

Kaarina Syväniemi

POLVEN TEKONIVELLEIKKAUKSET JA ROBOTTIAVUSTEINEN KIRURGIA

Syventävien opintojen kirjallinen työ

Kevätlukukausi 2025

Kaarina Syväniemi

POLVEN TEKONIVELLEIKKAUKSET JA ROBOTTIAVUSTEINEN KIRURGIA

Turun Yliopisto

Lääketieteellinen tiedekunta

Kevätlukukausi 2025

Vastuuhenkilö: Keijo Mäkelä

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

TURUN YLIOPISTO
Lääketieteellinen tiedekunta

SYVÄNIEMI, KAARINA: Polven tekonivelleikkaukset ja robottivusteinen kirurgia

Syventävien opintojen kirjallinen työ, 17 s.
Ortopedia ja traumatologia
Maaliskuu 2025

Polven kokotekonivelleikkaus (total knee arthroplasty, TKA) on todettu tehokkaaksi hoidoksi pitkälle edenneessä ja vaikeassa polven nivelrikossa. Tutkimuksissa on kuitenkin todettu noin 10 % potilaista olevan tyytymättömiä leikkaustulokseen. Parempia leikkaustuloksia pyritään saavuttamaan jatkuvasti kehittyvän teknologian avulla. Viime vuosikymmenen aikana on erityisesti noussut esiin robottivusteinen kirurgia. Tässä katsauksessa tarkastellaan tämänhetkistä kirjallisuutta polven tekonivelkirurgiassa käytettävästä robotiikasta kliinisten ja toiminnallisten tulosten sekä kustannusvaikuttavuuden osalta. Lisäksi aihetta pohditaan Suomen väestön ja terveydenhuollon näkökulmasta.

Katsauksessa käsitellään lyhyesti polven nivelrikkoa, polven tekonivelleikkauksen periaatteita sekä nykypäivänä käytettyjä leikkausrobotteja. Lisäksi vertaillaan tutkimuksissa todettuja kliinisiä ja kustannusvaikuttavuuden tuloksia perinteisen ja robottivusteisen kirurgian välillä. Tiedonhaussa on käytetty ortopedian oppikirjoja, Suomen Artroplastiayhdistyksen vuonna 2022 julkaisemaa Hyvä hoito lonkan ja polven tekonivelkirurgiassa -suositusta sekä lääketieteellisissä lehdissä julkaistuja tutkimuksia ja kirjallisuuskatsauksia. Tietokantana on käytetty PubMediä ja Web of Scienceä.

Useat tutkimukset ja meta-analyysit osoittavat leikkausrobottien mahdollistaman lisätarkkuuden proteesikomponenttien asemoinnissa. Tämän merkitystä ei ole kuitenkaan pystytty osoittamaan muissa kliinisissä tai toiminnallisissa tuloksissa. Kustannusvaikuttavuuden tutkimukset ja analyysit ovat tuloksiltaan kyseenalaistettavia. Osa tutkimuksista kuitenkin viittaa robotiikan mahdolliseen kustannustehokkuuteen, mikäli saavutetaan riittävä vuosittainen leikkausmäärä jokaista leikkausrobottia kohden. Uusien leikkausrobottien hankintaa Suomeen ei voida pitää perusteltuna. Jos robottien kustannustehokkuus on kuitenkin riippuvaista niiden käyttömääristä, olisi suositeltavaa tehostaa jo käytössä olevien robottien käyttöä.

Asiasanat: polven tekonivelleikkaus, robottivusteinen kirurgia

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO	1
2 POLVEN NIVELRIKKO	2
2.1 Polven anatomia	2
2.2 Nivelrikon patofysiologia ja riskitekijät	3
2.3 Konservatiivinen hoito	4
3 POLVEN TEKONIVELKIRURGIA	5
3.1 Indikaatiot ja vasta-aiheet	5
3.2 Polven tekonivelleikkauksen periaatteet.....	6
3.3 Komplikaatiot.....	7
3.4 Leikkaustulosten arviointi	7
4 LEIKKAUSROBOTIT ORTOPEDISESSÄ KIRURGIASSA	8
4.1 Polviprotetiikassa käytetyt robottiaivusteiset järjestelmät	9
4.2 MAKO-leikkausrobotti	9
4.3 Robotiikka Suomessa	10
5 ROBOTIIKKA POLVIPROTETIIKASSA	10
5.1 Kliiniset tulokset	10
5.1.1 Akselilinjaus ja liikelaajuus.....	10
5.1.2 Potilaiden raportoimat tulokset	11
5.1.3 Komplikaatiot.....	11
5.2 Kustannusvaikuttavuus	12
5.2.1 Kokonaiskustannukset	12
5.2.2 Toimenpiteen ja hoitojakson kesto	13
6 POHDINTA	14
LÄHTEET	15

1 JOHDANTO

Polven nivelrikko on yleinen ja merkittävä toimintakykyä heikentävä sairaus. Hoidon tavoite on kivun hallinta sekä toimintakyvyn parantaminen ja ylläpito, ja tavoitteet pyritään ensisijaisesti saavuttamaan konservatiivisesti. Kirurgisia toimenpiteitä harkitaan, kun konservatiiviset hoidot ovat todettu riittämättömiksi. (1) Vaikeassa polven nivelrikossa tekonivelleikkaus on vakiintunut hoitomuoto (2) ja se onkin yksi yleisimmistä ortopedisistä leikkaustoimenpiteistä. Suomessa tehtiin vuonna 2023 yli 14 700 polven tekonivelen ensileikkausta (3) ja määrän oletetaan kasvavan ikääntyvän väestön ja nivelrikon yleistymisen seurauksena.

Nykykirurgian tehokkuudesta huolimatta edelleen pyritään saavuttamaan parempia leikkaustuloksia jatkuvasti kehittyvän teknologian avulla. Viime vuosikymmenen aikana on erityisesti noussut esiin robottiväestöinen kirurgia. Robotiikan on esitetty vähentävän komplikaatioita, parantavan potilastyytyväisyyttä ja toiminnallisia tuloksia sekä pienentävän uusintaleikkaus- eli revisioriskiä. Tutkimusten tulokset ovat kuitenkin vaihtelevia eikä väitteille toistaiseksi ole vahvaa näyttöä. (2) Suomessa robotiikan hyödyntäminen tekonivelkirurgiassa on suhteellisen uutta ja ensimmäiset leikkausrobotit otettiin käyttöön vuonna 2021. (1)

Kliinisten tulosten lisäksi tutkimuksissa ollaan kiinnostuneita robotiikan kustannusvaikuttavuudesta. Teoretisoitu kustannustehokkuus perustuu hoitojaksojen lyhyempään keston, vähentyneeseen jatkokuntoutuksen tarpeeseen sekä tekonivelten parempaan kestävyys. (4) On kuitenkin huomioitava, että kustannustehokkuutta käsittelevät tutkimukset ovat pääasiallisesti metodologialtaan ongelmallisia retrospektiivisiä tutkimuksia tai perustuvat matemaattiseen mallintamiseen.

Tässä kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan tämänhetkistä kirjallisuutta polven tekonivelkirurgiassa käytettävästä robotiikasta kliinisten ja toiminnallisten tulosten sekä kustannusvaikuttavuuden osalta. Lisäksi aihetta pohditaan Suomen väestön ja terveydenhuollon näkökulmasta. Katsaus on rajattu käsittelemään polven kokotekonivelleikkauksia (total knee arthroplasty, TKA) nivelrikon hoitona.

2 POLVEN NIVELRIKKO

Nivelrikko eli artroosi on maailman yleisin nivelsairaus ja polvi puolestaan yleisin artroottinen nivel. Nivelrikon tyypilliset oireet ovat paikallinen kipu, turvotus, nivelen jäykkyys ja liikerajoitus sekä yleisen toimintakyvyn alentuminen. Diagnoosi perustuu potilaan oireisiin, kliiniseen tutkimukseen ja kuvantamislöydöksiin. Nivelrikko on palautumaton muutos, minkä vuoksi ennaltaehkäisy olisi taudin merkittävintä hoitoa. (1,5)

2.1 Polven anatomia

Polvinivelen muodostavat tibiofemoraali- ja patellofemoraalinivel. Tibiofemoraalinivel on polven kantava nivel, joka koostuu reisi- ja sääriluun lateraali- ja mediaalikondyyleistä. Nivelkapseli muodostaa nivelontelon ja yhdistää niveltyvät luut toisiinsa. Nivelkapselia vahvistavat patellajänne, sisempi ja ulompi sivuside sekä vino ja kaareva polvitaiveside. Nivelkapseli koostuu kahdesta kerroksesta. Polven keskiosissa nivelkapselin kerrokset erkanevat toisistaan. Nivelkapselikerrosten välissä ovat etu- ja takaristiside sekä patellanalainen rasvapatja. (6) Nivelkapselin sisempi kerros eli nivelkalvo tuottaa nivelnestettä, joka huolehtii nivelruston ravinteista ja vähentää nivelpintojen välistä kitkaa. Polven nivelpintoja peittää pääasiallisesti hyaliinirusto, joka suojaa alla olevaa subkondraaliluuta mekaaniselta rasitukselta. Lisäksi polvessa on syyrustosta koostuvat lateraalinen ja mediaalinen nivelkierukka, jotka tasaavat tibiofemoraalinivelen nivelpintoihin kohdistuvia voimia ja parantavat niiden yhteensopivuutta. (1)

Polvi on sarananivel, jossa tapahtuu pääasiassa ojennus- ja koukistusliikettä. Koukistuksen yhteydessä tapahtuu lisäksi pientä kiertoliikettä, jossa reisiluun mediaalikondyyli käyttäytyy lähes pallonivelen tavoin. Polven ollessa täysin ojennettuna sivusiteet ovat kireät ja kiertoliike estyy. Lisäksi täysin ojentunut polvi lukkiutuu reiden sisäkiertymisen vuoksi, mikä mahdollistaa lihasten rentoutumisen seisossa. Kun polvea koukistetaan sivusiteet löystyvät ja kiertoliike mahdollistuu. Etu- ja takaristisiteiden keskeinen kietoutuminen rajoittaa polvinivelen sisäkierron noin 10 asteeseen polven ollessa vähintään 90 asteen koukistuksessa. Ulkokiertoa rajoittaa pääasiassa sisempi ja ulompi sivuside. (6)

Alaraajan akselilinjaus on reisiluun pään keskipisteestä alkava ylemmän nilkkanivelen keskipisteeseen päättyvä kuvitteellinen linja. Neutraalissa linjauksessa tämä kulkee

polvinivelen keskeltä, varuslinjauksessa mediaalisesti ja valguksessa lateraalisesti. Tyypillisesti polven tibiaalinen nivelpinta on noin kolme astetta varuksessa ja femoraalinen nivelpinta valguksessa, minkä takia tibiofemoraalinen nivel on muutaman asteen kallistuksessa. (1) Lisäksi reisiluun distaaliosassa on kolme anatomista linjaa. Lateraalisen ja mediaalisen epikondyylin välissä on transepikondyylaarinen akseli (TEA), ja se on kohtisuorassa reisiluun etu-taka (AP) -akseliin. AP-akselia kutsutaan myös Whitesiden linjaksi. Kolmas linja on takakondyylien (PC) linja, joka on nivelpinnan tavoin kolmen asteen sisäkiertä. (7)

2.2 Nivelrikon patofysiologia ja riskitekijät

Nivelrikko on aktiivista ja dynaamista nivelen kudoksien epätasapainoa korjautumisen ja tuhoutumisen välillä. Rakenteellisia muutoksia tapahtuu koko nivelessä: hyaliinisessa nivelrustossa, subkondraalisessa luussa, nivelsiteissä, nivelkapselissa, nivelkalvossa ja niveltä ympäröivissä lihaksissa. (5)

Nykykäsityksen mukaan nivelrikko tyypillisesti alkaa poikkeavan ja raskaan mekaanisen kuormituksen laukaisemasta biokemiallisesta tapahtumasarjasta, joka lopulta johtaa nivelrikolle tyypilliseen nivelvaurioon. Tyypillisiä kuvantamisella todettavia rakenteellisia muutoksia ovat nivelruston rikkoutuminen ja lopulta sen häviäminen, mikä ilmenee röntgenkuvissa nivelraon kaventumisena. Lisäksi havaitaan subkondraalisen luun uudelleen muotoutumista sekä nivelen reunoille muodostuvia osteofyyttejä, jotka usein myös rajoittavat nivelen liikettä. Kyseisten muutosten eteneminen on yleensä hidasta ja tapahtuu vuosien kuluessa. Useimmiten muutokset ovat palautumattomia. (1) Nivelrikon radiologisen vaikeusasteen arviointiin käytetään Kellgrenin ja Lawrencen luokitusta. (8)

Nivelrikossa kipu on usein potilaalle kaikkein haittaavin oire. Kuvantamisella havaittuja nivelrikon rakenteellisia muutoksia todetaan enemmän kuin oireilevaa nivelrikkoa, ja näiden kahden välillä on havaittu vain kohtalainen yhteys. Kuvantamisen ja oireiden välinen yhteys on kuitenkin selkeämpi potilailla, joilla kipu on toistuvaa tai nivelrikko on rakenteellisesti pitkälle edennyt. Potilaan kokema kipu onkin erityisen merkityksellistä kliinisessä päätöksenteossa. Polven nivelrikossa kipu on tyypillisesti ajoittaista ja liittyy voimakkaasti mekaaniseen rasitukseen. Taudin edetessä kipu muuttuu voimakkaammaksi ja toistuvammaksi. Nivelrikkokivun syntymiseen liittyy useita mekanismeja, kuten kudostuhoon ja inflammaation

aiheuttama perifeerinen nosiseptiivinen kipu sekä neuropaattiset ja keskushermostolliset mekanismit. (5)

Nivelrikon tärkein riskitekijä on korkea ikä. Suomessa polven tekonivelleikkauksia tehtiin vuonna 2023 eniten 65-74 -vuotiaiden ikäryhmässä (3), jossa noin 11 % miehistä ja 18 % naisista sairastaa polven nivelrikkoa. Naissukupuoli on myös nivelrikon riskitekijä. (1) Suomessa valtaosa polvinivelen tekonivelleikkauksista tehdäänkin naisille, vaikka ero miehiin on huomattavasti kaventunut. (3) Muita varmoja riskitekijöitä ovat lihavuus, aiemmat nivelvammat sekä fyysisesti raskas työ. Perimän osuus nivelrikossa on arvioitu olevan 50-65 %:n luokkaa. Nivelrikon taustalla voi olla systeemisiä tai paikallisia riskitekijöitä. Sairauden määrittely primaariseen ja sekundaariseen nivelrikkoon perustuukin sen mahdolliseen etiologiaan. Nivelrikon primaarisessa tautimuodossa taustalla on systeeminen syy kuten ikääntyminen, perimä tai lihavuus. (1)

2.3 Konservatiivinen hoito

Nivelrikon hoidon ensisijaisina tavoitteina ovat kivun hallinta, toimintakyvyn parantaminen tai ylläpitäminen sekä taudin etenemisen estäminen. Konservatiivinen hoito koostuu pääasiassa kipulääkityksestä, riskitekijöiden hoidosta, fysioterapiasta sekä liikkumisen apuvälineistä. Nivelrikon lääkehoito keskittyy kipulääkitykseen sekä niveleen injektoitaviin glukokortikoidi- ja hyaluronaattivalmisteisiin. Kipulääkkeinä suositellaan ensisijaisesti parasetamolin ja tulehduslääkkeiden käyttöä. Tarvittaessa voidaan kokeilla myös heikkoja opioideja, kuten tramadolia tai kodeiinia. Pahanemisvaiheiden hoidossa voidaan tarvittaessa käyttää glukokortikoidipistoksia. Hyaluronaattivalmisteita käytetään tyypillisesti vain tilanteissa, joissa muiden lääkehoitojen käyttö on rajoitettua. Lääkkeettömiin hoitoihin kuuluvat itsehoidon ohjaus, terapeuttinen harjoittelu ja painonpudotus. Fysikaalisia hoitomenetelmiä ovat muun muassa kylmähoito, akupunktio, TENS-hoito sekä interferenssivirta.

Vaikeaoireinen ja pitkälle edennyt nivelrikko, jossa konservatiiviset hoidot eivät ole enää riittäviä, voidaan hoitaa tekonivelleikkauksella. Konservatiivisia hoitoja on kuitenkin suositeltavaa jatkaa myös kirurgisen hoidon jälkeen. (8)

3 POLVEN TEKONIVELKIRURGIA

Polven kokotekonivelleikkaus on todettu tehokkaaksi hoidoksi pitkälle edenneessä ja vaikeassa polven nivelrikossa. Tutkimuksissa on kuitenkin todettu noin 10 % potilaista olevan tyytymättömiä leikkaustulokseen. Vahvimmin tyytymättömyyttä toimenpiteeseen ennustaa nivelrikon lieväasteisuus. (9)

3.1 Indikaatiot ja vasta-aiheet

Kirjallisuudessa ei ole määritelty yksiselitteistä indikaatiota polven tekonivelleikkaukselle, vaan toimenpiteen aiheellisuus perustuu aina ortopedin tekemään yksilölliseen arvioon. (2) Suuntaa antavana leikkauskriteerinä voidaan kuitenkin pitää kipua, joka aiheuttaa merkittävän toiminnallisen haitan, kuten kävelymatkan lyheneminen tai häiritsee potilaan muuta normaalia päivittäistä elämää, esimerkiksi yöunia. (1) Konservatiiviseen hoitoon reagoimattomien vaikeiden oireiden tulisi jatkua vähintään 3-6 kuukautta ennen toimenpiteeseen ryhtymistä. Hankalien oireiden lisäksi potilaalla tulisi olla radiologisesti todetut selkeät nivelrikon muutoksen polven röntgen- tai magneettikuvassa. Voimakas kipu ilman nivelrikkoon sopivia selkeitä kuvantamislöydöksiä ei ole indikaatio tekonivelleikkaukselle.

Ehdottomia vasta-aiheita tekonivelkirurgialle on vähän. Näitä ovat kuitenkin aktiivinen bakteeri-infektio tai muu akuutti sairaus sekä alkoholismi ja aktiivinen suonensisäisten huumeiden käyttö. Lisäksi on huomioitava huonossa hoitotasapainossa olevat krooniset sairaudet, jotka ovat anestesia- ja infektoriski. Suhteellisista vasta-aiheista tärkein on potilaan puutteellinen yhteistoimintakyky esimerkiksi päihteiden väärinkäytön tai pitkälle edenneen neurologisen sairauden, esimerkiksi muistisairauden, seurauksena. Tämä voi johtaa ongelmiin toimenpiteen jälkeisessä kuntoutuksessa ja ohjeiden noudattamisessa. Leikkauksesta saavutettavien hyötyjen tulee olla riskejä suuremmat. Yleisesti komplikaatoriskiä kohottavia tekijöitä ovat muun muassa merkittävä ylipaino, diabetes, säärihaava ja muut ihorikot sekä sydän, maksa- ja munuaissairaudet. Hyvin sairaiden, sairaalloisen lihavien, liikkumattomien vuodepotilaiden ja kohonneessa komplikaatoriskissä olevien kohdalla leikkauksen tarvetta tulee perusteellisesti harkita. (2)

3.2 Polven tekonivelleikkauksen periaatteet

Proteesikomponenttien oikea asemointi luo edellytykset toimivalle polven tekonivelelle. Perinteisessä mekaanisessa linjauksessa tavoitellaan alaraajaan neutraalia akselilinjausta. Proteesikomponentit asemoidaan siten, että niiden nivelpinnat ovat kohtisuorassa neutraaliin akselilinjaukseen nähden. Femoraali- ja tibiaalikomponenttien rotaation tulee olla kohtisuorassa kunkin luun AP-akseliin nähden. Lisäksi tibiaalikomponentissa tulee olla lievä vertikaalinen takakallistus. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää kinemaattista linjausta, jossa proteesikomponenttien asemoinnissa tavoitellaan potilaan tibiofemoraalinivelen luonnollista kallistuskulmaa. (2) Kirurgin tekemät reisi- ja sääriluun sahaukset määrittävät tekonivelen asennon ja alaraajan tulevan akselilinjauksen.

Komponenttien asemoinnissa huomioidaan ympäröivien pehmytkudosten tasapaino. Hyvässä pehmytkudosten tasapainossa nivelrako on symmetrinen sekä polvi ojennettuna että 90 asteen koukistuksessa. Femurkomponentin rotaatio pitkälti määrittää koukistetun polven nivelraon symmetrisyyden sekä patellofemoraalinivelen toimivuuden. Asemoinnissa voidaan käyttää apuna reisiluun anatomisia maamerkkejä: TEA:ta, AP-akselia sekä PC-linjaa. Sahausten lisäksi tarvittaessa tehdään pehmytkudosvapautuksia tasapainon saavuttamiseksi. Pehmytkudosten epätasapaino voi johtaa toiminnallisesti huonoon tekoniveleeseen ja sen ennenaikaiseen kulumiseen. (7)

Polven tekonivelmallin valintaan vaikuttaa nivelrikon vaikeusaste, virheasento sekä mahdollinen epävakaus. Tyypillisesti proteesikomponenttien materiaalina käytetään kobolttikromia, minkä lisäksi niiden väliin asetetaan polyeteenimuovista koostuva liukupinta, joka voi olla joko liikkuva tai tibiakomponenttiin kiinnitetty. Polven tekonivel kiinnitetään luuhun useimmiten polymetyylimetakrylaatti-luusementillä, joka sisältää yleensä myös antibioottia postoperatiivisten infektioiden vähentämiseksi. (1) Suomessa yleisimmin käytetään takaristisiteen säästävää cruciate retaining (CR) -tekonivelmallia. Vaihtoehtoista posterior stabilized (PS) -mallin käyttöä harkitaa, jos takaristiside ei toimi kunnolla tai polven liikelaajuus on rajoittunut ennen leikkausta. Erona CR-malliin on, että PS-mallissa tehdään reisiluuhan ylimääräinen luuresektio ja takaristiside poistetaan. Lisäksi PS-mallin muoviosassa on tappi, joka korvaa poistetun takaristisiteen toimintaa. Tämä voi rajoittaa polven koukistuksen aikaista kiertoliikettä. Useissa tutkimuksissa CR-mallilla on todettu vähemmän komplikaatioita kuin

PS-mallilla. Kyseiset tulokset ovat kuitenkin olleet melko vähäisiä ja saattavat olla kliinisesti merkityksettömiä. Patella pinnoitetaan vain tarpeen mukaan. Stabiilivampia TC III- ja saranaproteeseja käytetään tilanteissa, joissa pehmytkudostasapainoa ei ole saavutettavissa, nivelsiteiden tuki puuttuu kokonaan tai luupuutokset ovat laajoja. Tyypillinen indikaatio stabiilivammille proteeseille on yli 20 asteen valgus-virheasento akselilinjauksessa. (2)

3.3 Komplikaatiot

Tekonivelleikkausten komplikaatiot jaetaan välittömiin ja myöhäisvaiheen komplikaatioihin. Mahdollisia välittömästi ilmeneviä komplikaatioita ovat muun muassa alaraajan syvä laskimotukos, keuhkoembolia, leikkausalueen verenvuoto sekä akuutti tekonivelinfektio. Akuutti syvä tekonivelinfektio on yleisin uusintaleikkauksen eli revision syy polviprotetiikassa. Hermovauriot ovat melko harvinaisia komplikaatioita polviprotetiikassa. Myöhäisvaiheen komplikaatioita ovat esimerkiksi tekonivelen hematogeeninen infektoituminen tai krooninen proteesi-infektio, proteesikomponenttien irtoaminen, kuluminen tai rikkoutuminen, sekä polven tai polvilumpion instabiliteetti. Myöhäisvaiheen komplikaatiot hoidetaan tyypillisesti revisiolla. (1) Revisiota harkitaan myös leikatun polven oireillessa, esimerkiksi tekonivelen virheasunnoissa, pehmytkudosongelmissa tai nivelen artrofibroosissa. (2)

3.4 Leikkaustulosten arviointi

Historiallisesti tekonivelleikkaustulosten arviointi on perustunut objektiivisesti arvioitaviin tuloksiin, kuten tekonivelen kestävyys ja komplikaatioiden ilmaantuvuuteen. Viime vuosina leikkaustulosten arvioinnissa on kuitenkin painotettu potilastyytyväisyyttä. Sen arvioimiseksi on luotu useita potilaiden täytettäväksi tarkoitettuja kyselykaavakkeita (patient reported outcome measures, PROMs), jotka sisältävät vaihtelevasti kysymyksiä hyvinvoinnin eri osa-alueilta. Yleisen fyysisen ja psyykkisen terveydentilan kartoittamisen lisäksi potilailta kysytään yleensä kivun voimakkuutta, toimintakyvyn ja aktiivisuuden tasoa sekä tyytyväisyyttä leikkaustulokseen. Yleisimmät polven oireisiin kohdistetut kaavakkeet ovat vuoden 1989 Knee Society Score (KSS), Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC) ja Oxford Knee Score (OKS). Lisäksi käytetään myös yleispätevämpiä kyselyitä, joita ovat Short Form-36 (SF-36) ja Hospital for Special Surgeries Score (HSS). (10)

Yksi käytetyimmistä kyselykaavakkeista kansainvälisesti on KSS, joka koostuu kahdesta osuudesta. Ensimmäisessä osuudessa arvioidaan polvinivelen liikelaajuutta ja stabiliteettia

sekä potilaan kokemaa kipua. Toisessa osuudessa arvioidaan potilaan kävelymatkaa ja porraskävelyä. Molemmista osuuksista voi saada 0-100 pistettä. Kliinisesti merkittäviksi muutoksiksi on määritelty vähintään 9 pistettä ensimmäisestä osuudesta ja vähintään 10 pistettä toisesta osuudesta. Uudistettu KSS julkaistiin vuonna 2011. Tähän sisällytettiin muun muassa osuudet potilaan odotuksista ja yksilöllisestä toimintakyvystä. Toistaiseksi vanhempi KSS on enemmässä käytössä. WOMAC:ssä enimmäispistemäärä on 96 pistettä ja kliinisesti merkitsevä muutos on 10 pistettä. (11) Enimmäispistemäärä OKS:ssä on 48 pistettä ja HSS:ssä 100 pistettä. OKS on käytetyin polvi-PROM Suomessa ja laajalti muuallakin. Kaikissa edellä mainituissa kyselyissä korkeampi pistemäärä tarkoittaa parempaa tulosta.

Proteesikomponenttien asentoa arvioidaan tarkastelemalla leikkauksen jälkeistä alaraajan akselilinjausta. Mekaanisessa linjauksessa on hyväksyttävää poiketa enintään ± 5 astetta neutraalista akselilinjauksesta. Hyvänä asentona pidetään enintään ± 3 asteen poikkeamaa. Leikkauksella tavoitellulle liikelaajuudelle ei ole määritelty selviä rajoja. Tarkemmat tavoitteet määrittyvät pitkälti potilaan tarpeiden mukaan. Porraskävelyssä polvinivelen tulisi koukistua vähintään 90 astetta, istuessa 95 astetta ja polvi-istunnassa yli 120 astetta. (2)

Tekonivelkirurgian kustannukset koostuvat useista eri osatekijöistä. Toimenpiteen hintaan suorasti vaikuttavat käytetty tekonivelmalli ja sen kiinnitysmenetelmä, kirurgin tekninen osaaminen ja oppimiskäyrä sekä muut leikkaustekniset seikat, kuten mahdollinen navigaatio ja leikkausta edeltävä kuvantaminen. Toimenpiteen jälkeisiin kustannuksiin vaikuttavat mahdolliset välittömät ja myöhäisvaiheen komplikaatiot, hoitojakson kesto ja sisältö sekä jatkokuntoutuksen toteutus. Terveys- ja sairaanhoidon vaikuttavuuden ja kustannusten arvioimisessa voidaan käyttää mittarina laatu-painotettua elinvuotta (Quality-Adjusted Life Year, QALY). QALY:ssa yhdistetään yhdeksi luvuksi jäljellä oleva elinaika sekä elämänlaatu. Kustannustehokkuuden rajaksi on yleisesti asetettu 50 000 dollaria yhtä QALY:a kohden. (12)

4 LEIKKAUSROBOTIT ORTOPEDISESSÄ KIRURGIASSA

Perinteisen polven tekonivelleikkauksen ohelle kehitetään jatkuvasti uutta teknologiaa leikkaustulosten parantamiseksi. Tänä päivänä tekonivelkirurgiassa käytetään muun muassa potilaskohtaista instrumentaatiota, paineantureita, kuvatonta ja kuvapohjaista navigointia sekä leikkausrobotteja. (2)

4.1 Polviprotetiikassa käytetyt robottiaivusteiset järjestelmät

Leikkausrobotit jaetaan autonomisiin, puoliautonomisiin ja passiivisiin järjestelmiin. Jako perustuu robotin osuudesta luun työstämisessä. Nykyiset leikkausrobotit vaativat polvinivelen virtuaalisen kolmiulotteisen (3D) mallinnuksen. Tämä toteutetaan joko ennen leikkausta tietokone-tomografia (TT) -kuvantamisella tai leikkauksen aikana luun morfologian rekisteröinnillä.

Passiiviset järjestelmät ovat verrattavissa tietokoneavusteiseen navigointiin. Passiivinen leikkausrobotti on täysin kirurgin hallittavissa eikä aktiivisesti osallistu luun työstämiseen. Navigoinnin lisäksi passiiviset leikkausrobotit auttavat leikkaussuunnitelman luomisessa sekä toimenpidevälineiden ohjauksessa. Autonomisissa järjestelmissä kirurgi luo leikkaussuunnitelman ja toteuttaa leikkauksen ensivaiheet, minkä jälkeen leikkausrobotti suorittaa leikkauksen itsenäisesti loppuun ennalta luodun suunnitelman mukaisesti. Autonomisia leikkausrobotteja ovat muun muassa ROBODOC ja CASPAR. Puoliautonomisissa järjestelmissä kirurgi luo leikkaussuunnitelman ja toteuttaa leikkauksen kokonaisuudessaan. Puoliautonominen leikkausrobotti tarvittaessa rajoittaa kirurgin luun työstämistä luodun suunnitelman mukaisesti. Puoliautonomisia leikkausrobotteja ovat muun muassa Navio, MAKO, ROSA ja OMNIBOT. Kolme viimeisimpänä mainittua ovat kuvapohjaisia leikkausrobotteja. (13)

4.2 MAKO-leikkausrobotti

MAKO-leikkausrobotin käyttö alkaa leikkaussuunnitelman luomisella, jossa apuna käytetään TT-kuvantamisen pohjalta muodostettua 3D-mallinnusta. MAKO:n avulla voidaan varmistaa tekonivelen nivelkulman ja -korkeuden sekä rotaation mahdollisimman tarkka rekonstruktio. (14) MAKO on suljettu järjestelmä eli sen kanssa voidaan käyttää vain tietyn valmistajan eli Strykerin tekoniveliä (15).

MAKO:lla toteutetut toimenpiteet ovat pääpiirteittäin perinteistä leikkaustekniikkaa vastaavat muutamaa työvaihetta lukuun ottamatta. Avausviillon jälkeen tehdään polven rekisteröinti eli sovitetaan polven rakenne yhteen aiemmin muodostetun 3D-mallinnoksen kanssa. Rekisteröinti toteutetaan kiinnittämällä paikannintapit sääri- ja reisiluuhun, minkä jälkeen paikantimet kalibroidaan rakenteellisten maamerkkien avulla. Tämä mahdollistaa polvinivelen asennon ja liikkeiden ajantasaisen mallintamisen. Kirurgi pystyy tällöin tarkistamaan nivelen

linjausta ja pehmytkudosten tasapainoa sekä tarvittaessa muuttamaan leikkaussuunnitelmaa. Kun leikkaussuunnitelma on vahvistettu, kirurgi voi aloittaa luisten rakenteiden työstämisen MAKO:n robottikäden avulla. MAKO on puoliautonominen järjestelmä eli kirurgi voi työstää luuta leikkausrobotin määrittämissä turvarajoissa pehmytkudoksia suojaten. (14)

MAKO-leikkausrobotin hankintakustannukset ovat noin 1,5 miljoonaa dollaria, jotka sisältävät varsinaisen robotin ja sen käyttöjärjestelmän. Lisäksi leikkausrobotin kustannuksiin kuuluu 160 000 dollarin vuosittaiset huoltomaksut. MAKO:n käyttöikäksi on arvioitu 10 vuotta. (16)

4.3 Robottiikka Suomessa

Suomessa polven tekonivelleikkauksissa on käytössä viisi Strykerin MAKO-leikkausrobotia. Ensimmäiset robotit hankittiin vuonna 2021 Oulun yliopistolliseen sairaalaan vuonna, minkä jälkeen robotteja on hankittu myös Poriin, Mikkeliin sekä Kuopioon.

Suomessa on ollut valtakunnallinen tekonivelrekisteri vuodesta 1980 lähtien. Rekisteriin kerätään tiedot kaikista tekonivelten ensi- ja uusintaleikkauksista sekä niissä käytetyistä tekonivelmalleista. Myös leikkausrobotin käytöstä ilmoitetaan rekisteriin. Vuonna 2023 ilmoituskattavuus polven ensileikkausten osalta oli 96,6 % ja uusintaleikkausten 83,1 %. (3) Huhtikuun 2021 ja toukokuun 2023 välisenä aikana Suomessa suoritettiin MAKO:lla ainakin 1 224 polven tekonivelleikkausta. (Alakylä K. ym., Käsikirjoitus, 2025)

5 ROBOTIIKKA POLVIPROTETIIKASSA

5.1 Kliiniset tulokset

Robottivasteisten polven tekonivelleikkausten (robotic-assisted TKA, rTKA) on havaittu lisäävän tarkkuutta proteesikomponenttien asemoinnissa sekä parantavan alaraajan linjausta perinteiseen polven tekonivelleikkaukseen (manual TKA, mTKA) verrattuna. Saavutetun tarkkuuden vaikutusta kliinisiin tuloksiin ei ole osoitettu.

5.1.1 Akselilinjaus ja liikelaajuus

Ruangsomboon ym. (17) ja Riantho ym. (18) käsittelivät molemmissa meta-analyyseissä 12 satunnaistetun kontrolloidun tutkimuksen (RCT) avulla rTKA:n ja mTKA:n kliinisiä tuloksia. Meta-analyysit yhdessä sisälsivät 17 eri tutkimusta sisällyttäen 2869 rTKA-potilasta. Lisäksi

Kort ym. (19) tarkastelivat kirjallisuuskatsauksessaan seitsemän muun meta-analyysin tuloksia, jotka sisälsivät yhteensä 21 eri tutkimusta. Akselilinjauksessa saavutettiin rTKA:lla 0.77-0.94 astetta pienempi hajonta sekä 57-64 % matalampi riski yli 3 asteen poikkeamalle neutraalista mekaanisesta akselistä. (17–19) Tekonivelen femur- sekä tibiakomponenttien koronaali- ja sagittaaliasemoinnin hajonnassa ei havaittu merkittävää eroa. Kaikissa mittauskulmissa oli merkittävästi vähemmän yli 3 astetta poikkeavia tuloksia rTKA:ssa kuin mTKA:ssa. (18) Liikelaajuus oli rTKA:ssa keskiarvolta 0.73 astetta pienempi kuin mTKA:ssa, mikä ei ollut merkitsevää. (17) Vermue ym. (20) ryhmittelivät tutkimukset meta-analyysissään ja raportoivat tulokset käytetyn leikkausrobotin mukaan. Meta-analyysissä käsiteltiin yhteensä 56 tutkimusta, sisältäen useita RCT:ta, vertailututkimuksia sekä kohorttitutkimuksia. Eniten tutkittu ja käytetty oli Strykerin MAKO-leikkausrobotti. MAKO:lla todettiin mTKA:a parempi leikkaustarkkuus. Meta-analyysissä ei vertailtu leikkausrobottien tuloksia keskenään. (20)

5.1.2 Potilaiden raportoimat tulokset

Potilaiden raportoimissa tuloksissa ei ole todettu merkittävää eroa rTKA:n ja mTKA:n välillä. Ruangsomboonin meta-analyysissä rTKA:ssa WOMAC oli keskiarvolta 0.35 pistettä matalampi, KSS oli 0.89 pistettä korkeampi ja HSS oli 0.67 pistettä korkeampi kuin mTKA:ssa. (17) Muissakin meta-analyyseissa on todettu vastaavia tuloksia WOMAC- ja HSS-pisteytyksissä. (19)

5.1.3 Komplikaatiot

Ruangsomboonin meta-analyysissä raportoitiin rTKA:ssa komplikaatioita 3.8 %:ssa tapauksia ja mTKA:ssa 3.7 %:ssa (17). Muissa meta-analyyseissä ei ole todettu merkitsevää eroa leikkaustekniikoiden välisessä komplikaatoriskissä (18,19). Myöskään MAKO-systeemillä ei ole todettu eroa komplikaatioiden ilmaantumisessa verrattuna perinteiseen leikkaustekniikkaan (20).

Vielä julkaisemattomassa Suomen tekonivelrekisteriin perustuvassa retrospektiivisessä tutkimuksessa selvitettiin aikaisen revision todennäköisyyttä rTKA:ssa ja mTKA:ssa. Kahden vuoden seurannan jälkeen revisioriski oli rTKA:ssa 2,1 % ja mTKA:ssa 2,8 %. (Alakylä K. ym., Käsikirjoitus, 2025) Revisioriskissä ei ole todettu eroa rTKA:n ja mTKA:n välillä pitkän eli yli 10 vuoden seurannan tutkimuksissa (17). Pitkän seurannan tuloksia on kuitenkin toistaiseksi tehty vain ROBODOC-systeemillä (20).

5.2 Kustannusvaikuttavuus

Leikkausrobottien kustannustehokkuutta puoltavat useat retrospektiiviset tutkimukset ja matemaattiset kustannusanalyysit. Suurimmassa osassa tutkimuksista jätettiin kuitenkin leikkausrobottien hankintakustannukset huomioimatta. Matemaattisten analyysien perusteella kustannustehokkuus voidaan saavuttaa leikkausmäärien ylittäessä tietyn vuosittaisen raja-arvon. (16,21)

5.2.1 Kokonaiskustannukset

Sarrel ym. (21) käsittelivät systemaattisessa katsauksessaan kahdeksaa retrospektiivista tutkimusta, kahta Markov-malli-analyysia sekä yhtä kustannuslaskennan tutkimusta, joissa kaikissa tutkittiin TT-kuvantamis pohjaisen rTKA:n kustannustehokkuutta verrattuna mTKA:an. Kuudessa retrospektiivisessä tutkimuksessa todettiin rTKA:ssa pienemmät sairaalakustannukset. Tutkimuksesta riippuen kustannukset olivat 640-2722 dollaria tai 4-11 % pienemmät kuin mTKA:ssa. Samoissa tutkimuksissa havaittiin rTKA:n kustannustehokkuuden lisääntyvän seurannan kestäessä vähintään 90 päivää. Grosso ym. (2022) raportoivat tutkimuksessaan vain 90 päivän seurannan kustannukset, jotka olivat rTKA:a puoltavat. Ainoastaan Tompkins ym. (2022) raportoivat rTKA:lle 4676 dollaria eli 29 % suuremmat sairaalakustannukset mTKA:an verrattuna. Kaksi edellä mainittua olivat ainoat retrospektiivisistä tutkimuksista, jotka sisällyttivät kustannuslaskelmiin leikkausrobotin hankintakustannukset. Lisäksi vain Gregory ym. (2022) tutkimuksessa sisällytettiin TT-kuvantamisen kustannukset. (21) Australialaisessa retrospektiivisessä kohorttitutkimuksessa vertailtiin tietokoneavusteisen polven tekonivelleikkauksen (computer-assisted TKA, cTKA) ja MAKO-systeemillä toteutettuja rTKA:n kustannuksia keskenään. Tutkimuksessa huomioitiin leikkausrobotin ja tietokoneavusteisen navigaation hankintakustannukset sekä molempien vuosittaiset huoltomaksut. Kokonaiskustannukset rTKA:ssa, 1848 dollaria eli 9.4 %, olivat merkitsevästi suuremmat kuin cTKA:ssa. Tutkimuksessa arvioitiin kustannusten tasautuvan, jos yksikössä tehtäisiin vuosittain vähintään 238 robottiaavusteista polven tekonivelleikkausta. Ilman edellä mainittuja pääomakustannuksia rTKA:n ja cTKA:n kokonaiskustannuksissa ei kuitenkaan ollut merkitsevää eroa. (16)

Kustannusvaikuttavuutta tutkivissa analyyseissä sovellettiin eri tavoin todennäköisyysmatemaattista Markovin mallia. Rajan ym. (22) kehittivät mallin, joka kuvansi

potilaiden terveydentilaa tiettyinä ajankohtana. Jokaiselle terveydentilalle oli määritelty arvo sekä elämänlaadulle että kustannuksille. Mallissa potilaan terveydentilan vaihtui ennalta määritettyjen todennäköisyyksien perusteella. Malliin syötetyt muuttujat olivat leikkaustekniikoiden välillä toisiaan vastaavat, mutta mTKA:ssa leikkauksen epäonnistuminen todennäköisyys oli 0,78 % tai 1,5 % kun taas vastaavat arvot rTKA:ssa olivat 0,3 % ja 0,6 %. Artikkelissa raportoitiin rTKA:lla saavutettavan 0,26 QALY:a enemmän kuin mTKA:lla. mTKA:ssa yksittäisen toimenpiteen kokonaiskustannukset olivat 25 113 dollaria. Kokonaiskustannuksia arvioitiin rTKA:ssa vuosittaisten leikkausmäärien mukaan; pienessä (10 kpl) leikkausmäärässä kustannukset olivat 92 823 dollaria, keskiarvossa (100 kpl) 29 261 dollaria ja suuressa (200 kpl) 25 730 dollaria. Kustannusvaikuttavuus oli pienessä leikkausmäärässä 256 055 dollaria/QALY, keskiarvossa 15 685 dollaria/QALY ja suuressa 2 331 dollaria/QALY. Keskiarvo ja suuri leikkausmäärä alittivat ennalta määritetyn kustannustehokkuuden rajan. (22) Hua ym. (23) kehittivät vastaavanlaisen Markovin mallin. Muuttujat olivat tässäkin toisiaan vastaavat, mutta vuosittainen revisioriski mTKA:ssa oli 0,49 % ja rTKA:ssa 0,28 %. 10 000 simulaation jälkeen rTKA:lla saatiin 0,01 korkeampi QALY kuin mTKA:lla. rTKA:n kustannukset olivat 32 535 dollaria ja mTKA:n 31 917 dollaria. Kustannusvaikuttavuudeksi laskettiin 41 331 dollaria/QALY. (23) Artikkeleissa arvioitiin, että vuosittaisen rTKA:n leikkausmäärän on oltava yli 42-49, jotta päästään alle 50 000 dollarin kustannuksiin yhtä saavutettua QALY:a kohden. (22,23)

5.2.2 Toimenpiteen ja hoitojakson kesto

Sarrelin katsauksen yhdeksässä tutkimuksessa todettiin rTKA:ssa lyhyemmät hoitojaksot mTKA:an verrattuna. Hoitojaksot kestivät tutkimuksissa rTKA:ssa 0,1-0,9 päivää vähemmän kuin mTKA:ssa. Lisäksi kuudessa tutkimuksessa raportoitiin, että perinteisellä leikkaustekniikalla leikatut potilaat siirtyivät huomattavasti useammin terveydenhuollon yksikköön jatkokuntoutukseen. (21)

Kliinisiä tuloksia käsittelevissä meta-analyyseissä rTKA:n leikkausaika oli 17–33 minuuttia pidempi kuin mTKA:ssa. (17–19) Myös cTKA:an verrattuna robottivälineiset leikkaukset olivat noin 30 minuuttia pidempiä. (16) Vermuen meta-analyysissä MAKO-systeemillä ei havaita varsinaisessa leikkausajassa merkittävää eroa perinteiseen leikkaustekniikkaan. Systemin asentamiseen käytettävä lisäaika oli kuitenkin noin 9 minuuttia. (20)

6 POHDINTA

Robotiikan roolista polviprotetiikassa ei voi tehdä lopullisia johtopäätöksiä. Vaikka useissa tutkimuksissa ja meta-analyyseissä on osoitettu leikkausrobottien mahdollistama lisätarkkuus, niin tämän merkitystä ei ole pystytty osoittamaan muissa kliinisissä tai toiminnallisissa tuloksissa. Lisäksi vastaavanlaista tarkkuutta on myös saavutettu muun muassa tietokoneavusteisilla leikkauksilla (13). Nykyisten tutkimustulosten ohella on myös huomioitava, että robottiaivusteiset järjestelmät ja niiden ominaisuudet ovat erilaisia keskenään. Tutkimuksissa tulisikin robotiikan sijaan puhua aina kyseisestä leikkausrobotista ja ohjelmistosta.

Robotiikan kustannustehokkuutta vahvistavia tutkimuksia ja analyysyjä on lukuisia. Tutkimukset ovat kuitenkin pääasiassa retrospektiivisiä eivätkä huomioi leikkausrobotteihin liittyviä hankintakustannuksia. Puolestaan mallintamiseen perustuvissa analyyseissä käytetyt parametrit ovat muun muassa sisältäneet oletuksen robotiikan pienemmästä vuosittaisesta revisioriskistä, jota meta-analyyseissä ei ole kuitenkaan osoitettu. Osa tutkimuksista viittaa robotiikan mahdolliseen kustannustehokkuuteen, mikäli saavutetaan riittävä vuosittainen leikkausmäärä jokaista leikkausrobottia kohden. On huomioitava, että robotiikan kustannustehokkuutta puoltavat tutkimukset ja analyysit ovat tutkimusmetodeiltaan ja tuloksiltaan kyseenalaistettavia. Tulevaisuudessa on kuitenkin suunnitteilla robotiikan sekä kliinisiä tuloksia että kustannusvaikuttavuutta tutkivia prospektiivisiä RCT:itä (24).

Kun huomioidaan robotiikan riittämätön näyttö polviprotetiikassa sekä Suomen terveydenhuollon tiukka taloudellinen tilanne, niin uusien leikkausrobottien hankintaa ei voida pitää perusteltuna. Jos robottien kustannustehokkuus on kuitenkin riippuvaista niiden käyttömääristä, olisi suositeltavaa tehostaa jo käytössä olevien robottien käyttöä.

LÄHTEET

1. Arokoski J, Kiviranta I. Ortopedia. 2. uudistettu painos. Toimittajat: Helenius I, Laitinen M, Sirola J. Helsinki: Kandidaattikustannus; 2022.
2. Remes V, Eskelinen A. Hyvä hoito lonkan ja polven tekonivelkirurgiassa 2022. Toimittajat: Remes V, Eskelinen A. Helsinki: Suomen Artroplastiahydistys; 2022.
3. Terveysten ja hyvinvoinnin laitos (THL). Tekonivelleikkaukset 2023. Tilastoraportti 44/2024. Suomen virallinen tilasto (SVT).
4. Robottiaivusteinen tekonivelkirurgia [Internet]. (viitattu: 5.5.2024). Saatavilla internetissä: <https://www.duodecimlehti.fi/duo16861>
5. Hunter DJ, Bierma-Zeinstra S. Osteoarthritis. Vol. 393, The Lancet. Lancet Publishing Group; 2019. s. 1745–59.
6. Agur AMR. Moore's essential clinical anatomy. 7. painos. Toimittaja: Dalley AF. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2024.
7. Sheth NP, Husain A, Nelson CL. Surgical Techniques for Total Knee Arthroplasty: Measured Resection, Gap Balancing, and Hybrid. Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons. 2017;25(7):499–508.
8. Polvi- ja lonkkanivelrikko. Käypä hoito -suositus. Suomalaisen Lääkäriseuran Duodecimin ja Suomen Ortopediyhdistys ry:n asettama työryhmä. Helsinki: Suomalainen Lääkäriseura Duodecim, 2018 (viitattu: 21.10.2024). Saatavilla internetissä: www.kaypahoito.fi. 2018.
9. DeFrance MJ, Scuderi GR. Are 20% of Patients Actually Dissatisfied Following Total Knee Arthroplasty? A Systematic Review of the Literature. J Arthroplasty. 2023;38(3):594–9.
10. Theodoulou A, Bramwell D, Spiteri A, Kim SW, Krishnan J. The Use of Scoring Systems in Knee Arthroplasty: A Systematic Review of the Literature. J Arthroplasty. 2016;31(10):2364-2370.e8.
11. Miralles-Muñoz FA, Gonzalez-Parreño S, Martinez-Mendez D, Gonzalez-Navarro B, Ruiz-Lozano M, Lizaur-Utrilla A, et al. A validated outcome categorization of the knee society score for total knee arthroplasty. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2022;30(4):1266–72.
12. Lehto M, Eskelinen A, Malmivaara A, Jämsen E. Mistä tekonivelkirurgian kustannusvaikuttavuus riippuu? Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim. 2017;(16):1461–7.

13. Batailler C, Swan J, Sappey Marinier E, Servien E, Lustig S. New Technologies in Knee Arthroplasty: Current Concepts. *J Clin Med*. 2020;10(1):47.
14. Roche M. The MAKO robotic-arm knee arthroplasty system. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2021;141(12):2043–7.
15. Siddiqi A, Horan T, Molloy RM, Bloomfield MR, Patel PD, Piuizzi NS. A clinical review of robotic navigation in total knee arthroplasty: historical systems to modern design. *EFORT Open Rev*. 2021;6(4):252–69.
16. Steffens D, Karunaratne S, McBride K, Gupta S, Horsley M, Fritsch B. Implementation of robotic-assisted total knee arthroplasty in the public health system: a comparative cost analysis. *Int Orthop*. 2022;46(3):481–8.
17. Ruangsomboon P, Ruangsomboon O, Pornrattanamaneewong C, Narkbunnam R, Chareancholvanich K. Clinical and radiological outcomes of robotic-assisted versus conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Acta Orthop*. 2023;94:60–79. Saatavilla: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36805771/>
18. Riantho A, Butarbutar JCP, Fidiario K, Elson E, Irvan I, Haryono H, et al. Radiographic Outcomes of Robot-Assisted Versus Conventional Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Clinical Trials. *JB JS Open Access*. 2023;8(2).
19. Kort N, Stirling P, Pilot P, Müller JH. Robot-assisted knee arthroplasty improves component positioning and alignment, but results are inconclusive on whether it improves clinical scores or reduces complications and revisions: a systematic overview of meta-analyses. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2022;30(8):2639–53.
20. Vermue H, Batailler C, Monk P, Haddad F, Luyckx T, Lustig S. The evolution of robotic systems for total knee arthroplasty, each system must be assessed for its own value: a systematic review of clinical evidence and meta-analysis. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2023;143(6):3369–81.
21. Sarrel K, Hameed D, Dubin J, Mont MA, Jacofsky DJ, Coppolecchia AB. Understanding economic analysis and cost-effectiveness of CT scan-guided, 3-dimensional, robotic-arm assisted lower extremity arthroplasty: a systematic review. *J Comp Eff Res*. 2024;13(4):e230040.
22. Rajan P V., Khlopas A, Klika A, Molloy R, Krebs V, Piuizzi NS. The Cost-Effectiveness of Robotic-Assisted Versus Manual Total Knee Arthroplasty: A Markov Model-Based Evaluation. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2022;30(4):168–76.

23. Hua Y, Salcedo J. Cost-effectiveness analysis of robotic-arm assisted total knee arthroplasty. *PLoS One*. 2022;17(11):e0277980–e0277980.
24. Khatri C, Metcalfe A, Wall P, Underwood M, Haddad FS, Davis ET. Robotic trials in arthroplasty surgery. *Bone Joint J*. 2024;106(2):114–20.