

LIIKUNTA-ALUSTAN PYSTYSUUNTAINEN JÄYKKYYS JA SEN MITTAAMINEN

TAPANI JÄNISKANGAS

**Yhteyshenkilö: Tapani Jäniskangas, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos,
Maa- ja pohjarakenteet, PL 600, 33101 Tampere. Puh. 040 737 6791. Sähköposti: tapani.janiskangas@tut.fi**

TIIVISTELMÄ

Jäniskangas T. 2014. Liikunta-alustan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. Liikunta & Tiede 51 (6), 85–92.

■ Eri liikuntalajeissa vaaditaan lajille ominainen joustoltaan sopiva alusta, jolla lajia voidaan harrastaa turvallisesti sekä kilpa- että harrastelijatasolla. Kansainväliset urheilujärjestöt vaativat usein, että päällysteiden tulee täyttää tiettyjen standardien vaatimukset.

Maailmalla on useita erilaisia urheilualustojen mittaamenetelmiä, mutta ne eivät tarpeeksi selitä alustan kaikkia jousto-ominaisuuksia. Urheilualustan jousto-ominaisuuksilla on merkitystä esimerkiksi urheilutulosten, loukkaantumisherkkeyden ja pelillisten ominaisuuksien kannalta. Liikkumiskokeet ovat osoittaneet, että alustan jäykkyys vaikuttaa juoksunopeuteen ja -vammoihin. Liikkumisen biomekaniikan muuttajat (mm. kehon sisäiset voimat) pitää ottaa huomioon mittalaitetta kehitettäessä.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää pudotuspainolaitteella tehtyjen dynaamisten mittausten käyttökelpoisuus arvioitaessa urheilualustan staattista jäykkyyttä. Tutkimuksen laboratoriomittauksissa vertailtiin joustoltaan erilaisten urheilualustojen staattisia ja dynaamisia jäykkyyksiä. Kenttämittauksissa mitattiin alustan dynaamisia jäykkyyksiä eri kenttätyypeiltä Loadman -pudotuspainolaitteella. Laitteistolla mitattiin alustaan kohdistuvan voiman suuruutta pystysuunnassa ja siten myös alustan jalkaan kohdistamaa reaktiivoimaa. Tehdyissä kokeissa saatiin selkeä yhteys staattisten ja dynaamisten jäykkyyksien välille ja alustan jäykkyydellä oli merkittävä vaikutus jalkaan kohdistuvaan iskuvoimaan. Laitteen kokoonpano on mahdollista säätää mitattavan liikuntapaikan mukaan, mutta säädöistä ei vielä ole olemassa liikuntapaikkakohtaista ohjetta. Pudotuskorkeus, paino ja pudotettavan painon vaimennus voidaan valita urheilusuoritusta vastaavaksi, jolloin mittalaitteella mitattu tulos vastaa urheilijasta alustalle kohdistuvaa dynaamista kuormitusta.

Tässä tutkimuksessa esitetyllä dynaamisella mittaamenetelmällä on mahdollista mitata liikunta-alustan pystysuuntainen jäykkyys kentällä. Menetelmällä voidaan nopeasti kartoittaa kentän tasalaatuisuus. Mitattuja arvoja voidaan käyttää alustasta aiheutuvan vamma-riskin, alustan nopeuden ja pelillisten ominaisuuksien arvioinnissa.

Asiasanat: jousto-ominaisuudet, jousivakio, jäykkyys, pudotuspainolaitte, dynaaminen kuormitus

ABSTRACT

Jäniskangas T. 2014. Measurement of flexibility and shock-absorbing properties of sports surfaces. Liikunta & Tiede 51 (6), 85–92.

■ Different types of sports set their own specific requirements for the surface they are played on to ensure the safety of both competitive athletes and amateurs. International sports organisations often require that surfacings meet certain standards.

Many different methods for measuring the properties of sports surfaces exist worldwide, but they do not describe all the flexibility properties of surfaces well enough. The flexibility properties of a sports surface are significant e.g. from the viewpoint of sports results, injury proneness and playability of the surface. Movement tests have shown that surface stiffness has an impact on running speed and injuries. The variables of biomechanics of movement (e.g. the body's internal forces) must also be considered in the development of the measuring apparatus.

The aim of this study was to determine the applicability of dynamic measurements made with the Loadman falling weight deflectometer in assessing the static stiffness of a sports surface. The laboratory measurements of the study compared the static and dynamic stiffness characteristics of sports surfaces of varying flexibility. Field tests, again, measured the different flexibility properties of sports surfaces of various types of fields using the falling weight deflectometer to determine the vertical force exerted on the surface and, thus, also the reaction force from the surface to the foot. Conducted tests indicated clear correlation between static and dynamic stiffness and that stiffness of the surface had a significant impact on the impact force on the foot. The configuration of the device can be varied by the facility to be measured, but sports facility-specific guidelines do not yet exist. Drop height, weight and damping of the dropped weight can be made to correspond to the sports performance in question so that the measured result reflects the dynamic load exerted by the athlete on the surface.

The dynamic measurement method presented in this study allows measuring the stiffness and shock-absorbing properties of sports surfaces on site as well as determining their homogeneity. The measured values can also be used to evaluate the injury risk posed by a surface as well as its fastness and playing properties.

Key words: flexibility properties, spring constant, stiffness, falling weight deflectometer, dynamic load

JOHDANTO

Liikunta-alustoilta edellytetään lajin luonteen mukaista jäykkyyttä/joustoa. Tärkeitä alustan ominaisuuksia ovat: turvallisuus, pelattavuus (pallokentät) ja sopivat jousto-ominaisuudet. Alustan sopiva joustavuus ja sen mittaaminen on tärkeää, sillä askeleen törmäys erilaisilla alustoilla aiheuttaa erilaisia törmäysvoimia. Esimerkiksi yleisurheilukentät, urheilunurmet, ratsastuskentät, raviradat, erilaiset tekoturmi- ja hiekkapintaiset jalkapallo- sekä pesäpallokentät ovat joustoltaan erilaisia. Lajin luonne edellyttää esimerkiksi raviradoilta ja pesäpallokentiltä tiettyä jäykkyyttä. Jalkapallokentät eivät saa olla liian kovia. Beach volley kenttien pitää olla pelin luonteen mukaisesti pehmeitä. Jäykkää alustaa (pieni joustavuus) pidetään nopeampana alustana kuin erittäin joustavaa alustaa (McMahon & Greene 1979, Lovett 2008). McMahon ja Greene (1979) mittaivat, että jalan kontaktiaika oli melkein kolme kertaa pitempi erittäin joustavalla alustalla verrattuna jäykkään alustaan. Tällöin juoksijoiden nopeudet hidastuivat. Erittäin joustava alusta tekee juoksemisesta raskaampaa. Kehoon kohdistuvat kuormitukset kasvavat erittäin jäykällä alustalla johtaen suurempiin iskuvoimiin etenkin hyppyjen ja suoritusten suunnanmuutosten yhteydessä.

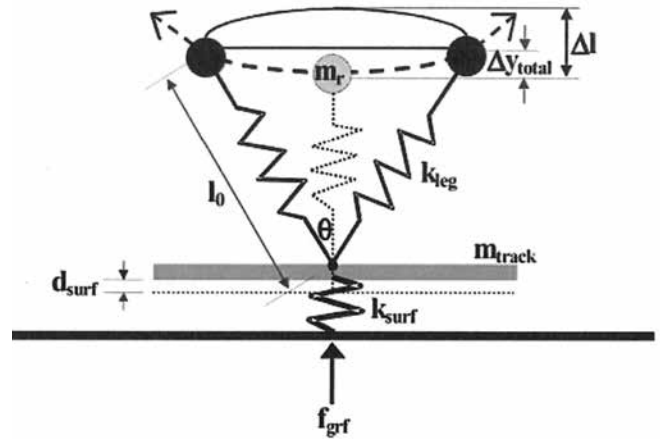
Jalan törmäysvoimat alustaan

Juostessa iskuvoimat ovat noin 1,5–5 kertaisia ihmisen kehonpainon verrattuna (Hreljac 2004). Kolmiolikkasuorituksen loikkavaiheessa on törmäysvoimaksi mitattu 15,2 kertaa kehon paino (Perttunen ym. 2000). Ramey ja Williams (1985) mittaivat (rekisteröivät) tutkimuksessaan harrastetason hyppääjiin kohdistuneiksi maksimaalisiksi pystyvoimiksi 7–12 kertaa kehon paino. Korkeushyppääjiltä hyppykorkeuksilla 2,2–2,4 m mitatut pystysuuntaiset iskuvoimat ovat 8–8,9 kertaa kehon paino (Deporte & Van Gheluwe 1989). Keihäänheitossa keskimääräinen jalan reaktiivoima alustaan on luokkaa yhdeksän kertaa kehon paino (Deporte & Van Gheluwe 1988). Hypyissä jalan törmäysvoimat voivat edellä mainitun perusteella olla n. 5–12 kN. Useat tutkijat ovat esittäneet, että jalkoihin kohdistuvat iskuvoimat ovat yhteydessä juoksijan vammoihin (Cavanagh & LaFortune 1980; Hardin ym. 2004; Hreljac 2004; James ym. 1978; Nigg 1997). Hyppääjän polvi (jumper's knee) on yleinen rasitusvamma urheilijoilla, jotka harjoittelevat kovilla alustoilla ja lisäävät harjoitusmääriä. Liikunta-alustan periksi antaminen kuvaa alustan joustavuutta. Ferretti ym. (1984) totesivat merkittävän yhteyden kovan pelipinnan (betoni verrattuna parkettiin) ja lisääntyvän hyppääjän polven -vamman välillä. Vamma on yleinen lentopallossa, koripallossa, jalkapallossa ja yleisurheilussa (pikajuoksijat, hyppääjät) (Ferretti ym. 1990; Lian ym. 2005).

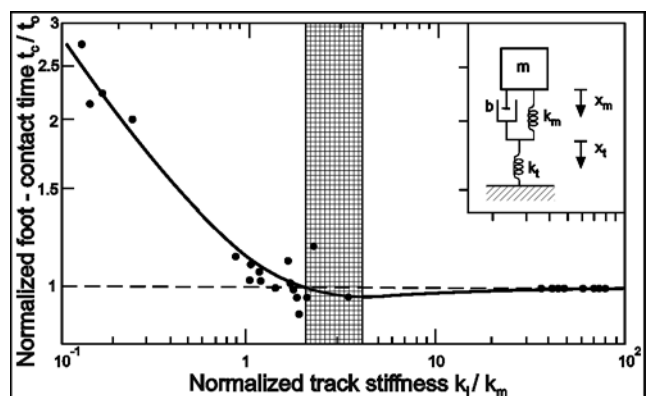
Jousi-massa -malli

McMahon ja Greene (1979) mallinsivat juoksijan jalkaa ja juoksu-alustaa yksinkertaisella jousi-massa -mallilla (kuvio 1, Kerdok ym. 2002). Pystysuora liike jousi-massa -systemin alustan kontaktivaiheessa on kuvattu termillä ”efektiivinen pystysuuntainen jäykkyys” (k_{vert}) (McMahon & Cheng 1990). Efektiivinen pystysuuntainen jäykkyys voidaan laskea ratkaisemalla yhtälö: $k_{vert} = F_{peak}/\Delta y_{total}$, missä F_{peak} on alustan pystysuora reaktiivoima ja Δy_{total} on massan aiheuttama pystysuuntainen siirtymä kontaktin aikana (Kerdok ym. 2002). Jousina toimivat lihakset, jänteet ja nivelsiteet. Jalkojen jousi-ominaisuuksien jäykkyyteen vaikuttavat mm. lihasten aktiivisuus ja jalan geometria kontaktin aikana. (Enoka 2002).

Juoksijan jalka puristuu kokoon vähemmän joustavalla alustalla verrattuna kovaan, jäykkään alustaan (Ferris ym. 1998; Kerdok ym. 2002). Ihmisen hypätessä 2 Hz taajuudella kolminkertaistui jalan jousivakio pehmeällä pinnalla ($k_{surf} = 26,1$ kN/m; $k_{leg} = 53,3$ kN/m) verrattuna erittäin jäykkään pintaan (voimalevy, $k_{surf} = 35\,000$ kN/m; $k_{leg} = 17,8$ kN/m) (Ferris & Farley 1997).



KUVIO 1. Jousi-massa -malli edustaa juoksijan jalan kontaktia juoksu-alustaan. Jalan pituus l_0 , kehon massa m_r , kehon painopisteen maksimaalinen korkeuden muutos Δy_{total} , ”jalkajousen” maksimaalinen puristuma Δl , jalkakulma kontaktin alussa θ , jalan jousivakio k_{leg} , juoksu-alustan efektiivinen massa m_{track} , juoksu-alustan siirtymä (jousto) d_{surf} , juoksu-alustan jousivakio k_{surf} ja pystysuora reaktiivoima f_{grf} . (Kerdok ym. 2002)



KUVIO 2. Jalan kontaktiaika verrattuna radan jäykkyyteen. Pystyakseli esittää normalisoitua jalan kontaktiaikaa (jalan kontaktiajan (t_c) suhdetta kovan pinnan kontaktiaikaan (t_0)) ja vaaka-akseli normalisoitua radan jäykkyyttä (radan jäykkyyden suhdetta (k_t) jalan jäykkyyteen (k_m)). Varjostettu alue osoittaa radan jäykkyyden alueen, missä juoksijan nopeuden pitäisi lisääntyä tehokkaimmin. Alhaiset jalan kontaktiajan arvot tarkoittavat korkeaa juoksu-nopeutta, koska nopeus = L/t_c , missä L on askeleen pituus. (McMahon 1984)

Liikunta-alustan pystysuuntainen jäykkyys

Urheilualustan pystysuuntaista jäykkyyttä voidaan kuvata alustan jäykkyydellä tai joustomodulilla (= kimmomoduli E). Kimmomoduli kuvaa materiaaliin kohdistuvan jännityksen ja sen aiheuttaman muodonmuutoksen suhdetta. Jäykkyys voidaan laskea alustaa kuormittavan voiman ja siirtymän suhteena.

McMahon & Greene (1979) tutkivat alustojen jäykkyyksiä määrittämällä voima-siirtymä -käyriä lisäämällä portaittain 0,22 kN painoa

halkaisijaltaan 127 mm alumiinisele aluslevylle, joka oli tutkittavan alustan päällä. Aluslevy edustaa jalkapohjan pinta-alaa. Puualustan jäykkyys määriteltiin em. tutkimuksessa tangenttina voima-siirtymä-käyrältä kohdassa 1,85 kN ($= 2,3 \cdot m_r \cdot g$, missä m_r on juoksijan massa ja g maan vetovoiman kiihtyvyyys). Alustan jäykkyyden staattisessa määrittämisessä oletetaan, että askeleen tukivaiheessa juoksija käyttää voimaa noin 2,3 kertaa painonsa verran (Kerdok ym. 2002). Meijer kuormitti tutkimuksessaan testialustaa halkaisijaltaan 135 mm aluslevyllä kuormitusnopeuden ollessa 10 N/s. Alustan jäykkyyden Meijer määritteli tangenttina kuormitus-siirtymä -käyrältä kohdassa 2,3 kN.

Alustan jäykkyys ja askeleen kontaktiaika vaikuttaa jalkaan kohdistuvaan iskuvoimaan sekä urheilijan juoksuopeuteen ja jalkavamoihin. Kuviossa 2 on McMahanin ja Greenen (1979) esittämä malli jalan kontaktiajasta verrattuna alustan jäykkyyteen.

Kuvasta 2 voidaan nähdä, että jalan kontaktiaika kasvaa merkittävästi pehmeimmillä alustoilla. Merkittävä asia on, että teoria ennustaa kontaktiajan olevan pienimmillään alustan jäykkyyden ollessa kaksineljä kertaa jalan jäykkyys.

McMahon ja Greene (1979) rakensivat erilaisia testiratoja. Heidän tutkimuksensa osoitti, että alustalle on olemassa jäykkyyssalue, missä juoksijan suoritus parani vähentämällä jalan ja alustan kontaktiaikaa, pienentämällä ensimmäistä voimapiikkiä pystysuoran maakontaktin reaktiivoimassa ja lisäämällä askeleen pituutta. Tämän optimaalisen radan jäykkyyden määritettiin olevan 160–320 kN/m. Tällaisia ratoja on rakennettu Harvardin (radan jäykkyys 190 kN/m) ja Yalen Yliopistolle sekä Madison Square Gardenille. Juoksuopeudet ovat kyseisillä radoilla lisääntyneet 2–3 prosenttia ja juoksuvoimat vähentyneet 50 prosentilla (Kerdok ym. 2002; McMahon & Greene 1979). Harvardin yliopiston sisähallin radan jäykkyydellä 75 kg:n painoinen juoksija aiheuttaa 9 mm painuman alustalle olettaen, että juoksija käyttää noin 2,3 kertaa kehon painonsa verran askeleen tukivaiheessa (Kerdok ym. 2002).

Stafilidis ja Arampatzis (2007) tutkivat radan jäykkyyden vaikutusta pikajuoksuasuoritukseen. Tutkimuksessa (Stafilidis & Arampatzis 2007) rakennettujen juoksualueiden staattiset jäykkyydet olivat: 5 500 kN/m, 2 200 kN/m ja 550 kN/m. Alustan jäykkyys määritettiin em. tutkimuksessa voima-siirtymä -käyrän kulmakertoimena väliltä 2 kN ja 3 kN. Johtopäätös kokeista oli, että radan jäykkyydellä ei ollut merkittävää vaikutusta pikajuoksijan tuloksiin 60 metrin matkalla. Em. tutkimuksessa todettiin, että tarvitaan lisätutkimusta joustavampien ratojen vaikutuksesta pikajuoksuasuoritukseen.

Maailmalla on käytössä erilaisia mekaanisia mittaustaitteita alustojen jousto-omaisuuksien mittaamiseen. Käytössä olevissa joustavuuden mittaustaitteistoissa tutkittavalle alustalle kohdistetaan dynaaminen kuormitus. Mittauksissa käytetään yleensä pudotuspainolaitetta, joka on varustettu kiihtyvyyssaturilla. Menetelmissä tulokset riippuvat pudotuskorkeudesta ja -painosta sekä kontaktipinnasta. Mittauslaitte "Artificial Athlete" on **standarditesti** (EN 14808:2005) monien urheilulajien suorituspaikkojen jousto-omaisuuksien mittaamiseen. Tutkittavan alustan mittaustulokset esitetään iskunvaimennusarvona (vertailu betonilattiaan) ja pystysuorana muodonmuutoksena. Laitteistolla mitattu referenssivoima betonilattialta (paksuus ≥ 300 mm) pitäisi olla $6,60 \pm 0,25$ kN. Laitteen koejalan teräksisen alustalevyn halkaisija on 70 mm. Laitteella voidaan mitata IAAF:n hyväksymät arvot.

Suomessa liikunta-alustojen jousto-omaisuuksien mittaamiseen on käytetty lähinnä kannettavaa Loadman II -pudotuspainolaitetta. Laite on kehitetty maarakenteiden kantavuuden ja tiivyyden tarkkailua varten. Loadman II on suhteellisen kevyt suljettu alumiininen putki, jonka halkaisija on 132 mm. Putken sisässä oleva, vapaasti liikkumaan pääsevä 10 kg teräspaino pudotetaan laitteen jäykälle kuormituslevylle.

Tässä kuvattu tutkimuksen tavoitteena oli selvittää pudotuspaino-

laitteella tehtyjen dynaamisten mittausten käyttökelpoisuus arvioitaessa urheilualustan staattista jäykkyyttä. Tutkimuksessa mitattiin eri liikunta-alustojen jäykkyyksiä kuormittamalla niitä sekä staattisesti että dynaamisesti. Pinnotteiden staattinen jäykkyys mitattiin kuormittamalla koealustoja puristimella. Dynaamiset jäykkyydet mitattiin Suomessa kehitetyllä kannettavalla Loadman II -pudotuspainolaitteella (Loadman II 2002). Tutkimuksessa on haluttu verrata pinnotteiden dynaamisia ja staattisia jäykkyysominaisuuksia, koska kirjallisuudessa (McMahon & Greene 1979) on esitetty urheilualustan jäykkyydelle juoksuopeuden ja jalkavammojen kannalta optimaalinen staattinen jäykkyyssalue.

TUTKIMUSAINIESTO JA -MENETELMÄT

Tutkitut materiaalit

Tutkimuksessa testattiin laboratorioissa kuuden liikunta-alustan: neljän juoksuratamatton, yhden joustokerroksella varustetun kumirouhetekonurmimaton ja yhden lasten leikkikentän turva-alustamatton jousto-omaisuudet. Testattavien alustojen alusrakenteena oli betonilattia.

Testattavat juoksuratamatot CONIPUR compact PUR Layer (PUR), CONIPUR Synthetic Layer with Spraid Structure (WS) ja CONIPUR 2S EPDM Layer (2S) ovat polyuretaanipäällysteitä, joissa on kumirakeita. Testattavan Mondo juoksuratamatton perusmateriaali on syntetttinen kumi. Normaalkäytössä matot asennetaan asfalttikerroksen päälle. Kumirouhetekonurmessa tekonerumen alle liimatun joustokerroksen paksuus oli 8 mm ja 14 mm pituinen nukka oli täytetty raekooltaan 0,5–4 mm kumigranulaatilla. Turva-alusta oli kumipäällyste.

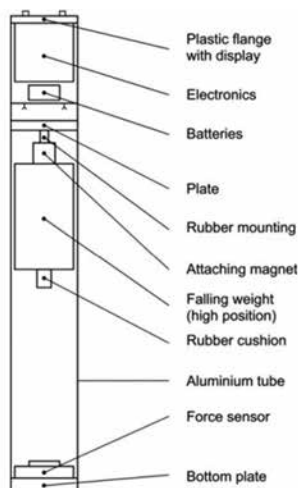
Kenttätutkimuksessa määritettiin tekonerumkenttien ja nurmikenttien jäykkyysominaisuuksia dynaamisella mittauksella.

Staattinen jäykkyys

Liikunta-alustojen staattiset jäykkyydet määritettiin puristamalla niitä puristuslujuuden testauslaitteessa vakionopeudella (0,5 mm/min). Alustojen puristuspinna-olat halkaisijaltaan 132, 100 sekä 70 mm. Testauslaite on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Testattavan alustan (WS) staattisen jäykkyyden määrittäminen (kuvassa puristuslevyn halkaisija on 100 mm)



KUVA 2. Loadmanin periaatekuva

Dynaaminen jäykkyys

Alustojen dynaamiset jäykkyydet mitattiin eri tavoin säädetyllä Loadman II -pudotuspainolaitteistolla. Mittauksissa laitteistolla aiheutettu dynaaminen kuormitus kovalle alustalle (betonilattialle) oli sekä 22,9 kN että 6,6 kN. Dynaaminen kuormitus 6,6 kN on sama kuin mittausslaitteella ”Artificial Athlete” ja vastaa pystyvoimaa hyppyssä. Laitteella kuormituksen alustalle aiheuttama painuma mitataan laitteen yläpäähän sijoitetulla kiihtyvyyssanturilla. Ajasta ja kiihtyvyydestä laite laskee nopeuden sekä nopeudesta painuman. Laitteen kokoonpano (paino, pudotuskorkeus, pohjalevy, kumivaimennin) voidaan vaihdella mitattavan alustan tai mittauksen tarkoituksen mukaan. Putken alapäähän on asennettu voima-anturi, joka mittaa iskun aiheuttaman dynaamisen voiman.

Kuvassa 2 on esitetty Loadman II:n osat. Mittauksessa laitteen näyttöön tulevat E-moduuli (MPa), painuma (mm) ja kuormitusvoima (N).

Joustomoduulilla (E-moduuli) tarkoitetaan kuormituksen aiheuttaman painuman perusteella laskettua kimmomoduulia E. Loadman -pudotuspainolaitteella mitattaessa joustomoduuli lasketaan kaavalla 1:

$$E = 1,5 * p * \frac{a}{s} \quad (1)$$

- E on joustomoduuli, MPa
- p on jännitys kosketuspinnassa = $P/\pi r^2$, Pa
- P on maksimikuormitus, N
- a on kuormituspinnan säde, mm
- s on mitattu maksimipainuma, mm

Voiman vaimennusarvo saadaan siten, että voiman maksimiarvoa tutkittavalla alustalla ja jäykällä alustalla (betonilattia) verrataan ja voiman vaimennus lasketaan kaavalla 2:

$$\text{Voiman vaimennus (\%)} = \left(1 - \frac{F_s}{F_b}\right) * 100 \quad (2)$$

- F_s = tutkittavalta alustalta mitattu voima-arvo
- F_b = betonilta mitattu voima-arvo

Mittauksissa käytettiin halkaisijaltaan 132 mm ja 70 mm pohjalevyjä. Mittaustulosten toistettavuus laitteella on noin viisi prosenttia, millä tarkoitetaan joustavalla alustalla tehtyjen mittausten keskihajontaa (PANK-9001). Testilaitte kalibroidaan vuosittain ja toimintakunnon tarkistus tehdään aina ennen laitteiston käyttöä vakioalustalla.

Tilastomenetelmät

Kahden muuttujan välistä lineaarista riippuvuutta on tarkasteltu Pearsonin korrelaatiokertoimen R ja selityssasteen R^2 perusteella. Lisäksi on laskettu korrelaatiokertoimeen liittyvä p-arvo. Jos p-arvo on pieni, niin korrelaatiota voidaan pitää tilastollisesti merkitseväenä. Yleisemmin rajana käytetään p-arvoa 0,05 (viiden prosentin merkitsevyytaso).

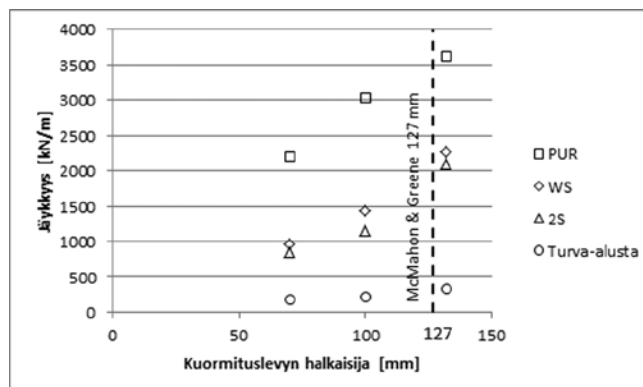
TULOKSET

Eri liikunta-alustojen staattisella mittauksella määritellyt jousivakiot

Mitattujen alustojen staattisella mittauksella saadut jousivakiot määritettiin tangenttina voima-painuma -käyriltä kohdassa 1,69 kN ja tulokset on esitetty taulukossa 1. Kuormituslevynä käytettiin halkaisijaltaan 132, 100 ja 70 mm olevia levyjä. Levykoolla 100 mm tehtiin kolme mittausta ja muilla levyillä yksi mittausta. McMahon & Greene (1979) käyttivät mittauksissaan halkaisijaltaan 127 mm levyä, joka edusti jalkapohjan pinta-alaa. Kuviosta 3 voidaan nähdä kuormituslevyn halkaisijan vaikutus mittaustulokseen.

TAULUKKO 1. Testattavilta alustoilta mitatut staattiset jäykkyydet halkaisijaltaan eri kuormituslevyillä

Testattava alusta	Paksuus [mm]	Jäykkyys [kN/m]			
		Kuormituslevyn halkaisija [mm]			70
		132	100		
			ka	kh	
PUR	12,5	3630	3032	109,4	2210
WS	17	2270	1430	40,3	960
2S	16	2100	1155	21,8	850
Turva-alusta	47	340	223	8,7	180
Mondo	10	3490			
Kumirouhetekonurmi	22	600			



KUVIO 3. Liikunta-alustojen staattisella mittauksella määritetyt jousivakiot halkaisijaltaan eri kuormituslevyillä mitattuna

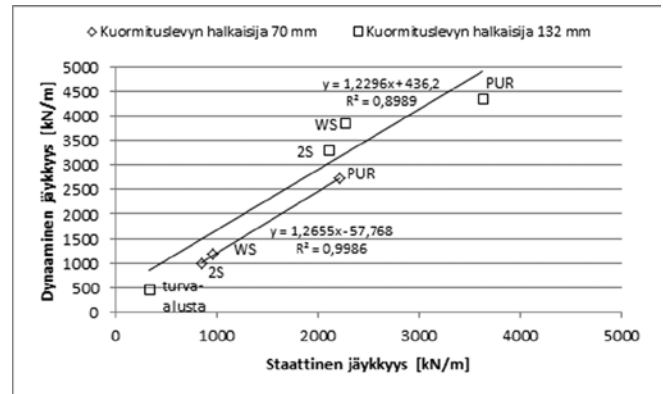
Eri liikunta-alustoilta mitatut dynaamiset jousto-ominaisuudet

Taulukossa 2 on esitetty eri alustoilta pudotuspainolaitteella eri laitekokoonpanoin mitatut painumat, joustomoduulit, dynaamiset iskuvoimat ja jäykkyyssarvot. Laitteistolla aiheutettu dynaaminen kuormitus betonilattialle oli 22,9 kN ja 6,6 kN. Neljälle juoksuratamatolle tehtiin dynaamisella kuormituksella 22,9 kN ja halkaisijaltaan 132 mm kuormituslevyllä kymmenen määrittystä alustaa kohden. Taulukossa 2 on esitetty mitatut joustomoduuli- ja voima-arvojen keskiarvot ja keskihajonnat. Alustojen dynaamiset jäykkyydet on määritetty voiman ja laitteiston mittaaman painuman suhteena. Dynaaminen jäykkyys riippuu aluslevyn pinta-alasta. Halkaisijaltaan suuremmalla aluslevyllä mitattu jäykkyys on suurempi kuin halkaisijaltaan pienemmällä aluslevyllä mitattu jäykkyys.

Taulukon 2 tuloksista voidaan nähdä, että alustan jäykkyydellä on merkittävä vaikutus iskuvoimaan; jäykempiin alustoihin kohdistuu dynaamisessa iskussa suurempi voima kuin vähemmän jykkiin alustoihin.

Eri alustoilta mitattujen staattisten ja dynaamisten jäykkyyksien vastaavuus

Kuviossa 4 on esitetty testattavien alustojen staattisella ja dynaamisella (kuormitus 6,6 kN) mittauksella määritetyt jousivakiot. Mittaukset on tehty halkaisijaltaan 70 ja 132 mm kuormituslevyillä testattavan alustan ollessa betonilattian päällä. Mittauksissa, joissa aluslevyn halkaisija oli 132 mm, dynaamiset mittauksella määritetyt jousivakiot ovat selvästi suurempia kuin staattisella mittauksella määritetyt jousivakiot. Käytettäessä halkaisijaltaan 70 mm aluslevyä ero oli pienempi, mutta kuitenkin samansuuntainen. Kuvan 4 perusteella voidaan todeta, että staattisella mittauksella ja dynaamisella mittauksella määritellyt jousivakiot korreloivat hyvin keskenään; kuormituslevyn halkaisijalla ϕ 132 mm ($R = 0,95$, $p = 0,05$) ja kuormituslevyn halkaisijalla ϕ 70 mm ($R = 0,99$, $p = 0,02$).

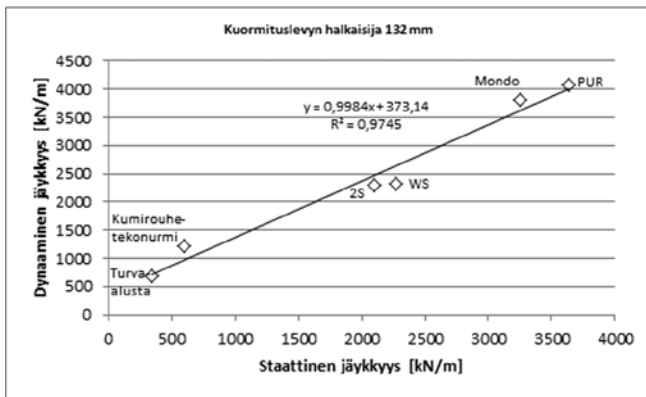


KUVIO 4. Eri urheilualustojen dynaamisella mittauksella määritetty jousivakio betonialustalla (dynaaminen kuormitus 6,6 kN) staattisella mittauksella määritetyn jousivakion funktiona

Kuviossa 5 on esitetty eri alustojen halkaisijaltaan 132 mm:n kuormituslevyllä sekä staattisella että dynaamisella mittauksella (dynaaminen kuormitus 22,9 kN) määritellyt jousivakiot asfaltin päällä. Kuvasta voidaan nähdä, että muuttujien välillä on selvä lineaarinen yhteys ($R = 0,999$, $p < 0,001$). Yleisurheilukentän pinnoituksen alla oleva kerros on yleensä asfalttia. Saatua yhteyttä on käytetty muutettaessa tehtyjen kenttämittausten dynaamisella mittauksella määritetty jousivakio vastaamaan staattisella mittauksella määritettyä jousivakiota.

TAULUKKO 2. Eri alustoilta mitatut dynaamiset iskuvoimat ja jäykkyysominaisuudet

Testattava alusta	Aluslevyn halkaisija, dynaaminen kuormitus		Painuma [mm]	Jousto moduuli E [MPa]		Isku voima [kN]		Voiman vaimennus betonilattiaan [%]	Dynaamisella mittauksella määritetty jousivakio ("jäykkyys") [kN/m]
	alusl. ϕ [mm]	dyn. kuor. [kN]		ka	kh	ka	kh		
PUR	132	22,9	2,33	68,9	2,13	14,8	0,16	35	6352
	132	6,6	1,35			5,9		11	4370
	70	22,9	3,75			10		56	2667
	70	6,6	2,01			5,5		17	2736
WS	132	22,9	3,38	47,4	1,17	11,6	0,07	49	3432
	132	6,6	1,41			5,6		14	3862
	70	22,9	5,47			7,7		66	1408
	70	6,6	3,6			4,3		35	1194
2S	132	22,9	3,72	43,1	0,88	11	0,09	52	2957
	132	6,6	1,66			5,5		16	3313
	70	22,9	6			7,3		68	1217
	70	6,6	4,19			4,2		36	984
Turva-alusta	132	22,9	>8	18		6,5		72	< 800
	132	6,6				3,4		49	455
	70	22,9				5,9		74	-
	70	6,6				3,2		52	-
Mondo	132	22,9	2,52	63,5	0,8	13,9	0,16	39	5507
Kumirouhe tekonurmi	132	22,9	5,65	28 (E2)		6,9		70	1221



KUVIO 5. Eri urheilualustojen dynaaminen jäykkyys asfalttialustalla (dynaaminen kuormitus 22,9 kN) staattisen jäykkyyden funktiona

Urheilualustojen dynaamisen jäykkyyden mittaus kentällä

Viiden hiekkatekonurmipintaisen pesäpallokentän, kuuden kumirouhetekonurmipintaisen jalkapallokentän ja neljän jalkapallonurmen jousto-ominaisuuksia tutkittiin Loadman II -laitteistolla (ϕ 132 mm kuormituslevy, dynaaminen kuormitus 22,9 kN). Tutkittujen kenttien jousto mitattiin pesäpallokentiltä 19 pisteestä ja jalkapallokentiltä 3–4 pisteestä eri puolilta kenttää. Kenttien alusrakenteena on kalliomurskerakenne. Taulukossa 3 on esitetty mitattujen joustomoduurien (E_2) ja iskuvoimien keskiarvot. Lisäksi kenttien staattiset jäykkyydet on laskettu kentällä tehdyistä dynaamisista mittauksista kuvan 7 esittämällä yhtälöllä.

Taulukon 3 tuloksista voidaan havaita, että pesäpallokenttien joustomoduurin- ja jäykkyydsarvot on selvästi suurempia kuin jalkapallokenttien vastaavat arvot. Luonnonnurmi- ja kumirouhetekonurmikenttien jäykkyydsarvot vastaavat toisiaan.

POHDINTA

Tutkimuksen mittauksissa havaittiin, että urheilualustan dynaamisella ja staattisella mittauksella määritetyn jousivakion välillä on ilmeinen yhteys, kun verrataan Loadman II -pudotuspainolaitteen dynaamista mittauksista staattisesti puristamalla tehtyyn mittaukseen. Näin

TAULUKKO 3. Tekonurmikentiltä ja luonnonurmilta mitatut joustomoduurit, dynaamiset voimat ja niiden perusteella lasketut staattiset jäykkyydet

Kenttätyyppi / nro	Nukan nimellisipituus [mm]	Joustomoduurin [MPa]	Isku voima [kN]	Staattinen jäykkyys [kN/m]
Hiekkatekonurmipintainen pesäpallokenttä / 1	33	104,3	16,8	10 578
Hiekkatekonurmipintainen pesäpallokenttä / 2	33	105,8	17,4	10 940
Hiekkatekonurmipintainen pesäpallokenttä / 3	33	84,1	15,9	8 119
Hiekkatekonurmipintainen pesäpallokenttä / 4	33	119,4	16,6	12 177
Hiekkatekonurmipintainen pesäpallokenttä / 5	20	76	15,5	6 936
Kumirouhetekonurmipintainen jalkapallokenttä / 1	60	16,5	6,9	356
Kumirouhetekonurmipintainen jalkapallokenttä / 2	40	27,3	7,4	912
Kumirouhetekonurmipintainen jalkapallokenttä / 3	55 (alla joustokerros 25 mm)	13,5	7,4	240
Kumirouhetekonurmipintainen jalkapallokenttä / 4	55	21,8	7,3	601
Kumirouhetekonurmipintainen jalkapallokenttä / 5	55	22,5	7,2	649
Kumirouhetekonurmipintainen jalkapallokenttä / 6	45 (alla joustokerros)	15,5	5	110
Nurmipintainen jalkapallokenttä / 1		21,4	6,9	554
Nurmipintainen jalkapallokenttä / 2		19	6,8	428
Nurmipintainen jalkapallokenttä / 3		19,4	7,1	494
Nurmipintainen jalkapallokenttä / 4		21,2	6,9	543

ollen kentällä pudotuspainolaitteella tehtyjen mittausten perusteella voidaan arvioida alustamateriaalin staattinen jousivakio. Loadman II -laitteen mittausvirheettömyyttä eli reliabeliutta arvioitiin uusintamittausten avulla. Mittauksissa, jossa käytettiin halkaisijaltaan 132 mm pohjalevyä, tehtiin joustavuudeltaan erilaisille juoksuratamatoille (PUR, WS, 2S, Mondo) ja yhdelle turva-alustalle kymmenen määrittystä alustaa kohden (taulukko 2). Mittauksissa tulosten toistettavuus (keskihajonta) laitteella oli alle 5 prosenttia.

McMahon & Greene (1979) tutkivat kahta jäykkyydeltään erilaista puurakenteista rataa (staattiset jäykkyydet: 100 ja 195 kN/m), yhtä vaahdokumilaatoista ladottua alustaa (jäykkyys 14,4 kN/m) ja betonialustaa sekä määrittivät juoksunopeuden ja juoksuvammojen kannalta radalle optimaalisen staattisen jäykkyyden alueen. Ratojen jäykkyyksien määrittelyssä kuormituslevyn halkaisija oli 127 mm. Ferrisin & Farleyn (1997) mukaan tyypilliset juoksuradat ovat jäykempiä kuin McMahonin & Greenen (1979) esittämä radan optimaalinen jäykkyyden alue (jousivakio-alue). Staffilidis ja Arampatzis (2007) tutkivat juoksualueiden vaikutusta pikajuoksusuoritukseen alustan staattisella jäykkyyden alueella 550–5 500 kN/m (kuormituslevyn halkaisija 100 mm). Kuten kuvio 3 osoittaa kuormituslevyn halkaisija vaikuttaa tutkitavan alustan staattiseen jäykkyyteen. Edellä mainituista tutkimuksista puuttuu kuitenkin juoksualueen staattinen jäykkyyden alue noin 200–600 kN/m, joka pitäisi tutkia urheilijan vammojen ja juoksunopeuden kannalta.

Askeleen kontaktiaika eli tukivaiheen kesto vaikuttaa urheilijan juoksunopeuteen. Meijerin tutkimuksessa jalan ja alustan kontaktiaika oli lyhyempi jäykemmällä alustalla (staattisella mittauksella halkaisijaltaan 135 mm aluslevyllä määritetty jousivakio = 670 kN/m) verrattuna kahteen vähemmän jäykkään alustaan (staattisella mittauksella määritetyt jousivakiot = 257 kN/m ja 109 kN/m). McMahonin ja Greenen (1979) tutkimista alustoista puuttuivat jäykemmät alustat lukuun ottamatta erittäin jäykkää betonialustaa. Jatkossa pitäisi selvittää useammilla eri jäykkyyksillä alustoilla (yleisurheilukenttien jäykkyyden alue) juoksijan kontaktiaikoja, jotta saataisiin selvitettyä nykyisten juoksuratojen optimaalinen jäykkyys juoksunopeuden suhteen.

Kansainvälisen Yleisurheiluliiton IAAF:n vaatimus kentän voiman vaimennukselle on 35–50 prosenttia. Tällä iskunvaimennuksen vaihteluvälillä yleisurheilukentän päällysteen paksuus on Suomessa mitatuilla kentillä vaihdellut 13–29 mm välillä (Jäniskangas 2008). Päällysteen paksuus vaikuttaa voimanvaimennukseen (Jäniskangas 2008). Tutkitun 47 mm paksuisen kumipäällysteen staattinen jäykkyys (Ø 132 mm) oli 340 kN/m sekä juoksuratamattojen WS ja 2S vastaavasti 2270 kN/m ja 2100 kN/m. Taulukosta 2 nähdään, että juoksuratamattojen voiman vaimennukset (dynaaminen kuormitus = 6,6 kN, Ø 70 mm kuormituslevy), verrattuna betonialustaan olivat 35 prosenttia ja 36 prosenttia (taulukko 2). Näistä 47 mm paksun maton mitattu arvo vastaa McMahonin ja Greenen (1979) esittämää optimaalista juoksuradan jäykkyyttä ja siitä mitattu alustan voiman vaimennusarvo (52 prosenttia) on lähellä IAAF:n vaatimusta. Näin ollen iskunvaimennustaso ≈ 50 prosenttia on lähellä McMahonin ja Greenen (1979) määrittelemää optimaalisen juoksualueen jäykkyyttä.

Tutkimuksessa todettiin selvä iskuvoiman (passive peak) pieneminen joustavimmilla pistejoustavilla alustoilla verrattuna kovempiin alustoihin. Samoin Meijer totesi tutkimuksessaan, että juoksunopeudella ja alustan jäykkyydellä oli merkittävä vaikutus (10–32 prosenttia) iskuvoimaan, mutta alustan jäykkyydellä ei ole vaikutusta aktiiviseen voimaan juoksuaskeleen rullatessa alustaa vasten.

Tässä tutkimuksessa esitetyllä mittausmenetelmällä on mahdollista arvioida olemassa olevien kenttien alustojen staattisia jäykkyyksiä. Kentältä edellytetty jäykkyys määräytyy lajin luonteen mukaisesti. Pesäpallokentän pitää olla selvästi jäykempi kuin yleisurheilu- ja jalkapallokentän. Esimerkiksi pesäpallossa pompputyönti on tehokas tapa pelaajan ulkokentällä etenemiselle, joten kentän jäykkyys (”kovuus”) vaikuttaa pelin luonteeseen. Jalkapalloilijat pitävät ihanteellisena luonnonnurmikentän joustavuutta. Tutkittujen luonnonnurmi- ja kumirouhetekonurmikenttien jousto-ominaisuudet vastasivat toisiaan. Kentän optimaalinen jäykkyys määräytyy siis lajikohtaisesti. On haastetta insinööritaidolle ja biomekaniikan asiantuntijoille päättää, missä raja-arvo eri lajeissa pitäisi olla urheilusuorituksen parantamisen kannalta aiheuttamatta kuitenkaan odottamattomia riskejä pelaajalle.

Urheilijoiden vammattutkimuksissa puuttuu yleensä mittaus tieto urheilualustan ominaisuuksista. Kenttäpinnan voidaan luokitella vain esimerkiksi nurmeksi tai keinonurmeksi. Yksityiskohtaisempi tieto alustoista puuttuu; esimerkiksi alustan rakenne, tiiviys, jäykkyys tai muita vaikuttavia ominaisuuksia (McGhie 2014). Alustan ominaisuudet pitäisi mitata tutkittaessa liikkumisen biomekaniikkaa erilaisilla alustoilla. Urheiluhalleissa erilaisten pinnoitemateriaalien ja lattiarakenteen vaikutus jalan rakenteiden ja alustan välisiin reaktiovoimiin voi vaihdella, jolloin joillakin alustoilla vaikutukset voivat muodostua haitallisiksi rasitusvammojen kannalta. Urheilun vammautumisen tutkimuksissa voidaan myös puhua vain yleisesti esim. synteettisestä alustasta tai parkettialustasta, vaikka pitäisi ilmoittaa alustan rakenne, jäykkyys ja kitka, eikä pelkkää pintamateriaalia.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Liikkumisen mekaniikkaa voidaan mallintaa käyttämällä yksinkertaista jousi-massa -mallia (Kerdok ym. 2002; McMahon & Cheng 1990). Loadman II -pudotuspainolaitteistolla on mahdollista mitata edustavia arvoja jousi-massa -mallia varten. Laitteistoa voi säätää erilaisia urheilusuorituksia vastaaviksi (esim. juoksu, hyppy).

Tutkimuksessa käytettiin kahta erilaista dynaamista kuormitusta (22,9 kN ja 6,6 kN) ja kahta erilaista kuormituslevyä (Ø 70 mm ja 132 mm). Loadman II -laitteella kovalla alustalla aiheutettu dynaaminen kuormitus 6,6 kN vastaa ihmisen hyppysuorituksissa alustaan kohdistuvia iskuvoimia. Staattiset määrittelyt tehtiin levykoon halkaisijalla 132 mm, joka vastaa kirjallisuudessa esitettyä levykokoa (McMahon & Greene 1979; Meijer).

Tehdyn tutkimuksen yhteenvetona voidaan todeta, että urheilukentät ovat jäykkyydeltään hyvin erilaisia. Kentän optimaalinen jäykkyys määräytyy lajikohtaisesti. Tutkimuksessa käytetyllä dynaamisella mittausmenetelmällä saadaan selkeästi erot erilaisten kenttien välillä. Mittaus tuloksista selviää myös kentän tasalaatuisuuden vaihtelut. Mittausmenetelmä soveltuu hyvin liikunta-alustojen pystysuuntaisen jäykkyyden mittaamiseen. Menetelmän antamaa kenttämittaus tietoa voidaan käyttää esimerkiksi kenttien luokittelussa, käyttöhyväksynnässä ja liikuntavammattutkimuksessa.

KIITOKSET

Haluan kiittää yo-merkonomi Miikka Laaksosta ja käyttöinsinööri Antti Akkasta avusta tutkimustyössä.

LÄHTEET

- Cavanagh, P.R. & LaFortune, M.A.** 1980. Ground reaction forces in distance running. *J. Biomech.* 13, 397–406.
- Deporte, E. & Van Gheluwe, B.** 1988. Ground Reaction Forces and Moments in Javelin Throwing in *Biomechanics XI-B*, G. De Groot, P. Hollander, P. Huijing and G.J. Van Ingen Schenau (Eds), Free University Press, Amsterdam, 575–581.
- Deporte, E. & Van Gheluwe, B.** 1989. Ground Reaction Forces in Elite High Jumping in Congress Proceedings XII international Congress of Biomechanics, UCLA California, June 1989, Abstract 202.
- EN 14808:2005.** Surfaces for sports areas - Determination of shock absorption.
- Enoka, R.M.** 2002. *Neuromechanics of human movement.* Human Kinetics, USA.
- Ferretti, A., Papandrea, P., Conteduca, F.** 1990. Knee Injuries in volleyball. *Sports Med* 1990: 10, 132–138.
- Ferretti, A., Puddu, G., Mariani, P.P., Neri, M.** 1984. Jumper's knee: an epidemiological study of volleyball players. *Phys Sportmed* 1984; 12: 97–106.
- Ferris, D. P. & Farley, C.T.** 1997. Interaction of leg stiffness and surface stiffness during human hopping. *Journal of Applied Physiology*, 82, 15–22.
- Ferris, D. P., Louie, M., & Farley, C.T.** 1998. Running in the real world: adjusting leg stiffness for different surfaces. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 989–994.
- Hardin, E.C., Bogert, A.J.V.D & Hamill, J.** 2004. Kinematic adaptations during running: Effect of footwear, surface, and duration.
- Hreljac, A.** 2004. Impact and Overuse Injuries in Runners. *Medicine & Science in sports & exercise.*
- James, S.L., Bates, B.T. & Osternig.** 1978. Injuries to runners. *Am. J. Sports Med.* 6:40–50
- Jäniskangas, T.** 2008. Yleisurheilukenttien jousto-ominaisuudet. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Maa- ja pohjarakenteet. Tampere. http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21433/janis-kangas_yleisurheilukenttien_jousto-ominaisuudet.pdf?sequence=1. Tarkistettu 17.9.2013.
- Kerdok, A.E., Biewener, A.A., McMahon, T.A., Weyand, P.G. & Herr, H.M.** 2002. Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses. *J. Appl. Physiol.* 92, 469–478.
- Lian, ØB., Engebretsen, L., Bahr, R.** 2005. Prevalence of jumper's knee among elite athletes from different sports: a cross-sectional study. *Am J Sports Med* 2005: 33, 561–567.
- "Loadman II" kannettava pudotuspainolaite muistilla.** 2002. AI-Engineering Oy.
- Lovett, R. A.** 2008. The technology of athletics tracks. *Cosmos* 15.8.2008.
- McGhie, D.** 2014. *Biomechanical Analysis of Impact Absorption and Traction on Third-Generation Artificial Turf.* Thesis for the degree of Philosophiae Doctor. Trodheim. Norwegian University of Science and Technology. Faculty of Social Sciences and Technology Management. Department of Human Movement Science.
- McMahon, T.A.** 1984. Mechanics of Locomotion. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, no. 2. Harvard University.
- McMahon, T.A. & Cheng, G.C.** 1990. The Mechanics of running: how does stiffness couple with speed? *J. Biomech.* 1990; 23 Suppl 1, 65–78.
- McMahon, T.A. & Greene, P.R.** 1979. The influence of track compliance on running. *J. Biomechanics* Vol. 12, 893–904.
- Meijer, K.** The Biomechanics of running on Artificial Turf. Faculty of Health, Medicine and Life Sciences. Universitet Maastricht. <http://sportsurf.lboro.ac.uk/workshops/STARSS/S1/KM.pdf>. Tarkistettu 17.9.2013.
- Nigg, B.M.** 1997. Impact forces in running. *Current Opinion in Orthopedics* 8: 43–47.
- PANK-9001.** 2002. Päälystealan neuvottelukunta. Kantavuuden mittaus, Loadman. Hyväksytty 13.6.2002.
- Perttunen, J., Kyröläinen, H., Komi, P. Heinonen, A.** 2000. Biomechanical loading in triple jump. *Journal of Sports Sciences*, 2000, 18, 363–370.
- Ramey, M.R. & Williams, K.R.** 1985. Ground Reaction Forces in the Triple Jump, *International Journal of Sports Biomechanics*, (3), 233–239.
- Stafilidis, S. & Arampatzis, A.** 2007. Track compliance does not affect sprinting performance. *Journal of Sports Sciences*, November 2007; 25(13), 1479–1490.