien laajennus fantomia varten. Kuvauslaite Planmeca intra; kuvausarvot 63 kV, 8 mA, 0,080 s.

Muita luovutettuja hampaita ei preparoitu fantomia varten, vaan ne olivat poistonaikaisessa tilassa sisältäen esimerkiksi hoitamattomia kariesta, juuriresorptiota ja vanhoja paikkamateriaaleja. Suurin osa hampaista oli poistettuja viisaudenhampaita, joten hampaat aseteltiin fantomiin satunnaisessa järjestyksessä hammasriviksi. Hammasrivi suunniteltiin siten, että se mahdollistaa kuvalevyn pidikkeen käytön kuvausharjoituksessa.

Fantomin materiaaliksi valikoitu kipsi sen röntgenläpäisevyyden, käsiteltävyyden, saatavuuden ja hinnan takia. Fantomeissa käytettiin valkoista tyyppin II kipsiä (Moldabaster® S), jolla on pienempi huokoisuus verrattuna tyyppin I kipsiin. Fantomin muotti valmistettiin jääpalamuottien avulla silikonista. Jalusta fantomille tehtiin kipsimallien valuun käytetystä valumuotista (kuva 5).

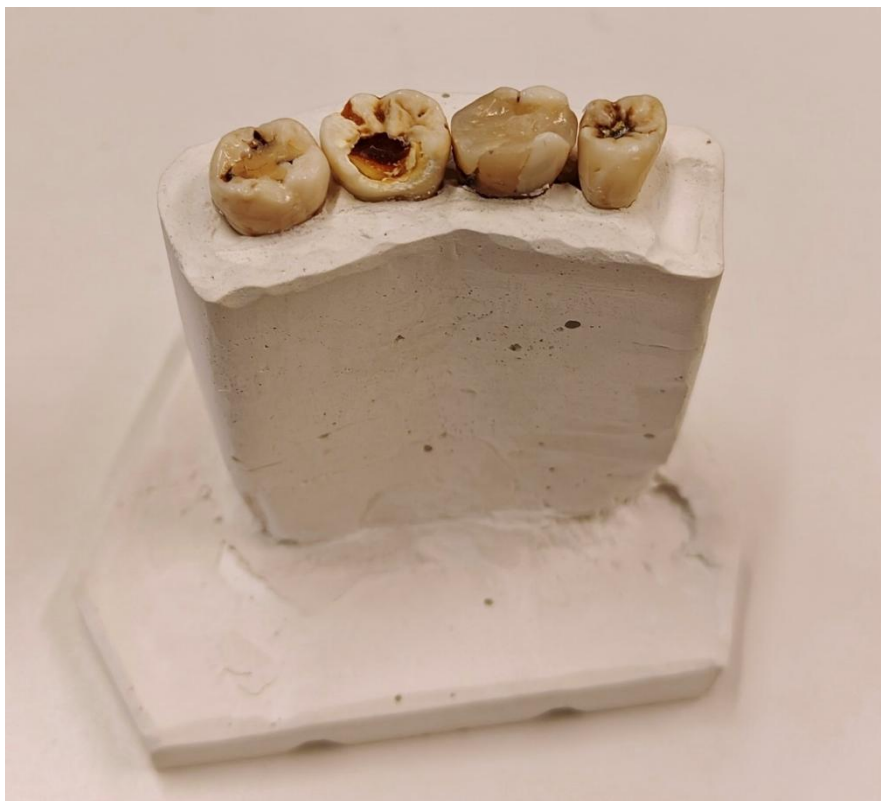


Kuva 5. Fantomin valmistuksen vaiheet: jalusta valettiin valumuottiin, jonka päälle asemoitiin ja valettiin silikonimuotti. Hampaat asemoitiin lasilevyllä ortodonttista vahaa hyväksikäyttäen. Hampaat upotettiin silikonimuotin vielä pehmeään kipsiin ja annettiin kovettua.

Yhteensä valmistettiin neljä eri fantomia, jotka kukin sisälsivät neljä poistettua hammasta (kuva 6). Kahdesta fantomista tehtiin ns. endodonttinen fantom, jotka sisälsivät sekä laajennetun että täytetyn juurihoidetun hampaan ja näiden lisäksi kaksi muuta hammasta. Kaksi muuta fantomia, ns. kariesfantom, sisälsivät sekä karioituneita että paikattuja hampaita (kuva 7).



Kuva 6. Työssä valmistetut hammasfantomit.



Kuva 7. Valmis kariesfantom.

4 Tulokset

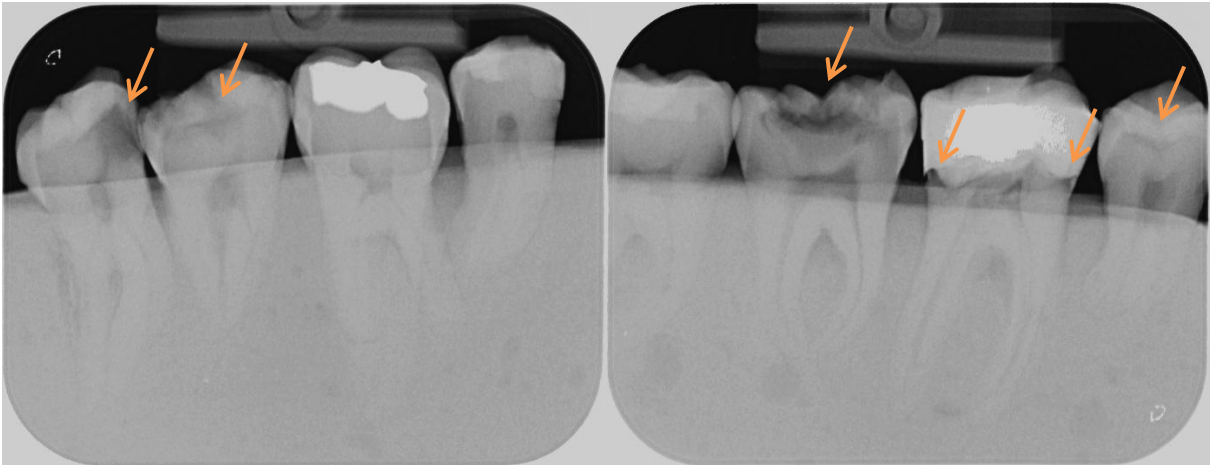
Hammasfantomit kuvattiin yliopiston vastaanottohuoneessa Opetuslinikalla. Hammasfantomit mahdollistavat erilaisten kuvalevyn pidikkeiden ja kuvalevyjen valinnan ja käytön. Fantomin avulla on mahdollisuus myös harjoitella röntgenputken suuntausta sekä ohjausrenkaan käyttöä että kuvausarvojen valintaa. Fantomit voidaan kuvata paralleelitekniikalla (kuva 8). Fantomien testiröntgenkuvauksessa käytettiin kuvauslaitteena Planmeca intra; kuvausarvot 63 kV, 8 mA, 0,064 s (kuva 9, kuva 10).



Kuva 8. Hammasfantomien käyttö intraoraaliröntgenkuvausharjoituksessa.



Kuva 9. Kaksi valmista endodonttista hammasfantomia. Keltaisilla nuolilla osoitettu laajennetut juurikanavat, punaisilla nuolilla juurentäytteet työmitassa, vihreä nuoli osoittaa katkennutta käsineulaa periapikaalialueella.



Kuva 10. Kaksi valmista karieshammasfantomia. Kariesleesiöt osoitettu oransseilla nuolilla. Kuvaslaite Planmeca intra; kuvausarvot 63 kV, 8 mA, 0,064 s

5 Pohdinta

Opinnäytetyössä tehtiin kirjallisuuskatsaus eri kuvantamismenetelmissä käytetyistä hammasfantomeista. Lisäksi valmistettiin neljä eri hammasfantomia intraoraalikuvausharjoituksiin osaksi suurradiologian opetusta. Fantomista otetuista röntgenkuvista pystyy hyvin havainnoimaan hampaan anatomiaa. Kiille erottuu dentiinistä sekä hampaan juuret ympärillä olevasta kipsistä. Hampaan juurten ympärille kuvautuu ikään kuin parodontaalirako, kun kipsi ei sitoudu täysin tiiviisti hampaan ympärille. Pulpaontelot, kavumavaukset, juurentäytteet ja juurihoitamattomien hampaiden luonnolliset juuriontelot kuvautuvat röntgenkuvassa hyvin. Juurihoidon komplikaationa katkenneet neulat erottuvat juurikanavissa. Kariesvauriot, jotka ovat myös kliinisesti havaittavissa laajoina, erottuvat hyvin kuvissa.

Röntgenkuvien anatomiasta jäi uupumaan lamina dura. ”Marginaalinen luuraja” ei kuvaudu hampaiden kohdalla luonnollisesti, vaan kipsi jättää röntgenkuvaan horisontaalisen juosteen hampaiden kiille- sementtirajalle. Muita intraoraalikuvauksessa mahdollisesti nähtäviä anatomisia rakenteita, kuten poskionteloja tai mentalisaukkoa, ei pystytty simuloimaan. Tarkoituksena kuitenkin oli keskittyä hampaat anatomiaan, kariesvaurioihin ja endodonttisen hoidon vaiheisiin. Työssä käytetty kipsi ei vastaa täysin luonnollisen luun röntgenläpäisevyyttä tai struktuuria, mutta tällä saavutettiin tarpeeksi hyvä kontrasti fantomia ajatellen. Lisäksi kipsin sekoituksen takia siihen jäi helposti ilmakuplia, jotka näkyvät kuvissa.

Kustannuksiltaan kyseisten fantomien valmistaminen oli edullista ja valmistusprosessi yksinkertainen, joskin sitä on myös mahdollista kehittää yksinkertaisemmaksi ja tehokkaammaksi. Oikeiden hampaiden käyttö fantomeissa tekee siitä realistisen ja mielenkiintoisen. Opiskelijat pääsevät harjoittelemaan täten harjoitustyössä myös röntgenkuvan tulkintaa, mikä ei ole aiemmin ollut mahdollista muovisten hammasfantomien avulla. Fantomien käsittely on vaivatonta ja lisäksi niiden säilöminen on helppoa. Hammasta ympäröivien kudosten osalta fantomissa on tarvittaessa vielä kehitettävää, etenkin pehmytkudosten osalta.

Valmistetut neljä fantomia tulevat noin 50 opiskelijan käyttöön pienryhmissä. Kustannuksia fantomien osalta ei laskettu. Fantomien valmistukseen aikaa kului arviolta 30 tuntia työn suunnitteluun, toteutukseen ja viimeistelyyn. De Mellon tutkimuksessa valmistettiin kaksi kallofantomia 41 opiskelijan käyttöön. Molempien 3D-tulostettujen fantomien hinnaksi tuli vajaa 7 USD (n. 6 euroa) (de Mello ym., 2024). Giacominin tutkimuksessa kahdelle 3D-tulostetulle kallofantom-prototyypille tuli hintaa 34 ja 39 USD (n. 29 ja 33 euroa). Näihin kustannuksiin verrattuna kaupalliset röntgenfantomit maksavat tuhannesta dollarista jopa kymmeneen tuhanteen dollariin. Fantomin valmistukseen tässä tutkimuksessa

kului lähes 10 työtuntia fantomin digitaaliseen suunnitteluun ja 24 tuntia fantomin tulostukseen. (Giacomini ym., 2023)

Opetustilanteisiin usein riittää yksi tai muutama harjoitteluun tarkoitettu fantom oppilaskoon mukaan. Tutkimuksissa sen sijaan saatetaan tarvita useita ja toisistaan erilaisia fantomeita, jotta saadaan esimerkiksi tilastollisia testejä tehtyä. Tällöin voi olla järkevää käyttää 3D-printtausta, jotta saadaan tismalleen samanlaisia fantomeja. Printtaukseen soveltuvat materiaalit, joista fantomit valmistuvat, eivät kuitenkaan ole täysin realistisia. Kun fantom valmistetaan itse, voidaan käyttää ihmis- tai eläinperäisiä kudoksia, jolloin fantomista saadaan mahdollisimman todellisuutta vastaava rtg-kuvissa. Fantomin rakentaminen itse vaatii kuitenkin aikaa, luovuutta ja osaamista. Käsityönä tehden on myös vaikeaa saada täysin toisiaan vastaavia malleja. Fantomeista tulee tällöin yksilöllisiä, aivan kuten anatomiakin on yksilöllistä.

Oppimisen kannalta on oleellista, että opetuksessa käytetään moderneja ja mielenkiintoisia opiskelumateriaaleja. Ajan myötä materiaaleja on myös päivitettävä. Oppimisen tavoitteet ohjaavat pitkälti opetusmateriaalien tarvetta ja käyttöä. Tässä opinnäytetyössä saatiin uudistettua suurradiologian intraoraaliharjoitusten sisältöä enemmän diagnostiikkaan suuntautuvaksi, mikä on oleellista hammaslääkärin perustyössä. Fantomien avulla opiskelijat pääsevät näkemään ensin klinisen tilanteen karioituneesta, paikatusta tai juurihoidetusta hampaasta ja sitä vastaavan näkymän intraoraalikuvassa. Hammasperäisistä sairauksista karies on yleisin maailmanlaajuinen patologinen tila (WHO) ja on ensiarvoisen tärkeää oppia tunnistamaan tämä sekä kliinisesti että rtg-kuvassa.

Opetuksessa käytetään enenevässä määrin tekoälypohjaisia sovelluksia sekä virtuaalimaailmaa, muun muassa potilastapauksissa. Nämä helpottavat ja nopeuttavat opetustyötä sekä mahdollisesti lisäävät opiskelijoiden mielenkiintoa. Hammaslääkärin perustyö on kuitenkin toistaiseksi pitkälti käsityöhön, kasvokkain kommunikointiin ja käytäntöön perustuvaa työtä. Opiskelijoilla on oltava hammaslääkäriksi valmistuttuaan riittävät käytännön ja kädentaidot ja nämä saavutetaan vain käytännössä harjoittelemalla. Intraoraalikuvien ottaminen ja kuvantulkitseminen on jokapäiväinen hammaslääkärin suorittama toimenpide ja siksi sen harjoittelu on tärkeää. Intraoraalikuvien perusteella tehdään useimmat jatkotoimenpiteet ja täten intraoraalikuvausprosessi kuvauksen suorittamisesta kuvan diagnostiikkaan ohjaa paljolti potilaan hoitokokonaisuutta.

Hammasfantomit otettiin ensi kerran käyttöön opetuksessa elokuussa 2025. Harjoitustöissä keräsimme palautetta fantomien käytöstä ja harjoitustyön onnistumisesta. Opiskelijat kokivat oikeat karioituneet ja paikatut hampaat mielenkiintoisiksi ja harjoitustyön kannalta opettavaisiksi. Harjoitustyössä yhdistyy nyt uudella tavalla teknillinen suoritus sekä diagnostiikka, kuten kliinisessä hammaslääkärin työssä.

6 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa onnistuttiin valmistamaan neljä erilaista yksilöllistä hammasfantomia tukemaan prekliinisen vaiheen hammaslääketieteen opiskelijoiden intraoraalikuvauksen suorittamista ja kuvan tulkintaa. Fantomeissa käytetyt poistetut hampaat tekivät siitä realistisen ja tuovat harjoitustyöhön merkityksellisyyttä. Tässä opinnäytetyössä saatiin uudistettua suurradiologian intraoraaliharjoitusten sisältöä enemmän diagnostiikkaan suuntautuvaksi, mikä on oleellista hammaslääkärin perustyössä. Hammasfantomien valmistusmenetelmät riippuvat pitkälti niiden käyttötarkoituksesta ja mielikuvitus ja materiaalien saatavuus on rajana. Tämän opinnäytetyön myötä kannustamme valmistamaan hammaslääketieteen opetusmateriaaleja, kuten fantomeja, itse opetuskäyttöön. Näin voitaneen taata opiskelijoiden mielenkiinnon ylläpitäminen sekä opetuksen saumaton soveltaminen käytäntöön.

Lähteet

- Augusto, L., Martins, C., Mazucatto Queiroz, P., Nejaim, Y., De Faria Vasconcelos, K., Groppo, F. C., & Haiter-Neto, F. (2020). *evaluation of metal artefacts for two cBct devices with a new dental arch phantom* (Vsk. 49).
<https://academic.oup.com/dmfr/article/49/5/20190385/7262872>
- Bayrak, S., Orhan, K., Kursun Çakmak, E. S., Görürgöz, C., Odabaşı, O., Yılmaz, D., & Atakan, C. (2020). Evaluation of a metal artifact reduction algorithm and an optimization filter in the estimation of peri-implant dehiscence defects by using cone beam computed tomography: an in-vitro study. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, *130*(2), 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2020.02.005>
- Chang, M., Felizardo, H. M. A., Oliveira-Santos, C., & Gaêta-Araujo, H. (2024). Influence of Metal Artifact Reduction Tool of Two Cone Beam CT on the Detection of Bone Graft Loss Around Titanium and Zirconium Implants—An Ex Vivo Diagnostic Accuracy Study. *Clinical Oral Implants Research*. <https://doi.org/10.1111/clr.14381>
- de Mello, W. M., Dutra, V., Maracci, L. M., Ongaro Savegnago, G. D., Serpa, G. F., & Liedke, G. S. (2024). New Scenarios for Training in Oral Radiology: Clinical Performance and Predoctoral Students' Perception of 3D-Printed Mannequins. *Dentomaxillofacial Radiology*. <https://doi.org/10.1093/dmfr/twae035>
- Giacomini, G. O., Dotto, G. N., Mello, W. M., Dutra, V., & Liedke, G. S. (2023). Three-Dimensional printed model for preclinical training in oral radiology. *European Journal of Dental Education*, *27*(2), 280–286. <https://doi.org/10.1111/eje.12801>
- Hur, J., Shin, Y.-G., & Lee, H. (2023). *Hybrid model-based and deep learning-based metal artifact reduction method in dental cone-beam computed tomography* *.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2023.00>
- Inboriboon, P. C., & Lumlertgul, S. (2013). A cadaveric model for pericardiocentesis training. *Journal of Emergency Medicine*, *44*(3), 661–662.
<https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2012.06.019>
- Kitai, N., Murabayashi, M., Sugimoto, H., Fujiwara, A., Tome, W., & Katsumata, A. (2017). Accuracy and head positioning effects on measurements of anterior tooth length using 3-dimensional and conventional dental panoramic radiography. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *151*(3), 607–615.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2016.06.049>
- Kumar, V., & Gadbury-Amyot, C. C. (2019). Predoctoral Curricular Revision for Dental Radiographic Interpretation Competence Based on OSCE Results. *Journal of Dental Education*, *83*(10), 1233–1239. <https://doi.org/10.21815/jde.019.112>

- Kuusisto, N., Abushahba, F., Syrjänen, S., Huuromonen, S., Vallittu, P., & Närhi, T. (2023). Zirconia implants interfere with the evaluation of peri-implant bone defects in cone beam computed tomography (CBCT) images even with artifact reduction, a pilot study. *Dentomaxillofacial Radiology*, 52(8). <https://doi.org/10.1259/dmfr.20230252>
- Mallya, S. M., & Lam, E. W. N. (2019). *White and Pharoah's Oral Radiology: Principles and Interpretation* (8. p.). Elsevier.
- Munhoz, E. A., Xavier, C. R. G., Salles, R. P., Capelozza, A. L. A., & Bodanezi, A. V. (2024). Convenient model of hard tissue simulation for dental radiographic research and instruction. *World Journal of Methodology*, 14(1). <https://doi.org/10.5662/wjm.v14.i1.88850>
- Nitsche, J. F., & Brost, B. C. (2013). Obstetric ultrasound simulation. Teoksessa *Seminars in Perinatology* (Vsk. 37, Numero 3, ss. 199–204). <https://doi.org/10.1053/j.semperi.2013.02.012>
- Nolting, L., Hunt, P., Cook, T., & Douglas, B. (2016). An inexpensive and easy ultrasound phantom: A novel use for SPAM. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 35(4), 819–822. <https://doi.org/10.7863/ultra.14.06023>
- Reymus, M., Fotiadou, C., Hickel, R., & Diegritz, C. (2018). 3D-printed model for hands-on training in dental traumatology. *International Endodontic Journal*, 51(11), 1313–1319. <https://doi.org/10.1111/iej.12947>
- Salemi, F., Jamalpour, M. R., Eskandarloo, A., Tapak, L., & Rahimi, N. (2021). Efficacy of metal artifact reduction algorithm of cone-beam computed tomography for detection of fenestration and dehiscence around dental implants. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 11(3), 305–314. <https://doi.org/10.31661/JBPE.V0I0.2102-1284>
- Shin, J. M., Lee, C., Kim, J. E., Huh, K. H., Yi, W. J., Heo, M. S., Choi, S. C., & Lee, S. S. (2016). Contrast reference values in panoramic radiographic images using an arch-form phantom stand. *Imaging Science in Dentistry*, 46(3), 203–210. <https://doi.org/10.5624/isd.2016.46.3.203>
- Suomalainen, A., & Koskinen, S. K. (2013). Kartiokeilatietokonetomografia ja sen kliiniset sovellukset. *Duodecim*, 129(10), 1037–43.
- STUK. (2011). *Hammasröntgentoiminnan laadunvalvonta ja kuvaushuoneen säteilysuojaus. STUK TIEDOTTAA.*
- Säteilyturvakeskus STUK. (2025a, maaliskuuta 31). *Lääketieteelliset tutkimukset ja niistä aiheutuva säteilyaltistus*. <https://stuk.fi/laaketieteelliset-tutkimukset-ja-niista-aiheutuva-sateilyaltistus>
- Säteilyturvakeskus STUK. (2025b, kesäkuuta 11). *Hammasröntgentutkimukset*. <https://stuk.fi/hammasrontgentutkimukset>

- Wahid, M. A., Choi, E., Macdonald, D. S., & Ford, N. L. (2017). Dosimetry analysis of panoramic-imaging devices in different-sized phantoms. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, *18*(2), 197–205. <https://doi.org/10.1002/acm2.12059>
- Yeom, H. G., Kim, J. E., Huh, K. H., Yi, W. J., Heo, M. S., & Lee, S. S. (2023). Development and validation of a clinical phantom reproducing various lesions for oral and maxillofacial radiology research. *Imaging Science in Dentistry*, *53*(4), 345–353. <https://doi.org/10.5624/ISD.20230129>
- Zhang, S., Jiang, B., & Shi, H. (2021). A metal artifact reduction method with bone segmentation for CBCT images. *Journal of Physics: Conference Series*, *2024*(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2024/1/012033>