



Vili Häkämies

Polvivammojen estäminen puettavalla laitteella

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

Insinöörityö

15.5.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Vili Håkämies
Otsikko: Polvivammojen estäminen puettavalla laitteella
Sivumäärä: 43 sivua + 2 liitettä
Aika: 15.5.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Tieto- ja viestintätekniikka
Ammatillinen pääaine: Hyvinvointi- ja terveysteknologia
Ohjaaja: Yliopettaja Mikael Soini

Tämän insinööriyön tavoitteena on selvittää, miten puettavaa teknologiaa ja koneoppimista voidaan hyödyntää polvivammojen ehkäisyssä urheilussa. Työ toteutettiin narratiivisena kirjallisuuskatsauksena, jossa analysoitiin 13 vertaisarvioitua tutkimusta aiheesta.

Tuloksissa tarkasteltiin, miten puettavat sensorit ja tekoäly voivat mitata riskitekijöitä, antaa reaaliaikaista palautetta ja ennustaa vammoja harjoittelun aikana. Lisäksi arviointiin teknologian haasteita, kuten mittausten tarkkuus, tietoturva ja käytettävyyden haasteet kenttäolosuhteissa.

Työ osoittaa, että puettavat laitteet tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia urheiluvammojen ennaltaehkäisyssä, mutta niiden tehokas hyödyntäminen vaatii jatkuvaa tutkimusta ja kehitystä erityisesti käyttäjäystävällisyyden ja datan luotettavuuden parantamiseksi.

Avainsanat: puettava teknologia, polvivammat, eturistiside, koneoppiminen, urheiluvammojen ehkäisy

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Vili Håkämies
Title: Preventing Knee Injuries with Wearable Devices
Number of Pages: 43 pages + 2 appendices
Date: 15 May 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Information and Communication Technology
Professional Major: Health Technology
Supervisor: Mikael Soini, Principal Lecturer

The aim of this thesis is to investigate how wearable technology and machine learning can be utilized to prevent knee injuries, particularly anterior cruciate ligament (ACL) injuries, in sports. The study was conducted as a narrative literature review analysing 13 peer-reviewed studies.

The results examine how wearable sensors, and artificial intelligence can measure risk factors, provide real-time feedback, and predict injuries during training. Challenges related to accuracy, data security, and usability in real-world conditions were also assessed.

The thesis highlights that wearable devices offer significant potential in injury prevention, but their effective implementation requires ongoing research and development, especially to improve user-friendliness and data reliability.

Keywords: wearable technology, knee injuries, anterior cruciate ligament, machine learning, injury prevention

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Polvivammojen esiintyvyys, riskitekijät ja vaikutukset	2
2.1	Polven anatomia	2
2.2	Polvivammat	3
2.3	Polvivammojen yleisyys urheilussa	4
2.4	Polvivammoille altistavat riskitekijät	7
2.5	Urheiluvammojen taloudelliset vaikutukset	8
2.6	Urheiluvammojen vaikutukset mielenterveyteen	9
3	Puettava teknologia urheilussa ja sen rooli polvivammojen ehkäisyssä	10
3.1	Puettavat laitteet urheilussa	10
3.2	Puettavat teknologiat ja tuotteet polvivammojen ennaltaehkäisyssä	11
3.3	Tekoäly ja koneoppiminen puettavassa teknologiassa	12
4	Kirjallisuuskatsaus	13
4.1	Narratiivinen kirjallisuuskatsaus	14
4.2	Tutkimuskysymykset ja tavoitteet	15
4.3	Tiedonhaku	15
4.4	Tutkimusmateriaalin valinta	17
4.5	Tutkimusmateriaalin analysointi	19
5	Tulosten analysointi	19
5.1	Riskien mittaaminen	20
5.2	Ennaltaehkäisevä toiminta	23
5.3	Vammojen ennustaminen koneoppimisella	26
5.4	Puettavan teknologian haasteet ja rajoitukset polvivammojen ehkäisyssä	27
6	Pohdinta	30
6.1	Puettavien laitteiden käyttö urheilussa tapahtuvien vammojen ehkäisyssä	30

6.2	Tulevaisuuden näkymät ja kehityssuunnat	31
6.3	Kirjallisuuskatsauksen luotettavuus ja laatu	32
6.4	Jatkotutkimusehdotukset	32
7	Yhteenveto	33
	Lähteet	35
	Liitteet:	
	Liite 1: Kirjallisuuskatsauksen haun tulokset	
	Liite 2: Tulokset	

Lyhenteet

- ACL: *Anterior cruciate ligament*. Eturistiside on toinen polvinivelen nivelpussin ristisiteistä.
- IMU: *Inertial Measurement Unit*. Anturiyksikkö, joka mittaa liikettä ja asentoa kiihtyvyyssanturin, gyroskoopin ja magnetometrin avulla.
- ML: *Machine Learning*. Tekoälyn osa-alue, jossa koneet oppivat ja parantavat suorituskyykyään automaattisesti datan avulla ilman erillistä ohjelmointia.
- EMG: Elektromyografia. Lihasten sähköisen aktiivisuuden mittaustekniikka.
- HRV: *Heart Rate Variability*. Sykevälivaihtelu.
- SVM: *Support Vector Machine*. Koneoppimismenetelmä.
- RF: *Random Forest*. Koneoppimismenetelmä, perustuu useisiin päätospuihin.
- LSTM: *Long Short-Term Memory*. Syväoppimismalli aikasarjadataan.
- K-NN: *K-Nearest Neighbors*. Yksinkertainen koneoppimismenetelmä.
- BMI: *Body Mass Index*. Painoindeksi.
- PRISMA: *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*. Systemaattisten katsausten raportointistandardi
- GPS: *Global Positioning System*. Satelliittipaikannusjärjestelmä, joka mahdollistaa sijainnin määrittämisen missä tahansa maapallolla.

1 Johdanto

Urheiluvammat ovat merkittävä haaste niin yksilön terveydelle kuin terveydenhuollolle. Erityisesti kilpa- ja ammattiurheilussa vammat voivat johtaa kalliisiin leikkauksiin ja pitkiin kuntousjaksoihin, suorituskyvyn heikkenemiseen ja pahimmillaan jopa urheilu-uran päättymiseen. Lisäksi vammat voivat aiheuttaa psyykkisiä haasteita, kuten motivaation laskua tai pelkoa vamman uusiutumisesta, mikä vaikeuttaa paluuta urheiluun.

Viime vuosina teknologian kehitys on tuonut uusia mahdollisuuksia vammojen ehkäisyyn. Puettavat laitteet ovat yleistyneet merkittävästi aktiivi- ja ammattiurheilussa. Näitä laitteita ovat muun muassa fysiologista dataa mittaavat laitteet ja erilaiset sensorit, kuten GPS (Global Positioning System), joka paikantaa urheilijan sijainnin ja seuraa nopeutta sekä kuljettua matkaa, sekä liikeanturit, jotka mittaavat esimerkiksi kiihtyvyyttä ja kehon asentoja. Näiden laitteiden avulla voidaan kerätä tarkkaa dataa urheilijan liikkeistä ja kuormituksesta.

Tämän insinöörityön tavoitteena on tarkastella, miten puettavaa teknologiaa voidaan hyödyntää polvivammojen ennaltaehkäisyssä. Työ perustuu narratiiviseen kirjallisuuskatsaukseen, jossa analysoidaan aiempia tutkimuksia ja arvioidaan niiden tuloksia. Tarkastelun kohteena ovat eri tutkimuksissa esitetyt ratkaisut, niiden teknologiset periaatteet sekä laitteiden mahdollisuus vammojen ehkäisyssä eri urheilulajeissa.

Toisessa luvussa tarkastellaan polvivammojen esiintyvyyttä, riskitekijöitä ja vaikutuksia. Kolmannessa luvussa käsitellään puettavaa teknologiaa urheilussa ja sen roolia polvivammojen ehkäisyssä. Neljännessä luvussa kuvataan työn toteutus narratiivisena kirjallisuuskatsauksena ja tiedonhakuprosessi. Viidennessä luvussa esitetään kirjallisuuskatsauksen tulokset. Kuudennessa luvussa pohditaan löydöksiä, työn rajoituksia ja tulevaisuuden kehityssuuntia. Seitsemännessä luvussa tehdään yhteenveto työn keskeisistä havainnoista.

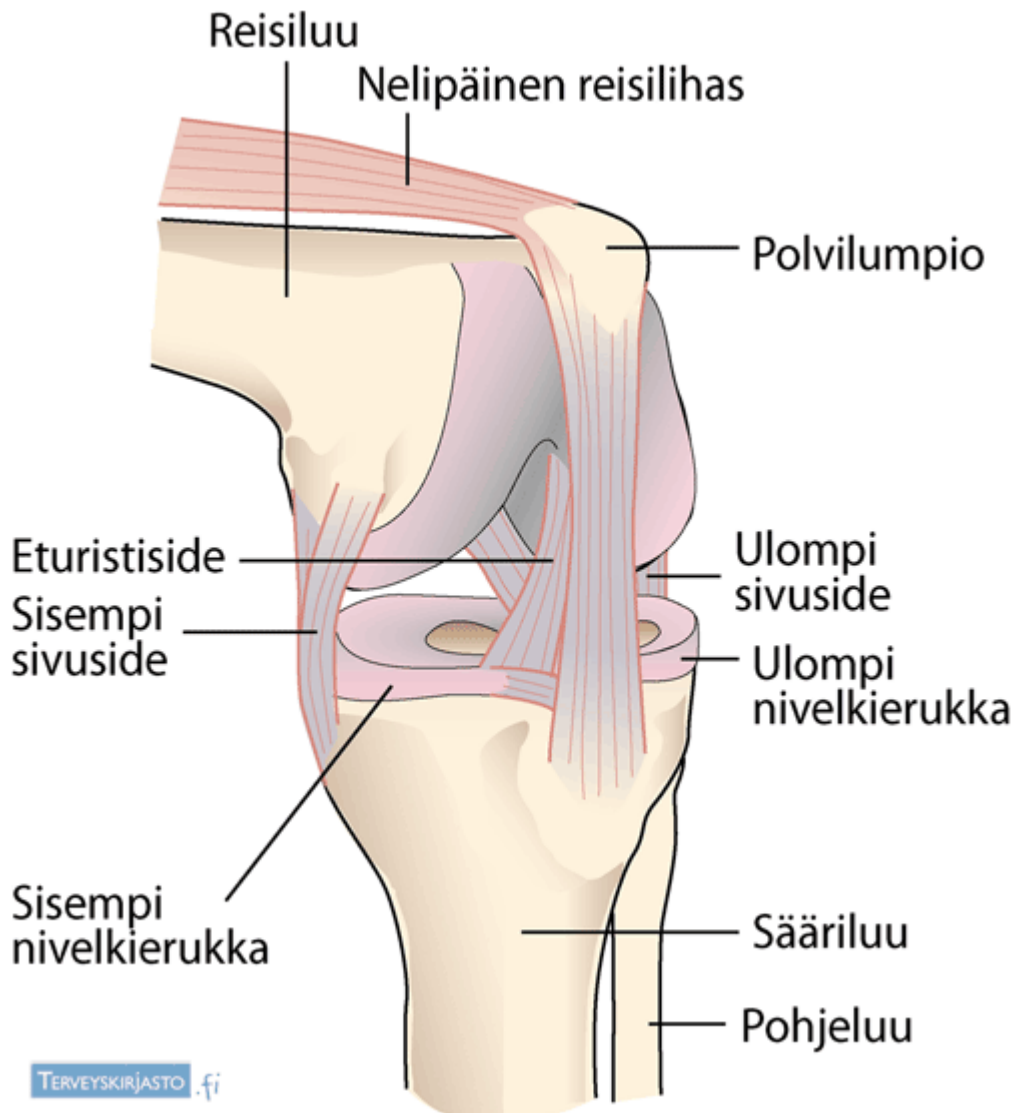
2 Polvivammojen esiintyvyys, riskitekijät ja vaikutukset

Polvivammat ovat yksi yleisimmistä ja kuormittavimmista tuki- ja liikuntaelinvammoista urheilijoiden keskuudessa. Ne voivat vaikuttaa merkittävästi urheilijan suorituskykyyn, harjoitteluun ja jopa koko urheilu-uran jatkumiseen. Polvivammat aiheuttavat usein pitkiä kuntoutusjaksoja, vaativat lääketieteellistä hoitoa ja voivat johtaa pitkäaikaisiin fyysisiin ja psyykkisiin seurauksiin. Tämän vuoksi niiden ehkäisy on keskeinen tavoite niin urheilulääketieteessä kuin teknologisessa kehityksessäkin. Tässä luvussa tarkastellaan polvivammojen yleisyyttä eri urheilulajeissa, niihin liittyviä riskitekijöitä sekä vammojen taloudellisia ja psykologisia vaikutuksia urheilijoiden ja yhteiskunnan näkökulmasta.

2.1 Polven anatomia

Polvinivel on kehon suurin ja yksi monimutkaisimmista nivelistä. Se muodostuu reisiluun, sääriluun ja polvilumpion välisestä rakenteesta, kuten kuvassa 1 esittäään. Polvi toimii pääasiassa sarananivelenä, mutta mahdollistaa myös lieviä kiertoliikkeitä, jotka tukevat liikkumista ja tasapainoa. Polvea vakauttavat passiiviset rakenteet, kuten nivelsiteet, nivelkapseli ja nivelkierukat sekä aktiiviset rakenteet eli lihakset. Keskeisiä nivelsiteitä ovat eturistiside (anterior cruciate ligament, ACL), takaristiside (posterior cruciate ligament, PCL), sisempi sivuside (medial collateral ligament, MCL) ja ulompi sivuside (lateral collateral ligament, LCL). ACL:n rooli on erityisen tärkeä etu- ja kiertosuunnan stabiliteetissa, ja sen vammat ovat yleisiä urheilussa. Aktiivisista rakenteista tärkeimmät ovat reisilihakset ja takareiden lihakset, jotka liikuttavat ja vakauttavat polvea. Lihasten hyvä yhteistyö on oleellinen polvivammojen ehkäisyssä. Meniskit (mediaalinen ja lateraalinen) parantavat nivelpintojen yhteensopivuutta ja vaimentavat iskuja. Ne jakavat kuormitusta ja tukevat polven toimintaa monipuolisesti. (Bozkurt & Açar 2021.)

Kuvassa 1 nähdään polvinivelen anatominen rakenne. Polvinivelen rakenteellinen monimutkaisuus tekee siitä alttiin vammoille, minkä vuoksi sen anatomian ja biomekaniikan ymmärtäminen on tärkeää ennaltaehkäisyssä ja kuntoutuksessa.



Kuva 1. Polven anatomia (Terveyskirjasto 2025).

2.2 Polvivammat

Polvinivelen monimuotoinen rakenne tekee siitä herkän vammoille, erityisesti urheilussa, jossa siihen kohdistuu suuria voimia, nopeita suunnanmuutoksia, hyppyjä ja äkkinäisiä pysähdyksiä (Bozkurt & Açar 2021). Yleisimpiä polvivammoja ovat eturistisiteen (ACL) repeämät, kierukkavammat ja sivusiteiden

venähdykset tai repeämät. Näitä vammoja esiintyy runsaasti muun muassa jalkapallossa, koripallossa, käsipallossa ja laskettelussa (Terveyskirjasto 2023).

Eturistiside on yksi polven tärkeimmistä rakenteista, ja se auttaa pitämään polven vakaana liikkeessä. ACL-repeämä on vakava vamma, joka tapahtuu usein ilman kontaktia toiseen pelaajaan esimerkiksi, kun urheilija laskeutuu hypystä tai tekee nopean käännöksen (Hewett ym. 2005). Vamma syntyy äkillisesti, ja sen yhteydessä polvessa voi tuntua napsahdus, jonka jälkeen polvi turpoaa ja muuttuu epävakaaksi (Terveyskirjasto 2023).

Eturistisiteen repeämä vaatii yleensä leikkaushoitoa ja pitkän kuntoutuksen, joka voi kestää useita kuukausia. Tällainen vamma voi myös altistaa polven myöhemmille vaurioille, kuten nivelkierukan tai ruston kulumiselle (Bozkurt & Açar 2021). Riskitekijöitä ovat esimerkiksi heikko lihaskunto, kehonhallinnan puute ja sukupuoli. (Hewett ym. 2005.)

Kierukkavammat ovat yleisiä tilanteissa, joissa polvi vääntyy tai kiertyy yllättäen. Vammautunut kierukka voi aiheuttaa kipua, turvotusta ja sen, että polvi ei liiku normaalisti. Joskus polvi voi jopa "lukkiutua" paikalleen ja tällä tavoin estää liikumisen tai tuottaa kipua. (Terveyskirjasto 2023.)

Sivusidevammat, kuten sisemmän polven nivelsiteen venähdykset (MCL-vammat), syntyvät usein törmäyksissä tai tilanteissa, joissa polvi taipuu väärään suuntaan. Näiden vammojen vakavuus vaihtelee: lievät venähdykset voivat parantua levolla ja kuntoutuksella, mutta vakavammat vaativat joskus leikkausta. (Bozkurt & Açar 2021; Terveyskirjasto 2023.)

2.3 Polvivammojen yleisyys urheilussa

Majewskin, Susannen ja Klausin (2006) kymmenvuotisessa tutkimuksessa kartoitettiin 17 397 urheilijaa, joilla oli yhteensä 19 530 urheiluvammaa. Tutkimuksen mukaan polvivammat muodostivat 39,1 % kaikista vammoista, mikä osoittaa niiden merkittävän osuuden urheiluvammoissa. Majewski ym. (2006) tutkimuksen

polvivamman saaneista potilaista 68,1 % oli miehiä ja 31,6 % naisia, ja eniten polvivammoja esiintyi 20–29-vuotiaiden ryhmässä (noin 43 % tapauksista).

Merkittävä osa polvivammoista tapahtuu ilman suoraa kontaktia toiseen pelaajaan tai ulkoiseen tekijään — niin sanotut non contact -vammat ovat erityisen yleisiä esimerkiksi eturistisidevammoissa. Näissä tapauksissa vamma syntyy usein äkillisessä suunnanmuutoksessa, hypyn alastulossa tai nopeassa pysähtymyksessä, mikä korostaa biomekaanisten ja neuromuskulaaristen tekijöiden roolia vammojen synnyssä. (Hewett ym. 2005.)

Brasilialaisen Universidade Federal de São Paulon (Unifesp) urheilutraumakeskuksessa tehty tutkimus (Nicolini ym., 2014) tukee havaintoa polvivammojen yleisyydestä. Polvivammat ovat ongelma erityisesti jalkapallossa, jossa niiden osuus oli 38 % kaikista vammoista. Jalkapallo oli myös erityisen altis eturistisiteen (ACL) repeämille, jotka muodostivat 54,5 % kaikista lajin polvivammoista. Tutkimuksessa polvivammojen havaittiin esiintyvän myös seuraavissa lajeissa: kävely/juoksu (8,6 % tutkimuksen polvivammoista), lentopallo (6 %), koripallo (5 %), käsipallo (3,8 %), judo (3,8 %) ja jiu-jitsu (4 %).

Taulukosta 1 nähdään, että polvivammat ovat yleisiä erityisesti palloilulajeissa, joissa yhdistyvät äkilliset suunnanmuutokset, hypyt ja fyysinen kontakti. Esimerkiksi koripallossa, jalkapallossa ja amerikkalaisessa jalkapallossa polvivammat muodostavat huomattavan osuuden kaikista urheiluvammoista. Myös jääkiekossa ja kamppailulajeissa polvivammat ovat yleisiä, mutta lajikohtaiset erot voivat liittyä esimerkiksi pelityyliin ja suojarusteiden käyttöön.

Taulukko 1: Eri urheilulajien urheiluvammojen polvivammojen osuus.

Urheilulaji	Polvivammojen osuus kaikista lajin vammoista (%)
Jalkapallo	38 % (Nicolini ym. 2014), 25–40 % (Makuch ym. 2024), 29,8 % (Amirneni ym. 2024).
Jääkiekko	29 % (Tuominen ym. 2015), 32 % (Hirvelä ym. 2024), 23,1 % (Ornon ym. 2020).
Koripallo	45 % (Aksović ym. 2024), 30 % (Hull ym. 2024), 21,9 % (Bove ym. 2019).
Am. jalkapallo	36 % (Saal 1991), 15 % (Clifton ym. 2017), 16 % (Baker ym. 2021).
Kamppailulajit	9,7 % (Bickley ym. 2023), 38 % (alaraaja) (Pocecco & Ruedl 2018).

Koska polvivammat voivat aiheuttaa merkittäviä toimintakyvyn menetyksiä ja pitkiä kuntoutusjaksoja, niiden ennaltaehkäisy on tärkeää. Perinteisesti vammojen ehkäisyssä on keskitytty esimerkiksi voimaharjoitteluun, liikkuvuusharjoitettiin ja tekniikkaharjoitteluun (Kangas 2021). Viime vuosina teknologian kehitys on kuitenkin tuonut uusia mahdollisuuksia urheilijoiden arviointiin ja hallintaan (Rebelo ym. 2023).

Puettavat teknologiat, kuten liikeanturit, GPS-seuranta ja biomekaaniset analyysityökalut (esimerkiksi voimalevyt, liikeanalyysijärjestelmät, inertiamittausyksiköt ja EMG-laitteet eli elektromyografialaitteet, joilla mitataan kehon liikeratoja, lihasaktivaatioita ja kuormitusvoimia) tarjoavat keinoja urheilijoiden liikkeiden tarkkaan analysointiin ja vammariskiäin vaikuttavien tekijöiden tunnistamiseen. Näiden teknologioiden hyödyntäminen osana harjoittelua voi mahdollistaa yksilöllisemmän ja tehokkaamman vammojen ennaltaehkäisyn, mikä voi vähentää polvivammojen esiintyvyyttä ja vakavuutta eri urheilulajeissa. (Rebelo ym. 2023.)

2.4 Polvivammoille altistavat riskitekijät

Polvivammoille altistavia riskitekijöitä on useita, kuten urheilulajin erityispiirteet ja kuormitus, biomekaaniset ja fyysiset tekijät sekä ulkoiset tekijät. Urheilulajin fyysisyys vaikuttaa merkittävästi vammariikkiin ja koostuu monista tekijöistä, kuten kontaktien määrästä, liikkeiden nopeudesta, suunnanmuutoksista, kuormituksen intensiteetistä ja harjoitusolosuhteista.

Kontaktilajeissa, kuten esimerkiksi jalkapallossa, jääkiekossa, koripallossa ja kamppailulajeissa, polvivammojen riski on merkittävä. Näille lajeille tyypilliset äkilliset suunnanmuutokset, nopeat pysähdykset sekä fyysiset kontaktit altistavat polven nivelsiteet suurille rasituksille. Erityisesti tilanteet, joissa polveen kohdistuu kiertoliike samalla, kun jalka on maassa, voivat aiheuttaa vakavia vammoja, kuten eturistisiteen (ACL) repeämiä (Terve Urheilija 2025).

Myös ulkoiset tekijät, kuten alustan ominaisuudet ja välineet, voivat lisätä polvivammojen riskiä. Esimerkiksi tekonurmella pelaaminen voi vaikuttaa pidon ja liukuvuuden suhteeseen, mikä saattaa altistaa polven vääntövammoille verrattuna luonnonnurmeen (Nicolini ym. 2014). Lisäksi carving-suksien käyttöönotto on lisännyt ACL-repeämien esiintyvyyttä laskettelijoilla, koska ne mahdollistavat voimakkaammat käännökset ja suuremmat polveen kohdistuvat vääntövoimat (Hermann & Senner 2021). Harjoitteluolosuhteet, kuten kovat tai epätasaiset alustat, voivat myös vaikuttaa merkittävästi polveen kohdistuvaan rasitukseen (Haaja 2016).

Pitkäkestoista rasitusta sisältävissä lajeissa, kuten maratonjuoksussa, triathlonissa ja maastopyöräilyssä, polvivammat ilmenevät usein rasitusvammoina ja nivelkierukkavaurioina. Toistuva ja pitkäkestoinen kuormitus yhdistettynä puutteelliseen tekniikkaan tai epätasaiseen alustaan voi lisätä polvinivelen rasitusta ja aiheuttaa kroonisia vaivoja. Lisäksi polven nivelten epävakaas ja lihasheikkous voivat altistaa vammautumiselle, sillä heikot tukilihakset eivät pysty vaimentamaan iskutusta tehokkaasti. Huono lihastasapaino ja riittämätön lihaskunto voivat edelleen lisätä polveen kohdistuvaa kuormitusta (Pasanen 2021).

Vammojen ehkäisyssä korostuvat oikea harjoitustekniikka, lihaskunnan kehittäminen sekä riittävä lämmittely ennen suoritusta. Puutteellinen lämmittely ja lihasten valmistelu rasitukseen voivat lisätä revähdysten ja nivelsidevammojen riskiä (Salmela 2021).

2.5 Urheiluvammojen taloudelliset vaikutukset

Urheilussa tapahtuvat vammat ja loukkaantumiset ovat taloudellisesti kuormittavia niin yksilölle, seuroille, joukkueille kuin terveydenhuollollekin. Etenkin ammattiuurheilussa, missä urheilijoille maksetaan isoja palkkoja, urheiluvammat voivat aiheuttaa merkittäviä taloudellisia vaikutuksia. Ammattiuurheilussa esimerkiksi vuonna 2022 tehdyn tutkimuksen mukaan jalkapallossa Euroopan top-5-sarjoissa joukkueet menettivät 732 miljoonaa euroa palkoissa ja yli 90 000 päivää, koska pelaajat eivät voineet harjoitella tai osallistua joukkueen peleihin. (Howden 2022.)

Urheiluvammoilla voi olla merkittäviä taloudellisia vaikutuksia yksilöön. Vammat voivat johtaa sairauspoissaoloihin työstä, mikä aiheuttaa ansionmenetyksiä. Lisäksi vammojen hoitokulut, kuten lääkärikäynnit, fysioterapia ja mahdolliset leikkaushoidot voivat aiheuttaa huomattavia kustannuksia. Pitkäaikaiset vammat saattavat myös vaikuttaa työkykyyn ja urakehitykseen, mikä voi heijastua taloudelliseen tilanteeseen pitkällä aikavälillä. (Öztürk & Kılıç 2013; UKK-instituutti 2023.)

Suomessa urheiluvammoilla on huomattava taloudellinen vaikutus. Vuosittain tapahtuu arviolta 350 000–400 000 liikuntavammaa, joista suuri osa vaatii terveydenhuollon palveluita ja kuntoutusta. Tämä lisää terveydenhuollon kustannuksia ja kuormittaa järjestelmää. Kelan tilastojen mukaan liikuntavammoihin liittyvät sairauspäivärahat ja kuntoutusetuudet aiheuttavat yhteiskunnalle useiden miljoonien eurojen vuosittaiset kustannukset. Lisäksi työikäisten vammat voivat johtaa pitkiin sairauspoissaoloihin, mikä vähentää työpanosta ja heikentää tuottavuutta. UKK-instituutin mukaan tehokkaalla vammojen ehkäisyllä voitaisiin saavuttaa merkittäviä säästöjä jopa kymmeniä miljoonia euroja vuodessa

ja samalla edistää väestön aktiivisuutta ja hyvinvointia (UKK-instituutti 2023; THL 2023; Kela 2023).

2.6 Urheiluvammojen vaikutukset mielenterveyteen

Urheiluvamma voi vaikuttaa urheilijan mielenterveyteen monin tavoin, aiheuttaen ahdistusta, masennusta sekä lyhyt- että pitkäaikaisia psykologisia haasteita. Vakava vamma voi johtaa elämänlaadun heikkenemiseen, sillä se vaikuttaa fyysisen toimintakyvyn lisäksi myös psyykkiseen, emotionaaliseen ja sosiaaliseen hyvinvointiin (Haraldsdottir & Watson 2021.). Loukkaantuneet urheilijat raportoivat usein erilaisia henkisiä haasteita, kuten stressiä, ahdistusta ja masennusta, erityisesti silloin, kun vamma estää urheiluun osallistumisen pidemmäksi aikaa. Lisäksi vamma voi horjuttaa urheilijan identiteettiä ja itseluottamusta, sillä moni kokee urheilun keskeisenä osana itseään (Jeong & Li 2024.).

Erytyisesti vakavien polvivammojen, kuten eturistisiteen (ACL) repeämien, on todettu vaikuttavan urheilijoiden mielenterveyteen pitkään vamman jälkeen. Esimerkiksi naisurheilijat (13–23-vuotiaat) raportoivat heikentyneitä elämänlaatua jopa kuuden kuukauden ajan vamman toteamisen jälkeen. Lisäksi loukkaantuneet urheilijat ovat kokeneet elämänlaatunsa heikentyneen erityisesti mielenterveyden, fyysisen toimintakyvyn ja emotionaalisen jaksamisen osalta. (Haraldsdottir & Watson 2021.)

Urheiluvamma voi myös vaikeuttaa paluuta lajiharjoitteluun, sillä monet urheilijat kokevat pelkoa uudelleen loukkaantumisesta. Tämä pelko voi pitkittää paluuta ja vaikuttaa negatiivisesti urheilijan suorituskykyyn ja itseluottamukseen. Tutkimusten mukaan monet ACL-rekonstruktion läpikäyneet urheilijat eivät koskaan palaa entiselle tasolle. Suurimpana syynä tähän on psykologiset tekijät, kuten pelko ja elämäntyylin muutos vamman seurauksena. (Jeong & Li 2024.)

3 Puettava teknologia urheilussa ja sen rooli polvivammojen ehkäisyssä

Tässä luvussa käydään läpi puettavan teknologian rooli urheilussa yleisesti ja miten puettavaa teknologiaa käytetään polvivammojen ehkäisyssä. Lisäksi tarkastellaan, miten puettavan teknologian data käsitellään koneoppimisen avulla. Lopuksi selvitetään, mitä haasteita tai rajoituksia on, sekä pohditaan mihin suuntaan puettavan teknologian käyttö on menossa.

3.1 Puettavat laitteet urheilussa

Puettavaa teknologiaa käytetään urheilussa monin tavoin. Eniten puettavaa teknologiaa käytetään suorituskyvyn ja palautumisen seurantaan. Teknologian kehitys mahdollistaa puettavan teknologian käytön myös vammojen ehkäisyssä. Urheilijat ja valmentajat hyödyntävät näitä laitteita harjoittelun optimoimiseen, tekniikan parantamiseen ja vähentääkseen loukkaantumisriskiä. Erilaiset sensorit, älyvaatteet ja biometriset mittarit, kuten sykemittarit, happisaturaatiomittarit ja lihasaktiivisuutta mittaavat EMG-sensorit mahdollistavat yksilöllisen ja reaaliaikaisen palautteen, mikä tukee sekä ammattilaisia että kuntoilijoita (Li ym. 2016).

Puettavan teknologian yksi yleisimmistä käyttötavoista on kehon toimintojen ja liikkeen seuranta. Sykkeen ja sydämen toiminnan mittaaminen älykelloilla, sykevöillä ja optisilla sensoreilla auttaa optimoimaan harjoittelua ja seuraamaan palautumista. Lisäksi sykevälivaihtelun (HRV, heart rate variability) mittaus, joka kuvaa sydämen lyöntien välisten aikavälien vaihtelua, on hyödyllinen työkalu stressin ja ylikuormituksen tunnistamiseen. GPS-seurantalaitteet ja kiihtyvyyssanturit puolestaan mahdollistavat liikkeen analysoinnin, kuten juoksunopeuden, askeleen pituuden ja reitin optimoinnin. Joukkueurheilussa niitä käytetään pelaajien liikkumisen arvioimiseen, kun taas yksilölajeissa, kuten juoksussa ja pyöräilyssä, ne auttavat harjoittelun tehokkuuden seurannassa. (Seshadri ym. 2019.)

Lihasakiivisuuden ja kehon asennon seuranta on kehittynyt älyvaatteiden (Tolonen 2020) ja sensoripohjaisten laitteiden (esimerkiksi kehoon kiinnitettävät mittauslaitteet, kuten kiihtyvyyssanturit, gyroskoopit ja EMG-elektrodit, jotka keräävät reaaliaikaista tietoa liikkeestä ja lihastoiminnasta) myötä. Elektrodit ja liiketunnistimet voivat analysoida lihasten aktivoitumista, voimantuottoa ja tasapainoa, mikä auttaa optimoimaan harjoituskuormitusta ja tekniikkaa. (Seshadri et al. 2019.).

3.2 Puettavat teknologiat ja tuotteet polvivammojen ennaltaehkäisyssä

Polveen kohdistuvaa kuormitusta ja rasitusta voidaan arvioida elektromyografialla (EMG), inertiaalisensoreilla eli inertiamittausyksiköillä (IMU, inertial measurement unit), jotka mittaavat muun muassa kiihtyvyyttä, kulmanopeutta ja asentoa sekä voima- että paineantureilla. Näiden laitteiden avulla mitataan polveen kohdistuvia voimia, liikeratoja, lihasaktiivisuutta ja kuormituksen jakautumista urheilusuoritusten aikana. Teknologian kehitys on mahdollistanut aiempaa tarkemman biomekaanisen analyysin ja ennaltaehkäisevien toimenpiteiden suunnittelun.

IMU-sensorit, kuten Xsens MVN ja MTw Awinda, tarjoavat reaaliaikaista tietoa kehon liikekulmista, nivelmomenteista ja kiihtyvyyksistä. Näitä on hyödynnetty urheilubiomekaniikan ja vammojen ennaltaehkäisyn tutkimuksessa, sillä ne mahdollistavat tarkat mittaukset ilman laboratorio-olosuhteita. (Xsens 2024.)

EMG-sensorit, kuten Myontec ja Athos, mittaavat lihasten sähköistä aktiivisuutta, minkä avulla voidaan arvioida lihasten toimintaa, polven stabiliteettia kuormituksen alla sekä mahdollisia epätasapainotiloja, jotka voivat lisätä vammariskiä. EMG:tä käytetään esimerkiksi nelipäisen reisilihaksen ja takareiden lihasaktiivisuuden analysointiin, mikä auttaa tunnistamaan ACL-vammoille altistavia lihasaktiivisuuden häiriöt. (Myontec; Athos.)

Voima- ja paineanturit, kuten Bertec-voimalevyt ja Flexiforce A301 -paineanturit, mittaavat maahan kohdistuvia voimia ja kuormituksen jakautumista eri liikkeiden

aikana. Näillä teknologioilla voidaan arvioida polven stabiilitettä ja tunnistaa epätasapainotiloja, jotka voivat altistaa vammoille esimerkiksi suunnanmuutostilanteissa. (Bertec; Tekscan.)

3.3 Tekoäly ja koneoppiminen puettavassa teknologiassa

Tekoäly (AI) ja koneoppiminen (ML) ovat tietojenkäsittelytieteeseen pohjautuvia menetelmiä, joiden avulla voidaan analysoida suuria tietomääriä, tunnistaa säännönmukaisuuksia ja tehdä ennusteita. Tekoäly kattaa laajemmin kaikki älykkäät järjestelmät, jotka voivat oppia ja tehdä päätöksiä, kun taas koneoppiminen on tekoälyn osa-alue, joka perustuu mallien kouluttamiseen suurista tietaineistoista ilman erillistä ohjelmointia jokaiseen tehtävään. (Kämäräinen 2023; Knuutila 2021.)

Koneoppimismallit voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin (Kämäräinen 2023):

- Ohjattu oppiminen (Supervised Learning): Malli oppii käyttämällä valmiiksi luokiteltua aineistoa, esimerkiksi terveiden ja loukkaantuneiden urheilijoiden liikedataa.
- Ohjaamaton oppiminen (Unsupervised Learning): Malli etsii itse datasta rakenteita, esimerkiksi ryhmittelemällä urheilijoiden liikemalleja ilman ennalta annettuja kategorioita.
- Vahvistusoppiminen (Reinforcement Learning): Malli optimoi päätöksiä palkkiojärjestelmän avulla, esimerkiksi optimoimalla harjoitusohjelmia loukkaantumisriskin vähentämiseksi.

Eri koneoppimismallit soveltuvat erilaisiin datan analysoinnin tehtäviin. Support Vector Machine (SVM) etsii optimaalisen rajan eri luokkien välille ja toimii erityisen hyvin, kun luokkien välinen ero on selkeä käsitellen myös monimutkaisia datarakenteita tehokkaasti. Random Forest (RF) on useista päätöspuista koostuva malli, joka on vakaa ja kestävä kohinaa vastaan sekä soveltuu sekä luokittelu- että ennustustehtäviin. Logistinen regressio puolestaan on yksinkertainen ja tulkittava malli, joka arvioi todennäköisyyttä tietyn lopputuloksen toteutumiseksi ja toimii erityisesti binäärisessä luokittelussa, kuten kyllä/ei-päätöksissä. (Kämäräinen 2023; Knuutila 2021.)

Tekoälyn ja koneoppimisen suurin etu on kyky käsitellä monimutkaisia tietokonekonaisuuksia nopeammin ja tarkemmin kuin perinteiset tilastolliset analyysimenetelmät. Näitä menetelmiä hyödynnetään yhä enemmän lääketieteessä, urheilutieteessä ja biomekaniikassa, koska ne mahdollistavat yksilöllisen riskianalyysin ja ennustavan analytiikan. (Kämäräinen 2023; Knuutila 2021.)

Tekoälypohjaisen liikeanalyysisovelluksen hyödyntäminen urheiluvalmennuksessa on esimerkki tällaisesta sovelluksesta. Jyväskylän ammattikorkeakoulussa toteutetussa opinnäytetyössä fysioterapeuttiopiskelijat testasivat tekoälypohjaista liikeanalyysisovellusta jalkapalloilijoiden polven rasitusvammojen riskitekijöiden tunnistamisessa. Sovellus mahdollisti urheilijoiden liikkeiden analysoinnin älypuhelimien avulla ilman erillisiä sensoreita, tarjoten näin helposti lähestyttävän työkalun valmentajille ja fysioterapeuteille. Vaikka sovelluksen analyysinopeudessa havaittiin kehitystarpeita, sen käyttö nähtiin lupaavana keinona urheilijoiden vammojen ennaltaehkäisyssä ja kuntoutuksessa. (Hämäläinen & Lahtinen 2024.)

4 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsaukset voidaan jakaa kolmeen eri päätyyppiin, joita ovat kuvaileva kirjallisuuskatsaus, systemaattinen kirjallisuuskatsaus ja meta-analyysi. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus antaa yleiskuvan tutkittavasta aiheesta ilman tiukkaa lähestymistapaa ja toimii usein pohjana tutkimusaiheen hahmottamiselle. Systemaattinen kirjallisuuskatsaus tiivistää valitun aihepiirin aiempien tutkimusten olennaisen sisällön. Meta-analyysi jaetaan kahteen osaan. Kvalitatiivinen meta-analyysi keskittyy laadullisten tutkimusten synteisiin ja pyrkii tunnistamaan niistä yhteisiä teemoja sekä merkityksiä. Kvantitatiivinen meta-analyysi puolestaan yhdistää numeerisia tutkimustuloksia tilastollisten menetelmien avulla ja mahdollistaa eri tutkimusten tulosten laajemman yleistettävyyden. (Salminen 2011.)

4.1 Narratiivinen kirjallisuuskatsaus

Tässä insinööriyössä käytetään kuvailevista kirjallisuuskatsausmenetelmistä narratiivista lähestymistapaa. Työn aihe – polvivammojen ennaltaehkäisy puettavan teknologian ja tekoälyn avulla on suhteellisen suppea, uusi ja nopeasti kehittyvä tutkimusalue. Tämän vuoksi aiheeseen liittyviä vertailukelpoisia tutkimuksia on saatavilla vielä rajallisesti, eivätkä systemaattisen kirjallisuuskatsauksen tiukat kriteerit ole tähän yhteyteen soveltuvia.

Narratiivinen katsaus mahdollistaa joustavan lähestymistavan, jossa voidaan tarkastella monipuolisesti alan nykytilaa, käytettyjä teknologioita, tutkimusmenetelmiä sekä tuloksia ilman, että tutkimusten tulee olla keskenään täysin vertailukelpoisia. Tällainen lähestymistapa sopii erityisen hyvin teknologisiin ja soveltaaviin aiheisiin, joissa kehitystyö ja kokeellisuus korostuvat.

Narratiivisen katsauksen avulla työssä tuodaan esiin

- Millaisia puettavia teknologioita on käytetty polvivammojen ehkäisyssä?
- Miten tekoälyä on hyödynnetty riskitekijöiden analysoinnissa ja vammojen ennustamisessa?
- Millaisia vaikutuksia teknologioilla on raportoitu harjoittelussa, arvioinnissa ja palautteessa?
- Mitkä ovat keskeiset tutkimussuuntaukset, haasteet ja kehitystarpeet?

Tavoitteena ei ole vain esittää yksittäisten tutkimusten tuloksia, vaan myös hahmottaa kokonaiskuva teknologian roolista ja mahdollisuuksista polvivammojen ennaltaehkäisyssä. Lisäksi työ pyrkii tunnistamaan toistuvia teemoja, teknologisia trendejä sekä mahdollisia tutkimusaukkoja, jotka voisivat toimia pohjana tulevalle kehitys- ja tutkimustyölle.

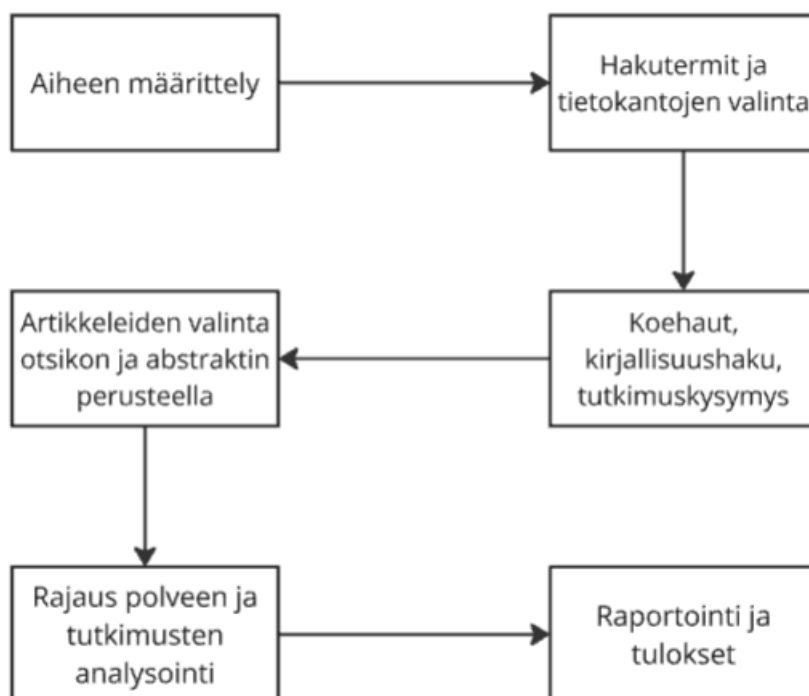
4.2 Tutkimuskysymykset ja tavoitteet

Insinööriyön tavoitteena on luoda luotettava ja käytettävä yleiskatsaus polvivammojen estämisestä puettavilla laiteilla kirjallisuuskatsauksen avulla. Tutkimuksessa kootaan luotettavia ja vertaisarvioituja tutkimuksia sekä artikkeleita, jotka vastaavat tutkimuskysymykseen: "Voiko urheilussa tapahtuvia polvivammoja ehkäistä puettavilla laitteilla?"

4.3 Tiedonhaku

Tiedonhaku toteutettiin hyödyntämällä tieteellisiä tietokantoja, jotka olivat PubMed ja ScienceDirect. PubMed on Yhdysvaltain kansallisen lääketieteellisen kirjaston (National Library of Medicine) ylläpitämä ilmainen hakupalvelu, joka sisältää laajan valikoiman biolääketieteen ja terveystieteiden tieteellisiä julkaisuja (PubMed). ScienceDirect puolestaan on Elsevier-kustantamon tarjoama tieteellinen tietokanta, joka sisältää vertaisarvioituja artikkeleita eri tieteenaloilta, erityisesti luonnontieteistä, tekniikasta ja lääketieteestä (ScienceDirect). Hakusanat valittiin tutkimuksen kohteena olevan aiheen perusteella, ja ne koostuivat erilaisista yhdistelmistä, jotka liittyvät puettaviin laitteisiin, urheiluvammojen ehkäisyyn ja erityisesti polvivammoihin. Hakustrategia suunniteltiin siten, että se kattaa mahdollisimman laajasti aiemman tutkimuksen, mutta samalla rajaa tulokset olennaisiin lähteisiin.

Kuvassa 2 nähdään kirjallisuuskatsauksen tutkimusprosessin vaiheet vuokaviona, joka alkaa aiheen määrittelystä ja päättyen raportointiin ja tuloksiin. Prosessi käynnistyi aiheen määrittelyllä ja sopivien hakutermien sekä tietokantojen valinnalla. Tämän jälkeen muodostettiin tutkimuskysymys ja suoritettiin koehaut ja laajempi kirjallisuushaku. Artikkeleita valittiin otsikoiden ja tiivistelmien perusteella, minkä jälkeen rajaus kohdistettiin polvivammoihin liittyviin tutkimuksiin. Lopuksi valitut tutkimukset analysoitiin ja niiden tulokset raportoitiin.



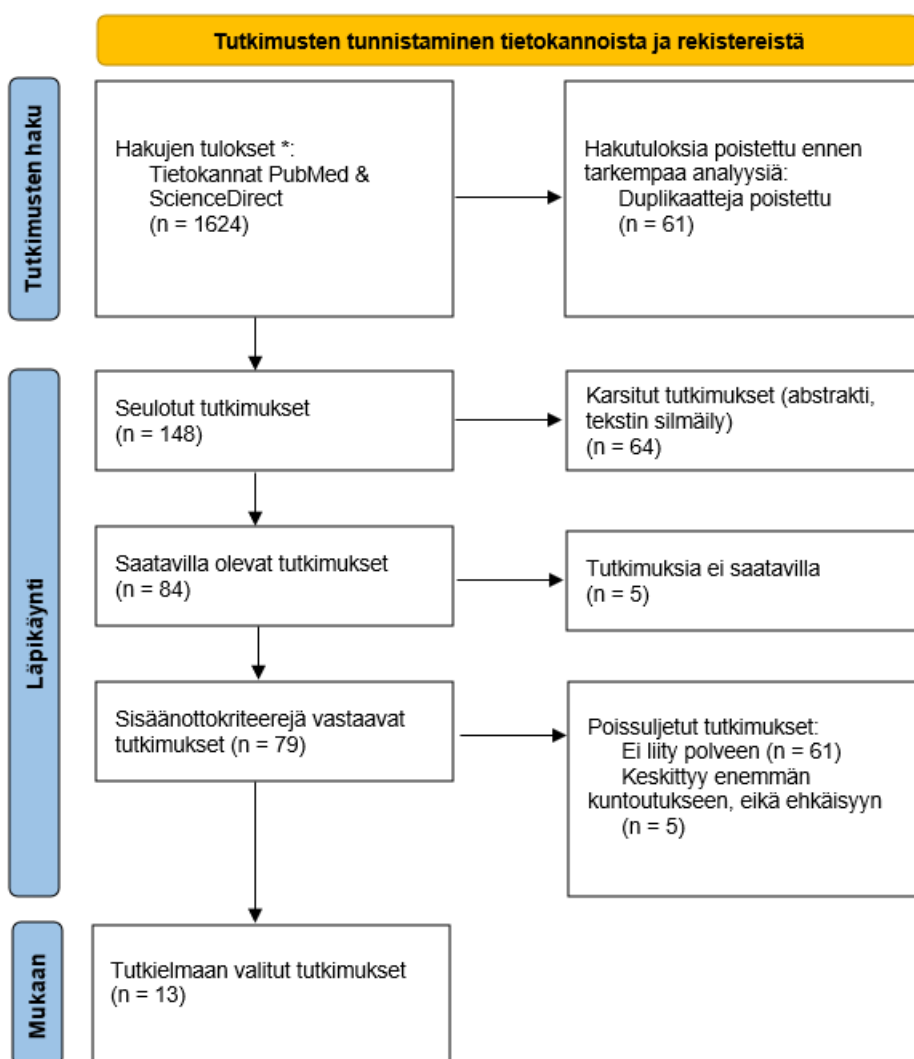
Kuva 2. Vuokaavio kirjallisuuskatsauksen eri vaiheista.

Hakujen suorittamisessa käytettiin Boolean-operaattoreita (AND, OR) yhdistämään eri termejä ja tarkentamaan hakutuloksia. Hakutulokset rajattiin julkaisuvuodesta 2015 vuoteen 2025, jotta mukaan otettaisiin vain ajantasainen ja relevantti tutkimustieto. Lisäksi mukaan otettiin vain vertaisarvioitua tieteellistä artikkelit, jotka olivat saatavilla joko vapaasti tai Metropolian lisenssin kautta. Hakutulokset esitetään tarkemmin liitteessä 1, jossa on yhteenveto hakusanoista, tietokannoista, rajauksista ja hyväksytyjen tutkimusten määrästä.

Hakuvaihe lopetettiin, kun hakujen perusteella huomattiin, että samat aikaisemmin valitut tutkimukset ja artikkelit alkoivat tulla esiin kaikissa hauissa. Tässä kohtaa hakuja ei tehty enää enempää, koska uusia päteviä artikkeleita tai tutkimuksia ei olisi tullut vastaan.

4.4 Tutkimusmateriaalin valinta

Tutkimusten valintaprosessi esitetään PRISMA-kaaviona kuvassa 3. Ensimmäisessä vaiheessa haettiin tutkimuksia valituista tietokannoista, mikä tuotti yhteensä 1624 hakutulosta. Seuraavaksi poistettiin duplikaatit, minkä jälkeen tutkimukset arvioitiin otsikoiden ja abstraktien perusteella. Lopulta täystekstit analysoitiin, ja mukaan otettiin ne tutkimukset, jotka täyttivät kaikki sisäänottokriteerit. Lopullisten tulosten tarkempi analyysi, mukaan lukien tutkimusten keskeiset löydökset ja niiden vertailu, on esitetty liitteessä 1.



Kuva 3. Tiedonhaku Prisma-kaaviona (PRISMA 2020).

Tutkimusten valintaprosessissa määriteltiin tarkat sisäänottokriteerit, joiden avulla varmistettiin tutkimusaineiston relevanssi ja laatu suhteessa insinööriyön

tutkimusongelmaan. Kriteerien avulla pyrittiin rajaamaan mukaan vain sellaiset tutkimukset, jotka tukevat suoraan kirjallisuuskatsauksen tavoitetta: tarkastella polvivamman ehkäisyä puettavan teknologian ja koneoppimisen avulla. Kriteerit huomioivat julkaisuvuoden, kielen, saatavuuden, tutkimuksen aiheen, tyypin sekä soveltuvuuden tutkimuskysymykseen. Taulukossa 2 nähdään tarkemmat sisäänottokriteerit insinööriyön analyysiin valittavista tutkimuksista.

Taulukko 2: Analyysiin mukaan otettavien tutkimusten mukaanottokriteerit.

Kriteerivaatimus	Sisäänottokriteeri
Julkaisuvuosi	2015–2025
Julkaisukieli	Suomi tai englanti
Saatavuus	Vapaasti luettavissa, saatavilla Metropolian kirjaston lisensseillä tai saatu pyydettyinä
Tutkimusaihe	Koskee polvivamman ehkäisyä puettavalla laitteella TAI vamman ehkäisyä koneoppimisella
Tutkimustyyppi	Tieteellinen vertaisarvioitu tutkimus (ml. katsaukset)
Soveltuvuus	Keskittyy polveen ja/tai vammojen ehkäisyyn koneoppimisen avulla

Lopulliseen analyysiin valittiin 13 tutkimusta, jotka vastasivat asetettuja sisäänottokriteerejä ja tukivat kirjallisuuskatsauksen tutkimusongelman käsittelyä. Valitut tutkimukset muodostavat pohjan tulosten analyysille ja johtopäätöksille, jotka esitellään työn myöhemmissä luvuissa.

4.5 Tutkimusmateriaalin analysointi

Tutkimusmateriaalin analysointi toteutettiin valittujen lähteiden kriittisellä lukemisella ja sisällön arvioinnilla suhteessa tutkimusongelmaan. Erityisesti huomio kohdistettiin niihin tutkimuksiin, jotka käsittelivät polvivammojen ehkäisyä puettavan teknologian tai koneoppimisen avulla. Lähteiden analyysi sisälsi menetelmien tarkastelun, tutkimustulosten vertailun sekä sovellettavuuden arvioinnin tämän insinööriyön näkökulmasta.

Analysointi painottui siihen, kuinka hyvin tutkimukset vastasivat valittuihin sisääntokriteereihin sekä kuinka suoraan ne liittyivät polveen kohdistuviin vammoihin ja niiden ennaltaehkäisyyn. Lisäksi huomioitiin, että tutkimukset ovat ajantasaisia, ovat vertaisarvioituja ja sitä kautta luotettavia.

Tämän analyysin pohjalta pystyttiin muodostamaan kokonaiskuva siitä, millaisia lähestymistapoja ja teknologioita polvivammojen ehkäisyssä on viime vuosina tutkittu ja miten niitä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää tulevaisuuden kehitystyössä.

5 Tulosten analysointi

Tässä insinööriyössä tutkittiin ja analysoitiin narratiivisen kirjallisuuskatsauksen avulla, miten puettavat teknologiat ja laitteet sekä koneoppimismenetelmät voivat tukea polvivammojen, erityisesti ACL-vammojen, ehkäisyä, riskinarviointia ja monitorointia etenkin urheilussa. Tarkasteluun valitut tutkimukset on koottu liitteessä 2 esitettyyn vertailutaulukkoon, jossa on kuvattu tutkimusten taustat, tutkimusasetelmat, puettavat laitteet, analysoidut muuttujat sekä keskeiset löydökset. Varsinaiset tulokset on ryhmitelty kolmeen kokonaisuuteen: riskien mittaamiseen, ennaltaehkäisevään toimintaan sekä vammojen ennustamiseen koneoppimisella, ja niitä käsitellään tarkemmin tulosluvussa. Lisäksi osion lopussa tarkastellaan puettavan teknologian haasteita ja rajoituksia polvivammojen estämisessä.

5.1 Riskien mittaaminen

Polvivammojen ehkäisyssä keskeinen lähtökohta on riskitekijöiden luotettava ja yksilöllinen mittaaminen. Useiden viime vuosien tutkimusten perusteella puettavat teknologiat tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia mitata biomekaanisia kuormituksia, liikeratoja, väsymystä ja liikemalleja urheilusuoritusten aikana sekä laboratorio- että kenttäolosuhteissa. Näiden mittausten avulla voidaan rakentaa tarkempia riskiprofiileja ja kehittää yksilöllistettyjä ehkäisyohjelmia.

Fan ym. (2021) esittelivät IMU-teknologiaan perustuvan järjestelmän, joka pystyy arvioimaan polven fleksio-, abduktio- ja sisärotaatiokulmia erityisesti ACL-vammoihin liittyvissä liikkeissä, kuten laskeutumisessa ja suunnanmuutoksissa. Heidän tuloksensa osoittivat, että IMU-järjestelmä pystyi tuottamaan tarkkoja kulmatietoja, jotka aiemmin vaativat laboratoriotason 3D-liikkeenkaappausta. Tämä mahdollistaa käytännönläheisen riskiseurannan esimerkiksi urheiluharjoituksissa.

Myös Di Paolo ym. (2023) tutkivat ACL-vammariskiä naisjalkapalloilijoilla kenttä- ja laboratoriotilanteissa. He kehittivät menetelmän, jossa pelaajien liikkeet ryhmiteltiin riskitason mukaan analysoimalla polven momenttitietoja kolmessa suunnassa. Kenttätilanteissa kerätyistä IMU-datasta havaittiin, että korkean riskin liikkeisiin liittyi tyypillisesti suuret polven abduktio-, ekstensio- ja ulkorotaatiomomentit sekä matala fleksioaste. Tutkimus korosti myös ekologisen validiteetin merkitystä laboratorio-olosuhteissa mitatut riskitekijät eivät aina heijastu sellaisinaan kentällä tapahtuvaan liikkumiseen.

Preatoni ym. (2022) systemaattisessa katsauksessaan analysoivat laajasti, miten puettavia sensoreita on hyödynnetty liikemekanikan mittauksessa urheiluvammojen ennaltaehkäisyssä, arvioinnissa ja kuntoutuksessa. Katsauksen mukaan, vaikka teknologia tarjoaa lupaavia ratkaisuja, tutkimuksissa esiintyy edelleen haasteita, kuten datan kohina, validointimenetelmien puute ja yhteyden puuttuminen mitattujen suureiden ja todellisten vammojen välillä. Kuitenkin

pitkäkestoiset kenttäseurannat ovat mahdollistaneet aiempaa tarkemman kuormituksen ja liikeradan arvioinnin ilman tarvetta laboratorioympäristölle.

Li ym. (2024) kehittivät menetelmän, jossa polven ja lonkan kulmat voidaan estimoida kolmen IMU-anturin avulla useissa dynaamisissa lajeissa, kuten tanssissa, uinnissa ja sulkapallossa. Käyttämällä siirtoppimiseen perustuvaa neuroverkkoa (transfer learning LSTM) he saavuttivat jopa 20 asteen tarkkuuden polvikulman arvioinnissa myös uusissa liikkeissä, joita ei sisällynyt alkuperäiseen opetusaineistoon. Vaikka 20 asteen tarkkuus ei vastaa kliinisten mittausten tarkkuustasoa, se on käyttökelpoinen esimerkiksi urheilukenttä- ja kuntosaliseurannassa. Tämä vähentää tarvetta laajoille yksilölliselle opetusdatalle ja mahdollistaa käytön urheilukentillä ja kuntosaleilla.

Zou ym. (2022) puolestaan esittelivät järjestelmän, joka yhdistää IMU-, paine- ja kaarevuusanturit arvioimaan polvinivelen kuormitusta ja väsymystä. Heidän mallinsa perustui siihen, että lihasväsymys lisää vamman riskiä, ja sitä voidaan arvioida epäsuorasti seuraamalla askelkuorman vaihtelua ja painopisteen siirtymää. Tämä voi olla erityisen hyödyllinen harjoituskuorman säätämisessä vammojen ehkäisemiseksi.

Di Paolo ym. (2021) havaitsivat, että heikko motorinen koordinaatio korreloi muuttuneen alaraajan liikkeen ja kuormitusjakautuman kanssa. Heidän tutkimuksessaan motorisesti heikommilla nuorilla urheilijoilla havaittiin lisääntyntä polven vääntökuormitusta suunnanmuutoksissa, mikä voi lisätä ACL-vamman riskiä.

Myös kaupallisten anturilaitteiden validointia on tutkittu. Benson ym. (2020) validoivat VERT Classic -nimisen kaupallisen IMU-laitteen, joka mittaa hyppymääriä nuorilla koripalloilijoilla. Vaikka laite oli suunniteltu kuormituksen arviointiin, tutkimus osoitti sen kykenevän tunnistamaan yli 15 cm korkeat hyppy luotettavasti verrattuna videopohjaiseen analyysiin. Luotettavuuden arvioinnissa käytettiin intraclass correlation coefficient -menetelmää (ICC), joka mittaa eri

menetelmien tulosten yhtenevyyttä. Tämä osoittaa, että myös kuluttajatuotteilla voi olla merkitystä riskien hallinnassa, erityisesti kuormituksen arvioinnissa.

Lopuksi Zadeh ym. (2021) korostivat tutkimuksessaan, että puettavan datan hyöty riskinarvioinnissa ei perustu yksittäisiin mittareihin vaan niiden yhdistelyyn ja analysointiin koneoppimisen avulla. Heidän analyysinsä osoitti, että esimerkiksi korkea BMI (body mass index, painoindeksi) yhdistettynä toistuviin mekaanisiin kuormituksiin johti suurempaan vammariskiin. Tämä osoittaa, että yksilöllinen mittausdatan profilointi on keskeistä ennakoivassa vammanhallinnassa.

Riskien mittaaminen puettavan teknologian avulla on kehittynyt selvästi pelkistä yksittäisten liikeratojen mittauksista kohti monidimensionaalista, kontekstisidonnaista ja yksilöllistä kuormitusprofiilin arviointia. Useissa tutkimuksissa (Fan ym. 2021; Di Paolo ym. 2023; Zou ym. 2022; Preatoni ym. 2022) osoitettiin, että inertiamittausyksiköiden (IMU) avulla voidaan tarkasti arvioida polven asentoa ja kuormitushetkiä ACL-vammoille tyypillisissä liikkeissä, kuten äkillisissä suunnanmuutoksissa ja laskeutumisissa.

E erityisen keskeiseksi nousee mittausympäristö. Laboratorion tarkkuus tarjoaa syvällistä tietoa biomekaanisista kuormista, mutta useat tutkimukset osoittavat, että todellinen riski tulee esiin vasta kenttäolosuhteissa, joissa pelaajien liike on reaktiivista ja epäennakoitavaa (Di Paolo ym. 2023). Tämä osoittaa tarpeen käyttää dataa, jota voidaan kerätä puettavien sensorien avulla harjoituksissa ja peleissä.

Mittauskohteet ovat laajentuneet kulmista momentteihin, nivelten kiertoliikkeisiin, kuormitukseen ja lihasväsymyksen arviointiin. Esimerkiksi Zou ym. (2022) esittelivät järjestelmän, joka huomioi sekä kaarevuuden että paineantureiden datan, mikä mahdollistaa kuormituksen ja väsymyksen arvioinnin reaaliajassa. Tämä on tärkeää, sillä polvivammojen riski voi nousta nopeasti kumuloituvan mekaanisen rasituksen seurauksena ennen kuin kipu tai toimintahäiriö ilmenee.

Lisäksi uuden sukupolven koneoppimismallit (Li ym. 2024; Zadeh ym. 2021) mahdollistavat entistä kevyemmän ja älykkäämmän analyysin, jossa riskiprofiileja voidaan rakentaa pienemmällä sensori- ja datamäärällä, mutta silti korkealla tarkkuudella. Tämä tekee teknologioista skaalautuvampia myös pienempiin seuroihin ja yksittäisten urheilijoiden käyttöön.

Mittauksen kohdentaminen yksilötasolle (esim. liiketekniikka, koordinaatio, harjoitusmäärät, väsymysprofiilit) mahdollistaa henkilökohtaisemman lähestymistavan vammariskin arviointiin. Myös kuluttajalaitteiden, kuten VERT-IMU:n (Benson ym. 2020), potentiaali kuormitusmonitoroinnissa on noussut esiin, vaikkei se vielä tarjoa yhtä kattavaa biomekaanista analyysiä.

Kaiken kaikkiaan riskien mittaaminen on siirtynyt yksinkertaisesta liikeradan tarkkailusta kohti kokonaisvaltaista, dataohjautuvaa lähestymistapaa. Puettavat sensorit ja älykkäät mallit voivat tunnistaa riskitekijöitä aiemmin, tarkemmin ja realistisemmassa ympäristössä kuin koskaan aiemmin mahdollistaen yksilöllistetyn vammojen ehkäisyn suunnittelun ja seurannan. Tämä luo vankan perustan seuraaville vaiheille, joissa teknologiaa hyödynnetään aktiivisesti ennaltaehkäisevässä toiminnassa ja koneoppimiseen perustuvassa ennustamisessa.

5.2 Ennaltaehkäisevä toiminta

Tutkimusten perusteella puettavien teknologioiden avulla voidaan paitsi mitata vamman riskiä, myös tukea suoraan ennaltaehkäisevää toimintaa antamalla yksilöllistä, reaaliaikaista palautetta liiketekniikasta, kuormituksesta ja väsymyksestä. Harjoittelun ohjaaminen näiden tietojen perusteella voi parantaa liikkeiden laatua ja siten ehkäistä polvivammoja, erityisesti ACL-vaurioita, jotka ovat yleisiä urheilussa.

Viswanathan ym. (2025) korostavat moniulotteisten ennaltaehkäisystrategioiden merkitystä, erityisesti ACL-vammojen kohdalla. Heidän katsauksensa mukaan tehokkain tapa ehkäistä vammoja on yhdistää neuromuskulaarinen harjoittelu, kehonhallinta ja liikeanalyysi. He esittävät, että puettavien laitteiden avulla

voidaan tarkentaa palautetta esimerkiksi lantion ja polven linjauksesta laskeutumisessa ja suunnanmuutoksessa ovat kriittisiä hetkiä ACL-vamman synnyssä. Tämä mahdollistaa ohjelmien yksilöllistämisen urheilijan liikemallien mukaan.

Myös Hermann ja Senner (2021) esittävät, että laskettelu- ja alppihiihdossa käytävissä oleva teknologia, kuten älykkäät siteet ja puettavat sensorit voivat toimia tärkeänä osana ennaltaehkäisyä. He esittävät "teknologisen paradigmanmuutoksen", jossa vammariskiä ei pyritä vain mittaamaan vaan aktiivisesti muokkaamaan esimerkiksi antamalla reaaliaikaista palautetta laskuasennosta tai kuormituksesta.

Arciniega-Rocha ym. (2023) keskittyivät erityisesti puettavan teknologian hyödyntämiseen harrastajaurheilijoilla, joilla virheasennot esimerkiksi kyykkyharjoituksissa voivat johtaa polvivammoihin. He kehittivät älypuettavan laitteen, joka havaitsee esimerkiksi liiallisen polven abduktion tai väärän kulman kyykyn aikana ja antaa käyttäjälle välitöntä palautetta. Tämä on konkreettinen esimerkki siitä, miten ennaltaehkäisevä toiminta voi tapahtua automaattisesti, ilman valmentajan jatkuvaa läsnäoloa.

Preatoni ym. (2022) nostavat esiin myös kuntoutuksen näkökulman: puettavien antureiden avulla voidaan seurata esimerkiksi paluun etenemistä ACL-rekonstruktion jälkeen. Ne mahdollistavat toistojen, kuormituksen ja liikeratojen seuraamisen harjoitusohjelman aikana, mikä auttaa ehkäisemään uusintavammoja liian aikaisen kuormituksen seurauksena.

Zadeh ym. (2021) puolestaan esittävät, että datavetoinen lähestymistapa ennaltaehkäisyyn vaatii selkeää ymmärrystä riskiprofiileista ja niiden muutoksista ajan myötä. Heidän tutkimuksessaan käytettiin koneoppimista tunnistamaan yhdistelmiä kuten korkea BMI ja toistuva mekaaninen kuormitus, jotka yhdessä ennakoivat vammoja. Tämä mahdollistaa ennaltaehkäisevien toimenpiteiden kohdentamisen niille, joilla on suurin riski.

Yhteistä useille tutkimuksille on ajatus yksilöllisestä, jatkuvasta ja automatisoidusta palautteesta. Benjaminse ym. (2024) esittelivät jalkapalloilijoilla käytetyn

mallin, jossa koneoppimismenetelmä tunnisti liikkeen aikaisen kuormituksen nivelissä. Tätä dataa käytettiin myöhemmässä vaiheessa harjoitussuunnitteluun. Mallin avulla voidaan siis palautteen lisäksi kehittää proaktiivisia strategioita harjoituskuorman ja liiketekniikan säätelyyn.

Myös kuluttajakäyttöön suunnatut teknologiat voivat tukea ehkäisyä. Benson ym. (2020) osoittivat, että VERT-IMU pystyy arvioimaan hyppymääriä tarkasti, mikä mahdollistaa kuormituksen seuraamisen ja harjoitusmäärien säätelyn erityisesti nuorten urheilijoiden osalta. Harjoituskuorman seuranta on keskeinen osa rasitusvammojen ehkäisyä.

Tutkimukset osoittavat selvästi, että puettavaa teknologiaa voidaan käyttää aktiivisesti vammojen ennaltaehkäisyssä ei vain riskin arviointiin. Reaaliaikainen palaute liikkeen suorituksesta, harjoituskuormasta ja väsymystilasta mahdollistaa yksilöllisen ohjauksen, joka parantaa tekniikkaa ja vähentää kudoksiin kohdistuvaa haitallista kuormitusta. Tämä on erityisen tärkeää ACL-vammojen kohdalla, joissa pienetkin tekniset erot voivat vaikuttaa merkittävästi vaurioriskiin.

Ennaltaehkäisyä tukevat järjestelmät vaihtelevat kevyistä harrastajakäyttöön suunnatuista wearables-laitteista (Arciniega-Rocha ym. 2023; Benson ym. 2020) aina laajoihin koneoppimismalleihin, jotka mukauttavat harjoittelua yksilöllisten riskien perusteella (Benjaminse ym. 2024; Zadeh ym. 2021). Lisäksi teknologiatuettu palaute voidaan integroida valmennukseen, kuntoutukseen ja palautumisen seurantaan, jolloin kokonaisvaltainen ehkäisystrategia on mahdollinen.

Ennaltaehkäisevä toiminta ei siis ole pelkkä harjoitussuunnitelma tai ohjelma vaan jatkuva, adaptiivinen prosessi, jota puettava teknologia tukee älykkäällä ja käytännönläheisellä tavalla.

5.3 Vammojen ennustaminen koneoppimisella

Koneoppimisen hyödyntäminen urheiluvammojen ennustamisessa on edennyt merkittävästi viime vuosina, erityisesti puettavan teknologian mahdollistaman liikemittausdatan yleistyessä. Koneoppimismallit kykenevät tunnistamaan monimutkaisia biomekaanisia poikkeamia ja kuormitusprofiileja, jotka voivat edeltää vammautumista erityisesti polven eturistisiteen (ACL) vaurioita.

Jauhiainen ym. (2022) kehittivät koneoppimismalleja, jotka hyödynsivät liikemittausdataa kerättyä dataa ACL-vamman ennustamiseen. Mallit, kuten pää- ja syvät neuroverkot, kykenivät erottamaan korkean riskin urheilijat matalariskisistä jopa yksittäisten liikkeiden perusteella. Tärkeimpiä tunnistettuja muuttujia olivat esimerkiksi polven valgus-asento laskeutumisen aikana sekä alaraajan kiihtyvyyden profiilit suunnanmuutoksissa.

Benjaminse ym. (2024) puolestaan kehittivät mallin, joka käytti kenttätilanteista kerättyä IMU-dataa yhdistettynä laboratorioissa mitattuihin nivelkuormituksiin. Näin koulutettu koneoppimismalli pystyi tunnistamaan liikemalleja, jotka liittyivät kohonneeseen ACL-vamman riskiin. Tulokset osoittivat, että vain kenttäkelpoinen, todellista pelitilannetta vastaava data mahdollistaa uskottavan vamman ennustamisen.

Zadeh ym. (2021) lähestyivät aihetta kokonaisvaltaisemmin ja rakensivat koneoppimismalleja yhdistellen useita muuttujia, kuten painoindeksi (BMI), liikekiihdytykset, harjoituskuorma ja kuormitusmäärien kehitys ajan kuluessa. Heidän mallinsa pystyivät erottamaan korkean riskin profiilit varhaisessa vaiheessa, mikä tukee dataperustaista vammojen hallintaa erityisesti kontaktittomissa vammoissa.

Arciniega-Rocha ym. (2023) kehittivät yksinkertaisen, kevytrakenteisen koneoppimismallin, joka tunnisti virheelliset kyykkyliikkeet harrastajaurheilijoilla. Malli koulutettiin erottamaan muun muassa polven liiallinen abduktio ja väärät fleksioasteet, ja se toimi reaaliaikaisesti suoraan puettavassa laitteessa. K-NN-

menetelmällä saavutettiin 85 %:n tarkkuus, mikä osoitti että koneoppimista voidaan hyödyntää kevyissä, ei-verkkopohjaisissa ratkaisuisissa.

Myös Li ym. (2024) käyttivät koneoppimista polven ja lonkan kulmien estimointiin hyödyntäen siirtoppimista. Malli koulutettiin pienellä määrällä dataa ja yleisty hyvin aiemmin näkemättömiin liikkeisiin eri urheilulajeissa. Tämä lähestymistapa mahdollistaa laajemman käyttöönoton ilman tarvetta mittaviin lajikohtaisiin koulutusaineistoihin.

Preatoni ym. (2022) huomauttavat, että koneoppimisen käyttö vammojen ennustamisessa ei rajoitu pelkkään riskin tunnistamiseen. Mallien avulla voidaan myös valita yksilöllisesti relevantteja mittareita kuten liiketasapaino, symmetria tai väsymykseen viittaavat piirteet ja näin kohdentaa mittausresursseja urheilijan profiiliin mukaan.

Koneoppiminen tarjoaa merkittävän lisäarvon polvivammojen ennustamiseen, kun mittausdata on tarpeeksi kattavaa ja kerätty realistisissa olosuhteissa. Mallit kykenevät tunnistamaan yksittäisten liikkeiden tai kuormitusmuutosten perusteella urheilijoita, joilla on kohonnut vammariski usein ennen kuin kliinisiä oireita ilmenee. Tämä mahdollistaa aikaisemman puuttumisen ja yksilöllisen riskinhallinnan.

Menetelmien kirjo ulottuu perinteisistä valvotuista malleista (esim. päätöspuut, SVM) syviin neuroverkkoihin ja siirto-oppimiseen. Lisäksi mallien keventäminen mahdollistaa niiden ajon suoraan puettavissa laitteissa ilman ulkoista laskentaa. Näin koneoppiminen voi toimia osana urheilijan päivittäistä harjoittelua ja ennaltaehkäisyä. Vammojen ennustamisesta tulee dynaaminen, jatkuvasti päivittyvä prosessi, joka täydentää biomekaanista mittausta entistä vaikuttavammin.

5.4 Puettavan teknologian haasteet ja rajoitukset polvivammojen ehkäisyssä

Vaikka puettavat teknologiat tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia urheiluvammojen ehkäisyssä, niiden hyödyntämiseen liittyy myös monia haasteita, jotka

rajoittavat käyttöönottoa, tarkkuutta ja vaikuttavuutta. Nämä haasteet liittyvät muun muassa datan laatuun, käyttäjäystävällisyyteen, mittaustarkkuuteen, teknologian kustannuksiin sekä algoritmien yleistettävyyteen eri urheilijoilla ja lajeissa.

Preatoni ym. (2022) korostavat, että yksi keskeisimmistä haasteista on puettavien sensoreiden tuottaman datan validointi ja standardointi. Monet tutkimukset käyttävät pieniä otoksia tai hyvin tarkkaan rajattuja liikeanalyyssejä, jolloin mallien soveltaminen laajempaan käyttöön voi olla ongelmallista. Lisäksi datan kohina, mittausvirheet ja liikkeen luonnollinen vaihtelu voivat heikentää mallien luotettavuutta.

Di Paolo ym. (2023) osoittivat, että vaikka laboratorio-olosuhteissa mitatut ACL-riskin biomarkerit voidaan tunnistaa tarkasti, ne eivät välttämättä heijastu pelikentällä. Kenttätilanteissa havaittiin esimerkiksi, että myös matalan riskin pelaajat saattoivat suorittaa liikkeitä, joita laboratorio piti korkeariskeinä. Tämä nostaa esiin ekologisen validiteetin ongelman: voiko laboratorio- tai yksittäistilanne ennustaa riittävän luotettavasti todellista pelitilannetta?

Myös käyttäjäkokemus ja käytännön sovellettavuus voivat rajoittaa teknologian hyötyjä. Esimerkiksi Arciniega-Rocha ym. (2023) kehittivät mallin, joka toimi reaaliaikaisesti mikro-ohjaimessa ja antoi palautetta kyykkytekniikasta. Vaikka laite oli teknisesti toimiva, käytännön haasteena on, miten urheilija vastaanottaa ja hyödyntää palautetta ja miten järjestelmä mukautuu yksilöllisiin eroihin.

Zadeh ym. (2021) huomauttavat, että moni koneoppimismalli tarvitsee suuria määriä dataa ja useita mittausmuuttujia toimiakseen luotettavasti. Tämä voi rajoittaa mallien soveltuvuutta pienissä urheiluyhteisöissä tai lajeissa, joissa resursseja jatkuvaan mittaukseen ei ole. Lisäksi algoritmien yleistettävyys eli kyky soveltaa yhtä mallia eri urheilijoihin ja liikeprofileihin on edelleen kehityksen kohteena.

Li ym. (2024) käsittelivät mallien yleistettävyttä siirto-oppimisen keinoin, mutta korostivat samalla, että tietyt urheilulajit tai liikkeet vaativat edelleen lajikohtaista

hienosäätöä. Vaikka kolmen IMU-anturin järjestelmä oli kevyt ja käytännöllinen, tarkkuus laski uusilla liikkeillä, joihin malli ei ollut alun perin koulutettu. Tämä voi rajoittaa erityisesti lajien välistä sovellettavuutta.

Toinen keskeinen rajoite liittyy teknologian soveltamiseen nuorilla tai harrastajatasen urheilijoilla. Benson ym. (2020) validoivat VERT-anturin hyppymäärien mittaamiseen nuorilla koripalloilijoilla, mutta osoittivat samalla, että hypyn korkeus- ja tyyppitunnistuksessa oli vaihtelua verrattuna videopohjaiseen analyysiin. Tämä asettaa rajoituksia kuormituksen arvioinnille, jos tavoitteena on tarkka kuormitusseuranta vammojen ehkäisyssä.

Lisäksi tietoturva ja yksityisyyteen liittyvät kysymykset nousevat esiin, kun henkilökohtaisia liiketietoja kerätään, analysoidaan ja mahdollisesti tallennetaan ulkoisiin palvelimiin. Tämä voi rajoittaa erityisesti ammattilaisurheilussa teknologian käyttöönottoa, mikäli tietoa ei voida hallita turvallisesti.

Vaikka puettavan teknologian mahdollisuudet ovat kiistattomat, niiden käyttö vammojen ehkäisyssä ei ole ongelmaton. Teknologisten ratkaisujen käyttöönottoa rajoittavat useat tekijät. Yksi merkittävimmistä haasteista on mittausdatan tarkkuus ja siihen liittyvä kohina, joka voi vaikeuttaa luotettavan analyysin tekemistä. Lisäksi laboratorio-olosuhteissa mitatut tulokset eivät aina heijasta todellisia kenttätilanteita, mikä luo ristiriidan tutkimuksen ja käytännön välille.

Koneoppimismallit vaativat usein suuria määriä dataa ja yksilöllistä hienosäätöä toimiakseen optimaalisesti, mikä voi olla resurssien puolesta haastavaa. Myös käyttäjäystävällisyys ja reaaliaikaisen palautteen käytännöllisyys voivat muodostua esteiksi erityisesti harrastetason urheilussa. Tämän lisäksi puettavien järjestelmien laajamittainen käyttö edellyttää riittäviä taloudellisia ja teknisiä resursseja, ja tietoturva sekä yksityisyyden suoja on varmistettava luotettavalla tavalla.

Näiden haasteiden vuoksi puettavan teknologian tehokas hyödyntäminen vammojen ehkäisyssä edellyttää tarkkaa kohdentamista, käyttäjälähtöistä suunnittelua sekä mallien jatkuvaa päivittämistä. Tarvitaan myös lisää tutkimusta siitä,

miten teknologia saadaan saumattomaksi osaksi urheilijan harjoittelua ja valmistusprosessia ei vain mittauslaitteeksi, vaan aidoksi ja vaikuttavaksi ennaltaehkäisyn työkaluksi.

6 Pohdinta

Tässä luvussa tarkastellaan kirjallisuuskatsauksen keskeisiä havaintoja, arvioidaan käytetyn aineiston luotettavuutta ja laadukkuutta sekä esitetään jatkotutkimusehdotuksia. Pohdinnassa pyritään tuomaan esiin, kuinka puettavat teknologiat voivat vaikuttaa urheilussa tapahtuvien polvivammojen ehkäisyyn, millaisia rajoitteita nykyisessä tutkimuksessa on havaittavissa ja mihin suuntaan tulevaa tutkimusta olisi tarkoituksenmukaista ohjata.

6.1 Puettavien laitteiden käyttö urheilussa tapahtuvien vammojen ehkäisyssä

Kirjallisuuskatsauksen perusteella puettavat laitteet tarjoavat merkittävää potentiaalia urheilussa tapahtuvien polvivammojen ehkäisyssä. Erityisesti sensorteknologiaa hyödyntävät laitteet, kuten inertiamittausyksiköt (IMU) ja paineanturit, mahdollistavat liikkeen seurannan ja analysoinnin reaaliaikaisesti. Tällaiset mitaukset voivat auttaa tunnistamaan riskitekijöitä, kuten virheellisiä liikemalleja tai liiallista kuormitusta, ennen kuin ne johtavat vammoihin.

Lisäksi osassa tutkimuksista oli otettu käyttöön koneoppimismalleja datan analysointiin, mikä paransi riskitekijöiden tunnistamisen tarkkuutta. Kuitenkin tutkimukset erosivat toisistaan laitteiden tyypeissä, analyysimenetelmissä ja koeasetelmissä, mikä vaikeuttaa yleispätevien johtopäätösten tekemistä. Käytännön sovelluksissa suurin haaste liittyy siihen, miten näitä teknologioita voidaan integroida osaksi urheilijoiden päivittäistä harjoittelua ilman, että ne häiritsevät toimintaa.

6.2 Tulevaisuuden näkymät ja kehityssuunnat

Puettavan teknologian kehitys näyttää etenevän kohti entistä kevyempiä, huomaamattomampia ja käyttäjäystävällisempiä ratkaisuja. Tulevaisuudessa on todennäköistä, että nämä laitteet integroituvat yhä paremmin osaksi urheilijan varustusta ja päivittäistä harjoittelua, jolloin teknologian käyttöönotto yleistyy myös nuorten ja harrastajien parissa.

Koneoppimismallit tulevat todennäköisimmin kehittymään yksilöllisempään ja jatkuvasti päivittyvään suuntaan. Sen sijaan, että mallinnetaan vain yksittäinen liike, tulevaisuudessa voidaan seurata urheilijan kuormitusta, palautumista ja liikeratojen muutoksia ajan kuluessa. Tämä mahdollistaa entistä tarkemman ja henkilökohtaisemman vamman ehkäisyn.

On myös odotettavissa, että koneoppimista sovelletaan laajemmin siirto-oppimisen ja kevyiden mallien avulla, jolloin tarkkaa analytiikkaa voidaan toteuttaa pienemmillä datamäärillä ja edullisemmilla laitteilla. Samalla käyttäjäkokemukseen tullaan todennäköisesti panostamaan: palaute voi tulevaisuudessa olla reaaliaikaista, visuaalisesti havainnollistettua ja helposti hyödynnettävää valmennuksessa.

Puettavien laitteiden tullaan todennäköisimmin yhdistämään muihin terveyteen liittyviin mittareihin, kuten uneen, sykevälivaihteluun ja palautumiseen. Näin muodostuu kokonaisvaltaisempi kuva urheilijan tilasta, jonka avulla riskiprofiileja voidaan seurata ja päivittää jatkuvasti.

Puettava teknologia ei siis todennäköisesti korvaa asiantuntijaa, mutta toimii jatkossa yhä vahvemmin tukena päätöksenteossa ja harjoittelun yksilöllistämässä. Ehkäisy ei enää perustu yksittäisiin testituloksiin, vaan jatkuvaan, ennakkoivaan datan hyödyntämiseen osana urheilijoiden ja taustajoukkojen arkea.

6.3 Kirjallisuuskatsauksen luotettavuus ja laatu

Kirjallisuuskatsauksessa hyödynnettiin vertaisarvioituja lähteitä, jotka on haettu kansainvälisesti arvostetuista tietokannoista, kuten PubMed ja ScienceDirect. Tämä tukee tiedon luotettavuutta ja tieteellistä uskottavuutta. Useimmat lähteet olivat viime vuosilta, mikä vahvistaa katsauksen ajankohtaisuutta. Hakustrategia oli suunniteltu niin, että se kattoi monipuolisesti aiheeseen liittyvät näkökulmat, mutta rajasi pois epäolennaiset julkaisut.

On kuitenkin tärkeää huomioida, että osa tarkastelluista tutkimuksista oli vielä alkuvaiheen pilottiluontoisia, eikä niiden tutkimusasetelmat tai otoskoot olleet laajoja. Monissa tapauksissa tutkimuksiin osallistui vain rajallinen määrä koehenkilöitä, mikä heikentää tulosten yleistettävyyttä ja vaikuttavien johtopäätösten tekemistä. Lisäksi tutkimusmenetelmien ja käytettyjen teknologioiden vaihtelu vaikeutti tulosten vertailtavuutta.

6.4 Jatkotutkimusehdotukset

Tulevissa tutkimuksissa olisi hyödyllistä toteuttaa laajempia ja pidempikestoisia seurantatutkimuksia, joissa hyödynnetään puettavia laitteita osana urheilijoiden harjoittelua ja kilpailutoimintaa. Näin voitaisiin tarkemmin arvioida teknologian vaikuttavuutta vammojen ehkäisyssä pitkällä aikavälillä. Lisäksi olisi tärkeää tutkia puettavien laitteiden käyttöä eri tasoilla urheilijoilla, jotta saataisiin kattavampaa tietoa siitä, miten ne soveltuvat sekä huippu- että harrasteurheiluun.

Tutkimusta tulisi suunnata myös käytettävyyteen ja käyttäjäkokemukseen liittyviin näkökulmiin, jotta puettavat laitteet voidaan integroida osaksi urheilijoiden arkea ilman, että ne häiritsevät harjoittelua tai suoritusta. Tekoälyn ja koneoppimisen hyödyntämistä datan analysoinnissa tulisi kehittää edelleen, erityisesti yksilöllisten riskiprofiilien ja varhaisten varoitusmerkkien tunnistamisessa.

Lisäksi olisi suositeltavaa tehdä yhteistyötä tunnettujen polvitukien ja -suojien valmistajien kanssa, jotta teknologiaa voitaisiin yhdistää jo olemassa oleviin,

hyväksytyihin tukiratkaisuihin. Tällainen integrointi voisi parantaa sekä käyttömukavuutta että käyttöönottoa, ja samalla tuoda teknologian lähemmäs käytännön urheilutoimintaa. Yhteistyö alan toimijoiden kanssa voisi myös edistää tuotteiden kaupallistamista ja levittämistä laajempaan käyttöön.

7 Yhteenveto

Tämä insinööri työ tarkastelee, miten puettavaa teknologiaa ja koneoppimista voidaan hyödyntää polvivammojen, erityisesti eturistisidevammojen (ACL), ehkäisyssä urheilussa. Työ perustuu narratiiviseen kirjallisuuskatsaukseen, jossa analysoitiin 13 vertaisarvioitua tutkimusta aiheeseen liittyen. Polvivammat ovat urheilijoilla yleisiä ja usein vakavia vammoja, jotka voivat vaatia pitkiä kuntoutusjaksoja ja vaarantaa urheilu-uran jatkumisen. Työn tarkoituksena oli selvittää, millaisia teknologisia ratkaisuja on kehitetty polvivammojen riskin mittaamiseen, niiden ennaltaehkäisyyn sekä vammojen ennustamiseen koneoppimisen avulla.

Tulokset osoittivat, että inertiamittausyksiköt ovat käyttökelpoisia polvivammojen riskien arvioinnissa erityisesti kenttäolosuhteissa. Ne mahdollistavat monipuolisen liikeanalyysin ilman laboratorio-olosuhteita. Yhdistämällä useita tietolähteitä, kuten harjoituskuormaa ja aiempia vammoja, voidaan parantaa riskiarvioinnin tarkkuutta. Ennaltaehkäisevien toimien osalta havaittiin, että älykkäät järjestelmät, kuten paine- ja EMG-anturit, voivat antaa urheilijalle reaaliaikaista palautetta suoritusasennosta ja rasituksesta. Nämä järjestelmät voivat auttaa ehkäisemään vammoja, kun ne yhdistetään osaksi harjoittelua ja palautumisen seurantaa. Joissain tutkimuksissa teknologia jo osoitti konkreettista suojaavaa vaikutusta.

Koneoppimista hyödynnettiin erityisesti vammojen ennustamiseen. Tutkimuksissa käytetyt mallit erilaiset koneoppimismallit antoivat lupaavia tuloksia, mutta haasteeksi nousivat pienten aineistojen heikko yleistettävyyttä sekä puutteet validoinnissa. Joissain tapauksissa siirto-oppiminen ja neuroverkot paransivat ennustustarkkuutta, mutta liikkeiden monimutkaisuus vaikutti edelleen negatiivisesti mallien suorituskykyyn.

Yhteenvetona voidaan todeta, että puettavat laitteet tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia polvivammojen ehkäisyyn urheilussa, erityisesti kun niitä täydennetään tekoälypohjaisella analytiikalla. Vaikka osa teknologioista on vielä kehitysvaiheessa, niiden käyttöönotto ja hyödyntäminen urheilijoiden harjoittelun tukena voi tulevaisuudessa vähentää vammojen määrää. Teknologian hyödyntäminen vaatii kuitenkin vielä lisää tutkimusta, erityisesti sen vaikuttavuuden arvioimiseksi eri urheilulajeissa ja eri tasoilla.

Lähteet

Aksović Aksović, N., Bubanj, S., Bjelica, B., Kocić, M., Lilić, L., Zelenović, M., Stanković, D., Milanović, F., Pajović, L., Čaprić, I., Milić, V., Dobrescu, T. & Su-faru, C. 2024. 'Sports Injuries in Basketball Players: A Systematic Review', *Life*, 14(7), art. 898. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://pub-med.ncbi.nlm.nih.gov/39063651/>. Viitattu 9.2.2025.

Amirneni, A., Elahi, J., Iftikhar, N. & Ganti, L. 2024. 'Mitigating the Risks of Lower Extremity Injuries in Soccer', *Orthopedic Reviews*, 16. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://orthopedicreviews.openmedicalpublishing.org/article/122315-mitigating-the-risks>. Viitattu 17.2.2025.

Applied Biomechanics in Sports Performance, Injury Prevention and Rehabilitation. 2023. Toim. Alfonso Penichet-Tomás. MDPI. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.mdpi.com/books/reprint/4681-applied-biomechanics>. Viitattu 16.3.2025.

Arciniega-Rocha, R.P., Erazo-Chamorro, V.C., Rosero-Montalvo, P.D. & Szabó, G. 2023. 'Smart Wearable to Prevent Injuries in Amateur Athletes', *Information*, 14(7), 402. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/info14070402>. Viitattu 2.3.2025.

Athos. [verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.liveathos.com/>. Luettu 23.2.2025.

Baker, H.P., Pirkle, S., Cahill, M., Reddy, M., Portney, D. & Athiviraham, A. 2021. 'The Injury Rate in National Football League Players', *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, 3(4), e1147–e1154. Verkkoaineisto. Saatavilla: [https://www.arthroscopysportsmedicineandrehabilitation.org/article/S2666-061X\(21\)00080-8/fulltext](https://www.arthroscopysportsmedicineandrehabilitation.org/article/S2666-061X(21)00080-8/fulltext). Viitattu 9.3.2025.

Benjaminse, A., Nijmeijer, E., Gokeler, A. & Di Paolo, S. 2024. 'Application of Machine Learning Methods to Investigate Joint Load in Agility', *Sensors*, 24(11). Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/s241113652>. Viitattu 1.3.2025.

Benson, L.C., Tait, T.J., Befus, K., Choi, J., Hillson, C., Stilling, C., Grewal, S., MacDonald, K., Pasanen, K. & Emery, C.A. 2020. 'Validation of a Commercially Available Inertial Measurement Unit', *Journal of Sports Sciences*, 38(8), 928–936. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1737360>. Viitattu 6.4.2025.

Bickley, R.J., Hazim, N.Y., Sy, J.W. & Nute, D.W. 2023. 'An Epidemiological Study of Martial Arts Injuries', *Injury*, 54(12), art. 111089. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37867023/>. Viitattu 15.2.2025.

Bove, T., Rodas, G., Pedret, C., Esparza, F. & Casals, M. 2019. 'Analysis of the Injuries of a Professional Basketball Team', *Apunts Sports Medicine*, 54(204), 139–147. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.apunts.org/en-analysis-injuries-professional-basketball-team>. Viitattu 30.3.2025.

Bozkurt, M. & Açar, H.İ. 2021. *Clinical Anatomy of the Knee*. E-kirja. Springer International Publishing.

Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S. & Vannozzi, G. 2018. 'Trends Supporting the In-Field Use of Wearable Inertial Sensors', *Sensors (Basel)*, 18(3), 873. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/s18030873>. Viitattu 8.3.2025.

Clifton, D.R., Onate, J.A., Schussler, E., Djoko, A., Dompier, T.P. & Kerr, Z.Y. 2017. 'Epidemiology of Knee Sprains', *Journal of Athletic Training*, 52(5), 464–473. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5455250/>. Viitattu 23.3.2025.

Di Paolo, S., Nijmeijer, E.M., Bragonzoni, L., Gokeler, A. & Benjaminse, A. 2023. 'Definition of High-Risk Motion Patterns for Female ACL Injury', *Sensors*

(Basel), 23(4), 2176. Verkkoaineisto. Saatavilla:
<https://doi.org/10.3390/s23042176>. Viitattu 5.4.2025.

Di Paolo, S., Zaffagnini, S., Pizza, N., Grassi, A. & Bragonzoni, L. 2021. 'Poor Motor Coordination Elicits Altered Lower Limb Biomechanics', *Sensors*, 21(13), 4371. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/s21134371>. Viitattu 13.4.2025.

Fan, B., Xia, H., Xu, J., Li, Q. & Shull, P.B. 2021. 'IMU-Based Knee Flexion, Abduction and Internal Rotation Estimation', *Journal of Biomechanics*, 124, 110549. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110549>. Viitattu 9.2.2025.

Haaja, M. 2016. Juoksussa Esiintyvien Polven Rasitusvammojen Tunnistaminen. Opinnäytetyö. Theseus. Verkkoaineisto. Saatavilla:
<https://www.theseus.fi/handle/10024/104717>. Viitattu 2.2.2025.

Halinen, M. 2025. 'Polvikipu', Lääkärikirja Duodecim. Terveyskirjasto. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00797>. Viitattu 6.4.2025.

Haraldsdottir K & Watson AM 2021. Psychosocial impacts of sports-related injuries in adolescent athletes. *Current Sports Medicine Reports*, 20(2), 104–108.

Hermann, A. & Senner, V. 2021. 'Knee Injury Prevention in Alpine Skiing. A Technological Paradigm Shift Towards a Mechatronic Ski Binding', *Journal of Science and Medicine in Sport*, 24(10), 1038–1043. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2020.06.009>. Viitattu 1.3.2025.

Hirvelä, J., Tuominen, M., Airaksinen, O., Hänninen, T., Lindblad, N., Ryhänen, H., Tikanto, J. & Parkkari, J. 2024. 'Acute Injuries in Male Elite Ice Hockey Players: A Prospective Cohort Study', *JSAMS Plus*, 4, art. 100068. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jsampl.2024.100068>. Viitattu 15.3.2025.

Howden. 2022. 'Football Injury Index: September 2022'. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.howdengroup.com/sites/corporate.howdenprod.com/files/2022-09/Football-Injury-Index-September-22.pdf>. Viitattu 31.3.2025.

Hull, P.A., Collins, A.P., Maag, B., Schwartzman, J., Gapinski, Z.A. & Service, B.C. 2024. 'Mechanism of Knee Injuries in the National Basketball Association: A Video-Based Analysis', *Advances in Orthopedics*, 2024, art. 5594149. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38682118/>. Viitattu 18.3.2025.

Hämäläinen, A. & Lahtinen, J. 2024. 'Tekoälypohjaisen Liikeanalyysin Hyödyntäminen Urheiluvalmennuksessa: Fysioterapeuttipiskelijöiden kokemuksia liikeanalyysisovelluksen käytöstä. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2024120432937>. Luettu 15.3.2025.

Jauhiainen Susanne, Kauppi Jukka-Pekka, Krosshaug Tron, Bahr Roald, Bartsch Julia & Äyrämö Sami. 2022. 'Predicting ACL Injury Using Machine Learning on Data From an Extensive Screening Test Battery of 880 Female Elite Athletes', *American Journal of Sports Medicine*, 50(11), 2917–2924. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.1177/03635465221112095>. Viitattu 14.3.2025.

Jeong, L. & Li, D. 2024. 'Psychological Well-Being From Sports Injuries in Adolescence: A Narrative Review', *Cureus*, 16(7), e64018. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.7759/cureus.64018>. Viitattu 31.3.2025.

Kangas, N. 2021. 'Yleisimmät Polven Vammat ja Niiden Ennaltaehkäisy'. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021060414296>. Viitattu 31.3.2025.

Knuutila, Timo. 2021. Tietotekniikan Laitos. Tekoälyn Perusteet. Turun yliopisto.

Kämäräinen, Joni. 2023. Koneoppimisen Perusteet. E-kirja. Otatieto.

Lee, J., Wheeler, K. & James, D.A. 2019. 'Wearable Sensors in Sport: A Practical Guide to Usage and Implementation'. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3777-2>. Luettu 4.4.2025.

Li, J., Zhu, K., Li, D., Kang, P. & Shull, P.B. 2024. '3D Knee and Hip Angle Estimation With Reduced Wearable IMUs via Transfer Learning During Yoga, Golf, Swimming, Badminton, and Dance', *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 32, 325–338. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2024.3349639>. Viitattu 31.3.2025.

Li, R.T., Kling, S.R., Salata, M.J., Cupp, S.A., Sheehan, J. & Voos, J.E. 2016. 'Wearable Performance Devices in Sports Medicine', *Sports Health*, 8(1), 74–78.

Makuch, R., Kucharski, A., Pilarski, K., Chrościcka, A., Gała, K., Czajka, A., Leonard, P., Michalska, S., Dewicka, M. & Wawrzyniak, A.M. 2024. 'Knee Joint Injuries in Football Players: Types of Injuries, Etiology, Diagnostics and Prevention', *Quality in Sport*, 15, 519–545. Verkkoaineisto. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/382019190_Knee_joint_injuries_in_football_players_types_of_injuries_etiology_diagnostics_and_prevention. Viitattu 31.3.2025.

Myontec. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.myontec.com/>. [Luettu 6.4.2025].

Nicolini, A.P., de Carvalho, R.T., Matsuda, M.M., Sayum, J.F. & Cohen, M. 2014. 'Common Injuries in Athletes' Knee: Experience of a Specialized Center', *Acta Ortopédica Brasileira*, 22(3), 127–131. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25061417/>. Viitattu 31.3.2025.

Ornon, G., Ziltener, J.-L., Fritschy, D. & Menetrey, J. 2020. 'Epidemiology of Injuries in Professional Ice Hockey: A Prospective Study Over Seven Years', *Journal of Experimental Orthopaedics*, 7, art. 87. Verkkoaineisto. Saatavilla:

<https://jeo-esska.springeropen.com/articles/10.1186/s40634-020-00300-3>. Viitattu 31.3.2025.

Pasanen, Kati, Heidi Haapasalo, Peter Halen, Jari Parkkari, ja Jukka Aho. Urheiluvammojen Ehkäisy, Hoito Ja Kuntoutus. 1. painos. Lahti: VK-Kustannus Oy.

Pearl, David, Intriligator, Jason & Liu, Wei 2025. 'Seamless Integration: The Evolution, Design, and Future Impact of Wearable Technology', arXiv preprint arXiv:2502.05797. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://arxiv.org/html/2502.05797v1>. Viitattu 4.4.2025.

Pocecco, E. & Ruedl, G. 2018. 'Injuries in Martial Arts and Combat Sports: Prevalence, Characteristics and Mechanisms', *Science & Sports*, 33(3), 147–153. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0765159718300388>. Viitattu 31.3.2025.

Preatoni, E., Bergamini, E., Fantozzi, S., Giraud, L.I., Orejel Bustos, A.S., Vannozzi, G. & Camomilla, V. 2022. 'The Use of Wearable Sensors for Preventing, Assessing, and Informing Recovery From Sport-Related Musculoskeletal Injuries: A Systematic Scoping Review', *Sensors*, 22(9), 3225.

PRISMA 2020. 'PRISMA 2020 Flow Diagram'. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram>. Viitattu 26.2.2025.

PubMed Overview. 2023. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/about/>. Päivitetty 8.15.2023. Luettu 3.1.2025.

Rebelo, A., Martinho, D.V., Valente-Dos-Santos, J., Coelho-E-Silva, M.J. & Teixeira, D.S. 2023. 'From Data to Action: A Scoping Review of Wearable Technologies and Biomechanical Assessments Informing Injury Prevention Strategies in Sport', *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 15, art. 169. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38098071/>. Viitattu 31.3.2025.

Saal, J.A. 1991. 'Common American Football Injuries', *Sports Medicine*, 12(2), 132–147. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1947533/>. Viitattu 31.3.2025.

Salmela, Johanna. 2017. *Urheiluvammat, Ennaltaehkäisy ja Monipuolinen Harjoittelu Voimistelussa: Sisällön Tuottaminen Terve Voimistelijä -maailmaan. Opinnäytetyö.* Haaga-Helia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.theseus.fi/handle/10024/131699>. Viitattu 31.3.2025.

Salminen, Ari. 2011. *Mikä Kirjallisuuskatsaus? Johdatus Kirjallisuuskatsauksen Tyyppeihin ja Hallintotieteellisiin Sovelluksiin.* Vaasan yliopiston julkaisuja. Opetusjulkaisuja 62. Vaasan yliopisto. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-476-349-3>. Luettu 4.1.2025.

ScienceDirect: Elsevier's Premier Platform of Peer-Reviewed Scholarly Literature. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/>. Luettu 6.1.2025.

Seshadri, D.R., Li, R.T., Voos, J.E., Rowbottom, J.R., Alfes, C.M., Zorman, C.A. & Drummond, C.K. 2019. 'Wearable Sensors for Monitoring the Internal and External Workload of the Athlete', *NPJ Digital Medicine*, 2, 71.

Tekscan. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-mapping-sensors/flexiforce-sensors>. Luettu 6.4.2025.

Terve Urheilija. 2025. 'Polvivammat – Eturistisidevammat – Polven Rasitusvammat'. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://terveurheilija.fi/urheiluvammojen-ennaltaehkaisy/polvi-polvivammat/>. Viitattu 31.3.2025.

Terveyskirjasto. 2025. 'Polvivammat', *Lääkärikirja Duodecim*. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00772>. Viitattu 31.3.2025.

Tolonen, Ari. 2020. 'Teknologia Ohjaa Kuntoutujaa Kädestä Pitäen', Aalto University Magazine, 27, 24–25. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.aalto.fi/fi/uutiset/teknologia-ohjaa-kuntoutujaa-kadesta-pitaen>. Viitattu 20.3.2025.

Tuominen, M., Stuart, M.J., Aubry, M., Kannus, P. & Parkkari, J. 2015. 'Injuries in Men's International Ice Hockey: A 7-Year Study of the International Ice Hockey Federation Adult World Championship Tournaments and Olympic Winter Games', British Journal of Sports Medicine, 49(1), 30–36. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://bjsm.bmj.com/content/49/1/30>. Viitattu 31.3.2025.

UKK-instituutti. 2023. Liikuntavammojen Ehkäisy Edistää Liikkumista ja Säästää Rahaa. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://ukkinstituutti.fi/liikkuminen/liikkuminen-saastaa-rahaa/liikuntavammojen-ehkaisy-edistaa-liikkumista-ja-saastaa-rahaa/>. Julkaistu 11.12.2023. Luettu 31.3.2025.

Viswanathan, Vibhu Krishnan, Vaishya, Raju, Iyengar, Karthikeyan P., Jain, Vijay Kumar & Vaish, Abhishek. 2025. 'Strategies for Preventing Anterior Cruciate Ligament Injuries in Athletes: Insights From a Scoping Review', Journal of Orthopaedics. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jor.2025.01.001>. Viitattu 31.3.2025.

Xsens. 2024. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://www.movella.com/products/motion-capture/xsens-mvn-animate>. Luettu 6.4.2025.

Zadeh, Amir, Taylor, David, Bertso, Margaret & Bruce, Scott L. 2021. 'Predicting Sports Injuries With Wearable Technology and Data Analysis', Information Systems Frontiers. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.1007/s10796-020-10018-3>. Viitattu 31.3.2025.

Zou, Tengyue, Huang, Haojun, Huang, Xuanyu, Chen, Jialun, Pan, Xiaodong & Xin, Jiawei. 2022. 'Wearable Knee Joint Fatigue Estimating System Based on Curvature and Pressure Sensing', Technology and Health Care, 30(6), 1489–

1502. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://doi.org/10.3233/THC-213579>. Viitattu 31.3.2025.

Öztürk, S. & Kılıç, D. 2013. 'What Is the Economic Burden of Sports Injuries?', *Eklemler Hastalıkları Cerrahisi*, 24(2), 108–111. Verkkoaineisto. Saatavilla: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23692199/>. Luettu 31.3.2025.

Kirjallisuuskatsauksen tulokset

Kirjallisuuskatsauksen koehakusanat, rajaukset ja tulokset:

Tietokanta	Hakusanat	Rajaukset	Tuloksia	Hyväksytyt
PubMed	sports injury prevention wearable device	2015->, aiheeseen liittyvä	73	73
ScienceDirect	"wearable device" AND "injury prevention" AND sports	2015->, aiheeseen liittyvä	136	22
PubMed	wearable technology for sports injury prevention	2015, aiheeseen liittyvä	98	42
ScienceDirect	smart wearables for athletic injury prevention	2015, aiheeseen liittyvä	190	12

PubMed	"wearable device" AND "injury prevention"	2015, aiheeseen liittyvä	7	3
PubMed	"injury prevention" AND "wearable technology"	2015, aiheeseen liittyvä	26	10
PubMed	injury prevention AND wearable device	2020 ->	109	15
PubMed	sports injury wearable devices	2015->	140	15
ScienceDirect	wearable sensor sports injury prevention	2015->	845	10
Google	sports medicine in wearable devices	Aiheeseen liittyvä tutkimus. Linkki	x	7

		ohjaa luotet- taville sivuille.		
Google	usage of wearable de- vices in sports to pre- vent injuries study	Aiheeseen liittyvä tutki- mus. Linkki ohjaa luotet- taville sivuille.	x	13

Tulokset

Tutkimus (tekijä, vuosi)	Tutkimuksen tavoite	Menetelmä	Teknologia (sensorit, AI yms.)	Keskeiset tulokset	Rajoitteet
Di Paolo ym. 2021	Tutkia motorisen koordinaation vaikutusta alaraajojen biomekaniikkaan jalkapalloilijoilla.	18 jalkapalloilijan biomekaniikan analyysi kenttäolosuhteissa.	Xsens MVN -inertiaalianturit, Matlab-analyysi.	Huono motorinen koordinaatio liittyi biomekaniikkiin poikkeavuuksiin ja ACL-vammariskin kasvuun.	Pieni otoskoko, vain nuoret pelaajat mukana.
Benjaminse ym. 2024	Kehittää ML-mallin polven nivelkuormituksen ennustamiseen suunnanmuutoksissa.	32 naisjalkapalloilijan suorittamat suunnanmuutokset, ML-analyysi.	Xsens MVN, Vicon, Bertec-voimalevyt, ML-mallit.	ML-malli luokitteli polven nivelkuormituksen tarkasti, mutta numeerinen ennustus jäi heikommaksi.	Regressiomallien tarkkuus heikko, ei testattu käytännössä.

Viswanathan ym. 2025	Kartoittaa ACL-vammojen riskitekijöitä ja ennaltaehkäisystrategioita.	Scoping review 322 artikkelista, 14 valittu tarkempaan analyysiin.	Vicon, OptiTrack, IMU-sensorit, tekoälyanalyysi.	Neuromuskulaarinen harjoittelu ja wearable-laitteet tehokkaimpia ACL-vammojen ehkäisyssä.	Vain kirjallisuuskatseaus, ei kokeellista validointia.
Fan ym. 2021	Kehittää IMU-pohjainen menetelmä polven liikkeiden arviointiin ACL-riskin ennustamiseksi.	IMU-pohjainen polven kulmanalyysi verrattuna optiseen liikeanalyysiin.	Xsens MTw, IMU-pohjainen laskenta ja validointi.	IMU-pohjainen menetelmä paransi ACL-riskin arvioinnin tarkkuutta kenttäolosuhteissa.	Kalibrointi-menettelmät vaikuttivat tarkkuuteen.
Hermann & Senner 2021	Kehittää suksiside ACL-vammojen ehkäisyyn.	Sensortechniikkaa hyödyntävän suksisiteen	Älykäs suksiside, lihasaktiivisuuden ja	Älykäs suksiside voi tunnistaa ja ehkäistä ACL-	Kehitystyötä tarvitaan sensoreiden kestävyys- ja tarkkuuden

		kehitys ja testaus.	polvikulmien mitaus.	vammoja alppihiihdossa.	parantamiseksi.
Zou ym. 2022	Luoda puuttava laite-järjestelmä polven väsymystilan arvioimiseksi.	Kuormituksen ja liikkeenanalyysin yhdistävä järjestelmä testattu koehenkilöillä.	Flex Sensor, Tekscan, MPU-6050 kiihtyvyyssanturit.	Puettava laite-järjestelmä ennusti polven väsymystilan ja esti vammoja koehenkilöillä.	Tarvitaan lisää tutkimusta järjestelmän pitkäaikaisvaikutuksista.
Jauhiainen ym. 2022	Testata ML-malleja ACL-vammojen ennustamiseen laajasta testidatasta.	880 naisurheilijan testidata analysoitu ML-malleilla ACL-vammojen ennustamiseksi.	3D-liikkeenanalyysi, voimalevyt, ML-mallit (SVM, RF, logistinen regressio).	ML-mallit eivät ennustaneet ACL-vammoja riittävästi kliiniseen käyttöön.	Datan epätasapaino vaikeutti ennustemallien kehittämistä.
J Li - 2024	Kehittää menetelmä polven ja lonkan 3D-kulmien	IMU-pohjainen polvikulmien arviointi ja siirto-	Kolme IMU-sensoria (lantio, molemmat	Siirtooppiminen paransi mallin tarkkuutta	Vähennetty sensorimäärä saattaa vaikuttaa

	arviointiin vähemmillä IMU-sensoreilla.	oppimiseen perustuva neuroverkko.	sääret), LSTM-pohjainen neuroverkko.	polven ja lonkan kulmien ennustamisessa.	tarkkuuden tietyissä liikkeissä.
Preatoni ym. 2022	Tarkastella puettavien sensorien käyttöä urheiluun liittyvien tukija liikuntaelinvammojen ehkäisyssä, arvioinnissa ja palautumisen seurannassa.	Systemaattinen scoping review	Inertiaalisensorit, kiihtyvyyssanturit, EMG, paineanturit, usean anturin järjestelmät	Puettavat sensorit voivat tukea vammojen hallintaa, yksilöllistä palautumista ja ennaltaehkäisyä kenttäolosuhteissa	Tarve paremmalle validoinnille, standardoinnille ja käytettävyyden parantamiselle valmennuskäytössä
Di Paolo ym. 2023	Selvittää, miten laboratoriossa mitatut ACL-riskitekijät näkyvät pelikentällä	24 naisjalakapalloilijaa, suunnanmuutokset laboratoriossa ja kentällä	Vicon, Bertec, Xsens MVN, MATLAB, klusterointi, wavelet-analyysi	Laboratorion riskimallit eivät aina vastaa kenttäolosuhteita; IMU-sensorit paljastivat	Pieni otoskoko, kenttä- ja laboratoriodatan erot

				uusia riskikäyttäytymisiä	
Benson ym. 2020	Validoida IMU-pohjainen hyppykuorman mittaus nuorilla koripalloilijoilla	VERT Classic vs. videoanalyysi harjoituksissa ja peleissä	VERT Classic IMU, videoanalyysi, Dartfish	92 % yhteinevyys videon kanssa hypyissä >15 cm; käyttökelpoinen harjoituskuorman seurannassa	Ei tunnistanut pieniä tai horisontaalisia hyppyjä tarkasti
Zadeh ym. 2021	Tarkastella koneoppimismenetelmien soveltamista urheiluvammojen, mukaan lukien polvivammojen, ennustamiseen	Systemaattinen katsaus 25 ML-pohjaiseen tutkimukseen	ML-algoritmit (SVM, RF, NN), joissain tutkimuksissa sensoridata, GPS, harjoituskuormitusdata	ML voi ennustaa vammoja kohtalaisella tarkkuudella, mutta vaatii yhdistettyä dataa (esim. harjoituskuorma + aiemmat vammat)	Monissa tutkimuksissa puutteellinen validointi, sensoridatan käyttö vielä rajallista

Arciniega-Rocha ym. 2023	Kehittää puettava laite, joka tunnistaa väärät kyykky- asennot ja ehkäisee vammoja	40 urheilijaa (aloitte- lijoita ja kokeneita), kyykky suorituksen ana- lyysi	Flex Sen- sor 4.5", MPU- 6050, ML- mallit (k- NN, SVM, NN), CNN- pruning	CNN+k- NN-malli tunnistoi oi- kein/vir- heelliset kyykkyt 90 % tarkkuu- della, toimi reaaliaikai- sesti kent- täolosuh- teissa	Tutkimus keskittyi kyykkyihin, sovelletta- vuus mui- hin liikkei- siin vaatii lisätutki- musta
--------------------------	--	--	--	--	--