

Aarne Lappi

Ortodonttisen hampaansiirron modifikaatioita

Syventävien opintojen kirjallinen työ

Kevätlukukausi 2022

Aarne Lappi

Ortodonttisen hampaansiirron modifikaatioita

Syventävien opintojen kirjallinen työ

Turun hammaslääketieteen laitos

Lasten hammashoito ja oikomisoppi

Kevätlukukausi 2022

Ohjaaja: EHL, HLT, prof. Janna Waltimo-Sirén

TURUN YLIOPISTO

Lääketieteellinen tiedekunta, hammaslääketieteen laitos

LAPPI, AARNE: ORTODONTTISEN HAMPAANSIIRRON MODIFIKAATIOITA

Syventävien opintojen kirjallinen työ, 19 s.

Lasten hammashoito ja oikomisoppi

Maaliskuu 2022

Hampaiden oikomishoito on pitkäaikainen purentavirheiden korjaamiseen tähtäävä hoitomuoto. Pitkittynyt oikomishoito kuormittaa sekä potilasta että yhteiskuntaa sen pääasiallisena maksajana. Hoidon pitkän keston on myös nähty tilastollisesti yhdistyvän hoidon mahdollisiin sivuvaikutuksiin, etenkin juuriresorptioihin. Hampaan siirtoa onkin pyritty nopeuttamaan erilaisilla keinoilla, jotka säästäisivät yksilön ja yhteiskunnan resursseja. Perinteisten metodien lisäksi uusia innovatiivisia tekniikoita on kehitetty. Tässä tutkimuksessa perehdytään kirjallisuuden kautta kortikotomian, matalataajuisen laserin sekä vibraation mahdollisuuksiin ortodonttisessa hampaan siirrossa.

Kortikotomia on tutkitusti todettu tehokkaimmaksi keinoksi hampaan siirron nopeutuksessa. Ongelmaksi on kuitenkin noussut leikkauksellisen tekniikan invasiivisuus. Tämän takia perinteisen flap-leikkauksen rinnalle on kehitetty mikroinvasiivisia toimenpiteitä. Matalataajuisesta laserhoidosta (LLLT) on saatu myös lupaavia tuloksia. LLLT:n tutkimusnäyttö on kuitenkin pääasiassa kokeellista. Vibraation mahdollisuuksia on myös selvitetty ortodonttisen hampaan siirron apuna. Tutkimustulokset ovat kuitenkin pitkälti ristiriitaisia. Haasteena on ollut oikean vibraatiotaajuuden, vibraation voiman ja suunnan tarkka määrittäminen. Yhteistä näille kaikille on pyrkimys nostaa metabolista aktiviteettia osteoklastien määrää kasvattamalla alveoliharjanteella toivotun luun resorption nopeuttamiseksi hampaan liikkeen suunnassa.

Kaiken kaikkiaan tämänhetkinen tutkimus hampaan siirron nopeuttamisesta on vielä matalalla tasolla. Tutkimusnäyttö ei tällaisenaan salli tehdä varmoja johtopäätöksiä. Laajempia tutkimuksia alalta vaaditaan, jotta hampaan siirron modifikaatioita voitaisiin ottaa yleisesti käyttöön väestötasolla.

Asiasanat: ortodonttinen hampaansiirto, kortikotomia, laser, fotobiomodulaatio, vibraatio

Sisällys

1. Johdanto	1
2. Menetelmät	2
Taulukko 1. Hakusanat	3
3. Tulokset	4
3.1. Kortikotomia	4
3.1.1. Esittely	4
3.1.2. Tutkimuksia	5
3.2. Laser	7
3.2.1. Esittely	7
3.2.2. Tutkimuksia	7
3.3. Fotobiomodulaatio	8
3.3.1. Esittely	8
3.3.2. Tutkimuksia	9
3.4. Vibraatio	10
3.4.1. Esittely	10
3.4.2. Tutkimuksia	10
3.5. Kombinaatiotutkimuksia	12
4. Pohdinta	12
4.1. Hampaansiirron tutkimus	12
4.2. Kortikotomia	13
4.3. Laser	14
4.4. Fotobiomodulaatio	14
4.5. Vibraatio	15
4.6. Lopuksi	16
Lähteet	17

1. Johdanto

Ortodonttinen, eli klassinen, hampaansiirto perustuu mekaanisen voiman aiheuttamiin biologisiin muutoksiin hampaan kiinnityskudoksissa, ikenessä sekä ennen kaikkea alveoliluussa. Suomessa ortodonttista hoitoa käytetään lähinnä sellaisten parentavirheiden korjaukseen, jotka aiheuttavat toiminnallisia ongelmia. Oikomishoito on otollisinta ajoittaa lapsuuteen ja nuoruuteen, jolloin luun joustava rakenne sallii hampaiden suhteellisen helpon siirtymän (Fleming, 2017). Vanhemmilla luun lamellaarinen rakenne muuttuu jäykemmäksi, jolloin hampaiden siirtoon joudutaan käyttämään huomattavasti suurempia voimia ja oikominen vaikeutuu (Scott ym., 2007).

Hampaaseen kohdistuva oikean suuntainen ja suuruinen voima mahdollistaa hampaan siirron halutusti. Voima kohdistetaan joko yhteen hampaaseen tai moneen hampaaseen samalla kertaa, riippuen halutusta hoitotuloksesta. On mahdollista siirtää koko hampaistoa, tai kiertää vain yhtä tiettyä hammasta parentavirheen korjaamiseksi. Hampaista siirrettäessä oikean suuruisen voiman aplikointi hampaaseen on avainasemassa. Liian suuri voima aiheuttaa luustossa liiallisen tulehdustilan ja sitä seuraavan nekroosin. Suurten voimien käyttö myös vähentää potilasmukavuutta ja lisää haittavaikutuksien riskiä, kuten hampaan resorptioita, hoidon aikana. Liian pieni voima taas viivästyttää oikomishoitoa tarpeettomasti. (Theodorou ym., 2019.)

Luustossa hampaaseen kohdistettu voima aiheuttaa resorptiota sille puolelle, jonne hammasta siirretään. Tätä puolta kutsutaan painepuoleksi. Resorptio tarkoittaa luuta hajottavien osteoklasti-solujen aktivoitumisesta johtuvaa luun hajoamista. Luun remodellaatiota tapahtuu painepuolen vastakkaisella puolella, vetopuolella. Remodellaatio taas tarkoittaa luuta tuottavien osteoblasti-solujen aktivoitumista ja uudisluun muodostumista. Osteoklastien lisääntynyt määrä liikkuvan hampaan ympärillä lisää alveoliluun toivottua resorptiota, mutta nostaa samalla juuriresorption riskiä, koska näistä vastaavat samat solut. (Wise ym., 2008.) Tämä hampaaseen kohdistetun mekaanisen voiman aiheuttama biologinen prosessi on ei-kirurgisen hampaan siirron perusta.

Hampaiden oikominen on pitkäaikainen parentavirheiden korjaamiseen tähtäävä hoitomuoto. Se on henkisesti, fyysisesti ja taloudellisesti kuormittava prosessi potilaalle ja potilaan perheelle, mutta myös yhteiskunnalle hoitojen pääasiallisena maksajana. Lisäksi oikomishoidon pitkän keston on tilastollisesti nähty liittyvän hoidon mahdollisiin sivuvaikutuksiin, eritoten juuriresorptioon (Theodorou ym., 2019). Hampaan siirtoa onkin

pyrityt nopeuttamaan erilaisilla keinoilla, jotka säästäisivät yksilön ja yhteiskunnan resursseja. Lääkkeellisillä menetelmillä on saatu laboratorio-olosuhteissa hyviä tuloksia ja uusia hampaiden siirron nopeuttamiseen tähtäviä tutkimuksia tehdään jatkuvasti. Näistä esimerkiksi RNA-molekyylien (Zhang ym., 2020) ja serotoniini-entsyymien käytöstä hampaan siirrossa on saatu lupaavia tuloksia (Dhenain, 2019). Ongelmaksi ovat kuitenkin muodostuneet lääkkeiden vaikea annostelu ja lääkkeistä aiheutuvat sivuvaikutukset, kuten hampaan resorptio.

Lääkkeellisten menetelmien lisäksi on pyritty löytämään uusia, innovatiivisia keinoja ortodonttisen hampaan siirron nopeuttamiseksi. Tarkoituksena on ollut löytää sivuvaikutukseton, mutta silti tehokas keino oikomishoidon pitkien prosessien lyhentämiseksi. Tässä kirjallisuuskatsauksessa on tarkoituksena pureutua tarkemmin hampaan siirron nopeutuksessa käytettäviin ei-lääkkeellisiin menetelmiin, joiden tehosta on löydetty vasta vähän tieteellistä näyttöä.

2. Menetelmät

Tutkielma on tehty kirjallisuuskatsauksena. Aineistona toimivat tärkeimmät lääketieteen ja hammaslääketieteen tietokannat, kuten PubMed, Medline, Scopus ja Medic. Näiden lisäksi tutkielmassa on käytetty yleisiä hakukoneita kuten Googlea, jolla laitevalmistajien sivustoja on haettu. Tietokantahaussa on käytetty valikoituja hakusanoja ja niiden yhdistelmiä (Taulukko 1.)

Taulukko 1. Hakusanat

KORTIKOTOMIA	LASER	PHOTOBIMODULAATIO	VIBRAATIO	Orthodontics	
corticotomy	laser	Photobiomodulation	Vibration	Orthodontic tooth movement	accelerated orthodontics
micro-osteoperforation	“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”	Photobiomodulation therapy (PBMT)	high-frequency vibration	Tooth movement techniques*	accelerating tooth movement
minimally invasive surgery	Low-level laser therapy			orthodontics treatment	Tooth Movement Techniques / adverse effects*[mesh]
minimally invasive surgically accelerated orthodontics (MISAO)	Laser therapy			Tooth Movement Techniques / methods*[mesh]	fast orthodontic tooth movement
Minimally Invasive Surgical Procedures / methods*[mesh]	Laser therapy[mesh]			Orthodontic movement	accelerated orthodontic tooth movement
Corticotomy surgery				Tooth movement	
Piezocision					

3. Tulokset

3.1. Kortikotomia

3.1.1. Esittely

Kortikotomian käyttöindikaatiot hampaan siirrossa on tunnettu jo pitkään. Ensimmäiset tutkimukset ortodontisen hampaan siirron nopeuttamisesta kirurgisesti on tehty jo vuonna 1959, jolloin Köle teki ensimmäiset tutkimuksensa. Köle kuitenkin virheellisesti oletti luun liikkuvan hampaan ympärillä luisena blokkina (*”bony block”*), kun kortikaaliluun katkaistiin. Tämän virheellisen käsittelyn kumosivat Wilckon veljekset vasta vuonna 2001. (Cano ym., 2012.)

Kortikotomian tarkoituksena on nimensä mukaan poistaa kortikaalista luuta, joka toimii jarruna ortodonttisen liikkeen tiellä. Tarkoitus on kuitenkin jättää luuta riittävästi, jotta verenkierto luussa jatkuu ja luun remodellaatio mahdollistuu. Ilman luun riittävää verenkiertoa nekroosin ja paradontiumin ongelmien riski kasvaa hammasta siirrettäessä. (Murphy ym. 2009.) Kortikotomian tavoitteena on kiihdyttää luun metaboliaa tekemällä kortikaaliluuhun tahallisia vaurioita. Kiihdyttävää ilmiötä kutsutaan kirjallisuudessa nimellä *Regional accelerated phenomenon (RAP)*. Taustalla on paikallinen inflammaatioreaktio, joka nostaa sytokiinitasoja ja siten aktivoi osteoklasteja halutusti. Näin vähennetään kortikaaliluun tiheyttä, jolloin hampaan siirto helpottuu. (Cifter ym., 2019.)

Kortikotomia voidaan tehdä erilaisilla tekniikoilla. Konservatiivisella tekniikalla kiinnittynyt ien nostetaan alveolaariharjanteelta flap-leikkauksella. Tässä muko-periostiläppä irrotetaan sulkukseen asti ja kortikaaliseen luuhun porataan tahallisia perforaatioita. Tekniikasta vaihdellen perforaatiot voivat olla porattuja reikiä, viiltoja tai muita uria kortikaaliluussa. Perforaatioiden syvyys vaihtelee tekniikasta riippuen yhdestä viiteen millimetriin. Perforaatioiden välille jätetään luuta. Tarkoitus on myös olla kajoamatta lamellaariseen luuhun luun tehokkaan verenkierron säilyttämiseksi. (Apalimova ym., 2020.)

Kortikotomia onkin yksi tehokkaimmista keinoista ortodonttisen hampaan siirron nopeutuksessa. Toimenpide on myös yksi varhaisimmista ja näin myös tutkituimmista ortodonttisen hampaansiirron kiihdyttämiseen tarkoitetuista tekniikoista. Kortikotomian komplikaatioista ja varsinkin juuriresorptioriskin kasvamisesta on ollut kirjallisuudessa pohdintaa. Tulokset näyttävät kuitenkin valoisilta, sillä kortikotomian on todettu jopa

vähentävän perinteisiä oikomisen sivuvaikutuksia, kuten juuriresorptiota sekä parodontaalivaurioita. (Raza ym., 2021.)

Todistetun tehokkuuden käänköpuolena on kuitenkin kortikotomian invasiivisuus. Leikkaus edellyttää muko-periostiläpän avaamista kortikotomia-alueen päältä sekä alveolaarisen kortikaaliluun poistamista suhteellisen isolla marginaalilla. Toipumisprosessi on potilaalle pitkä ja epä mukava suuren haava-alueen takia. Invasiivisuus onkin yksi tekijöistä, joiden takia kirurgia ei ole sopiva hoitovaihtoehto kaikille potilaille, vaikka hampaansiirtoa onkin sillä saatu nopeutettua. (Kurohama ym., 2017; Alfawal ym., 2018.)

Poistetun luun volyyymillä on myös vaikutusta saavutettuun lopputulokseen. Liiallisen kortikotomian on todettu kiihdyttävän hampaansiirron jälkeistä luun resorptiota ja madaltavan näin alveolaariharjannetta. (Kurohama ym., 2017.)

Perinteisen kortikotomian rinnalle onkin kehitetty vähemmän invasiivisia toimenpiteitä kuitenkin toimien samalla periaatteella eli kortikaaliluuta poistamalla. Näiden toimenpiteiden tarkoituksena on jättää invasiivinen flap-leikkaus tekemättä. Tällaisia invasiivisuutta minimoivia tekniikoita ovat kortikisaatio (*corticision*), piezosaatio (*piezocision*) ja mikroperforaatiotekniikka. (Alfawal ym., 2018.) Piezosaatio ja mikroperforaatiotekniikka ovat saaneet näistä tekniikoista eniten huomiota kirjallisuudessa. Piezosaation tarkoituksena on tehdä perforaatiot ilman flapeikkausta suoraan kiinnittyneen ikenen läpi kortikaaliluuhun käyttäen piezosähköistä terää. Piezosaatio on verrattain uusi tekniikka, sillä ensimmäiset kliiniset tutkimukset on tehty vasta 2000-luvulla (Versellotti ym., 2007; Dibart ym., 2009).

Invasiivisen kirurgian käyttötarkoitus lapsilla on kyseenalaista, sillä luu on jo valmiiksi riittävän huokoista suhteellisen nopeaan hampaansiirtoon. Onkin esitetty, että kortikotomiaa ja sen minimaalisesti invasiivisia modifikaatioita käytettäisiin lähinnä aikuisilla, joiden luun joustavuus on hävinnyt. Aikuisiällä tehty oikomishoito on koko ajan yleistymässä ja kortikotomia voisi olla yhtenä ratkaisuna, jolla aikuisen kiinteää luun rakennetta saataisiin muokattua oikomishoitoon sopivammaksi. (Vannala ym., 2019.)

3.1.2. Tutkimuksia

Kölen ja Wilckon veljesten tutkimukset ovat luoneet pohjan kortikotomian tutkimukselle. Näistä lähtökohdista on lähdetty jatkamaan 2000-luvulla. (Cano ym., 2012.)

Kortikotomiaa tukevia tutkimuksia on tehty paljon. Myös tuoreita tutkimuksia alalta on saatu julkaistua. Jahanbakhshin ym. (2017) tutkimuksessa kortikotomian todettiin nopeuttavan ortodonttista hampaansiirtoa 70 prosentilla kontrolliryhmään verrattuna ilman merkittäviä sivuvaikutuksia. Tutkimuksessa kulmahampaan siirto kortikotomiaryhmällä oli 1,8 millimetriä kuussa, kun samaan aikaan perinteisellä kiinteäkojehoidolla saavutettiin 1,1 millimetrin siirto kuussa. Samankaltaisiin tuloksiin on päässyt Al-noum ym. (2014) *split-mouth*-tutkimuksessaan. Tässä tutkimuksessa kortikotomian todettiin nopeuttavan hampaansiirtoa 0,54 millimetriä viikossa kontrolliryhmään verrattuna. Tutkimustuloksien luotettavuutta vähentää kuitenkin potilasaineiston koko, sillä Jahanbakhshin ja Al-noumin tutkimuksissa aineisto on rajoittunut alle kolmeen kymmeneen potilaaseen.

Pelon invasiivista kirurgiaa kohtaan on todettu olevan suurin syy, miksi potilaat eivät ole suosineet kortikotomiaa hoitomuotona. Zawawi (2014) tutki kortikotomiaan liittyviä ennakoasenteita ja pelkoa 129 ihmisen kyselytutkimuksella. Osallistuneista kortikotomian valitsisi vain 32 prosenttia, jos hampaan siirtoaika lyhenisi kolmanneksella. Hoidosta kieltäytyminen johtui kirurgisen operaation pelosta (52 prosenttia vastaajista) ja kivun pelosta (34 prosenttia vastaajista). Tutkimuksen tulosta heikentää kuitenkin se, että kyselyyn vastaajat eivät kokeneet kortikotomiaa käytännössä. Todellisuudessa kortikotomiaan suostuva ryhmä voisi olla vieläkin pienempi.

Mikroinvasiivisista tekniikoista piezosaation ensimmäiset todelliset kliiniset tutkimukset on tehty vasta 2000-luvulla (Versellotti ym., 2007; Dibart ym., 2009). Tutkimuksia alalta tulee koko ajan lisää. Al-Areqin ym. (2020) tutkimuksessa piezosaatiotekniikalla saatiin molaarin siirto nopeutettua kahden ensimmäisen kuukauden aikana kaksinkertaiseksi kontrolliryhmään verrattuna. Piezosaatio-ryhmällä molaari siirtyi 1,26 mm (SD 0,12), kun taas kontrolliryhmällä 0,68 mm (SD 0,19). Piezosaatiota koskevissa tutkimuksissa on saatu lupaavia tuloksia myös sen vähistä sivuvaikutuksista. Gipreal ym. (2019) vertasivat kiputunteja piezosaatioavusteisessa kortikotomiassa yhdistettynä kiinteäkojehoittoon ja pelkässä konservatiivisessa kiinteäkojehoidossa. Ilman flap-leikkausta tehdyn piezosaation ei todettu aiheuttavan lisäkipuja tai muuta epämiellyttävää kontrolliryhmään verrattuna. Kiputuntekset mitattiin 1., 7., 14. ja 28. toimenpiteen jälkeisinä päivinä.

Mikroinvasiivisen kirurgian tutkimustulokset ovat kuitenkin osittain ristiriitaisia. Murphyn ym. (2014) tutkimuksessa ilman flap-leikkausta tehdyn kortikotomian ei todettu edistävän hampaan siirtoa rotilla tehdyssä kliinisessä tutkimuksessa. Yhteensä 44 Wistar-rotalla

tehdyssä tutkimuksessa testattiin kortikotomia-avusteista kiinteäkojehoitoa kahdella eri siirtovoimakkuudella (10 grammaa ja 100 grammaa). Tilastollisesti merkitsevää eroa perinteiseen kiinteäkojehoitoon ei kuitenkaan havaittu kummallakaan voimalla.

3.2. Laser

3.2.1. Esittely

Laserin erilaisia variaatioita on käytetty ortodonttisessa hoidossa laajasti. Tehokkaita korkeataajuisia diodi-lasereita käytetään kudoksen muokkauksessa preoperatiivisesti. Matalataajuisen laserterapian (*low level laser therapy*, LLLT) on tutkimuksissa todettu lievittävän oikomishoidon yhteydessä esiintyviä kiputuntemuksia. Matalataajuisiksi lasereiksi lasketaan alle 500 mW tehoiset laserit. (Heidari ym., 2013.) Viime aikoina LLLT:n variaatioita on tutkittu myös varsinaisen hampaansiirron nopeuttamisessa. LLLT:sta onkin saatu jo lupaavaa näyttöä sen mahdollisesta kiihdyttävästä efektistä hampaansiirron biomekaanisessa prosessissa. (Kawasaki ym., 2000.) Kirjallisuuden perusteella tutkimustulokset kuitenkin vaihtelevat. Tässä tutkielmassa perehdytään LLLT:n osalta sen sopivuuteen hampaansiirron kiihdyttäjänä.

Matalataajuuksisten lasereiden on huomattu kykenevän stimuloimaan solutason tapahtumia ilman kudoksen normaalin lämpötilan muutosta. LLLT:n toimivuus hampaan siirrossa liittyy sen osteoklasteja, osteoblasteja, sekä tulehdussoluja stimuloivaan vaikutukseen. Osteoklastien stimulaatio kiihdyttää luun resorptiota painepuolella ja toisaalta osteoblastien stimulaatio luun remodellaatiota vetopuolella. (Heidari ym., 2013.)

Laserlaitteiden valmistajien sivustoilla ei löydy mainintaa matalataajuuksisten lasereiden käytöstä ortodontiassa. Amerikkalaisen LightScalpelin nettisivuilla mainostetaan teholtaan voimakasta diodi-laseria ortodonttisen hoidon tukena. Diodilasereita käytetään leikkauksellisissa toimenpiteissä, eikä se tehokkuutensa takia sovellu LLLT:n tavoin hampaan siirron nopeutukseen. (LightScalpel, 2022.) Matalataajuuksisia laserlaitteita ei siis ole vielä saatu kaupallistettua ja valmistettu kotikäyttöön.

3.2.2. Tutkimuksia

Kuten ortodonttisissa tutkimuksissa yleensäkin, myös lasertutkimusten asianmukainen tulkinta ei ole yksiselitteistä. Kliinisissä tutkimuksissa lähes poikkeuksetta tutkitaan eri

hampaiden siirtämistä. Hampaansiirron menetit myös vaihtelevat erilaisista kaarilangoista varioiviin siirtovoimiin. Laseriin oman ulottuvuutensa tuovat vielä laservalon eri aallonpituudet sekä se, onko tutkimuksessa käytetty pulsoivaa vai jatkuvaa laseria.

Lupaavia tutkimuksia alalta löytyy kuitenkin useita. Uudessa hampaansiirtonopeutta tutkineessa tutkimuksessa Zeng ym. (2021) todistivat hampaansiirtonopeuden lisääntyneen LLLT:n johdosta verrattuna kontrolliryhmään. Zeng tutki 14 potilasta *split mouth*-tutkimuksessa. Nimensä mukaan *split mouth*-tutkimuksessa suu jaetaan kahteen puoliskoon, jotka toimivat saman tutkimuksen tutkimus- ja kontrolliryhmänä. Kyseisessä tutkimuksessa todettiin myös hampaansiirrossa merkittävien entsyymien (IL-8 ja RANKL) pitoisuuksien nousevan luussa matalataajuuksisen laserin vaikutuksesta.

Cossetin ym. (2013) havaitsivat LLLT:n: kiihdyttävän merkittävästi osteoklastien toimintaa solutasolla rotilla tehdyssä tutkimuksessa. Samassa tutkimuksessa tutkittiin myös osteoblastien proliferaatiota. Odotusten vastaisesti osteoblastien määrä ei lisääntynyt tilastollisesti merkitsevästi kontrolliryhmään verrattuna. Negatiiviset tulokset osteoblastien stimulaatiossa näyttävät liittyvän liian suureen energiakuormitukseen soluissa. Toisessa kokeellisessa tutkimuksessa (Karabel ym., 2021) laboratoriorottiin kohdistettiin kahta eri kuormitusta; 54 ja 72 joulea. Suuremman kuormituksen ryhmässä rottien osteoblastituotannon todettiin jopa vähentyneen kontrolliryhmään verrattuna. Toisaalta pienemmän kuormituksen saaneilla rotilla osteoblastituotanto nopeutui kontrolliryhmään verrattuna.

3.3. Fotobiomodulaatio

3.3.1. Esittely

LLLT:n tavoin fotobiomodulaation tarkoituksena on kiihdyttää hampaan siirron biomekaanista prosessia. Tekniikassa kudokseen altistetaan näkyvälle tai juuri näkyvän valon taajuuden ylittävälle NIR-valolle (*near infrared range*) käyttämällä laser, tai LED-valoa (*light emitting diode*). Altistus voidaan tehdä intra- tai ekstraoraalisesti. Käytettyjen valolähteiden taajuus varioi noin välillä 600-1200 nm. Tutkimuksissa taajuudeksi on vakioitunut n. 800-850 nm. Tekniikan tarkoituksena on stimuloida ATP-tuotantoa (adenosiinitrifosfaatti) solutasolla kohdekudosta valottamalla ja saada näin myös ortodonttiselle hampaansiirrolle tärkeää osteoklastitoimintaa aktivoitua. Valon lähteellä ei

tutkimuksissa ole todistettu olevan eroa vaan suurin vaikutus on saatu valon taajuutta ja valotehoa säätelemällä. Valotehoa ei ole tutkimuksissa pystytty täysin vakioimaan, mutta parhaat tulokset on saatu n. 5 J/m² teholla. Tehon liiallinen nosto on kuitenkin johtanut hampaan siirtonopeuden hidastumiseen. Optimaalisesta valotettavasta pinta-alasta ei myöskään ole vielä luotettavaa tutkimusta. (Kacprzak ym., 2018)

3.3.2. Tutkimuksia

Hyvälaatuisia riippumattomia tutkimuksia fotobiomodulaatiosta hampaiden ortodonttisen siirron apuna on vähän. Iso osa kliinisistä tutkimuksista on laitevalmistajien rahoittamia. Fotobiomodulaatio onkin onnistuttu kaupallistamaan laajasti ortodontian sovelluksiin. Amerikkalainen Biolux Researchin valmistama OrthoPulse-laite on valmistettu kuluttajien kotikäyttöön. Laite hyödyntää noin 850 nm taajuuksista punaista tai NIR-valoa, joka valmistajan mukaan sitoutuu mitokondriaaliseksi energiaksi soluihin ja näin kiihdyttää hampaan siirtoa. Laitteen valmistajan sivuilla kerrotaan 10 minuutin päivittäisen käytön nopeuttavan hampaan siirtoa merkittävästi. Sivuilta löytyy potilastapauksia, joissa poikkeuksetta oikomishoidon kehutaan nopeutuneen 30-70% normaaliin oikomishoittoon verrattuna. Tilastot perustuvat kuitenkin vain arvioihin todellisesta oikomishoidon kestosta, eivätkä perustu tutkimukseen. Laitteella kehutaan olevan myös oikomishoidon yhteydessä ilmenevää kipua vähentäviä vaikutuksia. (OrthoPulse, 2022)

Esimerkkinä laitevalmistajien tutkimuksista mainittakoon Shaughnessy ym. julkaisu vuodelta 2016. Biolux Researchin rahoittamassa tutkimuksessa testattiin fotobiomodulaatiota oikomishoidon yhteydessä 19 potilaalta, yhteensä 28 hammaskaarealta. Oikomishoito saatiin päätökseen tutkimusryhmällä 48 päivässä (SD 39) verrattuna kontrolliryhmän 104 päivään (SD 55). Lupaavista tuloksista huolimatta tutkimus on todella suppea, sillä kontrolli ryhmä sisälsi vain 10 hammaskaarta verrattuna tutkimusryhmän 18 hammaskaareen. Kontrolliryhmän ja tutkimusryhmän oikomishoidon toteutuksessa oli myös eroja eivätkä ne näin ole vertailukelpoisia. Toisessa Biolux Researchin rahoittamassa laajemmassa tutkimuksessa (Kau ym., 2013) 90 potilasta altistettiin fotobiomodulaatiolle ekstraoraalisesti oikomishoidon yhteydessä. Tässäkin tutkimuksessa tutkimusryhmällä hampaan siirtonopeus oli 1,12 mm viikossa (SD 1,05) verrattuna kontrolliryhmän 0,49mm per viikko (SD 0,40).

3.4. Vibraatio

3.4.1. Esittely

Vibraatiotutkimuksissa haastetta tuo laitteiden tuottaman vibraation variaatio. Vaihtelua on ollut sekä vibraation voimakkuudessa että taajuudessa. Eri taajuuksin ja voimin suoritettuja tutkimuksia onkin vaikea verrata keskenään. Myös vibraatioliikkeen suunnassa on eroja. Vibraatiolaitteita on tutkimuksissa käytetty erilaisia. Monessa tutkimuksessa vibraatiota on testattu yhdistettynä kiinteäkojehoitoon, jolloin vibraatio on saatu ohjattua brakettien kautta siirrettävälle hampaalle (Mayama ym., 2022). Hampaita on myös lassottu teräslangalla, jota pitkin vibraatioliike on ohjattu hampaaseen (Takano-Yamamoto ym., 2017).

Vibraatio on hampaan siirrossa vielä suhteellisen tuntematon tekniikka. Ensimmäiset tutkimukset alalta on tehty vasta 2000-luvulla. Vibraation käyttö hampaan ortodonttisessa siirrossa perustuu sen osteoklasteja ja osteoblasteja stimuloivaan vaikutukseen. Tarkkaa taustaa tapahtuman takana ei kuitenkaan tiedetä. Tutkimuksissa on kuitenkin todettu lähinnä korkeataajuisen värähtelyn edistävän luun resorptioon liittyvien solujen aktivaatiota (Nishimura ym., 2008), kun taas matalataajuisen värähtelyn hidastavan hampaan liikettä (Kalajzic ym., 2014). Takano-Yamamoto ym. (2017) määrittivät optimitaajuuden olevan noin 70 Hz tutkittuaan eri taajuisen värähtelyjen vaikutusta hampaan siirtoon.

3.4.2. Tutkimuksia

Uusia tutkimuksia alalta tulee koko ajan lisää. Eläinkokeita alalta löytyy lukuisia. Lupaavia tuloksia sisältäviä ortodonttisen hampaansiirron nopeutusta käsitteleviä tutkimuksia on esitelty. Esimerkinä tuore vibraatio-tutkimus (Mayama ym., 2022), jossa yläleuan kulmahampaita siirrettäessä potilaille tehtiin *split mouth* -tutkimus, jossa vibraation todettiin tilastollisesti merkitsevästi avustavan hampaansiirrossa ilman minkäänlaisia sivuvaikutuksia. Vibraatiopuolella kulmahampaan siirtonopeus oli 1,21 mm (SD 0,60) kuukaudessa, kun se kontrollipuolella oli 0,89 mm (SD 0,55). Tutkimus oli kuitenkin aineistoltaan suhteellisen suppea sisältäen ryhmissä vain 23 tutkittavaa potilasta. Vastaavia positiivisia tutkimustuloksia on julkaistu muitakin. Takano-Yamamoto ym. (2017) tutkivat eri taajuuksisen vibraation vaikutusta hampaansiirron nopeuteen. Tutkimusta varten kehitetyllä laitteella pystyttiin testaamaan värähtelyä välillä 48-284 Hz. Parhaat tulokset

saatiin 70 Hz vibraatiolla 3 gramman voimalla, kun hampaaseen johdettiin kolme minuuttia värinää viikossa kolmen viikon ajan. Kasvatetulla ajalla ei todettu olevan tilastollista merkitystä. Testattuja aikoja olivat 3 minuttia/viikko, 6 minuuttia/viikko ja 10 minuuttia/viikko. Muita rotan hampaansiirtoa edistäneitä tutkimuksia on tehty myös 60 Hz ja 100 Hz taajuuksilla (Nishimura ym., 2008).

Yhtenä esimerkkinä ortodonttisen vibraation voittokulkua liputtavista ovat vibraatiolaitteita valmistavat yritykset. Laittevalmistajat mainostavat vibraation laajoja mahdollisuuksia ortodontiassa. Pääasiallisena tarkoituksena on ollut valmistaa kotikäyttöinen vibraatiolaitte, jota päivittäin käyttämällä hampaansiirto nopeutuisi sekä kiputuntemukset oikomisen yhteydessä helpottaisivat. Esimerkiksi amerikkalaisen Propel Orthodontics -yhtiön verkkosivuilla mainostetaan uutta AcceleDent -laitetta. Laitteen väitetään kliinisesti nopeuttavan hampaansiirtoa jopa 50 prosenttia kontrolliryhmään nähden, sekä toimivan myös kivunlievityksessä oikomishoidon yhteydessä. Kiputuntemusten todetaan vähenevän 71 prosenttia lähtötilanteesta. Laittevalmistajan sivuilta löytyy myös lista klinisiä tutkimuksia, joissa AcceleDent -laitteen todetaan mullistavan oikomishoidon. Kuten kaikkiin mainoksiin, myös näihin väitteisiin on suhtauduttava terveellä skeptisyydellä. Sivuston tutkimusten kirjoittajat ovat järjestäin sidoksissa Propel Orthodonticsiin ja tutkimusten rahoittajana on myös toiminut laitteen valmistajayhtiö. Vibraation mainitaan myös edesauttavan kalvo-oikomisessa käytettyjen kalvojen paikoilleen asettumisessa. Vibraatiolaitteita markkinoidaankin paljon juuri kalvo-oikomisen yhteydessä. (AcceleDent, 2020.)

Myös paljon vastakkaisia tutkimuksia alalta löytyy. Aljabaa ym. (2017) tutkivat systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessaan artikkeleita vibraation käytöstä ortodontiassa. Vain yhdessä viidestä tutkimukseen valituista artikkeleista löytyi tilastollisesti merkitseviä muutoksia kivunhoidossa tai hampaansiirtonopeuden stimulaatiossa käytettäessä vibraatiota. Samansuuntaisen tutkimustuloksen ovat saaneet Lyu ym. (2017), joiden systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa todettiin vibraatioavusteisen ortodontian kliinisen näytön olevan todella heikkoa. Tutkimuksen inklusiokriteerit läpäisi kolmetoista tutkimusta, joiden tulokset olivat selkeässä ristiriidassa keskenään. Artikkelissa todetaankin aiheen vaativan paljon lisää luotettavia tutkimuksia ja suuremmilla aineistoilla.

Tutkimuksissa on jopa löydetty syklisten voimien hidastavan hampaan siirtoa joissain tapauksissa. Negatiiviset tulokset näyttävät olevan yhteydessä liian matalataajuisen

värähtelyyn. Rotilla tehdyssä tutkimuksessa Kalajzic ym. (2014) löysivät 30 Hz taajuisen värähtelyn hidastavan merkittävästi hampaansiirtoprosessia perinteiseen kiinteäkojehoittoon verrattuna. Tutkimus todisti vibraatiossa käytetyllä taajuudella olevan merkitystä. Matalataajuuksista vibraatiota rotilla ovat testanneet myös Yadav ym. (2015) jotka testasivat 5 Hz, 10 Hz ja 20 Hz taajuuksien toimivuutta hampaansiirrossa. Tässäkään tutkimuksessa hampaansiirto ei tilastollisesti merkitsevästi kasvanut kontrolliryhmään verrattuna.

3.5. Kombinaatiotutkimuksia

Kortikotomiaa, matalataajuisia laseria sekä vibraatiota on tutkittu erikseen. Tutkimuskysymysten eroavaisuudet, tutkimusaineisto ja laajuus varioivat kuitenkin tutkimuskohtaisesti, eikä näin ollen vertailtavuutta pystytä suoraan osoittamaan eri menetelmien välillä. Yhdessä julkaistussa tutkimuksessa kortikotomiaa ja LLLT:n toimivuutta on vertailtu suoraan keskenään (Gifter ym., 2019). He vertailivat eläinkokeessaan kortikotomiaa ja LLLT:a kiinteäkojehoidon tukena. Tutkimuksessa yhteensä 42 Wistar-rottaa jaettiin kortikotomia-, LLLT- ja kontrolliryhmään. Tuloksia kontrolloitiin 7. ja 14. päivänä toimenpiteestä. Tässä tutkimuksessa kortikotomian todettiin edistävän hampaansiirtoa parhaiten, mutta myös LLLT nopeutti hampaan siirtoa tilastollisesti merkitsevästi kontrolliryhmään nähden.

4. Pohdinta

4.1. Hampaansiirron tutkimus

Hampaansiirtoa on tutkittu jo pitkään ja hampaansiirron biologisen perusmekanismin selvittäminen on ollut yksi ortodontian keskeisimpiä kysymyksiä. Hampaansiirron tutkimuksessa haasteita luovat tutkimuskysymyksen valinta ja tutkimusolosuhteiden variointi. Kliinisissä tutkimuksissa lähes poikkeuksetta tutkitaan eri hampaiden siirtämistä eri yksilöillä. Kiinteäkojehoidoissa käytetyt kaarilangat myös vaihtelevat, samoin hoidoissa käytetyt siirtovoimat. Luun tiheys ja reaktio hampaan siirtoon ovat myös yksilöllisiä piirteitä, joita on vaikea määrittää tarkasti. Kontrollimittauksien määrä vaihtelee suuresti ja

ne on toteutettu eri ajankohtina voiman aplikoinnista. Seuranta mahdollisista jälkioireista on puuttunut tutkimuksista lähes poikkeuksetta.

Suhteellisen luotettavia tutkimustuloksia on saatu rotilla tuotetuissa tutkimuksissa, joissa tutkimusaineisto saadaan selkeästi ihmistutkimuksia suuremmiksi. Ihmistutkimuksissa ongelmana on sopivien potilaiden löytäminen tutkimista varten. Potilaalta tulee löytyä sopiva purentavirhe, jonka korjauksen yhteydessä hampaan siirtoa tutkitaan. Ongelmaa vielä lisää se, että purentavirheet ovat hyvin yksilöllisiä. Purennat, purentavoimat, asentovirheet ja rotaatioasteet vaihtelevat. Näitä muuttujia on pyritty tasaamaan *split-mouth* tutkimuksilla. Vaikka näissä tutkimuksissa on saatu osa muuttujista eliminoitua, edellyttää tekniikka suhteellisen symmetristen purentavirheiden löytämistä.

4.2. Kortikotomia

Tässä kirjoitelmassa käsitellyistä ortodonttisen hampaansiirron nopeutukseen tarkoitetuista metodeista kortikotomia on osoittautunut tarkoitukseen parhaiten sopivaksi. Vibraatioon ja matalataajuiseen laseriin verrattuna kortikotomia on myös näistä kolmesta modifikaatiosta ylivoimaisesti tutkituin. Tutkimus kortikotomian käytöstä ortodontiassa on jatkunut yli 70 vuoden ajan ja jatkuu edelleen. Osassa tutkimuksista kortikotomian on todettu lisäävän hampaansiirtonopeutta jopa 100 prosenttia kontrolliryhmään verrattuna. Kortikotomian varjopuolena on sen invasiivisuus. Flap-leikkaus ja luun oikeaoppinen poistaminen vaativat paljon sekä potilaalta että hammaslääkäriltä.

Kun puhutaan kortikotomiasta hampaansiirron nopeuttajana, onkin syytä arvioida hyötysuhdetta. Ei ole välttämättä kannattavaa toteuttaa invasiivista leikkausta potilaalle vain yhden hampaan siirtonopeuden lisäämiseksi. Leikkaukseen liittyy kuitenkin aina omat riskinsä ja toipuminen on potilaalle hidasta, ja jopa kivuliasta. Hoitomuotona kortikotomia on myös kallis. Uusilla vähemmän invasiivisilla tekniikoilla, kuten piezosaatiolla ja mikrokirurgialla on jo nyt saatu hyviä tuloksia, mutta tutkimus alalta on vielä kapeaa. Aikuisten oikomishoito on koko ajan yhteiskunnassamme yleistyvää trendi. Lapsen joustavasta luusta poiketen aikuisen tiheä lamellaarinen luu vaatii suurempia voimia ja hoito on näin ollen myös riskialttiimpaa. Kortikotomia ja sen mikroinvasiiviset modifikaatiot

voisivatkin tulevaisuudessa olla relevantti ratkaisu aikuisten oikomishoidon nopeuttamiseksi.

4.3. Laser

LLLT:n mahdollisuudet ortodonttisen hampaansiirron nopeuttamisessa ovat ehkä kiinnostavimpia, sillä sen käyttö potilaaseen vaikuttaa vaivattomalta. Kortikotomiaan verraten laserin käytössä ei tarvita invasiivisia leikkauksia, joista potilaalla kestää kauan parantua. Kiinteäkojehoitoon yhdistettynä laserterapia voitaisiin toteuttaa ainakin osittain oikomishoidon kontrollikäyntien yhteydessä, mikä säästäisi sekä potilaan että yhteiskunnan resursseja. Tutkimusnäyttö matalataajuisen laserin hampaansiirtoa stimuloivasta vaikutuksesta rajoittuu kuitenkin vielä pitkälti eläinkokeisiin, eikä täysin luotettavia kliinisiä tutkimuksia ole toteutettu. Osassa tutkimuksista laserin jopa todettiin hidastavan hampaansiirron nopeutta. Matalataajuuksisia lasereita ei ole vielä tuotu markkinoille, ainakaan ortodonttisiin tarkoituksiin. Tämäkin kertoo osaltaan varsin heikosta tutkimusnäytöstä.

4.4. Fotobiomodulaatio

Fotobiomodulaatiota hampaan ortodonttisessa siirron nopeuttajana on tutkittu vasta vähän. Muutamia lupaavia kokeellisia tutkimuksia on saatu fotobiomodulaation solutason ATP-tuotantoa stimuloivista vaikutuksista ja näin myös osteoklastitoimintaa aktivoivista ominaisuuksista. Ala on kuitenkin uusi ja pääosa tutkimuksista onkin julkaistu vasta viimeisen vuosikymmenen kuluessa. Haasteita on tuottanut varsinkin optimaalisen valotehon, taajuuden ja valotettavan pinta-alan löytäminen.

Fotobiomodulaation suppeasta tutkimuksesta huolimatta ala on verrattain kaupallistunut. Varsinkin amerikkalainen OrthoPulse-laite on kerännyt suosiota kuluttajien keskuudessa. Toimiessaan laitevalmistajan lupauksien mukaan OrthoPulse voisi olla todella helppokäyttöinen oikomishoidon nopeuttaja. Laitteen verkkosivuilla mainostetut mahdollisuudet ortodonttisen hampaan siirron nopeutuksesta ovat kuitenkin laajasti kyseenalaisia. Laitteesta teetetyt tutkimukset ovat kyllä lupaavia, mutta rahoittajana on toiminut poikkeuksetta OrthoPulsen emoyhtiö Biolux Research Td. Laitteen tutkimuksissa on myös laadullisia ongelmia. Kaiken kaikkiaan fotobiomodulaation sovellukset

ortodonttisen hampaan siirron nopeuttajina ovat vielä kokeilutasolla. Ala vaatiikin paljon lisää kattavia ja riippumattomia tutkimuksia, jotta fotobiomodulaation sovelluksia voitaisiin käyttää laajemmin.

4.5. Vibraatio

Vibraation mahdollisuudet ortodonttiassa ovat kortikotomiaan ja laseriin verraten vielä varsin tutkimattomat. Pieniä tutkimuksia on jo toteutettu eläimillä, ja muutamia myös ihmisillä. Tutkimustulokset ovat kuitenkin olleet ristiriitaisia. Myös tutkimuskysymykset ja tutkimusten toteutus ovat vaihdelleet laajalti. Yksi vibraation ongelmista on ollut hampaansiirron stimulaatiolle optimaalisen taajuuden ja vibraatiovoiman määrittäminen. Mitään vakiintuneita arvoja näihin ei ole vielä kirjallisuudessa onnistuttu laatimaan. Matalataajuisen, alle 30 Hz vibraation on nykytutkimuksen valossa todettu hidastavan hampaan siirtoa. Korkeataajuisemmilla 60 Hz ja 100 Hz taajuuksilla on sen sijaan saatu lupaavia tuloksia.

Vibraatiolaitteiden toimivuus käytännössä vaikuttaa haastavalta, sillä monissa tutkimuksissa vibraatiolaite kiinnitettiin suoraan kiinteisiin kojeisiin. Vibraation johtuminen brakettien kautta hampaaseen todennäköisesti ainakin heikentäisi brakettien sidosta ja johtaisi niiden irtoamiseen käsittelyn yhteydessä. Vaihtoehtoiseksi tavaksi on esitetty hampaan lassoamista teräslangalla. Yhden hampaan siirrosta lassoaminen voisikin toimia, mutta jos kyseessä on useampi siirrettävä hammas, tähän kuluisi kohtuuttoman paljon aikaa vastaanottokäynnin yhteydessä. Markkinoille on tuotu viime aikoina myös kaupallisia laitteita kuten vibraatioon tukeutuva Acceledent. Mitään luotettavaa, riippumatonta tieteellistä näyttöä laitteen toiminnasta ei kuitenkaan ole. Kaupallisten, kotona käytettävien vibraatiolaitteiden tehosta on olemassa lähinnä laitevalmistajien rahoittamia kliinisiä tutkimuksia. Laitteiden kipua lievittävään ja hampaansiirtonopeutta lisäävään efektiin onkin suhtauduttava suurella varauksella, mutta kivun osalta placebo-vaikutus voi olla tärkeä.

4.6. Lopuksi

Ortodonttisen hampaansiirron kiihdyttäminen on yksi ortodontian tulevaisuuden mielenkiinnon kohteista. Uusia tutkimuksia alalta tulee koko ajan lisää. Tämänhetkinen näyttö voidaan kuitenkin todeta riittämättömäksi. Tarvitaan vielä paljon laajempia ja luotettavampia kliinisiä tutkimuksia, jotta ortodonttista hampaansiirtoa voitaisiin rutiinisti lähteä kiihdyttämään kiinteäkojehoitujen yhteydessä.

Lähteet

- Acceledent. Propel Orthodontics 2020. <https://acceledent.com/>. Luettu 21.1.2022.
- Al-Areqi MM, Abu Alhaija ES, Al-Maaitah EF. Effect of piezocision on mandibular second molar protraction. *Angle Orthod.* 2020 May 1;90(3):347-353.
- Alfawal AMH, Hajeer MY, Ajaj MA, Hamadah O, Brad B. Evaluation of piezocision and laser-assisted flapless corticotomy in the acceleration of canine retraction: a randomized controlled trial. *Head Face Med.* 2018 Feb 17;14(1):4.
- Aljabaa A, Almoammar K, Aldrees A, Huang G. Effects of vibrational devices on orthodontic tooth movement: A systematic review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2018 Dec;154(6):768-779.
- Al-Naoum F, Hajeer MY, Al-Jundi A. Does alveolar corticotomy accelerate orthodontic tooth movement when retracting upper canines? A split-mouth design randomized controlled trial. *J Oral Maxillofac Surg.* 2014 Oct;72(10):1880-9.
- Apalimova A, Roselló À, Jané-Salas E, Arranz-Obispo C, Marí-Roig A, López-López J. Corticotomy in orthodontic treatment: systematic review. *Heliyon.* 2020 May 27;6(5):e04013.
- Cano J, Campo J, Bonilla E, Colmenero C. Corticotomy-assisted orthodontics. *J Clin Exp Dent.* 2012 Feb 1;4(1):e54-9.
- Cifter M, Celikel ADG, Cifter ED, Tagrikulu B, Olgaç V, Erdem MA, Cankaya AB. Comparison of the efficiency of alveolar decortication and low level laser therapy on orthodontic tooth movement and alveolar metabolism in rats. *J Dent Sci.* 2019 Dec;14(4):401-407.
- Cossetin E, Janson G, de Carvalho MG, de Carvalho RA, Henriques JF, Garib D. Influence of low-level laser on bone remodeling during induced tooth movement in rats. *Angle Orthod.* 2013 Nov;83(6):1015-21.
- Dhenain T, Côté F, Coman T. Serotonin and orthodontic tooth movement. *Biochimie, An International Journal of Biochemistry and Molecular Biology.* 2019 Jun;161:73-79.
- Dibart S, Sebaoun JD, Surmenian J. Piezocision: a minimally invasive, periodontally accelerated orthodontic tooth movement procedure. *Compend Contin Educ Dent.* 2009 Jul-Aug;30(6):342-4, 346, 348-50.
- Fleming PS. Timing orthodontic treatment: early or late? *Aust Dent J.* 2017 Mar;62 Suppl 1:11-19.
- Gibreal O, Hajeer MY, Brad B. Evaluation of the levels of pain and discomfort of piezocision-assisted flapless corticotomy when treating severely crowded lower anterior teeth: a single-center, randomized controlled clinical trial. *BMC Oral Health.* 2019 Apr 16;19(1):57.

- Heidari S, Torkan S. Laser applications in orthodontics. *J Lasers Med Sci*. 2013 Fall;4(4):151-8.
- Jahanbakhshi MR, Motamedi AM, Feizbakhsh M, Mogharehabet A. The effect of buccal corticotomy on accelerating orthodontic tooth movement of maxillary canine. *Dent Res J (Isfahan)*. 2016 Jul-Aug;13(4):303-8.
- Kacprzak A, Strzecki A. Methods of accelerating orthodontic tooth movement: A review of contemporary literature. *Dent Med Probl*. 2018 Apr-Jun;55(2):197-206.
- Kalajzic Z, Peluso EB, Utreja A, Dymant N, Nihara J, Xu M, Chen J, Uribe F, Wadhwa S. Effect of cyclical forces on the periodontal ligament and alveolar bone remodeling during orthodontic tooth movement. *Angle Orthod*. 2014 Mar;84(2):297-303.
- Karabel MA, Dođru M, Dođru A, Karadede Mİ, Tuncer MC. Evaluation of the effects of diode laser application on experimental orthodontic tooth movements in rats. Histopathological analysis. *Acta Cir Bras*. 2021 Jan 20;35(12)
- Kau CH, Kantarci A, Shaughnessy T, Vachiramona A, Santiwong P, de la Fuente A, Skrenes D, Ma D, Brawn P. Photobiomodulation accelerates orthodontic alignment in the early phase of treatment. *Prog Orthod*. 2013 Sep 19;14:30.
- Kawasaki K, Shimizu N. Effects of low-energy laser irradiation on bone remodeling during experimental tooth movement in rats. *Lasers Surg Med*. 2000;26:282–91.
- Kurohama T, Hotokezaka H, Hashimoto M, Tajima T, Arita K, Kondo T, Ino A, Yoshida N. Increasing the amount of corticotomy does not affect orthodontic tooth movement or root resorption, but accelerates alveolar bone resorption in rats. *Eur J Orthod*. 2017 Jun 1;39(3):277-286
- Lightscalpel. Lightscalpel dental-laser 2022. <https://www.lightscalpel.com/laser-surgery/dental-laser/orthodontics/>. Luettu 25.2.2022.
- Lyu C, Zhang L, Zou S. The effectiveness of supplemental vibrational force on enhancing orthodontic treatment. A systematic review. *Eur J Orthod*. 2019 Sep 21;41(5):502-512.
- Mayama A, Seiryu M, Takano-Yamamoto T. Effect of vibration on orthodontic tooth movement in a double blind prospective randomized controlled trial. *Sci Rep*. 2022 Jan 25;12(1):1288.
- Murphy CA, Chandhoke T, Kalajzic Z, Flynn R, Utreja A, Wadhwa S, Nanda R, Uribe F. Effect of corticision and different force magnitudes on orthodontic tooth movement in a rat model. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2014 Jul;146(1):55-66.
- Murphy KG, Wilcko MT, Wilcko WM, Ferguson DJ. Periodontal accelerated osteogenic orthodontics: a description of the surgical technique. *J Oral Maxillofac Surg*. 2009 Oct;67(10):2160-6
- Nishimura M, Chiba M, Ohashi T, Sato M, Shimizu Y, Igarashi K, Mitani H. Periodontal tissue activation by vibration: intermittent stimulation by resonance vibration accelerates

experimental tooth movement in rats. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2008 Apr;133(4):572-83.

OrthoPulse. Biolux Research 2022. <https://www.orthopulse.com/patients> Luettu 13.4.2022

Raza M, Sharma P, Kumar P, Vaish S, Pathak B. Comparison of canine retraction by conventional and corticotomy-facilitated methods: A split mouth clinical study. *J Orthod Sci.* 2021 Jul 9;10:9.

Scott P, Fleming P, DiBiase A. An update in adult orthodontics. *Dent Update.* 2007 Sep;34(7):427-428, 431-434, 436.

Shaughnessy T, Kantarci A, Kau CH, Skrenes D, Skrenes S, Ma D. Intraoral photobiomodulation-induced orthodontic tooth alignment: a preliminary study. *BMC Oral Health.* 2016 Jan 13;16:3.

Takano-Yamamoto T, Sasaki K, Fatemeh G, Fukunaga T, Seiryu M, Daimaruya T, Takeshita N, Kamioka H, Adachi T, Ida H, Mayama A. Synergistic acceleration of experimental tooth movement by supplementary high-frequency vibration applied with a static force in rats. *Sci Rep.* 2017 Oct 25;7(1):13969.

Theodorou CI, Kuijpers-Jagtman AM, Bronkhorst EM, Wagener Optimal force magnitude for bodily orthodontic tooth movement with fixed appliances: A systematic review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2019 Nov;156(5):582-592.

Vannala V, Katta A, Reddy MS, Shetty SR, Shetty RM, Khazi SS. Periodontal Accelerated Osteogenic Orthodontics Technique for Rapid Orthodontic Tooth Movement: A Systematic Review. *J Pharm Bioallied Sci.* 2019 May;11(Suppl 2):S97-S106.

Vercellotti T, Podesta A. Orthodontic microsurgery: a new surgically guided technique for dental movement. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 2007 Aug;27(4):325-31.

Wise GE, King GJ. Mechanisms of tooth eruption and orthodontic tooth movement. *J Dent Res.* 2008 May;87(5):414-434.

Yadav S, Dobie T, Assefnia A, Gupta H, Kalajzic Z, Nanda R. Effect of low-frequency mechanical vibration on orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2015 Sep;148(3):440-9.

Zawawi KH. Patients' acceptance of corticotomy-assisted orthodontics. *Patient Prefer Adherence.* 2015 Aug 12;9:1153-8.

Zhang R, Li J, Li G, Jin F, Wang Z, Yue R, Wang Y, Wang X, Sun Y. LncRNA Nron regulates osteoclastogenesis during orthodontic bone resorption. *Int J Oral Sci.* 2020 May 9;12(1):14.

Zheng J, Yang K. Clinical research: low-level laser therapy in accelerating orthodontic tooth movement. *BMC Oral Health.* 2021 Jun 28;21(1):324.