

KIERREVOLTIN NOPEUSRAJOITUKSET

Rudolf Klemetti

Biomekaniikan kandidaatin tutkielma

Kevät 2008

Liikuntabiologian laitos

Jyväskylän yliopisto

Sisältö

1	JOHDANTO	2
2	JÄYKÄN KAPPALEEN MEKANIikka JA KIERREVOLTTI	3
2.1	Lagrangen ja Hamiltonin dynamiikka ja Eulerin yhtälöt	3
2.2	Kierrevoltin keppimalli	4
2.3	Kierteen kytkeytyminen volttiin	6
3	KIERREMEKANISMEISTA	8
3.1	Ilmakierteet	8
3.2	Kontaktikierre	9
4	LIIKEANALYYSEISTÄ	9
5	TUTKIMUSONGELMAT	11
6	MENETELMÄT JA MITTAUKSET	13
7	TULOKSET	15
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	22
9	LÄHTEET	25

1 JOHDANTO

Telinevoimistelun biomekaanisen tutkimuksen yksi päätarkoituksista on selvittää lajin yleisiä mekaanisia peruseriaatteita. Erilaisia liikkeitä tai liikesarjoja on kuitenkin satoja tai jopa tuhansia, joten niitä yhdistävien tekijöiden löytäminen on vaikeaa. Helpoin tapa saada liikkeeseen enemmän vaikeutta on lisätä siihen kierre tai voltti. Esimerkkinä tästä ovat mm. erittäin vaikeat puomilla tehtävät maaraset, joiden pohjana on kierrevoltti. Tämän työn tarkoituksena onkin etsiä kierrevoltin yleisiä peruseriaatteita.

Tutkimuksen lähtökohtana ovat puhtaasti mekaaniset seikat. Teorian ja käytännön kohdatessa huomataan, ettei kierrevoltti ole sellainen, kuin mitä se mekaniikan puitteissa voisi olla. Toisin sanoen, voimistelijat eivät tee voltteihin niin paljon kierrettä, kuin he voisivat. Mahdollisesti on niin, että kierrenopeutta rajoittaa ihmisen kyky sietää tai hallita pyörimistä. Siksi työn hypotesina onkin, että voimistelija tekee kierteet jollain vakiokeskinopeudella ja lisää voltin korkeutta saadakseen useampia kierteitä.

Tutkimus tehdään ponnistuslaudalta ja trampetilta hypättävistä volteista. Hypotesin mukaan kierteiden määrällä ja lentoajalla on yhteys; mitä pidempi lentoaika, sitä enemmän on mahdollista saada kierrettä volttiin. Mittaukset suoritetaan selkeyden vuoksi niin päin, että tutkitaan, miten kierteiden määrä vaikuttaa voltin lentoaikaan ja kontaktivoimiin. Täten tulee tehdä hiukan Teamgymmin lajiansalyysiä. Lentoaika ja kontaktivoimat mitataan ponnistuslaudan tai trampetin ja alastuloalueen alla olevalla voimalevyllä. Jos volttiin tulee enemmän korkeutta, pystysuora voima kasvaa tai mahdollisesti kontaktiaika pitenee. Matalassa voltissa tarvitaan luultavasti suuri vaakasuora impulssi kontaktin aikana, jotta voltti pyörisi nopeammin.

2 JÄYKÄN KAPPALEEN MEKANIikka JA KIERREVOLTTI

Vaikka ihminen ei ole jäykkä kappale, niin ymmärtääksemme kehon mekaniikka, on käytettävä jäykän kappaleen mekaniikkaa havainnollistamaan liikettä. Lisäksi, jäykän kappaleen mekaniikka tarjoaa mahdollisuuden tarkastella liikkeen ominaisuuksia. Kierrevoltin mekaaninen malli on jäykkä keppi. (Yeadon 1993a). Yksinkertaisuudestaan huolimatta se kuvaa hyvin volttia suorinvartaloin; mallin ennustukset ovat sopusoinnussa simulaatioiden kanssa, jotka kuvaavat hyvin havaintoja (Yeadon 1993c). Johdetaan seuraavaksi kierrevoltin liikeyhtälöt käyttäen Lagrangen ja Hamiltonin dynamiikka, joka on Newtonin mekaniikkaa huomattavasti yksinkertaisempaa ja elegantimpaa. Näin saatavien Eulerin liikeyhtälöiden avulla kierrevoltti voidaan kuvailla. Liikeyhtälöiden avulla johdetaan kierrevoltin keskeiset lausekkeet, jotka ovat tämän työn teoreettisena pohjana.

2.1 Lagrangen ja Hamiltonin dynamiikka ja Eulerin yhtälöt

Fysiikassa erilaisilla minimiperiaatteilla on pitkä historia. Nämä periaatteet perustuvat siihen, että luonto minimoi tiettyjä muuttujia fysikaalisessa prosessissa. Fermat esimerkiksi postuloi, että valo kulkee aina sellaista reittiä pitkin, mikä vie vähiten aikaa. Lähes kaiken fysiikan voi muotoilla Hamiltonin periaatteella. Hamiltonin periaate: kaikista mahdollisista reiteistä, joita pitkin dynaaminen systeemi voi kulkea pisteestä toiseen tietyssä ajassa, todellinen reitti on sellainen, mikä minimoi kineettisen ja potentiaalienergian erotuksen aikaintegraalin. Matemaattisesti esitettyä Hamiltonin periaate on muotoa

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - U) dt = 0, \quad (1)$$

missä δ on variaatiota kuvaava merkintä. Olkoon

$$L = T - U \quad (2)$$

Lagrangen funktio. Kun Lagrangen funktiolle tehdään Hamiltonin periaatteen mukainen variointi, saadaan Lagrangen liikeyhtälö

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = 0, \quad (3)$$

jossa q on yleistetty koordinaatti ja piste kuvaa aikaderivaattaa. Voltissa voimistelijaan ei vaikuta ilmalennon aikana voimia, kun tarkastellaan liikettä koordinaatistossa, joka kulkee voimistelijan mukana. Tällöin potentiaalienergia on nolla ja Lagrangen funktio saa muodon

$$L = T = \frac{1}{2} \sum_i I_i \omega_i^2, \quad (4)$$

joka on siis vain rotaatioenergioiden summa. Eli nyt Lagrangen liikeyhtälöille haetaan ratkaisu, jossa rotaatioenergiat minimoituvat. Käytetään yleistettynä koordinaattina Eulerin kulmaa ψ , jolloin Lagrangen liikeyhtälö on

$$\frac{\partial T}{\partial \psi} - \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} = 0. \quad (5)$$

Ratkaisuksi saadaan Eulerin yhtälöt:

$$\begin{aligned} (I_2 - I_3)\omega_2\omega_3 - I_1\dot{\omega}_1 &= 0 \\ (I_3 - I_1)\omega_3\omega_1 - I_2\dot{\omega}_2 &= 0 \\ (I_1 - I_2)\omega_1\omega_2 - I_3\dot{\omega}_3 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

(Marion & Thornton 1995, Whittaker 1937.)

2.2 Kierrevoltin keppimalli

Laskujen helpottamiseksi approksimoidaan, että kehon kaksi suuritna hitausmomenttia ovat yhtäsuuret;

$$I_1 = I_2 = I \quad (7)$$

Näin ollen Eulerin yhtälöt saavat muodon

$$\begin{aligned}(I - I_3)\omega_2\omega_3 - I\dot{\omega}_1 &= 0 \\ (I_3 - I)\omega_3\omega_1 - I\dot{\omega}_2 &= 0 \\ I_3\dot{\omega}_3 &= 0.\end{aligned}\tag{8}$$

Kolmannesta yhtälöstä nähdään välittömästi, että

$$\omega_3(t) = \text{vakio}.\tag{9}$$

Kaksi ensimmäistä yhtälöä voidaan kirjoittaa muotoon

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1 &= -\left(\frac{I_3 - I}{I}\omega_3\right)\omega_2 \\ \dot{\omega}_2 &= \left(\frac{I_3 - I}{I}\omega_3\right)\omega_1,\end{aligned}\tag{10}$$

missä sulkulausekkeet sisältävät samat vakiot, joten voidaan merkitä, että

$$\Omega = \frac{I_3 - I}{I}\omega_3,\tag{11}$$

Nämä kaksi toisiinsa kytkettyä differentiaaliyhtälöä voidaan ratkaista kertomalla jälkimmäinen yhtälö imaginaariyksiköllä ja laskemalla yhtälöt yhteen, jolloin

$$(\dot{\omega}_1 + i\dot{\omega}_2) - i\Omega(\omega_1 + i\omega_2) = 0.\tag{12}$$

Määritellään, että

$$\eta = \omega_1 + i\omega_2,\tag{13}$$

siten

$$\dot{\eta} - i\Omega\eta = 0, \quad (14)$$

jonka ratkaisu on

$$\eta(t) = Ae^{i\Omega t}, \quad (15)$$

josta Eulerin kaavaa apuna käyttäen saadaan, että

$$\omega_1(t) = A \cos \Omega t \quad (16)$$

$$\omega_2(t) = A \sin \Omega t.$$

Tämä on ympyrän parametriesitys. Koska ω_3 on vakio, niin myös kokonaiskulmanopeusvektorin $\vec{\omega}$ itseisarvo on vakio;

$$\omega = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2} = \sqrt{A^2 + \omega_3^2}. \quad (17)$$

Siis $\vec{\omega}$ prekessoi kehon pituusakselin ympäri vakiokulmanopeudella Ω . (Marion & Thornton 1995.)

2.3 Kierteen kytkeytyminen volttiin

Keppimallia vastaavista Eulerin yhtälöistä (8) nähdään, että jos kulmanopeus on kehon jonkin pääakselin suuntainen, ei kierrettä muodostu; voltti pysyy volttina. Siksi kulmanopeudelle täytyy tuottaa toinen komponentti. Ponnistusvaiheessa tämä on helppo tehdä, mutta se on mahdollista myös ilmalennon aikana, kallistamalla kehoa esim. epäsymmetrisellä käsien liikkeellä (Yeadon.1993c). Kuvataan kallistumista kulmalla θ , joka määritellään kehon pituusakselin ja kiinteän pystyakselin välisenä kulmana. Voltin pyörimisnopeus \vec{V} määritellään kiinteän vaaka-akselin suhteen tapahtuvana pyörimisenä. Kierrenopeus \vec{K} on kehon pituusakselin suhteen tapahtuvaa pyörimistä, kuitenkin erisuuruinen kuin ω_3 . Toisin sanoen

$$\vec{\omega} = \omega_1 \hat{e}_1 + \omega_3 \hat{e}_3 = \vec{V} + \vec{K}. \quad (18)$$

Tässä tarkastellaan siis hetkeä, jolloin $\omega_2 = 0$. Näin voidaan tehdä ympyräliikkeen johdosta.

Kallistumisen seurauksena liikemäärämomentin komponentit ovat

$$\begin{aligned} L_1 &= L \cos \theta \\ L_2 &= 0 \\ L_3 &= L \sin \theta. \end{aligned} \quad (19)$$

Tästä saadaan, että

$$\frac{L_3}{L_1} = \frac{I_3 \omega_3}{I \omega_1} = \tan \theta. \quad (20)$$

Koska

$$\begin{aligned} \omega_1 &= V \cos \theta \\ \omega_3 &= K + V \sin \theta, \end{aligned} \quad (21)$$

niin tämän ja yhtälön (20) nojalla saadaan, että

$$K = V \left(\frac{I}{I_3} - 1 \right) \sin \theta, \quad (22)$$

josta saadaan kierteiden määrä yhtä voltia kohden eri hitausmomenttien ja kallistuskulman arvoilla. Jos tehdään voltti suorinvartaloin, suhde $\frac{I}{I_3} = 12,65$, kun käytetään Yeadonin määrittämiä neljän trampoliinivoimistelijan keskimääräisiä hitausmomentteja (Yeadon 1993d.) Tällöin 20 asteen kallistuminen tuottaa 5,8 kierrettä volttiin. Kierteen synnyttäminen hidastaa voltin nopeutta vain noin kaksi prosenttia (Yeadon 1993c.) Hidastuminen johtuu siitä, että I_1 on hiukan pienempi kuin I_2 , ja kun kumpikin on kierteestä johtuen vuorollaan voltin pyörimisen hitausmomenttina.

3 KIERREMEKANISMEISTA

3.1 Ilmakierteet

Ilmassa tuotetut kierteet voidaan jakaa kahteen ryhmään, kierre ilman liikemäärämomenttia ja liikemäärämomentillinen kierre. Ensimmäiseen ryhmään kuuluu se, kun kissa pystyy kääntämään itsensä ja laskeutumaan jaloilleen, vaikka ennen ilmalentoa se ei pyörinyt mihinkään suuntaan eli liikemäärämomentti oli nolla. Teoreettiset tutkimukset astronauttien pyörimisestä osoittavat, että myös ihminen pystyy tuottamaan tuollaisia kehon segmenttien liikkeisiin perustuvia kierteitä. (Yeadon 1993c.) Kutsuttakoon näitä vastakiertokierteiksi, koska jonkun segmentin kierto tasapainottaa jonkun muun kehon osan vastakkaisella kierrolla - jotta kokonaisliikemäärämomentti säilyisi. Vastakiertokierteitä voi tuottaa esim. käsillä tai lonkan kierrolla. Lonkan kiertäminen vaatii koko muun kehon vastakiertoa. Kokeet osoittavat, että näin voidaan tuottaa ainakin puoli-toista kierrettä. Mutta kaikenkaikkiaan vastakiertomekanismit ovat varsin tehottomia kierteen tuottajia, koska kierre jatkuu vain niin pitkään, kuin vastakiertoja voidaan jatkaa. (Yeadon 1993c.)

Liikemäärämomentillinen ilmakierte tarkoittaa sitä, että pyörimistä tapahtuu entuudestaan jo johonkin suuntaan. Käytännössä tämä tarkoittaa kierrettä voltin yhteydessä, jolloin voltin liikemäärämomenttia käytetään kierteeseen. Vastakiertokierteet voi siis tuottaa ilman volttiakin, mutta ne voidaan toki tuottaa myös voltin aikana. Kutsuttakoon liikemäärämomentillisiä kierteitä kallistuskierteiksi, koska kierteen tuotto vaatii kehon kallistamista. Mitä enemmän kallistusta saadaan aikaan, sitä enemmän kierrettä tuotetaan, vrt. yhtälö (22). Kallistuminen saadaan tuotettua käsien tai lonkan epäsymmetrisillä liikkeillä sekä rintakehän tai hartioiden kierroilla. Simulointien mukaan 20 asteen kallistuskulmalla voidaan luoda lähes kuusi kierrettä yhtä volttia kohden. (Yeadon 1993c.) Liikemäärämomentti säilyy, vaikka kierre syntyykin: Kallistuminen ei tule itsestään, vaan esim. käsien rotaation liikemäärämomentti tasapainottaa kallistumisen, jolloin niiden yhteinen liikemäärämomentti on nolla. On muistettava, että liikemäärämomentti on vektori, joten sillä on avaruudellinen suunta, ei vain suuruus. Kallistuksen vuoksi voltissa on erisuuntaisia vektoreita tasossa; kierre ja itse voltti, joiden vek-

torisumma on edelleen kierteettömän voltin liikemäärämomentti

Tehtäessä voltti suorinvartaloin mahdollinen kallistusmekanismi on käden abduktio sivusuuntaan. Edelleen simulointien mukaan, näin saadaan noin kahdeksan asteen kallistus ja siten noin kaksi ja puoli kierrettä voltia kohden. Jos vartaloa taitetaan eteenpäin ja käsien ollessa vaakatasossa sivulla, tehokas kallistusmekanismi on kiertää rintakehää. Edelleen, jos vartalo on taitossa, lonkan kierrolla saadaan kallistuskulmaa lisättyä. (Yeadon 1993c.)

Kun kallistuskierte tuotetaan, se jatkuu niin kauan, kunnes se pysäytetään. Pysäyttäminen tapahtuu kallistuksen poistolla, joka onnistuu samoin keinoin kuin kallistuksen tuotto. (Yeadon 1993c.) Kallistuskulma täytyy poistaa senkin vuoksi, että esim. trampoliinilla laskeutuminen on vaikeaa vinossa asennossa (Yeadon 1993d). Samoin uimahyppääjään tulee sukeltaa veteen pystyasennossa (Yeadon 1993e).

3.2 Kontaktikierre

Kontaktikierteellä tarkoitetaan kierrettä, joka tuotetaan voltin ponnistuksen aikana. Kierre synnytetään kehon segmenttien liikkeillä toistensa suhteen. Tällöin liikemäärää siirtyy segmentistä toiseen. Valittavana on muutama mekanismi. Niiden tehokkuus riippuu siitä, minkä suuruisia voimistelijan hitausmomentit ovat toistensa suhteen.

Liikuttamalla käsiä vaakasuoralla tasolla kehon pituusakselin suhteen saadaan tuotettua kokonainen kierre. Toinen vaihtoehto on pyörittää rintakehää, kun muu keho on paikallaan. Tehokkain tapa on pyörittää koko kehoa pituusakselin suhteen. Tämä tapa on kaksi kertaa tehokkaampi keino kuin käsien liikuttaminen.

Hitaatkin liikkeet tuottavat paljon kierrettä, mutta liikkeiden oikea-aikaisuus on tärkeää kierteen onnistumiseksi. Käsien liike aiheuttaa kehoon epäsymmetrian, nutaation, joka kasvattaa kallistuskulmaa ja siten kierrenopeutta. (Yeadon 1993b.)

4 LIIKEANALYYSSEISTÄ

Eri lajeissa kierteitä tuotetaan yleisimmin käsien epäsymmetrisellä liikkeellä; sen osuus on suurin kaikista kierremekanismeista. Kierteet tuotetaan suurimmaksi osaksi ilmassa,

mutta erot eri voimistelijoiden tai uimahyppääjien välillä ovat suuria. (Yeadon 1993c.) Kokonaiskierteeseen vaikuttaa se, että joidenkin tekniikka on sellainen, että jotkut kehon segmentit hidastavat liikkeellään kierrettä. (Yeadon 1993e.) Kontaktikierteen osuus kasvaa, mitä aiemmin kierre tehdään volttiin (Yeadon 1993.) Tutkittaessa uimahyppääjiä yhden ja kolmen metrin ponnauslaudalta keskimäärin he tuottivat noin 20 asteen kallistuskulman, josta kontakikierteen osuus vaihteli kolmesta kolmeentoista asteeseen (Yeadon 1993e). Tutkittaessa kuutta kolmoisvolttia kolmella tai neljällä kierteellä kaksi koehenkilöä tuotti kaiken kierteen kontaktin aikana, kaksi kaiken ilmassa ja kaksi kummassakin yhtä suuret osuudet. Rekiltä tehtävässä voltissa yhdellä kierteellä kontaktikierteen osuus on havaittu olevan alle kolmasosa. (Yeadon 1993c.)

Liikeanalyysi on tehty Alex Artemevin tekemälle erittäin harvinaiselle nelikierteiselle voltille volttsuoralla, minkä hän kykenee tekemään myös permannolla. Sitä verrattiin hänen kolmikierteiseen volttiin. Teknisesti voltit olivat samanlaiset. Nelikierteinen voltti oli korkeampi ja hän lähti ilmaan aiemmin kuin kolmessa kierteessä. Nelikierteinen voltti oli vain kolmikierteinen voltti yhdellä kierteellä lisättynä, ja koska kolmannen kierteen jälkeen oli enää hyvin vähän aikaa käytettävissä, voltista täytyi tehdä korkeampi, jotta aikaa olisi enemmän. Tikku-ukkokuvien perusteella kierteiden nopeus on varsin tasainen. (Sands ym. 2006.)

5 TUTKIMUSONGELMAT

Tutkimuksen pääasiallinen ongelma liittyy kierrenopeuteen voltissa. Kierrevoltin mekaniikka on mielenkiintoinen siinä mielessä, että jos voltin pyöriminen nopeutuu, niin myös kierre on samassa suhteessa nopeampi. Kierteen nopeus riippuu vain kehon kallistuskulmasta ja hitausmomenteista. Liikeanalyysien mukaan esimerkiksi trampoliinivoimistelijat ja uimahyppääjät pystyvät kallistamaan kehoaan voltin aikana niin paljon, että kuusikierteinen voltti olisi mahdollista. Näin ei ainakaan telinevoimistelussa tapahdu. Kierteen ja voltin kytkeytymisen vuoksi permannolla pitäisi pystyä tekemään yhtä monta kierrettä kuin vaikkapa trampoliinilla. Käytännössä trampoliinilla saa volttiin enemmän kierteitä kuin permannolla. Kierrenopeus näyttäisi noudattavan jotain muuta lainalaisuutta, ja sitä näyttäisi vielä rajoittavan jokin tuntematon tekijä, koska voimistelijat eivät tee niin paljon kierteitä, kuin mitä mekaniikka sallisi.

Jos tehdään pelkkä voltti, pyörimisnopeuteen vaikuttavat tekijät ovat selviä. Nimitetään jos suoritetaan juoksuvaihtinen voltti, juoksuvauhti määrää voltin nopeuden, edellyttäen, että voimistelija kykenee hyödyntämään vauhdin ponnistuksen aikana. (King & Yeadon 2004.) Volttiin ei näytä siis liittyvän sellaisia rajoitteita kuin kierteeseen, sillä voimistelijat tekevät voltteja niin nopeasti, kuin vain pystyvät pyörimistä tuottamaan.

Tuleeko kierteissä vastaan ihmisen kyky sietää tai hallita pyörimistä? Kierteiden nopeudet ovat huomattavasti suurempia kuin volttien nopeudet, hitausmomenttien suuruuseroista johtuen, joten siksi mahdollinen pyörimisen sietokyky ei vaikuta volttien nopeuksiin, lyhyistä suoritusajoista puhuttaessa. Tässä tutkimuksessa voidaan vain spekuloida syitä kierrenopeuden rajoituksiin, mutta voidaan mitata kierrenopeuksia eri tilanteissa ja etsiä ilmiön taustalla olevaa lainalaisuutta.

Edellisen perusteella hypoteesina on, että maksimikierrenopeus on kullakin voimistelijalla sama esimerkiksi permannolla ja trampoliinilla, mutta lentoaikojen eroista johtuen kierteiden määrä on eri. Toisin sanoen, kierteiden määrä on suoraan verrannollinen lentoaikaan. Tämän vuoksi hypoteesina on myös, että lisättäessä kierteiden määrää, täytyy tehdä korkeampi voltti.

Lyhyemmällä lentoajalla on tietysti jokin vaikutus kierteen tuottamiseen käytet-

tävissä olevaan aikaan. Uimahyppäjille tehdyistä liikeanalyyseistä näkee, että voltin aikana on erittäin nopeita kierteentuottohetkiä (Yeadon 1993e), joten ei lyhentynyt lentoaika pitäisi olla kovin suuri ongelma. Ja vaikka kierrettä ei ehtisi ilmassa niin paljon tehdä, niin sen voi korvata tekemällä suuremman kontaktikierteen.

Tutkimukseen liittyy myös menetelmällinen ongelma; tehtävillä mittauksilla pyritään selvittämään, pystytäänkö trampetin voimamittausten avulla laskemaan lähtönopeudet. Onnistuminen riippuu siitä, miten hyvin trampetti noudattaa lineaarista, vaimennettua värähtelijää. Jos voimistelijat pysyvät kontaktin aikana riittävän jäykkinä, niin se helpottaa voima-analyysiä, muutoin analyysi voi olla mahdoton ilman lisämittauksia. Apuna trampetilla ja ponnistuslaudalla voidaan käyttää tietoa, että permantovolteissa massakeskipisteen alin paikka ponnistuksessa on ajallisesti voimakäyrällä törmäyspikkin jälkeisen lokaalin minimin kohdalla (Miller & Nissinen 1987). Joka tapauksessa, kontaktivoimien muutokset erilaisten volttien välillä kyetään näkemään.

6 MENETELMÄT JA MITTAUKSET

Suoritetaan mittaukset Hippos-hallin voimalevyä käyttäen. Asetetaan ponnistuslauta tai trampetti ja alastulomatto voimalevyn päälle, jolloin juoksuvauhdista tehtyjä hypyjä voidaan analysoida ponnistuksesta alastuloon saakka. Käytetään tutkimuksessa kokeneita telinevoimistelijoita. Koehenkilöinä toimii kaksi Jyväskylän voimistelijoiden miesten 1-ryhmän voimistelijaa, J ja S.

Mitataan jokaisessa hypyssä voiman kaikki komponentit (keräystaajuus 1kHz) ja määritetään siten voiman impulssi kaikissa suunnissa. Voimamittausten avulla määritetään lentoaika ja ponnistuksen kontaktiaika. Kuvataan suoritukset 50 Hz:n videokameralla volttien teknistä tarkastelua varten; lasketaan kierteet ja poistetaan tuloksista mahdolliset epäonnistuneet hypyt. Sijoitetaan kamera niin, että nähdään sivusta voltti ponnistuksesta alastuloon. Alkuverryttelynä voimistelijat tekevät vapaavalintaista lämmitteilyä sekä voltteja ponnistuslaudalta sekä trampetilta valmistautuen mittaukseen. Voimistelijat punnitaan voimalevyllä.

Kaikki voltit tehdään suorinvartaloin eteenpäin, voimistelijoiden vapaavalintaisella juoksuvauhdilla. Ensin kumpikin tekee ponnistuslaudalta volttiin yhden kierteen, sitten puolitoista, kaksi ja mahdollisesti enemmän päättyen maksimikierteisiin, kullakin kierremäärällä kolme suoritusta. Sen jälkeen trampetilta tehdään samalla periaatteella maksimi ja siitä puoli kierrettä vähemmän olevat voltit.

Voimadata kerätään tietokoneella Signal -ohjelmistoa käyttäen. Määritetään ensin lentoajat. Esitetään graafisesti kunkin voimistelijan lentoajat kierteiden määrän funktiona. Sovitetaan pistejoukkoon pienimmän neliösumman suora, jonka avulla tarkastellaan lentoajan ja kierteen määrän välistä riippuvuutta.

Voiman impulssit lasketaan integroimalla;

$$I_i = \int_{t_1}^{t_2} F_i(t) dt. \quad (23)$$

Integroimisrajat riippuvat siitä, mille aikavälille impulssi lasketaan. Pystyvoiman posi-

tiivisen työn vaiheesta määritettävästä impulssista lasketaan lähtönopeus seuraavasti;

$$v_0 = \frac{I_{z+}}{m}, \quad (24)$$

missä m on voimistelijan massa. Tasaisesti kiihtyvän liikkeen kinematiikasta saadaan yhtälö lentoajalle;

$$h_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 = 0, \quad (25)$$

jonka ratkaisu löydetään toisen asteen yhtälön ratkaisukaavasta

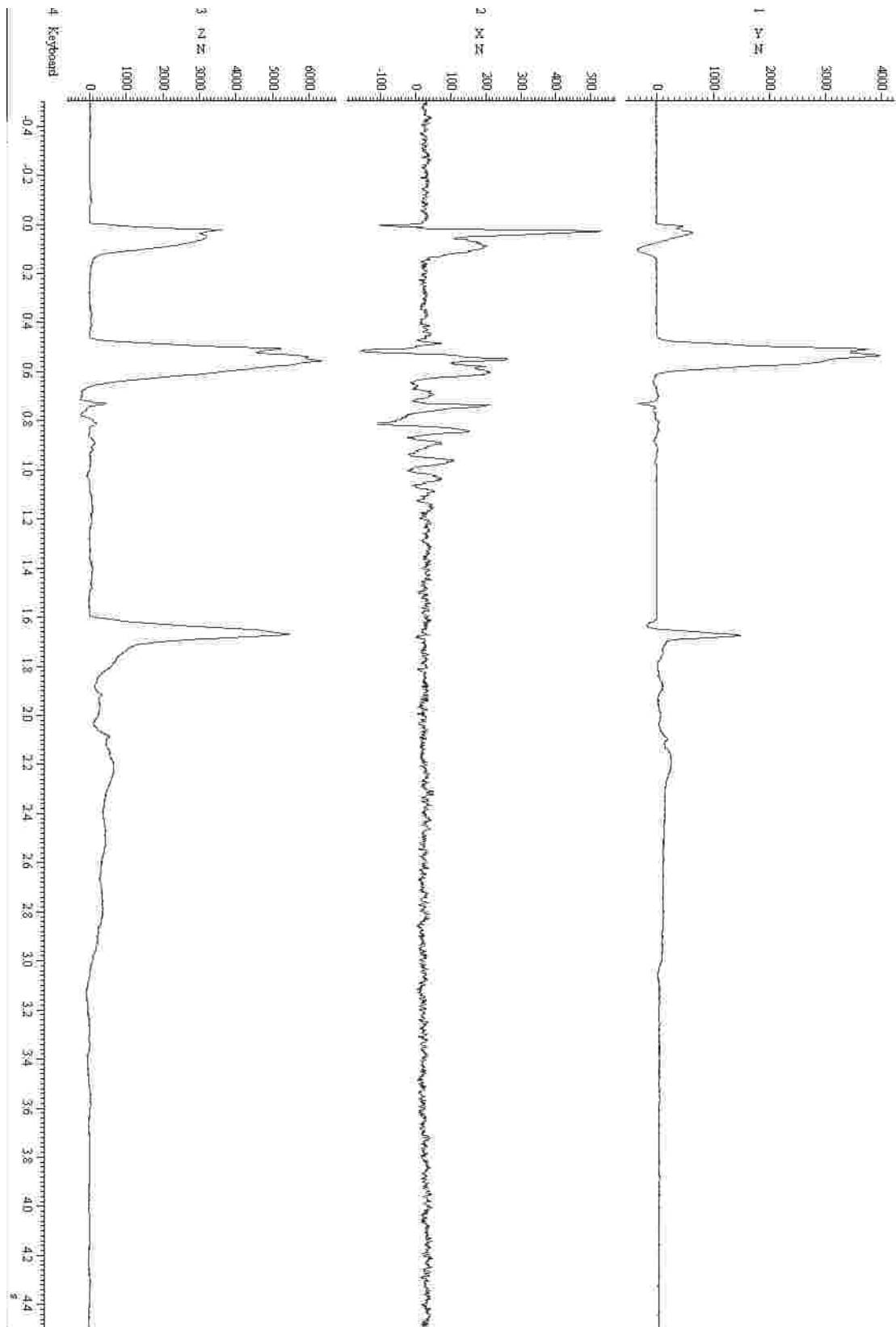
$$t = \frac{v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2gh_0}}{g}. \quad (26)$$

h_0 on trampetin keskikohdan korkeus alastulomaton pinnasta mitattuna. Laskettua lentoaikaa verrataan mitattuun lentoaikaan.

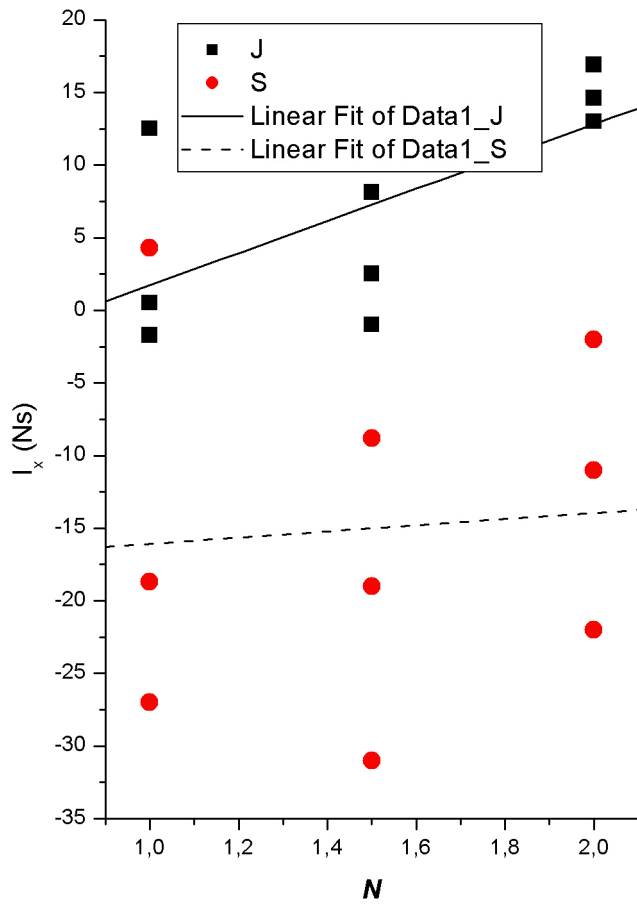
7 TULOKSET

Voimalevyllä mitattuna J:n paino on 800 N ja S:n 623 N. Jokaisen suorituksen impulssit ja lentoajat näkyvät Taulukossa 1 ja esimerkki voimadatasta on Kuvassa 1. Lentoajan virheeksi arvioidaan 10ms, mikä johtuu voimalevyn nollatason heittelystä ja arviointivirheistä. Ponnistuslaudalla kierteiden määrän N ja lentoajan t välillä on korrelaatio J:lle $r = 0,97$ ($p < 0,0001$) ja S:lle $r = 0,88$ ($p = 0,002$), Kuva 3. Vastaavasti N :n ja I_x :n välillä $r = 0,66$ ($p = 0,054$) ja $r = 0,08$ ($p = 0,84$), Kuva 2. Korrelaatio t :lle ja I_z :lle on J:lle $r = 0,97$ ($p < 0,0001$) ja S:lle $r = 0,88$ ($p = 0,002$), ja vastaavasti t :lle ja I_y :lle $r = 0,96$ ($p = 0,0001$) ja $r = 0,88$ ($p = 0,002$). Kierteen tekeminen alkoi ilmassa ainoastaan kaikissa yhden kierteen volteissa sekä ponnistuslaudalta volteissa J1,5 1, J1,5 2 ja S1,5 1, muuten kierre aloitettiin jo ponnistuksessa. J ei uskaltanut tehdä trampetilta usempaa kierrettä peläten voltin lähtevän liian sivuun. S:n kertoman mukaan ponnistukset olivat lopussa maksimaalisia.

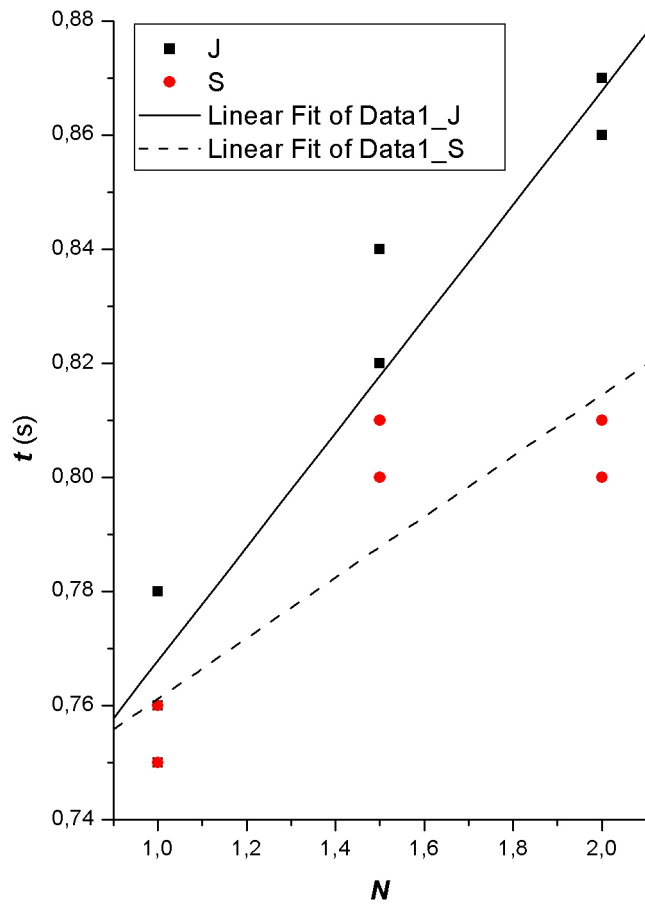
Ponnistuslaudan ja trampetin voimakäyrät poikkesivat oleellisilta osiltaan permantovolttien vastaavista, joten lähtönopeuksia ei voinut määrittää sitä kautta, Kuvat 4 ja 5. Positiivinen työvaihe alkaa ajallisesti luultavasti maksimivoiman tienoilla; tästä lasketut lentoajat ovat lähellä mitattuja aikoja. J:n kohdalla jo maksimivoimankin määrittäminen on vaikeaa, sillä useasta hänen suorituksestaan katosi dataa mittauskonfiguraatioiden liian pienen mittausalueen vuoksi. Voimakäyrät eri suoritusten välillä olivat hyvin erilaisia, joten niiden vertailu on vaikeaa.



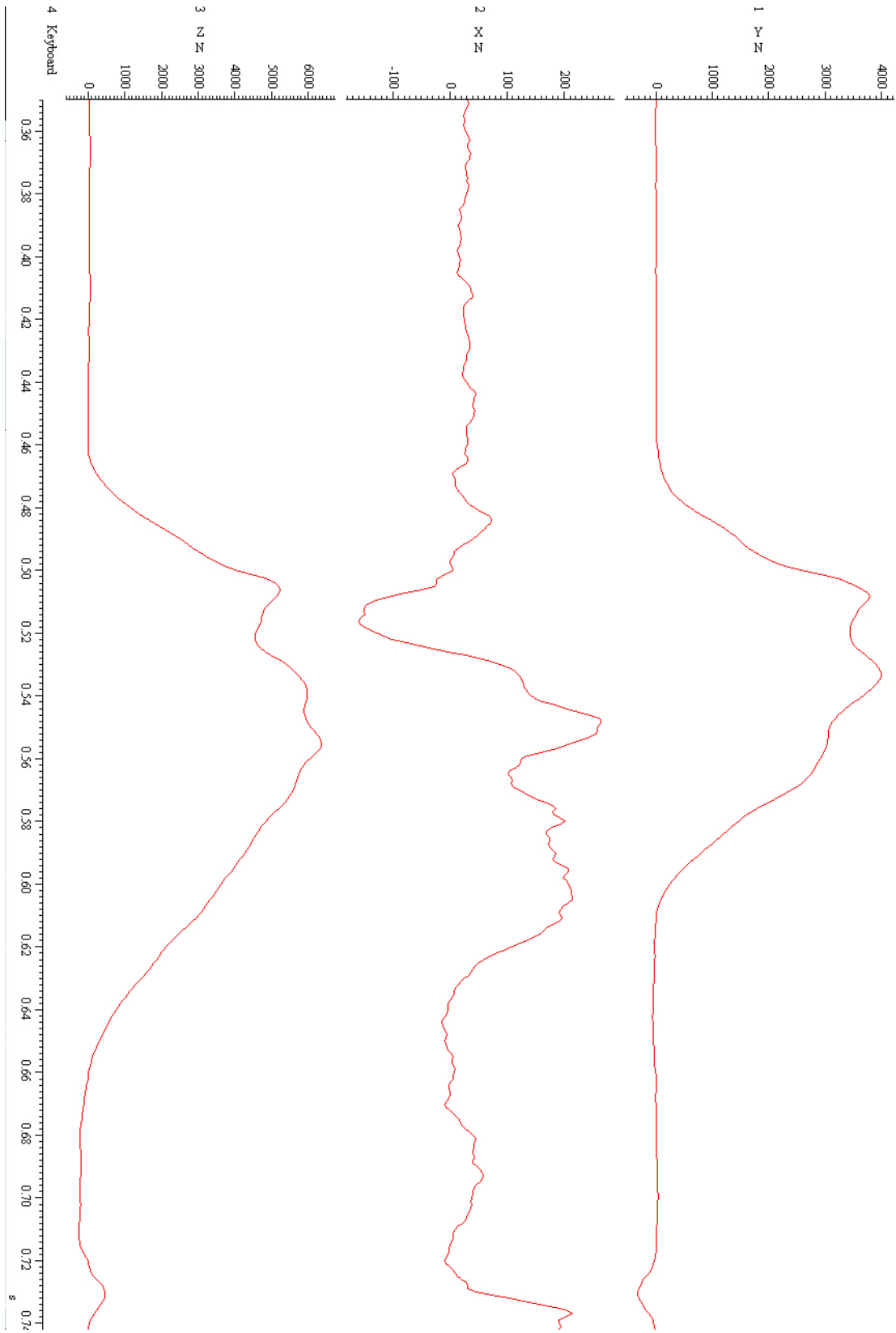
Kuva 1: Reaktiivoimat ajan funktiona. Yleiskuva mittauksesta, esimerkkinä trampetilla suoritus J1,5 1. Kuvassa näkyy esiponnistus, ponnistus ja alastulo.



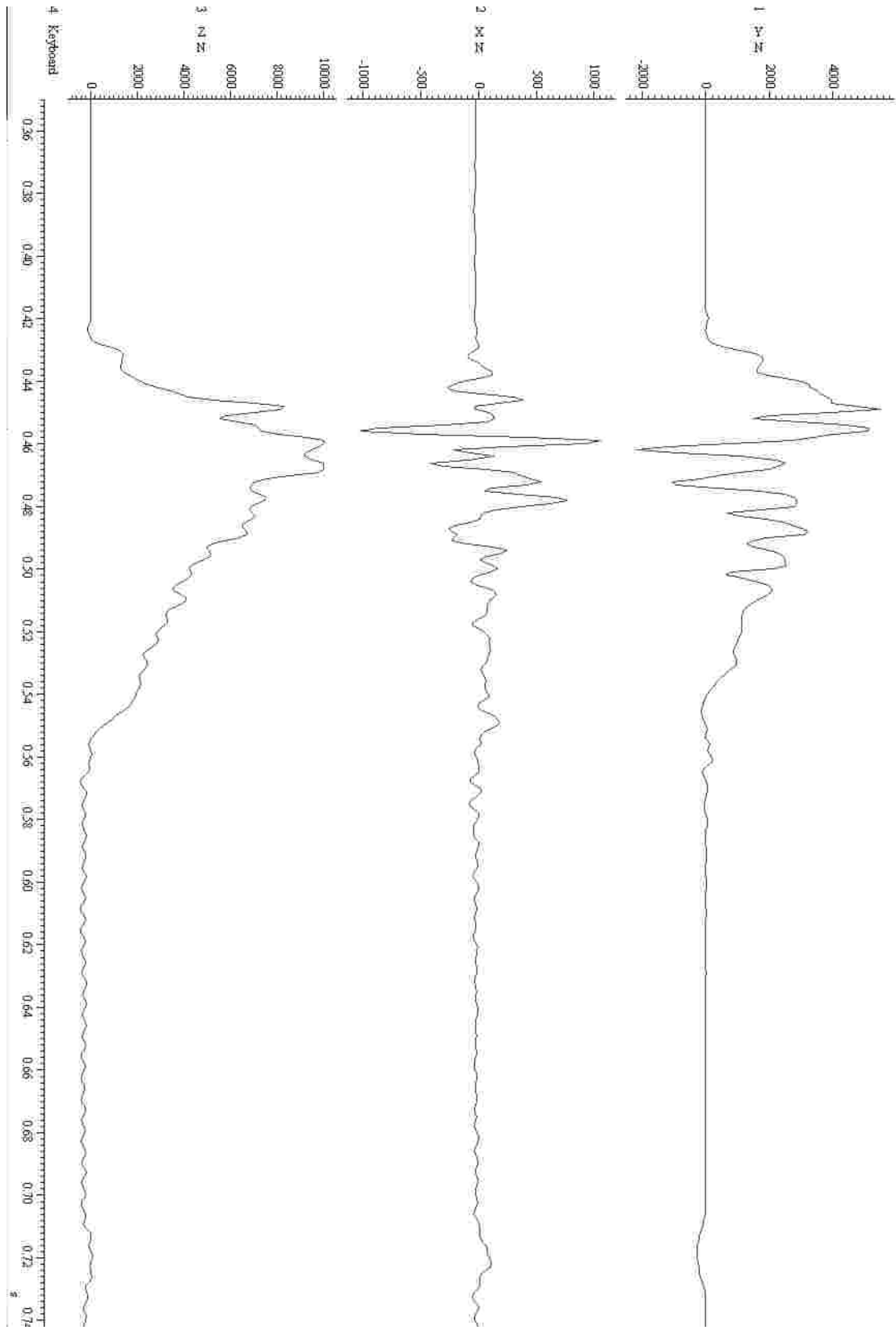
Kuva 2: Sivuttaisimpulssi I_x kierteiden määrän N funktiona, PNS-suora pistejoukkoon sovitettuna.



Kuva 3: Lentoajat ponnistuslaudalta kierteiden lukumäärän funktiona, PNS-suora pistejoukkoon sovitettuna..



Kuva 4: Trampetti J1,5 1. Reaktiovoimat ajan funktiona ponnistuksen ajalta.



Kuva 5: Ponnistuslauta, J1,5 1. Reaktiivoimat ajan funktiona ponnistuksen ajalta.

Taulukko 1: Impulssit ja lentoajat.

Ponnistuslauta	I_z [Ns]	I_x [Ns]	I_y [Ns]	t [s]
J1	420	0,5	196	0,78
J1	461	12,5	197	0,75
J1	450	-1,7	208	0,76
J1,5	467	8,1	203	0,82
J1,5	467	2,5	181	0,82
J1,5	464	-1,0	247	0,84
J2	486	16,9	198	0,86
J2	473	13,0	254	0,86
J2	481	14,6	262	0,87
Trampetti	I_z [Ns]	I_x [Ns]	I_y [Ns]	t [s]
J1,5	526	15	304	0,91
J1,5	496	38	281	0,91
J1,5	479	32	279	0,91
J2	492	30	288	0,94
J2	550	27	309	1,01
J2	514	44	321	0,95
Ponnistuslauta	I_z [Ns]	I_x [Ns]	I_y [Ns]	t [s]
S1	344	4,3	92	0,76
S1	349	-27	121	0,75
S1	379	-19	133	0,75
S1,5	371	-31	94	0,81
S,15	371	-8,8	160	0,8
S1,5	359	-19	178	0,8
S2	378	-11	105	0,81
S2	381	-22	178	0,81
S2	368	-2,0	155	0,8
Trampetti	I_z [Ns]	I_x [Ns]	I_y [Ns]	t [s]
S2	417	26	267	1,00
S2	423	28	241	0,99
S2	406	14	264	0,97
S2,5	429	32	291	1,02
S2,5	441	29	298	1,02
S2,5	446	30	298	1,03

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työssä tutkittiin kokeellisesti kierrevoltin nopeusrajoituksia käyttäen kahta telinevoimistelijaa. He tekivät juoksuvauhdistista kierrevoltteja suorinvartaloin eteenpäin ponnistuslaudalta ja trampetilta. Mittaustulokset saatiin voimalevyjen avulla. Hypoteesina oli, että kunkin henkilön kohdalla kaikissa volteissa keskimääräinen kierrenopeus on sama, jolloin kierteiden määrän lisäämiseksi täytyy tehdä korkeampi voltti. Oli syytä epäillä, että kierrenopeutta rajoittaa jokin ei-mekaaninen tekijä.

Ponnistuslaudalla kierteiden määrän N ja lentoajan t välillä oli korrelaatio J:lle $r = 0,97$ ($p < 0,0001$) ja S:lle $r = 0,88$ ($p = 0,002$), mutta esimerkiksi J:n nopein 1-kierteinen voltti vei aikaa 0,75 s ja 2-kierteinen voltti 0,86 s, ja vastaavasti S:n 0,75 s ja 0,80 s. Lentoajat siis kasvoivat merkitsevästi, mutta myös kierrenopeudet kasvoivat. Lisäksi, ainoastaan 1-kierteiset voltit pystyttiin kaikkinsa tekemään ilmassa tuotetulla kierteellä; kierteiden määrän lisääntyessä kierre aloitettiin aiemmin. Monikierteisissä volteissa kierre jäi myös enemmän tai vähemmän vajaaksi. Näin ollen kierteisiin todellisuudessa käytetty aika kasvoi, mutta sitä kasvua on vaikea määrittellä vertailukelpoiseksi sellaisiin voltteihin, joissa kierteet pystyttiin täysin tuottamaan ja pysäyttämään ilmassa.

Edellisen perusteella hypoteesi oli siltä osin oikein, että lentoaikaa jouduttiin kuitenkin lisäämään kierteiden lisääntyessä, ja toisaalta ponnistuksessa aloitettut ja kesken jääneet kierteet osoittavat juuri sen, että aika on rajoittava tekijä. Hypoteesi on täysin oikein, kun verrataan S:n voltia kahdella kierteellä ponnistuslaudalta ja 2,5:llä kierteellä trampetilta: esimerkkinä nopeimmat suoritukset, 0,80 s vs. 1,02 s. Aika siis kasvoi neljäsosalla, kun kierrettä tuli neljäsosa lisää, joten keskimääräinen kierrenopeus oli sama! Eli aika oli rajoittava tekijä ja trampetin tuoma lisäaika antoi mahdollisuuden tehdä enemmän kierrettä. Aikaa luonnollisesti rajoittaa ponnistusvoima ja -tekniikka.

Miksi kierrenopeus oli sama ainoastaan em. tilanteissa? Osaselitys voi olla itse mittaustilanjärjestely, jossa koehenkilöiltä vaadittiin mahdollisimman matalia voltteja, jotta kierrenopeudet olisivat kussakin suorituksessa maksimaalisia. Pienillä kierremäärillä kontrolli on vaikeaa, kun niihin riittää submaksimaalinen ponnistus, mutta maksimikier-

remäärillä joudutaan maksimaaliseen ponnistukseen ja siten voltin on automaattisesti niin matala, kuin se vain voi olla. Eli mahdollisesti 1-kierteisen voltin olisi voinut tehdä matalampanakin. Väitettä tukee myös se, että trampetilta lentoajat olivat pidempiä - vaikka se tosin voi johtua myös ponnistusteknisistä eroista.

J ei pystynyt tekemään enempää kierrettä trampetilta kuin ponnistuslaudalta, vaikka aikaa oli enemmän, koska hän pelkäsi, että voltin lähtee liian sivuun. Jo tuon kommentin perusteella oli syytä epäillä, että sivuttaisvoimilla olisi jokin merkitys rajoittavana tekijänä. Voimadatasta havaittiinkin, että J:llä $N:n$ ja $I_x:n$ välillä on korrelaatio $r = 0,66$ ($p=0,054$). Eli suurentunut sivuttaisimpulssi voi olla rajoittava tekijä. Ei pelkästään sen takia, että se saattaa heittää voimistelijan sivuun patjasta, vaan myös siksi, että jos keho lähtee ponnistuksessa kallistumaan, voltin lopussa kulma voi olla niin suuri, että se aiheuttaa teknisiä ongelmia. Suuressa kallistuskulmassa on vaikea laskeuta, joten kulma täytyy poistaa ilmassa, mikä vie aikaa.

Tuossa onkin yksi syy, joka voi tehdä kierteiden määrästä aikariippuvaisen. Työn hypoteesi rakennettiin sille pohjalle, että taitavat koehenkilömme olisivat pystyneet tuottamaan kierteet puhtaasti ilmassa. Näin ei kuitenkaan käynyt, ja se muuttaa tilanteen täysin. Kontaktikierrettä käytettäessä keho siis lähtee ponnistuksen jälkeen kallistumaan, jolloin kierrenopeus koko ajan kasvaa. Niinpä korkeammassa volteissa kallistuskulma on ehtinyt kasvaa suuremmaksi. Täten kierremäärä ei olekaan aikavakio. Toki yhtälö (22) edelleen pätee, mutta siinä θ kasvaa tasaisesti. Ts. kierteen määrä riippuu lentoajasta. Ilmakierteisissä volteissa kallistuminen tuotetaan nopeasti, eikä siten kulman tarvitse ollakaan niin suuri, kuin se kontaktikierteisissä volteissa on. Niinpä ilmakierteisen voltin loppu onkin helpompi, eikä kallistuksen poistamiseen kulu niin kauan aikaa.

Tulkittaessa sivuttaisimpulssia on oltava varovainen, sillä se kertoo vain voiman vaikutuksista, kierteessä on oleellista voiman momentti. Koska voimanvarret eivät pysy vakiona, muutokset voimissa eivät suoraan tarkoita muutosta momenteissa. Jos voima olisi koko ajan nolla, olisi myös momentti, mutta näin ei nyt ollut. Eikä sivuttaisvoima ole todellakaan ainoa kierrettä aiheuttava voima; kun keho on kerran kallistunut pystyvoimalla on suuri merkitys momentissa. Oma roolinsa on myös pitkittäisvoimalla. Merkillepan-

tavaa kuitenkin J:n kohdalla on merkitsevä muutos sivuttaisimpulsseissa. Se voi periaatteessa johtua myös pitkittäisimpulssin kasvusta, sillä voimalevyn ja voimistelijan xy-koordinaatit eivät ole täysin samat, koska juoksusuunta tuskin on koordinaattiakselin suuntainen. Mutta kuitenkin J:n tekniikassa on jotain eroa S:ään verrattuna, koska hänellä korrelaatiota ei ollut, $r = 0,08$ ($p=0,84$).

Lentoajan kasvu oli yhteydessä pystyimpulssin kasvuun, mutta osa ajankasvusta voi tulla myös massakeskipisteen korkeuden eroista. Lentoaikoja ei kyetty laskemaan tarkalleen ilman lisämittauksia, koska voimakäyrät eivät olleet samanlaisia kuin permannolla. Mutta voidaan olettaa, että massakeskipiste on alimmillaan, kun voima on suurin. Tällöin tilanne vastaa lineaarista joustaa. Tästä tiedosta voidaan arvioida positiivinen työvaihe ja siten lähtänopeus ja lentoaika. Nämä laskut ovat kuitenkin niin herkkiä arviointivirheille, ettei todellista mitattujen ja laskettujen aikojen vertailua voi tehdä. Tulkintaongelmia tulee siitä, etteivät voimakäyrät ole samanmuotoisia. Tarkempia laskuja voisi tehdä käyttäen apuna esiponnistusta, josta positiivinen työvaihe voidaan helpommin erottaa. Siitä voi laskea sitten ponnistuksen työvaiheet, kun tiedetään esiponnistuksen ja ponnistuksen välinen aika. Nyt ei kuitenkaan kontrolloitu sitä, astuvatko koehenkilöt esiponnistuksen täysin voimalevyn päälle - sitä he eivät ainakaan aina tehneet -, joten tähän laskutapaan ei tässä työssä voida luottaa.

9 LÄHTEET

King & Yeadon 2004. Maximizing somersault rotation in tumbling. *Journal of Biomechanics* 37.

Marion & Thornton 1995. *Classical Dynamics of Particles and Systems*. Saunders College Publishing.

Miller & Nissinen 1987. Critical examination of ground reaction force in the running forward somersault, *International Journal of Sport Biomechanics* 3.

Sands ym. 2006. The Triple- and Quadruple-Twist: A Case Study. <http://coachesinfo.com/category>

Yeadon 1993a. The biomechanics of twisting somersault Part I: Rigid body motions. *Journal of Sports Sciences* 11.

Yeadon 1993b. The biomechanics of twisting somersault Part II: Contact twist. *Journal of Sports Sciences* 11.

Yeadon 1993c. The biomechanics of twisting somersault Part III: Aerial twist. *Journal of Sports Sciences* 11.

Yeadon 1993d. The biomechanics of twisting somersault Part IV: Partitioning performances using the tilt angle. *Journal of Sports Sciences* 11.

Yeadon 1993e. Twisting techniques used by competitive divers. *Journal of Sports Sciences* 11.

Whittaker 1937. *Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies*, s. 34-41. Cambridge University Ptes.