

EMF-KALVON KÄYTTÖ VOIMISTELUN HYPYSSÄ

Tuomas Moisio

Biomekaniikan pro gradu -tutkielma

Syksy 2004

Liikuntabiologian laitos

Jyväskylän yliopisto

TIIVISTELMÄ

Tuomas Moisio(2004), EMF-kalvon käyttö voimistelun hyppyssä, Biomekaniikan progradu -tutkielma, Liikuntabiologian laitos, Jyväskylän yliopisto, 69 sivua.

EMF-kalvo (Electromechanical film) on ohut ja joustava elektreettimuovikalvo. Kalvolla voidaan mitata dynaamista voimaa. Tutkimuksessa rakennettiin EMF-kalvoon perustuva voimamittausjärjestelmä voimistelun hyppylaudalle. Järjestelmällä pystyttiin mittaamaan hyppääjän ja hyppylaudan välinen vertikaalinen reaktivoimakäyrä. Voima-aikakäyrästä laskettiin vertikaalinen lähtönopeus, jota verrattiin liikeanalyysistä saatuun tulokseen.

Koemittaukset suoritettiin Suomen, Ruotsin, Englannin ja Latvian välisestä maaottelukilpailun telinäkokeilusta Jyväskylässä kesällä 2003. Koehenkilöinä toimivat kyseisten maiden miesmaajoukkueurheilijat. Analysoitujen hyppyjen lukumäärä oli 13. Jokaisesta hypystä tehtiin liikeanalyysi, laskettiin vertikaalinen lähtönopeus voima-aikakäyrästä, määritettiin kontaktiaika, määritettiin maksimivoima ja analysoitiin voima-aikakäyrän muoto. Vertikaalinen lähtönopeus voidaan laskea voima-aikakäyrästä, mikäli voima-aikakäyrästä pystytään määrittämään törmäyksen ja työnnön välinen muutoskohta. Muutoskohdan määrittämisessä käytettiin kahta eri menetelmää. Liikeanalyysillä määritettiin vertikaalinopeuden muutossuunta. Toinen menetelmä perustui arvioitiin, jossa arvioitiin törmäysimpulssin suuruus. Menetelmää voitiin käyttää, koska vertikaalisten tulonopeuksien keskihajonta oli pieni (SD 0.15 m/s).

Liikeanalyysillä määritetty keskimääräinen horisontaalinen tulonopeus oli 7.30 (SD 0.35) m/s ja lähtönopeus oli 4.40 (SD 0.42) m/s. Keskimääräinen vertikaalinen tulonopeus oli -1.20 (SD 0.15) m/s ja lähtönopeus oli 4.09 (SD 0.24). Voima-aikakäyrästä lasketut vertikaaliset lähtönopeudet olivat keskimäärin $v_{y1} = 4.08$ (SD 0.32) m/s (muutoskohta saatu liikeanalyysistä) ja $v_{y2} = 4.09$ (SD 0.32) m/s (muutoskohta arvioitu). Menetelmien korrelaatiot olivat $r_1 = 0.485$ ja $r_2 = 0.491$. Menetelmät eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, $p_1 = 0.0927$ ja $p_2 = 0.0888$. Keskimääräinen vertikaalisen lähtönopeuden virhe ja virherajat olivat $-0.3 \pm 14\%$ (v_{y1}) ja $0.5 \pm 14\%$ (v_{y2}). Keskimääräinen kontaktiaika oli 108 (SD 3.38) ms. Huippuvoimat olivat välillä 6200 – 8900 N. Voima-aikakäyrän muodosta pystyttiin todistamaan hyppääjän painon ja oikean jäykkyyden omaavan laudan merkitys sekä kontaktikohdan merkitys.

Avainsanat: EMF-kalvo, voima-aikakäyrä, hyppylauta, kontaktiaika, vertikaalinen lähtönopeus, kontaktikohta.

LYHENTEET

APAS	= ariel performance analysis system, liikeanalyysiohjelmisto
EMF	= electromechanical film, elektreettimuovikalvo
C	= kapasitanssi (F)
CMJ	= hyppy kevennyksellä
DJ	= pudotushyppy
E	= sähkökentän voimakkuus (V/m)
J	= hitausmomentti
pC	= pico coulombi, sähkövarauksen yksikkö
PET	= polyeteeni, muovilaatu
PP	= polypropyleeni, muovilaatu
SEM	= scanning electron microscope, pyyhkäisyelektronimikroskooppi
SJ	= staattinen hyppy
TSC	= thermally stimulated current, lämpötilan avulla stimuloitu varausten irrottaminen
Y	= youngin modulus, kuvaa materiaalin elastisuutta eli muodonmuutosta voiman vaikutuksesta
Q	= sähkövaraus (C)

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ

LYHENTEET

JOHDANTO	7
1 VOIMISTELUN HYPPY	7
1.1 Lajikuvaus	7
1.2 Hypyn vaiheet	8
2 VERTIKAALINEN LÄHTÖNOPEUS	11
2.1 Osatekijät.....	11
2.1.1 Horisontaalinen tulo nopeus.....	11
2.1.2 Vertikaalinen tulo nopeus	12
2.1.3 Hyppääjän taito	12
2.1.4 Kontaktikohta laudalla	13
2.1.5 Laudan ominaisuudet	13
2.1.5 Hermolihasjärjestelmän merkitys.....	13
2.2 Vertikaalinopeuden merkitys	14
2.3 Vertikaalinopeuden määrittäminen	15
2.3.1 Liikeanalyysi	15
2.3.2 Reaktiivoimasta laskeminen.....	15
2.3.3 Reaktiivoimamittauksen validiteetti.....	16
3 EMF-KALVO	18
3.1 Rakenne.....	18
3.2 Toimintaperiaate	19
3.3 Ominaisuudet	20
3.3.1 Herkkyys	20
3.3.2 Vanhentaminen	21
3.3.3 Kapasitanssi	22

3.3.4 Voimalineaarisuus.....	23
4 EMF JA VOIMAN MITTAUS.....	24
4.1 Sähköinen sijaiskytkentä.....	24
4.2 Mittausvahvistimet.....	25
4.3 Taajuusvaste.....	25
4.4 Siirtofunktion määrittäminen DSP:n avulla.....	26
5 TUTKIMUKSEN TARKOITUS.....	28
6 TUTKIMUSMENETELMÄT.....	29
6.1 Koeasetelma ja koehenkilöt.....	29
6.2 Mittausmenetelmät.....	29
6.2.1 Voimamittaus.....	29
6.2.2 Videokuvaus.....	31
6.3 Analyysimenetelmät.....	32
6.3.1 Siirtofunktio ja signaalin korjaaminen.....	32
6.3.3 Liikeanalyysi.....	34
6.4 Tilastolliset menetelmät.....	34
7 TULOKSET.....	35
7.1 Vertikaaliset lähtönopeudet.....	35
7.2 Liikeanalyysin nopeusmuuttujat.....	37
7.3 Painopisteen kulmat.....	40
7.4 Voima-aikakäyrät.....	41
7.5 Huippuvoimat.....	44
7.6 Kontakti-ajat.....	44
8 POHDINTA.....	46
8.1 Päätulokset.....	46
8.2 Virheanalyysi.....	47
8.3 Valmennuksellinen merkitys.....	49
8.3 Kehitysideoita.....	50

8.4 Yhteenveto	51
9 LÄHTEET	52
10 LIITTEET	55
LIITE 1. Laudan tekniset mitat	55
LIITE 2. Liikeanalyysin nopeuskuvaajat	56
LIITE 3. EMF-kalvolla mitatut voima-aikakäyrät	63

JOHDANTO

Elektromekaaninen kalvo (Electromechanical film; EMF) on ohut ja joustava elektreettimuovikalvo. Se on kehitetty ja patentoitu Suomessa 1980-luvun lopulla. EMF-kalvon erityispiirteinä on kuplarakenteisuus ja sitä kautta tuleva suuri herkkyys. Kalvoa voidaan käyttää dynaamisen voiman mittaamiseen.

Voimistelun hyppy on yksi kuudesta miesten telinevoimistelun lajista. Hyppylaudalta irtoamisen jälkeen voimistelijalla on tietty vertikaali-, horisontaali- ja kulmanopeus. Nämä nopeudet ovat ratkaisevia hypyn onnistumisen kannalta, koska hyppypöydällä nopeuksiin ei pystytä enää merkittävästi vaikuttamaan.

Voimistelun hyppypöytä muuttui vuonna 2001 leveämmäksi. Tämä muutos toi hyppyihin lisää näyttävyttä ja teknisyyttä. Nykyään korkean lähtöpisteen hyppyissä pitää olla useita kierteitä ja/tai voltteja. Tämän takia vertikaalisen lähtönopeuden merkitys on korostunut.

Lähtönopeus voidaan määrittää liikeanalyysillä, mutta se ei ole käytännöllinen tapa valmennusta ajatellen. Analyysi on hidas ja kuvaus pitää tehdä suurnopeuskameralla. EMF-kalvon ohuuden ja elastisuuden ansiosta kalvo voidaan asentaa hyppylaudan kannen päälle. Kalvolla voidaan mitata hyppääjän tuottama vertikaalinen voima-aikakäyrä. Käyrästä laskemalla voidaan määrittää vertikaalinen lähtönopeus.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää EMF-kalvon ominaisuuksia ja rakentaa hyppylaudan voimamittaus EMF-kalvolla. Tutkimusongelmana oli selvittää kuinka hyvin voimamittauksella määritetty vertikaalinen lähtönopeus korreloi liikeanalyysistä saatuun tulokseen.

1 VOIMISTELUN HYPY

1.1 Lajikuvaus

Hypy on yksi kuudesta miesten telinevoimistelun lajista. Se kuuluu joukkuekilpailuun, henkilökohtaiseen 6-otteluun sekä telinekohtaiseen kilpailuun. Jokaisella hypyllä on oma arvonsa vaikeusasteen mukaisesti. Tämä myös rajaa hypystä saatavan maksimipistemäärän. Suorituksen tulee esittää teknistä virheettömyyttä ja tehokasta ylös- ja eteenpäin menevää liikettä. Hypyn tulee sisältää yksi tai useampi pyörähdys kierteellä tai ilman ja päättyä hallittuun alastuloon määrätyle alueille. Voimistelijan täytyy hypätä kaksi erilaista hypyä, joista lasketaan keskiarvo lopulliseen tulokseen. (FIG 2001a.)

Hypyt voidaan jakaa karkeasti kahteen tyyppiin, eteenpäin tai taaksepäin lähteviin hypyihin. Tyyppin ratkaisee se, mihin suuntaan selkä osoittaa lautakontaktin lopuksi. Taaksepäin lähtevissä selkä osoittaa menosuuntaan. Miltei kaikki eri hypyt ovat saaneet nimensä urheilijan mukaan, joka on sen ensimmäisenä pystynyt suorittamaan.

Hypyn välineet ovat hyppylauta, hypypöytä ja 25 m:n vauhdinottorata. Hyppylaudan tehtävänä on varastoida törmäysvaiheessa hypääjän liike-energiaa ja luovuttaa se välittömästi takaisin vertikaaliseksi impulssiksi. Laudan ulkoiset mitat ovat 120 cm (pituus), 60 cm (leveys) ja 20 cm (korkeus). Pehmusteen paksuus on 2 cm. (FIG 2001b.)

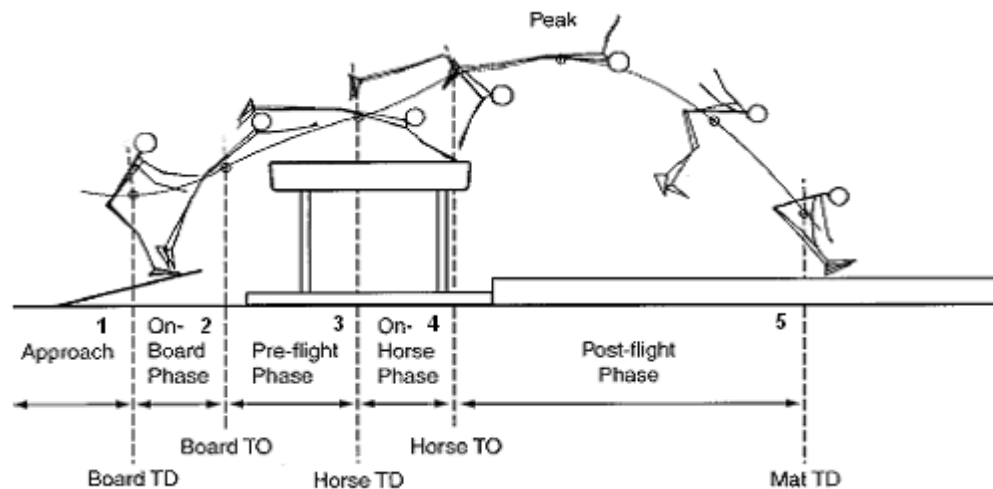
Hyppylaudan varsinaiset jousielementit ovat karkaistuja kierrejousia, mutta myös hyppylaudan kansi ja laudan jalat toimivat joustavina elementteinä. Laudan elastisuus pitää olla voimakkainta 75 – 95 cm kohdalla laudan etureunasta mitattuna. Elastisuuden pitää olla tasaisesti jakautunut laudan leveysuunnassa. Tämä saavutetaan käyttämällä useaa rinnakkaista joustaa. Säännöissä ei ole mitään raja-arvoja laudan elastisista ominaisuuksista. Käytännössä hienosäätö tapahtuu kierrejousilla, jotka voidaan nopeasti irrottaa ja kiinnittää. Sääntöjen mukaiset tekniset mitat ovat liitteessä 1. (FIG 2001b.)

Hypypöytä muuttui vuonna 2001. Siihen saakka telineenä oli pitkittäinen pukki, joka korvattiin satulamaisella leveämmällä hypypöydällä. Uuden pöydän ansiosta ilmaantui

uusia näyttäviä hyppyjä, joissa käsikosketus voi tapahtua eriaikaisesti telineeseen. Hypypöydän korkeus miehillä on 1,35 m. (FIG 2001b.)

1.2 Hypyn vaiheet

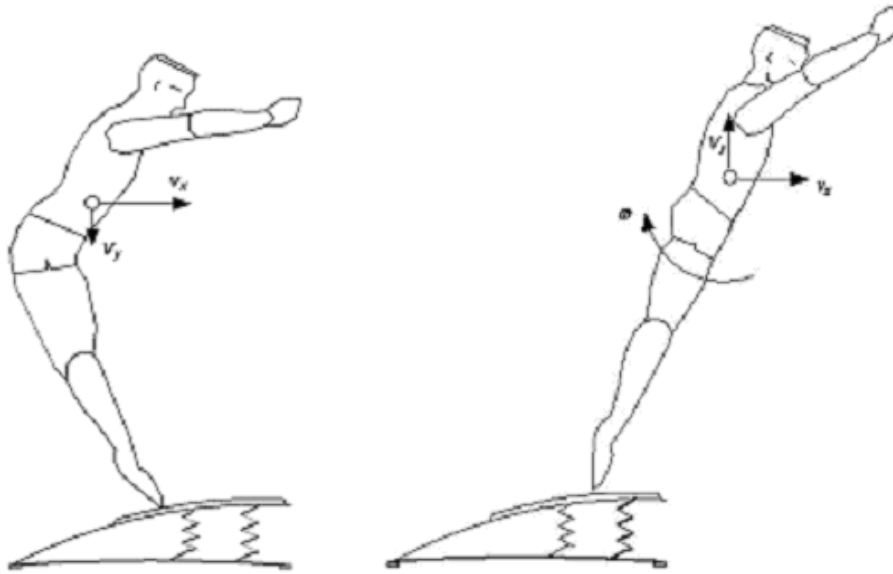
Hypystä voidaan erottaa seuraavat vaiheet: 1) lähestyminen, 2) lautakontakti, 3) esilento-
vaihe, 4) hypypöytäkontakti ja 5) loppulentovaihe (kuva 1).



KUVA 1. Hypyn eri vaiheet (Takei 2000).

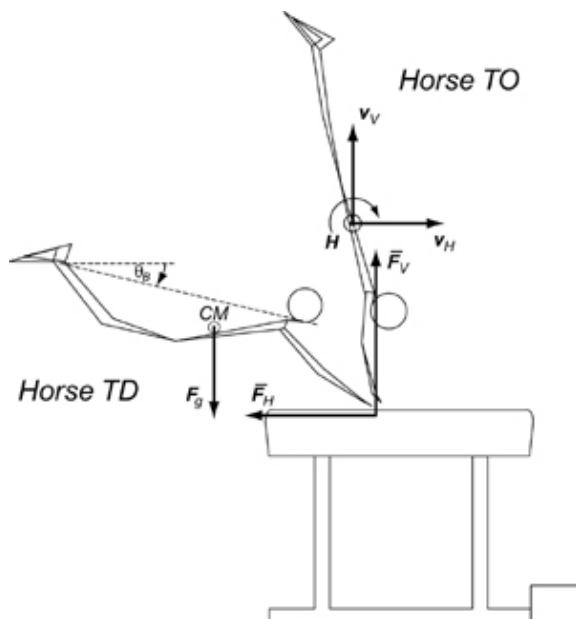
Lähestymisvaihe. Lähestymisvaiheen aikana hyppääjä pyrkii saavuttamaan mahdollisimman suuren horisontaalisen nopeuden. Miesten maksiminopeudet ovat noin 8 - 9 m/s. (Krug ym. 1998.). Vauhdinjuoksun lopuksi eteenpäin menevissä hypyissä hyppääjä tekee yhdenjalan ponnistushypyn laudalle. Taaksepäin lähtevissä hypyissä hyppääjä tekee ennen laudalle tuloa ns. arabialaisen käsien kautta ja päätyy laudalle selkä menosuuntaan.

Lautakontakti. Kontaktivaiheen alussa hyppääjällä on negatiivinen vertikaalinopeus ja alkuvaiheessa lauta painuu kasaan (kuva 2). Kontaktivaiheen loppupuolella lauta alkaa työntämään hyppääjää ylöspäin. Ylöstyöntävä voima aiheuttaa sekä vertikaalisen, että kulmakiihtyvyyden hyppääjään (kuva 2). Kulmakiihtyvyyden suuruus riippuu ajoituksesta. Mitä edempänä painopiste on tukipistettä työntövaiheen lopussa, sitä suuremmaksi tulee kulmakiihtyvyys (Dainis 1981).



KUVA 2. Tulo- ja lähtönopeudet ja niiden suunnat (Dainis 1981).

Hyppypöytäkontakti. Koko hyppypöytävaiheen aikana hyppääjän painopiste pysyy tukipisteen taka- ja yläpuolella (kuva 3). Kontaktin alussa törmäys aiheuttaa horisontaalinopeuden vähenemisen ja kulmanopeuden suurenemisen. Kun hyppääjän asento siirtyy pystymmäksi, käsityöntö lisää vertikaalista nopeutta. Työntö aiheuttaa samalla kulmanopeuden vähenemisen. Kontaktin jälkeen hyppääjällä on suurempi vertikaalinopeus ja pienempi horisontaali- ja kulmanopeus kuin ennen kontaktia. (Takei & Blucker 2003.)



KUVA 3. Nopeudet, voimakomponentit ja painopisteen paikka hyppypöytäkontaktin aikana (Takei & Blucker 2003).

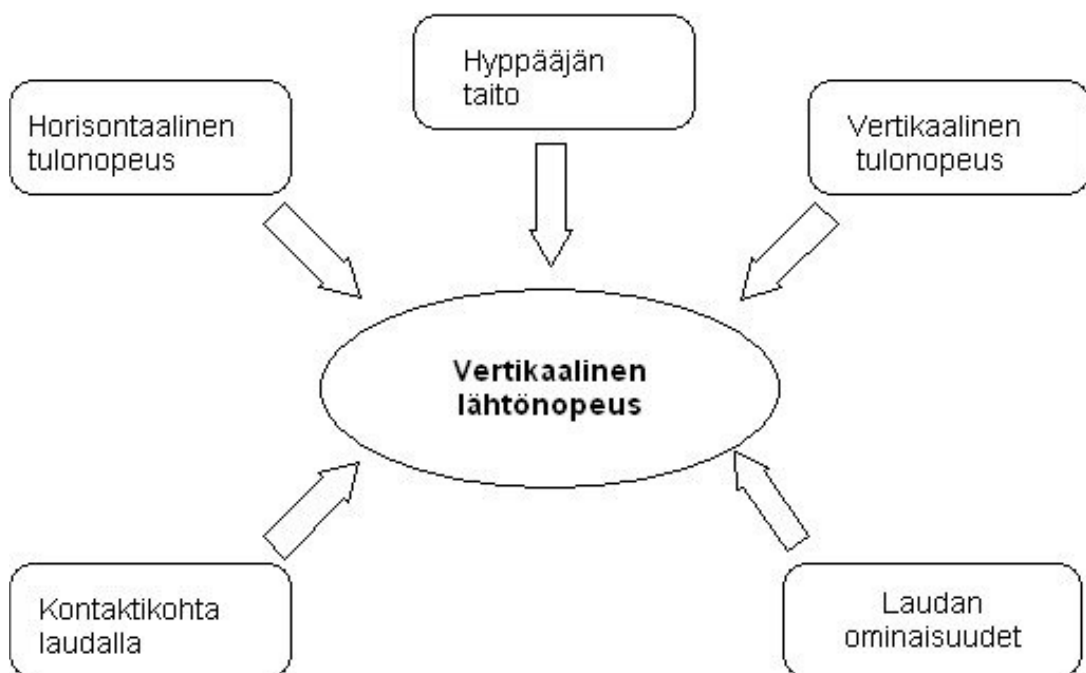
Esilentovaihe. Vaiheen aikana ulkopuolisia voimia ei vaikuta hyppääjään. Laudan lähtönopeudet (v_x , v_y) laudalta määräävät painopisteen lentoradan ja esilentovaiheen keston. Kulmanopeuteen hyppääjä pystyy vaikuttamaan vartalon asentoa muuttamalla. Kuitenkin Takein ja Bluckerin (2003) tutkimuksen mukaan korkean pistemäärän ja matalan pistemäärän Roche hyppyissä ei ollut merkittäviä eroja painopisteiden lentoradoissa. Erojen löytymättömyyden syy saattoi olla myös mittaustekninen. Esilentovaihe oli lyhyt ja nopea, jota liikeanalyysi ei pystynyt erottelemaan.

Loppulentovaihe. Loppulentovaiheen liikerata on ratkaiseva hypystä saatavien pisteiden kannalta. Suuri horisontaalinen nopeus ennakoii pitkää lentoaikaa ja hypystä tulee pitkä. Suuri vertikaalinen lähtönopeus korreloi korkeaan lentorataan (Dainis 1981.). Korkean pistemäärän hyppyissä lentorata on korkeampi ja lentoaika pitempi, joka mahdollistaa puhtaiden volttien ja kierteiden suorittamisen (Takei ym. 1996).

2 VERTIKAALINEN LÄHTÖNOPEUS

2.1 Osatekijät

Vertikaalisella lähtönopeudella tarkoitetaan hyppääjän painopisteen vertikaalista nopeutta hetkellä, jolloin kontakti hyppylautaan loppuu (Dainis 1981). Nopeuteen vaikuttavat tekijät on koottu kuvaan 4.



KUVA 4. Vertikaaliseen lähtönopeuteen vaikuttavat tekijät (Takei & Blucker 2003; Sands & Cheetham 1986; Sandsin & McNealin 1995; Sands 1999).

2.1.1 Horisontaalinen tulo nopeus

Horisontaalisen tulo nopeuden merkityksestä on ristiriitaisia tutkimustuloksia. Sands ja Cheetham (1986) osoittivat tutkimuksessaan korrelaation hypyistä saatujen pisteiden ja horisontaalisen juoksunopeuksien välillä juniorinaisvoimistelijoilla. Sandsin ja McNealin (1995) tutkimuksen mukaan korrelaatiota taas ei ole. Myöskään Sandsin (1999) mukaan suuri horisontaalinen lähestymisnopeus ei selitä yksinään pisteitä.

2.1.2 Vertikaalinen tulonopeus

Vertikaalinen tulonopeus laudalle on negatiivinen, koska hyppääjä on putoamisliikkeessä alaspäin laudalle tullessa. Kun hyppääjä vauhdinjuoksun loppuun hyppää, niin painopiste tekee paraabelin-muotoisen lentoradan. Lentoradan korkein piste määrää vertikaalisen tulonopeuden suuruuden laudalla (Young & Freedman, 2000).

Mitä suurempi on kehon vertikaalinen tulonopeus, sitä suurempi on sen liike-energia. Laudan tehtävänä on varastoida liike-energia laudan jousiin. Koska laudan joustosuunta on lähes vertikaalinen, liike-energian muuntaminen tapahtuu suurella hyötysuhteella ilman ylimääräistä lihastyötä (Young & Freedman, 2000). Vertikaalisen tulonopeuden merkitys on kuitenkin pieni, koska siinä ei ole suuria eroja hyppääjien välillä (Takei, 1990).

2.1.3 Hyppääjän taito

Takei ja Blucker (2003) tutkivat liikeanalyysillä vuoden 2000 olympiakisojen 16 parasta ja 16 huonointa Roche hyppyä. Kahden ryhmän välillä ei ollut eroa horisontaali- ja vertikaalinopeuksissa laudalle tulovaiheessa. Lautavaiheen aikana parempi ryhmä pystyi tuottamaan suuremman vertikaalisen voiman (11.8 %), suuremman vertikaalisen nopeuden kasvun (6.2 %) ja suuremman vertikaalisen lähtönopeuden (3.2 %). Lisäksi paremmalla ryhmällä oli lyhyempi (9.1 %) kontaktiaika. Horisontaalinen lähtönopeus ja kulmanopeus olivat molemmilla ryhmillä samat.

Hyppääjän taitona voidaan pitää kykyä muuntaa horisontaalista nopeutta vertikaaliseksi. Sandsin (2000) mukaan absoluuttisesti suuri horisontaalinen lähestymisnopeus ei ole merkittävä tekijä, vaan ilmeisesti kysymys on nopeudesta, jonka hyppääjä pystyy hallitsemaan. Kontaktivaiheen aikana hyppääjän pitää pystyä muuttamaan osa horisontaalinopeudesta vertikaaliseksi, mutta myös säilyttämään riittävä horisontaalinopeus. Pelkästään suuri lähestymisnopeus ei siis riitä, jos voimistelija ei pysty hallitsemaan sitä laudan kontaktivaiheessa. Hypyssä tarvitaan kuitenkin riittävä horisontaalinopeus, jotta hyppyyn saadaan tarvittava törmäysimpulssi, tarpeeksi pituutta ja riittävä rotaatio (Sandsin & McNealin, 1995).

2.1.4 Kontaktikohta laudalla

Laudan kontaktikohdan merkitys on myös merkittävä. Mikäli hyppy tulee laudalle taakse eli kauaksi hyppypöydästä, niin laudan jousienergiaa ei saada hyödynnettyä täydellisesti. Lauta menee pohjaan ja hyppääjä joutuu vaimentamaan liike-energian muuttosta kehollaan. Paikka laudalla vaikuttaa myös esilentovaiheen keston. Pitkän alkulennon aikana nopeus vähenee, millä on suuri vaikutus hypyn pituuteen hyppypöydältä irtoamisen jälkeen. Horisontaalinopeuden hidastuminen 7 %:lla aiheuttaa 13 % lyhemmän, ja vastaavan suuruinen pystynopeuden pudotus 25 % lyhemmän loppulennon (Dainis 1981).

2.1.5 Laudan ominaisuudet

Joustava lauta aiheuttaa suuremman vertikaalisen liikkeen ja pitemmän kontaktiajan kuin jäykempi lauta. Vertikaalinen impulssi tulee suuremmaksi ja aiheuttaa suuremman vertikaalisen lähtönopeuden. Kuitenkin pitkä kontaktiaika aiheuttaa suuremman häviön horisontaalisessa nopeudessa. Hyppääjän painopiste ehtii myös liikkua kontaktivaiheen aikana kohti hyppypöytää ja aiheuttaa suuremman kulmakiiktyvyyden hyppääjään. Hyppääjälle sopivan laudan jäykkyys riippuu hyppääjän massasta ja ojentajalihasten (lantio, polvi ja nilkka) lihasvoimasta. (Takei & Blucker, 2003.)

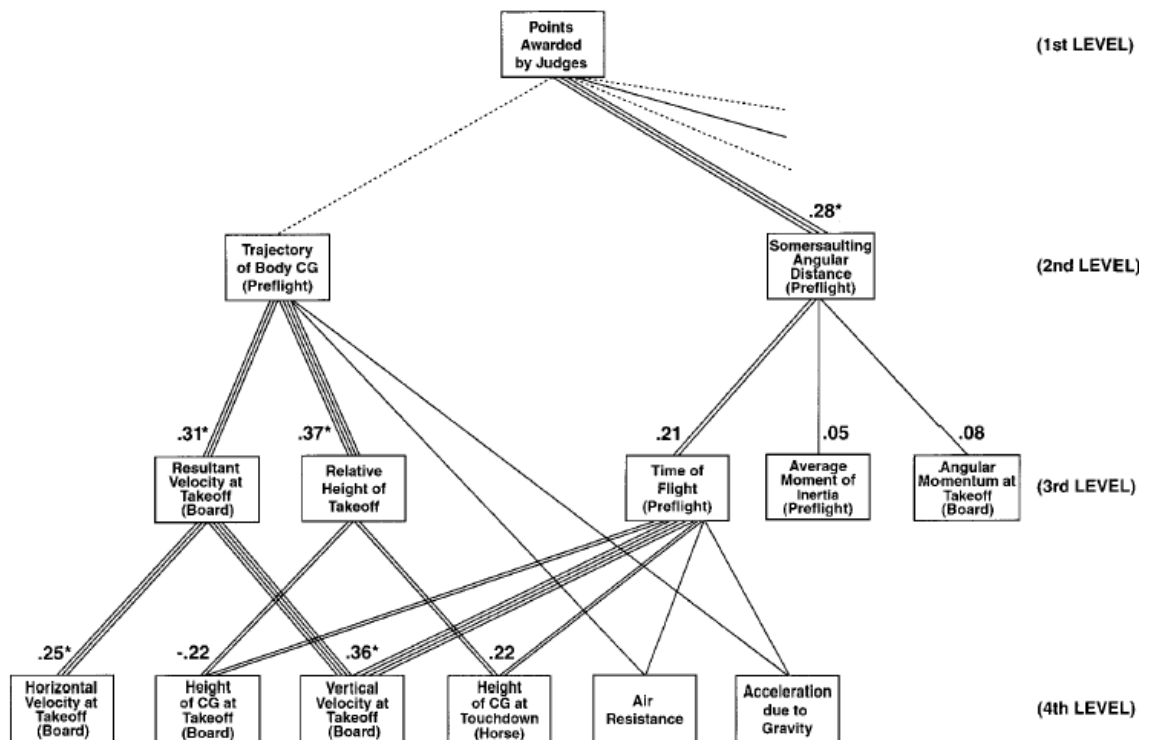
2.1.5 Hermolihasjärjestelmän merkitys

Hypyn lautavaiheessa tärkeimmät lihakset ovat lantion, polven ja nilkan ojentajalihakset. Törmäysvaiheessa lihaksilta vaaditaan suurta eksentristä voimaa, jotta lautaan kohdistuva impulssi tulisi mahdollisimman suureksi. Välittömästi törmäyksen jälkeen lihasten pitää supistua mahdollisimman nopeasti, mutta synkronoidusti. Voima, supistumisnopeus ja ajoitus ratkaisevat kuinka hyvin hyppääjä pystyy tuottamaan vertikaalista nopeutta mahdollisimman vähäisellä horisontaalinopeuden menetyksellä. (Takei & Blucker, 2003.) Tärkeimmät hypyssä tarvittavat lantion ojentajalihakset ovat m. gluteus maximus, m. semimembranosus, m. semitendinosus ja m. biceps femoris. Polven tärkeimmät ojentajalihakset ovat m. vastus medialis, m. vastus intermedius, m.

vastus lateralis ja m. rectus femoris. Nilkan ojentajalihakset ovat m. gastrocnemius, m. soleus, m. plantaris, m. tibialis posterior, m. peroneus longus, m. peroneus brevis, m. flexor hallucis longus ja m. flexor digitorum longus (Takei & Blucker, 2003.)

2.2 Vertikaalisen lähtönopeuden merkitys

Takei ym. (2000) vertasivat tutkimuksessaan hyppytekniikan 18 muuttujan ja tuomaripisteiden välistä riippuvuutta vuoden 1995 MM-kisoissa. Tällöin käytössä oli vielä vanhamallinen hyppypöytä ja hyppynä oli Hechtin hyppy. Tilastollisesti merkittävimmäksi perustekijäksi tuli vertikaalinen lähtönopeus laudalta. Kuvassa 5 on esitetty eri muuttujien korrelaatioita tuomaripisteisiin.



KUVA 5. Eri muuttujien korrelaatiot tuomaripisteisiin (Takei ym 2000). Muuttujan vieressä oleva luku on Pearsonin korrelaatiokertoimen neliö (r^2).

Dainis (1981) matemaattinen malli pohjautuu samassa tutkimuksessa tehtyyn liikeanalyysiin. Kun hyppääjä irtoaa laudalta, on hyppääjällä tietty rotaatio-, vertikaali- ja horisontaalinopeus. Mallin ja mekaniikan lakien mukaan nämä nopeudet alkavat hidastua

välittömästi ilmalennon alettua. Hyppypöydän kontaktin aikana nopeuksia ei pystytä merkittävästi kasvattamaan (Bruggemann 1984). Siksi liiketilat laudalla (horisontaali-, vertikaali- ja kulmanopeus) ovat hyppääjälle ratkaisevia loppuhypyn suhteen (Bajin 1979).

2.3 Vertikaalisen lähtönopeuden määrittäminen

2.3.1 Liikkeenanalyysi

Kehon liikenopeuden määrittäminen liikkeenanalyysillä tapahtuu tarkimmin kehon painopisteestä (Miller & Nelson 1973, Davies & Rennie. 1968). Painopisteen paikka voidaan määrittää segmentoimalla keho osiin ja summaamalla jokaisen segmentin vaikutus painopisteeseen. Kehon eri segmenttien painopisteiden paikka voidaan hakea valmiista mallista (Dempster 1955).

Nopeuksien määrittäminen tapahtuu laskemalla painopisteen matkakäyrän derivaatta. Matkakäyrä on kulmikas, johtuen kuvausteknisistä virheistä. Käyrän riittävä suodattaminen on suoritettava ennen derivaatan laskemista. 2D analyysissä x- ja y-nopeudet saadaan matkakäyrän x- ja y-koordinaattien muutosnopeudesta (Nigg & Herzog 1995).

2.3.2 Reaktivoimasta laskeminen

Vertikaalinen lähtönopeus voidaan johtaa Newtonin II:n ja III:n lain perusteella. Vertikaalinen voima F_z koostuu kolmesta eri voimasta. Massan lineaarinen kiihtyvyyden komponentti (ma), maan painovoiman vaikutus (mg) ja massakappaleen rotaatiokiihtyvyyden komponentti ($J\alpha/r$). (Young & Freedman 2000.)

$$F_z = ma + mg + \frac{J}{r} \alpha \quad (1)$$

$$a = \frac{dv}{dt}, \alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

J on kehon hitausmomentti painopisteen suhteen,

r on painopisteen ja tukipisteen välinen etäisyys,
 a on kiihtyvyys ja α on kulmakihtyvyys.

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} + mg + \frac{J}{r} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

$$dv = \frac{F}{m} \cdot dt - g \cdot dt - \frac{J}{mr} \cdot d\omega \quad (4)$$

$$\int dv = \int \frac{F}{m} dt - \int g \cdot dt - \int \frac{J}{mr} d\omega \quad (5)$$

$$v(t) = \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F \cdot dt - g(t - t_0) - \frac{1}{mr} \int J \cdot d\omega \quad (6)$$

missä t_0 on ajanhetki, kun hyppääjän nopeus on nolla. Nopeus $v(t)$ kertoo nopeuden irtoamishetkeen asti. Viimeinen termi edustaa sitä osaa voimasta, joka menee hyppääjän kulmanopeuden kasvattamiseen. (Young & Freedman 2000.) Lähtönopeus voidaan siis laskea, mikäli tunnetaan voima-aikakäyrä, hyppääjän massa m , ajanhetki t_0 , hyppääjän hitausmomentti ja kulmanopeus.

2.3.3 Reaktiovoimamenetelmän validiteetti

Lamb ja Stothart (1978) tutkivat reaktiovoimasta lasketun vertikaalisen nopeuden ja liikeanalyysin painopisteen välistä korrelaatiota. Tutkimuksessa suoritettiin staattisia hyppyjä (SJ) voimalevyn päällä. Tulokset ovat taulukossa 1. FTVEL on liikeanalyysistä saatu tulos (m/s) ja PTVEL on reaktiovoimasta laskettu lähtönopeus (m/s).

TAULUKKO 1. t-testi ja pearson korrelaatio (n=25) (Lamb & Stothart 1978).

	Mean	Std. dev:	Std. error	Diff. B.M	Std. dev.	Std. error	corr.	t value
FTVEL	2,9988	0,234	0,047					
				0,0587	0,082	0,016	0,938	3,57
PTVEL	2,9401	0,206	0,041					

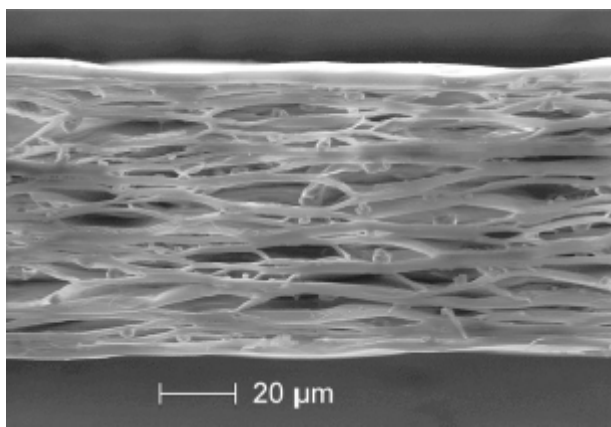
Tulos osoittaa korkeaa positiivista korrelaatiota ($r = 0.94$, merkitsevyysraja $p < .00001$, $r^2 = 0.88$). Pieni virhe nopeuksien keskiarvossa ei vähennä menetelmän validiteettia. Pieni virhe voidaan selittää systemaattisena virheenä, joka voi olla peräisin synkronointivirheestä liikeanalyysin ja voimakäyrän välillä. Tutkimus osoitti, että reaktiivoimasta laskettu lähtönopeus on tarkka menetelmä määriteltäessä painopisteen verikaalista nopeutta staattisissa hypyissä.

Virmavirta ym. (1995) mittasi tutkimuksessaan staattisia-(SJ), kevennys-(CMJ) ja pudotus(DJ) hyppyjä. Staattisen hypyn tapauksessa voimamenetelmä on erittäin luotettava. Myös CMJ ja DJ hypyissä menetelmä on luotettava, mikäli työntövaiheen alkamiskohta voidaan määrittää tarkasti. Voimamittaus on menetelmänä luotettava, mutta ongelmana on työntövaiheen alkamiskohdan määrittäminen (Virmavirta ym.1995).

3 EMF-KALVO

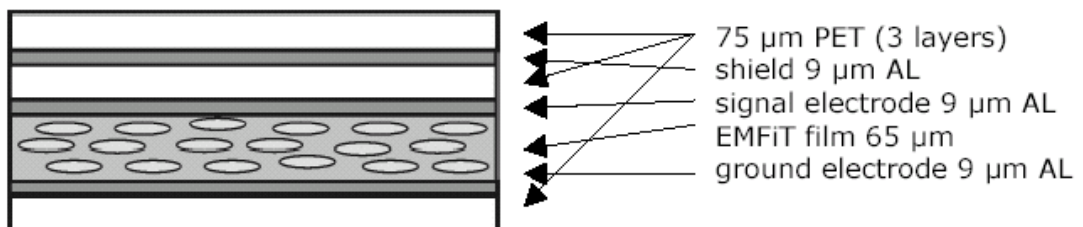
3.1 Rakenne

Elektromeekaaninen kalvo (Electromechanical film; EMF) on ohut (n. 70 μm), biaksiaalisesti orientoitu, kuplarakenteinen, sähköä johtavilla kerroksilla päällystetty elastinen elektreettimuovikalvo (Kuva 6).



KUVA 6. SEM kuva EMF-kalvosta (Paajanen ym. 2000).

Kalvon perusmateriaalina on polypropyleeni (PP). Sähköä johtavat kerrokset ovat alumiinia. Valmistusprosessin aikana kalvoon injektoidaan varaukset erittäin voimakkaan sähkökentän avulla koronapurkauslaitteella. Koska perusmateriaali on erittäin hyvä eriste, jää varaukset loukkuun kalvon sisälle. Todellisessa anturissa on lisäksi yksi ylimääräinen häiriösuojakerros (kuva 7).



KUVA 7. EMFiT[®] L-tyypin kalvon rakenne (Emfitech Oy 2003)

3.2 Toimintaperiaate

EMF-kalvon toiminta sensorina perustuu sähköinfluenssiin. Sähkövaraus synnyttää ympärilleen sähkökentän. Sähkökentän voimakkuus E (V/m) määritellään kentän positiiviseen varaukseen Q kohdistaman voiman F ja varauksen Q suhteena. Kahden varauksen välisen voiman F määrittelee Columbin laki (7). (Nilsson & Riedel 2000.)

$$F = \frac{k}{\epsilon_r} * \frac{Q_1 * Q_2}{r^2} \quad (7)$$

missä kerroin,

$$k = 8.988 * 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \text{ ja}$$

ϵ_r = väliaineen suhteellinen permittiivisyys

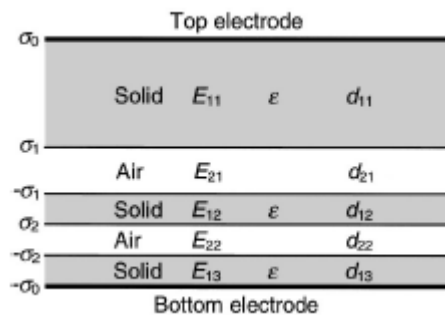
EMF-kalvoon syntyy muodonmuutos ulkoisen voiman vaikutuksesta. Samalla kalvon sisällä olevassa varausjakaumassa tapahtuu muutos, joka muuttaa samalla ulkoista sähkökenttää. Ulkoinen sähkökenttä aiheuttaa kalvon pinnalla oleviin metallielektrodeiden varauksiin Coulumbin lain mukaisen voimavaikutuksen. Elektrodeihin näin syntyvä varausjakauma aiheuttaa metallipintaan sisäisen sähkökentän. Kentän voimakkuus kasvaa arvoon, missä sisäinen kenttä kumoaa ulkoisen kentän vaikutuksen. Elektrodien välille syntyy varausjakaumaero, joka voidaan havaita jännite- tai varausmäärämittauksella. (Nilsson & Riedel 2000.)

Ilmiö toimii myös toisinpäin. Metallielektrodeihin tuotu ulkopuolinen jännite aiheuttaa sähkökentän kalvoon ja kalvossa oleviin varauksiin. Varauksiin kohdistuvan voimavaikutuksen takia kalvoon syntyy dimensiomuutos. Koska kalvon rakenne on solukkomainen ja elastinen kalvon pinnan normaalin suuntaan, dimensiomuutos tapahtuu käytännössä ainoastaan tähän suuntaan. (Nilsson & Riedel 2000.)

3.3 Ominaisuudet

3.3.1 Herkkyys

Kalvon varausmuutoksen ja voiman välinen lauseke voidaan johtaa mallintamalla kalvo useaksi päällekkäin olevaksi kerrokseksi, jossa vuorottelee perusmateriaali ja ilma (kuva 8).



KUVA 8. Kalvon yksinkertaistettu malli (Hillenbrand & Sessler 1999).

Sähkökenttä ylimmän kerroksen rajapinnassa voidaan laskea Gaussin lain perusteella.

$$-\varepsilon E_{11} + E_{21} = \sigma_1 / \varepsilon_0 \quad (8)$$

Samalla tavalla voidaan laskea myös kaikki muut kerrokset. Tehdään oletus, että voiman aiheuttama muodonmuutos vaikuttaa ainoastaan ilmakerrosten paksuuteen, saadaan johtamalla lopuksi (Hillenbrand & Sessler 1999).

$$t_u = \frac{\Delta\sigma_0}{p} = \frac{\varepsilon d}{Y} \frac{d_1 \sum d_{2i} \sigma_i}{d_2 (d_1 + \varepsilon d_2)^2} \quad (9)$$

Missä t_u on herkkyysarvo, $\Delta\sigma_0$ on vaurausjakauman muutos, Y on Youngin modulus ja p on paine.

Herkkyysarvo ilmoitetaan yksikkönä pC/N. C (Coulumbi) on sähköisen varauksen yksikkö ja se on aina 1 elektronin varauksen monikerta ($e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C). EMF-kalvon

paksuus vaikuttaa voimakkaimmin herkkyyсарvoon. Paksu kalvo on joustavampi ja sen Youngin modulus on silloin pienempi. Paajanen ym. (2001) saivat tutkimuksessaan kahdelle eri kalvotyypille seuraavat herkkyyсарvot (taulukko 2).

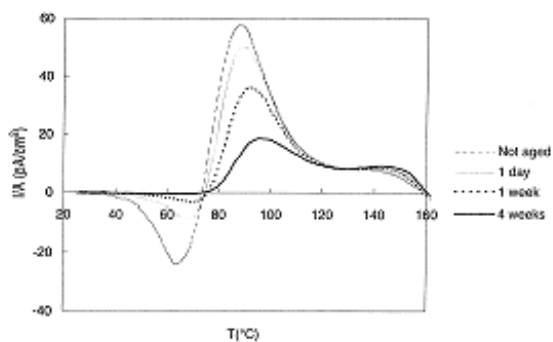
TAULUKKO 2. Kahden erilaisen EMF-kalvon ominaisuuksia (Paajanen ym. 2001).

Tyyppi	Paksuus(μm)	Y(Mpa)	Herkkyyс (pC/N)
O01	37	19	28
HS01	70	1.5	170

Kalvon herkkyyс venytykselle on erittäin pieni, koska kalvo on huomattavan paljon joustavampi kalvon paksuussuunnassa. Käytännössä tästä seuraa, että kalvo mittaa vain kalvon pinnan normaalin suuntaista voimakomponenttia (Paajanen ym. 2001).

3.3.2 Vanhentaminen

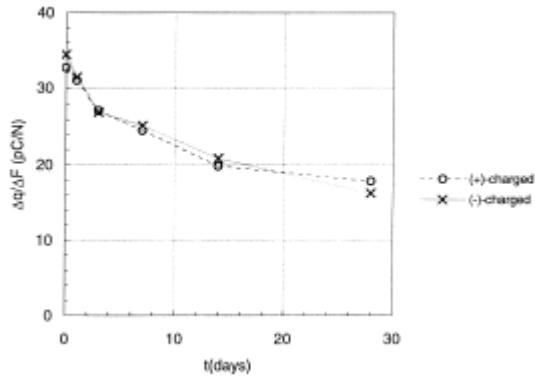
Kalvon ominaisuuteen kuuluu varausten katoaminen ajan kuluessa. Syynä on kalvon eristyskyvyn epäideaalisuus. Varausten karkausnopeus on riippuvainen lämpötilasta. Kuvassa 9 on oikosulku TSC käyriä (TSC = Thermally Stimulated Current), josta näkyy vanhentamisen ja lämpötilan vaikutus.



KUVA 9. Oikosuljetun O01 EMF-kalvon TSC-käyriä, vanhennettu +50 C eri aikaperiodeja (Paajanen ym. 2000).

Varausten karkaaminen on nopeinta vanhentamisen alussa ja stabiloituu vähitellen. Pitkän vanhennusprosessin jälkeen kalvoon jää ainoastaan pysyvät varaukset ja tämän jäl-

keen kalvon stabiilisuus on hyvä jopa vuosiksi eteenpäin. Hintana tästä maksetaan herkkyuden pieneneminen. Lämpötilan ja ajan vaikutus näkyy kuvassa 10.



KUVA 10. Herkkyysmuutos ajan funktiona, $t = 50\text{ C}$ (Paajanen ym. 2000). Katkoviiva kuvaa negatiivisillä varauksilla varatun kalvon muutosta ja yhtenäinen viiva positiivisillä varauksilla varatun kalvon muutosta.

3.3.3 Kapasitanssi

Kalvon yksi merkittävä ominaisuus on sen kondensaattoriominaisuus. Kaksi lähekkäin olevaa johdinpintaa ja välissä oleva eriste muodostavat kondensaattorin. Kondensaattorin kapasitanssin suuruus voidaan määrittää kaavalla (Millman & Grabel 1987).

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 * \frac{A}{d} \quad (10)$$

missä,

ε_r = eristeen suhteellinen permittiivisyys

ε_0 = tyhjiön permittiivisyysvakio (8,85 pF/m)

A = levyn pinta-ala (m^2)

d = levyjen välinen etäisyys (m)

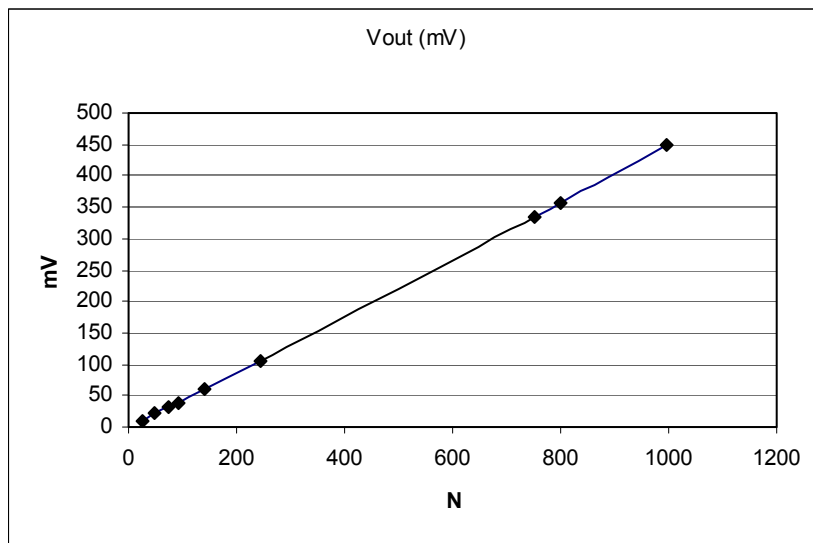
L-tyypin EMFiT[®]-kalvon kapasitanssi on noin 22 pF/cm^2 (Emfitech Oy 2003).

3.3.4 Voimalineaarisuus

Kalvon varausmuutos on suoraan verrannollinen paineeseen (kappale 3.3.1). Herkkyysarvo voidaan olettaa vakioksi niin kauan, kun jousto tapahtuu vain ilmväleissä. Voiman ja varausmuutoksen välinen lauseke voidaan kirjoittaa yksinkertaisempaan muotoon (11).

$$\Delta q = k\Delta F, \quad (11)$$

missä k on kalvon herkkyys (pF/N). Voimalineaarisuudessa on kyse kalvon herkkyiden muutoksista eri voimatasoilla. EmfiTech Oy:n mittausten mukaan kalvon voimalineaarisuuden virhe oli alle 6 % välillä 0-1000 N (kuva 10).

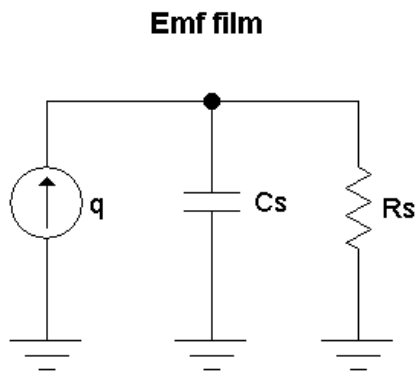


KUVA 10. EMFiT[®]-kalvon voimalineaarisuus (Emfitech Oy 2002).

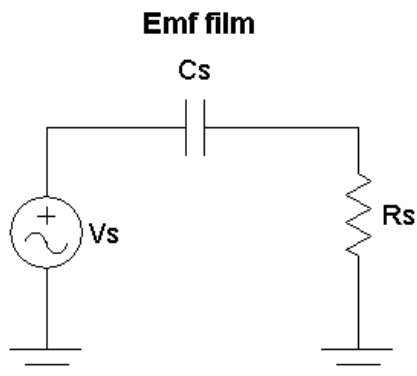
4 EMF JA VOIMAN MITTAUS

4.1 Sähköinen sijaiskytkentä

Kuvassa 11 on esitetty kalvon sähköinen sijaiskytkentä, jossa lähteenä toimii virtalähde. Kun kytkentä korvataan Theveninin ekvivalentilla saadaan kuvan 12 mukainen sijaiskytkentä (Nilsson & Riedel, 2000). EMF-kalvon voi ajatella olevan kondensaattori, jonka sisällä on jännitelähde. Kapasitanssilla C_s on käytännön merkitys mittausvahvistimen ja taajuusvasteen kannalta. Vuotovastuksen R_s merkitys on pieni sen vastusarvon suuruuden vuoksi ($10^{15}\Omega/m^2$).



KUVA 11. EMF-kalvon sähköinen sijaiskytkentä (Emfitech Oy 2002).



KUVA 12. EMF-kalvon sähköinen sijaiskytkentä (Emfitech Oy 2002).

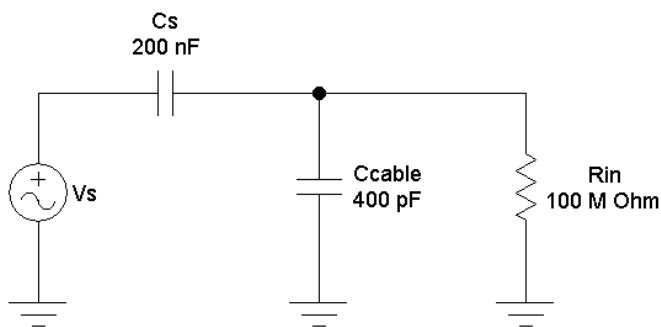
4.2 Mittausvahvistimet

Mittaus voidaan suorittaa varausvahvistimella tai jännitevahvistimella. Varausvahvistimen etuna on tunteettomuus mittauskaapelin kapasitanssin muutoksille. Myös kalvon kapasitanssi ei vaikuta taajuusvasteeseen, vaan vaste määräytyy varausvahvistimen komponenttiarvoista. Toisaalta varausvahvistimen elektroniikka vaatii hyvän suunnittelun ja komponenttien ominaisuudet pitää olla hyvät. Suuret resistanssiarvot, lämpötilan vaihtelut ja vuotovirrat ovat kriittisiä kohtia suunnittelussa. (Horowitz & Hill 1989.)

Jännitevahvistin on ratkaisuna yksinkertaisempi. Ainoa perusvaatimus on suuri sisääntuloimpedanssi. Lisäksi pitää ottaa huomioon kaikki piirin kapasitanssit ja kalvon kapasitanssi vaikuttaa taajuusvasteeseen (Horowitz & Hill 1989). Suurin etu on, että kalvoa voidaan mitata suoraan tiedonkeruujärjestelmän A/D-kanavalla ilman mitään ylimääräistä vahvistinta.

4.3 Taajuusvaste

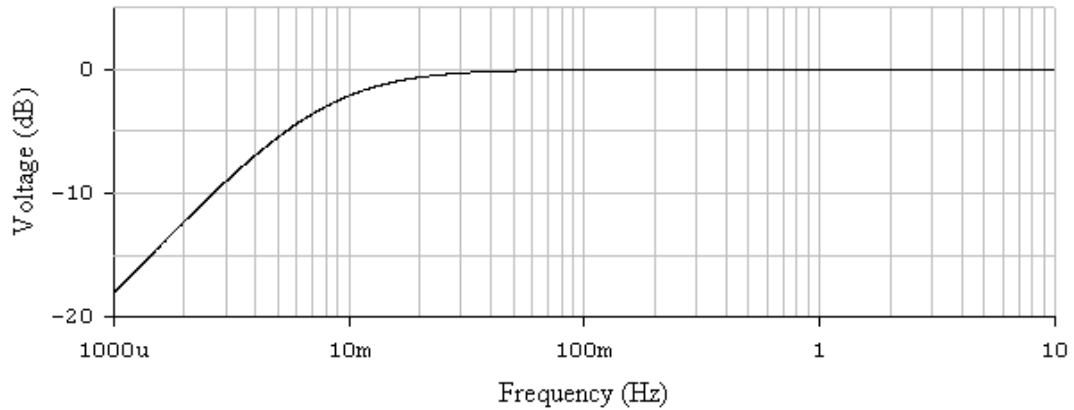
Kuvassa 13 on tyypillinen kytkentä, jossa jännitevahvistimen sisääntuloimpedanssi on 100 M Ω . Kaapelin kapasitanssi on noin 400 pF. EMF-kalvon kapasitanssi on 200 nF.



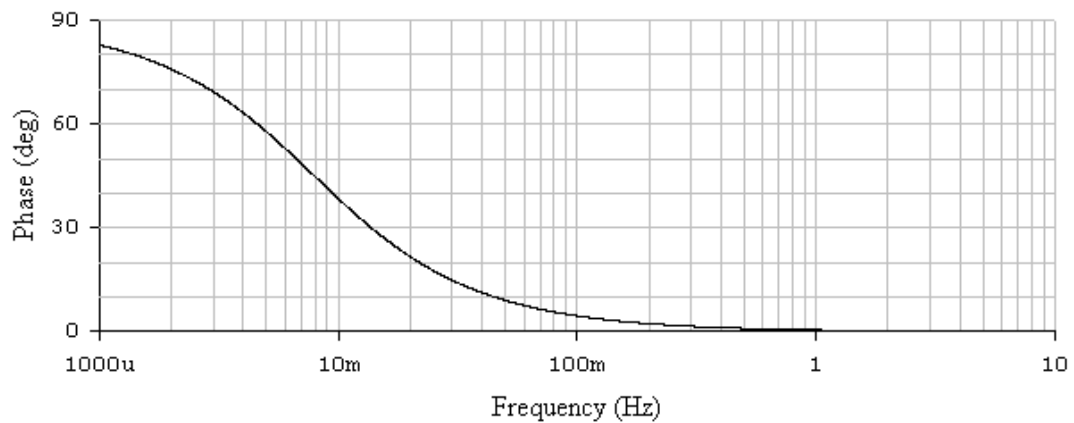
KUVA 13. Tyypillinen mittauskytkentä.

Kun kuvan 13 mukainen kytkentä simuloidaan vastuksen R_{in} yli, nähdään EMF-kalvon ylipäästösuodatinominaisuus (kuva 14 ja kuva 15). Rajataajuutta voidaan siirtää kohti pienempää taajuutta kasvattamalla vastuksen R_{in} arvoa (Horowitz & Hill 1989). Aivan

staattiseen pisteeseen saakka ei ole kuitenkaan mahdollista päästä. *EMF-kalvon käyttö rajoittuu siis vain dynaamisiin mittauksiin.*



KUVA 14. Jännitevahvistus taajuuden funktiona.

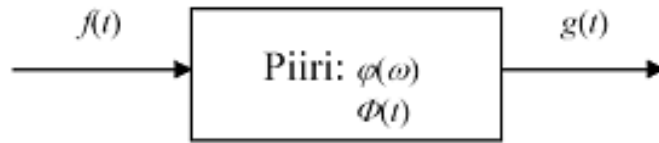


KUVA 15. Vaihe taajuuden funktiona.

4.4 Siirtofunktion määrittäminen DSP:n avulla

Digitaalinen signaalinkäsittely (DSP) tarkoittaa signaalin käsittelyä numeerisesti, matemaattisten algoritmien avulla (Oppenheim & Schaffer 1999). DSP mahdollistaa taajuusvasteen korjaamisen ja määrittämisen ohjelmallisesti, ilman analogiatekniikkaa. Analogiset signaalit pitää ensin digitoida A/D-muuntimella digitaaliseksi. Muodostuneet diskreettijonot ovat peruskomponentteja, kun lähdetään varsinaiseen signaalinkäsittelyyn. (Smith 1999.) Digitaalisen signaalinkäsittelyn peruskäsitteistä tärkein on siirtofunktio.

Siirtofunktio on kompleksifunktio, joka kuvaa järjestelmän sisäänmenon ja ulostulon välisen riippuvuuden taajuuden funktiona (Oppenheim & Schaffer 1999). Tarkastellaan piiriä tai mittalaitetta, jonka otto- ja antosignaali olkoot $f(t)$ ja $g(t)$ (kuva 16).



KUVA 16. Esimerkki piiristä, jossa $f(t)$ on ottosignaali ja $g(t)$ on antosignaali.

Mitta-anturilta saatava signaali $g(t)$ on mitattavan "oikean" signaalin $f(t)$ ja piirin siirtofunktion $\Phi(t)$ konvoluutio (Smith 1999).

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)\Phi(t-\tau)d\tau = f \otimes \Phi \quad (12)$$

Konvoluutio voidaan palauttaa kertolaskuksi ottamalla yhtälöstä puolittain Fourier-muunnokset (Smith 1999).

$$G(\omega) = F\{g(t)\} = F\{f(t) \otimes \Phi(t)\} = F\{f(t)F\{\Phi(t)\}\} = F(\omega)\phi(\omega)$$

josta saadaan,

$$F(\omega) = \frac{G(\omega)}{\phi(\omega)}. \quad (13)$$

Haluttu ottosignaali saadaan ottamalla yhtälöstä käänteinen Fourier-muunnos.

$$F^{-1}\{F(\omega)\} = f(t) = F^{-1}\left\{\frac{G(\omega)}{\phi(\omega)}\right\} \quad (14)$$

Piirin ulostulosta voidaan siis laskea piirin sisäänmeno, mikäli piirin siirtofunktio tunnetaan. Samalla tavoin piirin siirtofunktio voidaan laskea, jos tiedetään piirin sisäänmeno ja ulostulo (Smith 1999).

5 TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli rakentaa EMF-kalvolla voimistelun hyppylaudan voimamittausjärjestelmä. Tutkimusongelmana oli selvittää kuinka tarkasti vertikaalinen lähtönopeus voidaan määrittää voima-aikakäyrästä. Referenssimittauksena käytettiin liikeanalyysiä. Lähtönopeus laudalta on yksinkertainen muuttuja, jota voidaan käyttää myös valmennuksellisesti hyödyksi. Muita tutkimusongelmia olivat voima-aikakäyrän muoto, kontaktiajat ja voima-aikakäyrän muotoon vaikuttavat tekijät.

6 TUTKIMUSMENETELMÄT

6.1 Koeasetelma ja koehenkilöt

Koemittaukset suoritettiin Hipposhallissa 18.07.2003. Tällöin hallissa harjoitteli Suomen, Ruotsin, Englannin ja Latvian maajoukkueet seuraavan päivän maaottelukilpailua varten. Suomelta oli myös mukana 2. joukkue. Hyppypaikalle pystytettiin EMF-kalvolla varustettu hyppylauta ja videokuvauslaitteisto lisävaloineen. Hyppypaikalle tuotiin myös henkilövaaka, jolla voitiin tarkastaa hyppääjän paino.

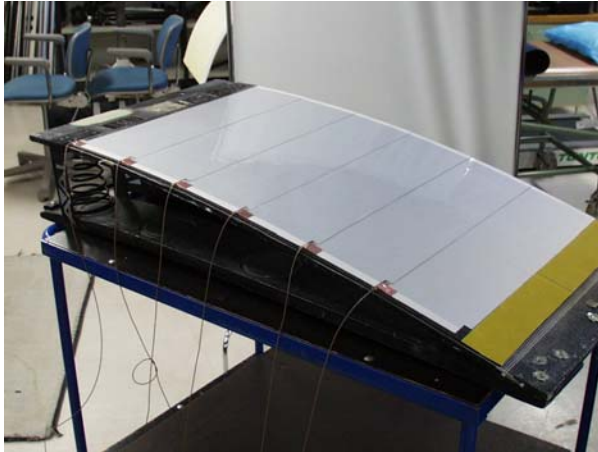
Urheilijat suorittivat hyppyjä omaan tahtiin satunnaisessa järjestyksessä. Hyppyjen joukossa oli sekä matalatehoisia askelmerkkihyppyjä, että täysitehoisia kilpailuhyppyjä. Hyppyjä suoritettiin kyseisen päivän aikana yhteensä 42 kpl, joista kaikista mitattiin voima EMF-kalvolla. Videokuvaus liikeanalyysiä varten suoritettiin 13:sta eri hypystä.

Koehenkilöinä toimi kyseisten maiden parhaat miesvoimistelijat. Joukossa oli yksi olympiavoittaja sekä useita EM- ja MM-tasolla menestyneitä voimistelijoita. Tilastojen valossa Latvian voimistelijat olivat hypyssä kovatasoisimpia.

6.2 Mittausmenetelmät

6.2.1 Voimamittaus

EMF-kalvo jaettiin 6 liuskaan, jotta taipumisen vaikutus saatiin minimoitua (kuva 17). Liuskat liimattiin 3 mm kumimattoon kiinni. Liuskoilla varustettu kumimatto asetettiin hyppylaudalle ja päälle asetettiin vielä toinen 3 mm kumimatto. Näiden päälle asetettiin 20 mm:n vaahtokumipehmuste. Koko paketti sidottiin tiukasti matolla joka kiinnitettiin tarranauhoilla laudan kannen ympärille (kuva 18).



KUVA 17. EMF-kalvot.



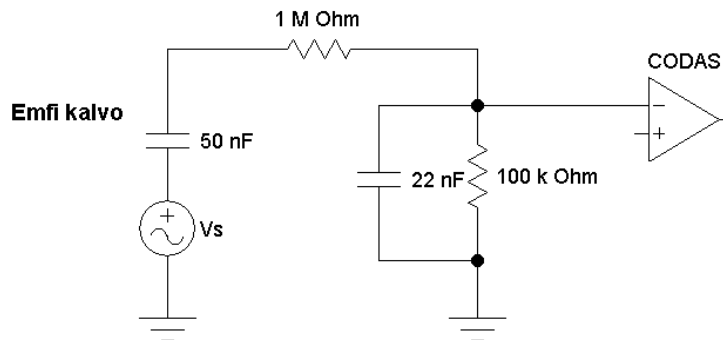
KUVA 18. Hyppylauta mittausvalmiina.

Kalvon signaalit mitattiin CODAS mittausjärjestelmällä (DataQ Instruments Inc., Ohio, USA). CODAS järjestelmän tärkeimmät tekniset ominaisuudet tässä tutkimuksessa on esitetty taulukossa 3. Jokainen liuska muodosti yhden mittauskanavan eli kanavia tuli yhteensä 6 kpl. Näytteenottotaajuus kanavaa kohden asetettiin arvoon 1 kHz.

TAULUKKO 3. CODAS järjestelmän teknisiä arvoja.

Ominaisuus	Arvo
Resoluutio	12 bittiä
Kanavien lukumäärä	16
Sisääntuloimpedanssi	> 100 MΩ
Maksimi jännitealue	+/- 5V
Sisääntulon bias-virta	< 100 nA

EMF-signaalit mitattiin jännitemittauksella. Jokaiselle kanavalle laitettiin kuormaksi 100 k Ω :n vastus, jolla eliminoitiin A/D-muuntimen sisäänmenoimpedanssin vaikutus. Vastus purkaa myös vahvistinasteelta tulevan bias-virran, jolloin se ei pääse varaamaan EMF-kalvon kapasitanssia. Vastuksen rinnalle asetettiin 20 nF:n kondensaattori poistamaan korkeataajuisia signaaleja. Lisäksi oli 1M. Ω :n etuvastus tiputtamassa ulostulojännite CODAS:lle sopivaksi (kuva 19).



KUVA 19. Sähköinen mittauskytkentä.

6.2.2 Videokuvaus

Videokuvaus suoritettiin yhdellä kameralla (taulukko 4), joka asetettiin hyppylaudan kohdalle noin 10 metrin etäisyydelle. Optinen akseli oli kohtisuoraan hypyn suuntaan.

TAULUKKO 4. Kameran ominaisuudet.

Tyyppi	Kuvanopeus (/s)	Suljinnopeus (s)	Resoluutio(pikseliä)
Redlake Imaging Corp.			
MotionScope suurnopeuskamera	500C 125	1/500	480x420

Kuvauspaikalle pystytettiin myös PC-tietokone, jonka kovalevyllä videokuva talletettiin suoraan ilman välitalletusta nauhalle. Ohjelmisto oli kameravalmistajan (Redlake Imaging Corp. USA). Nopeasta suljinnopeudesta johtuen kuvauspaikka valaistiin tehokkailla 3 kW:n halogeenivalaisimilla.

6.3 Analyysimenetelmät

6.3.1 Siirtofunktio ja signaalin korjaaminen

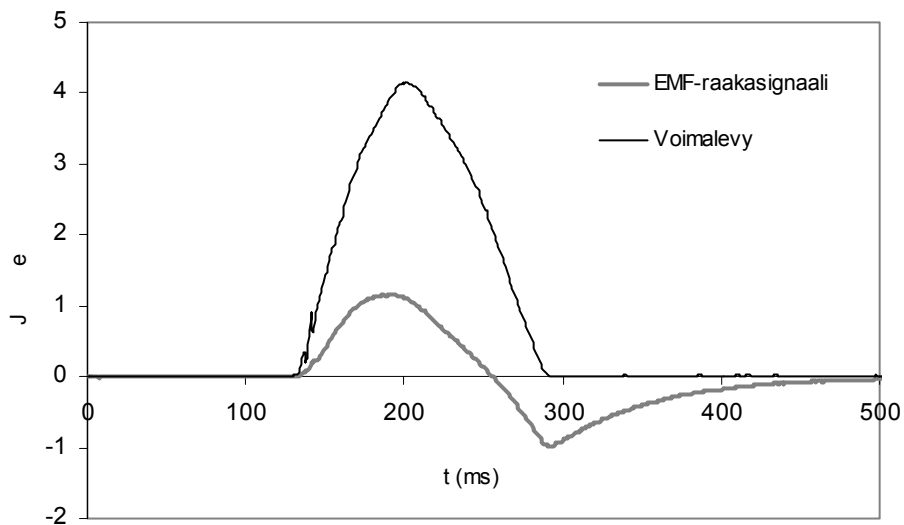
EMF-kalvon ulostulosignaali on ylipäästösuodatettu mittauskytkennän (kuva 19) vuoksi. Jotta saataisiin selville oikea voimakäyrä, pitää signaalin amplitudi- ja vaihevaste korjata. Vasteet voidaan korjata digitaalisesti jälkeenpäin, mikäli kyseisen kytkennän siirtofunktio tunnetaan. Siirtofunktion voi määrittää teoreettisesti simuloimalla kytkennän vasteet. Parempi keino on kuitenkin määrittää todellinen siirtofunktio voimalevyn päällä. Kytkennälle määritettiin siirtofunktio käyttäen referenssinä Kistler 9286A tyyppistä voimalevyä.

Siirtofunktion määrittelyn teoreettinen perusta on selvitetty kappaleessa 4.4. Haluttu alarajataajuus ja käytännön mittaustarkkuus luovat rajan kuinka korkeaksi analoginen rajataajuus voidaan asettaa. Kun A/D-muunnoksen resoluutio on 12 bittiä, niin yksi bitti on 1/4096 osa mittausalueesta. Minimitaajuus voidaan laskea seuraavilla tiedoilla:

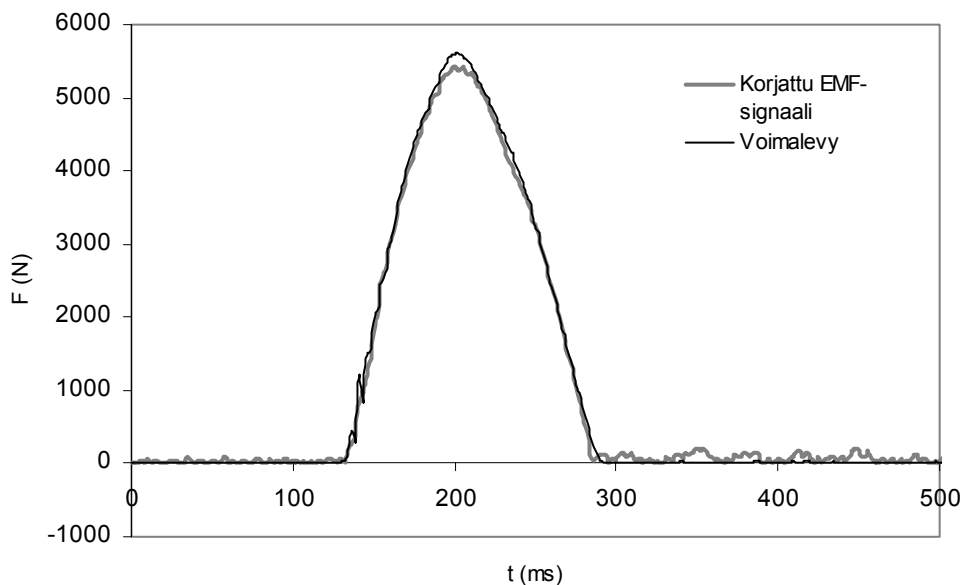
- muunnostarkkuus 12 bittiä, dynamiikka 72 dB
- ylipäästösuodattimen rajataajuus asetettu arvoon 3 Hz
- 1. asteen suodatin, signaali vaimenee estokaistalla 20 dB/dekadi
- pienin taajuus f_s , joka voidaan havaita on:

$$f_s = 3 \text{ Hz} / (72\text{dB} / 20\text{dB}) / 10 = 0.008 \text{ Hz}$$

Käytännössä f_s on suurempi, koska signaalissa on aina kohinaa ja signaalin vaihteluväli on aina pienempi kuin A/D-kanavan mittausalue. Kuvassa 20 on esimerkkinä yhden päkiähypyn voima-aikakäyrä. Kuvassa näkyy EMF-kalvon raakasignaalin käyttäytyminen. Kun kalvon paksuus pienenee, niin jännite nousee. Vastaavasti kalvon paksuuden kasvaessa jännite laskee. Voiman maksimikohdassa saadaan myös maksimi positiivinen jännite EMF-kalvolta, mikäli voima kasvaa lineaarisesti. Voiman vähentyessä kalvon paksuus palautuu, jolloin vastaavasti jännite pienenee. Mikäli siirtofunktio olisi täysin lineaarinen taajuuden suhteen, EMF-signaalin integrointi riittäisi korjaamaan ylipäästösuodattimen vasteen. Päkiähypyysesimerkin digitaalisesti korjattu signaali on kuvassa 21.



KUVA 20. EMF-raakasignaali päkiähypyssä. EMF-kalvo asennettu voimalevyn päälle. Voimalevyn signaalin nousun alussa näkyvät piikit johtuivat voimalevyn värähtelystä. Mitattu suoraan vahvistimilta, yksikkönä voltti (V).



KUVA 21. EMF-signaali on korjattu digitaalisesti siirtofunktion avulla ja yksiköt muutettu voimaksi (N). Korjatussa EMF-signaaliissa näkyvä kohina johtuu signaalin kohinasta, A/D-muunnoskohinasta ja rajallisesta laskentatarkkuudesta.

Siirtofunktion vaatimat laskennat ja EMF-signaalin korjaaminen tehtiin PC-ympäristössä, Hiq Professional for Windows, versio 4.1 ohjelmalla. Vaadittava ohjelmakoodi kirjoitettiin itse.

6.3.3 Liikeanalyysi

Liikeanalyysi oli 2D analyysi, jossa määritettiin painopisteen horisontaali- ja vertikaalinopeudet. Analyysi tehtiin Ariel Performance Analysis System (APAS) ohjelmistolla. Digitointi tehtiin manuaalisesti ohjelmamoduulilla DIGI4 versio 1.0. Lineaarimuunnos suoritettiin ohjelmamoduulilla Transformation module revision 1.0. Nopeuskäyrät suodatettiin Filter Module revision 1.0 moduulilla. Suodatusparametrina manuaalinen 8. asteen digitaalifiltteri.

6.4 Tilastolliset menetelmät

Tutkimuksessa verrattiin kahden eri muuttujajoukon välistä korrelaatiota. Korrelaatio laskettiin Pearsonin tulomomenttimenetelmällä ja laskettiin korrelaation tilastollinen merkitsevyys. Menetelmien toistettavuutta testattiin 2-suuntaisella parillisella t-testillä ja variaatiokertoimen CV(%) avulla. $CV\% = 100 \sqrt{\sum di^2 / 2n} / x$, missä di on kahden eri menetelmän ero, n on suoritusten lukumäärä ja x on kaikkien suoritusten keskiarvo (Madsen 1996). Systemaattisen virheen suuruutta arvioitiin virheen keskiarvolla. Maksimivirheen suuruutta 95 %:n todennäköisyydellä arvioitiin virheen keskihajonnan avulla käyttämällä kaavaa $\pm 1.96 * SD$. Kaikki analyysit laskettiin SPSSTM ohjelmalla (SPSS Inc, USA).

7 TULOKSET

Hyppyjä analysoitiin 13 kappaletta. Jokaisesta hypystä analysoitiin liikeanalyysillä vertikaaliset ja horisontaaliset tulo- ja lähtönopeudet. Lisäksi laskettiin laudan kontaktivaiheessa painopisteen ja kontaktipisteen välisen suoran kulmat verrattuna vaakatasoon siten, että kulma suurenee hyppypöytään päin. Jokaisesta hypystä analysoitiin 240 ms:n pituinen jakso. Jakso valittiin niin, että lautavaihe tuli ajanjakson keskelle. Kuvanopeus oli 125 Hz, jolloin kuvaväliksi tuli 8 ms ja kuvapisteen lukumääräksi 30. Laudan kontaktivaiheen alku määriteltiin kohdaksi, jolloin laudassa näkyi ensimerkkejä kokoonpainumisesta. Kontaktivaiheen loppu määriteltiin kohdaksi, jolloin molemmat jalat olivat irti laudasta. Voima-aikakäyrästä määritettiin huippuvoimat, kontaktiajat ja laskettiin vertikaaliset lähtönopeudet. Voima-aikamenetelmällä saatuja arvoja verrattiin liikeanalyysistä saatuihin arvoihin. Taulukoissa on hypyt numeroitu 1-13.

7.1 Vertikaaliset lähtönopeudet

Hyppyjen vertikaaliset lähtönopeudet määritettiin liikeanalyysillä ja tuloksia verrattiin voima-aikakäyrästä laskettuihin lähtönopeuksiin (taulukko 5). Vertikaalinen lähtönopeus voitiin laskea, kun tiedettiin voima-aikakäyrä ja hyppääjän massa. Putoamiskiihtyvyyden arvona käytettiin vakiota 9.82 m/s^2 (leveyspiiri 62°).

Lähtönopeuden laskeminen voima-aikakäyrästä edellytti, että törmäysvaiheen voimaosuus voitiin poistaa laskennasta. Törmäysvaiheen voimaosuuden määrittämiseen käytettiin kahta eri menetelmää. Ensimmäinen (vy_1) menetelmä vaati liikeanalyysin tuekseen. Liikeanalyysistä määritettiin se hetki, milloin nopeuden suunta muuttui positiivisesti. Kyseisellä hetkellä hyppääjän negatiivinen vertikaalinopeus muuttui positiiviseksi. Toinen menetelmä (vy_2) perustui törmäyksen voimaosuuden laskemiseen. Törmäyksen voimaosuus voitiin laskea, kun tiedettiin vertikaalinen tulonopeus. Koska kaikkien hyppyjen tulonopeuksien keskihajonta oli pieni (SD 0.15), voitiin kaikille hypyille käyttää samaa tulonopeutta. Huomioitavaa on, että vy_2 -menetelmässä liikeanalyysiä ei tarvittu kun laskettiin yksittäisiä nopeuksia.

TAULUKKO 5. Vertikaaliset lähtönopeudet. v_y liikea. on liikeanalyysin tulos. v_{y1} laskettu voima-aikakäyrästä, työntövaiheen alku määritelty liikeanalyysistä. v_{y2} laskettu voima-aikakäyrästä, työntövaiheen alku laskettu. Keskiarvo (\bar{x}) ja keskihajonta (SD) jokaisen sarakkeen lopussa. Samat tulokset myös xy-kuvaajassa kuvassa 22.

Hyppy	v_y liikea. (m/s)	v_{y1} (m/s)	v_{y2} (m/s)
1	3.8	3.9	3.9
2	4.3	4.3	4.4
3	4.0	4.3	4.5
4	3.8	3.9	3.9
5	4.0	3.6	3.7
6	3.8	3.6	3.6
7	4.6	4.2	4.3
8	4.3	4.7	4.5
9	4.3	3.9	3.8
10	4.1	4.1	4.3
11	4.2	4.3	4.4
12	4.1	3.9	3.9
13	3.9	4.3	4.2
\bar{x} (SD)	4.09(0.243)	4.08 (0.315)	4.09 (0.319)

Virhe. Virhettä kuvattiin virheen keskiarvolla ja keskihajonnalla ($\pm 1.96 \cdot SD$). Tilastollisesti lasketut virheet olivat:

$$-0.3 \pm 14 \% (v_{y1}),$$

$$+0.5 \pm 14 \% (v_{y2}).$$

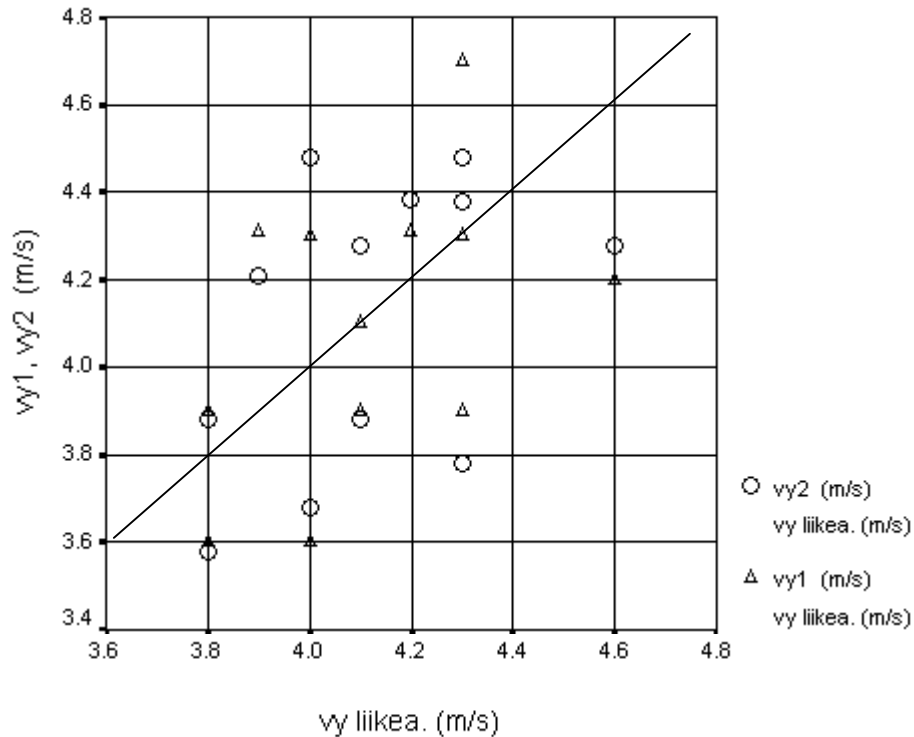
Virheen keskiarvo on lähellä nollaa molemmilla menetelmillä, joten menetelmissä ei ole systemaattista virhettä (kuva 22). Voimamenetelmällä määritetyn vertikaalisen lähtönopeuden virhe 95 %:n todennäköisyydellä oli $\pm 14 \%$.

Korrelaatio. Korrelaatiot molemmille menetelmille laskettiin Pearsonin tulomenttimenetelmällä. Korrelaatiot (r) ja tilastolliset merkitsevyydet (p) olivat:

$$r_1 = 0.485, p_1 = 0.0927 (v_{y1})$$

$$r_2 = 0.491, p_2 = 0.0888 (v_{y2})$$

Korrelaatiot eivät ole tilastollisesti merkittäviä ($p > 0.05$). Kahdella eri voima-aikamenetelmällä ei ollut merkittävää eroa.



KUVA 22. Taulukon 10 tulokset xy-kuvaajassa. Suora viiva kuvaa lineaarista täydellistä korrelaatiota.

Toistettavuus.. Toistettavuutta testattiin 2-suuntaisella parillisella t-testillä ja CV(%):lla. t-testin todennäköisyydet ja CV(%):t menetelmille olivat:

$$p_1 = 0.869 \text{ (vy}_1\text{)}$$

$$p_2 = 0.979 \text{ (vy}_2\text{)}$$

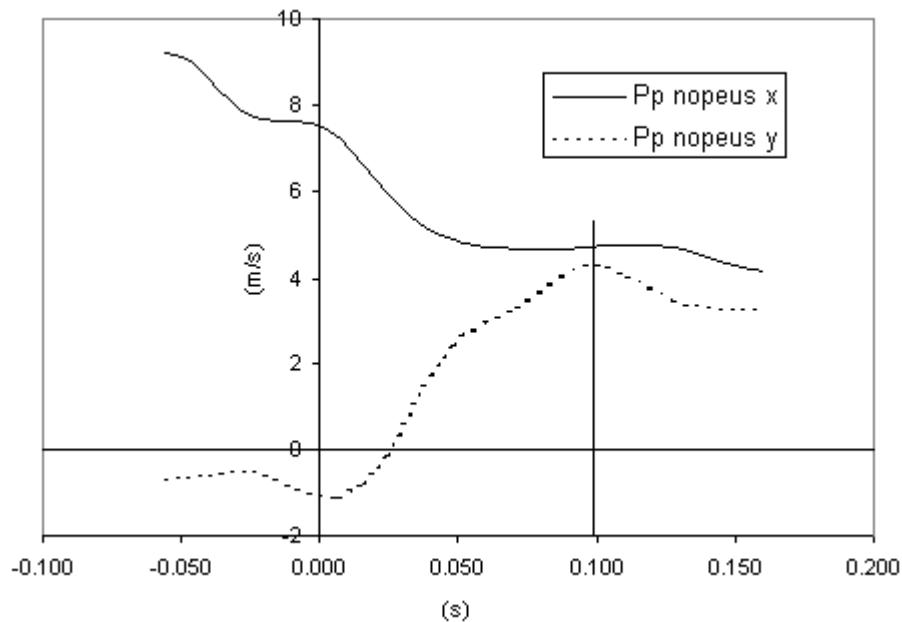
$$CV_1 \text{ (%) = 4.8 \% (vy}_1\text{)}$$

$$CV_2 \text{ (%) = 4.8 \% (vy}_2\text{)}$$

7.2 Liikeanalyysin nopeusmuuttujat

Liikeanalyysillä määritettiin painopisteen x- ja y-nopeudet hypyn lautavaiheen aikana. Analyysin aikajakson alkukohta kohdistettiin alkamaan 50 ms ennen hyppääjän tuloa

laudalle ja loppukohta 50 ms laudalta irtoamisen jälkeen. Kuvassa 23 on esimerkkinä yhden hypyn painopisteen nopeuskäyrät.



KUVA 23. Painopisteen nopeudet v_x ja v_y , hyppy 2. Ajanhetki 0 merkitsee lautakontaktin alkua ja pystyviiva sen loppua. Yhtenäinen viiva kuvaa painopisteen horisontaalinopeutta (m/s) ja katkoviiva vertikaalista nopeutta (m/s).

Kuvan hypyn horisontaalinen tulonopeus on 7.5 m/s ja vertikaalinen tulonopeus -1.1 m/s. Vertikaalinen tulonopeus on negatiivinen, koska hyppääjä on putoamisvaiheessa laudalle tullessaan. Jarrutusvaiheen aikana vertikaalinopeuden suunta muuttuu positiiviseksi. Aikaa nopeuden suunnanmuutokseen kuluu noin 20 ms. Kyseisellä hetkellä lauta on vielä painumassa kasaan. Lautaa on alimmassa kohdassa noin 45 ms lautakontaktin jälkeen. Kohdan voi määrittää voima-aikakäyrästä tai videokuvasta. Lautaa on alimmassa kohdassa, kun voima on maksimissaan. Painopisteen vertikaalinen nopeus muuttuu siis positiiviseksi, vaikka lauta on vielä menossa alaspäin. Painopiste menee ylöspäin samalla kun lauta eli hyppääjän jalat menevät alaspäin. Selitys löytyy videokuvasta. Hyppääjän oikea-aikainen kehon oikaisu lautakontaktin alussa aiheuttaa painopisteen nopean nousun.

Vertikaalinen nopeus kasvaa koko lautakontaktin ajan ja on suurimmillaan lautakontaktin lopussa. Hyppyjen kesimääräinen vertikaalinen lähtönopeus liikeanalyysillä määritettynä oli 4.0 (SD=0.22) m/s. Horisontaalinen nopeus pieneni jarrutusvaiheessa keskimäärin 2.9 m/s. Kaikkien hypyjen horisontaaliset (x) ja

vertikaaliset (y) nopeudet on koottu taulukkoon 6 ja kuvaa 23 vastaavat nopeuskuvaajat liitteeseen 2.

TAULUKKO 6. Liikeanalyysin nopeusmuuttujat. Keskiarvo (\bar{x}) ja keskihajonta (SD) jokaisen sarakkeen lopussa.

Hyppynumero	v_x (m/s)	v_x (m/s)	v_y (m/s)	v_y (m/s)	Kontaktiaika (ms)
	kontaktin alussa	kontaktin lopussa	kontaktin alussa	kontaktin lopussa	
1	7.6	4.2	-1.3	3.6	120
2	7.5	4.8	-1.1	4.3	104
3	7.7	4.5	-0.9	3.9	104
4	6.9	5	-1.1	3.8	112
5	6.8	4.9	-1.3	3.8	120
6	7.2	4.2	-1.2	3.8	112
7	6.9	4.6	-1.3	4.2	104
8	7.1	5.1	-1.0	4.2	112
9	7.6	4.1	-1.0	4.3	112
10	7.3	4.2	-1.4	3.9	112
11	7.4	3.9	-1.2	4.1	112
12	6.7	4.3	-1.1	4.0	112
13	7.6	3.8	-1.0	3.8	104
\bar{x} (SD)	7.3 (0.35)	4.4 (0.42)	-1.2 (0.15)	4.0 (0.22)	111 (5.51)

7.3 Painopisteen kulmat

Painopisteen kulmat hypyn eri vaiheissa ovat taulukossa 7. Kierrettyypinen hyppy tarkoittaa hyppyä, jossa hyppääjä tekee kierteen tai kierteitä ilmalennon aikana. Suorassa hypyssä hyppääjän suunta ei kierry pysty akselin suhteen. Tulokulma tarkoittaa painopisteestä kontaktipisteeseen vedetyn suoran kulmaa lautakontaktin alussa. Kulma on määritelty suhteessa vaakatasoon siten, että kulma kasvaa hyppypöydälle päin. Kontaktipiste laudalle määriteltiin isovarpaan ja nilkan puoliväliin. Lähtökulma lautakontaktin lopussa on määritelty samoin. Taulukossa on myös kulman suuruus silloin, kun lauta on alimmassa asennossa.

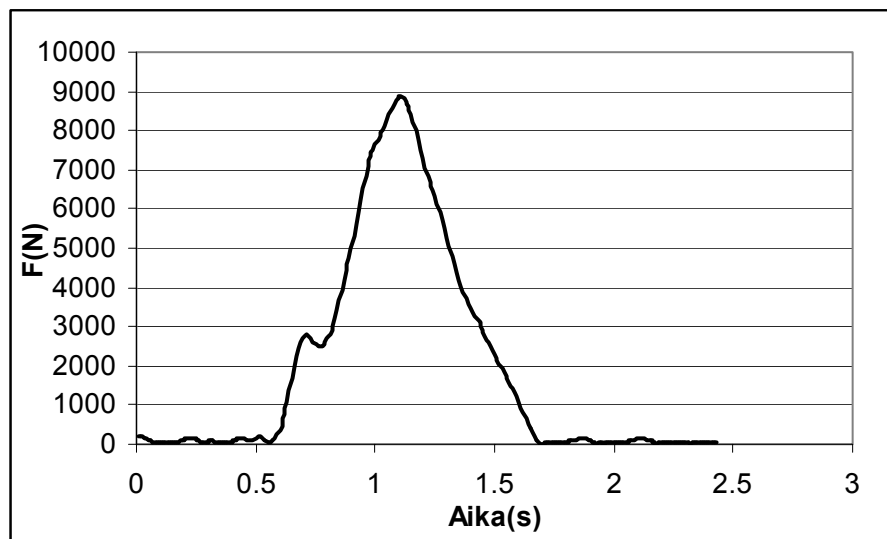
TAULUKKO 7. Painopisteen kulmat hypyn eri vaiheissa. Ajanhetki Pp pystyssä t(ms) tarkoittaa aikaa kontaktin alusta hetkeen, jolloin painopiste on täysin tukipisteen päällä. Kulma on silloin 90°.

hyppy	tyyppi	tulokulma (°)	kulma lauta pohjassa (°)	lähtökulma (°)	ponnistuksen	
					kulmamuuutos (°)	Pp pystyssä, t (ms)
1	kierre	66.7	79.2	106.5	39.8	80
2	kierre	70.2	83.1	107.9	37.7	56
3	kierre	68.4	81.0	106.0	37.7	64
4	suora	71.3	82.6	105.4	34.1	56
5	suora	69.0	82.3	106.3	37.3	64
6	kierre	66.1	77.2	108.9	42.8	72
7	suora	70.1	77.2	103.9	33.8	64
8	kierre	72.5	85.2	114.4	42.0	48
9	kierre	64.9	77.9	106.4	41.5	72
10	suora	66.4	80.5	103.3	36.9	72
11	suora	65.0	76.0	102.9	37.9	80
12	kierre	68.8	81.1	107.0	38.3	64
13	suora	65.7	80.5	103.5	37.8	72
x (SD)		68.1 (2.48)	80.3 (2.70)	106.4 (3.04)	38.3 (2.72)	66 (9.5)

7.4 Voima-aikakäyrät

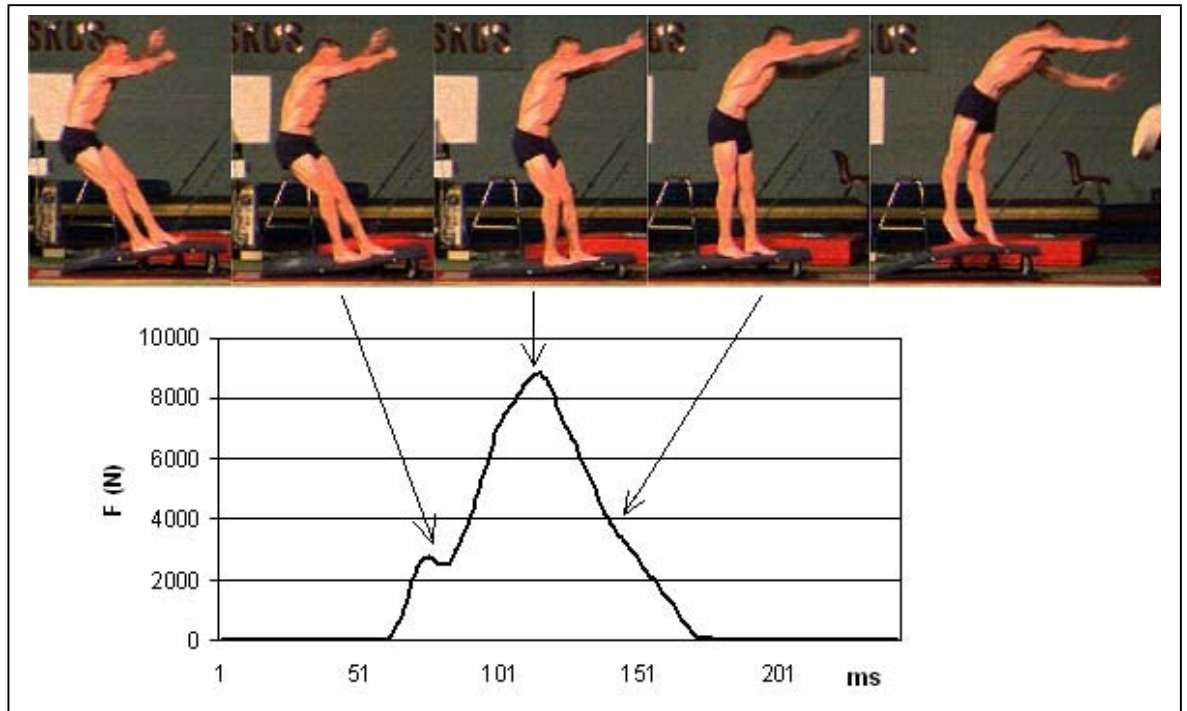
EMF-kalvolla mitattiin hypyistä voiman raakasignaalit. Näistä raakasignaaleista muodostettiin voima-aikakäyrät ohjelmallisesti siirtofunktion avulla.

Lautakontaktin voima-aikakäyrän tyypillinen muoto on esitetty kuvassa 24. Voimassa ei näy mitään nopeita voimapiikkejä, koska lauta on elastinen. Voima-käyrän alussa näkyy törmäyksen jälkeen voimatason heilahdus, joka johtuu hyppääjän joustosta. Hyppääjä ei pysty pitämään kehoaan täysin jäykkänä. Jousto tapahtuu pääasiassa polvinivelessä ja näkyy hetkellisenä polvikulman muutoksena. Maksimivoima saavutetaan laudan ollessa alimmassa asennossa. Tässä vaiheessa laudan jousielementteihin on varastoitunut maksimi määrä energiaa. Loppuosan voimakäyrällä lauta purkaa jousien jännityksen ja hetkellisesti varastoitunut energia muuttuu takaisin hyppääjän liike-energiaksi.

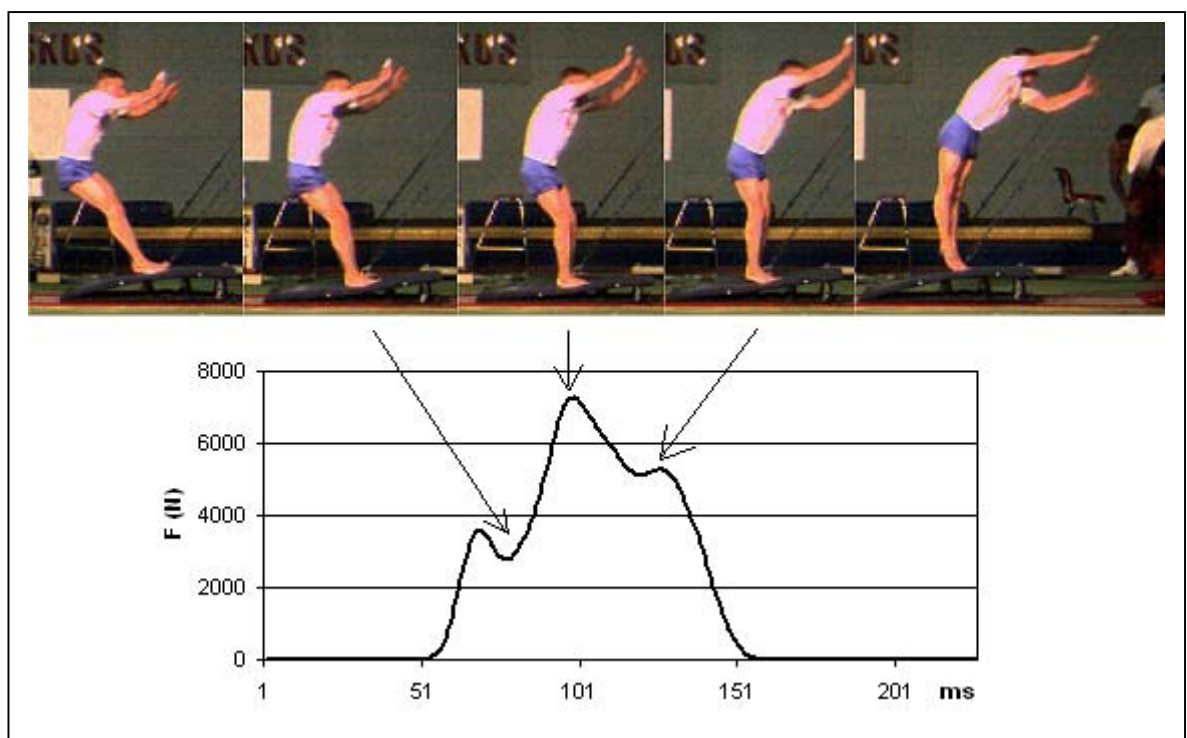


KUVA 24. Hypyn 1 voima-aikakäyrä. Hyppääjän massa 83 kg.

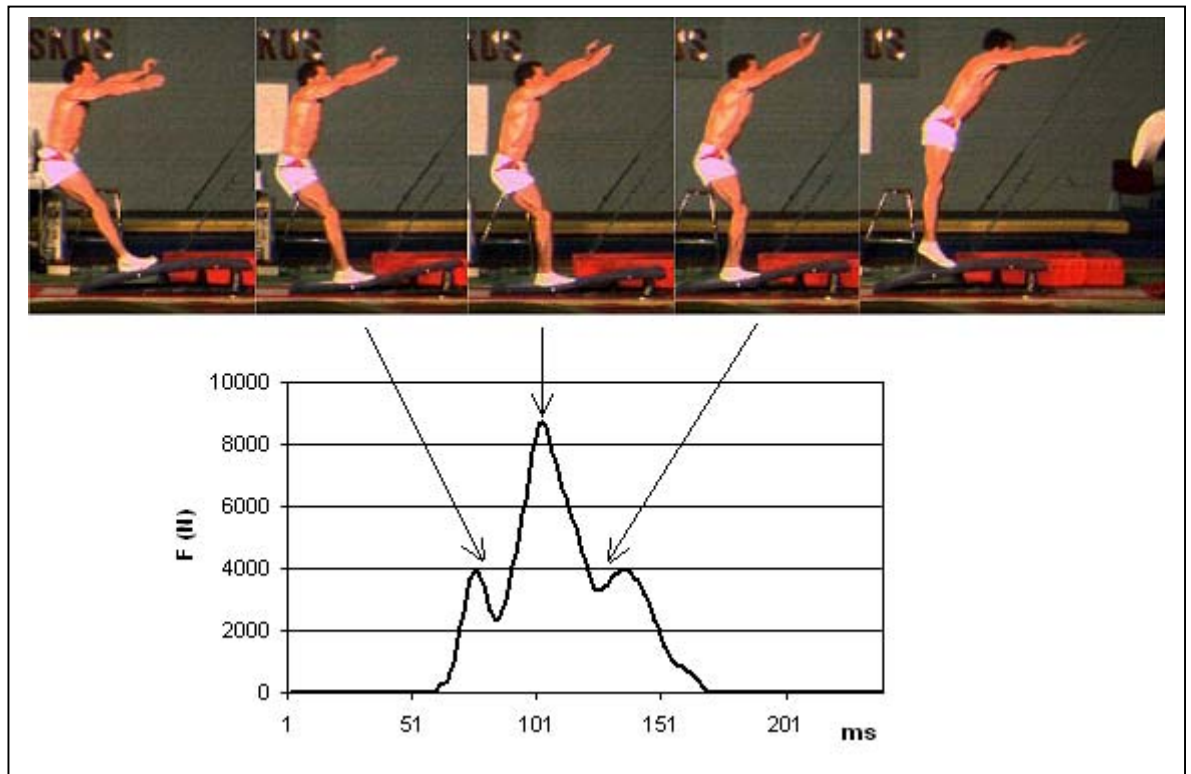
Voimakäyrän muotoon vaikuttivat voimakkaimmin hyppääjän massa (kuva 25, kuva 26) ja kontaktikohta laudalla (kuva 27, kuva 28). Kevyillä hyppääjillä laudan piiskamainen liike aiheuttaa laskevalle voimakäyrälle heilahduksen (kuva 26). Voima-aikakäyrän muoto oli terävämpi hypyissä, joissa kontaktikohdat olivat laudan alaosassa (kuva 27). Oikeaan kohtaan osunut hypy ja sen voima-aikakäyrä on esitetty kuvassa 28.



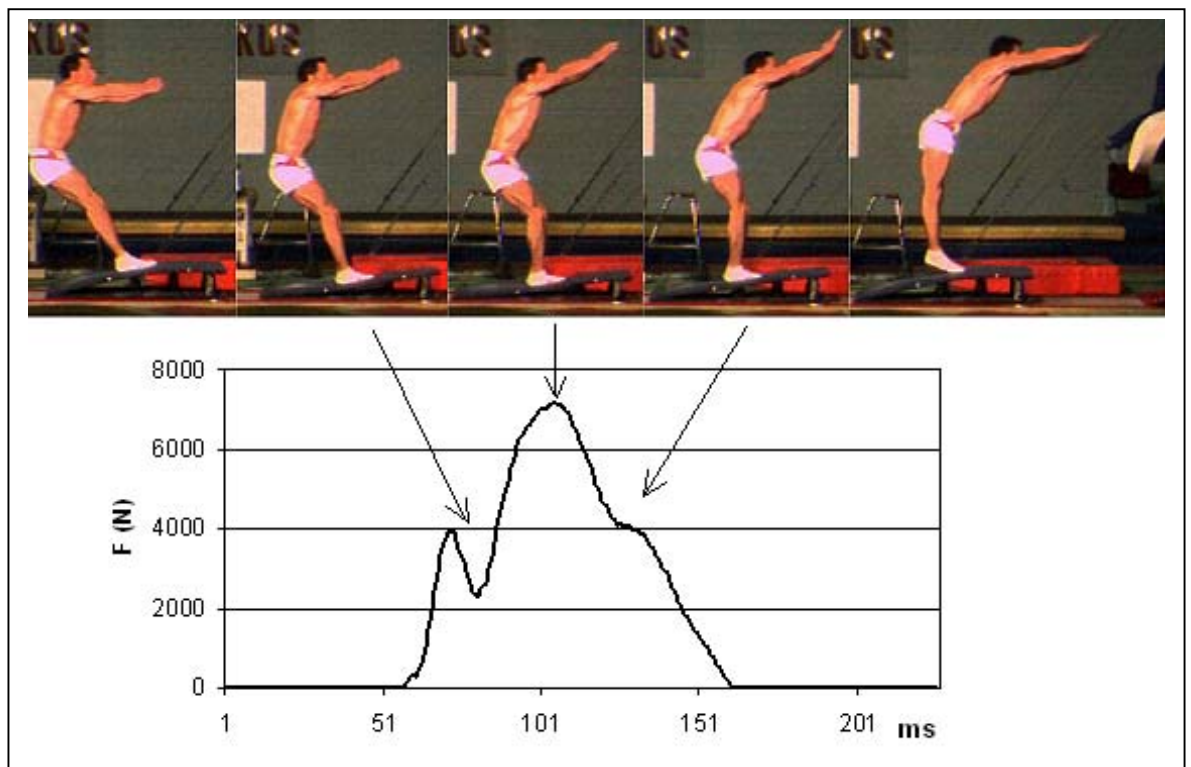
KUVA 25. Painavan hyppääjän voima-aikakäyrä. Hyppääjän massa 83 kg.



KUVA 26. Kevyen hyppääjän voima-aikakäyrä. Hyppääjän massa 65 kg.



KUVA 27. Kontaktikohdan merkitys voima-aikakäyrään. Hyppy kohdistunut liian alas.



KUVA 28. Kontaktikohdan merkitys voima-aikakäyrään. Hyppy kohdistunut oikeaan paikkaan.

7.5 Huippuvoimat

Huippuvoimaksi määriteltiin voima-aikakäyrän maksimiarvo. Voima oli maksimissaan, kun lauta oli alimassa asennossa. Taulukkoon 8 on kerätty huippuvoimat, tulonopeudet ja massat.

TAULUKKO 8. Huippuvoimat, nopeudet ja massat. Hypyn tyyppi kuvaa hyppyä. Kierrehypyssä hyppääjä tekee kierteen tai kierteitä vertikaaliakselin ympäri. Suorassa hypyssä on rotaatiota vain horisontaaliakselin ympäri.

hyppy	tyyppi	v_y (tulo)	v_x (tulo)	massa (kg)	huippu-voima (N)
1	kierre	-1.3	7.6	83	8860
2	kierre	-1.1	7.5	65	7230
3	kierre	-0.9	7.7	65	7300
4	suora	-1.1	6.9	67	7670
5	suora	-1.3	6.8	67	6510
6	kierre	-1.2	7.2	68	6680
7	suora	-1.3	6.9	65	7670
8	kierre	-1.0	7.1	65	7460
9	kierre	-1.0	7.6	65	6580
10	suora	-1.4	7.3	66	8690
11	suora	-1.2	7.4	66	7730
12	kierre	-1.1	6.7	62	6210
13	suora	-1.0	7.6	66	7140
x (SD)		-1.2 (0.15)	7.3 (0.35)	67 (5.0)	7360 (793)

7.6 Kontaktiajat

Kontaktiaikojen vertailu liikeanalyysin ja EMF-kalvon välillä oli epätarkkaa, koska liikeanalyysissä kuvaväli oli 8 ms. EMF-kalvolla mitattuna ja voima-aikakäyrästä määritettynä tarkkuus oli 1 ms. Voimataso, jolla kontakti alkoi tai loppui määriteltiin arvoiksi 50 N. Menetelmät antavat samat tulokset mittaustarkkuuden rajoissa. Liikeanalyysi antoi keskiarvona hieman pidemmät kontaktiajat (taulukko 9).

TAULUKKO 9. Kontaktiajat.

hyppy	kontakti-aika (ms)	
	EMF-kalvo	liikea.
1	115	120
2	105	104
3	105	104
4	112	112
5	107	120
6	108	112
7	101	104
8	112	112
9	110	112
10	110	112
11	107	112
12	109	112
13	106	104
x (SD)	108 (3.38)	111(5.51)

8 POHDINTA

8.1 Päätulokset

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää EMF-kalvon soveltuvuutta voiman mittaamiseen voimistelun hyppylaudalta ja tutkia hyppyjen voima-aikakäyriä ja niistä laskettuja vertikaalisia lähtönopeuksia.

EMF-kalvo asennettiin hyppylaudan kannen päälle. Tutkimuksessa mitattiin 13 hyppyä, joista määriteltiin voima-aikakäyrät ja liikeanalyysillä kinemaattiset muuttujat. Voima-aikakäyrät muodostettiin EMF-kalvon raakasignaaleista ohjelmallisesti siirtofunktion avulla. Törmäysvaiheen osuus voima-aikakäyrästä määritettiin kahdella eri tavalla. Liikeanalyysin avulla määritettiin todellinen törmäysvaiheen muuttuminen työntövaiheeksi. Toisena tapana käytettiin pelkkää arviointia. Arviointia voitiin käyttää, koska vertikaaliset tulonopeudet ($x = -1.2$ m/s) olivat lähes samansuuruisia (SD = 0.15 m/s). Tämä tarkoittaa, että törmäysimpulssi oli kaikissa hypyissä hyppääjän massa suhteutettuna sama. Huomioitavaa on, että tässä tutkimuksessa määritetty arviointimenetelmä pätee vain huipputaso miesshyppääjille. Mikäli menetelmää halutaan käyttää naisten ja nuorten tapauksessa, pitää tehdä uusi vertaileva liikeanalyysi- ja voimamittaustutkimus.

Maksimivoima saavutettiin laudan ollessa alimassa asennossa ja sen suuruus vaihteli välillä 6200 - 8800 N. Kaikissa hypyissä näkyi törmäysvaiheessa voimatason hetkellinen aleneminen, joka johtui pääasiassa hyppääjän polvien ja nilkkojen joustosta.

Mikäli hyppääjä oli kevyt, näkyi myös laudan työntöosalla voimatason hetkellinen kasvu. Syynä oli laudan kannen aaltoliike. Laudan kansi on esijännitetty kaaren muotoon. Törmäysvaiheessa kansi joutuu taipumaan voimakkaasti. Aalto syntyy ja etenee kohti laudan etureunaa, koska kansi pääsee elämään jousien päällä. Törmäysvaiheen jälkeen kansi alkaa palautua takaisin muotoonsa, jolloin aalto vaelttaa kannen pituussuunnassa takaisin. Voimatason hetkellinen nousu syntyy, kun aallon maksimi-amplitudi kohtaa hyppääjän tukipisteen laudalla. Painavalla hyppääjällä ilmiötä ei synny, koska lauta menee täysin pohjaan ja laudan kansi on silloin täysin kokoonpainuneiden jousien päällä. Voima-aikakäyrien muodossa näkyi suuria eroja eri

hyppääjien välillä. Usealla hyppääjällä muoto oli niin yksilöllinen, että hyppääjän pystyi tunnistamaan pelkästä voima-aikakäyrän muodosta. Kaikkien hyppyjen voima-aikakäyrät ovat liitteessä 3.

Lautavaiheen kontaktaiaika oli keskimäärin 108 ms ja vertikaalinen lähtönopeus 4.1 m/s. Vertikaalinen lähtönopeus aikaisemmissa tutkimuksissa on alempi. Takei ym. (2000) on tutkinut vuoden 1995 MM-kisojen Hechtin hyppyä ja saanut vertikaalisen lähtönopeuden keskiarvoksi 3.3 m/s. Syynä eroon ovat erilainen hyppypöytä ja hypyn tyyppi. Vanhanmallinen pöytä vaati suuren horisontaalisen lähtönopeuden laudalta. Kyseisessä tutkimuksessa horisontaalinen lähtönopeus oli keskimäärin 6.3 m/s, kun se tässä tutkimuksessa oli keskimäärin 4.4 m/s. Sääntömuutos uudesta hyppypöydästä tuli voimaan vuonna 2001 ja sen jälkeen tehtyjä tutkimuksia ei ole vielä julkaistu. Uusi hyppypöytä on muuttanut hypyn luonnetta merkittävästi, joten tulosten vertaaminen vanhanmallisen hyppypöydän aikaisiin tutkimuksiin ei ollut järkevää.

Kahden eri voimamenetelmän (liikeanalyysi, arviointi) korrelaatiot liikeanalyysiin verrattuna olivat 0.485 ja 0.491. Korrelaatio oli kahdella eri menetelmällä samansuuruinen. Johtuen pienestä testilukumäärästä tilastollista merkitsevyyttä ($p \leq 0.05$) ei saavutettu, $p = 0.0927$ ja $p = 0.0888$. Vertikaalisen lähtönopeuden virhe molemmilla menetelmillä oli noin $\pm 14\%$. Tulokset osoittivat, että liikeanalyysiä ei tarvita ja sillä ei saada lisätarkkuutta lähtönopeuden määrittämiseen voimamenetelmällä.

8.2 Virheanalyysi

Menetelmässä oli systemaattisia virhelähteitä. EMF-kalvo on hyvin immuuni poikittais/pitkittäisvoimille. Kalvo mittaa vain pinnan normaalin suuntaista voimakomponenttia. Johtuen hyppylaudan geometriasta, laudan pinnan normaali ei ole jatkuvasti täysin vertikaalisuunnassa. Laudalle asennettu EMF-kalvo ei siis mittaa pelkästään vertikaalikomponenttia. Tämä korostuu varsinkin törmäysvaiheessa ja aivan lautavaiheen lopussa. Törmäysvaiheessa mitataan osa horisontaalisesta nopeuskomponentista, koska jännittämättömän laudan pinta osoittaa taakse ja ylös. Lautavaiheen keskellä mittaussuunta on hyvin lähellä vertikaalista, jolloin tuotetaan myös suurin

voima. Loppuvaiheessa kun painopiste on tukipisteen etupuolella lauta työntää takaisin taakse ja ylös ja osa vertikaalisesta voimasta jää mittaamatta.

Absoluuttisen tarkka vertikaalisen lähtönopeuden määrittäminen voima-aikakäyrästä edellyttää, että kaikki systeemiin vaikuttavat voimat tiedetään. Hyppytahtumassa osa vertikaalivoimasta kuluu hyppääjän kulmakiihtyvyyden (rotaatio) kasvattamiseen. Hyppääjä saa kulmakiihtyvyyttä aivan lautavaiheen lopussa, kun painopiste on tukipisteen etupuolella. Laudan työntö kohdistuu taakse ja ylös, mikä aiheuttaa rotaatiota hyppyyn. Tässä tutkimuksessa vertikaalinopeuden laskentaan muodostui virhettä, koska kulmakiihtyvyyden aiheuttamaa voimamäärää ei pystytty määrittämään. Tuloksiin se vaikuttaa niin, että todellinen vertikaalinen nopeus on pienempi kuin laskettu. Virheosuus voidaan laskea jos hyppääjän kulmakiihtyvyys määritetään liikeanalyysillä ja lisäksi tiedetään hitausmomentti. Ongelmana on hitausmomentin määrittäminen, se muuttuu jatkuvasti samalla kun hyppääjän kehon asento muuttuu.

Vertikaalinopeuden määrittäminen voima-aikakäyrästä perustuu Newtonin voimалаakeihin. Lait pätevät täsmällisesti vain jäykkien kappaleiden tapauksessa. Tässä tilanteessa virhettä tulee, jos hyppääjä ei pysty pitämään kehoaan jäykkänä laudan työntövaiheessa. Tämä voimaosa tulee mitattua, mutta se ei anna massalle kiihtyvyyttä.

Vertikaalisen lähtönopeuden laskeminen voima-aikakäyrästä edellyttää myös nopeuden muutossuunnan tarkkaa ajoittamista. Tässä tutkimuksessa muutoskohta pystyttiin määrittämään liikeanalyysillä yksilöllisesti. Tutkimuksessa käytettiin myös arviointimenetelmää, koska vertikaalisten tulo nopeuksien keskihajonta oli pieni ($SD= 0.15$ m/s). Liikeanalyysi ja arviointimenetelmä antoivat kuitenkin lähes samat tulokset, jolloin muutossuunnan arviointi ei aiheuttanut merkittävää virhettä tuloksiin.

Kokonaisuutena virheet olivat kuitenkin niin pieniä, että ne eivät vaikuttaneet systemaattisesti tuloksiin. Osasyynä oli virheiden pienuus ja virheet osittain kompensoivat toisiaan. Isommalla aineistolla tulokset saattaisivat korreloida myös tilastollisesti merkitsevästi. Ilmeisesti hajontaan vaikutti myös referenssinä käytetty liikeanalyysi. Hypyssä oli nähtävissä myös kehon sivuttaisliikettä, jota 2D analyysi ei huomioinut.

8.3 Valmennuksellinen merkitys

Hyppääjään kohdistuva vertikaalivoima. Maksimivoimat joita hyppääjiin kohdistui olivat luokkaa 6200 – 8900 N. Voimistelun hypyssä hyppääjään kohdistuvat voimat ovat siis suhteellisen pieniä. Suurten törmäysvoimien kesto ei ole täten merkittävä asia voimistelun hypyssä.

Hyppylaudan käyttäytyminen eri painoisilla hyppääjillä. Voima-aikakäyrän muoto kertoi, miten lauta käyttäytyi eri painoisilla hyppääjillä. Raskailla hyppääjillä voimakäyrän muoto oli hyvin lineaarinen. Kevyillä hyppääjillä vaihtelua oli enemmän. Merkittävin ero oli työntövaiheessa näkyvä hetkellinen voiman kasvu. Kasvu johtui laudan kannen joustavuudesta. Painavalla hyppääjällä lauta painuu pohjaan, jolloin laudan kannen elastisuutta ei saada hyödynnettyä ja törmäyksen liike-energiaa menee hukkaan. Voima-aikakäyrät osoittivat, että löysällä laudalla kevyet hyppääjät saivat edun. Etu näkyy suurempana voima-aikaintegraalina ja sitä kautta suurempana vertikaalisena lähtönopeutena. Jos halutaan antaa hyppääjille tasaveroiset olosuhteet, niin painaville hyppääjille pitäisi olla jäykempi lauta. Tulevaisuudessa lajissa on käytössä 2 erivahvuista lautaa. Tällä voimamenetelmällä on mahdollisuus optimoida jokaiselle hyppääjälle yksilöllinen vauhdinjuoksunopeus, jolla lauta toimii optimaalisesti. Optimaalinen laudan toiminta mahdollistaa hyppääjälle maksimaalisen vertikaalisen lähtönopeuden.

Kontaktikohdan merkitys. Hyppääjän massan lisäksi voima-aikakäyrän muotoon vaikuttaa hyppääjän kontaktikohta laudalla. Alalautaan kohdistuneen hypyn voima-aikakäyrän huippu on terävä ja työntövaiheessa voiman lasku on nopeaa. Ylemmäksi jousien päälle kohdistuneessa hypyssä voima-aikakäyrän muoto on pehmeämpi ja voiman vaikutusaika pitempi. Voima-aikakäyrän integraali tulee isommaksi, joka näkyy isompana vertikaalisena lähtönopeutena. Hyppääjän ei kannata koskaan hypätä alalautaan, vaan aina mahdollisimman ylös. Tämä menetelmä pystyi osoittamaan hypyn kontaktikohdan laudalla, tilanteessa jossa hyppy oli jäänyt liian alas.

Hypyn vaiheet lautavaiheen aikana. Voimasignaalin ja hypyn videokuvan yhtäaikainen tarkastelu auttaa ymmärtämään hyppääjän asennon vaikutusta ponnistukseen ja laudan työntövoimaan. Vartalon ojennus alkaa välittömästi kontaktin jälkeen. Hyppääjän pai-

nopiste alkaa jo nousta, vaikka lauta on vielä painumassa kasaan. Tämä vaatii jaloilta eksentristä voimaa sekä lantiolta ja käsiltä nopeaa ojennusta. Voima-aikakäyrän muodosta voidaan tarkasti katsoa, missä kohdassa tulee törmäyksen aiheuttaman voimatasen lasku, milloin lauta on alimmassa asennossa ja milloin kontakti loppuu.

Vertikaalinen lähtönopeus laudalta. Tämä tutkimuksen päätarkoitus oli selvittää pystytäänkö voimamenetelmällä laskemaan vertikaalinen lähtönopeus laudalta. Tulos osoitti, että menetelmällä voidaan mitata lähtönopeus kunhan hyväksytään menetelmään liittyvä hajonta. Mikäli liikeanalyysiä ei tehdä, tämän tutkimuksen tuloksia voidaan suoraan soveltaa vain maajoukkue-tason mieshyppääjiin.

8.3 Kehitysideoita

EMF-kalvolla on monia etuja verrattuna perinteiseen voimalevyyn. Kalvo on ohut ja elastinen. Se voidaan viedä moniin sellaisiin paikkoihin, mihin voimalevy ei sovellu. Lisäksi se on halpa ja mittaaminen on yksinkertaista. Suurimpana haittana on, että kalvo mittaa vain yhden voimakomponentin ja sillä ei voi mitata staattista voimaa. Taajuusraja voidaan vetää hyvinkin alas hyvällä elektroniikkasuunnittelulla ja digitaalisella signaalinkäsittelyllä, mutta aivan staattiseen tilanteeseen ei päästä koskaan. Kalvo kannattaa laittaa lähelle kontaktipintaa. Rakennelmat, jossa kalvo asetetaan jäykkien levyjen väliin ovat turhia. Kalvon dimensiomuutos paineen alla on niin pieni, että painepiikkiä ei saada helposti pois jäykkilläkään levyillä. EMF-kalvo on muovia ja sen kestävyys on siksi rajallinen. Lisäksi varausten karkaaminen ja sitä kautta herkkyiden muuttuminen voi tulla ongelmaksi pitkäaikaisessa käytössä. Tämä aiheuttaa lisäksi kalibrointiongelman. Kalvon kalibroiminen voima-levyn päällä käy mahdottomaksi, jos kalvo piilotetaan rakenteisiin. Kalibrointi voidaan tehdä myös ilman voimalevyä, mutta sopiva menetelmä pitäisi ensin kehittää ja testata. Tässä tutkimuksessa tehty hyppy-lautasovellus oli vaativa kalvon soveltamiskohde. Olisi hyödyllistä testata kalvoa yksinkertaisena voimalevynä erityisesti toistettavuuden ja kestävyiden suhteen.

Mikäli hypyn vertikaalinopeus haluttaisiin mitata kaikissa olosuhteissa pitäisi kehittää menetelmä, joka pystyisi ilmaisemaan hyppääjän painopisteen nopeuden muutos-suunnan törmäyksen jälkeen. Sen pitää olla yksinkertaisempi kuin liikeanalyysi, koska

analyysi on raskas ja hidas. Tässä tapauksessa kannattaisi hyödyntää jotain eri teknologiaa, esimerkiksi kiihtyvyyssantureita.

8.4 Yhteenveto

Tämä tutkimus osoitti, että EMF-kalvolla voidaan mitata impulssityyppistä voimaa luotettavasti. Voimistelun hypyssä vertikaalinopeus voidaan määrittää voima-aikamenetelmällä, kun tiedostetaan ja hyväksytään virhelähteiden olemassaolo. Mittaustulokset osoittivat myös, että voima-aikakäyrän muotoon sisältyy paljon informaatiota, josta voi olla hyötyä valmennuksellisesti.

9 LÄHTEET

Bajin, B. (1979). Gonionmetric analysis of the pushoff phase during 1-1/2 somersault in men's gymnastic vaulting. Science in gymnastics, Del Mar, CA, Academic Publishers, 1-8.

Brüeggmann, G.P. (1984). Biomechanical analysis of selected vaults on the longhorse. In Science in Gymnastics, Del Mar, CA, Academic Publishers, 9-24.

Dainis, A. (1981). A model for gymnastic vaulting. Medicine and Science in Sport and Exercise, 13, 34-43.

Davies, C., Rennie, R. (1968). Human power output. Nature 217, 770-771.

Dempster, W. (1955). Space Requirements of the Seated Operator. WADCTR 55-159, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.

Emfitech, Oy (2002). EMFit Sensors.

Emfitech, Oy (2003). L-type sensor specifications.

FIG 2001a. Federation International of Gymnastic. 2001. Code of points for Artistic Men 2001-2004.

FIG 2001b. Federation International of Gymnastic. 2001. Technical Regulations 1008.

Hillenbrand, J., Sessler, G. (1999). Mechanical and electrical response of charged polymers with cellular structure, IEEE CEIDP, 43-46

Horowitz, P., Hill, W. (1989). The Art of Electronics. Cambridge University Press, Cambridge.

Krug, J., Knoll, K., Koethe, T, Zoecher, H-D. (1998). Running approach velocity and energy transformation in difficult vaults in gymnastics. In, Hartmut J. Riehle & Manfred

M. Vieten, (Eds.) Proceedings of XVI International Symposium on Biomechanics in Sports, UVK—Universitätsverlag Konstanz, Germany, 160-163.

Lamb, H.F., Stothart, P. (1978) Comparison of cinematographic and force platform techniques for determining take-off velocity in the vertical jump. Biomechanics VI-A, Baltimore, Md., University Park Press, 387-391.

Madsen, O. (1996). Torque, total work, power, torque acceleration energy and acceleration time assessed on a dynamometer: reliability of knee and elbow extensor and flexor strength measurements. Eur. J Appl. Physiology 74: 206-210.

Miller, D., Nelson, R. (1973). Biomechanics of Sport. Lea and Febiger Publishers, Philadelphia.

Millman, J., Grabel, A. (1987). Microelectronics. Second Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.

Nigg, B.M., Hertzog, W.(1999). Biomechanics of the musculo-skeletal system. 2nd ed., Wiley , Chichester.

Nilsson, J., Riedel, S. (2000). Electric Circuits, 6th ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River (NJ).

Oppenheim, Schafer (1999). Discrete-time signal processing, 2nd ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River (NJ).

Paaanen, M., Välimäki, H., Lekkala, J. (2000). Modelling the electromechanical film (EMFi), Journal of Electrostatics, 48, 193-204.

Paaanen, M., Lekkala, J., Välimäki, H. (2001). Electromechanical modeling and properties of the electret film EMFI, IEEE Trans. on Dielectrics EI, 8, 4, 629-636.

Sands, W., Cheetham, P. (1986). Velocity of the vault run: Junior elite female gymnasts. Technique 6, 10-14.

Sands, W., McNeal, J. (1995). The relationship of vault run speeds and flight duration to score. *Technique* 15(5), 8-10.

Sands, W., McNeal, J. (1999). Body size and sprinting characteristics of 1998 National TOP's athletes. *Technique* 19(5): 34-35.

Smith, W.(1999). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2nd ed., California Technical Publishing, California.

Takei, Y. (1990). Techniques used by elite women gymnasts performing the handspring vault at the 1987 Pan American Games. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6, 29-55.

Takei, Y. (1992). Blocking and postflight techniques of male gymnasts performing the compulsory vault at the 1988 Olympics. *International Journal of Sport Biomechanics*, 8, 87-110.

Takei, Y., Blucker, E., Dunn, H., Myers, S. and Fortney, V. (1996). A three-dimensional analysis of the men' s compulsory vault performed at the 1992 Olympic Games. *Journal of Applied Biomechanics*, 12, 237-257.

Takei, Y. (2000). The Hecht vault performed at the 1995 World Gymnastic Championships: Deterministic model and jugdes scores. *Journal of Sports Sciences* 18, 849-863.

Takei, Y., Blucker, E.P.(2003). Comparison of high&low scoring Roche Vaults. *International Journal of Sports Biomechanics*, 2, 107-125.

Virmavirta, M., Avela, J., Komi, P.V. (1995). A comparison of different methods to determine the take-off velocity in vertical jumps. XVth Congress of the International Society of Biomechanics, July 2-6, 1995, University of Jyväskylä, 972-973.

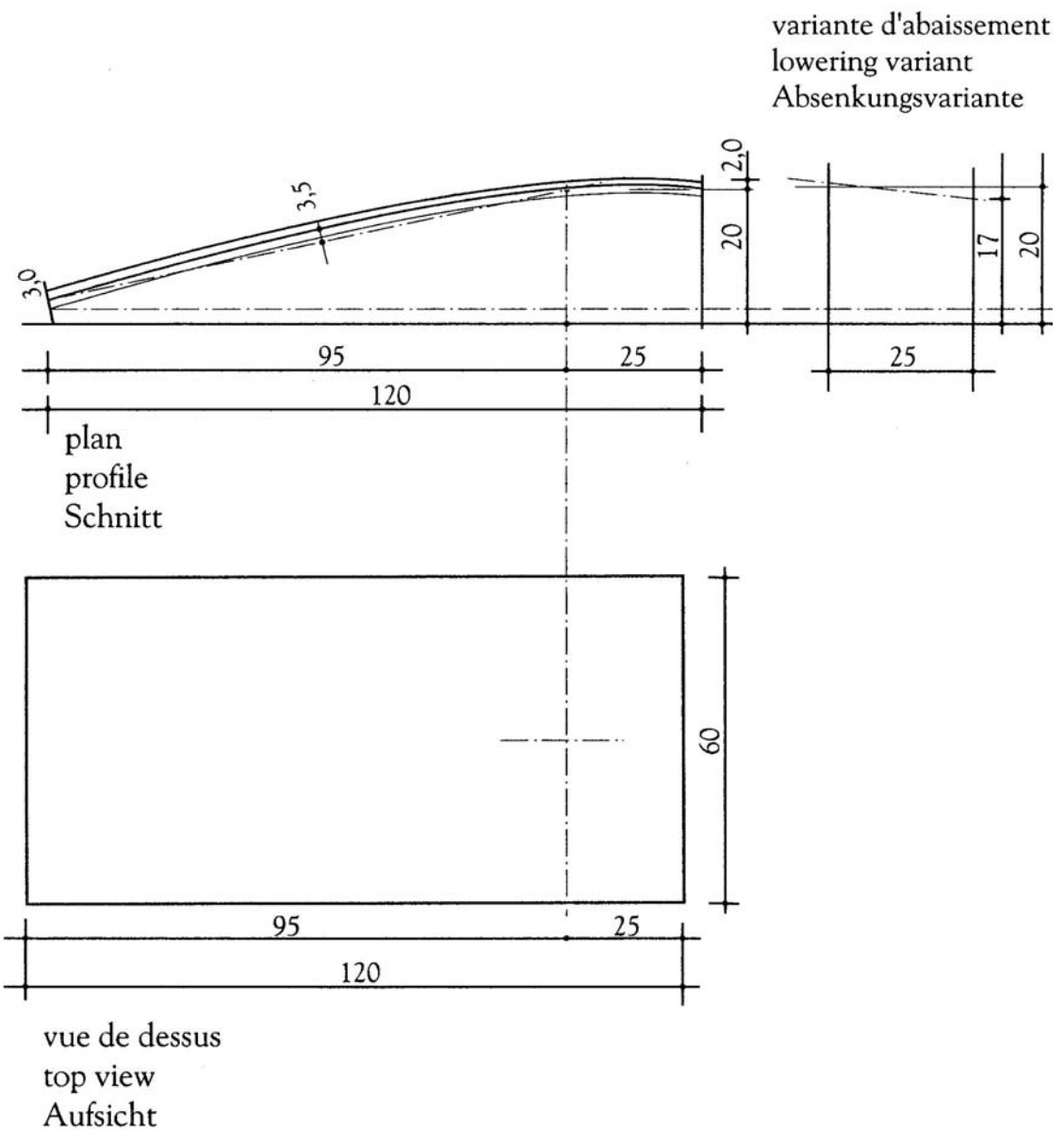
Young, H., Freedman, R. (2000). *University Physics*. 10th ed. Addison-Wesley, San Francisco.

10 LIITTEET

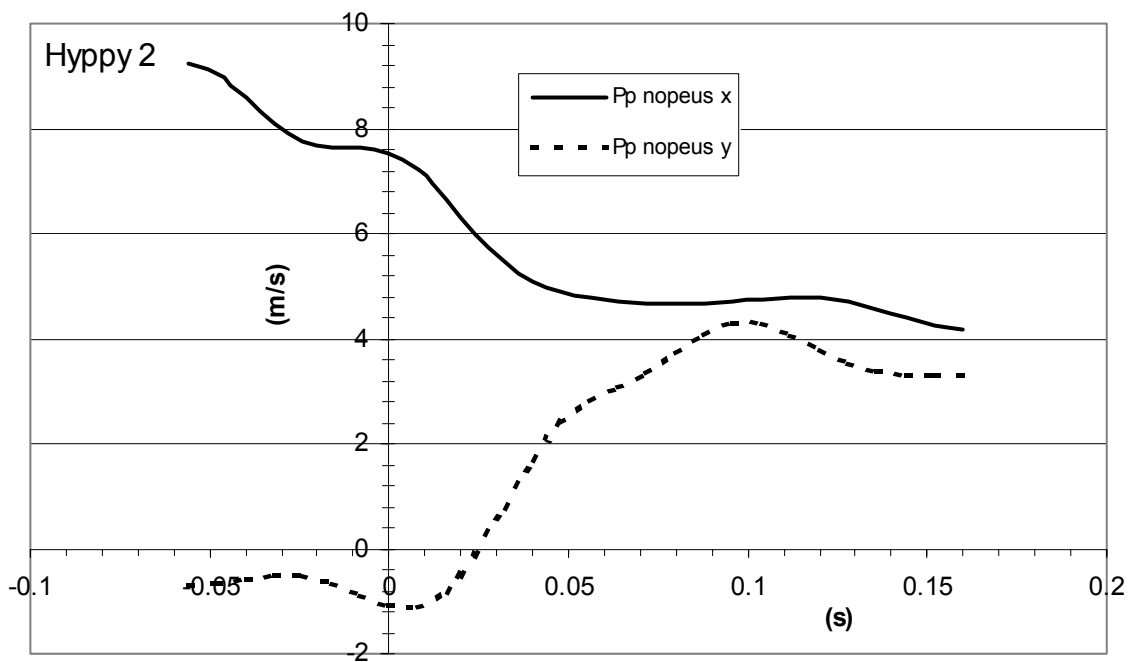
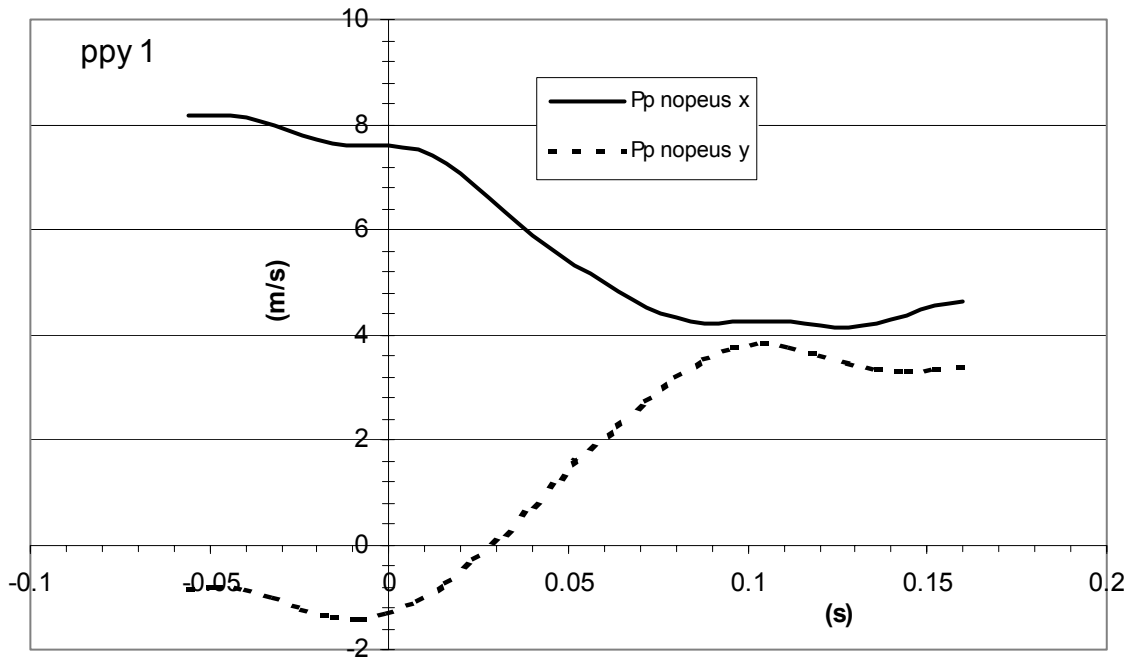
LIITE 1. Laudan tekniset mitat (FIG 2001b).

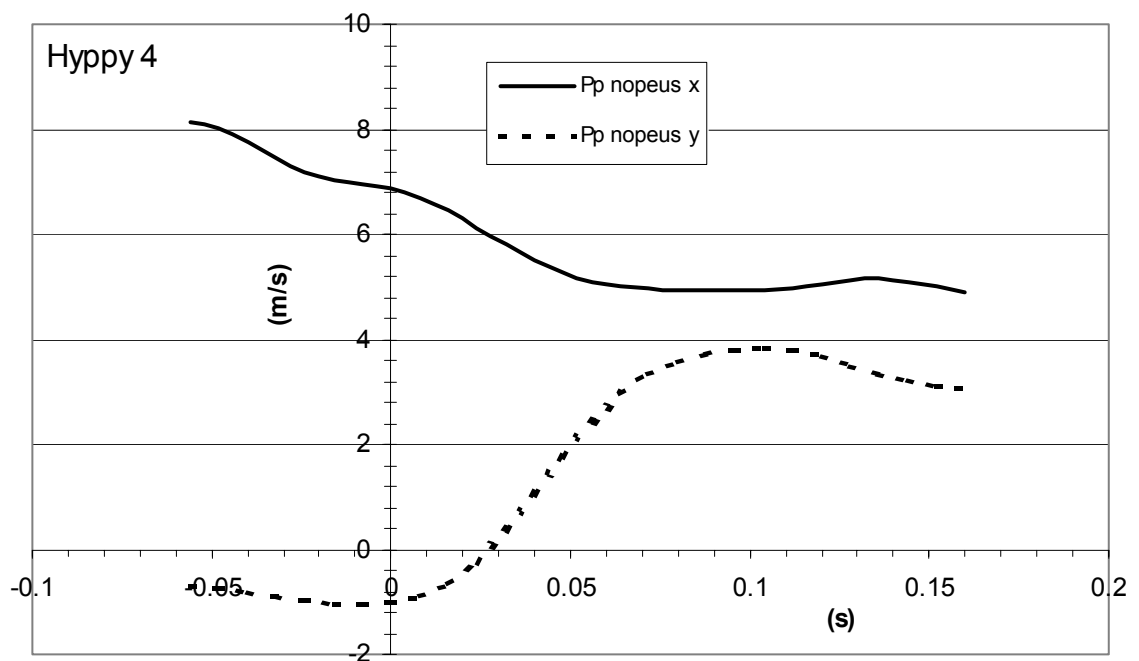
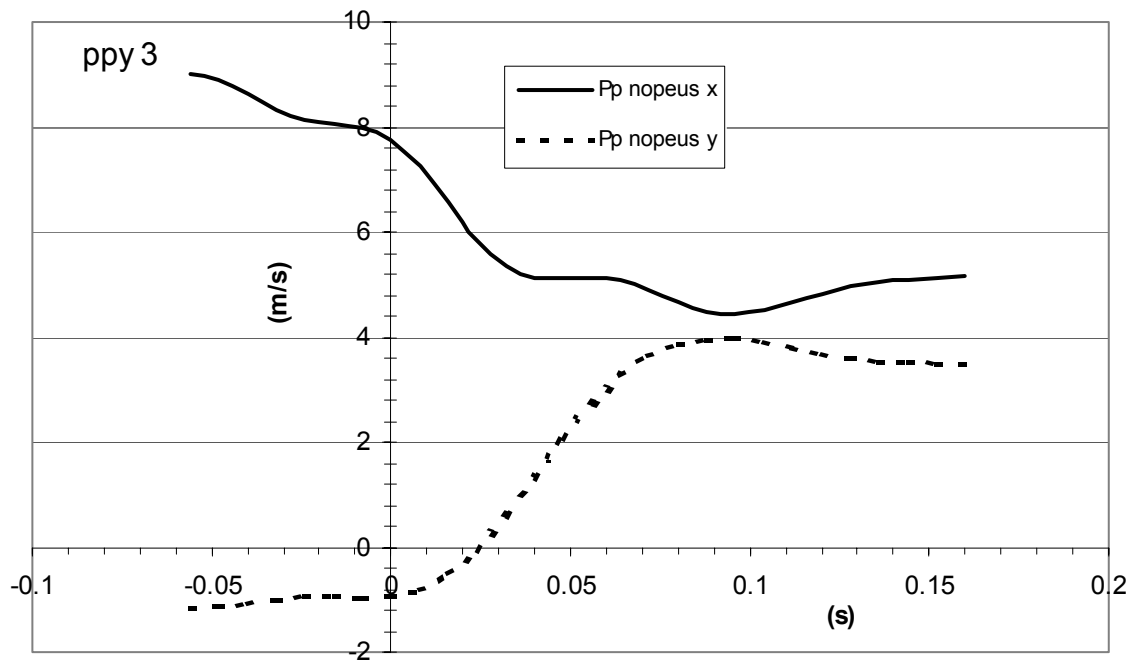
Tremplin
Springboard
Sprungbrett

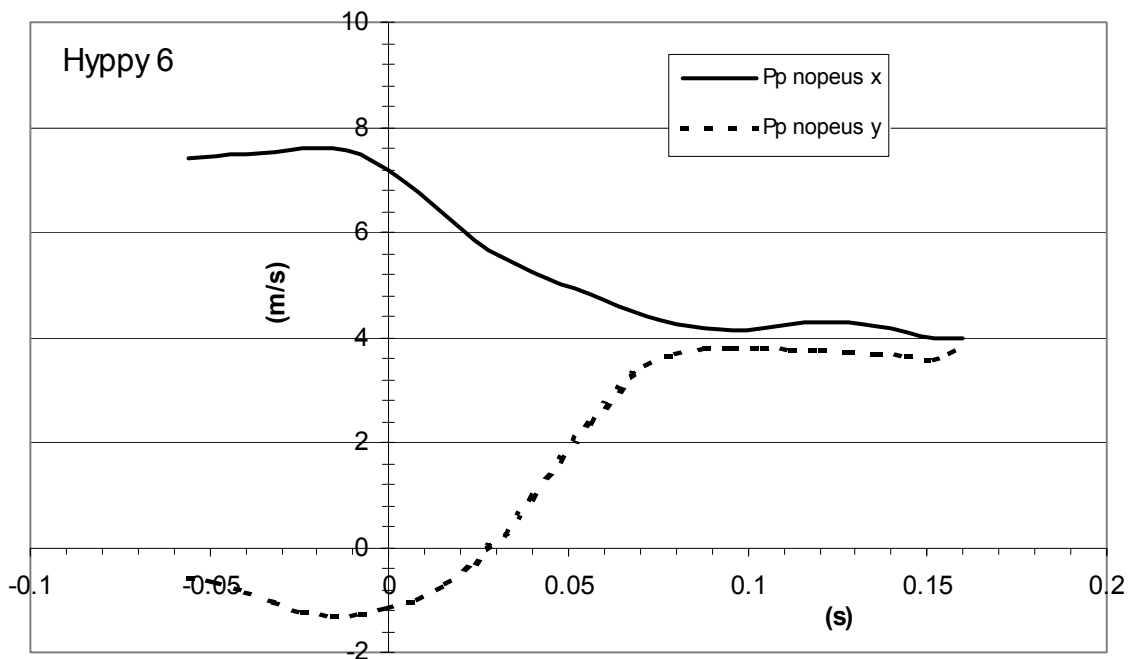
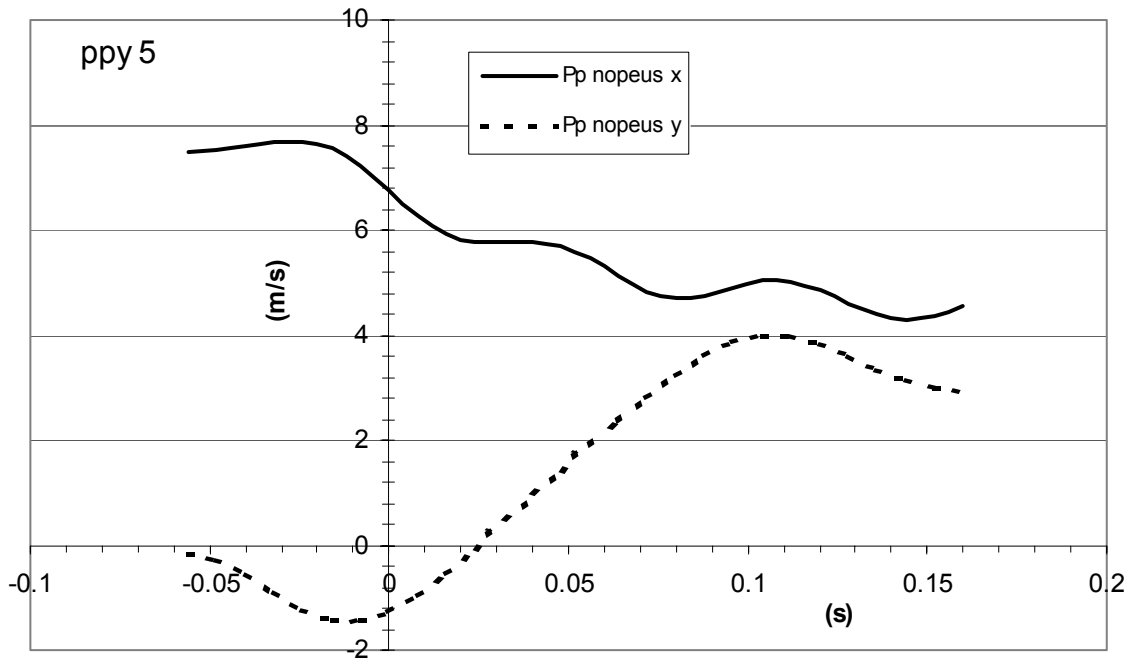
II
MAG 14
01.01.2000
36

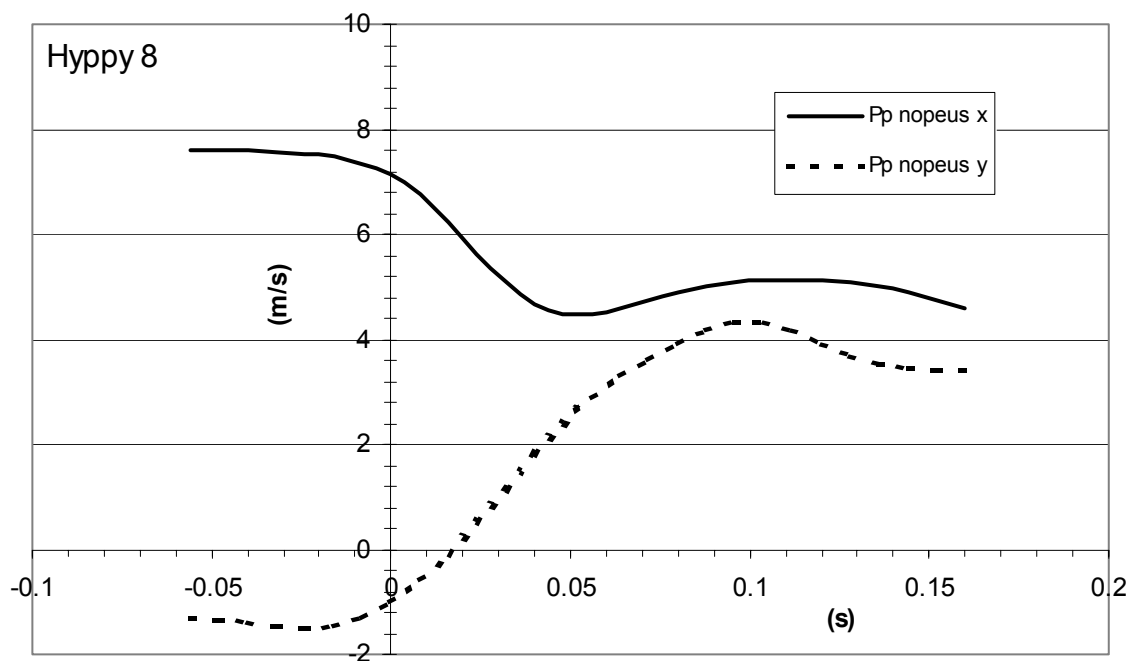
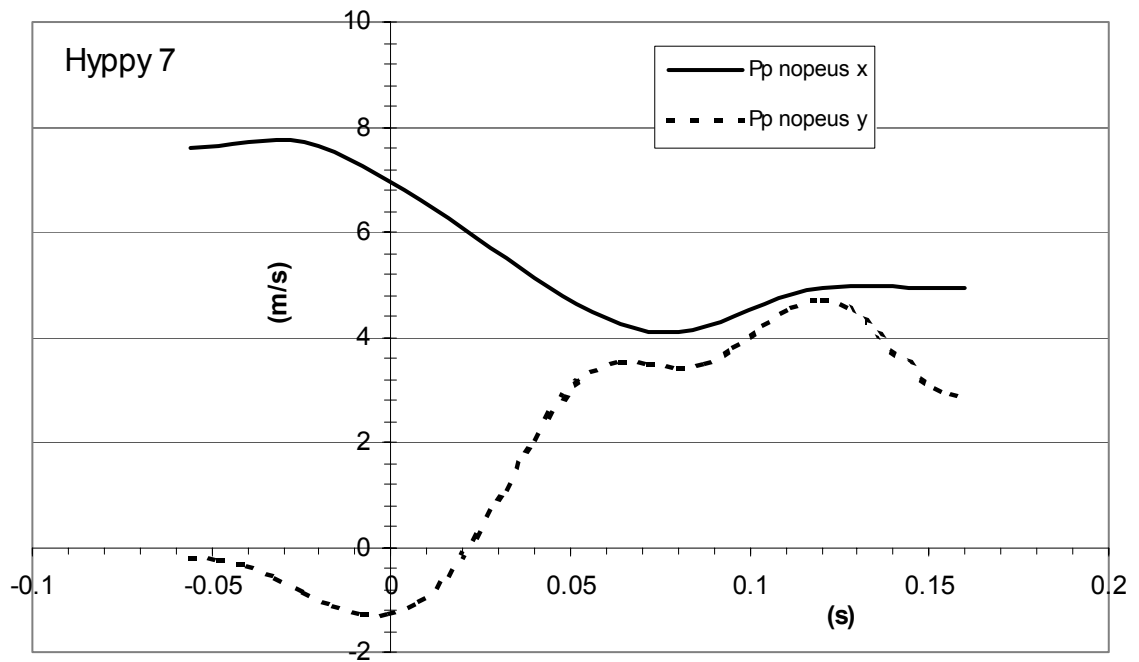


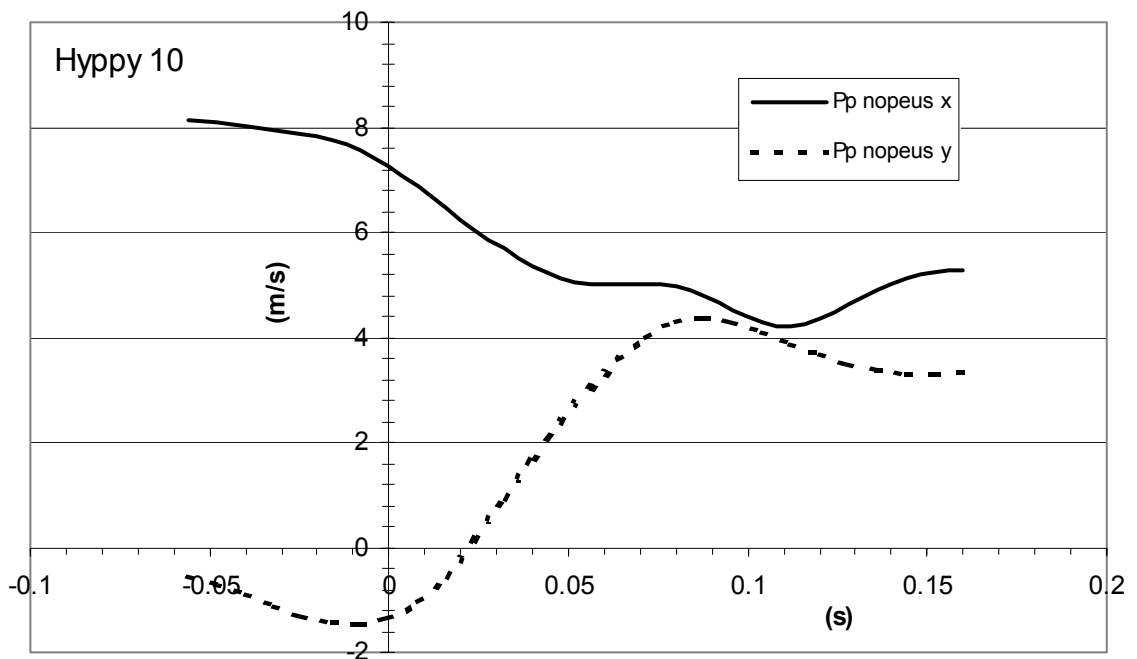
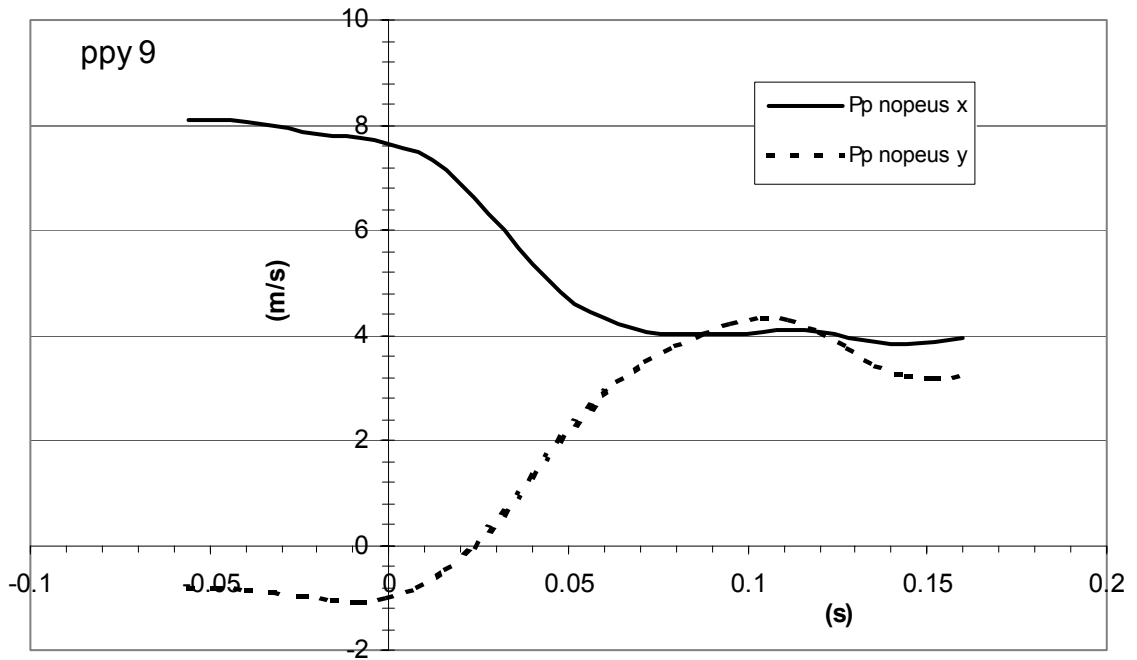
LIITE 2. Liikeanalyysillä määritetyt hyppääjän painopisteen horisontaali (x) ja vertikaali (y) nopeudet hypyistä numero 1-13.

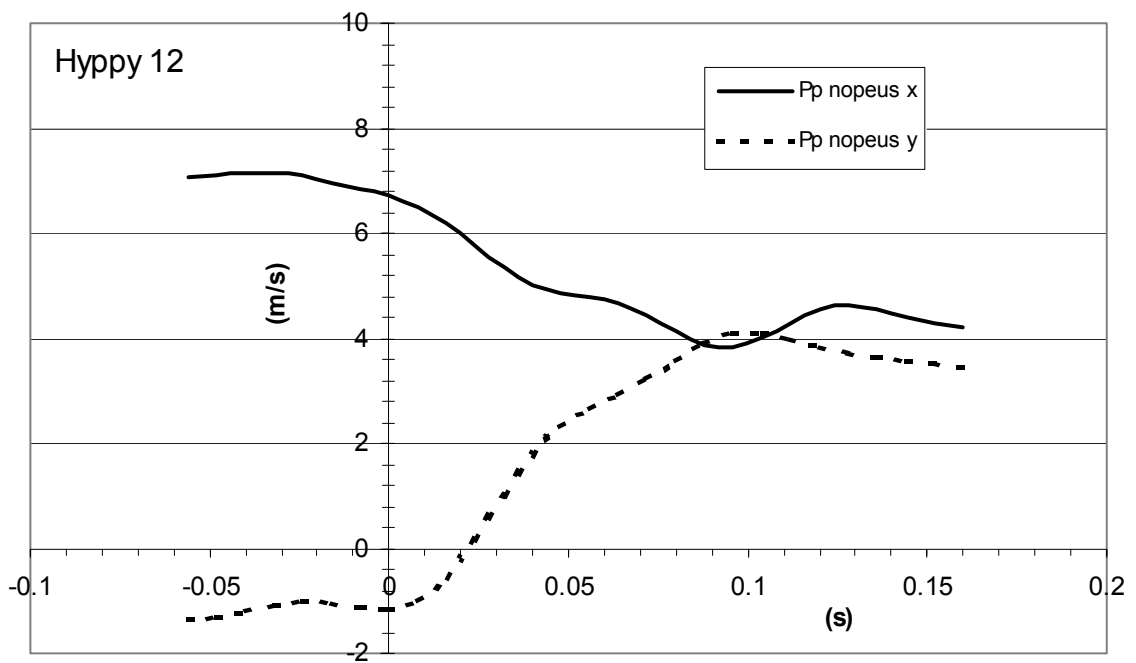
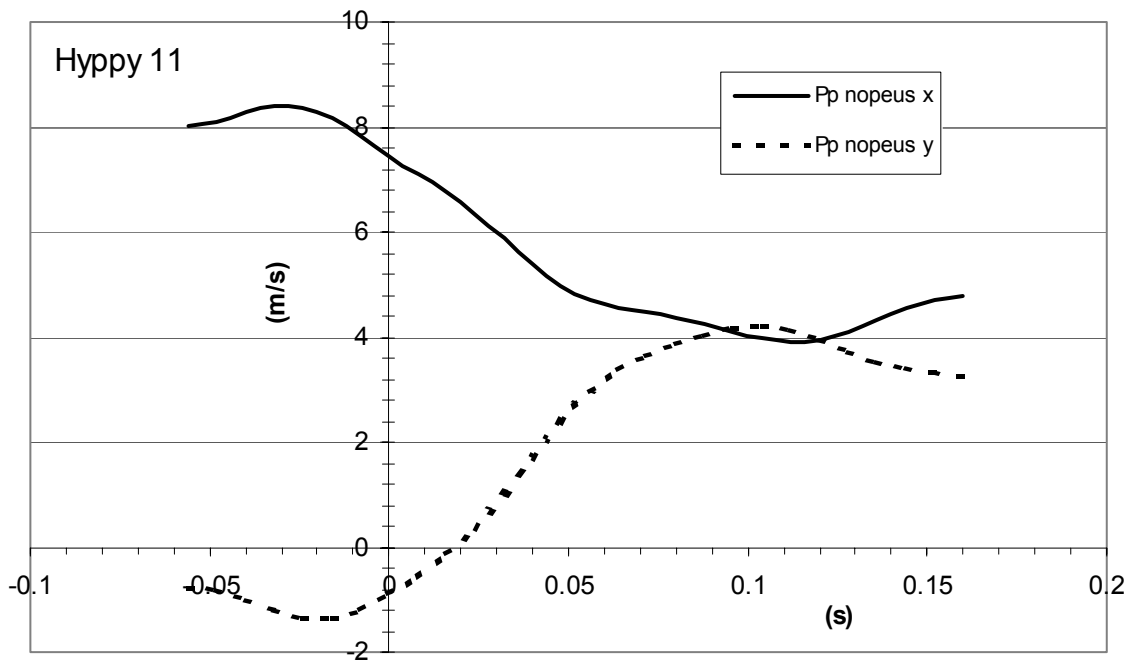


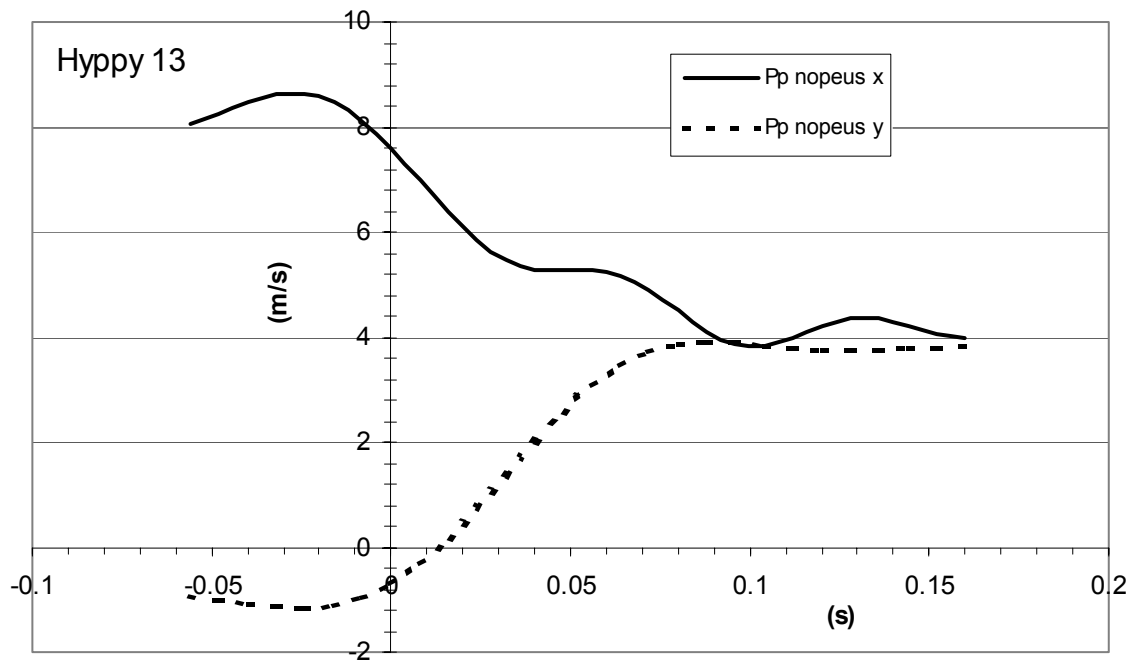












LIITE 3. EMF-kalvolla mitatut voima-aikakäyrät.

