

**VERTIKAALIHYPYJEN VOIMANTUOTON YHTEYS  
MÄKIHYPYN PONNISTUKSEN TEHOKKUUTEEN**

Lauri Hakola

Biomekaniikka

Pro gradu -tutkielma

Kevät 2016

Liikuntabiologian laitos

Jyväskylän yliopisto

Työn ohjaajat:

Mikko Virmavirta, Janne Avela

## TIIVISTELMÄ

Hakola, Lauri 2016. Vertikaalihyppyjen voimantuoton yhteys mäkihypyn ponnistuksen tehokkuuteen. Biomekaniikka, Pro gradu -tutkielma, Liikuntabiologian laitos, Jyväskylän yliopisto, 78 s.

Ponnistusta pidetään mäkihyppäsuorituksen tärkeimpänä osa-alueena, minkä johdosta biomekaaninen tutkimus on painottunut tämän osa-alueen ympärille. Vertikaalihypyillä on keskeinen rooli mäkihyppääjän fyysistä suorituskkyä mittaavassa testistössä, ja tyypillisesti myös oheisharjoittelussa painotetaan nousukorkeuden kehittämistä. Tutkimustiedon mukaan vertikaalihyppyjen nousukorkeus ei kuitenkaan ole paras mittari lajeissa, joissa voimantuottoon käytettävä aika on lyhyt. Mäkihyppytutkimuksesta ei löydy selkeitä kuvauksia siitä, miten kineettiset muuttujat vertikaalihypyissä selittävät lajiponnistuksen voimantuottoa. Myös lajitekniikan yhteys voimantuottoon on jäänyt tutkimuksessa vähemmälle huomiolle.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin, miten mäkihyppääjien voimantuotto vertikaalihypyissä on yhteydessä lajiolosuhteisiin, ja siten suorituksen tehokkuuteen. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin lajitekniisten muuttujien korrelaatiota voimantuottoon ja kokonaissuorituksen laatuun. Tutkimuskysymysten kautta pyrittiin ymmärtämään paremmin lajinomaisen tehoharjoittelun merkitystä, sekä selkiyttämään lajisuorituksen biomekaanisia laatutekijöitä. Mittaukset suoritettiin kansallisen kilpailun yhteydessä ( $n = 19-20$ ), jossa kineettisiä parametreja mitattiin voimalevyillä ja kinemaattisia parametreja videoanalyysiin perustuen. Staattisen hypyn nousukorkeus korreloi merkitsevästi vain keulan keskivaiheen (2–4 m) voimantuoton kanssa ( $r = 0,516$ ,  $p = 0,024^*$ ). Sen sijaan hypyn pituutta selittivät eniten hyvä voimantuotto sekä hyppyrin keulan ensimmäisellä (0–2 m) että toisella (2–4 m) kolmanneksella ( $r = 0,647$ ,  $p = 0,003^{**}$ ,  $r = 0,608$ ,  $p = 0,006^{**}$ ). Laskuasennon, ponnistusvaiheen tai alkuilmalennon kinematiikasta löytyi hyvin vähän muuttujia, joilla voitiin selittää suorituksen laatua ryhmätasolla.

Tutkimuksen keskeiset johtopäätökset olivat: 1) Hyvä staattisen hypyn nousukorkeus auttaa tehokkaan voimantuoton saavuttamisessa, mutta ei selitä kokonaan voimantuotokkyä lajiolosuhteissa. 2) Lajiponnistuksen hyvä voimantuotto, ja erityisesti sen ensimmäisen puolikkaan tehokkuus vaikuttaa olevan ratkaisevaa suorituksen laadun kannalta. 3) Hyvä suoritus ja tehokas voimantuotto on mahdollista toteuttaa erilaisilla tekniikoilla. Valmentajien, urheilijoiden ja testaajien tulisikin pohtia, miten laji- ja oheisharjoittelulla voitaisiin tehostaa yksilöllistä voimantuotokkyä lajiolosuhteissa, sekä kehittää testimenetelmiä jotka vastaavat biomekaanisessa tarkastelussa paremmin lajiponnistuksen yksilöllisiä piirteitä.

Asiasanat: biomekaniikka, mäkihyppy, mäkihypyn ponnistus, vertikaalihyppy, ponnistuksen voimantuotto, ponnistuksen kinematiikka, fyysisen suorituskkyyn lajinomaisuus.

# SISÄLTÖ

## TIIVISTELMÄ

1 JOHDANTO.....	5
2 MÄKIHYPPYN BIOMEKANIikka.....	7
2.1 Vauhtimäen laskuasento.....	9
2.1.1 Kaarrelaskun dynamiikka.....	10
2.1.2 Laskuasennon muuttujien yhteys suorituksen tehokkuuteen .....	13
2.2 Ponnistuksen voimantuotto ja sen yhteys suorituksen tehokkuuteen.....	14
2.2.1 Reaktiovoimat .....	15
2.2.2 Kiertomomentti .....	18
2.3 Ponnistuksen kinematiikka ja sen yhteys suorituksen tehokkuuteen .....	20
2.3.1 Kulmamuuttujat.....	21
2.3.2 Painopisteen liikerata .....	23
2.4 Aerodynaamisten voimien vaikutus ponnistukseen .....	25
2.5 Ponnistustapahtumaa rajoittavat tekijät.....	27
2.6 Ilmalentovaihe .....	29
2.6.1 Alkuilmalennon muuttujien yhteys hypyn pituuteen .....	31
2.6.2 Olosuhteiden ja kehonpainon merkitys .....	34
3 VERTIKAALIHYPYT .....	37
3.1 Vertikaalihyppyjen muuttujia.....	40
3.2 Voimantuoton tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä .....	41
4 REAKTIOVOIMIEN MITTAAMINEN JA VIDEOANALYYSI MÄKIHYPPYSSÄ	44
5 TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA TUTKIMUSONGELMAT .....	46
6 MENETELMÄT .....	47
6.1 Koehenkilöt .....	47
6.2 Koeasetelma .....	47
6.3 Aineiston keräys .....	48
6.4 Aineiston analysointi.....	50
6.5 Tilastolliset menetelmät .....	51

7 TULOKSET .....	52
8 POHDINTA .....	63
8.1 Staattisen hypyn voimantuoton korrelaatiot lajiponnistuksen voimantuottoon ....	65
8.2 Kineettisten ja kinemaattisten muuttujien korrelaatiot lajisuorituksessa .....	66
8.3 Korrelaatiot hypyn pituuteen.....	67
8.4 Virhelähteet .....	68
8.5 Johtopäätökset ja tutkimuksesta nousevat jatkokysymykset.....	70
9 LÄHTEET .....	72
10 LIITTEET.....	77

# 1 JOHDANTO

Mäkihyppysuoritus on kompleksinen liikesarjojen kokonaisuus, joka vaatii hyppääjältä vahvoja psyykkisiä ja fyysismotorisia ominaisuuksia. Suorituksen eri vaiheet vaikuttavat ketjureaktion kaltaisesti toisiinsa siten, että kunkin vaiheen suhteellinen onnistuminen vaikuttaa seuraavan vaiheen toteutukseen. Ponnistusvaihetta pidetään kuitenkin suorituksen tärkeimpänä yksittäisenä osa-alueena, sillä se määrittelee lähtökohdat lento-vaiheelle. Erityisesti kohtisuora voimantuotto latua vasten vaikuttaa hypyn lopputulokseen usean eri mekanismin kautta. Suorituksen ballistiset ja aerodynaamiset tekijät ovat osittain toisiaan poissulkevia, joten ponnistuksen yksilöllinen optimointi vaatii aina kompromisseja tekniikan toteutuksessa. Sekä tehokas voimantuotto että hyvä lopputulos voidaan toteuttaa erilaisilla tekniikoilla. Lajin kehittyessä on yhä tärkeämpää ymmärtää spesifejä tekijöitä, jotka selittävät onnistunutta suoritusta.

Vertikaalihyppy on yksi parhaista liikkeistä arvioida alaraajojen tehontuottoa, mikä on oleellinen ominaisuus useimmissa räjähtävää voimantuottoa vaativissa lajeissa. Myös mäkihyppyssä ponnistusteho on urheilijan tärkein fyysinen ominaisuus, joka ei kuitenkaan yksistään voi korvata muita lajissa vaadittavia ominaisuuksia. Vertikaalihypyt ovat olleet keskeinen osa mäkihyppääjän fyysistä suorituskykyä mittaavaa testistöä jo useiden vuosikymmenten ajan. On kuitenkin ollut epäselvää, kuinka hyvin hyppääjät pystyvät hyödyntämään vertikaalihypyissä todetun ponnistustehonsa lajiolosuhteissa.

Ponnistustehon merkitys mäkihyppääjälle on kiistaton. Suomalaisten mäkihyppyvalmentajien keskuudessa on kuitenkin viimeaikoina pohdittu, tavoitellaanko fyysismotoristen ominaisuuksien harjoittelulla liian yksipuolisesti vertikaalihypyn nousukorkeuden optimoimista, ja pitäisikö näkökulmaksi ottaa enemmän tehontuoton optimointi lajiolosuhteissa. Viimeaikaisten havaintojen, sekä biomekaanisten mittaustenkin perusteella kysymys on relevantti ja antaa aiheen lisäselvityksille.

Tutkimusten perusteella lajeissa, joissa voimantuottoon käytettävä aika on hyvin rajallinen, vertikaalihypyn absoluuttinen nousukorkeus ei korreloi parhaalla tavalla suoritusta-

son kanssa. Sen sijaan oleellisempia mittareita ovat ilmeisesti voimantuoton alkuvaiheen tehokkuutta kuvaavat parametrit. Vertikaalihypyn absoluuttiseen nousukorkeuteen vaikuttaa eniten jalkojen ojentalihasten supistumiskyky, kun taas voimantuoton alkuvaiheen tehokkuuden taustalla korostuvat useat muutkin ominaisuudet, kuten esimerkiksi nivelten liikkuvuus ja stabiliteetti.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten vertikaalihyppyjen voimantuoton muuttujat korreloivat voimantuoton muuttujiin hyppyrimäkiolosuhteissa, ja kuinka vahvasti ne selittävät kokonaissuorituksen laatua. Toinen tärkeä tavoite on ymmärtää, miten kinemaattiset muuttujat laskuasennon, ponnistuksen ja alkuilmalennon osalta korreloivat voimantuoton ja kokonaissuorituksen tehokkuuteen.

## 2 MÄKIHYPPYN BIOMEKANIikka

Mäkihyppysuorituksen lopputulokseen vaikuttavat sekä ballistiset että aerodynaamiset tekijät. Ballistisiin tekijöihin kuuluvat lähtönopeus ja lähtöasento hyppyrin keulalta, kun taas aerodynaamisiin tekijöihin kuuluvat mm. hyppääjä-sukset-systeemin asento, pinta-ala ja ilmanvastus koko suorituksen aikana. (Virmavirta & Komi 2011.) Kokonaisuus voidaan jakaa kuuteen päävaiheeseen: vauhtimäen lasku, ponnistus, alkuilmalento, staabiili lento, alastulon valmistelu ja alastulo. Jokainen vaihe sisältää erityisiä piirteitä, jotka vaikuttavat osaltaan hypyn pituuteen ja tekniikan tehokkuuteen. Suorituksen vaiheet vaikuttavat ketjureaktion kaltaisesti toisiinsa siten, että kunkin vaiheen suhteellinen onnistuminen vaikuttaa seuraavan vaiheen toteutukseen. (Schwameder 2008.)

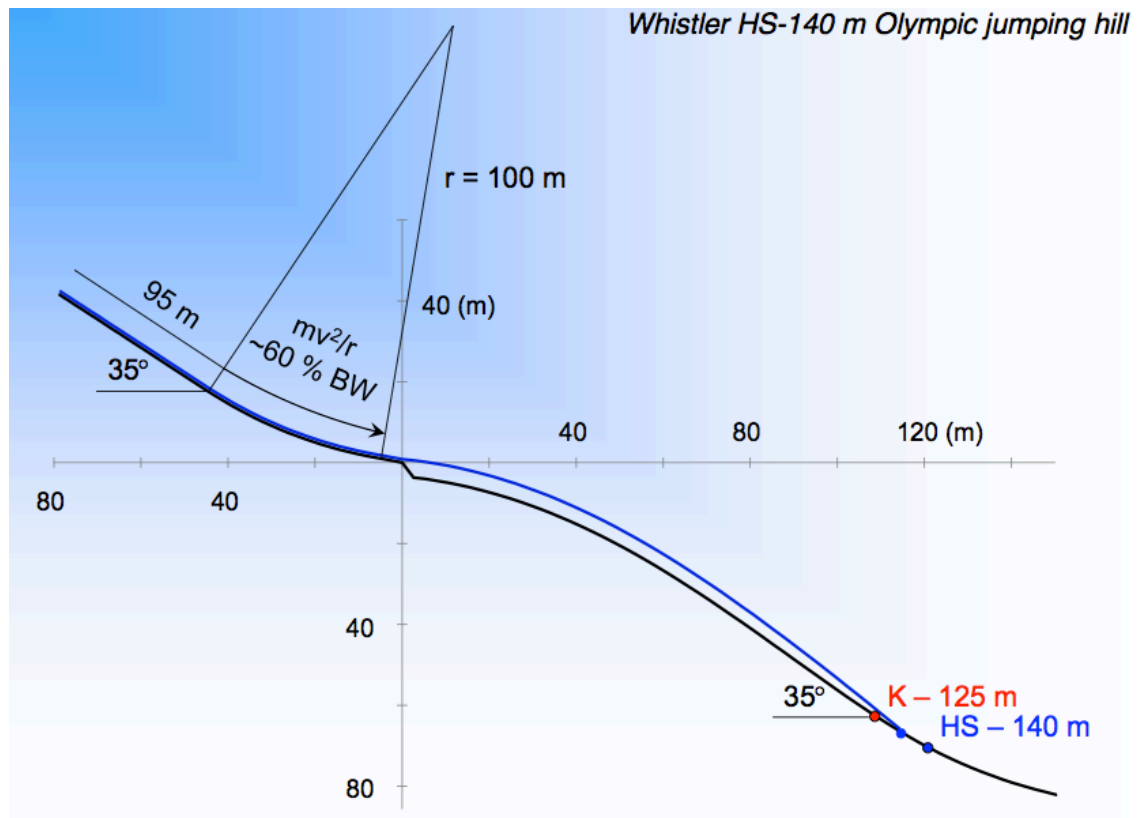
Fysiikan näkökulmasta hypyn pituuteen vaikuttavat hyppääjän vauhtimäessä hankkima nopeus, ponnistuksen voimantuotolla saavutettu kohtisuora lähtönopeus suhteessa hyppyrin keulaan, aerodynaaminen nosto- ja vastusvoima ponnistuksen ja ilmalennon aikana sekä hyppääjän ja varusteiden massa. Kaikki edellä mainitut tekijät vaikuttavat hyppääjän painopisteen liikerataan suorituksessa, ja siten hypyn pituuteen. Ponnistuksessa latua vasten kohtisuoraan tuotettu voima aiheuttaa hyppääjälle myös kiertomomenttia eteenpäin, joka mahdollistaa nopean lentoasentoon siirtymisen. (Schmölzer & Müller 2005.)

Ponnistusvaihe on suorituksen laadun kannalta merkittävin. Ponnistusliike suoritetaan muuttuvissa olosuhteissa hyvin lyhyessä ajassa, vaihdellen 0,25 sekunnista 0,30 sekuntiin. Suurmäessä liikkeen tuottamiseen vaaditaan noin 7 metrin matka. (Virmavirta & Komi 2011.) Ponnistuksessa tapahtuneita virheitä ei voida merkittävästi kompensoida ilmalennon aikana, mutta hyvän ponnistuksen hyödyt voidaan helposti menettää ilmalennossa tapahtuvien virheiden johdosta (Virmavirta ym. 2009).

Mäkihyppysuoritus vaatii hyppääjältä erinomaista voimantuoton kapasiteettia, koordinaatiota, havaintomotorisia taitoja, tarkkaa ohjauskykyä, tasapainoa sekä tietynlaisia kehon morfologista rakennetta (Jost 2010). Tutkimuksissa on selkeästi osoitettu, että hyvä lopputulos voidaan saavuttaa erilaisilla tekniikoilla (mm. Virmavirta ym. 2009).

Suorituksessa tavoiteltavien ilmiöiden optimointi vaatii aina kompromissien tekemistä, sillä ne ovat osittain toisiaan poissulkevia (Virmavirta ym. 2005). Myös aerodynaamisten elementtien korostuminen on asettanut haasteita eritellä ja ymmärtää ponnistusvaiheen yksittäisten parametrien vaikutusta hypyn lopputulokseen (Virmavirta & Komi 2011).

Tutkimushavaintojen pohjalta voidaan päätellä, että tehokas mäkihyppysuoritus vaatii yleisten lainalaisuuksien toteutumisen lisäksi tekniikan yksilöllistä optimointia. Kuvassa 1 nähdään tyypillinen suurmäen profiili ja hyppymäen mittasuhteet, joiden avulla voidaan hahmottaa mäkihyppääjän suoritusympäristö kokonaisuutena.



KUVA 1. Whistlerin suurmäen (HS-140 m) profiili, mittasuhteet ja esimerkki hyppääjän lentoradasta (Virmavirta 2011).



## 2.1 Vauhtimäen laskuasento

Hyppääjän vauhtimäessä hankkima nopeus on merkittävin yksittäinen hypyn pituuteen vaikuttava tekijä (Virmavirta & Komi 1993). Vauhtimäki koostuu suorasta osasta, sitä seuraavasta kaarevasta osasta ja hyppyrinkeulan suorasta osasta, joka osoittaa noin 10° alaspäin (Schwameder 2008). Vauhtimäen laskun aikana hyppääjän potentiaalienergia muuttuu kineettiseksi energiaksi lähes 90 % hyötysuhteella. Suksien ja ladun välisen kitkan, sekä laskuasennon aerodynaamisen nosto- ja vastusvoiman suuruus vaikuttavat muutoksen hyötysuhteeseen. (Grosz ym. 2011.) Koska sekä kitkavoiman että ilmanvastuksen vaikutuskohta on hyppääjään painopisteen alapuolella, pyrkivät ne aiheuttamaan hyppääjälle kiertomomenttia eteenpäin (Ettema & Bråten 2004; Ettema ym. 2005 mukaan). Vauhtimäen suoralla osalla asennon normaalivoiman vaikutussuora kulkee hie- man kehon painopisteen etupuolella, kumoten eteenpäin vaikuttavan kiertomomentin. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että kehon painopiste on taempana suhteessa jalka- pohjan tasapainopisteeseen. (Ettema ym. 2005.)

Vauhtimäen suoralla osuudella hyppääjän latuun kohdistama voima on hyppääjän painon aiheuttaman normaalivoiman komponentti (kaava 1). Kitkavoiman suuruus voidaan laskea kertomalla kitkakerroin normaalivoiman suuruudella (kaava 2). Hyppyrimäessä suksien ja ladun välinen kitkakerroin ( $\mu$ ) on noin 0,05 (Virmavirta & Komi 2000b). Aerodynaamisen vastusvoiman määrittelyssä (kaava 3)  $c_d$  on aerodynaamisen vastusvoiman kerroin,  $\rho$  on ilman tiheys,  $A$  kuvastaa kappaleen pinta-alaa kohtisuoraan nopeuden suuntaan ja  $V$  tarkoittaa kappaleen nopeutta.

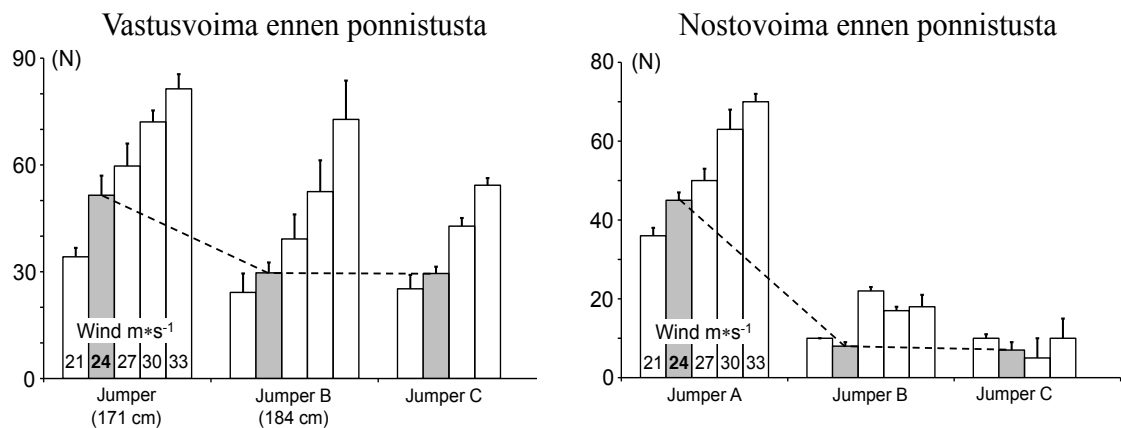
$$1) F_n = m \cdot g \cdot \cos \theta$$

$$2) F_f = \mu_f \cdot F_N$$

$$3) F_d = c_d \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2$$

Välittömästi puomilta lähdettyään hyppääjä asettuu matalaan laskuasentoon saavuttaakseen mahdollisimman suuren nopeuden ja hyvän lähtökohdan tehokkaalle ponnistusliikkeelle. Asennon on oltava riittävän matala ja virtaviivainen aerodynaamisen vastusvoiman minimoimiseksi, mutta riittävän korkea salliakseen nopean ponnistusliikkeen. (Schwameder 2008.) Kehon painopisteen tasainen jakautuminen suksien päällä, sekä suksien ja kehon asennon hallinta laskun aikana ovat myös tehokkaan asennon tunnusmerkkejä (Grosz ym. 2011).

Virmavirta ja Komi (2000a) havaitsivat painepohjallisten avulla, että vauhtimäen suoralla osalla painekeskuste on keskimäärin melko tasaisesti jakautunut kantapäähän ja päkiän välille. Yksilöiden välillä on havaittu sen sijaan merkittäviä eroja laskuasennon aerodynaamisissa ominaisuuksissa (kuva 2), jotka vaikuttavat suoraan hyppääjän saavuttamaan nopeuteen. Asennon suuri ilmanvastus lisää myös aerodynaamista nostovoimaa, joka syntyy kun ilmavirta pääsee ylävartalon alle. (Virmavirta ym. 2001a.) Lihasten aktivaation kannalta vauhtimäen suora osa ei aiheuta hyppääjälle suuria haasteita. Polven ojentajalihakset (mm. vastus lateralis, VL) pitävät asennon korkeuden stabiilina, kun taas säären etu- ja takaosan lihakset (mm. tibialis anterior, TA, gastrocnemius, GA) ylläpitävät tasapainoa eteen-taakse suunnassa. (Virmavirta & Komi 2011.)



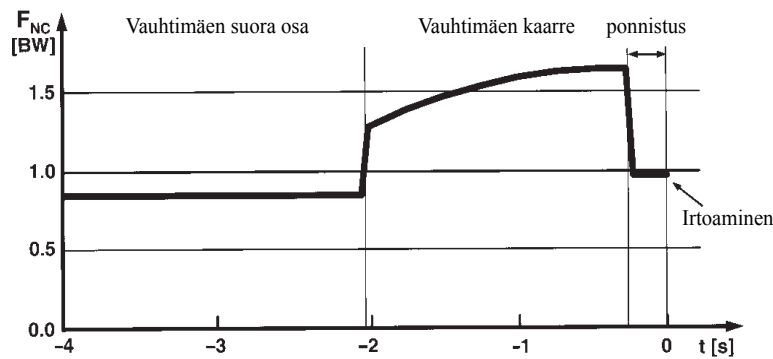
KUVA 2. Kolmen hyppääjän laskuasennon aerodynaaminen vastus- (vas) ja nostovoima (oik) eri tuulen nopeuksilla tuulitunnelissa. (mukailtu Virmavirta & Komi 2011.)

Vauhtimäen laskuasento on optimoitava yksilöllisesti. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. nivelten liikelaajuus, kehon mittasuhteet, tehon tuoton kapasiteetti, sensomotoriset ominaisuudet sekä ponnistustekniikka. Laskuasennon taitaminen vaikuttaa oleellisesti ponnistustapahtuman onnistumisen todennäköisyyteen. (Grosz ym. 2011, Schwameder ym. 1997.)

### 2.1.1 Kaarrelaskun dynamiikka

Hyppääjä pyrkii säilyttämään laskuasennon muuttumattomana vauhtimäen kaarteiden aikana ulkoisten voimien muutoksesta huolimatta. Kun hyppääjän liikerata kulkee vauhtimäen pinnan mukaisesti, kohdistuu kaarteiden aikana painopisteeseen liikesuunnan muutosta eli kiihtyvyyttä. Tämän ns. keskipakovoiman suuruus riippuu hyppääjän no-

peudesta, massasta sekä kaarteeseen säteestä. (Ettema ym. 2005.) Keskipakovoiman aiheuttaman normaalivoiman komponentin lisääntyminen voidaan laskea kaavalla  $F_c = mv^2 / r$ . Voiman suuruus on yleensä noin 60 % hyppääjän massasta. (Schwameder 2008.) Lihasaktiivisuuksien kannalta keskipakovoiman lisääntyminen näkyy selkeästi polven ojentajalihasten (VL) aktivaation lisääntymisenä (Virmavirta & Komi 2011). Kuvasta 3 nähdään latua vasten kohtisuoran voiman suuruus ajan funktiona ilman ponnistusliikettä.

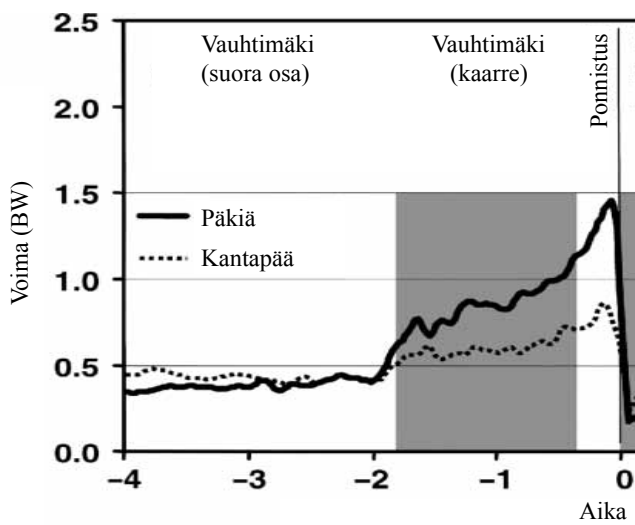


KUVA 3. Kehon painoon suhteutettu kohtisuora voima latua vasten vauhtimäen aikana ilman ponnistusliikettä (mukailtu Schwameder 2008).

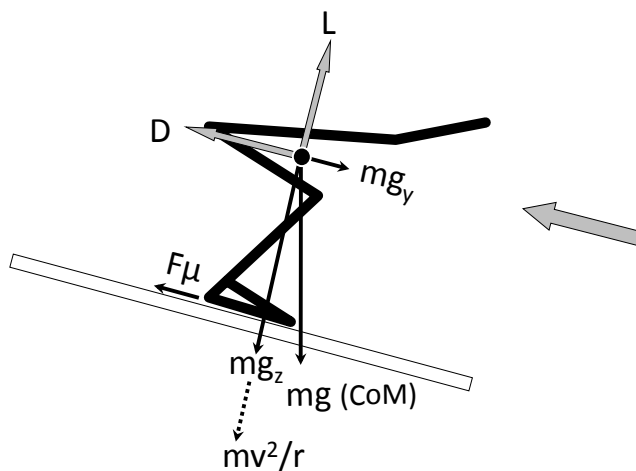
Kaarrelaskun dynamiikka voidaan jakaa sisään- ja ulostuloon. Kaarteelle tultaessa normaalivoiman lisääntymisen myötä kitkavoima kasvaa, joka korostaa ulkoisten voimien aiheuttamaa kiertomomenttia eteenpäin. Tapahtuma aiheuttaa nopean vasteen hyppääjän hermolihasjärjestelmässä, saaden aikaan voimantoton lisääntymisen mekaanisen ja hermostollisen mekanismin kautta. Samassa yhteydessä hyppääjän tasapainopiste jalkapohjan alla siirtyy nopeasti eteenpäin, jotta vastakkaissuuntaista momenttia voidaan kasvattaa ja ylläpitää asennon tasapainoa. (Ettema ym. 2005.)

Mikäli kaarteelta poistutaan staattisessa laskuasennossa, tapahtuu käytännössä vastakkainen ilmiö. Kitkavoiman pienentyessä eteenpäin vaikuttava momentti heikentyy, johon hyppääjä reagoi siirtämällä tasapainopistettä jalkapohjan alla taaksepäin. Käytännössä normaalivoiman vaikutussuora sijoittuu tällöin hyvin lähelle kehon painopistettä tai hieman sen taakse. Mikäli ponnistusvaiheen voimantuotto aloitetaan juuri ennen keulan suoralle osalle siirtymistä, haasteet tasapainon säilyttämisen kannalta helpottuvat ja voimantuottoa pystytään toteuttamaan vakaammin. (Ettema ym. 2005.)

Kaarrelaskun haasteet korostavat dynaamisen tasapainokyvyn merkitystä eli laskuasennon tasapainosta vastaavien lihasten (TA, GA) hyvä koordinaatio on tärkeää. Kaarrelaskun loppuvaihe on erittäin kriittinen ponnistuksen ajoituksen ja koordinaation suhteen. (Virmavirta & Komi 2011.) Mikäli hyppääjän tasapaino ehtii siirtyä kantapäille keulan suoralle osalle tultaessa, aiheuttaa se ongelmia ponnistusliikkeen suuntaamisessa (Virmavirta & Komi 2000a). Kuvassa 4 nähdään miten tasapaino jalkapohjan alla tyypillisesti jakautuu kantapään ja päkiän välillä laskuasennossa ja ponnistuksessa. Kuvassa 5 nähdään yhteenvetona vauhtimäen laskun aikana hyppääjään vaikuttavat ulkoiset voimat.



KUVA 4. Keskimääräinen ( $n=22$ ) voiman jakautuminen päkiän ja kantapään alla vauhtimäen aikana (mukailtu Schwameder 2008).



KUVA 5. Hyppääjään vaikuttavat voimat laskuasennon aikana.  $D$  = ilmanvastus,  $L$  = nostovoima,  $F\mu$  = kitkavoima,  $mg_z$  = normaalivoiman komponentti,  $mv^2/r$  = keskipakovoiman komponentti,  $mg$  = putoamiskiihtyvyyden komponentti,  $mg_y$  = liikkeen suuntainen komponentti. (Virmavirta 2000.)

### 2.1.2 Laskuasennon muuttujien yhteys suorituksen tehokkuuteen

Laskuasennon muuttujien merkitystä mäkihypyn kokonaissuoritukseen on tutkittu ver-raten vähän (Schwameder 2008). Janura ym. (2010) tekivät 10 vuotta kestäneen pitkäai-kaisseurannan laskuasennon keskimääräisistä muutoksista maailman-cup tasolla. Par-haiden hyppääjien asentojen kinemaattiset muuttujat eivät eronneet merkittävästi koko ryhmän keskiarvoista seurantajakson aikana, mutta yleisessä tarkastelussa laskuasento on kokenut muutoksia vuosikymmenen aikana. Hyppääjien asento on muuttunut sy-venemmäksi nilkka- ja polvinivelten osalta, mutta ylävartalon segmentin kulma suhteessa vaakatasoon on kasvanut hieman. (Janura ym. 2010.)

Schwameder ym. (1997) pyrkivät selvittämään yksilön kannalta optimaalista laskuasen-toa. Keskeinen havainto oli, että korkeammasta asennosta ponnistusliikkeen voiman-tuottoaika lyheni ilman vertikaalisen lähtönopeuden heikentymistä. Toisin sanoen pon-nistusliikkeen teho kasvoi. Tutkijoiden mielestä korkeampi asento mahdollistaisi lasku-asennon säilyttämisen pidempään, mutta toisaalta lisäisi asennon vastuspinta-alaa. Tut-kimuksessa pohdittiinkin, voisiko asentoa mukauttaa vauhtimäen aikana optimaalisen vaikutuksen saamiseksi. He pitivät kuitenkin oleellisimpana asiana, että laskuasento optimoidaan yksilöllisten ominaisuuksien perusteella. (Schwameder ym. 1997.) Tutki-musten joukosta löytyy myös havaintoja, joissa laskuasennon syvyys on korreloinut positiivisesti hyppääjän suorituskykyyn. Teoriassa voimantuoton optimoinnin kannalta syvästä laskuasennosta on mahdollista tuottaa suurempi voimaimpulssi. (Virmavirta & Komi 1993.)

Grosz ym. (2011) saivat tehokkaasti parannettua hyppääjäryhmän vauhtimäen nopeuk-sia kahden viikon prosessin aikana. Asetelmassa kategorisoitiin yksilöiden keskeisiä ongelmia puomilta lähdön ja vauhtimäen asennon osalta. Ongelmiin räätälöitiin harjoit-telukonsepti, joka tutkimuksessa on tarkasti kuvailtu. Koehenkilöiden nopeus parani intervention aikana 2–3 %. (Grosz ym. 2011.) Taulukossa 1 nähdään laskuasentoa kos-kevien ongelmien jaottelu.

Taulukko 1. Vauhtimäen laskuasentoa heikentävät tekijät (Grosz ym. 2011).

**Ongelman määrittely**


---

 Kehon painopisteen epäsymmetrinen jakautuminen suksille

Painopisteen sijainnin muutokset kaartein aikana

Puutteellisesti suoristettu ylävartalo (ei ”pitkää niskaa”)

Kädet alhaalla, ylhäällä tai koukussa

Pää tai katse liian ylhäällä tai alhaalla

Epäsopiva asennon syvyys

---

Vauhtimäen aikana kerätty nopeus on hyvin ratkaiseva muuttuja hypyn pituuden kannalta (mm. Virmavirta & Komi 1993). Koska asennon ja varusteiden sekä aerodynaamiset että kitkaominaisuudet vaikuttavat suoraan nopeuden hankintaan, voidaan näiden elementtien optimoimista pitää hyvin tärkeänä (Virmavirta ym. 2001a). Taulukosta 2 nähdään tietokonesimulaatioon perustuvat laskelmat nopeuden muutoksen merkityksestä eripituisissa hyppyissä. Laskuasennon tehokkuutta pohdittaessa ei sovi myöskään unohtaa, kuinka kaarrelaskun dynamiikka ja muut ulkoiset voimat vaikuttavat kokonaisuuteen. Vaikka mäkihypyn ponnistuksen on mielletty olevan puhdas konsentrinen liike, sisältää se kaartein keskipakovoimasta johtuen todennäköisesti jonkinasteisen venymis-lyhenemissyklin (Virmavirta & Komi 1993).

TAULUKKO 2. Vauhtimäen nopeuden vaikutus hypyn pituuteen Whistlerin HS-140 mäessä (Virmavirta &amp; Kivekäs 2012).

		Pitkä hyppy		Keskiarvo hyppy		Lyhyt hyppy	
Muuttuja	Muutos	140 m	vaikutus (m)	120 m	vaikutus (m)	100 m	vaikutus (m)
Nopeus	+ 1 km/h	143,8	3,8	127,0	7,0	110,1	10,1

**2.2 Ponnistuksen voimantuotto ja sen yhteys suorituksen tehokkuuteen**

Ponnistusvaiheen oletetaan olevan mäkihypyysuorituksen tärkein osa-alue, sillä se määrittelee lähtökohdan lentovaiheelle. Ponnistusvaiheen vaikeutta korostavat alati muuttuvat ulkoiset voimat, sekä äärimmäisen lyhyt suoritus aika. Suurmäessä hypääjän on

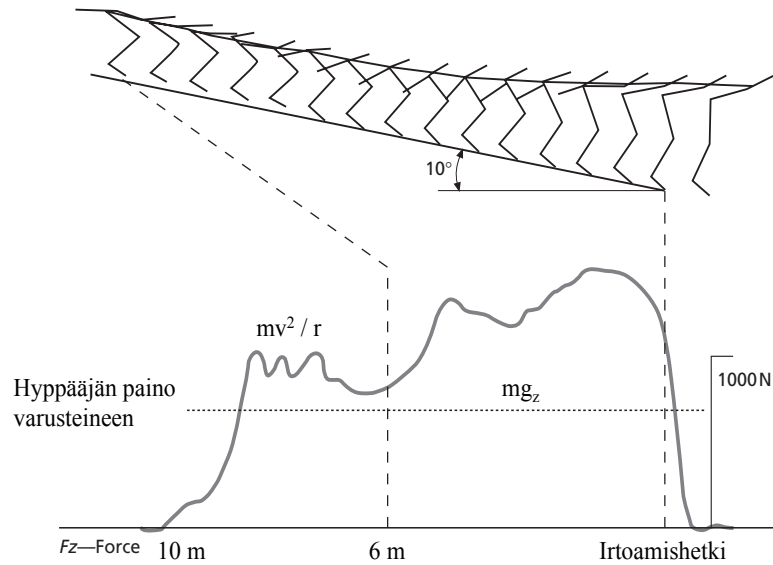
siirryttävä noin 25 m/s nopeudessa syvästä laskuasennosta lentovaiheeseen alle 0,3 sekunnissa. Ponnistuksen voimantuotto tulisi aloittaa vauhtimäen kaarteeseen loppuvaiheilla. Sen tavoitteena on nostaa hyppääjän painopistettä, sekä tuottaa kiertomomenttia eteenpäin. Ponnistusvaiheen luonteen vuoksi on ymmärrettävää, että mäkihypyn biomekaniikan tutkimus on selkeästi painottunut tämän osa-alueen ympärille. (Schwameder 2008.) Tietokonesimulaation perusteella hyppääjä lentäisi suurmäestä ilman ponnistuksen voimantuottoa vain 30 metriä (Virmavirta & Komi 2011).

### 2.2.1 Reaktivoimat

Ponnistuksessa lihakset tuottavat voiman, joka aiheuttaa nivelmomentin (Sasaki & Tsunoda 1997). Nivelvoimien jatkuvuuden periaatteen mukaisesti lihas- ja nivelvoimat summautuvat ja välittyvät vipujärjestelmässä luu-luu voimina vivusta toiseen kohti alustaa (Virmavirta 2003). Lihasten aktiivisuuden oletetaan korreloivan kineettisiin parametreihin, kuten nivelvoimiin. Tosin tasasuunnatun EMG:n korrelaatio ei ole kuitenkaan lineaarinen vaan eksponentiaalinen. (Sasaki ym. 1995.)

Voiman ja vastavoiman lain mukaisesti alustasta kohdistuu hyppääjään reaktivoimaa, joka aiheuttaa hyppääjälle sekä translaatiota että rotaatiota. Mäkihypyssä voiman tuottamiseen osallistuu pääasiassa kaksi niveltä; polvi- ja lantionivel. Näitä niveliä ojentavien lihasten (mm. VL ja gluteus, GL) aktiivisuus kasvaa taas melko tasaisesti läpi ponnistuksen, mutta tyypillisesti GL:n aktivoituminen korostuu hieman myöhemmin. (Virmavirta & Komi 2000b.) Ponnistusliikkeessä ylävartalosegmentin liike tuottaa ilmeisesti suurimman osuuden kokonaistehosta, mutta nivelmomenttien suhde vaihtelee eri tekniikoiden välillä. Joka tapauksessa myös lantion ojentajalihasten toimintakapasiteetti on mäkihyppääjälle tärkeä ominaisuus. (Sasaki & Tsunoda 1997.)

Reaktivoimia mittaamalla on voitu selkeästi todentaa, että onnistuneissa suorituksissa voimantuotto alkaa ennen kaarteeseen keskipakovoiman loppumista. Voimakuvaaajista voidaan nähdä, että normaalivoiman suuruudessa ei tapahdu äkillistä pienenemistä hyppyrin keulan suoralle osalle tultaessa. Voimantuoton maksimiarvo saavutetaan yleensä noin 4 metriä ennen keulan päättymistä, ja sen suuruusluokka on keskimäärin hieman yli kaksi kertaa hyppääjän kehonpainoa suurempi. (Kaps ym. 1997.) Kuvassa 6 nähdään esimerkki mäkihyppyponnistuksen voimantuoton kuvaajasta.



KUVA 6. Kohtisuoraan latua vasten tuotettu voima.  $mv^2/r$  on kaarteella hyppääjään vaikuttava pinnan tukivoima, ja  $mg_z$  on hyppääjän paino. Voimantuotto alkaa ennen kaarteen säteen loppumista. (mukailtu Virmavirta 2003.)

Voimantuotto kohtisuoraan latua vasten on mäkihypyssä korostuneessa asemassa, sillä matala kitka suksien ja ladun välissä ei mahdollista horisontaalisen voiman hyödyntämistä (Virmavirta & Komi 2001). Reaktiivoimien suuruus ja suunta ovat ponnistuksen avaintekijöitä. Latua vastaan kohtisuora voimantuotto ajan funktiona määrittelee hyppääjään lineaarisen liikemäärän muutoksen ( $\Delta p = \int F_n \cdot \Delta t$ ). (Schwameder 2008.) Hyppyrimäessä ponnistuksen voimantuoton on havaittu olevan noin 70 % simulaatioponnistuksen voimantuotosta (Vaverka ym. 1993). Simulaatioponnistus tarkoittaa lajiponnistuksen imitaatiota kuivaharjoitteluolosuhteissa.

Vertikaalisen voimantuoton on todettu korreloivan suorituksen tehokkuuden kanssa. Tutkimuksissa voimantuoton suuri maksimiarvo ja suuri nettoimpulssi olivat yhteydessä pidemmälle kantaneisiin hyppyihin. (Virmavirta & Komi 1993, Yamanobe & Watanabe 1999.) Continental cup tasoisten hyppääjien suorituksissa voimantuoton parametrit olivat hyvin identtisiä saman hyppääjän eri suoritusten välillä. Myös eri hyppääjien voimantuoton parametreista löytyi paljon samankaltaisuuksia, vaikka suoritukset toteutettiin erilaisilla tekniikoilla. (Yamanobe & Watanabe 1999.)

Ponnistuksen alkuvaiheessa, n. 6–2 metriä ennen irtoamista, tuotettu voimataso vaikuttaa olevan enemmän yhteydessä hypyn pituuteen kuin suuri maksimivoima ponnistuk-



sen loppuvaiheessa (Virmavirta & Komi 1993). Tehokkaan voimantuoton edellytyksenä näyttää olevan, että hyppääjän painopiste ei siirry liioin eteen eikä taakse ponnistuksen alkuvaiheessa (Virmavirta 2000). Voimantuoton ajallinen määrittely on mahdollista tehdä vain reaktivoimia tulkitsemalla, sillä voimantuotto ilmenee selkeästi ennen silmillä havaittavan liikkeen alkua. Myös vauhtimäen kaartein keskipakovoima vaikeuttaa varsinaisen ponnistusliikkeen voimantuoton alkuvaiheen määrittelyä. (Virmavirta & Komi 2011.)

Ponnistuksen aikana paineen jakautuminen jalkapohjien alla vaikuttaa olevan pääsääntöisesti päkiävoittoinen (Schwameder & Müller 1995). Liikkeen loppuvaihetta kuvastaa lisäksi paineen liikkuminen jalan etuosan mediaaliselle puolelle (Virmavirta & Komi 2000a). Mäkihypyn simulaatioponnistusten voimantuottoa mitattaessa on havaittu, että paineen vaihtelu jalkapohjan alla heikentää pystyvoiman impulssia. Yleensä painekestipiteen taakse-eteen vaihtelu yhdistyy horisontaalisen voimantuoton lisääntymiseen, mikä samaan aikaan näkyy lähes poikkeuksetta vertikaalivoiman heikentymisenä. (Hakola 2014.) Paremmilla hyppääjillä tasapaino jalkapohjien alla vaikuttaa olevan vakaampi läpi ponnistuksen (Virmavirta & Komi 2001).

Kineettisten parametrien osalta ponnistuksen on havaittu olevan hyvin saman kaltainen erikokoisissa mäissä. Mittauksissa ei ole havaittu merkittäviä mäkikohtaisia muutoksia tasapainon käyttäytymisessä jalkapohjan alla, lihasaktiivisuuksien ilmenemisessä tai voimantuoton muuttujissa ajan funktiona. Tätä taustaa vasten voidaan olettaa, että harjoittelu pienimmissä mäissä ei sekoita ponnistuksen liikemallia, vaan voi itse asiassa toimia hyvänä erikoisharjoitteluna. (Virmavirta ym. 2001b.) Taulukosta 3 nähdään, kuinka pelkän vertikaalivoiman suuruuden muutokset vaikuttavat laskennallisesti hypyn pituuteen.

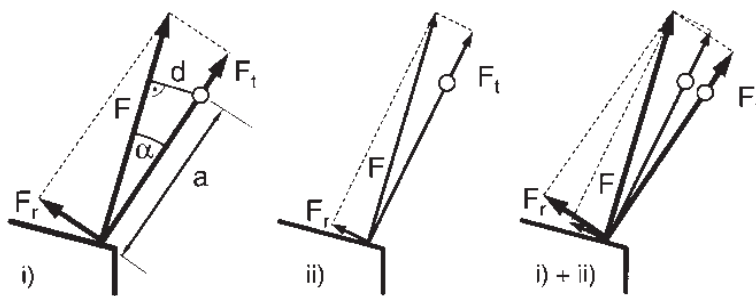
TAULUKKO 3. Ponnistusvoiman muutosten vaikutus hypyn pituuteen Whistlerin HS-140 mäessä (Virmavirta & Kivekäs 2012).

Muuttuja	Muutos	Pitkä hyppy		Keskiarvo hyppy		Lyhyt hyppy	
		140 m	vaikutus (m)	120 m	vaikutus (m)	100 m	vaikutus (m)
Ponnistus-	+1 %	140,5	0,5	120,8	0,8	101,1	1,1
voima (ka.)	+ 5 %	142,0	2,0	123,3	3,3	105,1	5,1

### 2.2.2 Kiertomomentti

Ponnistuksen voimantuoton yksi oleellinen tavoite on aiheuttaa hyppääjälle kiertomomenttia eteenpäin, joka kompensoi aerodynaamisen vastusvoiman aiheuttaman vastakkaisen momentin (Schwameder 2008). Taaksepäin kiertävän momentin suuruus riippuu hyppääjä-sukset systeemin asennosta, ja on siten suuresti riippuvainen ylävartalon liikkeistä ojennusten aikana. Mitä enemmän vastakkaista momenttia pääsee syntymään, sitä tehokkaammin hyppääjän on kompensoitava tilannetta voimantuoton avulla, jotta nopea siirtyminen lentoasentoon olisi mahdollista. Ilman vertikaalista voimantuottoa lentoasentoon kiertyminen ei ole mahdollista. (Virmavirta & komi 2011.)

Kulmaliikemäärää eteenpäin syntyy, kun reaktivoiman vaikutussuora kohdistuu hyppääjän painopisteen taakse. Kulmaliikemäärää aiheuttava voima muodostuu normaali-voiman ja tangentialisen (kitka) voiman komponenteista. Tosin matalan kitkakertoimen ansiosta kitkavoiman merkitys on vähäinen. Resultanttivoimantuoton reaktivoima, joka ilmenee kohtisuoraan suhteessa latuun, voidaan jakaa translaatiota ja rotaatiota aiheuttaviin komponentteihin (kuva 7). Translaatiota tuottava komponentti kulkee hyppääjän painopisteen kautta, ja rotaatiota tuottava komponentti suorassa kulmassa tähän nähden. (Schwameder 2008.)



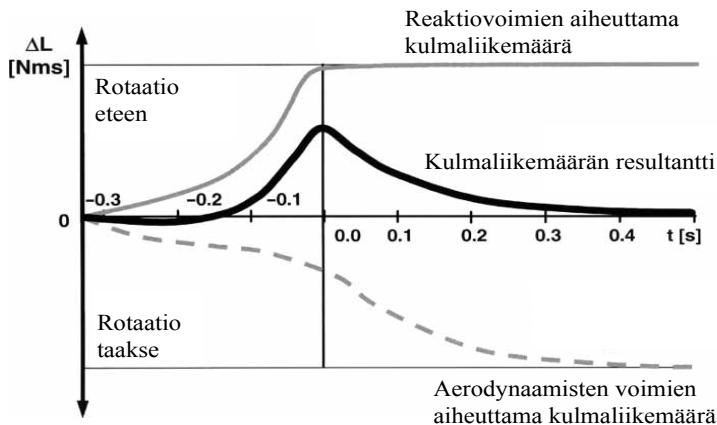
KUVA 7. Resultanttivoima ( $F$ ) ja voiman komponentit ( $F_r$  = rotaatio ja  $F_t$  = translaatio) ponnistuksessa kehon painopisteen suhteellisen sijainnin muuttuessa.  $a$  = rotaatiota aiheuttavan voimakomponentin momenttivarsi suhteessa painopisteeseen,  $d$  = normaalivoiman momenttivarsi suhteessa painopisteeseen. (Schwameder 2008.)

Edellisen kuvan vektorianalyysistä nähdään selkeästi, kuinka painopisteen suhteellinen sijainti resultanttivoiman vektoriin nähden vaikuttaa enemmän rotaatiota, kuin translaatiota tuottavan komponentin suuruuteen. Edelleen on hieman epäselvää, tulisiko hyp-

pääjän maksimoida vai optimoida kulmaliikemäärän suuruus ponnistuksen avulla. (Schwameder 2008.) Kaavalla 4 voidaan laskea rotaatiota aiheuttavan voimakomponentin suuruus, ja kaavalla 5 kulmaliikemäärän suuruus resultanttivoiman avulla.

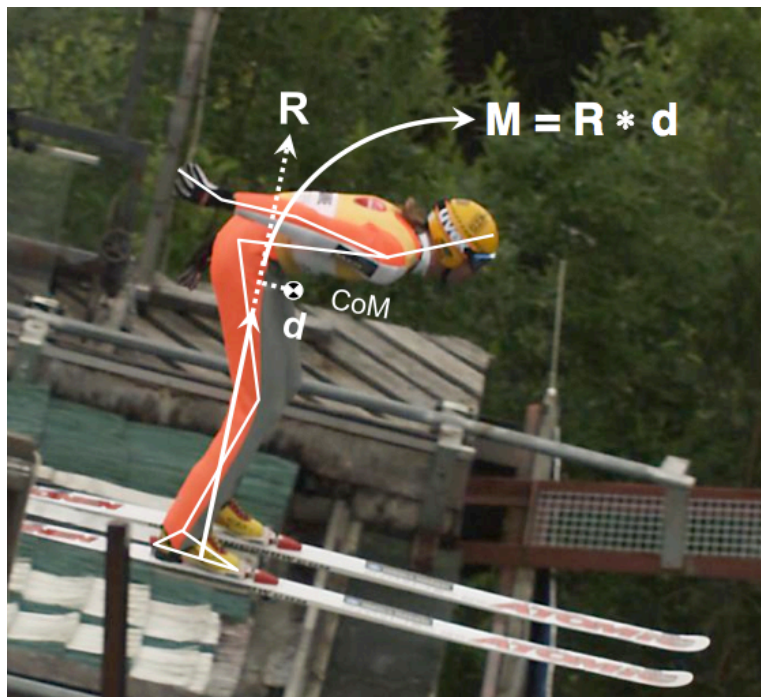
$$4) F_r = F \cdot \sin \alpha \qquad 5) \Delta L = f(F \cdot d) \cdot \Delta t$$

Mittauksissa on havaittu hyppääjien kiertomomentin olevan ponnistuksen aikana keskimäärin  $66 \pm 10 \text{ Nm}$  ja lopullinen kulmaliikemäärä irtoamishetkellä noin  $19 \pm 3 \text{ Nms}$ . Tehokkaan suorituksen edellytyksenä vaikuttaa olevan, että ponnistusvaiheen ja alkulennon aikana vaikuttavat momentit kumoavat toisensa mahdollisimman nopeasti ja tarkasti (kuva 8). (Schwameder & Müller 1995.)



KUVA 8. Hyppääjän kulmaliikemäärän kuvaus ponnistuksen aikana (negatiivinen aika) ja ilmalennossa. Voimantuoton ja ilmanvastuksen aiheuttamat momentit kumoavat tarkasti ja nopeasti toisensa. (mukailtu Schwameder & Müller 1995.)

Arndt ym. (1995) päättelivät ponnistuksen avulla tuotetun reaktivoiman merkityksen olevan tärkeämpi kiertomomentin kuin nousukorkeuden kannalta. Tutkijaryhmä arvioi kiertomomentin suuruutta välillisesti kinemaattisen datan avulla, josta he määrittivät muuttujan ”somersault angle” (volttikulma). Tällä tarkoitettiin polvesta hartiaan määritellyn linjan kulmamuutoksia suhteessa horisontaaliseen tasoon. Tutkijaryhmä havaitsi nopeammin pienenevän volttikulman olevan yhteydessä nopeammin saavutettuun lentoasentoon ja pidempiin hyppyihin. (Arndt ym. 1995.) Kuvassa 9 havainnollistetaan vielä, kuinka reaktivoima vaikuttaa hyppääjään.



KUVA 9. Reaktiovoiman vaikutussuora (R) kohdistuu jalkapohjan painekeskipisteeseen, aiheuttaen hyppääjän painopisteelle (CoM) latuun nähden sekä kohtisuoraa kiihtyvyyttä että kierto-momenttia momenttivarren (d) välityksellä (Virmavirta & Komi 2011).

### 2.3 Ponnistuksen kinematiikka ja sen yhteys suorituksen tehokkuuteen

Mäkihypyn ponnistusvaihetta on tutkittu eniten kinemaattisten muuttujien kautta (Schwameder & Müller 2001). Tutkimuksen keskeisenä tavoitteena on ollut liikkeen teknisen kuvailun lisäksi selvittää eri muuttujien yhteyttä suorituksen tehokkuuteen (Müller & Schwameder 2003). Useimmissa tutkimuksissa korrelaatiokertoimet ponnistuksen kinemaattisten parametrien ja hypyn pituuden välillä ovat vaihdelleet välillä  $r = 0,3-0,6$ . Melko heikko tilastollinen yhteys tarkoittaa todennäköisesti sitä, että useimpien hyppääjien ponnistustekniikassa on yksilöllisiä piirteitä. (Vodicar & Jost 2010.) Kinemaattisissa tutkimuksissa tarkastellaan pääasiassa kehon nivelten, segmenttien ja painopisteen sijainnin kulmamuuutoksia, sekä nopeuden ja kiihtyvyyden muutoksia.

### 2.3.1 Kulmamuuttujat

Myös kinemaattisen datan perusteella voidaan sanoa, että mäkihypyn ponnistus on kahden nivelen, polven ja lantion, rytmisen ja kiihtyvä toiminto. Polvinivelen astekulma muuttuu ponnistuksen aikana noin 70 asteesta 140 asteeseen, ja ojentuminen jatkuu vielä hyppyrin pöydältä irtoamisen jälkeen. Kulmanopeus saavuttaa verraten suuren arvon, ollen irtoamishetkellä noin 12 rad/s. Lantionivelen kulmamuutos tapahtuu keskimäärin 30 asteesta 100 asteeseen. Hyvässä ponnistuksessa myös lantion kulmanopeus on suhteellisen korkea, noin 10 rad/s, joka johtuu enemmän reisi-, kuin ylävartalosegmentin liikkeistä. (Virmavirta ym. 2009.)

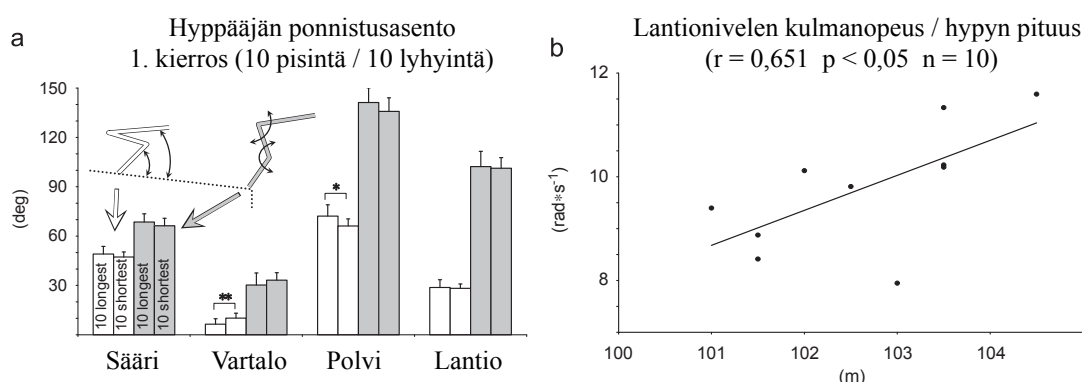
Säären asennon pitäminen vakiona, erityisesti ponnistuksen alkuvaiheessa, vaikuttaa mahdollistavan tehokkaamman voimantuoton alustaa vasten, ja toisaalta ylävartalon kiihtyvän liikkeen eteenpäin (Virmavirta & Komi 1994). Riittävä säärikulma ojennusten aikana mahdollistaa yläpuolisten segmenttien rotaation tukipisteen etupuolelle, mikä on edellytys kiertomomentin syntymiselle. Toisaalta ylävartalon eteneminen horisontaalisesti liian kauas nilkasta aiheuttaa usein kompensatioliikkeen, jolloin ylävartalon kulmaa kasvatetaan suhteessa liikesuuntaan. Vaihtoehtoisesti säären asento nousee pysymmäksi. (Virmavirta ym. 2009.)

Chardonens ym. (2013) toteuttivat asetelman, jossa määriteltiin sääri-, reisi-, ja ylävartalosegmenttien välisen koordinaation (CRP) merkitystä suorituksen laadun kannalta. Hyppääjät saavuttivat suurempia pituuksia, kun reisisegmentti johti liikettä suhteessa ylävartaloon ja säärisegmentti oli inaktiivinen mahdollisimman pitkään. Keskimäärin hyppyissä reisi ja ylävartalo toimivat synkronisesti ponnistuksen ensimmäisen kolmanneksen ajan, toisella kolmanneksella ylävartalo toimii hieman aktiivisemmin ja viimeisellä kolmanneksella reisisegmentti oli vastaavasti aktiivisempi. Reisi- ja ylävartalosegmentin toiminnan hyvä synkronisaatio vaikutti korreloivan positiivisesti hyppäjien pituuksien kanssa. Tutkijat korostivatkin, että liikkeiden koordinaatio vaikuttaa olevan tärkeämpää kuin liikkeiden absoluuttinen suuruus. (Chardonens ym. 2013.)

Muutamissa tutkimuksissa polvinivelen tai reisisegmentin kinemaattisten muuttujien osalta on löydetty jotain selkeitä korrelaatioita suorituksen tehokkuuden kanssa. Paremmilla hyppääjillä on havaittu polvinivelen olevan hieman ojentuneempi ponnistuk-

sen loppuvaiheessa. (Janura ym. 2011.) Myös polvinivelen ekstension kulmanopeuden on havaittu korreloivan positiivisesti suorituksen tehokkuuden kanssa (Arndt ym. 1995). Sen sijaan Torinon Olympialaisissa (2006) tehdyissä mittauksissa ei havaittu merkittäviä eroja tämän muuttujan osalta suhteessa hyppyjen pituuteen (Virmavirta ym. 2009). Schwameder & Müller (1995) totesivat kuitenkin aiemmin, että hypyn pituuteen korreloi eniten hyppääjän vertikaalinen irtoamisnopeus ja polvinivelen ojentumisnopeus (Schwameder & Müller 1995).

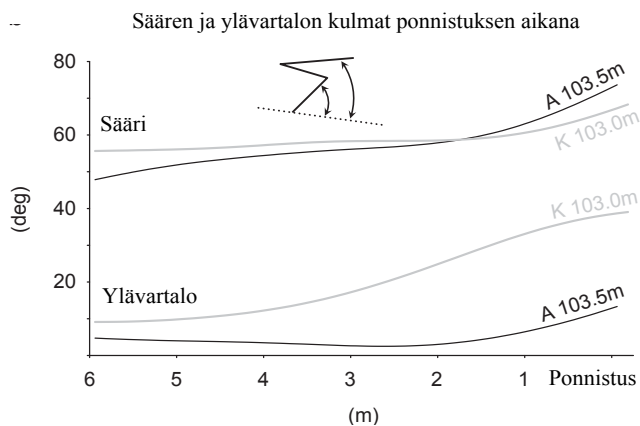
Myös lantionivelen ja ylävartalosegmentin liikkeistä on löydetty yhteyksiä hypyn pituuteen. Torinon Olympiakilpailuissa parhaiten menestyneillä hyppääjillä ylävartalon asento oli vain hieman matalampi irtoamishetkellä, mutta lantionivelen ekstension kulmanopeus sen sijaan korreloi merkittävästi hypyn pituuden kanssa (kuva 10). (Virmavirta ym. 2009.) Liberecin mm-kilpailuissa (2009) tehdyissä mittauksissa todettiin, että parhaiten menestyneet hyppääjät kykenivät liikkuttamaan ojennusten aikana ylävartaloa eteenpäin siten, että se ei heijastunut yhtä voimakkaana ylävartalon avaamisena kuin heikommilla hyppääjillä (Janura ym. 2011).



KUVA 10. a) Ponnistusasennon vertailua 10 parhaimman (vas) ja 10 heikoimman (oik) hyppääjän välillä. Valkoinen pylväs = lähtöasento, harmaa pylväs = irtoamishetki. b) Lantionivelen kulmanopeuden (irtoamishetki) ja hypyn pituuden välinen korrelaatio. (mukailtu Virmavirta ym. 2009.)

Useampia kinemaattisia tutkimuksia yhdistää havainto, että hyvä hyppy on mahdollista toteuttaa hyvin erilaisilla tekniikoilla (mm. Virmavirta ym. 2009, Janura ym. 2011). Janura ym. (2011) kehottivat urheilijoita ja valmentajia hyppytekniikan yksilölliseen kehittämiseen. Heidän selvityksensä mukaan eri tekniikoissa vaihtelu on pienintä reisisegmentin osalta, kun taas sääri- ja vartalosegmentin käyttö vaihtelee yksilöiden välil-

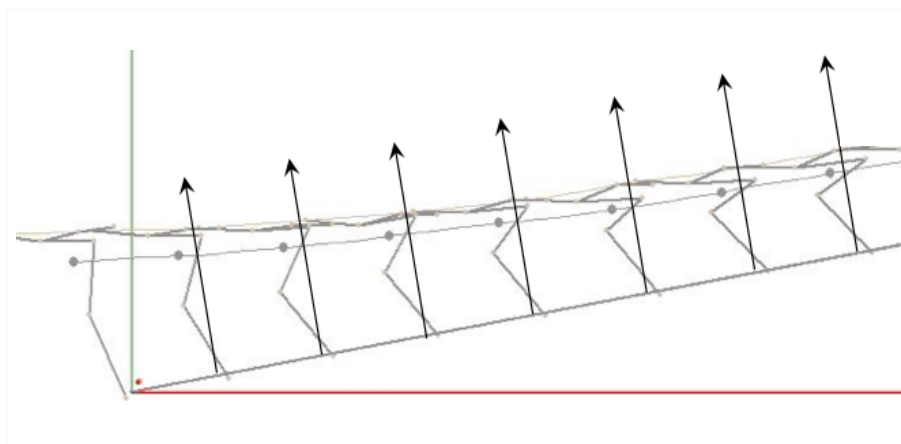
lä eniten. Tässä tarkastelussa otettiin huomioon vain hyppyrin keulan 2 viimeistä metriä. (Janura ym. 2011.) Kuvassa 11 nähdään esimerkki, kuinka kahdella hyvin erilaisella tekniikalla saavutettiin lähes sama hypyn pituus kilpailussa.



KUVA 11. Kahden hyppääjän säären ja ylävartalon kulmamuutokset ponnistuksen aikana (mukailtu Virravirta ym. 2009).

### 2.3.2 Painopisteen liikerata

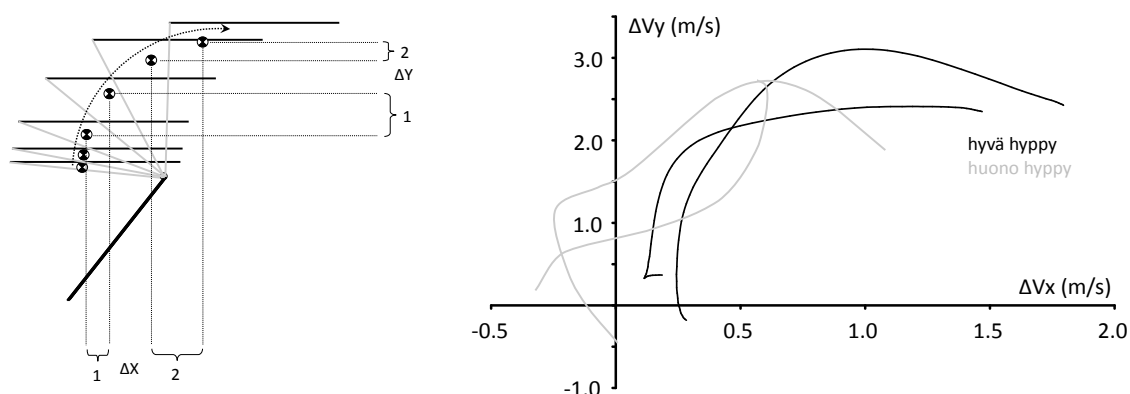
Hochmuth (1958) arvioi ballistiikan ja aerodynamiikan vaikutuksia siten, että 23 m/s nopeudella  $3^\circ$  painopisteen radan kohoaminen pienentää hyppääjän nopeutta 1 m/s, mutta lisää hypyn pituutta 9–14 m. Kehon painopisteen kohoamisen vaikutus lähtökulmaan voidaan laskea kaavalla  $\tan \alpha = \text{nousukorkeus (m)} / \text{ponnistusmatka (m)}$ . Kuvassa 12 nähdään yksilöllinen esimerkki, kuinka hyppääjän painopiste kohoaa ponnistuksen aikana suhteessa hyppyrin keulaan. Painopisteen vertikaalinen kiihtyvyys vertautuu suoraan ponnistuksen reaktivoimaan ( $F = ma$ ).



KUVA 12. Painopisteen kohoaminen ponnistuksen aikana (mukailtu Virravirta 2011).

Hyppääjän painopisteen kohtisuora nopeus hyppyrin keulaan nähden on irtoamishetkelä noin 2–3 m/s, mikä tarkoittaa hieman yli 30 cm nousukorkeutta (Virmavirta & Komi 2011). Paremmat hyppääjät näyttävät myös pystyvän säilyttämään painopisteensä horisontaalisen nopeuden ponnistuksen aikana paremmin kuin heikommat hyppääjät (Virmavirta ym. 2009). Janura ym. (2011) mittasivat hyppääjien painopisteen suhteellista sijaintia ponnistuksen kahdella viimeisellä metrillä, mutta eivät havainneet tilastollisesti merkitseviä muutoksia eritasoisten hyppääjien välillä.

Kuvassa 13 nähdään vasemmalla puolella teoreettinen kuvaus painopisteen lineaarisista muutoksissa  $x$ – $y$  suunnassa ponnistuksen aikana. Liikkeen alkuvaiheessa tulisi korostua painopisteen nousu vertikaalisesti, kun taas loppuvaiheessa painopiste kiertää enemmän eteenpäin suhteessa nilkkaan. Painopisteen vertikaalinen muutos on ponnistuksen tehoa, kun vastaavasti horisontaalinen muutos mahdollistaa kiertomomentin syntymisen. Oikealla puolella kuvataan, kuinka painopisteen nopeus suhteessa nilkkaan tyypillisesti eroaa hyvissä ja huonoissa suorituksissa. (Virmavirta 2003, Virmavirta 2011.)

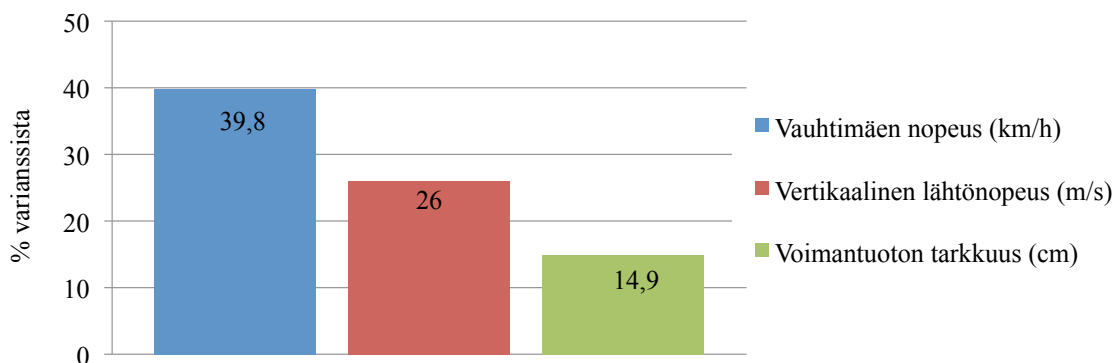


KUVA 13. Vasen: Painopisteen liikerata  $x$ – $y$  suunnassa (Virmavirta 2003), oikea: painopisteen nopeus suhteessa nilkkaan eritasoisissa hyppyissä (Virmavirta 2011).

Vodicar & Jost (2010) selvittivät faktorianalyysin avulla kinemaattisten muuttujien yhteyttä suorituksen tehokkuuteen. Analyysissä huomioitiin 29 parhaan slovenialaisen mäkihyppääjän 7 eri hyppyä. Riippumattomia muuttujia analyysissä olivat painopisteen nopeus vauhtimässä, painopisteen vertikaalinen lähtönopeus ja voimantuoton tarkkuus. Riippuvana muuttujana oli hypyn pituus. Voimantuoton tarkkuus määriteltiin painopisteen vertikaalisen nopeuden maksimiarvon ilmenemiskohdasta suhteessa hyppyrin keulaan. Riippumattomat muuttujat selittivät 80,7 % riippuvan muuttujan varianssista. Tu-



lostien yhteenvedosta (kuva 14) nähdään, että nopeusmuuttujat korreloivat voimakkaimmin hypyn pituuden kanssa. (Vodicar & Jost 2010.)



KUVA 14. Kinemaattisten muuttujien faktorilatauksen voimakkuudet suhteessa hypyn pituuteen (mukailtu Vodicar & Jost 2010).

Tutkimuksessa eniten yksilöllistä vaihtelua ilmeni voimantuoton tarkkuudessa, mikä saattaa johtua useista (myös psykologisista) tekijöistä. Tutkijoiden mielestä kaikkien kolmen muuttujan hyvä onnistuminen on edellytys huipputason suorituksille. Ilmeisesti ponnistuksen tarkkuusmuuttuja on enemmän latentti vaikuttaja nopeuden faktoreihin, joten sen merkitys voi olla oletettua suurempi. Myös useat muut muuttujat ovat todennäköisesti vuorovaikutuksessa toisiinsa. (Vodicar & Jost 2010.)

## 2.4 Aerodynaamisten voimien vaikutus ponnistukseen

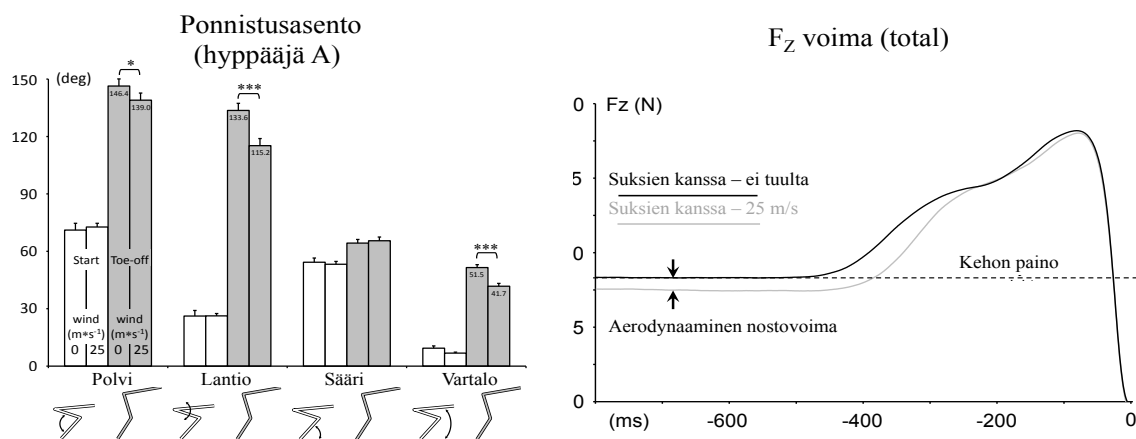
Hyvässä laskuasennossa aerodynamiikan nostovoima on lähellä nollaa ja lentoasennossa yli 300 N. Ponnistuksen aikana nostovoima on tekniikasta riippuen jotain tältä väliltä, keventäen ja nopeuttaen liikettä. (Virmavirta ym. 2001a.) Aerodynaamiset voimat kasvavat neliöön suhteessa hyppääjän nopeuteen (Virmavirta & Komi 2011). Ylävartalon käytön aiheuttamaa ilmanvastusta tulisi minimoida, mutta yhtäältä hyppääjän tulisi saavuttaa mahdollisimman suuri vertikaalinen lähtönopeus hyödyntämällä myös ylävartaloa ponnistuksessa. Tämä ei kuitenkaan vaadi liian radikaaleja kompromisseja taitavalta hyppääjältä. (Virmavirta & komi 1993.)

Tuulitunnelissa tehtyjen mittausten perusteella on voitu määritellä tarkemmin aerodynaamisen nostovoiman vaikutusta ponnistuksen voimantuottoon. Ilmavirran nopeudella

27 m/s simulaatioponnistuksen voimantuottoaika lyheni 14 %, mutta hyppääjän vertikaalinen lähtönopeus ja maksimivoiman arvo eivät muuttuneet nollatuulella tehtyihin suorituksiin verrattuna. Lyhyempi voimantuottoaika voidaan selittää nostovoimalla, joka keventää hyppääjän kehon painoa ( $mg - L$ ). (Virmavirta ym. 2001a.) Luurankoliakselle tyypilliseen voima-nopeus riippuvuuteen perustuen, tämä mahdollistaa nopeamman voimantuoton (Komi & Virmavirta 2000). Myös sama lähtönopeus pienemmällä voimaimpulsilla selittyy ilmavirran keventävällä vaikutuksella (Virmavirta ym. 2001a).

Aerodynaaminen nostovoima syntyy ilmavirran käyttäytymisestä hyppääjän ylävartalon ympärillä ja on suuresti riippuvainen ylävartalon asennon muutoksista liikkeen aikana. Hyppyrimäkiolosuhteissa nostovoiman nopeuttava ja keventävä vaikutus on todennäköisesti vielä merkittävämpi kuin simulaatioponnistuksissa, koska voimantuoton suunta kohdistuu paremmin samaan suuntaan nostovoiman kanssa. Tämä entisestään korostaa ponnistuksen räjähtävää luonnetta. (Virmavirta ym. 2001a.) Hyödyntämällä tämän ilmiön oikeanlaisella ylävartalon käytöllä, on ponnistusta mahdollista nopeuttaa voimantuoton heikentymättä (Komi & Virmavirta 2000).

Tuulitunnelikokeissa on myös havaittu, että ilmavirran vaikutuksen alla simulaatioponnistuksen liikkeistä tulee aerodynaamisempia. Tämä tarkoittaa käytännössä matalampaa ylävartalon asentoa irtoamishetkellä. Suksien ja siteiden käyttö simulaatioponnistuksissa vaikuttaa lähinnä paineen vaihteluihin jalkapohjan alla, tehden ponnistusliikkeestä tasapainoisemman. (Virmavirta ym. 2011.) Kuvassa 15 nähdään ilmavirran vaikutus simulaatioponnistuksen kinemaattisiin muuttujiin ja vertikaaliseen voimantuottoon. Taulukossa 4 on tietokonesimulaation perustuva arvio aerodynaamisten voimien vaikutuskertoimista valmiusasennon ja ponnistuksen aikana.



KUVA 15. Vasen: Keskimääräinen ponnistusasento ( $n = 4-10$ ) nollatuulella ja vastatuulella 25 m/s. Valkoiset pylväät = lähtöasento, harmaat pylväät = irtoamishetki.  $*p < .05$ ,  $***p < .001$ . Oikea: Keskimääräinen voimakuvaja ( $n = 4-10$ ) eri olosuhteissa. (mukailtu Virmavirta ym. 2011.)

TAULUKKO 4. Tuulitunnelissa mitatut aerodynaamisen vastus- ( $c_d$ ) ja nostovoiman ( $c_l$ ) vaikutuskertoimet laskuasennon ja ponnistuksen aikana (Whistler HS-140). Laskelmat on tehty hyppääjän todellisten antropometriset tietojen mukaan. (Virmavirta & Kivekäs 2012.)

Kerroin	Laskuasento	Ponnistus
$c_d$	0,082	0,22
$c_l$	0,028	0,20

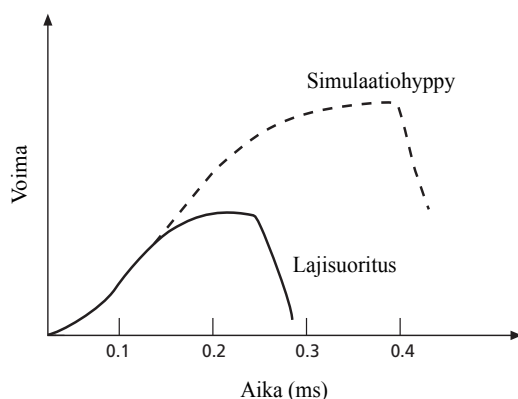
Ilman tiheys  $1,11 \text{ kg/m}^3$  (900 m korkeudessa), hyppääjän nopeus 26 m/s.

## 2.5 Ponnistustapahtumaa rajoittavat tekijät

Suuren nopeuden aikaansaama lyhyt voimantuottoaika, sekä vauhtimäen kaarteeseen aiheuttama keskipakovoima ja sen häviäminen keulan suoralle osalle tultaessa asettavat erityisiä vaatimuksia hyppääjän aisti- ja hermolihaskäytännölle. Myös mäkihyppääjän varusteet ja eri mäkienvaihtelevat profiilit asettavat omat haasteensa tehokasta ponnistusta ajatellen. (Virmavirta 2000.) Keskimäärin hyvän hyppääjän voimantuotto hyppyrin keulalla vastaa noin 35 cm nousukorkeutta, mikä on merkittävästi vähemmän kuin nousukorkeus normaalissa vertikaalihypyssä (Virmavirta & Komi 2011).

Isometrisessä lihastyössä luurankolihasen maksimaalinen aktivaatio vaatii noin 600–1200 ms. Keskimäärin myös staattisen vertikaalihypyn tai simulaatioponnistuksen voi-

mantuottoaika on noin 500 ms. Koska hyppyrimäessä käytettävä aika on alle 300 ms, voidaan lihaksen voima-aika riippuvuuteen perustuen todeta ajan olevan ponnistuksen tehoa rajoittava tekijä. Myös lihaksen voima-nopeus riippuvuus rajoittaa hyppääjän maksimaalista voimantuottoa erittäin nopeassa ponnistusliikkeessä, jota ilmavirran nostovoima edelleen korostaa. Hyppyrimäessä voimantuotto aloitetaan tyypillisesti verrat- ten syvästä asennosta, jolloin lihaksen voima-pituus ominaisuus asettaa haasteita eten- kin voimantuoton alkuvaiheen tehokkuudelle. Aktivoidun lihaksen esivenytys lisää voimantuottokapasiteettia, joka tapahtuu tyypillisesti esimerkiksi esikevennetyssä verti- kaalihypyssä. Hyppyrimäessä tämän ilmiön hyödyntäminen, ainakin merkittävässä mää- rin, on hyvin haastavaa. (Komi & Virmavirta 2000.) Kuvassa 16 verrataan simulaa- tioponnistuksen ja lajiponnistuksen voimantuottoa.



KUVA 16. Voimantuoton kuvaaja ajan funktiona simulaatio-, ja lajiponnistuksessa (mukailtu Komi & Virmavirta 2000).

Voimantuottoa optimoitaessa kaikki kehoa ojentavat nivelet tuottaisivat maksimaalisen nivelmomentin (Sasaki & Tsunoda 1997). Suuren ilmanvastuksen takia ylävartalon käyttö on kuitenkin hyppyrimäkiolosuhteissa rajallista (Virmavirta & Komi 2011). Myöskään jäykkä mäkikenkä ja suksien käyttäytyminen ilmalennon alkuvaiheessa eivät salli nilkan plantaarifleksiota siinä määrin kuin normaalissa vertikaalihypyssä. Simulaa- tioponnistuksia vertailtaessa monojen käyttö näyttää heikentävän lähtönopeutta yli 8 % lenkkikenkään verrattuna. (Virmavirta & Komi 2001.)

Vähäinen kitka suksien ja ladun välillä rajoittaa voimantuoton suuntaa siten, että hyp- pääjä voi hyödyntää käytännössä vain latua vasten kohtisuoraan tuotetun voiman (Vir- mavirta & Komi 2000b). Ponnistusvaiheessa alati muuttuvat ulkoiset voimat ovat haaste voimantuoton tasapainoa ajatellen (Virmavirta 2000). Paineen vaihtelu jalkapohjan alla

heikentää yleensä ponnistusliikkeen tehokkuutta, joten ulkoisten voimien vaihtelu voi siten rajoittaa liikkeen vaikuttavuutta. Karkeat virheet ponnistuksen suunnassa ja tasapainossa ovat myös konkreettinen vaaratekijä hyppärimäkiolosuhteissa, mikä tuo oman elementtinsä suoritukseen. (Virmavirta & Komi 2001.)

Suorituksen ballistiset ja aerodynaamiset tekijät ovat osittain toisiaan poissulkevia. Ponnistuksen yksilöllinen optimointi vaatii aina kompromisseja tekniikan toteutuksessa, ja taitavat hyppääjät pystyvät toteuttamaan tämän tehokkaammin. (Virmavirta & Komi 2001.) Myös hyppärimäkien erilaiset profiilit haastavat hyppääjien taitoa. Parhaimmat hyppääjät pystyvät sopeuttamaan tekniikkansa muuttuviin olosuhteisiin, mutta heikompien hyppääjien osalta ponnistustapahtuman tehokkuus voi kärsiä. (Virmavirta 2000.)

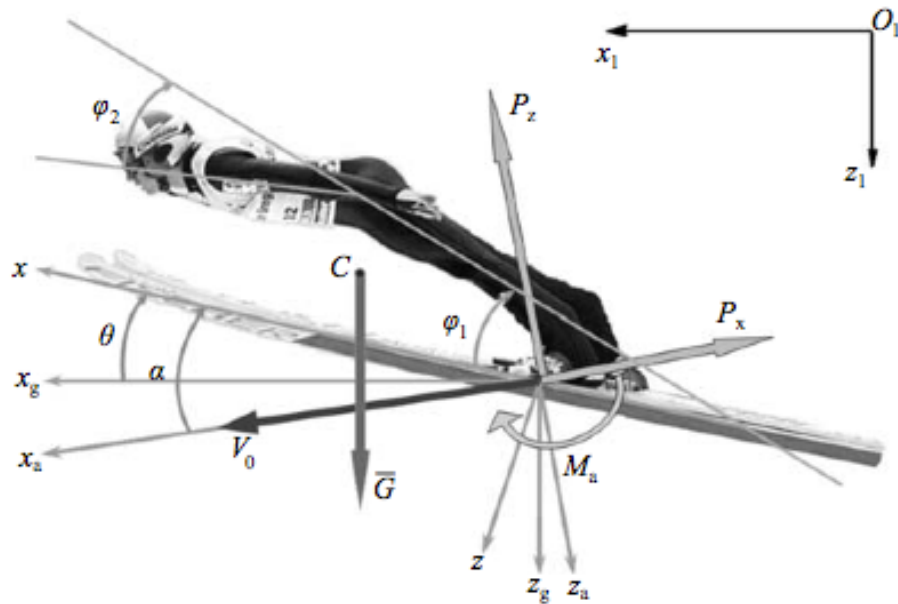
Ajoituksen vaatimus on niin ikään yksi lisähaaste ponnistusvaihetta ajatellen. Kuten yleisesti tiedetään, hyppääjä ei voi aloittaa voimantuottoaan haluamaansa aikaan, vaan liikkeen on toteutettava vauhtimäen profiilin mukaisesti. Tämä on yksi selkeä ero kiuvaalla maalla tapahtuviin ponnistuksiin verrattuna, joissa urheilija voi rauhassa tunnustella sopivaa asentoa ja ponnistushetkeä (Virmavirta 2000). Ponnistuksen ajoituksen tärkeyttä onkin korostettu useissa tutkimuksissa (mm. Virmavirta 2000, Vodigar & Jost 2010).

## **2.6 Ilmalentovaihe**

Ilmalento voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen; alkulento, stabiili lento ja alastulon valmistelu. Alkulennolla tarkoitetaan yleensä välivaihetta ponnistuksesta stabiiliin lentoon. (Schwameder 2008.) Tämän vaiheen on arvioitu olevan ponnistuksen ohella kriittisin hypyn onnistumisen kannalta (mm. Arndt ym. 1995, Virmavirta ym. 2005). Biomekaanisessa tarkastelussa stabiilin lentovaiheeseen vaikuttavat gravitaatiovoima, sekä aerodynaaminen nosto- ja vastusvoima. Hyppääjän tavoitteena on saavuttaa stabiilissa lentovaiheessa optimaalinen vastus-nostovoima suhde, sekä pitää yllä hyppääjä-sukset systeemin vakautta. Maksimoidakseen hypyn pituuden, hyppääjä pyrkii tekemään alastulon valmisteluvaiheen niin myöhään kuin mahdollista. (Schwameder 2008.)

Urheilijan kehon ja suksien asento vaikuttavat aerodynaamisten voimien suuruuteen, ja

siten hypyn lopputulokseen. Vaikka lennon ilmiöitä on tutkittu jonkin verran, on edelleen epävarmaa miten ilmanpaine ja sen muutokset käyttäytyvät hyppääjä-sukset systeemissä. Stabiilin lentovaiheen edellytys on, että systeemiin kohdistuvien voimien aiheuttamien momenttien summa on nolla. Hypyn pituus ei johdu pelkästään asennon nosto-vastusvoima suhteesta, vaan myös molempien absoluuttisesta suuruudesta. Tämän yhtälön optimointi riippuu täysin kehon antropometrisista ominaisuuksista sekä varusteiden laadusta. Käytännössä lennon alkuvaiheessa hyppääjä pyrkii minimoimaan aerodynaamisen vastusvoiman, ja loppuvaiheessa lisäämään sitä. Vastusvoiman lisääntyminen lisää myös nostovoimaa. (Schmölzer & Müller 2005.) Kuvassa 17 nähdään lentovaiheen analysointiin käytettäviä kulmamuuttujia, sekä hyppääjän vaikuttavia voimia.

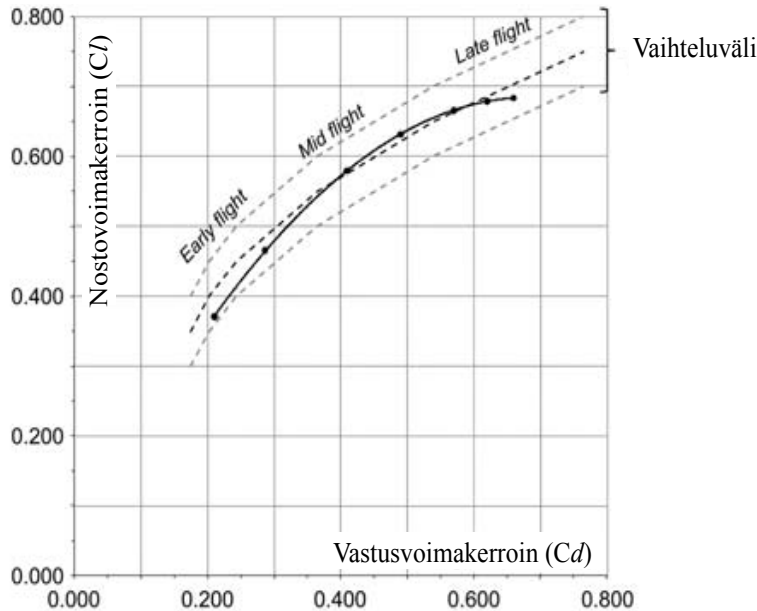


KUVA 17. Lentovaiheen analysointiin käytettäviä kulmamuuttujia, sekä hyppääjän vaikuttavat voimat lentovaiheessa.  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  = asentokulmat,  $\theta$  = kallistuskulma,  $\alpha$  = hyökkäyskulma,  $V_0$  = lennon tangentialinen nopeus,  $G$  = gravitaatiovoima,  $P_z$  = nostovoima,  $P_x$  = vastusvoima,  $M_a$  = kiertomomentti. (Maryniak ym. 2009.)

Aerodynaaminen nosto- ( $F_l$ ) ja vastusvoima ( $F_d$ ) riippuvat hyppääjän asennon muodosta, pinta-alasta sekä varusteiden laadusta. Mikäli vastus- ja nostovoiman kertoimet ( $C_{l/d}$ ) ovat tiedossa, voidaan voimien suhde laskea kaavalla 6, jossa  $\rho$  = ilman tiheys,  $V$  = nopeus ja  $A$  = pinta-ala. Voimien suhde vaihtelee lennon eri vaiheissa ja on myös riippuvainen suorituksen laadullisista muuttujista. (Virmavirta & Kivekäs 2012.) Kuvassa 18 nähdään nosto- ja vastusvoimien suhde lennon eri vaiheessa suurmäen kriittiselle pis-

teelle (120 m) kantaneessa hypyssä. Taulukossa 5 on lueteltuna hieman pidemmän (130 m) referenssihypyn laskennalliset kertoimet.

$$6) F_{l/d} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_{l/d} \cdot A$$



KUVA 18. Nosto- ja vastusvoiman polaariset diagrammit. Datapisteet vastaavat 5.2%, 10.4%, 31.3%, 45.8%, 62.5% ja 72.9% lentoajasta. (Virmavirta & Kivekäs 2012.)

TAULUKKO 5. Referenssihypyn aerodynaamiset vastus- ( $c_d$ ) ja nostovoimakertoimet ( $c_l$ ) ilmalennon aikana (Whistler HS-140). Laskelmat on tehty hyppääjän todellisten antropometrisien tietojen mukaan. (Virmavirta & Kivekäs 2012.)

Kerroin	Lentovaihe (s)	0,5	1,0	2,0	2,5	3,0	3,5
$c_d$		0,32	0,38	0,42	0,47	0,56	0,66
$c_l$		0,50	0,56	0,59	0,63	0,68	0,73

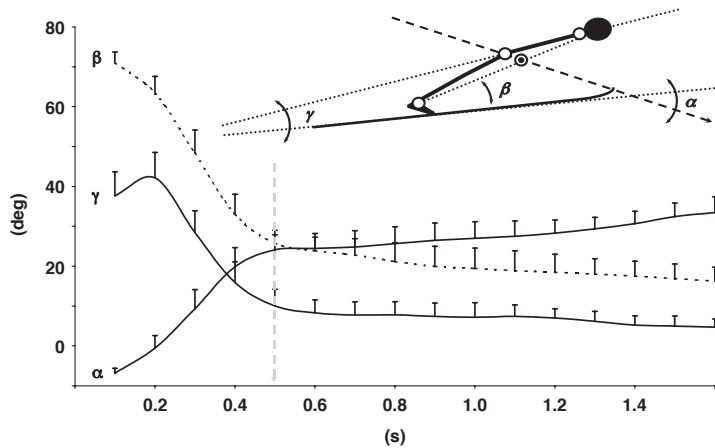
Ilman tiheys  $1,11 \text{ kg/m}^3$  (900 m korkeudessa), hyppääjän nopeus 26 m/s.

### 2.6.1 Alkuilmalennon muuttujien yhteys hypyn pituuteen

Hyppääjän tärkein tavoite alkuilmalennon osalta on saavuttaa lentoasento mahdollisimman nopeasti (Schwameder 2008). Erityisesti lentovaiheen ensimmäinen 40 m kuvastaa ponnistuksen onnistumista, sillä suotuisaa kehon asentoa ei voida saavuttaa ilman ponnistuksen avulla tuotettua kiertomomenttia eteenpäin. Nopeuden säilyttäminen ja aerodynaamisen nostovoiman lisääntyminen alkulennon aikana ovat tärkeitä hypyn

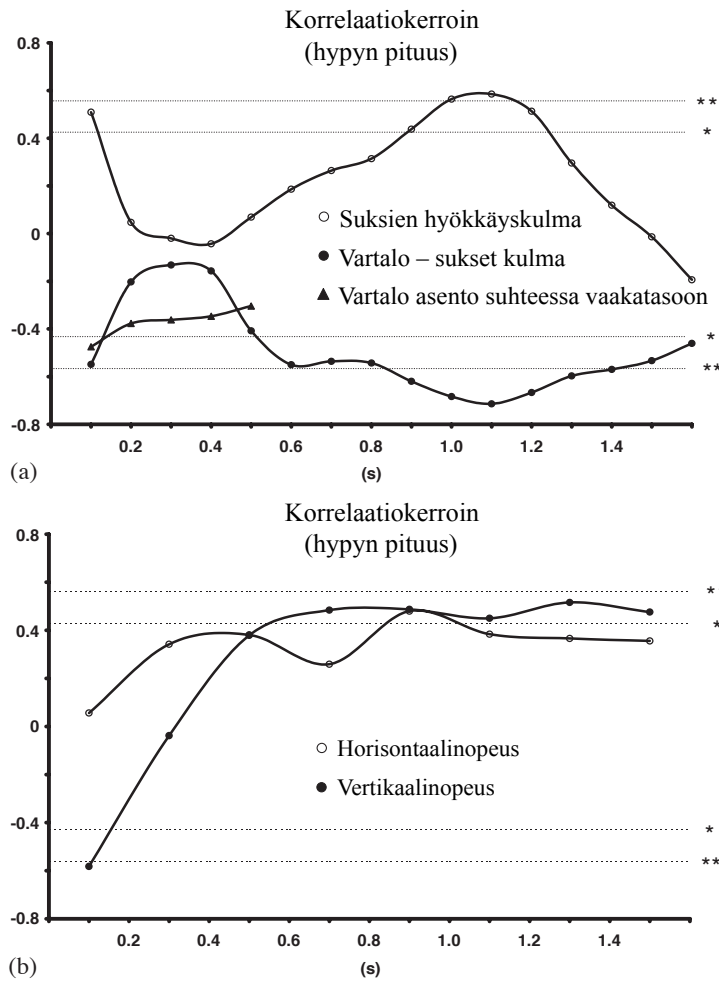
pitouden kannalta. Tässä vaaditaan kuitenkin tietynlaista kompromissia, sillä ne ovat ainakin osittain toisiaan poissulkevia ilmiöitä. (Virmavirta ym. 2005.)

Virmavirta ym. (2005) tutkivat alkuilmalennon kinemaattisia muuttujia ensimmäisen 40 metrin ajalta Salt Lake Cityn suurmäen Olympiakilpailuissa. He havaitsivat, että hypääjien lentoasento oli valmis keskimäärin 0,5 s mennessä (kuva 19). Suurin korrelaatio hypyn pituuden kanssa löytyi ylävartalon ja suksien välisestä kulmasta 0,1 s kohdalla ( $r = -0,549$ ), sekä alkuilmalennon myöhemässä vaiheessa 0,6–1,6 sekunnin kohdalla. Myös suksien hyökkäyskulman muutokset aiheuttivat samankaltaisen vaikutuksen. Kuvassa 20 esitetään alkuilmalennon keskeisten muuttujien ja hypyn pituuden välisen korrelaation käyttäytyminen ajan funktiona. (Virmavirta ym. 2005.)



KUVA 19. Kulmamuuttujien käyttäytyminen alkuilmalennon aikana.  $\alpha$  = suksien hyökkäyskulma,  $\beta$  = suksien ja vartalon välinen kulma,  $\gamma$  = suksien ja ylävartalon välinen kulma. (Virmavirta ym. 2005.)





KUVA 20. a) kulma- ja b) nopeusmuuttujien ja hypyn pituuden välisen korrelaation käyttäytyminen ajan funktiona (Virmavirta ym. 2005).

Kilpailussa osa hyvistäkin hyppääjistä menetti verraten paljon korkeutta alkulennon aikana. Sen sijaan he kykenivät säilyttämään hypyn resultanttinopeuden suurena, jota on mahdollista hyödyntää lennon myöhemmissä vaiheissa. Näyttää siltä, että ponnistuksen tehon puutetta voidaan ainakin osittain kompensoida aerodynaamisella nostovoimalla, jonka suurempi nopeus mahdollistaa. Tosin tämän tutkimuksen tuloksiin saattoi osin vaikuttaa korkean ilmanalan matala ilmanpaine. Joka tapauksessa hyvän tuloksen saavuttaminen näyttää olevan mahdollista erilaisilla lentotekniikoilla. (Virmavirta ym. 2005.)

Arndt ym. (1995) toteuttamassa tutkimuksessa kehon painopisteen nopeus tai korkeus alkulennon aikana ei ole ennustanut merkittävästi hypyn pituutta. Viiden eri kulma- muuttujan kombinaatio riippuvana muuttujana 17 metrin lennon kohdalla selitti hypyn pituutta faktorilatauksella  $R^2 = 0,84$ . Näistä viidestä kulmasta suurimman yksittäisen

yhteyden osoitti ylävartalon asento ( $R^2 = 0,77$ ). (Arndt ym. 1995.) Toisessa tutkimuksessa pieni kulma suksien ja vartalon välillä 20 metrin lennon jälkeen korreloi eniten hypyn pituuden kanssa (Schwameder & Müller 1995). Eri tasoisten hyppääjien vertailussa paremmat hyppääjät saavuttivat aerodynaamisemman asennon heti 5 metrin ilmailmalennon jälkeen. Tämä näkyi suurempana säärisegmentin ja kehon painopisteen eteenpäin kiertymisenä. (Janura ym. 2011.)

### **2.6.2 Olosuhteiden ja kehonpainon merkitys**

Hyppääjän lentorataa ja siihen vaikuttavien parametrien sensitiivisyyttä on arvioitu tietokonesimulaatioilla. Syöttötietoina simulaatioissa on käytetty ballistisia ja aerodynaamisia muuttujia, sekä tuulitunnelimittausten havaintoja. (mm. Schmöltzer & Müller 2005.) Aerodynaamisiin voimiin vaikuttaa liikkeen nopeuden lisäksi ulkopuolinen tuuli, ilman tiheys, sekä hyppääjä-sukset systeemin pinta-ala ja sen aerodynaamiset kertoimet (Müller 2009). Hyppääjän kehonpaino vaikuttaa gravitaatiovoiman (mg) suuruuteen, ja siten määrittelee hyppääjä-sukset systeemin lento-ominaisuuksia (Rausavljevic ym. 2012).

Virmavirta ja Kivekäs (2012) selvittivät mm. vasta- ja takatuulen, sekä kehon painon vaikutusta hypyn pituuteen tietokonesimulaatiolla. Muuttujien sensitiivisyyttä suorituksen aikana tarkasteltiin 0,2 sekunnin välein, ja laskennoissa huomioitiin vain tuulen kohtisuora komponentti. Tutkijat havaitsivat, että hypyn aikana lisääntyvän tai heikentyvän tuulennopeuden vaikutus ei ole lineaarinen (taulukko 6). Hypyn pituudella on myös oleellisesti merkitystä siihen, kuinka paljon tuulen tai kehon painon muutokset vaikuttavat lopputulokseen (taulukko 7). Käytännössä lennon laadulliset tekijät on myös otettava huomioon. Taitava hyppääjä pystyy yleensä hyötymään vastatuulesta enemmän, eikä sivutuuli aiheuta niin suuria teknisiä ongelmia kuin heikommille hyppääjille. (Virmavirta & Kivekäs 2012.)

TAULUKKO 6. Linearisesti vaihtuvan tuulen ja vakiotuulen vaikutus (m) hypyn pituuteen referenssihyppässä (130 m, 26 m/s). Takatuuli (-), vastatuuli (+). (Virmavirta & Kivekäs 2012.)

		Tuulen nopeus alastulossa (m/s)				
		+ 2	+ 1	0	- 1	- 2
Tuulen-	+2	12,5	9,3	6,1	2,7	-0,7
nopeus	+1	10,2	6,9	3,3	-0,3	-3,9
keulalla	0	7,7	4,0	0	-3,9	-7,9
(m/s)	- 1	4,6	0,4	-4,0	-8,3	-12,6
	- 2	0,7	-4,2	-8,8	-13,6	-18,2

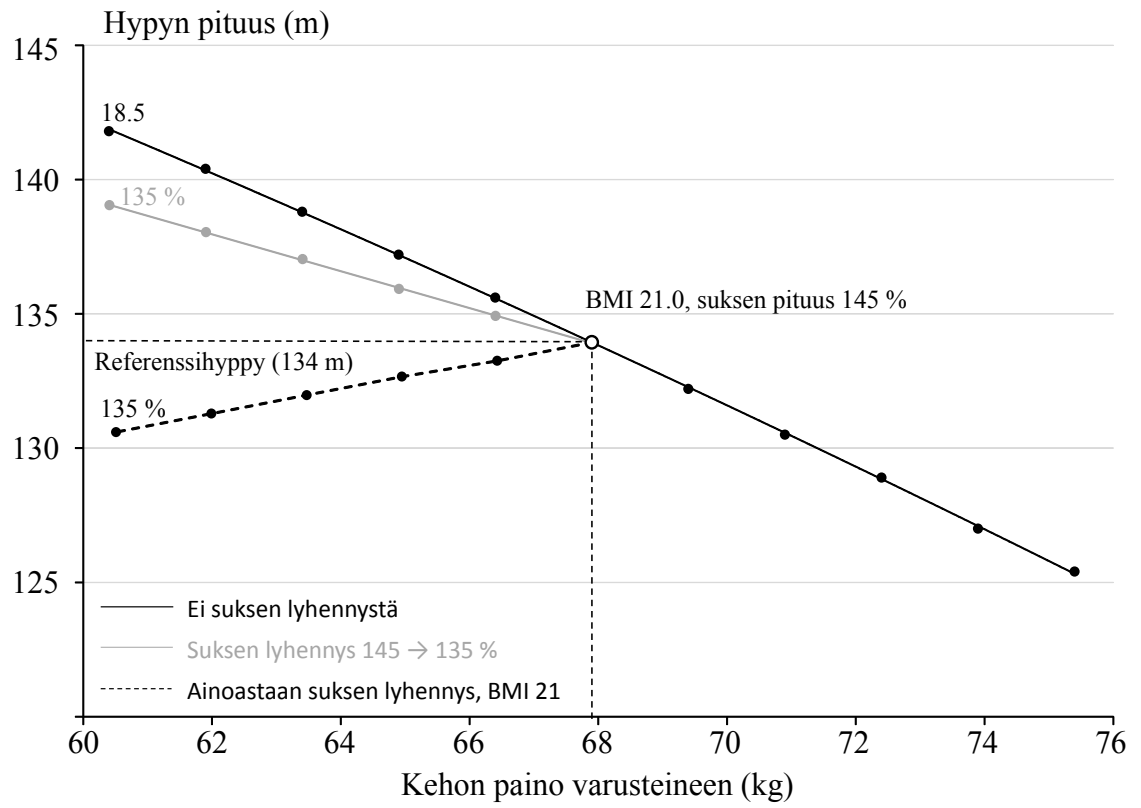
Ilman tiheys 1,11 kg/m<sup>3</sup> (900 m korkeudessa)

TAULUKKO 7. Kehon painon ja vastatuulen vaikutus hypyn pituuteen Whistlerin HS-140 mässä (Virmavirta & Kivekäs 2012).

		Pitkä hyppy		Keskiarvo hyppy		Lyhyt hyppy	
Muuttuja	Muutos	140 m	vaikutus (m)	120 m	vaikutus (m)	100 m	vaikutus (m)
Vastatuuli	+ 1 m/s	145,2	5,3	128,8	8,8	111,9	11,9
Massa	+ 1kg	141,5	1,5	122,6	2,6	103,5	3,5

Ilman tiheys 1,11 kg/m<sup>3</sup> (900 m korkeudessa)

Koska kehon painolla on ratkaiseva merkitys hypyn pituuteen, on kansainvälinen hiihtoliitto (FIS) pyrkinyt vähentämään hyppääjillä havaittua epäterveellistä laihduttamista sääntömuutoksella, jossa suksen maksimipituus sidotaan hyppääjän painoindeksiin (BMI). Hyppääjää saa hypätä täysimittaisella suksella (145 % hyppääjän pituudesta) mikäli kehon painoindeksi on 21 tai yli. Pienempi indeksi johtaa suksen maksimipituuden lyhentämiseen (0,5 % lyhennys / - 0,125 BMI). Tietokonesimulaation perusteella sääntömuutoksen mukainen suksien pinta-alan pienentäminen ei riitä kompensoimaan kevyemmästä kehonpainosta saavutettavaa hyötyä (kuva 21). Nykyisilläkin säännöillä hyppääjä hyötyy laskennallisesti 2 metriä jokaista pudotettua BMI-yksikköä kohti. (Virmavirta & Kivekäs 2013.) Lisäksi kevyt hyppääjä pystyy saavuttamaan lentovaiheessa matalamman kehon asennon ilman tasapainon menetystä. Aggressiivisempi lentotekniikka on todennäköisesti hieman tehokkaampi myös aerodynamiikan näkökulmasta. (Schmöltzer & Müller 2005.)



KUVA 21. Painoindeksin ja suksien pituuden vaikutus hypyn pituuteen (mukailtu Virravirta & Kivekäs 2013).

### 3 VERTIKAALIHYPYT

Vertikaalihyppy on yksi parhaista liikkeistä arvioida alaraajojen tehontuottoa, mikä on oleellinen ominaisuus useimmissa räjähtävää voimantuottoa vaativissa lajeissa (Dal Pupo 2012). Myös mäkihypyssä ponnistusteho on urheilijan tärkein fyysinen ominaisuus, joka ei kuitenkaan yksistään voi korvata muita lajissa vaadittavia ominaisuuksia (Pulli & Virmavirta 1990). Kuten yleisesti tiedetään, vertikaalihypyt ovat olleet keskeinen osa mäkihyppääjän fyysistä suorituskykyä mittaavaa testistöä jo useiden vuosikymmenten ajan. Spesifisyyden periaatteen mukaisesti paras yhtäläisyys testiliikkeiden ja lajisuorituksen välillä löytyy, kun suoritukset vastaavat biomekaanisessa tarkastelussa toisiaan mahdollisimman hyvin (Sale & MacDougall 1981).

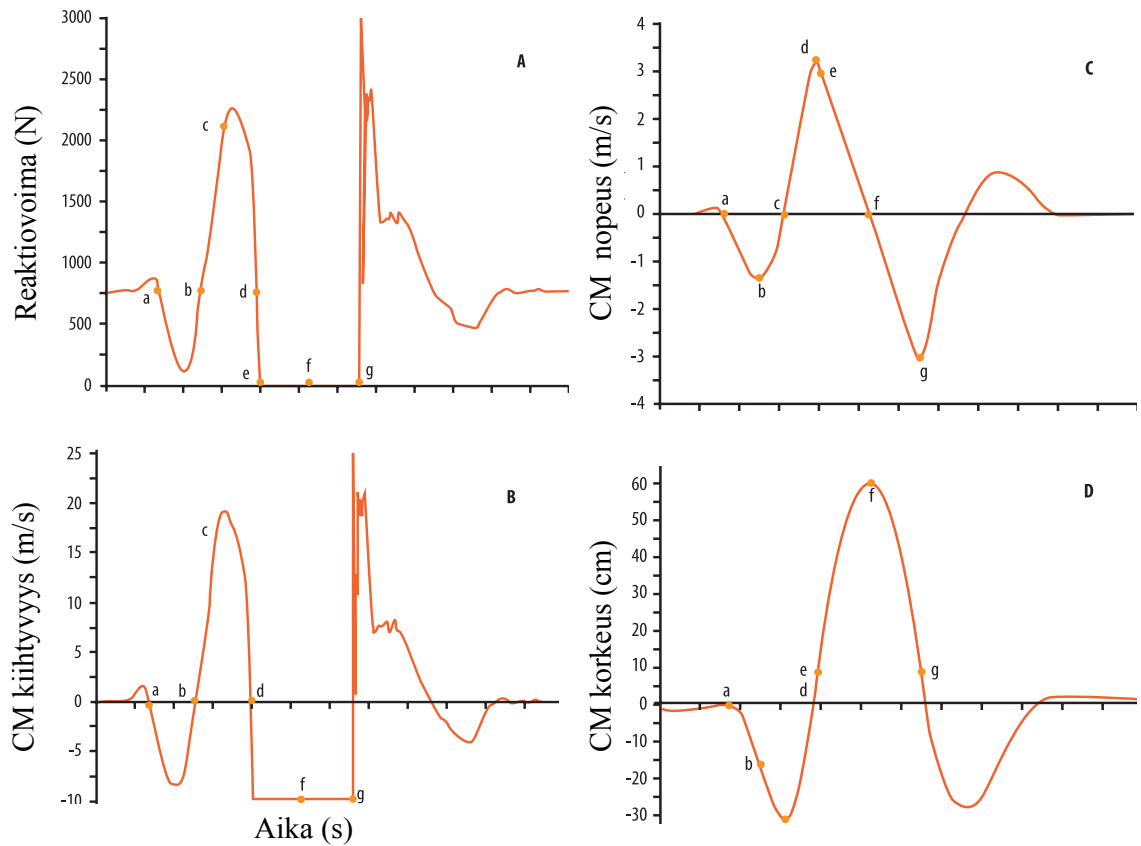
Staattisessa vertikaalihypyssä voimantuotto on puhtaasti konsentrinen. Liike aloitetaan kyykkyasennosta, jossa ollaan hetki liikkumatta ennen voimakasta polvi- ja lantionivelen ekstensiota. Esikevennetyssä hypyssä voimantuotto on plyometrinen. Liike aloitetaan nopealla polvi- ja lantionivelen fleksiolla, jota seuraa välittömästi ojennusvaihe. Lähes kaikki ihmisen luontainen liikkuminen sisältää tällaisen venymis-lyhenemis syklin. Urheilulajeista mäkihypyn ponnistus kuvastaa ehkä eniten pelkkää puhdasta konsentrista voimantuottoa. Vertikaalihypyissä resultanttivoimantuoton vaikutussuora kulkee hyppääjän painopisteen kautta, ja hyppääjän kehon painopiste saa positiivista kiihtyvyyttä, kun reaktiovoiman suuruus ylittää kehon painon. Reaktiovoimista voidaan analysoida mm. hypyn voimantuoton, kiihtyvyyden, nopeuden ja paikan (CM) muutoksia ajan funktiona. (Linthorne 2001.)

Voimadatasta voidaan laskea hypyn nousukorkeus mm. lentoajan ja nettoimpulssin avulla, jotka molemmat perustuvat painopisteen nopeuteen irtoamishetkellä. Lähtönopeuden ja nousukorkeuden välinen yhteys voidaan määrittää soveltamalla energian säilymisen lakia. Tässä yhteydessä kyseeseen tulee kineettisen energian ja potentiaalienergian muutokset irtoamisvaiheen (toe off) ja hypyn lakipisteen (peak) välillä (kaava 7). Ilmanvastuksen merkitys on niin pieni, että sitä ei tarvitse tässä yhteydessä huomioida. Hyppääjän vertikaalinen nopeus hypyn lakipisteellä on 0 m/s, joten hypyn korkeus voidaan laskea kaavalla 8. (Linthorne 2001.)

$$7) \frac{1}{2}mv_{(to)}^2 + mgh_{(to)} = \frac{1}{2}mv_{(peak)}^2 + mgh_{(peak)} \quad 8) h_{(flight)} = h_{(peak)} - h_{(to)} = v_{(to)}^2 / 2g$$

Lentoaikaan perustuvassa määrittelyssä otetaan huomioon irtoamisen ja alastulokontaktin välinen aika. Laskennassa oletetaan, että kehon panopisteen korkeus on sama molemmissa vaiheissa. (Linthorne 2001.) Yleensä hyppääjä kuitenkin laskeutuu 1–4 cm matalampaan asentoon, mikä vaikuttaa tässä metodissa nousukorkeuden tarkkuuteen noin 0,5–2 cm (Kibele 1998). Kaavalla 9 voidaan laskea hyppääjän lähtönopeus lentoajan perusteella. Nettoimpulssin avulla tapahtuva lähtönopeuden laskenta (kaava 10) perustuu siihen, että nettoimpulssin muutos vertautuu suoraan hyppääjän liikemäärän muutokseen ( $\Delta p$ ). Tässä menetelmässä hyppääjän suoritustekniikka ei vaikuta tulokseen. Impulssin määrittelyssä tulee ottaa huomioon vain voimantuoton konsentrinen osuus. Tämä on tärkeä huomioida etenkin esikevennyksessä hypyissä. Kuvassa 22 nähdään esikevennetyn hypyn kineettisiä ja kinemaattisia kuvaajia, joiden avulla suorituksia analysoidaan. (Linthorne 2001.)

$$9) v_{(to)} = gt_{(flight)} / 2g \quad 10) \int (F_{GRF} - mg)\Delta t = mv_{(to)} = \Delta p$$



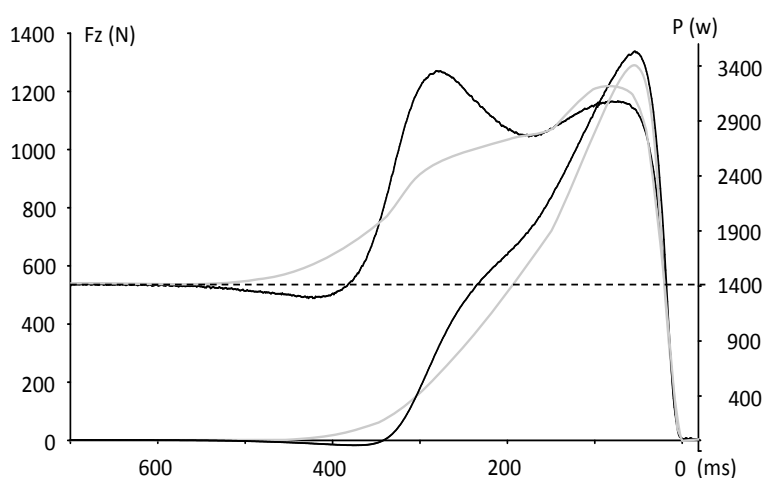
KUVA 22. Esikevennetyn hypyn kineettisiä ja kinemaattisia kuvaajia (CM = kehon painopiste): a) reaktiovoima, b) CM kiihtyvyys, c) CM nopeus, d) CM korkeus. Kirjaimet kuvaajissa: a) lähtötilanne, b) GRF = kehon paino, eli kiihtyvyys on nolla mutta negatiivinen nopeus maksimi, c) konsentrisen vaiheen alku, eli impulssit a-b ja b-c ovat yhtä suuret, d) GRF = kehon paino, eli kiihtyvyys on nolla mutta positiivinen nopeus maksimi, e) irtoamishetki, f) lentovaiheen lakipiste, g) alastulon kontakti. (mukailtu Dal Pupo 2012, Linthorne 2001.)

Vertikaalihyppyjen voimantuotto tapahtuu pääasiassa polvi- ja lantioniveltä ojentavien lihasten toimesta. Temporaaalisesti nivelten liike on melko yhtenäinen, mutta lihasten EMG-mittausten perusteella polvea ojentavat lihakset dominoivat voimantuottoa. (MacKenzie ym. 2014.) Mäkihypyn ponnistuksessa lantiota ojentavilla lihaksilla on siten suurempi rooli liikkeen tuottamisessa verrattuna vertikaalihyppyihin (mm. Sasaki & Tsunoda 1997).

### 3.1 Vertikaalihyppyjen muuttujia

Biomekaanisessa tarkastelussa vertikaalihypyn reaktivoimista analysoidaan usein mm: hypyn korkeutta, konsentrisen vaiheen voimantuoton tehoa, absoluuttisen ja suhteellisen maksimivoiman tasoa, maksimivoiman saavuttamiseen vaadittavaa aikaa, vertikaalisen nopeuden maksimiarvoa sekä voimantuoton alkuvaiheen suuruutta (Dal Pupo ym. 2012). Voimantuoton alkuvaihetta kuvastava voimantuotonopeus (rate of force development, RFD) on ilmeisesti nousukorkeutta oleellisempi mittari lajeissa, joissa voimantuoton aika on hyvin lyhyt. RFD:ssa määritellään usein voimataso 100 ms kohdalta, mutta myös muita tämän suuruusluokan muuttujia on käytetty. (Zatsiorsky 2003.)

Ehkä hieman tuntemattomampi muuttuja on ns. voiman gradientti tai S-gradientti, joka kuvaa keskimääräistä RFD:n suuruutta. Parametri määritellään kaavalla  $F_{0,5 \max} / T_{0,5 \max}$ , jossa  $F_{0,5 \max}$  on 50 % suorituksen maksimivoiman suuruudesta ja  $T_{0,5 \max}$  on sen saavuttamiseen kulunut aika. Vaikuttaa siltä, että voiman gradientti kuvastaa enemmän nopeiden lihassolujen jakaumaa kuin muuttujia, jolla mitataan maksimivoimantuottoon vaadittavaa aikaa. Parametri ESD (explosive strenght deficit), mittaa optimiolosuhteissa saavutetun maksimivoiman ja vertikaalihypyssä (tms.) saavutetun maksimivoiman suhdetta, eli kuvastaa hyvin räjähtävän voiman kapasiteettia tietyssä liikkeessä. (Zatsiorsky 2003.) Kuvassa 23 verrataan mäkihyppääjän suorittaman simulaatioponnistuksen ( $h = 46$  cm) ja staattisen vertikaalihypyn ( $h = 61$  cm) voiman- ja tehontuottoa. Tosin vertikaalihypyssä on nähtävissä pieni kevennysvaihe.

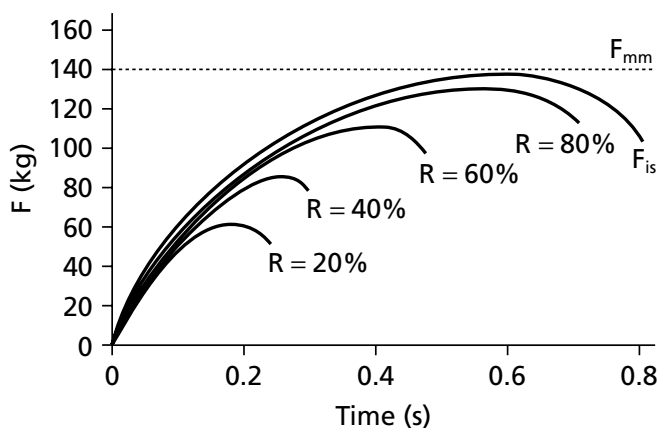


KUVA 23. Simulaatioponnistuksen (harmaa) ja staattisen vertikaalihypyn (musta) voiman- ja tehontuotto (Virmavirta 2011).



### 3.2 Voimantuoton tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä

Hyvin tunnettuja voimantuottoon vaikuttavia tekijöitä ovat lihassolukon ja hermoston laadulliset ominaisuudet, lihas-jänne kompleksin elastiset rakenteet sekä harjoittelun spesifisyys ja liikkeiden koordinaatio (Mero ym. 2004, 251–291). Lisäksi voimantuoton tehokkuuteen vaikuttavat suuresti spesifi liike, kehon asento ja nivelkulmat, liikkeen nopeus, lihastyön muoto sekä ulkopuolisen vastuksen määrä (Zatsiorsky 2003). Esikivennyksessä hyppyissä saavutetaan yleensä suurempi nousukorkeus kuin staattisissa hyppyissä. Tämä johtuu ilmeisesti lihasten suuremmasta aktivaatiosta konsentrisen vaiheen alussa, jolloin supistuvien rakenteiden voimantuotto ehtii potentoitua tehokkaammin. Lihas-jänne kompleksiin varastoituvan elastisen energian vapautuminen, ja venytysrefleksin avulla tehostuva hermostollinen osuus voi myös selittää eroa. (Linthorne 2001.) Kuvasta 24 nähdään polven ekstension voima-aika kuvaaja erilaisilla ulkoisen vastuksen tasoilla. Mitä kevyempi ulkoinen vastus on, sitä pienempi on saavutettavan maksimivoiman taso. Voimaa pystytään kuitenkin tuottamaan alkuvaiheen osalta yhtä tehokkaasti vastuksesta riippumatta.



KUVA 24. Polven ekstension voima-aika kuvaaja erilaisilla vastuksen tasoilla ( $R = \%$  isometrisestä maksimivoimasta  $F_{is}$ ) (Verchoshansky 1977; Zatsiorsky 2003 mukaan).

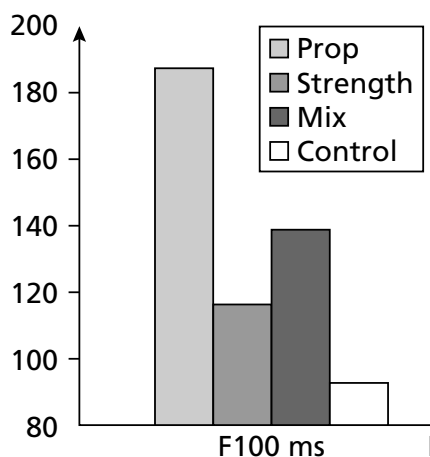
Dal Pupo ym. (2012) vertailivat yleisimpien vertikaalihyppyistä mitattavien muuttujien yhteyttä hyppymen nousukorkeuteen ja tehontuottoon. Asetelmassa oli koehenkilöinä kokeneita lentopalloilijoita ja pikajuoksijoita, joten räjähtävää voimantuottoa vaativat liikkeet olivat kuuluneet oleellisena osana heidän harjoiteluunsa. (Dal Pupo ym. 2012.) Taulukosta 8 nähdään tutkimuksen muuttujien korrelaatioita. Mäkihyppyn näkökulmasta

kiinnostava havainto on, että voimantuoton alkuvaihetta kuvastavat muuttujat näyttävät korreloivan enemmän hyppyjen tehontuottoon kuin nousukorkeuteen.

TAULUKKO 8. Vertikaalihypyistä mitattujen voima- ja nopeusmuuttujien korrelaatio vertikaalihyppyjen nousukorkeuteen ja tehontuottoon (\*p < 0,05, \*\*p < 0,01) (Dal Pupo ym. 2012).

	St. Hyppy		Ek. Hyppy	
	Korkeus	Teho	Korkeus	Teho
RFD (30 ms)	0,13	0,44*	-0,04	0,34
Maks.voima	0,05	0,12	0,06	0,02
Suht. MV	0,47*	0,88**	0,52**	0,76**
Aika MV	-0,07	-0,46*	-0,07	-0,49*
Maks. nop.	0,97**	0,75**	0,95**	0,80**

Voimantuoton alkuvaiheen tehokkuus näyttää korreloivan nivelten stabiliteetista vastaavan proprioseptiikan herkkyyteen. Tehostunut kehon ja nivelten asentoaisti ilmeisesti mahdollistaa tehokkaamman lihasten aktivaation, joka johtuu selkäydintason refleksien herkistymisestä. (Gollhofer 2003.) Kuvassa 25 nähdään, kuinka erilaiset yleisurheilijoilla teetetyt harjoittelumetodit vaikuttivat ensimmäisen 100 ms voimantuottoon neljän viikon intervention jälkeen. Proprioseptiikan herkkyyden on todettu olevan yksi niistä harvoista ominaisuuksista, jotka korreloivat urheilijan suoritustasoon useassa eri lajissa (Han ym. 2014). Tasapainoharjoittelun (lähellä proprioseptiikan harjoittelua) on todettu parantavan vertikaalihypyn nousukorkeutta. Kokeneilla urheilijoilla vaikutuksen on havaittu olevan yhtä suuri, kuin mitä pelkän voimaharjoittelun avulla on saavutettu. Havainto on mielenkiintoinen, sillä voimaharjoittelu vaikuttaa lisäävän spinaalitason refleksien herkkyyttä (alfa-motoneuronialtaan herkkyyttä kuvaava  $H_{\max} / M_{\max}$  suhde), kun taas tasapainoharjoittelun vaikutus on päinvastainen. Tältä osin tasapainoharjoittelun vaikutusmekanismi hypyn nousukorkeuteen ei ole täysin selvillä. (Taube ym. 2007.)



KUVA 25. Eri harjoittelumetodien vaikutus voimantuoton alkuvaiheeseen. Prop = proprioseptiivinen harjoittelu, Strength = isometrinen voimaharjoittelu, Mix = yhdistelmä edellisistä. (Gollhofer 2003.)

Keskivartalon hallinnalla on tärkeä rooli tehokkaan ja tarkoituksenmukaisen liikkeen tuottamisessa. Kehon keskivartalon segmentti välittää energiaa, sekä on ala- ja yläraajojen liikkeiden välittäjä. (Hedrick 2000.) Keskivartalon hallinnan parantumisen on havaittu tehostavan myös vertikaalihyppyjen voimantuottoa, kun vastaavasti pelkän keskivartalon voimatason kehittämällä ei ole todettu samankaltaisia vaikutuksia (Atsushi ym. 2014). Mäkihyppäjillä toteutetun tutkimuksen mukaan lantion liikkuvuus oli yhteydessä erityisesti voimantuoton alkuvaiheen tehokkuuteen lajiponnistuksessa. Selvityksessä myös nilkan liikkuvuus (dorsifleksio) oli yksi muuttuja, joka selitti kykyä räjähtävään voimantuottoon. (Jost 2010.)

## 4 REAKTIOVOIMIEN MITTAAMINEN JA VIDEOANALYYSI MÄKIHYPPYSSÄ

Mäkihypyn biomekaanisissa tutkimuksissa reaktivoimia on mitattu enemmän simulaatioponnistuksissa kuin hyppyrimäkiolosuhteissa. Kuitenkin lisääntyvässä määrin myös voimalevyjä on asennettu hyppyrimäkien latujen alle. Yleensä mittaaminen rajoittuu pelkän vertikaalivoiman määrittelyyn, mutta joitakin kolmeen avaruudelliseen suuntaan voimia mittaavia antureita on asennettu myös hyppyrimäkiin. Laitteiston käyttö ei vaikuta millään tavalla hyppääjien suorituksiin, joten mittauksia on helppo tehdä myös kilpailuiden aikana. Reaktivoimia voidaan mitata myös painepohjallisten avulla tai käänteistä dynamiikkaa käyttämällä. (Schwameder 2008.) Voimalevyanturi mittaa voiman muutoksia mm. venymäliuska-anturilla, mikä on materiaalin venymisen mittaamiseen tarkoitettu anturi. Sen toiminta perustuu anturissa olevan metallijohteen muodon muuttumiseen venytyksen takia, jolloin myös johteen resistenssi muuttuu. Voimalevyn ulostulon analoginen signaali vahvistetaan ja muutetaan digitaaliseen muotoon tietokoneohjelman analysoitavaksi. (Malinen 2011.)

Videoanalyysi on ollut laajalti käytössä mäkihypyn biomekaanisessa tutkimuksessa. Analyysit ovat painottuneet 2D-analyyseihin sagittaalitasossa, mutta myös 3D-analyysejä on tehty. Harjoitusolosuhteissa hyppääjiä voidaan valmistella markkereiden avulla, joka parantaa analyysin luotettavuutta. Kilpailutilanteessa hyppääjään ei voi kiinnittää mitään ylimääräistä, mutta toisaalta kilpailutilanne antaa aina oman lisänsä analyysin kiinnostavuuteen. (Schwameder 2008.)

Videoanalyysissä kehon painopiste määritellään segmenttianalyysin perusteella. Vauhtimäen asennon ja ponnistusvaiheen tutkimuksissa on käytetty mm. DeLevan (1996) Zatsiorskyn segmenttianalyysistä muokkaamaa versiota. Ilmalentovaiheen analyyseissä on käytetty jopa 12 segmentin mallia, jossa suksien etu- ja takaosat muodostavat oman segmenttinsä. Kehon segmenteistä mukana ovat yleensä ainakin jalkaterä, sääri, reisi, ylävartalo, olkavarsi, kyynärvarsi, kämmen ja pää. (mm. Virmavirta ym. 2009, Virmavirta ym. 2005.) Painopisteen todelliseen sijaintiin vaikuttaa kehon yksilöllinen antropometria, johon usein myös lajitaustalla on oma vaikutuksensa. Vaikka segmenttiana-

lyysi ei anna täysin tarkkaa kuvaa painopisteen sijainnista, ei se yleensä vaikuta merkittävästi analyysin luotettavuuteen. Mahdollisimman hyvän mallin valitsemiseen kannattaa käyttää kuitenkin harkintaa. Eri lajien urheilijoille parhaiten sopivia malleja on myös tutkittu. (Virmavirta ja Isolehto 2014.)

Videonalyysien avulla on tutkittu suorituksen eri vaiheita, kun taas reaktivoimien mittaaminen on rajoittunut käytännössä ponnistusvaiheeseen (Müller & Schwameder 2003). Molemmilla edellä mainituilla metodeilla on omat rajoituksensa. Tutkimuksen luotettavuutta parantaa, mikäli kineettinen ja kinemaattinen data voidaan yhdistää. Näin myös analyysistä saadaan havainnollistavampi. Datojen yhdistäminen vaatii tarkkaa synkronointia, joka voi tapahtua esimerkiksi valomerkin avulla. (Komi ym. 1974.) Lajin luonteen ja tekniikan yksilöllisten piirteiden vuoksi eri parametrien tilastollisessa käsittelyssä kannattaa tehdä sekä ryhmätason, että yksilötason vertailuja (Janura ym. 2011).

## 5 TUTKIMUKSEN TARKOITUS JA TUTKIMUSONGELMAT

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli selvittää mäkihyppääjien vertikaalihyppyjen voimantuoton yhteyttä hyppymäessä tapahtuvaan voimantuottoon. Toinen tärkeä tavoite oli tarkastella lajiponnistuksen voimantuoton yhteyttä kokonaissuorituksen laatuun, sekä selvittää mitkä tekniset muuttujat selittävät tehokasta voimantuottoa lajiolosuhteissa. Ponnistuksen muuttujia vertailtiin alkuilmalennon kinemaattisiin muuttujiin sekä hypyn pituuteen. Vertikaalihypyt mitattiin juuri ennen kilpailun koekierrosta. Lajiponnistuksen ryhmätason vertailut tehtiin kilpailun ensimmäisen kierroksen suorituksista.

**Tutkimusongelma 1:** Miten vertikaalihyppyjen nousukorkeus ja voimantuoton tehokkuutta kuvaavat parametrit korreloivat voimantuottoon lajiolosuhteissa?

**Tutkimusongelma 2:** Miten lajiponnistuksen voimantuotto korreloi suorituksen tehokkuuteen?

**Tutkimusongelma 3:** Miten laskuasennon ja ponnistusvaiheen tekniikka korreloi voimantuoton tehokkuuteen lajiolosuhteissa?

Tutkimuksen ensisijaisina tavoitteina on lisätä valmentajien, testaajien ja urheilijoiden ymmärrystä lajinomaisen tehoharjoittelun merkityksestä, sekä selkiyttää tehokkaan laji-suorituksen teknisiä elementtejä. Tästä prosessista syntynyttä materiaalia on tarkoitus hyödyntää mäkihypyn kansallisissa valmentajakoulutuksissa.

## 6 MENETELMÄT

### 6.1 Koehenkilöt

Tutkimuksen koehenkilöinä toimi 20 miesten erikoismäen (HS-100) yleisen sarjan kilpailijaa Vuokatin Finlandia Veikkaus cup kilpailuissa kesällä 2015 (ikä  $23,4 \pm 5,5$  vuotta; paino täydessä kilpailuvarustuksessa suksineen  $73,7 \pm 3,9$  kg). Yhtä kilpailijaa lukuun ottamatta kaikki hyppääjät olivat saavuttaneet urallaan FIS -tasoisien (MC, COC, Fis-cup) kilpailun pistesijoja. Koehenkilöihin kuuluivat myös kaikki kaudelle 2015–2016 valitut maajoukkueen edustajat. Kesällä 2015 paras henkilökohtainen suomalaissijoitus kesä Grand Prix -kilpailuissa oli neljäs sija, ja joukkuemäessä Suomen joukkue sijoittui parhaimmillaan viidenneksi. Mittauksista ja tutkimuksen tarkoituksesta informoitiin urheilijoiden valmentajia ja huoltajia joukkueenjohtajien kokouksessa, sekä itse urheilijoita kilpailutapahtuman alussa. Kaikki kilpailijat suostuivat vapaaehtoisesti tutkimuksen koehenkilöiksi, ja tutkimus toteutettiin Helsingin julistuksen mukaisesti.

### 6.2 Koeasetelma

Koehenkilöt suorittivat välittömästi kilpailuun valmistavan verryttelyn jälkeen kaksi staattista ja kaksi esikevennettyä hyppyä voimalevyllä. Suoritusohjeena oli tehdä itselle tyypillisellä tavalla mahdollisimman korkeat hypyt omaan rauhalliseen tahtiin. Staattisten hyppyjen osalta kuitenkin varmistettiin, että koehenkilöt aloittivat voimantuoton täysin staattisesta asennosta. Koehenkilöiden paino mitattiin henkilöväällä täydessä kilpailuvarustuksessa ennen ensimmäistä kilpailukierrosta. Muutoin urheilijat toimivat kilpailutapahtuman aikana parhaakseen katsomalla tavalla, eivätkä tutkimuksen muut mittaukset vaikuttaneet urheilijoiden toimintaan.

Koehenkilöiden suorituksista mitattiin ponnistuksen aikainen voimantuotto molemmilta kilpailukierroksilta. Kinemaattista analyysiä varten suoritettiin videokuvaukset hyppymäen keulalta sekä alkuilmalennosta. Kilpailutapahtuma vietiin sujuvasti läpi aamupäivän aikana. Kokonaisuudessaan koekierroksen ensimmäisen- ja kilpailun viimeisen hypyn

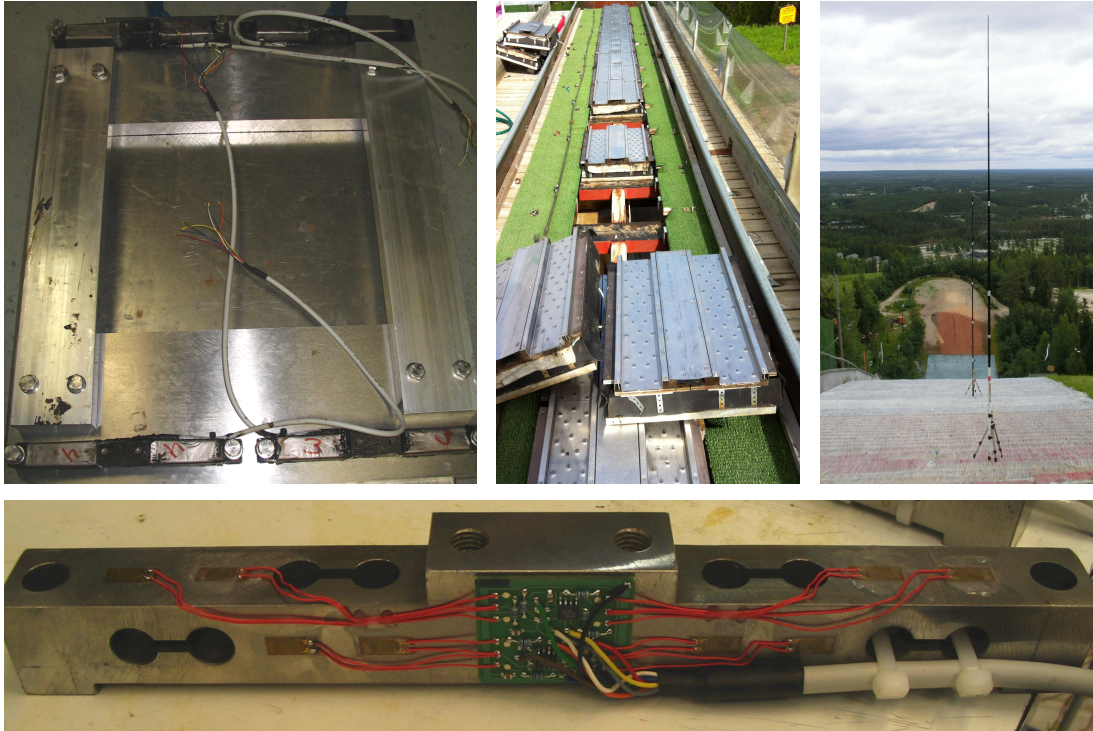
välinen kesto oli alle 2 h. Sää kilpailutapahtuman aikana oli selkeä ja alkuilmalennossa vallitsi kevyt ja tasainen vastatuuli ( $1,7 \pm 0,5$  m/s). Ilmalennon loppuvaiheen tuuliolosuhteita arvioitiin subjektiivisesti kokeneen valmentajan toimesta. Arviointiskaalana käytettiin kuusiportaista asteikkoa (-3...+3), jonka nolla-arvo kuvasti keskimääräisesti vallitsevaa tuuliolosuhdetta. Subjektiivisen arvioinnin keskihajonta oli  $\pm 0,9$ , joten olosuhteet olivat myös loppulennon osalta varsin tasapuoliset.

### 6.3 Aineiston keräys

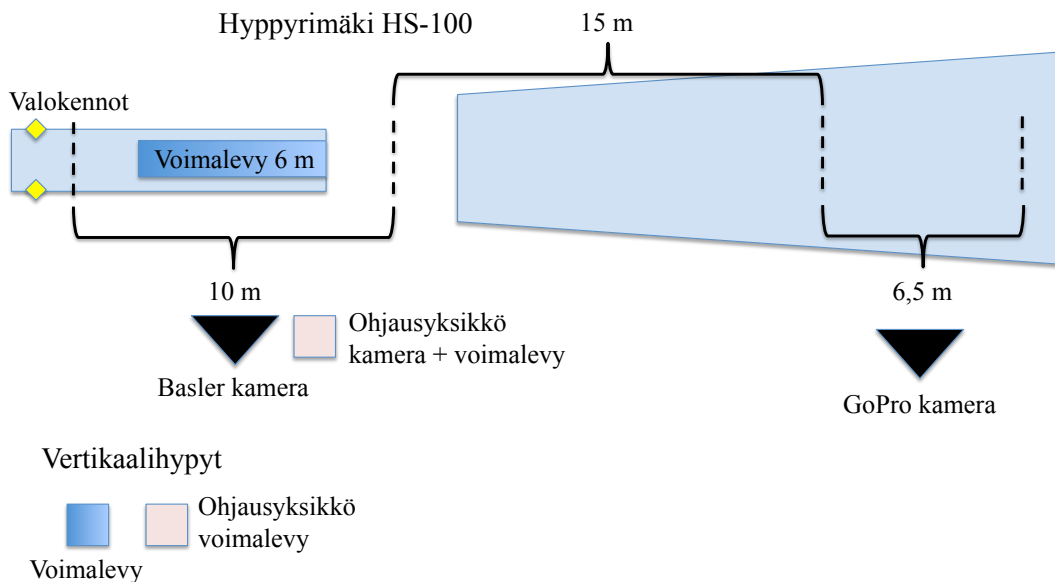
*Voimantuotto.* Vertikaalihypyistä voimadataa kerättiin Spike –ohjelmalla (Cambridge Electronic Design Limited, Englanti), jonka keräystaajuus oli 100 Hz. Koska voimalevyssä oli neljä eri segmenttiä, vertikaalivoimien ulostuloista luotiin ohjelman avulla virtuaalinen summakanava datan analysointia varten. Hyppyrin keulalta voimantuottoa mitattiin viimeisen kuuden metrin matkalta 400 Hz taajuudella. Mittausohjelmistona käytettiin järjestelmään erikseen luotua ohjelmaa. Tutkimuksessa käytettyjen voimalevyjen elementit oli huollettu ja kalibroitu noin kuukausi ennen kilpailua, joten mittauksien alla suoritettiin vain nollassojen tarkistus. Mittauksissa käytetyt voimalevyt on valmistettu Jyväskylän yliopiston liikuntabiologian laitoksella, ja ne ovat osa Vuokatin urheiluopiston mäkihypyn palautteenantojärjestelmää (laji- ja simulaatioponnistukset). Kuvassa 26 nähdään hyppyrimäessä käytettävien voimalevyjen rakenteita.

*Videoanalyysi.* Hyppyrimäen keulalta kalibroitiin 2 m korkea ja 6 m leveä alue. Digitoitava kuvausalue kattoi yhteensä 10 m matkan, ulottuen 2 m yli kalibrointialueen molempien puolen. Näin analyysiin saatiin huomioitua valmiusasento ennen voimantuoton alkua, sekä ponnistusliikkeen viimeiset ojennukset. Vauhtimäen kaarteelle sijoitettu valokenno käynnisti yhtä aikaa sekä voimamittauksen että videokameran (Basler, 100 Hz, Basler AG, Saksa) datan synkronoimista varten. Alkuilmalennon analysoimiseksi kalibroitiin 5 m korkea ja 6,5 m leveä alue (kuva 26). Kalibrointialueen keskikohta oli noin 5 m korkeudessa alastulorinteen pinnasta ja noin 15 m etäisyydellä hyppyrin keulasta. Kuvaus suoritettiin GoPro kameralla (Hero 4, 50 Hz, GoPro, USA). Kuvassa 27 nähdään mittausasetelman kokonaisuus.





KUVA 26. Hyppyrimäen voima-antureiden rakenteita ja alkutilmalennon kalibrointi. Venymäliuska-anturit (alhaalla) on sijoitettu n. 85 cm mittaisten kiskoelementtien päihin, joiden päälle on integroitu vauhtimäen latuelementit. Alkutilmalennon kalibrointiin käytettiin kameranjaloilla tuettuja teleskooppivapoja, joiden avulla voitiin saavuttaa riittävä korkeus.

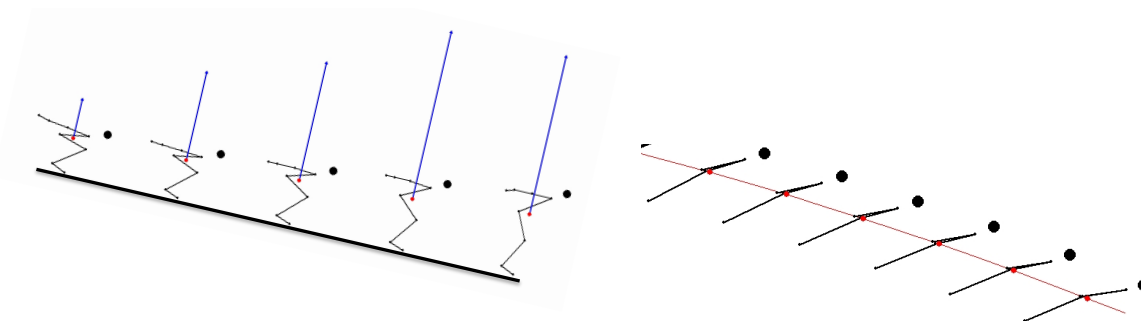


KUVA 27. Mittausasetelma ylhäältäpäin katsottuna.

## 6.4 Aineiston analysointi

*Voimantuotto.* Staattisissa hypyissä keskeisin muuttuja oli nousukorkeus (m), joka vertautuu suoraan hypyn irtoamisnopeuteen (m/s). Lähtönopeus saadaan kaavalla  $V = I / m$ , ja hypyn nousukorkeus kaavalla  $h = V^2 / 2g$ . Lisäksi staattisista hypyistä analysoitiin voimantuoton ensimmäisen 100 ms nettoimpulssi, voimantuottoaika (s), nettovoimantuoton maksimiarvo (N), sekä sen saavuttamiseen kulunut aika. Esikevennetyistä hypyistä analysoitiin ainoastaan voimantuoton konsentrisen vaiheen aikaansaama irtoamisnopeus. Hyppyrin keulalta tarkasteltiin pelkästään pystyvoimantuottoa, josta määriteltiin koko mittausalueen (6 m) voimaimpulssin aikaansaama vertikaalinen irtoamisnopeus (m/s), sekä keulan jokaisen kolmanneksen pystynopeus. Lisäksi hyppyrin keulalta analysoitiin nettovoimantuoton maksimiarvo ja siihen kulunut aika suhteessa mittausalueen alkuun. Muuttujien laskemiseen vaadittava kehonpaino (kg) määriteltiin vertikaalihypyissä voimalevyn signaalista ja hyppyrimäessä henkilöva’alla. Kaikissa voima-analyyseissä kehon paino määriteltiin nollassa.

*Videoanalyysi.* Kinemaattiset muuttujat analysoitiin Vicon Motus –ohjelmalla (2D) (Contemplas, Saksa). Laskuasennon ja ponnistuksen analysointiin käytettiin koko kehon mallia, joka perustui muokattuun Zatsiorskyn segmenttianalyysiin (DeLeva 1996). Tätä mallia yksinkertaistettiin vielä siten, että pääsegmentin ainoaksi digitointipisteeksi määriteltiin korvakäytävä ja koko segmentin massan keskittymä sijoitettiin tähän pisteeseen. Digitointi suoritettiin kaikista kuvausalueen kuvista, joissa oli nähtävillä hyppääjän koko keho. Alkuilmalennon muuttujien analysoimiseksi edellä mainittua koko kehon mallia yksinkertaistettiin edelleen siten, että raajoista muodostettiin yhtenäiset segmentit. Käsissä digitointipisteinä käytettiin olka- ja ranneniveliä ja jaloissa lantio- ja nilkaniveliä. Kyseisten segmenttien massan keskittymät laskettiin painotetulla keskiarvolla Zatsiorskyn segmenttianalyysiin pohjautuen. Alkuilmalennon digitointi käsitti 2–3 lisäkuvaa kalibroidun alueen molemmin puolin. Kinemaattisessa analyysissä tarkasteltiin kehon segmenttien ja nivelten kulmamuuttujia, kehon painopisteen liikerataa ja sen lineaarisen nopeuden muutoksia. Ponnistusvaiheen analysointi jaettiin kolmeen osaan, mikä mahdollisti vertailun kineettisiin parametreihin. Kuvassa 28 nähdään esimerkki siitä, millaista graafista analyysiä Vicon Motus -ohjelman raporttityökalulla voidaan tehdä.



KUVA 28. Esimerkki ponnistusvaiheen ja alkuilmalennon graafisesta analyysistä Vicon Motus -ohjelmalla. Vasemmalla sininen nuoli kuvastaa kehon painopisteen vertikaalista nopeutta suhteessa ladun pintaan. Oikealla kehon painopisteen lentorata alkuilmalennossa. Ponnistusvaiheen kulmamuuttujia tarkasteltiin suhteessa ladun pintaan, ja alkuilmalennon muuttujia suhteessa horisontaaliin tasoon.

## 6.5 Tilastolliset menetelmät

Mittausdataa käsiteltiin tilastollisesti SPSS -laskentaohjelmalla, jossa muuttujien välistä riippuvuutta tarkasteltiin Spearmanin korrelaatiolla. Tilastollisen merkitsevyyden luottamusvälinä käytettiin 95 %. Merkitsevyydet on merkitty tuloksiin seuraavasti: \* =  $p < 0,05$ , \*\* =  $p < 0,01$ , \*\*\* =  $p < 0,001$ . Tulosten keskiarvot ja keskihajonnat laskettiin Excel -ohjelmalla. Mittausdatan analysoinnissa tehtiin myös yksittäisten suoritussten, sekä pienten ryhmien välisiä vertailuja.

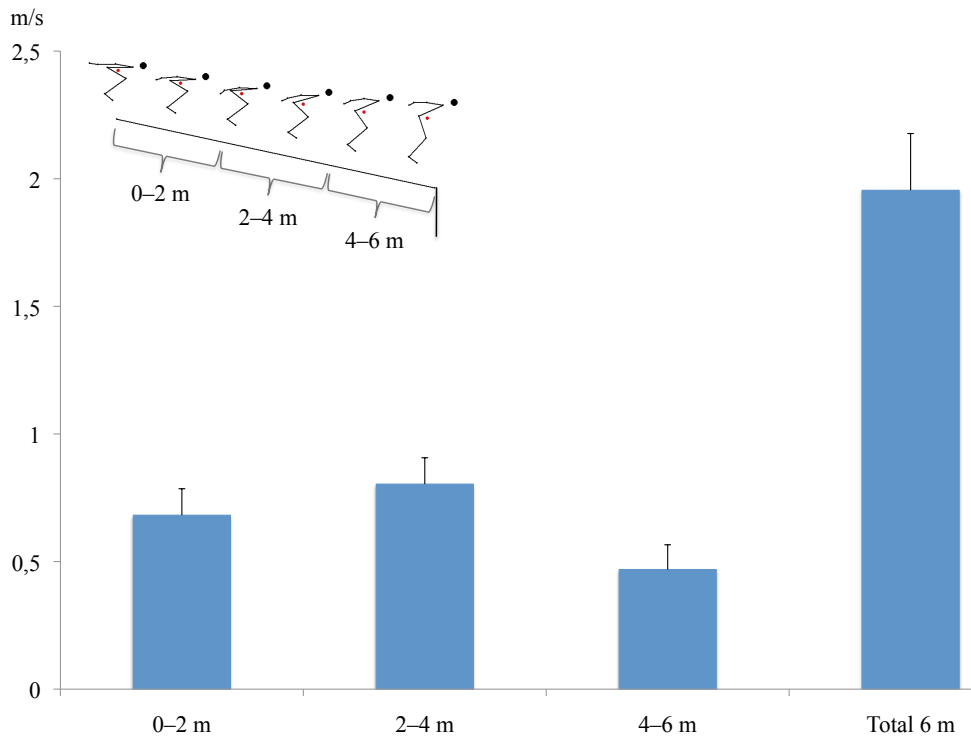
## 7 TULOKSET

Hyppyrimäessä koko otosjoukon välinen vertailu tehtiin ensimmäisen kilpailukierroksen suorituksista. Ponnistusliikkeen analysointi käsitti 6 m matkan, joka on jaettu kolmeen vaiheeseen (alku 0–2 m, keski 2–4 m, loppu 4–6 m). Kinemaattisten muuttujien tulokset kuvastavat kunkin vaiheen tai koko ponnistuksen (total = 6 m) keskiarvoa. Pysyvoimantuottoon liittyvät tulkinnat tarkoittavat latua vasten kohtisuoraan tuotettua nettovoimaa. Hyppyrin keulan muuttujien osalta otanta käsitti 19-, ja muissa mittauspisteissä 20 koehenkilöä. Ensimmäisellä kilpailukierroksella hyppyjen keskimääräinen pituus oli  $82,9 \pm 7,4$  m ja virallinen kilpailunopeus  $82,4 \pm 0,4$  km/h. Taulukossa 9 nähdään vertikaalihypyistä mitattujen muuttujien keskiarvot ja keskihajonnat.

TAULUKKO 9. Vertikaalihyppyjen keskiarvotuloksia. RFD (rate of force development) = voimantuoton 100 ms nettoimpulssi (Ns), Max F = kehonpainoon normalisoidun voimantuoton maksimiarvo (N), Aika Max F = voimantuoton maksimiarvon saavuttamiseen kulunut aika (s).

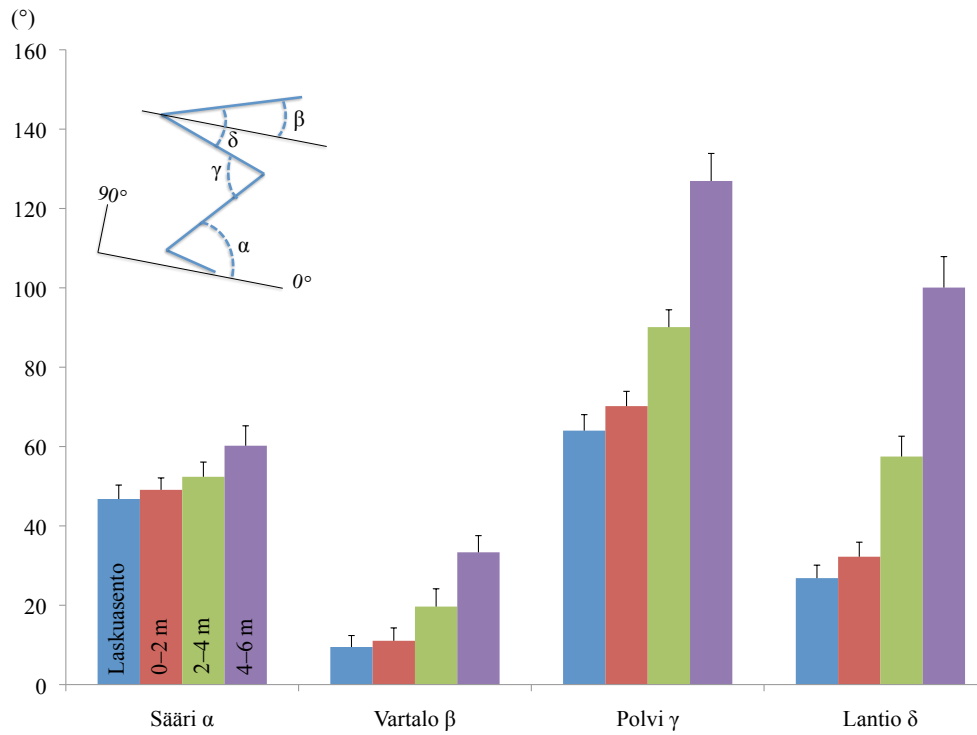
Muuttuja	ka.	SD
<u>Staattiset hypyt</u>		
Nousukorkeus (cm)	43,8	$\pm 5,9$
Voimantuottoaika (s)	0,46	$\pm 0,04$
RFD (Ns)	19,8	$\pm 11,8$
Max F (N)	1398	$\pm 111$
Aika Max F (s)	0,31	$\pm 0,12$
<u>Esikevennetyt hypyt</u>		
Nousukorkeus (cm)	45,8	$\pm 7,0$

Hyppyrimäen keulalla vertikaalisen nettovoimantuoton maksimiarvo oli keskimäärin  $843 \pm 91$  N, ja siihen kulunut aika voimannmittausalueen (6 m) alusta laskien  $0,17 \pm 0,07$  s. Kuvassa 29 havainnollistetaan koko mittausalueen keskimääräistä kokonaisvoimantuottoa ja sen jakautumista eri vaiheiden kesken. Voimantuoton vertikaalinen nettoimpulssi aiheuttaa hyppääjälle pystynopeutta (m/s), jonka suuruus saadaan jakamalla nettoimpulssi hyppääjän massalla.

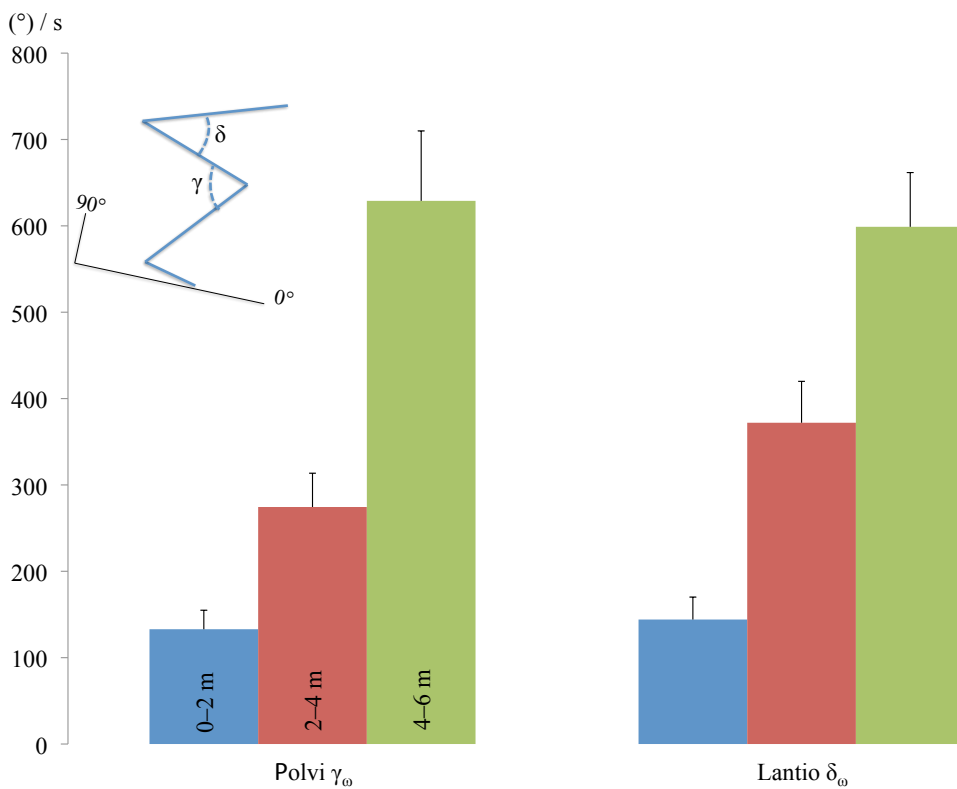


KUVA 29. Koko mittausalueen (6 m) voimaimpulssin aikaansaama vertikaalinen irtoamisnopeus (m/s), sekä keulan jokaisen kolmanneksen aikaansaama pystynopeus. Hyppääjän painon määrittelyssä huomioitiin kaikki kilpailuvarusteet suksineen. Kuvaajissa on esitelty koko ryhmän keskiarvo ja keskihajonta.

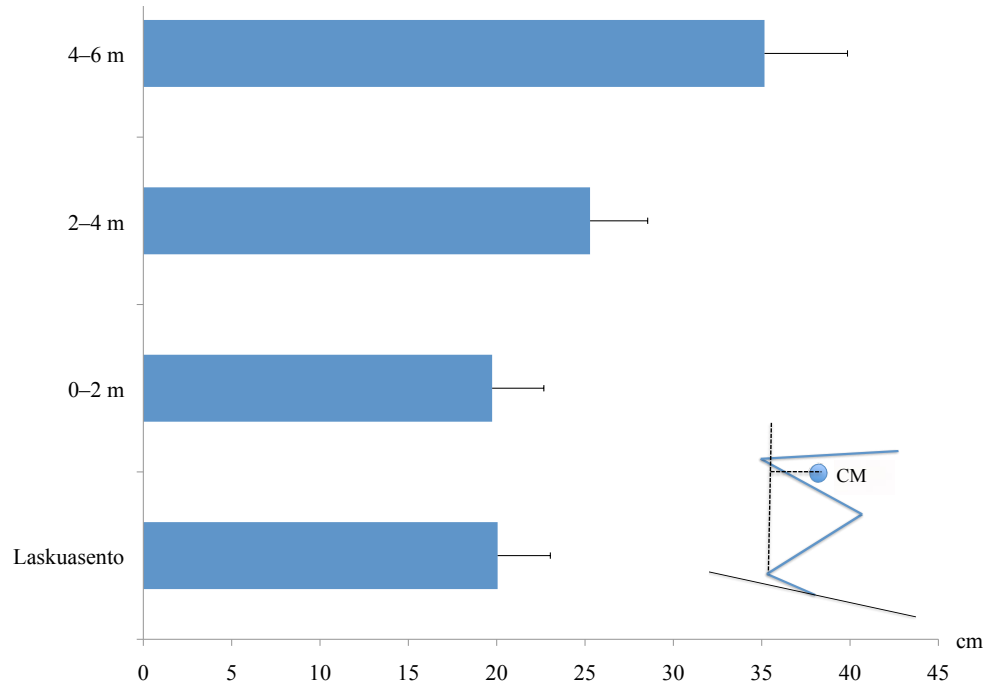
Kuvassa 30 nähdään keskimääräiset kulmamuutokset laskuasennosta ponnistusliikkeen loppuun. Kuvassa 31 esitellään kulmanopeuksien käyttäytymistä ponnistusvaiheen aikana, ja kuvassa 32 tarkastellaan kehon painopisteen horisontaalista siirtymää suhteessa nilkkaniveleen. Tuloksista voidaan havaita, että mäkihypyn ponnistus toteutetaan pääasiassa polvi- ja lantioniveleä ojentamalla, jolloin kehon painopiste liikkuu ponnistuksen edetessä tukipisteen etupuolelle. Kuvassa 33 nähdään keskimääräinen vartalon asento ja kehon painopisteen lentoradan kulma alkuilmalennossa. Alkuilmalennon muuttujat määriteltiin kalibrointialueen keskeltä, josta laskettiin noin 2 m lentovaiheen keskiarvo (n. 17–19 m kohdalta). Irtoamishetken jälkeen hyppääjien keskimääräinen resultanttinopeus lisääntyi kummalle mennessä horisontaalisen nopeuden heikentyessä (kuva 34). Vertikaalinen nopeus oli tässä vaiheessa keskimäärin  $-7,9 \pm 0,3$  m/s. Hyppääjien kehon painopiste oli alkuilmalennon kalibrointialueen keskellä lähes 5 m korkeudessa suhteessa alastuloalueen pintaan (kuva 34).



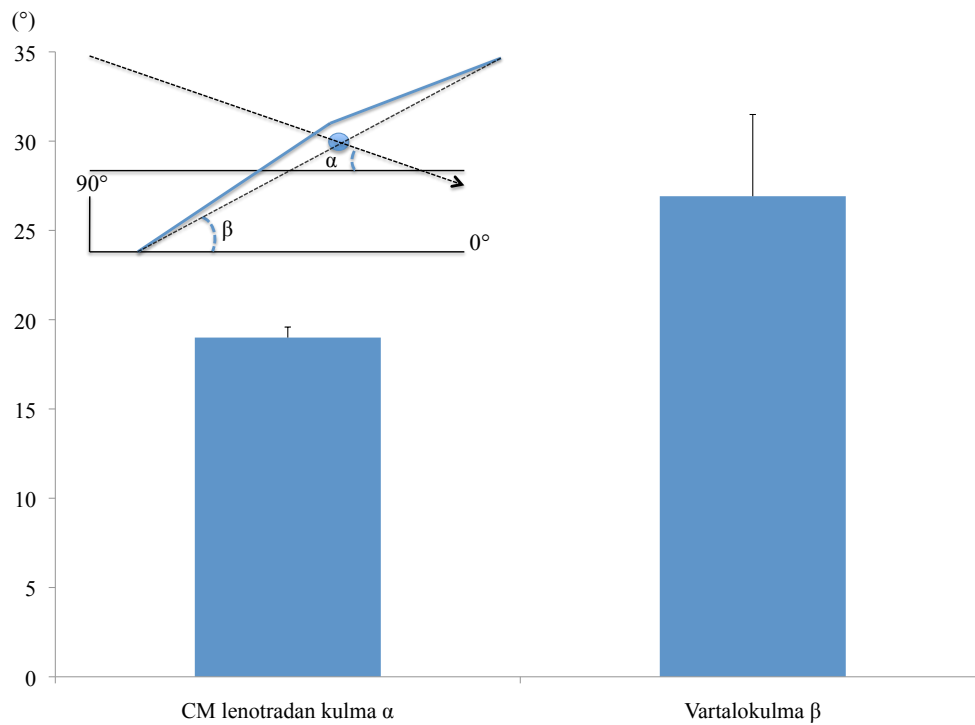
KUVA 30. Sääri- ja vartalosegmentin, sekä polvi- ja lantionivelen keskimääräiset asennot ( $^{\circ}$ ) laskuasennossa ja ponnistusliikkeen aikana suhteessa hyppyrin keulan tasoon.



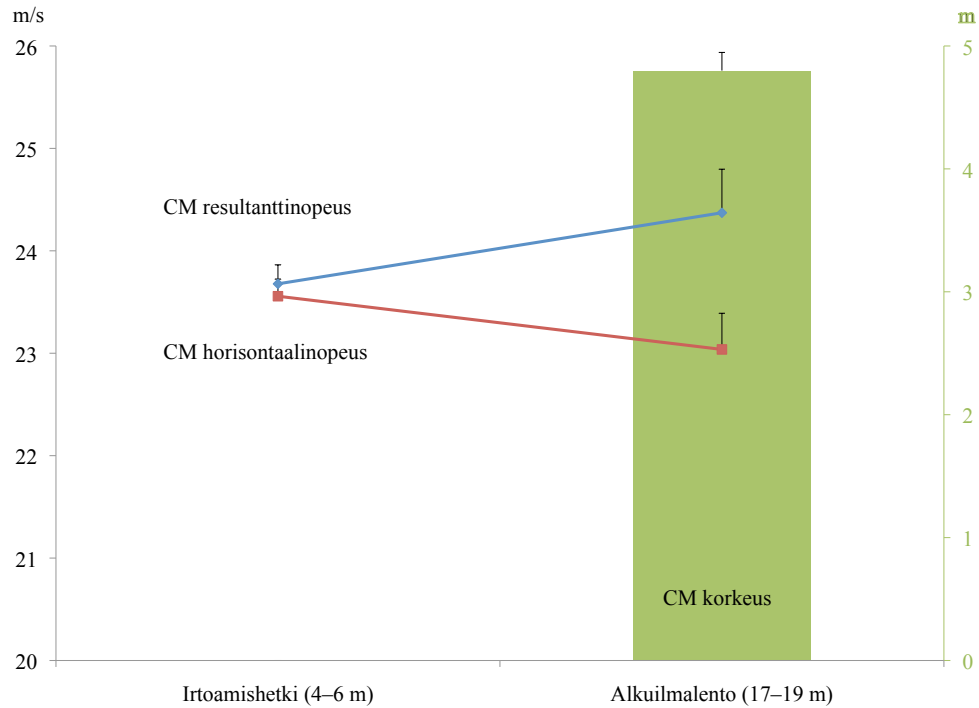
KUVA 31. Polvi- ja lantionivelen keskimääräiset kulmanopeudet ( $^{\circ}/s$ ) ponnistusliikkeen aikana.



KUVA 32. Keskimääräinen kehon painopisteen (CM) horisontaalinen etäisyys (cm) nilkaniveleen laskuasennossa ja ponnistusliikkeen eri vaiheissa.



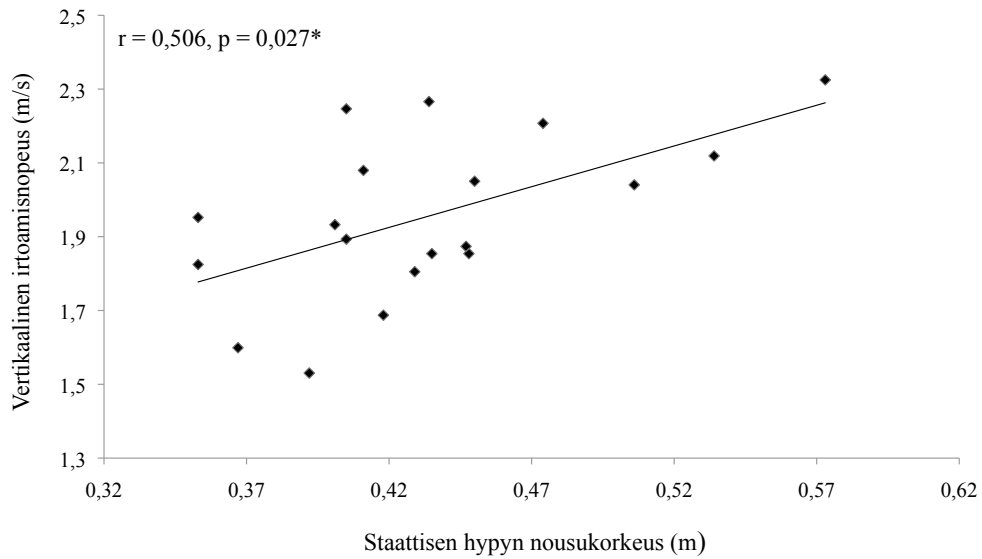
KUVA 33. Keskimääräinen kehon painopisteen (CM) lentoradan kulma ja vartalon asento (°) alkuihmalennossa (ka. 17–19 m kohdalla). Vartalokulma = nilkka- ja olkanivelen välinen linja suhteessa vaakatasoon.



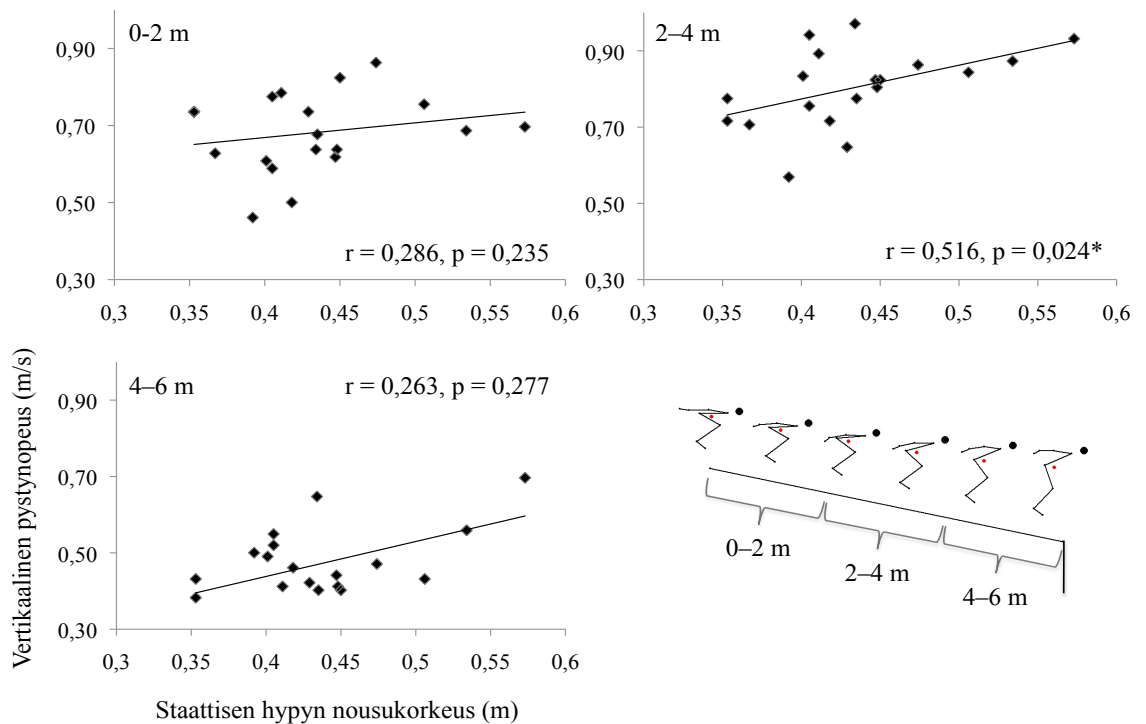
KUVA 34. Keskimääräinen kehon painopisteen (CM) resultantti- ja horisontaalinen nopeus (m/s) keulan viimeisellä kolmanneksella ja alkuilmalennossa, sekä painopisteen korkeus (m) alkuilmalennossa.

*Vertikaalihyppyjen yhteys lajiponnistuksen voimantuottoon.* Staattisten hyppyjen nousukorkeus korreloi tilastollisesti merkitsevästi lajiponnistuksen kokonaisvoimantuoton (NI/kg = pystynopeus m/s) kanssa (kuva 35). Kun korrelaatiota tarkasteltiin keulan eri vaiheiden osalta (kuva 36), havaittiin staattisen hypyn nousukorkeuden olevan yhteydessä lähinnä keulan keskimmäisen osan (2–4 m) kanssa. Muiden vertikaalihyppyjen muuttujien osalta ei voitu osoittaa selkeitä ja luotettavia yhteyksiä.





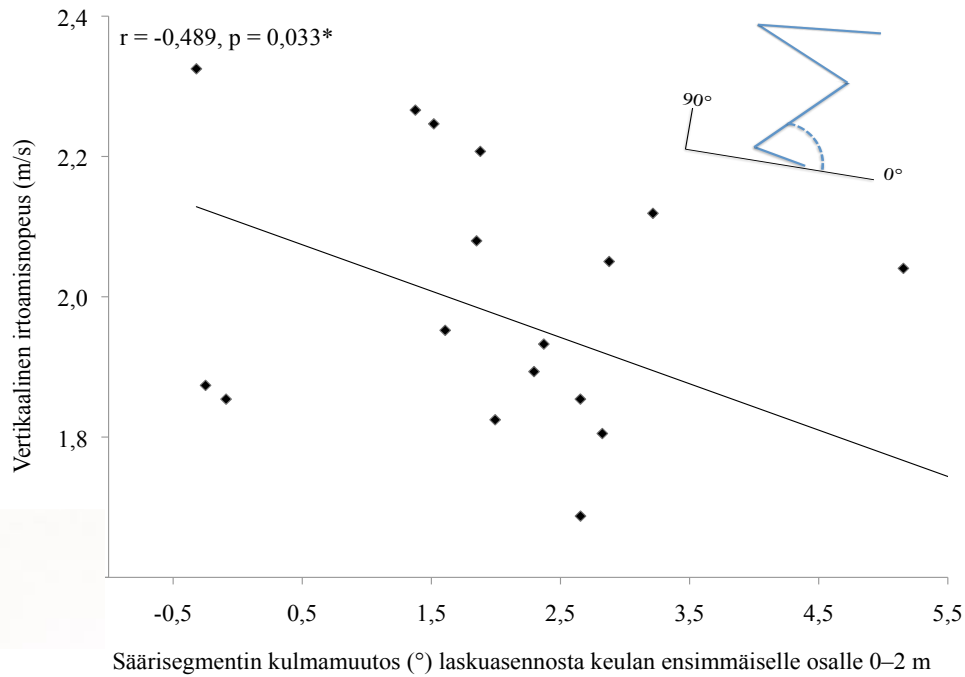
KUVA 35. Staatin hypyn nousukorkeuden korrelaatio lajiponnistuksen kokonaisvoimantuottoon.



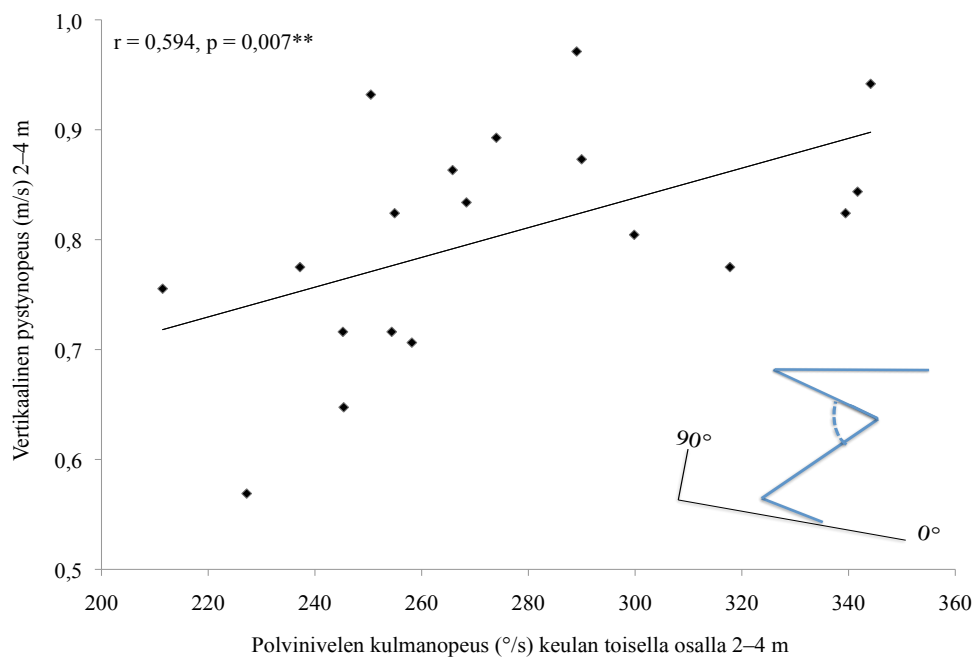
KUVA 36. Staatin hypyn nousukorkeuden korrelaatio lajiponnistuksen voimantuoton eri vaiheisiin.

*Lajiponnistuksen kinemaattisten muuttujien korrelaatio voimantuottoon.* Vain muutama tekninen muuttuja selitti tilastollisesti merkitsevästi lajiponnistuksen voimantuottoa. Säärisegmentin asennon muutos ponnistusliikkeen alkuvaiheessa näytti heikentävän

kokonaisvoimantuottoa (kuva 37). Vastaavasti polvinivelen kulmanopeus keulan keskivaiheilla korreloi positiivisesti kyseisen vaiheen voimantuottoon (kuva 38).

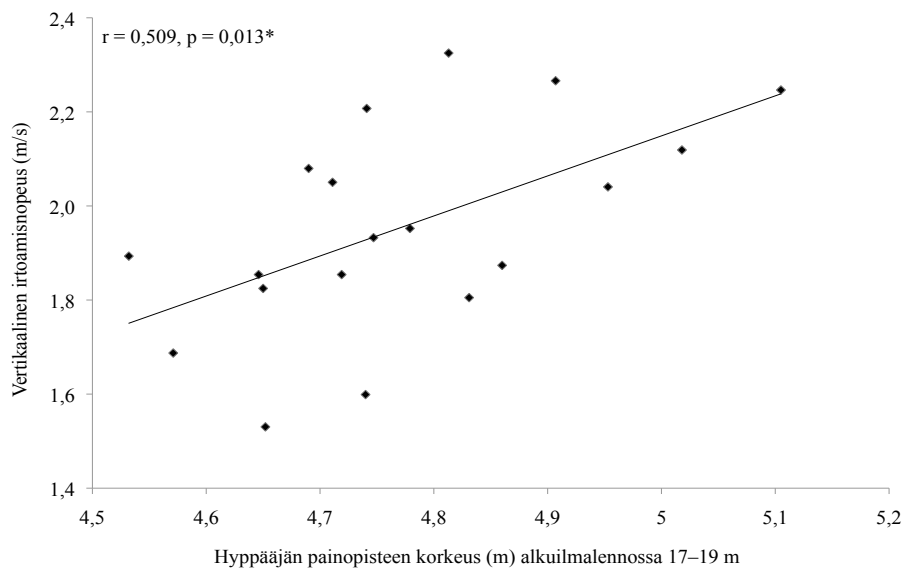


KUVA 37. Säärisegmentin kulmamuutos ( $^{\circ}$ ) laskuasennosta keulan ensimmäiselle kolmannekselle ja sen korrelaatio lajiponnistuksen kokonaisvoimantuottoon. Positiivinen muutos tarkoittaa säärisegmentin nousemista pystympään asentoon.

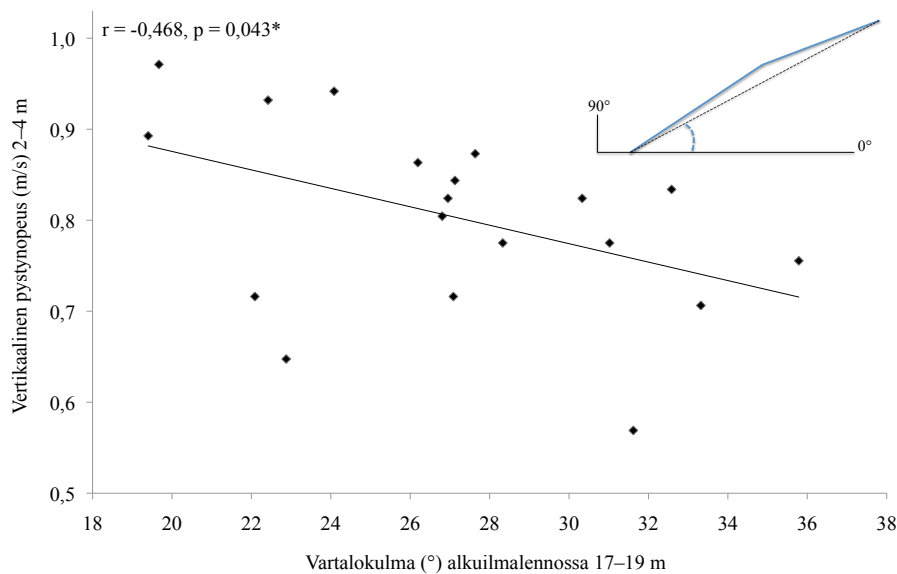


KUVA 38. Polvinivelen kulmanopeuden korrelaatio lajiponnistuksen voimantuottoon hyppyrinkeulan toisella osalla (2–4 m).

*Lajiponnistuksen muuttujien yhteys alkuihmalentoon.* Lajiponnistuksen voimantuotto (NI/kg = pystynopeus m/s) selitti tilastollisesti merkitsevästi kehon painopisteen korkeutta alkuihmalennossa (kuva 39). Myös polvinivelen kulmanopeus keulan toisella kolmanneksella (2–4 m) korreloi positiivisesti lentoradan korkeuteen ( $r = 0,509$ ,  $p = 0,026^*$ ). Hyppääjän kiertymistä hyvään lentoasentoon selitti ainoastaan voimantuoton suuruus keulan toisella kolmanneksella (kuva 40).

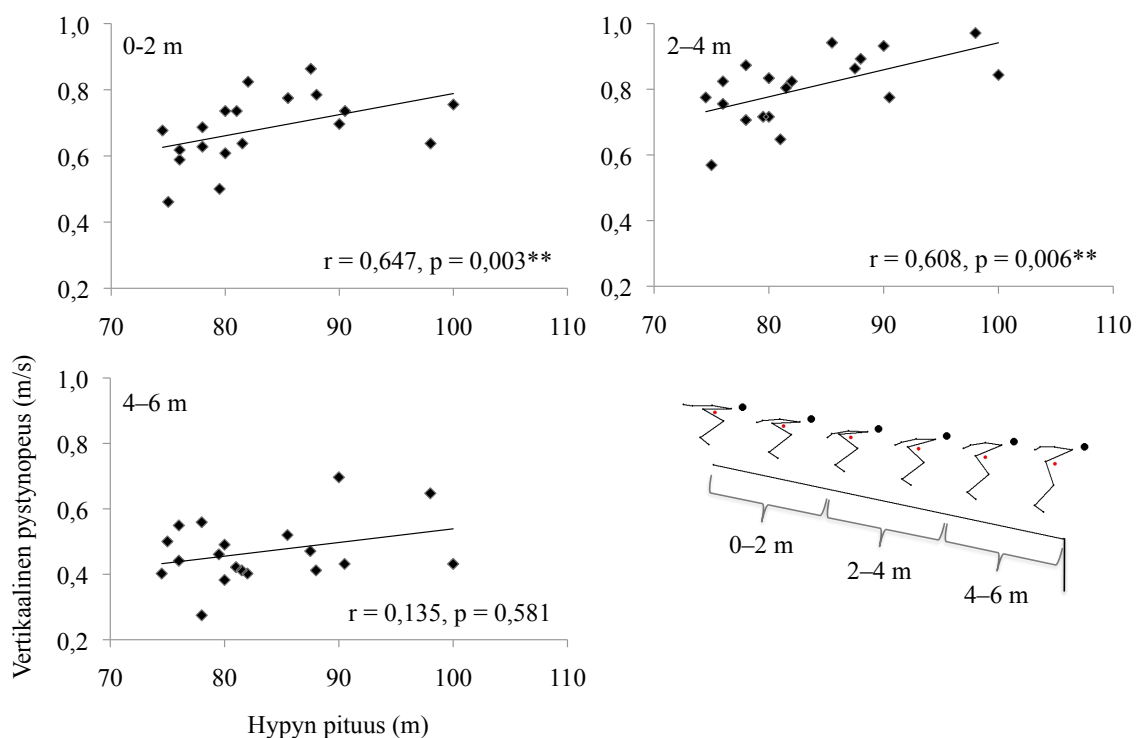


KUVA 39. Lajiponnistuksen kokonaisvoimantuoton yhteys hyppääjän painopisteen korkeuteen (m) alkuihmalennossa (17–19 m ka. suhteessa alastuloalueen pintaan).



KUVA 40. Lajiponnistuksen voimantuoton (2–4 m) yhteys hyppääjän vartalon asentoon alkuihmalennossa. Vartalon asento = nilkka- ja olkanivelen välinen linja suhteessa vaakatasoon.

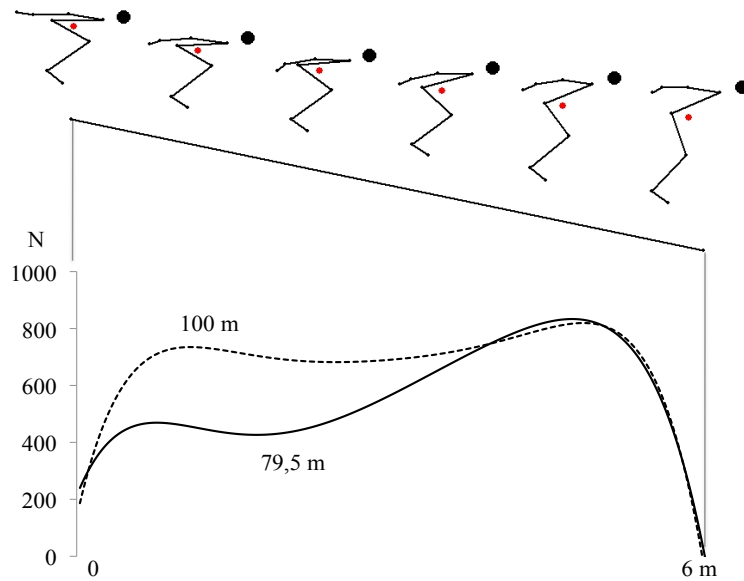
*Lajiponnistuksen ja alkuilmalennon muuttujien yhteys hypyn pituuteen.* Voimantuotto (NI/kg = pystynopeus m/s) keulan kahdella ensimmäisellä kolmanneksella korreloi vahvasti hypyn pituuden kanssa. Sen sijaan keulan viimeisen kolmanneksen voimantuotto ei selittänyt tilastollisesti merkitsevästi hypyn pituutta (kuva 41). Kinemaattisista muuttujista ainoastaan polvinivelen kulmanopeus keulan toisella kolmanneksella (2–4 m) osoitti tilastollista merkitsevyyttä ( $r = 0,653$ ,  $p = 0,002^{**}$ ) hypyn pituuteen. Alkuilmalennon muuttujien osalta tilastollisesti merkitsevää yhteyttä hypyn pituuteen ei löytynyt. Kuitenkin painopisteen korkeus ( $r = 0,43$ ,  $p = 0,059$ ) ja vartalon asento ( $r = -0,434$ ,  $p = 0,056$ ) osoittivat kohtalaista trendiä.



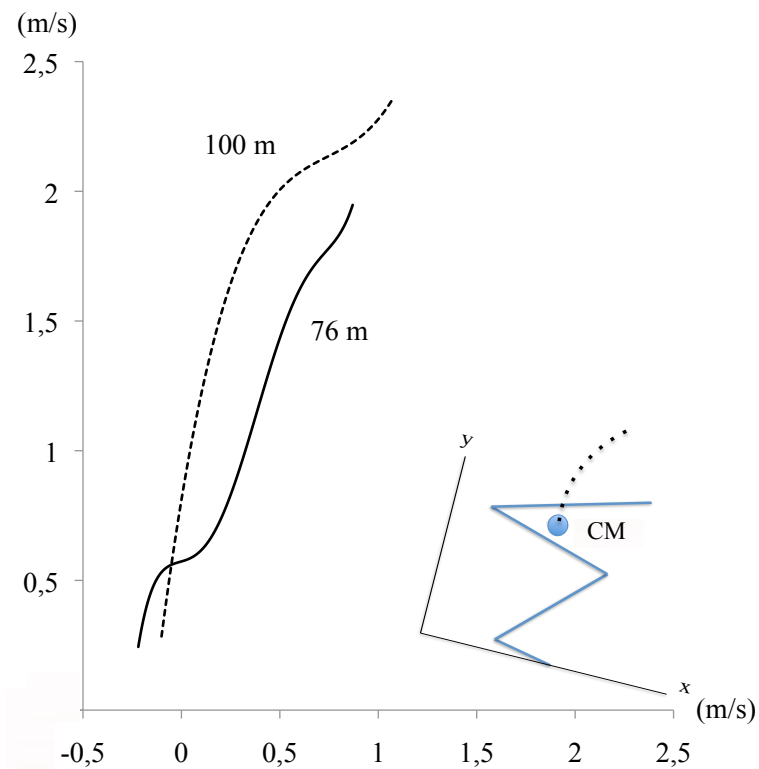
KUVA 41. Lajiponnistuksen voimantuoton korrelaatio hypyn pituuteen (m) hyppyrin keulan eri vaiheissa.

*Yksittäisten suoritusten välisiä vertailuja.* Kuvassa 42 verrataan kilpailun pisimmän hypyn ja keskiarvoa lyhyemmän hypyn pystyvoiman kuvaajia. Esimerkki konkretisoi hyvin tilastollisen analyysin havainnon, jonka perusteella voimantuotto, ja etenkin sen alkuvaiheen tehokkuus vaikuttaa olevan tärkeä tekijä onnistuneen suorituksen taustalla. Kuvassa 43 tarkastellaan kehon painopisteen lineaarista nopeutta suhteessa nilkkaan (liikkuvassa koordinaatistossa) ponnistusliikkeen aikana ja miten nopeuden käyttäytyminen poikkeaa eritasoisissa suorituksissa. Kuvan 44 avulla voidaan hahmottaa, että

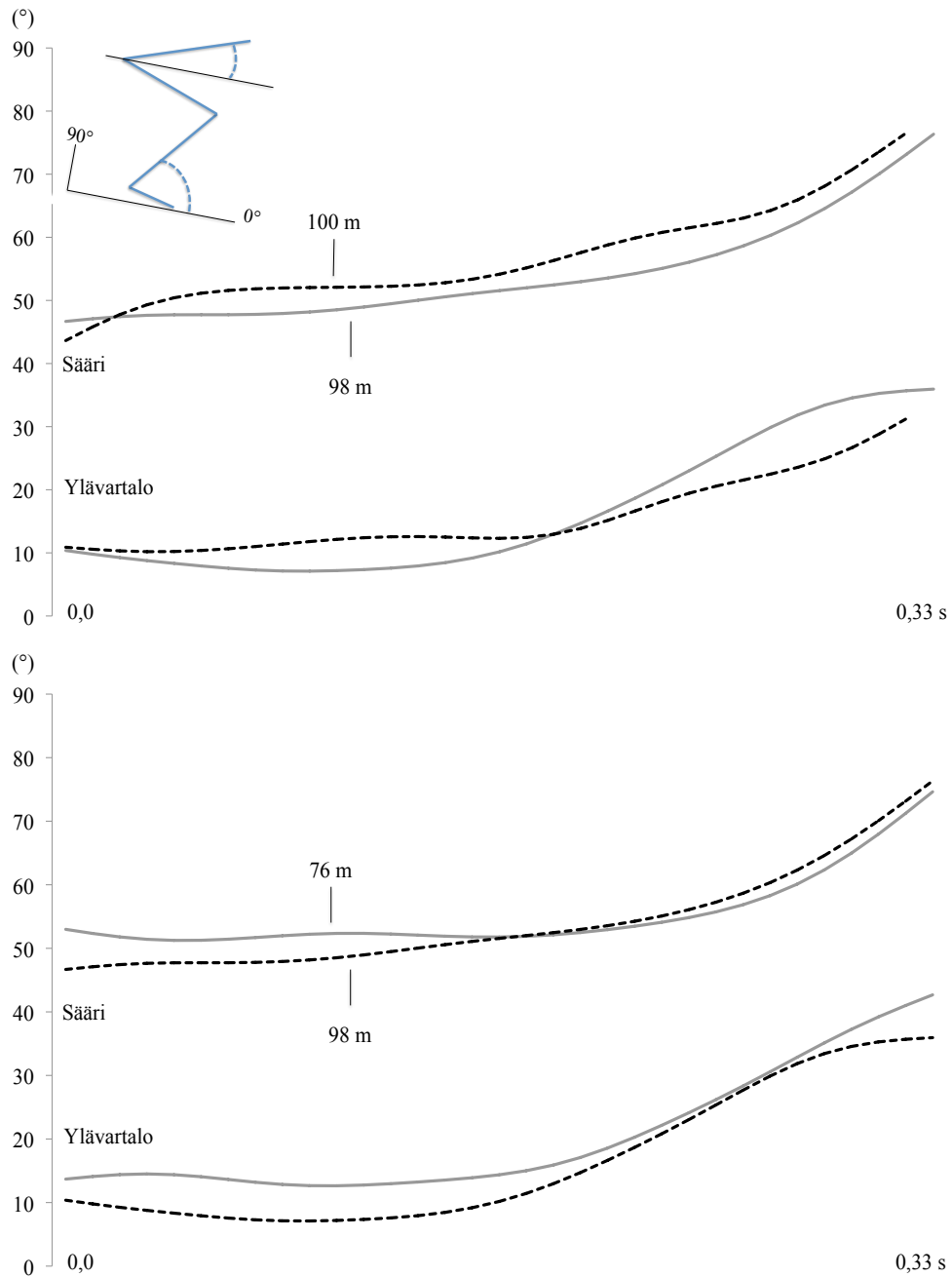
teknisten muuttujien osalta hyvän hypyn määrittäminen on vaikeampaa. Eroavaisuuksia löytyy sekä hyvien että heikompien hyppyjen väliltä.



KUVA 42. Ponnistuksien vertikaaliset nettovoimakuvajat (filtrattu) kilpailun pisimmästä ja keskiarvoa lyhyemmästä suorituksesta.



KUVA 43. Kehon painopisteen (CM) lineaarinen nopeus (m/s) suhteessa nilkkaniveleen ponnistusliikkeen aikana. Tarkastelu on tehty suhteessa ladun pintaan. Vertailussa kilpailun paras ja keskimääräistä heikompi suoritus.



KUVA 44. Sääri- ja vartalosegmentin kulmamuutokset (°) ponnistuksen aikana. Yläkuvassa kahden hyvän suorituksen välinen vertailu. Alakuvassa hyvän suorituksen vertailu selkeästi heikompaan suoritukseen.

## 8 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin mäkihyppääjät pystyvät hyödyntämään vertikaalihyppyjen ponnistusvoiman hyppyrimäkiolosuhteissa, ja millainen vaikutus lajiponnistuksen voimantuotolla on suorituksen laatuun. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin, miten tekniset muuttujat selittävät voimantuoton ja kokonaissuorituksen tehokkuutta. Tutkimuksen koehenkilöinä toimivat kansallisen mäkihyppykilpailun miesten yleisen sarjan kilpailijat ( $n = 19\text{--}20$ ). Tässä pohdinnassa arvioidaan, miten tutkimuksen tulokset suhtautuvat tutkimuskysymyksiin ja millaisia johtopäätöksiä niistä voidaan tehdä. Lopuksi luodaan vielä katsaus mahdollisiin virhelähteisiin, sekä tästä tutkimuksesta nouseviin lisäkysymyksiin.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että hyvä staattisen hypyn nousukorkeus auttaa tehokkaan voimantuoton saavuttamisessa hyppyrimäkiolosuhteissa, mutta ei selitä sitä kokonaan. Tehokas voimantuotto kohtisuoraan latua vasten vaikuttaa olevan tärkeä tekijä onnistuneen suorituksen taustalla, ja etenkin voimantuoton alkuvaiheen tehokkuus selittää ratkaisevasti hypyn pituutta. Tulosten perusteella voidaan myös todeta, että tehokas voimantuotto ja pitkä hyppy on mahdollista toteuttaa erilaisilla tekniikoilla.

Vertikaalihyppyjen keskimääräiset nousukorkeudet olivat yllättävän matalia. Koska hyppyjen korkeus määriteltiin nettoimpulssin perusteella, ei alastulon tekniikka vaikuta tulokseen. Sen sijaan lentoajasta tehtävään määrittelyyn, joka on testimenetelmänä yleisempi, vaikuttaa merkittävästi hyppääjän asento laskeutumishetkellä. Hyvälläkin alastulotekniikalla eron on havaittu olevan 0,5–2,0 cm (Kibele 1998). Keskiarvotulosten pohjalta voidaan päätellä, että testimenetelmien luotettavuuteen tulisi kiinnittää enemmän huomiota. On myös mahdollista, että hyppääjät eivät olleet valmistautuneet vertikaalihyppyihin yhtä hyvin kuin erillisiin fyysisiin testeihin. Toisaalta fyysisiä ominaisuuksia pitäisi harjoitella juuri lajisuorituksia ja kilpailuja varten.

Hyppyrimäessä pystyvoimantuoton aikaansaama vertikaalinen irtoamisnopeus oli keskimäärin 1,96 m/s, mikä on selkeästi vähemmän muihin viimeaikaisiin tutkimushavaintoihin verrattuna (mm. *Virmavirta & Komi 2011*). Eroa selittää ainakin se, että tässä

tutkimuksessa lähtönopeuden laskennassa huomioitiin hyppääjän paino täydessä kilpailuvarustuksessa. Pelkkien suksien huomioiminen laskennassa vaikuttaa tulokseen yli 7 %. On myös mahdollista, että joidenkin hyppääjien voimantuotto on alkanut ennen mittausaluetta (6 m), jolloin sillä olisi vaikutusta todelliseen irtoamisnopeuteen. Edellä mainittujen syiden takia vertikaalisen irtoamisnopeuden keskimääräisiä arvoja ei ole mielekäästä verrata tutkimustuloksiin, jotka on analysoitu erilaisella laskentatavalla.

Lajiponnistuksen kinemaattisten muuttujien osalta keskiarvostetut tulokset olivat samassa linjassa aiempien tutkimushavaintojen kanssa. Edelleen voidaan todeta, että mäkihypyn ponnistus on kahden nivelen, polven ja lantion, rytmisen ja kiihtyvän toiminto. Tässä otannassa teknisten muuttujien yksilöllinen vaihtelu oli suurinta ponnistusliikkeen viimeisellä kolmanneksella. Ponnistuksen kinemaattiset arvot kuvaavat keulan eri vaiheiden (0–2, 2–4, 4–6 m) keskiarvoja. Tämä kannattaa huomioida vertailussa muihin saman aihealueen tutkimuksiin, joissa yleensä mm. irtoamishetken asento on määritelty keulan katkeamisen kohdalta. Kehon painopisteen horisontaalinen sijainti suhteessa nilkkaniveleen osoitti, että keskimäärin hyppääjien painopiste siirtyi ponnistuksen alkuvaiheessa hieman nilkkaa kohti. Vaikka muutos oli hyvin pieni, on se huomionarvoinen sen vuoksi, että muutoksen olisi odottanut olevan päinvastainen. Tasapainon siirtymisen kohti kantapäitä keulan suoralle osalle tultaessa voi vaikeuttaa loppuliikkeen suunnastamista (Virmavirta & Komi 2000a).

Alkuilmalennon muuttujat analysoitiin kalibrointialueen keskeltä, 17–19 m etäisyydeltä hyppyrin keulasta. Koska hyppääjien keskimääräinen horisontaalinen nopeus oli irtoamishetken ja alkuilmalennon mittausalueen välillä noin 23,5 m/s, on alkuilmalennon analysointialue saavutettu alle 0,8 s lentovaiheen jälkeen. Alkuilmalennossa eniten vaihtelua oli havaittavissa vartalon asennossa, eli ns. kiertymisessä hypyn päälle. Kaikkien hyppääjien horisontaalinen nopeus heikkeni hieman kummalle mennessä, mutta yhtä hyppääjää lukuun ottamatta resultanttinopeus lisääntyi. Tämä selittyy vertikaalisen nopeuden lisääntymisellä, eli käytännössä hyppääjät putoavat jo tässä vaiheessa kiihtyvällä vauhdilla alaspäin. Alkuilmalennossa korkeimman ja matalimman hypyn välinen ero oli lähes 50 cm, kun tarkasteltiin kehon painopisteen korkeutta.



## 8.1 Staattisen hypyn voimantuoton korrelaatiot lajiponnistuksen voimantuottoon

Staattisen hypyn nousukorkeutta on yleisesti pidetty tärkeänä muuttujana mäkihyppääjien fyysistä suorituskyyä mittaavassa testistössä. Tämän tutkimuksen perusteella nousukorkeus selitti lajiponnistuksen voimantuottoa, mutta vain osittain, sillä yhteys oli tilastollisesti merkitsevää vain keulan keskivaiheen (2–4 m) voimantuoton kanssa. Sale & MacDougall (1981) mukaan paras yhtäläisyys testiliikkeiden ja lajisuorituksen välillä löytyy, kun suoritukset vastaavat biomekaanisessa tarkastelussa mahdollisimman hyvin toisiaan. Vertikaalihyppyjen voimantuotto tapahtuu pääasiassa polvi- ja lantioniveltä ojentavien lihasten toimesta, mutta lihasten EMG-mittausten perusteella polvea ojentavat lihakset dominoivat voimantuottoa (MacKenzie ym. 2014). Kinemaattisista muuttujista keulan keskivaiheen (2–4 m) voimantuottoa selitti ainoastaan polvinivelen kulmanopeus, eikä vastaavaa yhteyttä voitu osoittaa keulan muille osuuksille. Vaikuttaa siis siltä, että staattisen hypyn ja lajiponnistuksen biomekaaninen yhtäläisyys oli suurinta juuri lajiponnistuksen keskivaiheilla.

Koska vertikaalihyppyjen nousukorkeus ei ole suoraan riippuvainen ponnistuksen alkuvaiheen tehokkuudesta, on ymmärrettävää, että pelkkä nousukorkeus ei osoittanut merkittävää yhteyttä lajiponnistuksen alkuvaiheen (0–2 m) voimantuottoon. On arveltu, että alkuvaiheen tehokkuuteen vaikuttaa lihasten supistumiskyvyn lisäksi mm. keksivartalon hallinta, nivelten stabiliteetti sekä kehon ja nivelten asentoaistin herkkyys (mm. Gollhofer 2003). Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan löydetty yhteyttä staattisen hypyn alkuvaiheen tehokkuutta kuvaavien parametrien (RFD, aika Max F) ja lajiponnistuksen voimantuoton alkuvaiheen (0–2 m) välillä. Tämä voi johtua siitä, että staattisten hyppyjen lähtöasentoa ei vakioitu. Tällöin staattisen hypyn alkuvaiheen tehokkuuden parametrit kuvastavat todennäköisesti enemmän ko. hypyn valmiusasennon nivelkulmia, kuin todellista voimantuottokyyä lajinomaisilta nivelkulmilta. Ilmeisesti mitä lähempänä staattisen hypyn lähtöasento on ollut lihasten optimaalista voima-pituus aluetta, sitä tehokkaammin voimantuoton alkuvaihe on ollut mahdollista suorittaa. Toisaalta vapaasti valittava staattisen hypyn lähtöasento antoi paremman vertailukohdan tutkimuksen peruskysymykselle, eli kuinka normaalin testitilanteen kaltainen vertikaalihyppy on yhteydessä lajisuoritukseen.

Tutkimuksen havaintojen perustella on vaikea sanoa, miksi mikään vertikaalihyppyjen muuttujista ei korreloinut selkeästi lajiponnistuksen viimeisen vaiheen (4–6 m) voimantuoton kanssa. Koska lajiponnistuksen loppuvaiheen tekniikassa havaittiin eniten yksilöllistä vaihtelua, on mahdollista, että biomekaaninen yhtäläisyys staattisen hypyn kanssa oli keksimäärin vähäisempää. Toki on ilmeistä, että ponnistustehon täysimääräinen hyödyntäminen hyppyrimäkiolosuhteissa vaatii aina yksilöllisesti optimoitua tekniikkaa ja vahvoja psyykkisiä ominaisuuksia. On arveltu, että hyppääjän tekninen malli voi olla yhteydessä siihen, kuinka luottavaisesti ponnistusliikettä voidaan hyppyrimäkiolosuhteissa toteuttaa. Ehkä edellä mainitut seikat voivat korostua lajiponnistuksen alku- ja loppuvaiheissa, mutta tämän tutkimuksen perustella ei näihin kysymyksiin voitu vastata.

## **8.2 Kineettisten ja kinemaattisten muuttujien korrelaatiot lajisuurituksessa**

Laskuasennon ja lajiponnistuksen teknisistä muuttujista löytyi hyvin vähän voimantuottoa selittäviä tekijöitä ryhmätason vertailussa. Polvinivelen kulmanopeus selitti tilastollisesti merkitsevästi voimantuottoa hyppyrinkeulan keskivaiheen (2–4 m) aikana. Lisäksi säären asennon muuttuminen ponnistusliikkeen alkuvaiheessa oli negatiivisesti yhteydessä kokonaisvoimantuottoon, aivan kuten Virnavirta ja Komi (1994) aiemmin havaitsivat. Tämän tutkimuksen hyppääjillä voimantuottoa heikentävä säärisegmentin muutos tarkoitti asennon nousemista ylöspäin. Tämä selittää aiemmin esitellyn trendin, jossa painopiste siirtyi keskimäärin lähemmäs nilkkaa ponnistuksen alkuvaiheessa. Koska laskuasennon kinemaattiset muuttujat eivät selittäneet tilastollisesti merkitsevästi voimantuottoa hyppyrin keulalla, voidaan olettaa, että laskuasento kannattaa optimoida yksilöllisten ominaisuuksien perusteella. Samaan johtopäätökseen tulivat myös Schwameder ym. (1997) tutkimuksessaan ”Aspects of technique specific training in ski-jumping”.

Sasaki & Tsunoda (1997) päättelivät, että mäkihypyn ponnistuksessa ylävartalosegmentin liike tuottaa suurimman osuuden kokonaistehosta. Näin ollen oli hieman yllättävää,

etteivät lantionivelen tai ylävartalosegmentin muuttujat osoittaneet tässä otannassa systemaattista yhteyttä voimantuoton parametrien kanssa. Vaikka voimantuoton muuttujista löytyi paljon samankaltaisuuksia, täytyy tulosten perusteella todeta, että ne tuotettiin erilaisilla tekniikoilla. Samaan johtopäätökseen päätyivät aiemmin myös Yamanobe & Watanabe (1999).

Voimantuotto hyppyrin keulalla selitti sekä hyppääjän lentoradan korkeutta että ns. etunojaa alkutilmalennossa. Havainto oli odotettu, sillä voimantuotto kohtisuoraan latua vasten aiheuttaa hyppääjälle sekä translaatiota että rotaatiota (Virmavirta & Komi 2000b). Voimantuoton tilastollinen yhteys alkutilmalennon vartalokulmaan oli hieman pienempi kuin yhteys lentoradan korkeuteen. Todennäköisesti tämä johtuu ainakin osittain hyppääjien yksilöllisestä ponnistustekniikasta. Vaikka vertikaalinen voimantuotto on edellytys kiertomomentin syntymiselle, vaikuttaa lopulliseen kulmaliikemäärään voiman suuruuden lisäksi sekä painopisteen liikerata ojennusten aikana että liikkeiden aerodynaamisuus. Toki on mahdollista, että lentoasennon aerodynaamisilla ominaisuuksilla oli vaikutusta jo alkutilmalennon muuttujiin, eivätkä ponnistuksen muuttujat riittä täysin selittämään havaintoja.

### **8.3 Korrelaatiot hypyn pituuteen**

Voimantuotto hyppyrin keulalla selitti yllättävän vahvasti hypyn pituutta. Tilastollisesti merkitsevä korrelaatio löytyi kuitenkin pelkästään keulan ensimmäisen ja toisen vaiheen osalta (0–2, 2–4 m). Vaikka keulan viimeisen osan (4–6 m) voimantuotto ei korreloinut tilastollisesti merkitsevästi hypyn pituuden kanssa, ei ole perusteltua olettaa, ettei loppuvaiheen voimantuotolla olisi merkitystä. Enemmän voidaan ajatella, että tehokkaat suoritukset erottuvat edukseen erityisesti voimantuoton ensimmäisen puolikkaan aikana. Johtopäätös on samankaltainen aiemman tutkimusnäytön kanssa, jossa n. 6–2 metriä ennen irtoamista tuotetun voimatason on havaittu olevan enemmän yhteydessä hypyn pituuteen kuin suuri maksimivoima ponnistuksen loppuvaiheessa (Virmavirta & Komi 1993). Vertikaalisen voimantuoton vaikutus hypyn pituuteen ei johdu pelkästään vertikaalisen irtoamisnopeuden lisääntymisestä. Vähintään yhtä tärkeä ilmiö on kulmaliikemäärän syntyminen, jota ei tapahdu ilman voimantuoton vertikaalista komponenttia (Schwameder 2008).

Koska mittausmenetelmillä ei saatu tietoa jalkapohjan painepisteestä, ei kiertomomentin suuruutta voitu määrittää. Voidaan olettaa, että painopisteen korkeus ja vartalon kulma alkuilmalennossa kuvastivat epäsuorasti voimantuoton aiheuttaman translaation ja rotaation suhdetta. Edellä mainitut alkuilmalennon muuttujat selittivät hypyn pituutta kuitenkin lähes identtisesti, joten tämän otannan perusteella ei voida sanoa kumpi mekanismi olisi tärkeämpi hypyn pituuden kannalta.

Laskuasennon, ponnistuksen tai alkuilmalennon kinemaattisista muuttujista ainoastaan polvinivelen kulmanopeus keulan toisella kolmanneksella (2–4 m) korreloi tilastollisesti merkitsevästi hypyn pituuteen. Todennäköisesti tämä yhteys linkittyy hypyn pituuteen juuri voimantuoton kautta, jota sama muuttuja selitti. Voidaan päätellä, että yleispätevien teknisten ehtojen määrittäminen mäkihyppysuoritukseen on hyvin vaikeaa. Ilmeisesti tehokkaassa suorituksessa on kyse yleisten lainalaisuuksien toteutumisen lisäksi tekniikan yksilöllisestä optimoinnista. Myös aiemmissa tutkimuksissa on selkeästi osoitettu, että hyvä lopputulos voidaan saavuttaa erilaisilla tekniikoilla (mm. Virmavirta ym. 2009).

Vaikka hyppääjän vauhtimässä hankkima nopeus on merkittävin yksittäinen hypyn pituuteen vaikuttava tekijä (mm. Virmavirta & Komi 1993), ei tämän tutkimuksen havainnoista löytynyt tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota nopeusmuuttujien ja hypyn pituuden väliltä. Virallisen kilpailunopeuden keskihajonta oli vain  $\pm 0,4$  km/h, eli kyseisissä kilpailuolosuhteissa ei syntynyt merkittävästi hypyn pituuteen vaikuttavia eroja. Myös hyppääjien kehon painopisteen horisontaalisen ja resultanttinopeuden keskihajonnat olivat irtoamishetkellä hyvin pieniä, eivätkä nopeusmuuttujat tältäkään osin korreloineet merkittävästi hypyn pituuden kanssa. Tästä voidaan päätellä, että tämän otannan hyppääjillä ponnistusliikkeet eivät vaikuttaneet siinä määrin nopeusmuuttujiin, että pelkästään sillä olisi ollut merkittävää vaikutusta hypyjen pituuksiin.

## 8.4 Virhelähteet

Mittausten ajankohta oli heinäkuussa, jolloin mäkihyppääjillä on yleensä menossa harjoituskauden kuormittavin vaihe. Tämä tarkoittaa todennäköisesti sitä, että keskimäärin

hyppääjien fyysinen ja tekninen suorituskyky ei ollut parhaimmillaan. Tämä ei vaikuta tutkimuksen keskeisimpien havaintojen luotettavuuteen, mutta voi antaa hieman vääristyneen kuvan mittausten absoluuttisista arvoista. Kansallisen tason kilpailuissa varusteiden laadussa on yleensä merkittäviä eroja, jotka voivat vaikuttaa etenkin suorituksen aerodynaamisiin ominaisuuksiin. Tällä voi siten olla vaikutusta niiden korrelaatioiden luotettavuuteen, joissa hypyn pituus on riippuva muuttuja.

Esikevennettyjen hyppyjen kohdalla tulokset olivat jossain määrin epäluotettavia, eikä niitä sen vuoksi otettu mukaan tilastolliseen vertailuun. Mittauksissa käytetyn voimalevyn signaalitaso oli riippuvainen hyppääjän sijainnista suhteessa voimalevyn pintaan. Koska nettoimpulssiin perustuvassa määrittelyssä hyppääjän paino arvioitiin voimasignaalista, olisi tulosten luotettavuuden kannalta ollut tärkeää, että myös ponnistuksen voimantuotto oltaisiin tehty täsmälleen samasta sijainnista. Esikevennetyissä hyppyissä hyppääjien jalkojen sijainti ilmeisesti muuttui hieman kevennysvaiheen aikana, mikä aiheutti ongelmia luotettavuuden kannalta. Havaitut muutokset olivat kuitenkin hyvin pieniä, vaikuttaen tuloksiin sekä heikentävästi että parantavasti. Näin ollen tulososiossa ilmoitettu esikevennettyjen hyppyjen nousukorkeuksien keskiarvo on todennäköisesti hyvin lähellä oikeaa.

Mittaushetkellä suomalaisten mäkihyppääjien taso ei ollut kansainvälisessä vertailussa huippuluokkaa, mikä voi vaikuttaa tiettyjen havaintojen yleistettävyyteen. On mahdollista sanoa, olisiko maailman parhaiden hyppääjien mukanaolo vaikuttanut esimerkiksi teknisten muuttujien korrelaatioihin. Toisaalta aiempi tutkimusnäyttö tuki verraten hyvin niitä keskeisiä havaintoja, joita tehtiin lajisuorituksesta mitattujen muuttujien välillä. Vertikaalihyppyjen muuttujien yhteydestä lajiponnistuksen voimantuottoon ei tietävästi löydy aiempaa tutkimusnäyttöä. Tältä osin tuloksia ei varsinaisesti tarvitsekaan yleistää, sillä keskeinen tavoite oli ymmärtää paremmin suomalaisten hyppääjien tilannetta tässä asiassa.

Hyppyrinkeulan voimanmittausalue käsitti 6 metrin matkan, mikä on todennäköisesti HS-100 m mäessä riittävä alue koko ponnistuksen voimantuoton havainnointiin. On kuitenkin mahdollista, että joillakin hyppääjillä voimantuottoa on ilmennyt jo ennen mittausalueen alkamista. Tällä voisi olla hyvin pieni merkitys voimantuoton nettoimpulssin suuruuteen ja ponnistuksen alkuvaiheen tehokkuuden määrittelyyn. Kineettisen

ja kinemaattisen datan synkronoinnissa keräystaajuuden erot (Video 100 Hz, voima 400 Hz) saattoivat aiheuttaa hyvin pientä vaihe-eroa, mutta sillä tuskin oli käytännön merkitystä havaintojen luotettavuuteen. Kinemaattisessa analyysissä laskuasennon muuttujien määrittely tapahtui noin metrin kalibrointialueen ulkopuolelta. Tämä saattoi aiheuttaa pientä perspektiivivirhettä absoluuttisiin tuloksiin, mutta mahdollinen virhe on sama kaikissa suorituksissa. Koska kilpailutilanteessa ei voida käyttää digitoinnin tarkkuutta parantavia markkereita, lisää se vääjäämättä arviointivirheiden mahdollisuutta. Digitoitijäljen huolellisen tarkistuksen ja raakadatan suodattamisen ansiosta kinemaattisen datan voidaan olettaa olevan riittävän luotettavaa tämänkaltaisen tutkimuksen tarpeisiin.

Alkuilmalennon osalta kalibrointialueen korkeus asetti haasteita alueen tarkkojen mittasuhteiden määrittelyyn. Tällä voi olla vaikutusta absoluuttisiin tuloksiin, mutta ei suoritusten välisiin vertailuihin, mikä oli oleellisempaa tässä tutkimuksessa. Alkuilmalennossa käytetyn kameran kuvaustaajuus (50 Hz) osoittautui näissä nopeuksissa hieman liian pieneksi. Vaikka tuloksiin määriteltiin n. 2 metrin alueen keskiarvo, käsitti analyysi vääjäämättä hieman eri vaiheen kunkin hyppääjän kohdalla. Maksimissaan tämä on voinut tarkoittaa horisontaalisesti noin 0,5 m eroa. Vertikaalisesti ero on ollut huomattavasti pienempi.

## **8.5 Johtopäätökset ja tutkimuksesta nousevat jatkokysymykset**

Tutkimusongelmien kannalta tärkeimmät johtopäätökset voidaan tiivistää seuraavasti:

1) Hyvä staattisen hypyn nousukorkeus auttaa tehokkaan voimantuoton saavuttamisessa, mutta ei selitä kokonaan voimantuottokykyä lajiolosuhteissa. 2) Latua vasten kohdistuoraan tuotettu voima, ja erityisesti ponnistuksen ensimmäisen puolikkaan tehokkuus vaikuttaa olevan ratkaisevaa hypyn pituuden kannalta. 3) Hyvä suoritus ja tehokas voimantuotto lajiponnistuksessa on mahdollista toteuttaa erilaisilla tekniikoilla.

Vaikka tutkimuskysymyksiin saatiin vastattua verraten hyvin, ei tuloksista voitu päätellä todellista syytä kaikkiin keskeisiin havaintoihin. Perusteltu jatkotutkimuksen aihe olisi etsiä sellaisia testi- ja harjoittelumenetelmiä vertikaalihypyjen rinnalle, jotka vastaavat vielä paremmin mäkihyppyponnistuksen biomekaanisia vaatimuksia. Kirjallisuuden perusteella ilmiöt voisivat liittyä mm. yksilöllisyyden korostamiseen, propriosep-

tiikkaan, keskivartalon hallintaan tai nivelten liikkuvuuteen (mm. Atsushi ym. 2014, Han ym. 2014, Jost 2010). Tämän tutkimuksen perusteella voidaan suositella myös asettelmia, joissa ryhmätason vertailun sijaan tarkasteltaisiin yksilötason lajitekniisten muutosten vaikutusta suorituksen tehokkuuteen. Edellä mainittujen tutkimuskysymysten kautta olisi mahdollista kehittää ja yksilöidä harjoitteluprosesseja siten, että siirtovaikutus koko voimantuottoa ajatellen tehostuisi. Janura ym. (2011) kehottivat urheilijoita ja valmentajia hyppytekniikan yksilölliseen kehittämiseen. Myös tämä pohdinta voidaan päättää samoihin ajatuksiin.

## 9 LÄHTEET

- Arndt, A., Brüggemann, G-P., Virmavirta, M. & Komi, P.V. 1995. Techniques used by Olympic Ski Jumpers in the Transition From Takeoff to Early Flight. *Journal of Applied Biomechanics* 11, 224–237.
- Atsushi, I., Kaneoka, K., Okubo, Y. & Shiraki, H. 2014. Effects of Two Types of Trunk Exercises on Balance and Athletic Performance in Youth Soccer Players. *The International Journal of Sports Physical Therapy* 9 (1), 47.
- Chardonens, J., Favre, J., Cuendet, F., Gremion, G. & Aminian, K. 2013. Characterion of lower-limbs inter-segment coordination during the take-off extension in ski jumping. *Human Movement Science* 32, 741–752.
- Dal Pupo, J., Detanico, D. & Giovana dos Santos, S. 2012. Kinetic Parameters as Determinants of Vertical Jumps Performance. *Brazilian Journal of Kinanthropometry and Human Performance* 14 (1), 41–51.
- DeLeva, P. 1996. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov’s segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics* 29, 1223–1230.
- Ettema, G.J.C., Bråten, S. & Bobbert, M. F. 2005. Dynamics of the In-Run in Ski Jumping: A Simulation Study. *Journal of Applied Biomechanics* 21, 247–259.
- Gollhofer, A. 2003. *Biomechanics of Strength and Strength Training*. Teoksessa *Strength and Power in Sport*. Edited by Paavo Komi. Blackwell Science. 2 nd. Edition.
- Grosz, W.R, Balint, L. & Ganzenhuber, P. 2011. Study of the Implications of the Ski Jumpers Technical Behaviour During Start and Inrun Position on the Enhancement of the Sliding Velocity at Jumping Hill Table Takeoff. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series VIII: Art, Sport, Vol. 4 (53) No. 1*.
- Hakola, L. 2014. *Kitkaolosuhteiden vaikutus kuivaharjoittelun lajinomaisuuteen mäkihyppyharjoittelussa*. Jyväskylän yliopisto. Liikuntabiologian laitos. Kandidaattitutkielma.
- Han, J., Anson, J., Waddington, G. & Adams, R. 2014. Sport Attainment and Proprioception. *International Journal of Sports Science & Coaching*, Volume 9, Number 1.
- Hedrick, A. 2000. Training the trunk for improved athletic performance. *Strength Cond*



- journal 22(3), 50–61.
- Hochmuth, G. 1958. Studies on the influence of the take-off movement on the length of a ski jump. *Wiss. Zeitschrift der DHFK, Leipzig* 1, 29–59.
- Janura, M., Cabell, L., Elfmark, M. & Vaverka, F. 2010. Kinematic Characteristics of the Ski Jump Inrun: A 10-Year Longitudinal Study. *Journal of Applied Biomechanics* 2, 196–204.
- Janura, M., Cabell, L., Svoboda, Z., Elfmark, M. & Janurova, E. 2011. Analysis of the Beginning of the Early Flight Phase of the Ski Jump in Athletes Different Performance level. *Acta Universitatis Palaskianae Olomucensis. Gymnica* 41, 7–13.
- Jost, B. 2010. The Hierarchical Structure of Selected Morphological and Motoric Variables in Ski Jumping. *Human Movement* vol. 11 (2), 124–131
- Kaps, P., Schwameder, H. & Engstler, C. 1997. Inverse Dynamic Analysis of Take-off in Ski-Jumping. Teoksessa Müller, E., Schwameder, H., Kornexl, E. & Raschner, C. *Science and skiing*. Cambridge: Chapman & Hall, Cambridge University Press, 72–87.
- Kibele, A. 1998. Possibilities and Limitations in the Biomechanical Analysis of Counter-movement Jumps: A Methodological Study. *Journal of Applied Biomechanics* 14 (1), 105–117.
- Komi, P.V., Nelson R.C. & Pulli, M. 1974. Biomechanics of skijumping. *Studies in Sport Physical Education and Health* 5. University of Jyväskylä.
- Komi, P.V. & Virnavirta, M. 2000. Determinants of Successful Ski-Jumping Performance. Teoksessa Zatziorsky. *Biomechanics in sport*. Blackwell Science, Cambridge University Press, 349–362.
- Linthorne, P. N. 2001. Analysis of Standing Vertical Jumps Using a Force Platform. *American Journal of Physics* 69 (11), 1198–1204.
- MacKenzie, J. S., Lavers, R.J. & Wallace, B. B. 2014. A biomechanical comparison of the vertical jump, power clean, and jump squat. *Journal of Sports Sciences*. Published online: 16 Apr 2014.
- Malinen, J. 2011. Palautteenantojärjestelmä mäkihypyssä. Jyväskylän yliopisto. Liikuntabiologian laitos. Pro gradu -tutkielma.
- Maryniak, J., Ladyzynska-Kozdra, E. & Slawomir Tomczak. 2009. Configurations of the Graf-Boklev (V-Style) Ski Jumper Model and Aerodynamic Parameters in a Wind Tunnel. *Human Movement* 10 (2), 130–136.

- Mero, A., Kyröläinen, H. & Häkkinen, K. 2004. Hermolihasjärjestelmän rakenne ja toiminta. Teoksessa Mero, A., Nummela, A., Keskinen, K. & Häkkinen, K. Urheiluvalmennus. VK-Kustannus Oy, Lahti.
- Müller, W. 2009. Determinants of ski-jump performance and implications for health, safety and fairness. *Sports Medicine* 39(2), 85–106.
- Müller, E. & Schwameder, H. 2003. Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping. *Journal of Sports Sciences* 21, 679–692.
- Pulli, M. & Virmavirta, M. 1990. Mäkihyppy. Teoksessa Mero, A., Vuorimaa, T., Häkkinen, K. Lasten ja nuorten harjoittelu. VK-Kustannus Oy, Jyväskylä.
- Rausavljevic, N., Spasic', M. & Jost, B. 2012. Mechanics Model of the Relationship Between the Body Mass of Skijumpers and Length of the Skijump. *Kinesiologia Slovenica* 18 (1), 14–20.
- Sale, D. & MacDougall, D. 1981. Specificity in strength training: A review for the coach and athlete. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences* 6, 87–92.
- Sasaki, T. & Tsunoda, K. 1997. Joint power production in take-off action during ski-jumping. Teoksessa Müller, E., Schwameder, H., Kornexl, E. & Raschner, C. *Science and skiing*. Cambridge: Chapman & Hall, Cambridge University Press, 49–60.
- Sasaki, T., Tsunoda, K. & Uchida, E. 1995. The relation of muscle activity and joint power during ski jump takeoff action. Häkkinen, K. (ed.) XVth Congress of the International Society of Biomechanics, Jyväskylä, University of Jyväskylä, 800–801.
- Schmölzer, B. & Müller, W. 2005. Individual flight styles in ski jumping: results obtained during Olympic Games competitions. *Journal of Biomechanics* 38 , 1055–1065.
- Schwameder, H. 2008. Biomechanics research in ski jumping, 1991–2006. *Sports Biomechanics* 7 (1), 114–136.
- Schwameder, H. & Müller, E. 1995. Biomechanische Beschreibung und Analyse der V-Technik im Skispringen (Biomechanical description and analysis of the V-technique in ski-jumping). *Spectrum der Sportwissenschaften* 7, 5–36.
- Schwameder, H. & Müller, E. 2001. Biomechanics in Ski Jumping: A Review. *European Journal of Sport Science* vol 1, issue 1.

- Schwameder, H., Müller, E., Raschner, C. & Brunner F. 1997. Aspects of technique-specific training in ski-jumping. Teoksessa Müller, H. et al., (ed.) Science and skiing. Chapman & Hall, Cambridge University Press, Cambridge, 309–319.
- Taube, W., Kullmann, N., Leukel, C, Kurz, O., Amtage-F. & Gollhofer, A. 2007. Differential Reflex Adaptations Following Sensorimotor and Strength Training in Young Elite Athletes. *International Journal of Sports Medicine* 28 (12), 999–1005.
- Vaverka, F., Janura, M., Sallinger, J. & Brichta, J. 1993. Comparison of the take-off measured under laboratory and jumping hill conditions. ISB XIVth Congress, Paris, France, abstract book, 1406–1407.
- Virmavirta, M. 2000. Limiting factors in ski jumping take-off. *Studies in Sport Physical Education and Health* 5. University of Jyväskylä. Väistökirjatyö.
- Virmavirta, M. 2003. Mäkihyppy Lajianalyysi Taso 3 CD-ROM. Suomen Hiihtoliitto, Suomen Olympiakomitea, Kilpa- ja huippu-urheilun tutkimuskeskus.
- Virmavirta, M. 2011. Valmentajafoorumiesitys. Rovaniemi. Liikuntabiologian laitos, Jyväskylän yliopisto.
- Virmavirta, M. & Isolehto, J. 2014. Determining the location of the body's center of mass for different groups of physically active people. *Journal of Biomechanics* 47 (8), 1909–1913.
- Virmavirta, M., Isolehto, J., Komi, P., Brüggemann, G. P., Müller, E. & Schwameder, H. 2005. Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition. *Journal of Biomechanics* 38, 2157–2163.
- Virmavirta, M., Isolehto, J., Komi, P.V., Schwameder, H., Pigozzi, F. & Massazza, G. 2009. Take-off analysis of the Olympic ski jumping competition (HS-106 m). *Journal of Biomechanics* 42, 1095–1101.
- Virmavirta, M. & Kivekäs, J. 2012. The effect of wind on jumping distance in ski jumping – fairness assessed. *Sports Biomechanics* 11 (3), 358–369.
- Virmavirta, M. & Kivekäs, J. 2013. Is it Still Important to Be Light in Ski Jumping? Poster presentation. XXIV ISB congress, Natal, Brazil.
- Virmavirta, M., Kivekäs, J. & Komi, P.V. 2001a. Take-off aerodynamics in ski jumping. *Journal of Biomechanics* 34, 465–470.
- Virmavirta, M., Kivekäs, J. & Komi, P.V. 2011. Ski Jumping Takeoff in a Wind Tunnel With Skis. *Journal of Applied Biomechanics* 27, 375–379.

- Virmavirta, M. & Komi P.V. 1993. Measurement of take-off forces in ski jumping. Part 1 & 2. *Scand J Med Sci Sports* 3, 229–243.
- Virmavirta, M. & Komi, P.V. 1994. Takeoff analysis of a champion ski jumper. *Coaching and Science Journal* 1 (1), 23–27.
- Virmavirta, M. & Komi, P.V. 2000a. Plantar pressures during ski jumping take-off. *Journal of Applied Biomechanics* 16, 320–326.
- Virmavirta, M. & Komi, P.V. 2000b. Plantar pressure and EMG activity of simulated and actual ski jumping take-off. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in sports* 11, 310–314.
- Virmavirta, M. & Komi, P.V. 2001. Ski jumping boots limit effective take-off in ski jumping. *Journal of Sport Sciences* 19, 961–968.
- Virmavirta, M. & Komi, P.V. 2011. Teoksessa Komi, P.V. (ed.) *Neuromuscular aspects of sports performance* 6, 91–102.
- Virmavirta, M., Perttunen, J. & Komi, P.V. 2001b. EMG activities and plantar pressures during ski jumping take-off in three different sized hills. *Journal of Electromyography & Kinesiology* 11, 141–147.
- Vodicar, J. & Jost, B. 2010. The Factor Structure of Chosen Kinematic Characteristics of Take-Off in Ski Jumping. *Journal of Human Kinetics* volume 23, 37–45.
- Yamanobe, K. & Watanabe, K. 1999. Measurement of take-off forces in ski jumping competition. *Japanese Journal of Biomechanics in Sports & Exercise* Vol. 3 Issue 4, 277–286.
- Zatsiorsky, V. M. 2003. *Biomechanics of Strength and Strength Training*. Teoksessa *Strength and Power in Sport*. Edited by Paavo Komi. Blackwell Science. 2 nd. Edition.

## 10 LIITTEET

TAULUKKO 10. Koehenkilöiden tiedot. Paino mitattiin kaikkien hyppyvarusteiden kanssa, hypyn pituus 1. kierrokselta, tuulilukema mitattu kummulta (kaikille vastatuuli).

KH (n=20)	Syntynyt	Paino (kg)	Hypyn pituus (m)	Tuuli (m/s)
KH 1	1997	71,7	80	1
KH 2	1996	78,8	74,5	1
KH 3	1996	69,2	78	1
KH 4	1992	68,9	76	3
KH 5	1990	74,4	90	1,5
KH 6	1993	73,5	76	2
KH 7	1998	75,3	79,5	2
KH 8	1996	69,8	77	1,5
KH 9	1995	74,4	87,5	1
KH 10	1985	69,0	81,5	1,5
KH 11	1989	69,7	88	1,5
KH 12	1994	68,8	98	2
KH 13	1977	78,8	100	2
KH 14	1991	74,4	90,5	2
KH 15	1992	78,1	78	2
KH 16	1991	80,7	80	1,5
KH 17	1994	71,7	75	2
KH 18	1995	74,1	85,5	2
KH 19	1992	73,7	81	1
KH 20	1980	79,2	82	1,5

TAULUKKO 11. Tutkimuksen kaikkien muuttujien keskiarvotulokset, keskihajonnat sekä kilpailun kahden pisimmän (top) ja kahden lyhyimmän (last) hypyn hypänneiden urheilijoiden keskiarvot kunkin muuttujan kohdalla.

Muuttuja	Ka.	SD	Ka. top 2	Ka. last 2
<u>Kilpailutulokset</u>				
Nopeus (km/h)	82,4	± 0,4	82,9	82,6
Hypyn pituus (m)	82,9	± 7,4	99	74,8
Vastatuuli alkutilmalennossa (m/s)	1,7	± 0,5	2	1,5
<u>Staatitset hypyt</u>				
Nousukorkeus (cm)	43,8	± 5,9	47	41,4
Voimantuottoaika (s)	0,46	± 0,04	0,45	0,49
RFD 100 ms (Ns)	19,8	± 11,8	19,8	14,1
Max F (N)	1398	± 111	1475	1284
Aika Max F (s)	0,31	± 0,12	0,23	0,41
<u>Esikevennetyt hypyt</u>				
Nousukorkeus (cm)	45,8	± 7	51,1	44,3
<u>Voimantuotto keulalla</u>				
NI/kg 0–2 m (m/s)	0,68	± 0,1	0,7	0,57
NI/kg 2–4 m (m/s)	0,8	± 0,1	0,91	0,67
NI/kg 4–6 m (m/s)	0,47	± 0,1	0,54	0,45

NI/kg Total 0–6 m (m/s)	1,96	± 0,22	2,15	1,69
Max F (N)	844	± 92	903	787
Aika Max F (N)	0,17	± 0,07	0,2	0,14
<u>Kinematiikka keulalla</u>				
<u>Laskuasento</u>				
Säärisegmentin kulma (°)	46,8	± 3,5	47	47,5
Vartalosegmentin kulma (°)	9,5	± 2,9	9,9	7,8
Polvinivelen kulma (°)	64	± 4	59,4	66,8
Lantionivelen kulma (°)	26,8	± 3,3	23,2	27
CM vaakaetäisyys nilkasta (cm)	20,1	± 3	19,4	22
<u>Alkuvaihe 0–2 m</u>				
Säärisegmentin kulma (°)	49,1	± 3	50,2	50,3
Säärisegmentin kulmanmuutos laskuasentoon nähden (°)	2,3	± 1,6	3,3	2,7
Vartalosegmentin kulma (°)	11	± 3,2	9,5	10,3
Polvinivelen kulma (°)	70,2	± 3,7	68,6	73,1
Lantionivelen kulma (°)	32,2	± 3,7	27,9	33,4
Polvinivelen kulmanopeus (°/s)	133	± 22	120	147
Lantionivelen kulmanopeus (°/s)	144	± 26	121	128
CM vaakaetäisyys nilkasta (cm)	19,7	± 2,9	18,9	21,5
<u>Keskivaihe 2–4 m</u>				
Säärisegmentin kulma (°)	52,4	± 3,7	55,7	55,4
Säärisegmentin kulmanmuutos laskuasentoon nähden (°)	5,6	± 3,4	8,7	7,8
Vartalosegmentin kulma (°)	19,7	± 4,5	15,4	19,5
Polvinivelen kulma (°)	90,1	± 4,4	90,1	91
Lantionivelen kulma (°)	57,5	± 5,1	50,5	54,9
Polvinivelen kulmanopeus (°/s)	274	± 39	315	232
Lantionivelen kulmanopeus (°/s)	372	± 48	350	305
CM vaakaetäisyys nilkasta (cm)	25,3	± 3,3	23	24,7
<u>Loppuvaihe 4–6 m</u>				
Säärisegmentin kulma (°)	60,2	± 5	66	62,8
Säärisegmentin kulmanmuutos laskuasentoon nähden (°)	13,4	± 4,7	19	15,3
Vartalosegmentin kulma (°)	33,3	± 4,2	28,4	31,7
Polvinivelen kulma (°)	126,9	± 6,9	129,4	122,7
Lantionivelen kulma (°)	100,1	± 7,8	90,6	92,5
Polvinivelen kulmanopeus (°/s)	629	± 81	654	539
Lantionivelen kulmanopeus (°/s)	599	± 63	598	578
CM vaakaetäisyys nilkasta (cm)	35,2	± 4,7	30,4	31,9
CM horisontaalinen nopeus (m/s)	23,6	± 0,2	23,7	23,7
CM resultanttinopeus (m/s)	23,7	± 0,2	23,8	23,8
<u>Alkuilmalennon kinematiikka</u>				
Vartalokulma (°)	26,9	± 4,6	23,4	30
CM korkeus (m)	4,8	± 0,1	4,9	4,7
CM lentoradan kulma (°)	19	± 0,6	18,1	19,1
CM horisontaalinen nopeus (m/s)	23	± 0,4	23,1	22,7
CM resultanttinopeus (m/s)	24,4	± 0,4	24,3	24
CM vertikaalinopeus (m/s)	-7,9	± 0,3	-7,6	-7,9