

**KILPAKELAUSTUOLIN MASSAN VAIKUTUS PYÖRÄ-  
TUOLIKELAUKSEN SUORITUSKYKYYN -  
TAPAUSTUTKIMUS**

Simo Ihalainen

Biomekaniikan Pro Gradu -tutkielma

Kevät 2012

Liikuntabiologian laitos

Jyväskylän yliopisto

Työn ohjaaja: Janne Avela

# TIIVISTELMÄ

Ihalainen, Simo 2012. Kilpakelaustuolin massan vaikutus pyörätuolikelauksen suorituskykyyn – tapaustutkimus. Biomekaniikan pro gradu –tutkielma. Liikuntabiologian laitos, Jyväskylän yliopisto, 50 s.

Pyörätuolikelauksessa kelaustuoli on oleellisessa osassa määrittämässä suorituskykyä. Matemaattisen mallinnuksen avulla on arvioitu jo pienen massan pudotuksen vaikuttavan merkittävästi kelaussuorituksen loppu-aikaan, mutta tätä tulosta ei ole kokeellisesti testattu. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää massaltaan kevyemmän kelaustuolin vaikutusta kelaussuoritukseen ja suorituskykyyn. Tutkimuksessa verrattiin uutta kevyempää kelaustuolia vanhaan kilpailukäytössä olleeseen kelaustuoliin. Kelaustuoleja vertailtiin toisiinsa lähtökiihdytyksistä ja täysimittaisista 100 metrin kelauksista mitattujen muuttujien perusteella. Lisäksi kelaustuoleihin vaikuttavia vastustavia voimia arvioitiin tuolin hidastuvuutta mittaavien testien avulla ("coasting deceleration" -testit).

"Coasting deceleration" -testeissä mitattiin kelaustuolin hidastuvuutta seitsemällä eri lähtönopeudella. Lähtökiihdytyksissä testattava teki yhteensä kuusi maksimaalista 20 metrin kiihdytystä molemmilla tuoleilla, ja 100 metrin täysimittaisissa kelauksissa neljä maksimaalista kelausta molemmilla tuoleilla. Kelaussuoritukset tehtiin kahtena eri mittauspäivänä, ja tuolien suoritusjärjestys käännettiin päivien välillä. Suoritusten kelausajat mitattiin valokennojen avulla ja suoritusten väliajat ja nopeusprofiili lasertutkalla. Lähtökiihdytyksestä ja maksiminopeuden vaiheesta tehtiin kolmiulotteinen liikeanalyysi.

"Coasting deceleration" -testin perusteella uuden kelaustuolin vastustavat voimat olivat pienempiä kuin vanhan kelaustuolin vastustavat voimat. Vanhalla ja uudella kelaustuolilla tehdyissä suorituksissa ei ollut 20 metrin lähtökiihdytysten loppuajoissa ( $4,47 \pm 0,06$  s vs.  $4,51 \pm 0,03$  s) tai 100 metrin kelausten loppuajoissa ( $14,26 \pm 0,12$  s vs.  $14,40 \pm 0,04$  s) tilastollisesti merkitseviä eroja. Nopeimmat kelausajat kelattiin kuitenkin vanhalla kelaustuolilla. Vanhan kelaustuolin keskimääräiset nopeudet olivat suurempia kuin uuden kelaustuolin nopeudet väleillä 50-60 metriä ( $8,27 \pm 0,07$  m/s vs.  $8,16 \pm 0,01$  m/s;  $p < 0,05$ ) ja 90-100 metriä ( $8,77 \pm 0,03$  vs.  $8,62 \pm 0,08$  m/s;  $p < 0,05$ ). Vanhassa kelaustuolissa kelausasento oli edempänä kuin uudessa kelaustuolissa. Tästä johtuen vanhan kelaustuolin keulinta ( $2,1 \pm 0,9$  cm vs.  $3,9 \pm 1,7$  cm;  $p < 0,05$ ) ja palautusvaiheen nopeuden tippuminen ( $-0,73 \pm 0,13$  m/s vs.  $-1,01 \pm 0,15$  m/s;  $p < 0,01$ ) maksiminopeuden vaiheessa olivat pienempiä kuin uudessa tuolissa. Etupyörän keulinnan ja palautusvaiheen aikaisen nopeuden hidastumisen välillä todettiin tilastollisesti merkitsevä korrelaatio ( $r = 0,76$ ;  $p < 0,01$ ).

Tässä tutkimuksessa vertailtujen kelaustuolien massaero oli vain 0,56 kiloa, mikä on huomattavasti vähemmän kuin mitä tätä tutkimusta suunniteltaessa oletettiin. Näin pienen massaeron ei huomattu vaikuttavan kelauksen suorituskykyyn positiivisesti. Pienen massaeron tuomat mahdolliset hyödyt saattoivat hukkaa kevyemmän tuolin heikomman kelausasennon tai rungon jäykkyysominaisuuksien seurauksena. Tutkimuksessa huomattu istuma-asennon siirtyminen lähemmäs taka-akselia johti vastustavien voimien pienenemiseen, mutta toisaalta myös keulinnan lisääntymiseen ja heikentyneeseen voimantuottoon ensimmäisen kelaussyklin aikana. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella kelausasennon optimointi näyttäisi olevan yksi kriittinen kohta tuolin suunnittelussa ja toteutuksessa suorituskyvyn optimoinnin kannalta.

Avainsanat: pyörätuolikelaus, suorituskyky, kinematiikka

# SISÄLTÖ

## TIIVISTELMÄ

1 JOHDANTO .....	4
2 PYÖRÄTUOLIKELAUS .....	5
3 PYÖRÄTUOLIKELAUKSEN BIOMEKANIikka .....	7
3.1 Kinematiikka .....	8
3.2 Kinetiikka .....	11
3.3 Lihasaktivaatio.....	15
4 KELAUSTUOLI.....	17
4.1 Kitka ja ilmanvastus .....	17
4.2 Massa.....	20
4.3 Kelaustuolin ja urheilijan välinen vuorovaikutus .....	21
4.3.1 Istuma-asento .....	22
4.3.2 Camber-kulma.....	22
4.3.3 Työntökehä.....	23
5 TUTKIMUSONGELMAT JA HYPOTEESIT .....	25
6 MENETELMÄT .....	27
6.1 Tutkittava.....	27
6.2 Mittausprotokolla.....	27
6.3 Tulosten analysointi.....	29
6.4 Tilastollinen tarkastelu .....	31
7 TULOKSET.....	33
7.1 ”Coasting deceleration” -testit.....	33
7.2 Lähtökiihdytykset .....	34
7.3 Sadan metrin kelaussuoritukset .....	37
8 POHDINTA.....	41
9 LÄHTEET.....	46

# 1 JOHDANTO

Pyörätuolikelaus on yksi suurimmista vammaisurheilulajeista. Lajin suosion kasvu on näkynyt kilpailun kovenemisena ja tason nousuna kansainvälisissä kilpailuissa. Pyörätuolikelauksessa kelaustuoli on oleellisessa osassa määrittämässä suorituskykyä, joten huippukelaajan kelaustuolin teknisessä kehityksessä on oltava samalla tasolla kanssakilpailijoiden suhteen. Menestyksen takaamiseksi Lontoon 2012 paralympiakisoissa on suomalaiselle huippukelaajalle rakennettu uusi hiilikuitu-runkoinen kelaustuoli.

Suomalaisen huippukelaajan tämänhetkinen kelaustuoli on jäykkyysominaisuuksien ja kelausasennon suhteen optimaalinen, mutta tuolin paino on liian suuri kanssakilpailijoiden kelaustuoleihin verrattuna. Suuremman kelaustuolin massan takia kyseinen urheilija antaa kilpailuissa tasoitusta erityisesti lähtökiihdytyksen aikana. Jo pienten massan vähennysten on todettu vaikuttavan merkittävästi 100 metrin kelaussuorituksen loppuajkaan. Tästä syystä uuden kelaustuolin suunnittelussa ja valmistuksessa on pyritty ennen kaikkea pienentämään tuolin massaa. Tähän on pyritty hyödyntämällä rungon valmistuksessa hiilikuitumateriaaleja ja uutta nanoteknologiaa. Vakiintuneen kelaustekniikan on myös haluttu säilyvän mahdollisimman muuttumattomana, joten uuden kelaustuolin valmistuksessa on pyritty säilyttämään tuolin geometriset mittasuhteet ennallaan.

Matemaattisen mallinnuksen avulla on arvioitu jo pienen massan pudotuksen vaikuttavan merkittävästi kelaussuorituksen loppuajkaan, mutta tätä tulosta ei ole kokeellisesti testattu. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, miten massan pieneneminen vaikuttaa kelaussuoritukseen ja suorituskykyyn loppuajan, vastustavien voimien ja suorituksen kinemaattisten muuttujien osalta.

## 2 PYÖRÄTUOLIKELAUS

Pyörätuolikelaus on vammaisurheilijoille kehitetty laji, jossa kilpaillaan erikoisvalmisteisilla kilpakelaustuoleilla. Pyörätuolikelauksessa kilpaillaan eripituisilla matkoilla aina sadan metrin sprinttimatkasta maratoniin asti (Bhambhani 2002). Pyörätuolikelaus on yksi suosituimmista paralympialajeista, ja lajin huima kehitys 1990-luvulta lähtien on nostanut lajin suuren yleisön tietoisuuteen ja lisännyt pyörätuolikelauksen tieteellisen tutkimuksen määrää (Cooper ym. 2003).

Vammaisurheilun ensimmäiset kilpailut järjestettiin Stoke Mandevillissä Englannissa 1948 toisen maailmansodan veteraaneille. Ensimmäiset paralympialaiset järjestettiin 1960 Roomassa, ja pyörätuolikelaus on ollut mukana paralympialajina alusta asti. (Steward & Walsh 1986.) Urheilijoiden ja osallistujamaiden määrä on kasvanut Rooman kisojen 400 urheilijasta ja 23 maasta Pekingin paralympialaisten 3951 urheilijaan ja 146 maahan. Soulin 1988 paralympialaisista lähtien kisat on järjestetty samassa paikassa kuin olympialaiset. (Paralympic Games.)

Pyörätuolikelauksessa urheilija on oikeutettu osallistumaan kansainvälisiin kilpailuihin, jos vähintään kymmenen prosenttia jalkojen toiminnallisesta kapasiteetista on hävinnyt (Bhambhani 2002). Kelaajat jaetaan neljään eri vammaluokkaan (T-51, T-52, T-53 ja T-54) toiminnallisen kapasiteetin perusteella. T-51-luokassa toiminnallinen kapasiteetti on heikoin, ja tähän luokkaan kuuluvilla urheilijoilla on toiminnallinen vajaus olkapään, kyynärpään ja ranteen toiminnassa. Vartalon lihakset eivät myöskään ole toimintakuntoisia. T-54-luokan urheilijoilla on normaali yläraajojen toimintakyky ja lähes normaali tai normaali vartalon toimintakyky. Vammaluokilla pyritään takaamaan mahdollisimman tasa-arvoiset kilpailumahdollisuudet eriasteisista vammoista kärsiville urheilijoille. (Classification Handbook 2010.)

Pyörätuolikelauksessa tärkeä osa suorituskykyä on kelaustuoli. Vielä 1960-luvulla pyörätuolikelauksessa käytettiin normaaleja jokapäiväiseen käyttöön tarkoitettuja pyörätuoleja. Modernit kelaustuolit suunnitellaan ja valmistetaan yksilöllisesti vastaamaan kelaussuorituksen ja urheilijan asettamia vaatimuksia. Tämä kilpakelaustuolien kehitys

on näkynyt huimana maailmanennätysaikojen paranemisena eri kelausmatkoilla viimeisten vuosikymmenien aikana. (Vanlandewijck ym. 2001.) Kilpailun koveneminen on johtanut siihen, että pienten yksityiskohtien optimointi sekä harjoittelun että kelaustuolin suhteen on välttämätöntä menestyksen saavuttamiseksi (Costa ym. 2009).

### 3 PYÖRÄTUOLIKELAUKSEN BIOMEKANIikka

Pyörätuolikelauksessa suoritus koostuu kelaussykleistä, joihin kuuluu sekä työntö- että palautusvaihe. Työntövaiheeksi määritellään se aika, jonka kelaajan käsi on kiinni työntörenkaassa ja urheilija tuottaa työntövoimaa. Palautusvaihe on vastaavasti se aika, jonka kelaajan käsi on irti työntörenkaasta. Palautusvaiheen aikana kelaaja palaa takaisin alkuasentoon seuraavan kelaussyklin aloitusta varten. (Ridgway ym. 1988.) Kelausfrekvenssiksi määritellään kelaussyklien määrä aikayksikköä kohden. Muita kelaussykleistä määritettyjä muuttujia ovat syklin aikana kuljettu matka, kelaustuolin nopeus syklin alussa ja lopussa, sekä työntö- ja palautusvaiheiden prosentuaaliset osuudet koko syklin kestästä. (Goosey ym. 1997; Higgs 1986; Ridgway ym. 1998; Veeger ym. 1989a; Chow & Chae 2007.)

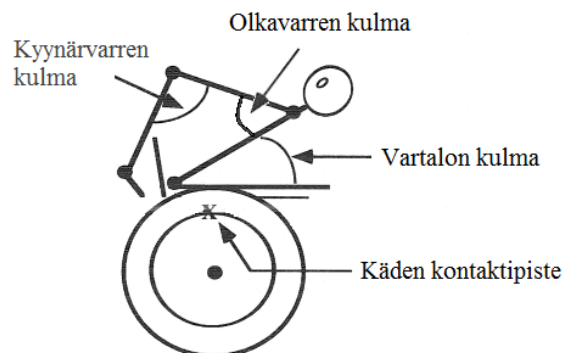
Lähtökiihdytyksen aikana kelaajan nopeus kasvaa jokaisen kelaussyklin aikana. Työntövaiheessa nopeus kasvaa kelaajan tuottaman työntövoiman ansiosta, ja syklin maksimaalinen nopeus saavutetaan 0,03-0,07 sekuntia käden irrotushetken jälkeen. Palautusvaiheen aikana nopeus hidastuu noin 0,4 m/s. Lähtökiihdytyksessä kelaussyklin kesto lyhenee ensimmäisen kuuden syklin aikana keskimäärin 0,82 sekunnista 0,45 sekuntiin. Työntövaihe lyhenee ensimmäisen kelaussyklin 0,62 sekunnista 0,21 sekuntiin, kun taas palautusvaihe pitenee hieman 0,20 sekunnista 0,24 sekuntiin. Tämän seurauksena työntövaiheen prosentuaalinen osuus koko syklin kestästä lyhenee alkukiihdytyksen aikana 76 prosentista 47 prosenttiin. (Moss ym. 2005.) Sadan metrin kelauksen ensimmäisen kymmenen metrin aikana kelausfrekvenssi on 1,85 Hz ja keskimääräinen yhden kelaussyklin aikana kuljettu matka 1,46 metriä (Chow & Chae 2007).

Sadan metrin kelauksessa maksiminopeuden vaihe saavutetaan 48–88 metrin jälkeen. Maksiminopeuden vaiheessa nopeuden kasvu työntövaiheen aikana ja nopeuden hidastuminen palautusvaiheen aikana ovat yhtä suuria. Kelaussuorituksen aikana saavutettu maksiminopeus korreloi sadan metrin loppuajan kanssa. Maksiminopeuden vaiheeseen siirryttäessä kelaussyklin kesto pysyy samana kuin alkukiihdytyksen lopussa, mutta työntövaiheen pituus lyhenee entisestään keskimäärin 0,12 sekuntiin ja palautusvaiheen kesto pitenee 0,40 sekuntiin. Työntövaiheen osuus kelaussyklin kokonaiskestosta on

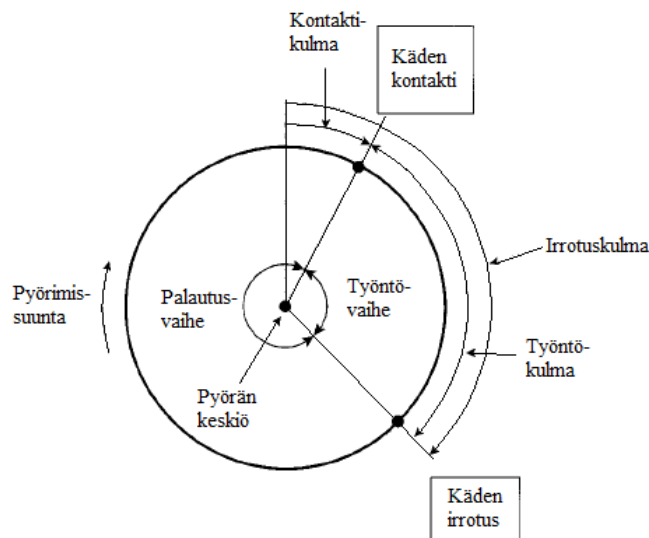
maksimivauhdin aikana vain 22,8 prosenttia. Lähtökiihdytykseen verrattuna kelaussyklin aikana kuljettu matka kasvaa 3,42 metriin, kun taas kelausfrekvenssi säilyy lähes vakiona 1,95 Hz. (Chow & Chae 2007.) Kahdeksansadan metrin kelauksessa kelaussyklin kesto maksimivauhdin aikana on 0,54–0,56 sekuntia ja työntövaiheen osuus kelaussyklin kestosta 20–25 prosenttia (Goosey ym. 1997).

### 3.1 Kinematiikka

Pyörätuolikelauksesta usein määritettyjä kinemaattisia muuttujia ovat kehon segmenttien (vartalo, olkavarso, kyynärvarsi) kulmat, kulmanopeudet ja –kiihtyvyydet (kuva 1), nivelpisteiden sijainnit ja nopeudet, sekä työnnön kulmamuuuttajat työntövaiheen ajalta (kuva 2). Kulmamuuuttujia on tutkimuksissa määritetty sekä sagittaali- ja frontaalitasoissa, että kolmiulotteisessa avaruudessa. (Chow ym. 2001; Goosey ym. 1998; Moss ym. 2005; O’Connor ym. 1998.)



KUVA 1. Kehon segmenttien kulmat sagittaalitasossa (mukailtu O’Connor ym. 1998).



KUVA 2. Takapyörän kulmamuuuttajat työntövaiheen ajalta (mukailtu Chow ym. 2001).



### *Vartalo*

Pyörätuolikelauksessa työntövaiheen aikana tapahtuu vartalon fleksio (vartalon kulman pieneneminen), jonka avulla kelaaja pystyy hyväksikäyttämään vartalon massaa ja liikemäärää voiman tuottamiseksi työntörenkasiin. Nykyisissä kelaustuolimalleissa vartalon horisontaalinen kelausasento mahdollistaa tehokkaan voiman- ja tehontuoton siirron vartalosta työntörenkasiin. (Goosey ym. 1997.) Vartalon asennolla voidaan lisäksi säädellä olkapään etäisyyttä käden kontakti- eli voimantuottopisteestä työntökehään. Tällöin käsivarsien lihaspituudet ja segmenttien kulmat säilyvät voimantuoton kannalta optimaalisina suuremman osan työntövaiheesta. (Goosey-Tolfrey ym. 2001.) Goosey ym. (1997) mittasivat 800 metrin aikuisten mieskelaajien kelaussyklin aikaiseksi vartalon maksimikulmaksi 49 astetta ja minimikulmaksi 28 astetta. Kelaussyklin aikana tapahtuvan fleksion suuruus oli 21 astetta. (Goosey ym. 1997.) Vanlandewijck ym. (1994) päättelivät, että nopeuden kasvaessa kelauksen mekaaninen hyötysuhde heikkenee vartalon liikkeen lisääntymisen myötä. Wang ym. (1995) kuitenkin huomasivat, että suurempi vartalon fleksio on välttämätöntä vaaditun nopeuden saavuttamiseksi. Lyhyillä sprinttimatkoilla vaaditaan maksimaalista nopeutta, joten vartalon liikkeen amplitudi ja vartalon fleksio kelaussyklin aikana kasvavat (Wang ym. 1995), eikä mahdollinen mekaanisen hyötysuhteen heikkeneminen ole suorituksen kannalta oleellista.

### *Olkavarsi*

Olkavarsi on työntövaiheen alussa noin 80 asteen ekstensiossa. Olkavarren fleksio alkaa työntövaiheen alusta jatkuen koko työntövaiheen ajan. Työntövaiheen lopussa olkavarsi on noin 8 asteen fleksiossa, josta palautusvaiheen aikana olkavarsi viedään jälleen ekstensioasentoon seuraavan kelaussyklin aloitusta varten. Olkavarren kulman amplitudi kelaussyklin aikana on noin 89 astetta. Olkapään lineaarinopeus ja olkavarren kulmanopeus ovat suurimmillaan käden kontaktihetkellä työntörenkaaseen. Lineaari- ja kulmanopeus pienenevät irrotushetkeä kohti, ollen lähellä nollaa irrotushetkellä. (Wang ym. 1995, Moss ym. 2005.)

Kelausnopeuden kasvaessa sekä olkapään maksimaalinen lineaarinopeus että olkavarren kulmanopeus kasvavat (Wang ym. 1995). Myöhemmässä tutkimuksessa Wang ym. (2008) mittasivat olkavarren liikelaajuudeksi 76 astetta, ja maksimaaliseksi kulmanopeudeksi 650 astetta sekunnissa. Nämä muuttujat korreloivat vahvasti toistensa kanssa, mistä tutkijat päättelivät olkavarren suuremman liikelaajuuden mahdollistavan suurem-

man kulmanopeuden saavuttamisen. Lisäksi olkavarren liikelaajuus ja maksimaalinen kulmanopeus korreloivat maksimaalisen kelausnopeuden kanssa, joten näillä muuttujilla on selkeä yhteys suurimman mahdollisen kelausnopeuden saavuttamiseen. (Wang ym. 2008.)

### *Kyynärvarsi*

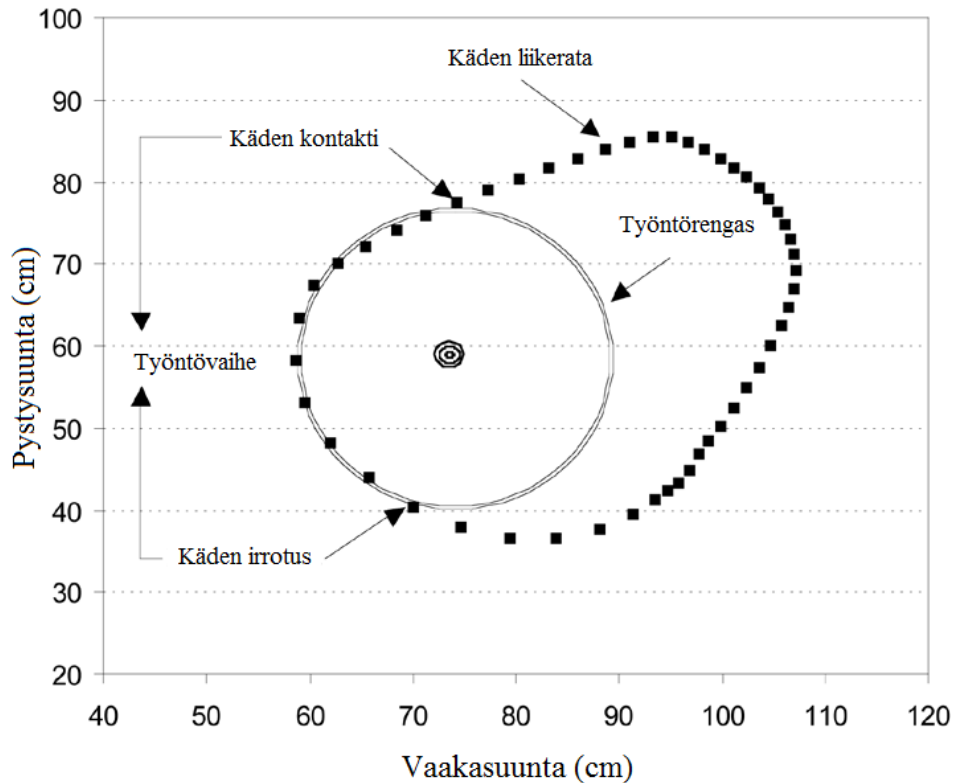
Kyynärvarren kulma työntövaiheen alussa on noin 102-111 astetta ja työntövaiheen lopussa noin 160-162 (Goosey & Cambell 1998a; O'Connor ym. 1998). Maksimaalinen kyynärvarren kulma 168-180 astetta saavutetaan palautusvaiheen aikana heti irrotushetken jälkeen. Kyynärvarren minimikulma 93-103 astetta saavutetaan myös palautusvaiheen aikana hieman ennen seuraavan työntövaiheen alkua. Kyynärvarren liikelaajuus kelaussyklin aikana on 71-81 astetta. (Goosey ym. 1997; Goosey ym. 1998; Goosey & Cambell 1998.) Nopeuden kasvaessa kyynärvarren kulma työntövaiheen alussa pienee, mikä mahdollistaa kyynärvarren suuremman liikelaajuuden työntövaiheen aikana (Wang ym. 1995). Pienemmän kelaussyklin aikaisen kyynärvarren minimikulman ja suuremman kyynärvarren liikelaajuuden on todettu olevan yhteydessä taloudelliseen kelaussuoritukseen (Goosey & Cambell, 1998b).

Submaksimaalisessa (90 prosenttia maksimaalisesta nopeudesta) kelaussuorituksessa kyynärpäähän lineaarinopeus on suurimmillaan työntövaiheen alussa, ja nopeus hidastuu koko työntövaiheen ajan. Kelaussyklin aikainen kyynärpäähän pienin lineaarinopeus saavutetaan irrotushetkellä palautusvaiheen alkaessa. Kelausnopeuden kasvaessa myös kyynärpäähän lineaarinopeus kasvaa. Kyynärvarren kulmanopeus kasvaa työntövaiheen aluksi, mutta kulmanopeus kääntyy laskuun työntövaiheen loppua kohden. (Wang ym. 1995.) Samoin kuin olkavarren kulmamuuttujien tapauksessa, myös kyynärvarren liikelaajuus korreloi maksimaalisen kyynärvarren kulmanopeuden kanssa. Lisäksi nämä molemmat muuttujat korreloivat maksimaalisen kelausnopeuden kanssa. (Wang ym. 2008).

### *Käsi*

Käden kontakti työntörenkaaseen aloittaa työntövaiheen (kuva 3). Käsi seuraa työntörenkaan määräämää liikerataa työntövaiheen ajan. Käden kontaktikulma työntövaiheen alussa on 29-40 astetta, ja kontaktikulma kasvaa suuremmilla kelausnopeuksilla kelattaessa. Käden irrotuskulma vaihtelee 170-220 asteen välillä ja

työntökulma 140-192 asteen välillä (Chow ym. 2001, Goosey ym. 1998, Wang ym. 1995).



KUVA 3. Käden liikerata kelaussyklin aikana (mukailtu Wang ym. 2008).

Käden lineaarinopeus ja nopeuden suunta kontaktihetkellä ovat kelaussuorituksen kannalta oleellisia muuttujia. Käden lineaarinopeus on suurimmillaan juuri ennen kontaktihetkeä. Käden nopeuden tulisi olla vähintään yhtä suuri kuin työntörengaan nopeus, jottei työntövaiheen aluksi tuotettaisi liikesuuntaa vastaan jarruttavaa voimaa. Käden lineaarinopeuden maksimoiminen mahdollistaa suuremman voimantuoton työntövaiheen aikana. Tämä kuitenkin edellyttää sitä, että nopeuden suunta on lähes työntörengaan ja käden kontaktipisteen tangentin suuntainen. (Wang ym. 1995; O'Connor ym. 1998.)

### 3.2 Kinetiikka

Teoreettisesta näkökulmasta tarkasteltuna pyörätuolikelauksessa vaikuttavia voimia ja energianlähteitä voidaan mallintaa tehon tasapainon mallin avulla. Tehon tasapainon malli vaakasuoralla alustalla kelattaessa voidaan esittää yhtälöllä

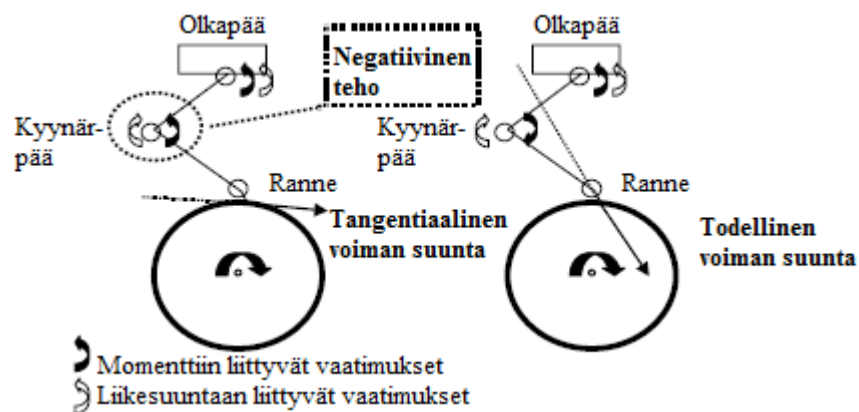
$$P_0 = (F_{vierimis} + F_{ilma} + F_{sisäinen} + ma) \times v, \quad (1)$$

missä  $P_0$  on urheilijan ulkoinen tehontuotto,  $F_{vierimis}$  vierimiskitkan aiheuttama vastustava voima,  $F_{ilma}$  ilmanvastuksen aiheuttama vastustava voima,  $F_{sisäinen}$  pyörien laakeroinnista ja rungon taipumisesta syntyvä vastustava voima,  $m$  kelaajan massa, sekä  $a$  ja  $v$  pyörätuoli-urheilija systeemin kiihtyvyys ja nopeus. Vakionopeuden säilyttämiseksi kelaajan on tuotettava riittävän suuri ulkoinen teho vastustavien voimien vaikutuksen kumoamiseksi. Ulkoinen tehontuotto seuraa lihastyöllä aikaansaadusta työntövoimasta työntörenkasiin. Jos kelaajan tehontuotto on suurempaa kuin vastustavien voimien aiheuttamat energian häviöt, kelausnopeus kasvaa. Näin aikaansaatua kelaustuolin kiihtyvyys on riippuvainen kelaustuoli-urheilija systeemin massasta. Mitä pienempi on systeemin massa, sitä suurempaa on kiihtyvyys. (van der Woude ym. 2000.)

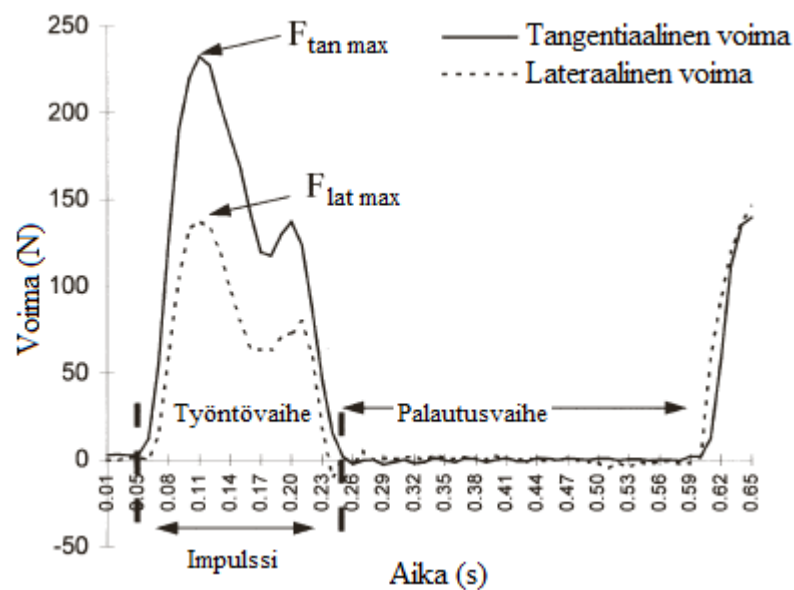
Tavallisilla pyörätuoleilla tehdyissä kokeellisissa tutkimuksissa on huomattu, että työntövaiheen aikana voimantuotto työntörenkasiin poikkeaa optimaalisesta voimantuotto-suunnasta (kuva 4). Voimantuotto jaetaan usein tangentialiseen (työntörenkaan tangentin suuntainen), radiaaliseen (pyörän keskiön suuntainen) ja lateraaliseen (normaali pyörän tason suhteen) komponenttiin. Puhtaasti mekaanisesta näkökulmasta ajateltuna voimantuoton suunnan tulisi olla työntörenkaan tangentin suuntainen koko työntövaiheen ajan. Tällöin saavutettaisiin maksimaalinen momentti pyörien suhteen ja suurempi pyörätuolin kiihtyvyys. Useissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu tangentialisen voimantuoton olevan vain 57-81 prosenttia kokonaisvoimantuotosta. (Bregman ym. 2009; Kotajärvi ym. 2006; Robertson ym. 1996; Roeleveld ym. 1994.) Lisäksi työntövaiheen aluksi tuotetaan negatiivista momenttia, mikä jarruttaa tuolin nopeutta (Veeger ym. 1991; de Groot ym. 2002). Tavallisilla pyörätuoleilla tehtyjä tutkimuksia ei voida kuitenkaan soveltaa suoraan pyörätuolikelaukseen. Pyörätuolikelauksessa kelaustuolin poikkeava rakenne, kelausasento ja liikenopeus vaikuttavat oleellisesti voimantuoton muuttujiin.

Pyörätuolikelauksen voimantuottoon liittyviä tutkimuksia on tehty erittäin vähän. Goosy-Tolfrey ym. (2001) mittasivat kansainvälisen tason kelaajien voimantuottoa takapyörien ympärille rakennetun venymäliuska-anturijärjestelmän avulla. Mittausjärjestelmä mahdollisti tangentialisen ja lateraalisen voimantuoton mittauksen, mutta radiaalista voimantuottoa ei tällä järjestelmällä pystytty mittaamaan. Tangentialinen voima on

suurempaa kuin lateraalinen voima koko työntövaiheen ajan. Työntövaiheen alussa ei myöskään ole havaittavissa negatiivista tangentiaalista voimaa, kuten tavallisten pyörätuolien tutkimuksissa on havaittu (kuva 5). Lateralinen voima suuntautui koko työntövaiheen ajan tuolin keskiosaa kohden. Kuuden kelaajan keskimääräinen tangentiaalinen voima työntövaiheen aikana (kelausnopeus 5,64 metriä sekunnissa) oli 86 newtonia ja maksimaalinen tangentiaalinen voima 158 newtonia. Vastaavat lateraalisen voimantuoton arvot olivat 62 ja 104 newtonia. Tangentiaalinen voima vastasi 80 prosenttia mitatusta kokonaisvoimantuotosta. Tangentiaalinen impulssi työntövaiheen aikana oli 480 Ns ja lateraalinen impulssi 312 Ns. (Goosey-Tolfrey ym. 2001.)



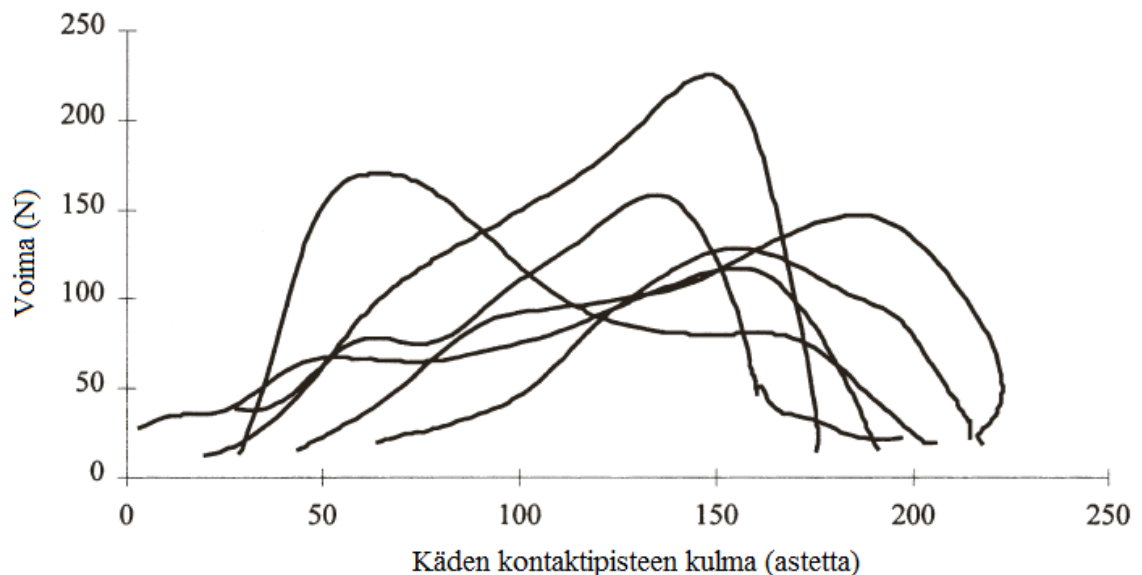
KUVA 4. Optimaalinen ja todellinen voimantuoton suunta työntövaiheessa. Optimaalinen voimantuoton suunta vaatisi kyynärpäähän negatiivista tehontuottoa. (mukailtu de Groot ym. 2002.)



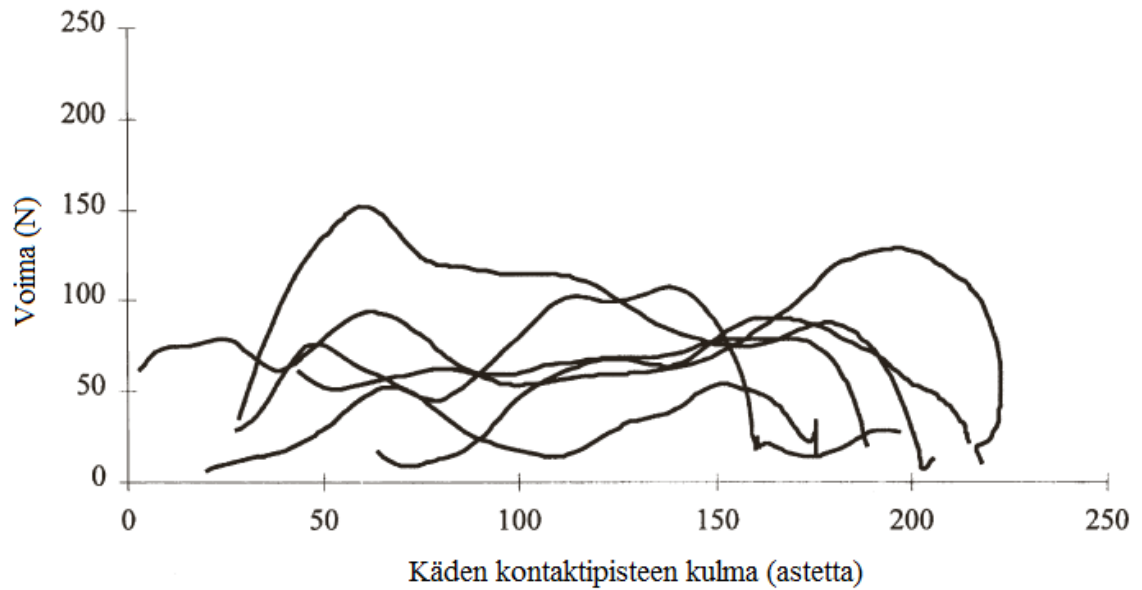
KUVA 5. Tangentiaalinen ja lateraalinen voimantuotto kelaussyklin aikana (mukailtu Goosey-Tolfrey ym. 2001).

Goosey-Tolfreyn ym. (2001) tutkimuksessa viidellä kelaajalla kuudesta maksimaalinen voimantuotto ajoittui työntökulmille 140-180 astetta (kuvat 6 ja 7). Tutkijoiden mukaan yhden kelaajan poikkeava voimantuotto profiili johtui kyseisen kelaajan vammaluokasta ja keskivartalon lihasten toimimattomuudesta. Maksimaalisen voimantuoton ajoittuminen suurilla työntökulmille kertoo kyynärpään ekstension tärkeydestä kelaussuorituksen voimantuotossa. Kelaustuolin tavallista pyörätuolia matalampi ja horisontaalimpi työntöasento myös mahdollistavat voimantuoton pidemmällä työntömatkalla työntörenkaan ympäri ja maksimaalisen voimantuoton saavuttamisen suurilla työntökulmilla. (Goosey-Tolfrey ym. 2001.)

Käden kontaktin ylläpitämiseksi ja lipsumisen estämiseksi kelaajat tuottavat lateraalista ja radiaalista voimaa työntörenkasiin. Vaadittava lateraalisen ja radiaalisen voiman suuruus riippuu käden ja työntörenkaan välisestä kitkakertoimesta. Lateraalinen ja radiaalinen voima eivät vaikuta tuolin kiihtyvyyteen liikesuuntaan nähden, joten näiden voimien tulisi olla juuri sopivan suuruisia pidon säilyttämiseksi, eikä sen suurempia. Goosey-Tolfreyn ym. (2001) tutkimuksessa nopeuden lisääntyessä 20 prosenttia sekä lateraalinen että tangenciaalinen voima kasvoivat lähes samassa suhteessa. Tämä kertoo siitä, että kelaajien voimantuottostrategia ei muuttunut nopeuden kasvaessa, vaan ainoastaan voimantuoton suuruus kasvoi. (Goosey-Tolfrey ym. 2001.)



KUVA 6. Kuuden kelaajan tangenciaaliset voimantuotot käden kontaktipisteen suhteen kelausnopeudella 5,64 metriä sekunnissa. 0 astetta tarkoittaa käden kontaktia työntörenkaaseen keskellä ylhäällä, 180 astetta käden kontaktia keskellä alhaalla. (mukailtu Goosey-Tolfrey ym. 2001.)



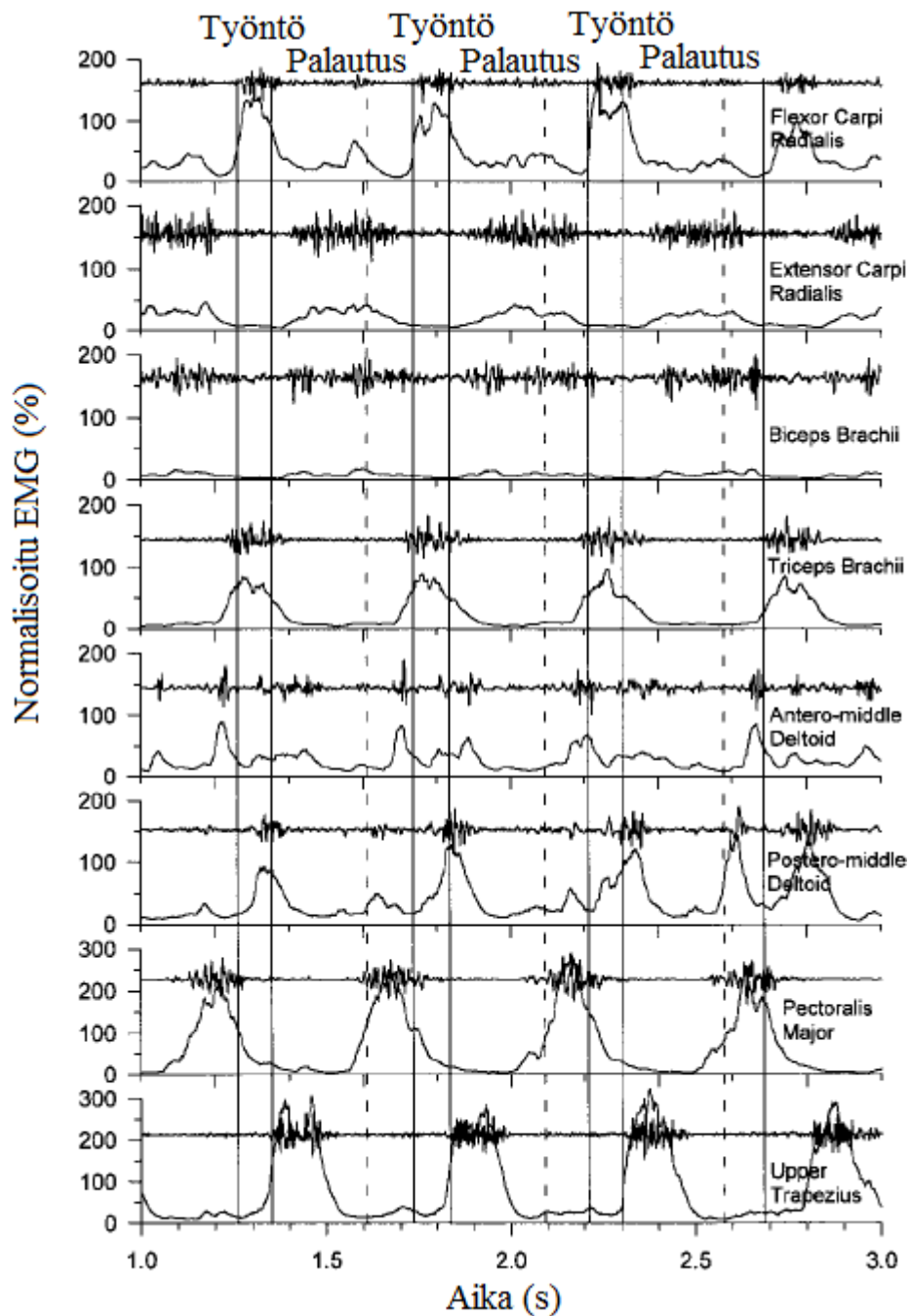
KUVA 7. Kuuden kelaajan lateraaliset voimantuotot käden kontaktipisteen suhteen kelausnopeudella 5,64 metriä sekunnissa (mukailtu Goosey-Tolfrey ym. 2001).

### 3.3 Lihasaktivaatio

Työntövaiheen aikana ranteen väärtinälunpuoleisen koukistajalihaksen (flexor carpi radialis, FCR) ja kolmipäisen olkalihaksen (triceps brachii, TBR) lihasaktiivisuudet ovat suurimmillaan (kuva 8). Palautusvaiheen alussa hartialihaksen takaosa (postero-middle deltoid, PMD) ja epäkäslihaksen yläosa (upper trapezius, UTR) ovat aktiivisimmillaan, ja palautusvaiheen lopussa ranteen väärtinälunpuoleinen ojentajalihas (extensor carpi radialis, ECR), hauislihas (biceps brachii, BBR), hartialihaksen etuosa (antero-middle deltoid, AMD) ja iso rintalihas (pectoralis major, PCM) ovat aktiivisimmillaan. (Chow ym. 2001.)

FCR:n ja ECR:n koaktivaatio on havaittavissa koko työntösyklin ajan. Vastuksen lisääntyessä FCR:n ja ECR:n aktivaatiot pienenevät, mikä voi viitata siihen, että ranteen tehtävä muuttuu työntävästä stabiloivaksi vastuksen kasvaessa. ECR:n suurempi aktivaatio palautusvaiheessa viittaa siihen, että työntövaiheen kontaktihetkeä varten vaaditaan palautusvaiheen aikana ranteen ojennus. Palautusvaiheen aikana TBR ja BBR ovat molemmat aktiivisia. Työntövaiheessa koaktivaatiota ei kuitenkaan ole enää nähtävissä, ja ainoastaan TBR on aktiivinen. AMD:n ja PMD:n koaktivaatiota on havaittavissa koko työntösyklin ajan. Vastuksen kasvaessa AMD:n aktiivisuus palautusvaiheen lopussa

kasvaa, kun taas PMD:n aktiivisuus pienenee sekä työntö- että palautusvaiheessa. (Chow ym. 2000.)



KUVA 8. Raaka ja tasasuunnattu normalisoitu EMG-aktiivisuus eri lihaksista kelaussuorituksen aikana. Tasasuunnattu EMG on normalisoitu isometrisen maksimivoiman EMG-aktiivisuuteen. Yhtenäisellä viivalla on kuvaan merkitty käden kontakti- ja irrotushetki (työntövaihe). Katkoviiva kuvaa maksimaalisen kyynärpään korkeuden hetkeä. (mukailtu Chow ym. 2001.)



## 4 KELAUSTUOLI

Pyörätuolikelauksessa käytetyt kelaustuolit poikkeavat huomattavasti normaaleista pyörätuoleista (kuva 9). Kelaustuolien runko on pidempi ja jäykempi, kelausasento horisontaalisempi, työntörenkaat halkaisijaltaan pienempiä ja eturengas suurempi kuin tavallisissa pyörätuoleissa. Kelaustuolien muotoilulla ja rakenteella pyritään pienentämään vastustavien voimien vaikutusta ja mahdollistamaan tehokas ja taloudellinen voimansiirto kelaajasta tuoliin. Van der Wouden ym. (2000) mukaan kolme avaintekijää vaikuttaa pyörätuolikelauksen suorituskykyyn: 1) urheilija, joka tuottaa energian ja tehon työntövaiheeseen, 2) kelaustuolin tekninen toteutus ja mekaniikka, jotka vaikuttavat tehontuoton vaatimukseen, ja 3) kelaustuolin ja urheilijan välinen vuorovaikutus, mikä vaikuttaa tehontuoton siirtoon urheilijasta kelaustuoliin. (van der Woude ym. 2000.)



KUVA 9. Kilpakelaustuoli.

### 4.1 Kitka ja ilmanvastus

Kelaustuolin teknisellä toteutuksella pyritään minimoimaan liikettä vastustavien voimien suuruus. Kelaussuorituksessa liikettä vastustavia voimia ovat vierimiskitka ja sisäinen kitka, sekä ilmanvastus. (van der Woude ym. 2000.) Pienentämällä vastustavien

voimien vaikutusta kelaussuorituksessa, saavutetaan samansuuruisella ulkoisen tehon tuotolla suurempi kelausnopeus. Vastustavien voimien suuruutta kelaussuorituksessa voidaan mitata kokeellisesti ”coasting deceleration” -tekniikalla. Menetelmässä kelaustuoli kiihdytetään aluksi tiettyyn nopeuteen, jonka jälkeen kelaaja ottaa liikkumattoman kelaussuoritusta vastaavan asennon ja antaa tuolin pysähtyä. Tuolin alkunopeuden ja sen jälkeisen hidastumisen tai pysähtymiseen kuluvan matkan perusteella voidaan laskea vastustavien voimien suuruus. (Chua ym. 2010; Coutts 1991; Fuss 2009; Hoffman ym. 2003; Kwarciak ym. 2009.)

Vierimiskitka syntyy renkaiden ja alustan muodonmuutosten aiheuttamien energianhäviöiden seurauksena (van der Woude ym. 2000). Vierimiskitkan suuruus voidaan laskea yhtälön

$$F_{vierimis} = \mu_{vierimis} \times N \quad (2)$$

avulla, missä  $F_{vierimis}$  on renkaaseen kohdistuva vastustava voima,  $\mu_{vierimis}$  vierimiskitkakerroin ja  $N$  renkaaseen kohdistuva alustan tukivoima. (Hoffman ym. 2003.) Osassa tutkimuksista vierimiskitkan on todettu olevan kelausnopeudesta riippumatonta (Hoffman ym. 2003), mutta Fuss (2009) väitti nopeudesta riippuvan vierimiskitkan osuuden vastaavan noin 5 prosenttia koko vierimiskitkasta. Hoffman ym. (2003) määrittivät kilpavelaustuolin vierimiskitkakertoimeksi  $0,0013 \pm 0,0002$ . Suhteellisen hitaalla kelausnopeudella (4 metriä sekunnissa) vierimiskitkan arvioitiin vastaavan 20-30 prosenttia vastustavista voimista. (Hoffman ym. 2003.) Vierimiskitkaan ja vierimiskitkakertoimeen vaikuttavia tekijöitä on esitetty taulukossa 1. Takapyörien camber-kulmalla (pyörän kallistuskulma pystysuoraan nähden) ei ole kokeellisissa mittauksissa huomattu negatiivista vaikutusta vierimiskitkaan (Veeger ym. 1989b), vaikka teoreettisesta näkökulmasta tarkasteltuna vierimiskitkan voisi olettaa kasvavan camber-kulman suurentuessa (van der Woude ym. 2000).

Kelaussuorituksessa sisäinen kitka syntyy pyörien laakereiden kitkasta ja rungon mahdollisesta taipumisesta kelaussuorituksen aikana. Hyväkuntoisilla ja hyvin huolletuilla laakereilla laakerointikitka on pienempi kuin 0,1 prosenttia vierimiskitkasta. Huonokuntoisilla laakereilla sisäinen kitka saattaa kuitenkin nousta merkittäväksi tehon- ja energianhäviön syyksi. (van der Woude ym. 2000.) Työntövaiheen aikana tapahtuva rungon taipuminen johtaisi suureen sisäisen kitkan muodostumiseen sekä tehon- ja energianhä-

viöihin. Rungon taipumista kelaussuorituksen aikana ei kuitenkaan ole tutkittu, ja rungon taipumisen voidaankin olettaa olevan pientä nykyisissä kelaustuoleissa.

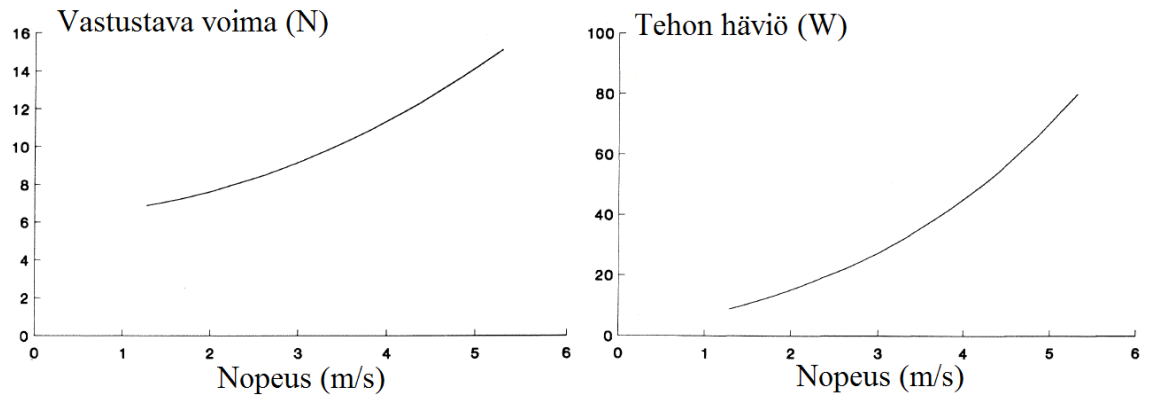
TAULUKKO 1. Vierimiskitkaan vaikuttavia tekijöitä (mukailtu van der Woude ym. 2000).

<b>Tekijä</b>	<b>Vaikutus vierimiskitkaan</b>
Urheilijan massa ↑	↑
Kelaustuolin massa ↑	↑
Renkaiden ilmanpaine ↑	↓
Renkaiden koko ↓	↑
Alustan kovuus ↑	↓
Camber-kulma ↑	?
Aurauskulma ↑	↑↑
Massakeskipiste suurten takapyörien päällä	↓
Taittuva runko	↑

Kelaussuorituksessa ilmanvastuksen aiheuttama vastustava voima voidaan laskea kaavalla

$$F_{ilma} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2, \quad (3)$$

missä  $F_{ilma}$  on ilmanvastuksen aiheuttama voima,  $\rho$  ilman tiheys,  $A$  kelaajan ja tuolin ilmavirtaa vastaan kohtisuora pinta-ala,  $C_d$  aerodynaaminen ilmanvastuskerroin ja  $v$  kelaajan nopeus ilman suhteen. (Hoffman ym. 2003.) Kelaussuorituksessa ilmanvastusta voidaan siis pienentää joko pinta-alaa tai aerodynaamista ilmanvastuskerrointa pienentämällä. Vartalon horisontaalinen asento kelaussuorituksen aikana pienentää pinta-alaa, ja kelaustuolin aerodynaamisella muotoilulla voidaan vaikuttaa ilmanvastuskertoimeen. (Hedrick ym. 1990.) Kilpakelaustuoleissa kelaajan ja tuolin ilmavirtaa vastaan kohtisuora pinta-ala on  $0,37 \pm 0,06 \text{ m}^2$ . Kelausnopeudella 4 metriä sekunnissa ilmanvastuksen osuus kaikista vastustavista voimista on jopa 70-80 prosenttia. (Hoffman ym. 2003.) Coutts (1991) huomasi vastustavien voimien (kitka ja ilmanvastus) summan kasvavan suhteessa nopeuden neliöön ja vastustavien voimien aiheuttaman tehon häviön kasvavan suhteessa nopeuden kuutioon (kuva 10). Tästä hän päätteli ilmanvastuksen olevan pääasiallinen syy suurempiin vastustaviin voimiin nopeuden kasvaessa. (Coutts 1991.)



KUVA 10. Vastustava voima ja tehon häviö kelausnopeuden kasvaessa (mukailtu Coutts 1991).

## 4.2 Massa

Kelaustuolin massa vaikuttaa suuresti kelaussuoritukseen ja loppu-aikaan varsinkin lyhyillä sprinttimatkoilla. Kelaajan tuottama energia  $E_{input}$  vaikuttaa kelaustuoli-urheilija-systeemin kineettisen energian  $E_{kin}$  muutokseen kaavan

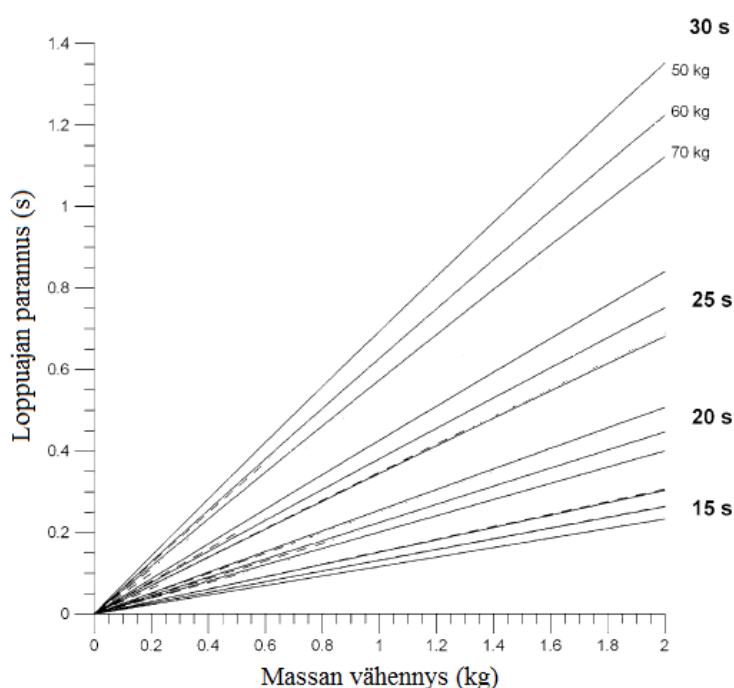
$$E_{kin} = E_{input} - (E_{ilma} + E_{kitka}) \quad (4)$$

mukaan, missä  $E_{ilma}$  ja  $E_{kitka}$  ovat ilmanvastuksen ja vierimiskitkan aiheuttamat energianhäviöt. Toisaalta systeemin kineettinen energia voidaan esittää muodossa

$$E_{kin} = \frac{1}{2}(mv^2 + \sum_{i=1}^3 I_i \omega_i^2), \quad (5)$$

missä  $m$  on kelaustuoli-urheilija-systeemin massa,  $v$  systeemin nopeus,  $I_i$  pyörän  $i$  hitausmomentti ja  $\omega_i$  pyörän  $i$  kulmanopeus. Ensimmäinen termi yhtälön oikealla puolella vastaa systeemin translaationaalista liike-energiaa, ja toinen termi kelaustuolin kolmen pyörän rotaationaalista energiaa. Yhtälöitä tarkastelemalla voidaan havaita, että systeemiin vaikuttavien energianhäviöiden ja systeemiin tuotetun energian säilyessä vakiona, seuraa pienemmästä kelaustuoli-urheilija-systeemin massasta suurempi nopeus. Massan vaikutus kelausnopeuteen on erityisen suuri lähtökiihdytyksen aikana, kun lähes kaikki tuotettu energia muuntuu systeemin kiihtyvyydeksi. Kelausnopeuden kasvaessa tuotettu energia kuluu vastustavien voimien vaikutuksen kumoamiseen, jolloin massan vaikutus kelausnopeuteen ei ole enää yhtä merkittävä. (Fuss 2009.)

Fuss (2009) tutki massan, ilmanvastuksen ja vierimiskitkan vaikutusta 100 metrin kelausaikaan kokeellisten mittaustulosten ja matemaattisen mallinnuksen avulla. Matemaattisen mallinnuksen avulla on mahdollista tarkastella yksittäisten parametrien muutosten vaikutusta kelaussuoritukseen, kun systeemiin tuotettu energia säilyy vakiona. Yhden kilogramman massan pieneneminen 60 kilogramman systeemissä todettiin vaikuttavan 100 metrin kelauksessa 15 sekunnin loppuaikaan 0,132 sekuntia (kuva 11), ja viiden kilogramman massan pienenemisen todettiin vaikuttavan loppuaikaan 0,66 sekuntia. Lisäksi massan pienenemisen todettiin vaikuttavan 15 sekunnin kelaussuorituksen loppuaikaan neljä kertaa enemmän kuin vierimiskitka- tai ilmanvastuskertoimen pieneneminen. (Fuss 2009.)



KUVA 11. Massan vähennyksen vaikutus 100 metrin kelauksen loppuaikaan eripituisissa suorituksissa ja eripainoisilla kelaustuoli-urheilija-systeemeillä (mukailtu Fuss 2009).

### 4.3 Kelaustuolin ja urheilijan välinen vuorovaikutus

Kelaustuolin mekaanisten ominaisuuksien lisäksi kelaustuolin ja urheilijan välisen vuorovaikutuksen tehokkuus vaikuttaa pyörätuolikelauksen suorituskykyyn. Hyvän vuorovaikutuksen kautta kelaajan tuottama energia ja teho siirtyvät parhaalla mahdollisella tavalla urheilijasta kelaustuoliin. Vuorovaikutuksen tehokkuuteen voidaan vaikuttaa istuma-asennon, camber-kulman ja työntökehän koon avulla.

### 4.3.1 Istuma-asento

Kelaussuorituksen istuma-asentoon voidaan vaikuttaa sekä istuimen paikan (istuinkorkeus, horisontaalinen etäisyys taka-akselista) että kulman avulla. Nykyisissä kelaustuoleissa vartalon asento on kelaussuorituksen aikana horisontaalinen, mikä pienentää ilmanvastuksen vaikutusta (O'Connor ym. 1998). Istuimen paikka alempana ja vartalon asennon suurempi fleksio tavallisiin pyörätuoleihin verrattuna mahdollistavat pidemmän työntömatkan ja voimantuoton työntökehän ympäri. (Goosey-Tolfrey ym. 2001).

Masse ym. (1992) huomasivat, että matalampi istuinkorkeus kasvatti kelaussyklin ja palautusvaiheen kestoa ja pienensi kelausfrekvenssiä. Matalamman istuinkorkeuden seurauksena suurempi osuus työntökehästä oli kelaajan ulottuvissa työntövaiheen aikana ja työntökulmat kasvoivat tämän seurauksena. Myös ranteen ja kyynärpään maksimaaliset kulmanopeudet työntövaiheen aikana kasvoivat matalammilla istuinkorkeuksilla. Tutkijat päättelivät, että matalammalla istuinkorkeudella työntövaiheen pidempi voimantuottomatka työntökehiin mahdollisti pienemmän kelausfrekvenssin. (Masse ym. 1992.) Kotajärvi ym. (2004) eivät löytäneet vastaavaa yhteyttä kelausfrekvenssin ja istuinkorkeuden väliltä. Istuinkorkeuden todettiin kuitenkin vaikuttavan työntö- ja palautusvaiheiden kestoihin sekä työntökulmaan. Matalammilla istuinkorkeuksilla huomattiin myös suurempi radiaalinen ja lateraalinen voimantuotto, vaikka tangentialinen voimantuotto säilyi muuttumattomana. (Kotajärvi ym. 2004.)

### 4.3.2 Camber-kulma

Camber-kulmalla tarkoitetaan kelaustuolin takapyörien kulmaa vertikaaliseen tasoon nähden. Camber-kulman etuna on stabiilin asennon saavuttaminen kelaussuorituksen aikana. Kelaustuolin stabiiliin asentoon vaikuttaa takapyörien kontaktipisteiden etäisyys toisistaan, mikä kasvaa camber-kulman myötä. Camber-kulman ajatellaan parantavan kelaajan ulottumista työntökehiin ja mahdollistavan esteettömän käsien ja vartalon liikkeen kelaussyklin aikana. Camber-kulman ajatellaan myös mahdollistavan tehokkaamman ja optimaalisemman voimantuoton työntökehiin. Stabiilin asennon lisäksi muita oletuksia camber-kulman hyödyistä ei ole kuitenkaan tutkimuksissa pystytty todistamaan. (Veeger ym. 1989b.)

Veeger ym. (1989b) totesivat camber-kulman muutoksen 0-9 astetta vaikuttavan työntöaikaan, kontaktikulmaan, työntökulmaan ja olkavarren abduktioon. Muutokset eivät kuitenkaan olleet johdonmukaisia siten, että muuttujat olisivat systemaattisesti kasvaaneet tai pienentyneet camber-kulman kasvaessa. Suuremmalla camber-kulmalla ei myöskään todettu olevan positiivista vaikutusta kinemaattisiin tai fysiologisiin muuttujiin. (Veeger ym. 1989b.) Camber-kulmilla 9-15 astetta ei löydetty eroja kelausnopeuden, tuotetun momentin, syklin keston, työntövaiheen keston tai tuotetun tehon suhteen (Faupin ym. 2008). Yli 15 asteen camber-kulmista (15, 18, 20 ja 24 astetta) vastustavien voimien aiheuttamat tehonhäviöt olivat suurimpia 20 ja 24 asteen kulmilla, mikä johtui vierimiskitkan kasvamisesta. Fysiologisista muuttujista hapenkulutus ja syke kasvoivat suuremmilla camber-kulmilla, mikä johti kelaussuorituksen mekaanisen hyötysuhteen heikkenemiseen. (Mason ym. 2011.)

### 4.3.3 Työntökehä

Työntökehän kokoa voidaan ajatella kelauksessa käytettävänä vaihteena. Pienempi työntökehän halkaisija vaatii suuremman voimantuoton ja pienemmän käden tangentiaalisen nopeuden vakionopeudella kelattaessa. Suuremmalla työntökehällä kelattaessa voimantuoton vaatimukset pienenevät, mutta vastaavasti vaadittu käden ja työntökehän tangentiaalinen nopeus kasvavat. (van der Woude ym. 2000.)

Costa ym. (2009) tutkivat työntökehän halkaisijan vaikutusta kelaussuoritukseen eri kelausnopeuksilla. Työntökehän halkaisijan suurenemisen todettiin kasvattavan kelausfrekvenssiä ja vastaavasti lyhentävän työntöaikaa kaikilla tutkituilla kelausnopeuksilla. Työntöajassa oli suurimmalla kelausnopeudella 27 prosentin ero erikokoisten työntökehien välillä, jolloin pienemmällä kelauskehällä oli mahdollista tuottaa vastaavan suuruisen impulssi työntökehiin pienemmällä lihasten voimantuotolla ja pidemmällä voimantuottoajalla. Pienimmän tutkitun työntökehän halkaisijan todettiin olevan taloudellisin suurilla kelausnopeuksilla. Hitaammilla kelausnopeuksilla saman työntökehän halkaisijan todettiin olevan epätaloudellisin, ja suuremmat työntökehän halkaisijat olivat taloudellisempia. (Costa ym. 2009.)

Sekä Costan ym. (2009) että van der Wouden ym. (1988) tutkimuksissa kaikki testattavat eivät pystyneet ylläpitämään suurinta vaadittua kelausnopeutta isoimmalla työntökehän halkaisijalla. Tutkijat päättelivät, että suurten työntökehien tangentiaalinen nopeus kasvoi liian suureksi, jolloin voimantuotto työntökehiin heikkeni. Työntökehän halkaisijan valinta onkin vaaditusta kelausnopeudesta ja urheilijan voimantuottoominaisuuksista riippuvaista. Tutkijat totesivat, että kaikille kelausnopeuksille on löydettävissä yksilöllinen optimaalinen työntökehän halkaisija, joka maksimoi urheilijan suorituskyvyn. (Costa ym. 2009).



## 5 TUTKIMUSONGELMAT JA HYPOTEESEIT

Pyörätuolikelauksessa kelaustuoli on oleellisessa osassa määrittämässä suorituskyyä (van der Woude ym. 2000). Matemaattisen mallinnuksen avulla on arvioitu jo pienen massan pudotuksen vaikuttavan merkittävästi kelaussuorituksen loppuaikaan. (Fuss 2009). Massan pienenemisen vaikutusta kelaussuoritukseen ja suorituskyyyn ei ole kuitenkaan kokeellisesti testattu.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää uuden massaltaan kevyemmän hiilikuiturunkoisen kilpakelaustuolin vaikutusta kelaussuoritukseen ja suorituskyyyn. Tutkimuksessa tutkittiin massan pienenemisen vaikutusta sekä lähtökiihdytyksen aikana että maksimivaiheen kelauksessa. Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää kilpakelaustuolien suunnittelussa ja valmistuksessa. Tutkimusongelmat ja hypoteesit (H) on muotoiltu seuraavasti:

### **1. Onko tuolin massalla vaikutusta kelaussuorituksen nopeusprofiiliin lähtökiihdytyksen ja maksiminopeuden osalta?**

*H1: Kiihtyvyys ja nopeus suorituksen alussa on suurempaa kevyemmällä tuolilla, ja maksimaalinen nopeus saavutetaan aikaisemmin. Tämän johdosta kelausajat ovat parempia kevyemmällä tuolilla.*

Massan vaikutus kelausnopeuteen on erityisen suuri lähtökiihdytyksen aikana, kun lähes kaikki tuotettu energia muuntuu systeemin kiihtyvyydeksi. Matemaattisen mallinnuksen perusteella jo pienten massan pudotusten on todettu vaikuttavan kelauksen loppuajoihin merkittävästi. (Fuss 2009.)

### **2. Ovatko uuden ja vanhan kelaustuolin kelausasennot samanlaisia? Vastaako uuden kelaustuolin rungon jäykkyys vanhaa kelaustuolia?**

*H2: Kelausasento tuoleissa säilyy samanlaisena, ja kelaustuolin jäykkyysominaisuudet vastaavat toisiaan.*

Uutta kelaustuolia valmistettaessa on rungosta pyritty tekemään samat geometriset mitasuhteet omaava ja yhtä jäykkä kuin vanhasta kelaustuolista.

### **3. Miten massan pieneneminen vaikuttaa vastustaviin voimiin?**

*H3: Vastustavissa voimissa ei ole eroa tuolien välillä.*

Ilmanvastuksen pitäisi tuoleissa pysyä samansuuruisena, sillä tuolien muoto vastaa toisiaan. Kelausnopeudella 4 metriä sekunnissa ilmanvastuksen osuus kaikista vastustavista voimista on 70-80 prosenttia (Hoffman ym. 2003). Massan pieneneminen pienentää myös vierimiskitkaa, mutta vierimiskitkakertoimen pysyessä samana on tämän vaikutus vastustavaan kokonaisvoimaan mitätön.

## 6 MENETELMÄT

### 6.1 Tutkittava

Tutkimus toteutettiin tapaustutkimuksena, jossa huippupyörätuolikelajaalle kehitettyä uutta kevyempää kelaustuolia verrattiin käytössä olevaan vanhaan kelaustuoliin. Tutkimukseen osallistunut pyörätuolikelaja on 100 metrin pyörätuolikelauksen kaksikertainen paralympiavoittaja, maailman- ja euroopanmestari, sekä tämänhetkisen maailmanennätyksen haltija. Tutkittava antoi kirjallisen suostumuksen mittauksiin osallistumisesta ja tulosten julkistamisesta.

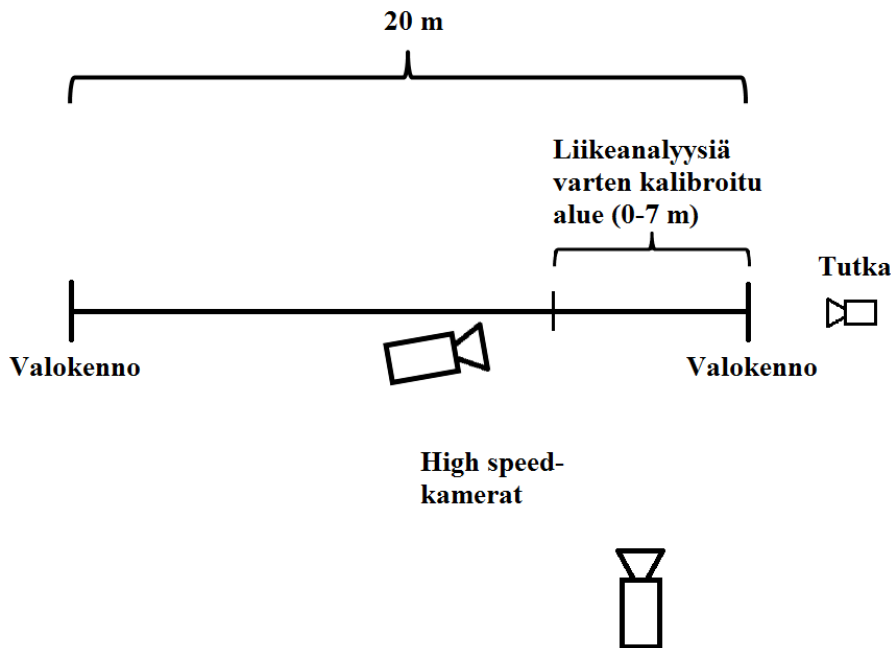
Mittauksissa käytettiin kahta eri hiilikuiturunkoista kelaustuolia: uutta kevyempää kelaustuolia (massa 9,04 kg) ja vanhaa kilpailukäytössä ollutta raskaampaa kelaustuolia (massa 9,60 kg). Tuoleissa käytettiin samanlaisia pyöriä, joiden ilmanpaineet tarkistettiin ennen mittausten aloitusta.

### 6.2 Mittausprotokolla

Mittaukset suoritettiin kahtena päivänä sisäradalla. Mittausten aluksi testattava teki normaalin alkulämmittelyn, jonka aikana suoritettiin kelaustuolin vastustavien voimien arvioimiseksi ”coasting deceleration” -testi. Ensimmäisenä mittauspäivänä ”coasting deceleration” -testi tehtiin vanhalla kelaustuolilla, ja toisena mittauspäivänä uudella kelaustuolilla. Alkulämmittelyn jälkeen tehtiin kuusi 20 metrin maksimaalista lähtökiihdytystä. Ensimmäiset kolme lähtökiihdytystä tehtiin vanhalla kelaustuolilla, jonka jälkeen tehtiin kolme lähtökiihdytystä uudella tuolilla. Suoritusten välissä oli 7 minuutin palautus. Lähtökiihdytysten jälkeen pidettiin 30 minuutin palautusaika, jonka jälkeen tehtiin neljä 100 metrin kelausta. Ensimmäiset kaksi suoritusta tehtiin vanhalla kelaustuolilla, jonka jälkeen vaihdettiin uuteen kelaustuoliin. Suoritusten välissä pidettiin 15 minuutin palautus. Toisena mittauspäivänä tehtiin samat mittaukset käännettyssä järjestyksessä siten, että lähtökiihdytykset ja täysimittaiset kelaukset tehtiin ensin uudella kelaustuolilla.

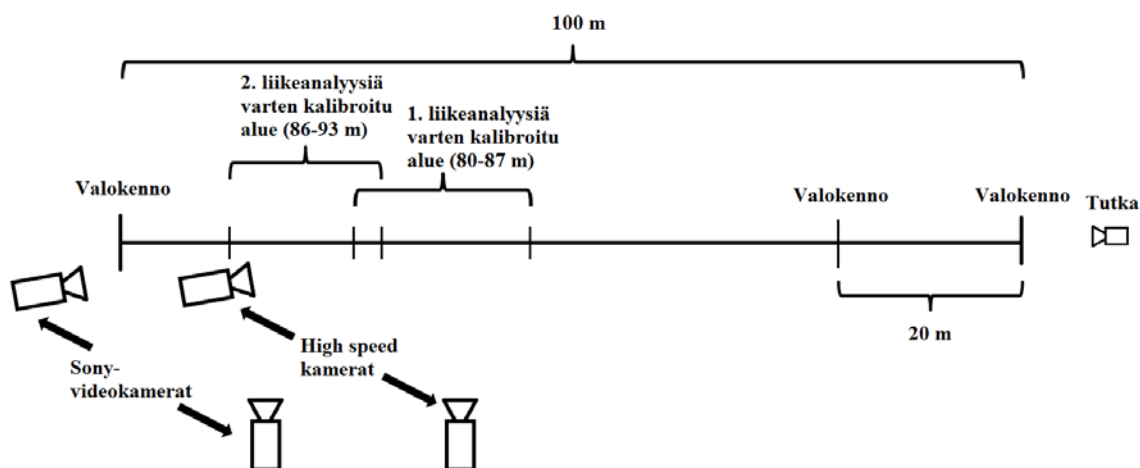
”Coasting deceleration” -testissä testattava kiihdytti ensin ennalta määrättyyn alkunopeuteen (1, 2, 3, 4, 5, 6 ja 7 m/s). Tämän jälkeen hän otti liikkumattoman aerodynaamisen kelausasennon, ja antoi kelaustuolin rullata pysähdyksiin asti. Kullakin alkunopeudella mitattiin yksi onnistunut suoritus. Kelaustuolin nopeus mitattiin lasertutkalla (Jena Optik, Saksa) 50 Hz keräystaajuudella.

Lähtökiihdytyksissä testattava lähti paikoiltaan liikkeelle ja kiihdytti maksimaalisesti 20 metrin matkan. Suoritukseen kulunut aika mitattiin Sunx VF -valokennoilla (Panasonic Corporation, Japani) millisekunnin tarkkuudella (kuva 12). Kelaustuolin nopeus mitattiin koko suorituksen ajalta lasertutkalla. Tutkan etäisyyden nollakohta kalibroitiin lähtöviivan kohdalle. Lähdöstä kuvattiin ensimmäiset seitsemän metriä kahdella Nac Memrecam fx K4 suurnopeuskameralla (NAC Image Technology, USA) 250 Hz kuvaustaajuudella 3d-liikeanalyysiä varten.



KUVA 12. Lähtökiihdytysten mittausasetelma.

Sadan metrin maksimaalisista kelauksista mitattiin valokennoilla 20 metrin väliaika ja 100 metrin loppuaika (kuva 13). Kelausnopeus mitattiin koko suorituksen ajalta laseritutkalla. Tutkan etäisyyden nollakohta kalibroitiin lähtöviivan kohdalle. Maksiminopeuden vaiheesta kuvattiin yhteensä 13 metrin matka (80-93 metriä lähdöstä) 3d-liikeanalyysiä varten. Ensimmäinen seitsemän metrin matka kuvattiin kahdella suurnopeuskameralla 250 Hz kuvaustaajuudella ja jälkimmäinen 7 metrin matka kahdella Sony HXR-NX70E –videokameralla (Sony Electronics Oy, USA) 100 Hz kuvaustaajuudella.



KUVA 13. Täysimittaisten 100 metrin kelausten mittausasetelma.

### 6.3 Tulosten analysointi

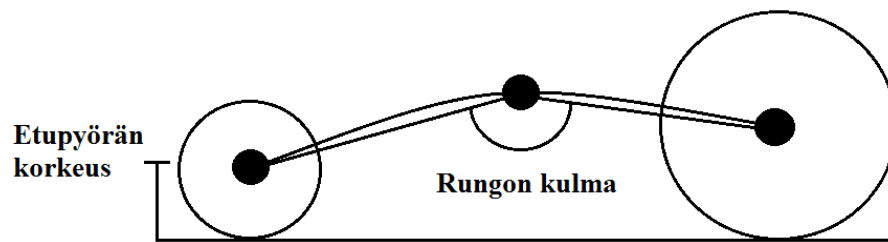
Tutkan paikka- ja nopeusdata suodatettiin digitaalisella 4. asteen vaihesiirrottomalla butterworth-alipäästäsuodattimella kolmen hertsin leikkaustaajuudella. Tutkan datasta analysoitiin lähtökiihdytyksistä väliajat viiden metrin välein ja 100 metrin kelauksista väliajat 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ja 100 metrin matkoilta. Tutkan nopeusdatasta analysoitiin keskinopeudet väleiltä 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 ja 90-100 metriä. Nopeimmista molempien tuolien lähtökiihdytyksistä ja täysimittaisista kelauksista piirrettiin aika-nopeuskoordinaatistoon kuvaajat suoritusten nopeusprofiilien havainnollistamiseksi.

Kelaustuoliin vaikuttavia vastustavia voimia arvioitiin ”coasting deceleration” -testien nopeusdatan perusteella. Kaikilla alkunopeuksilla tehtyjen suoritusten rullaosuuksien nopeus piirrettiin aika-nopeus-koordinaatistoon ja dataan tehtiin lineaarinen suoransovitus. Suoransovitusten vakiotermit vastasivat tällöin alkunopeutta, ja suoran kulmakerroin kelaustuolin kiihtyvyyttä. Eri alkunopeuksilla tehtyjen rullausten alkunopeuden ja kiihtyvyyden arvot sijoitettiin nopeus-kiihtyvyys-koordinaatistoon. Kelaustuoliin vaikuttavien vastustavien voimien tulisi kasvaa suhteessa nopeuden neliöön (yhtälö 3), joten nopeus-kiihtyvyys-dataan sovitettiin toisen asteen polynomi. Vastustavien voimien suuruus laskettiin kiihtyvyyden ja kelaustuoli-kelaaja-systeemin massan perusteella. Vastustavia voimia laskettaessa ei otettu huomioon pyöriin varastoitunutta pyörimisenergiaa, joten lasketut vastustavat voimat ovat pienempiä kuin todelliset vastusta-

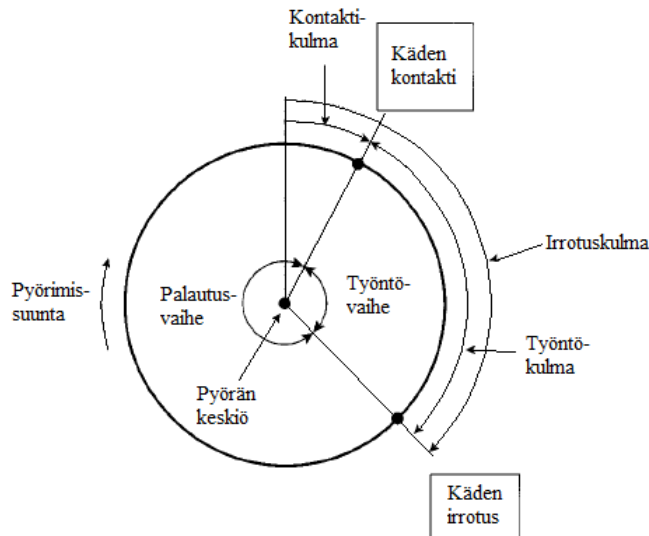
vat voimat. Tuoleissa käytettiin identtisiä renkaita, joten tuolien välinen vertailu vastustavien voimien osalta on kuitenkin mahdollista.

Liikeanalyysin videokuvien kalibrointia varten käytettiin 24 heijastavaa markkeria, joiden kolmiulotteiset koordinaatit määritettiin takymetrin (Nikon Corporation, Japani) avulla millimetrin tarkkuudella. Kelaussuorituksista digitoitiin Apasliikeanalyysiohjelmistolla (Ariel Dynamics Oy, USA) yhteensä kymmenen pistettä kelaajan kelaussuuntaan nähden vasemmalta puolelta. Etupyörän keskiö, takapyörän keskiö, rungon keskipiste ja rannenivel digitoitiin heijastavien markkerien perusteella. Jalalauta, nilkkanivel, polvinivel, olkanivel, kyynärnivel ja käden kontaktipiste työntörenkaaseen digitoitiin visuaalisen tarkastelun perusteella. Lähtökiihdytykset ja sadan metrin suoritusten ensimmäinen kuvausalue digitoitiin 125 Hz taajuudella. Sadan metrin suoritusten jälkimmäinen kuvausalue digitoitiin 100 Hz taajuudella. Digitoinnin yhteydessä kelaussykliä, työntövaiheiden ja palautusvaiheiden kestot määritettiin videokuvaista. Työntövaiheeksi määriteltiin se aika, jonka käsi oli kontaktissa työntörenkaaseen, ja vastaavasti palautusvaiheeksi se aika, jonka käsi oli irti työntörenkaasta. Digitoitujen pisteiden kolmiulotteiset koordinaatit laskettiin DLT-algoritmin avulla. Koordinaattipisteet suodatettiin digitaalisella alipäästösuodattimella 5 Hz leikkaustaajuudella. Digitoitujen pisteiden paikka-, nopeus- ja kiihtyvyydata tallennettiin liikeanalyysiohjelmasta Excel-taulukkolaskentaohjelmistoon (Microsoft, USA) tulosten jatkokäsittelyä ja analysointia varten.

Liikeanalyysidatasta laskettiin digitoitujen pisteiden nopeus- ja kiihtyvyyshuomautukset kelaussykliä eri vaiheista (koko sykli, työntövaihe, palautusvaihe). Kelausasentojen samankaltaisuutta arvioitiin laskemalla nivelpisteiden paikat suhteessa takapyörän keskiöön työntö- ja palautusvaiheiden alussa. Rungon taipumista ja jäykkyyttä arvioitiin laskemalla takapyörän, rungon markkerin ja etupyörän muodostaman kulman keskihajonta työntö- ja palautusvaiheen aikana (kuva 14). Kelaustuolin keulinnan (etupyörän irtoaminen maasta) suuruus laskettiin etupyörän syklin aikaisen maksimi- ja minimikorkeuden erotuksena. Käden kontakti- ja irrotuskulma sekä syklin työntökulma määritettiin kuvan 15 osoittamalla tavalla.



KUVA 14. Rungon kulma ja etupyörän korkeus.



KUVA 15. Käden kontakti- ja irrotuskulma, sekä syklin työntökulma.

## 6.4 Tilastollinen tarkastelu

Tulokset on esitetty muodossa keskiarvo  $\pm$  keskihajonta. Suorituksen ja kelaustuolin sekä päivän ja kelaustuolin vaikutusta lähtökiihdytysten aikamuuttujiin tutkittiin toistettujen mittausten varianssianalyysin avulla. Analyysin avulla pyrittiin selvittämään, syntykö lähtökiihdytyksiin eroja suoritusten lukumäärän lisääntyessä (esim. uupumuksen seurauksena), ja poikkesivatko lähtökiihdytykset toisistaan eri mittauspäivinä. Lisäksi analyysillä selvitettiin, olivatko suorituksen tai päivän aiheuttamat muutokset samanlaisia molemmilla tuoleilla. Suorituksen järjestyksellä ei ollut vaikutusta lähtökiihdytyksen 5, 10, 15 tai 20 metrin kelausaikoihin. Sen sijaan suorituksen ja kelaustuolin yhdysvaikutus 20 metrin kelausaikaan oli tilastollisesti merkitsevä ( $p < 0.05$ ). Vanhalla kelaustuolilla suoritusten ajat paranivat suoritusten lukumäärän lisääntyessä, kun taas uudella kelaustuolilla ajat pysyivät samalla tasolla. Mittauspäivällä ei ollut vaikutusta 5, 10, 15

tai 20 metrin kelausaikoihin. Mittauspäivän vaikutus kelaussuorituksen aikamuuttujiin oli samanlainen kummallakin kelaustuolilla.

Toistettujen mittausten varianssianalyysin tulosten perusteella vanhalla ja uudella kelaustuolilla tehtyjä lähtökiihdytyksiä käsiteltiin omina ryhminään, ja uuden ja vanhan kelaustuolin välisiä eroja testattiin itsenäisten otosten Mann-Whitney U-testillä. Lähtökiihdytyksissä uudella ja vanhalla tuolilla tehtyjä suorituksia oli ryhmävertailussa kuusi kummassakin ryhmässä. Liikeanalyysin muuttujia vertailtiin toisiinsa sykleittäin, sillä lähtökiihdytyksen aikana ensimmäiset syklit poikkeavat toisistaan huomattavasti.

Täysimittaisissa 100 metrin kelauksissa vanhalla tuolilla tehtyjä kelaussuorituksia oli neljä ja uudella tuolilla tehtyjä kelaussuorituksia kolme. Tämä johtui siitä, että uuden kelaustuolin suorituksista saatiin analysoitua toiselta mittauspäivältä välinerikon vuoksi ainoastaan yksi 100 metrin kelaussuoritus. Täysimittaisista kelaussuorituksista analysoitiin liikeanalyysin avulla yhteensä 15 vanhan kelaustuolin kelaussykliä ja 12 uuden kelaustuolin kelaussykliä. Uudella ja vanhalla kelaustuolilla tehtyjen suoritusten ja syklien välisiä eroja testattiin Mann-Whitney U-testillä. Kelaustuolin palautusvaiheen aikaisen nopeuden hidastumisen ja keulimisen välistä yhteyttä tutkittiin Pearsonin korrelaatiokertoimen avulla.

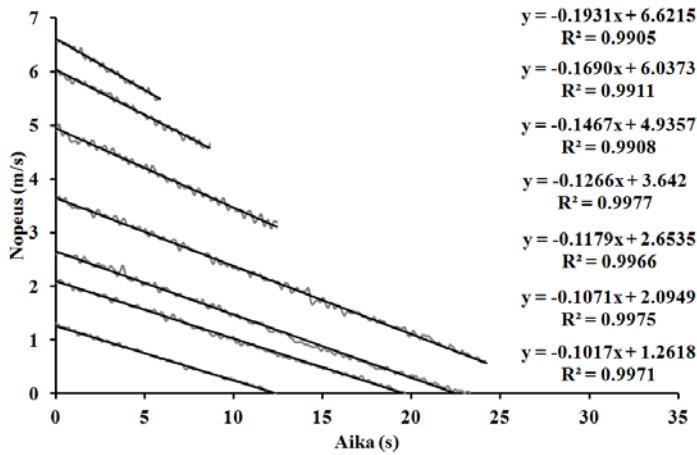
Tilastollisiin testeihin käytettiin PASW 18.0-tilastolaskentaohjelmaa (SPSS Oy, USA) ja tilastollisen merkitsevyyden rajaksi asetettiin  $p < 0.05$ .



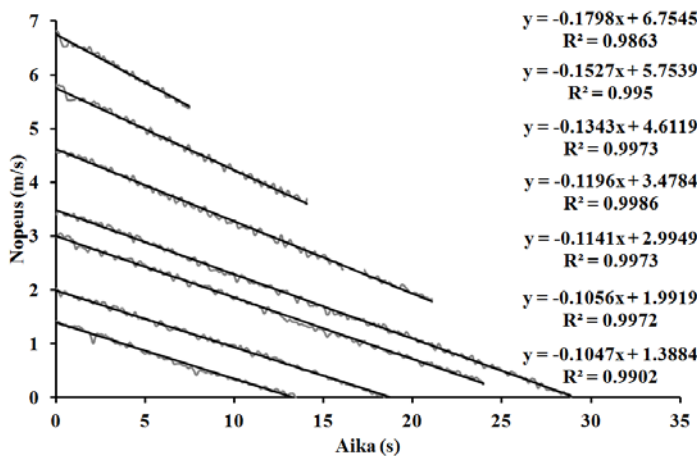
## 7 TULOKSET

### 7.1 ”Coasting deceleration” -testit

Vanhan (kuva 16) ja uuden (kuva 17) kelaustuolin ”coasting deceleration” -testien nopeusdatan suoransovitukset vastasivat hyvin mitattuja nopeusarvoja. Suoransovitusten  $R^2$ -arvot vaihtelivat 0,986 ja 0,999 välillä. Tuolien hidastuvuus oli odotetusti sitä suurempaa, mitä suurempi tuolin alkunopeus oli.

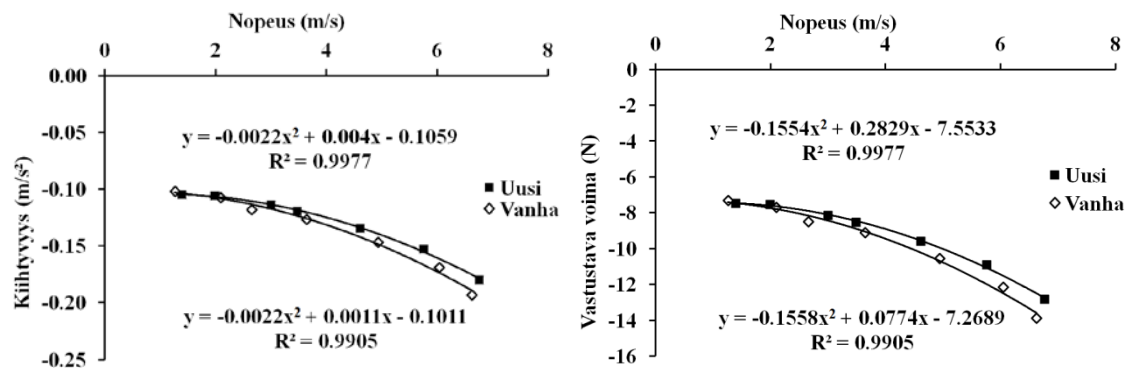


KUVA 16. Vanhan kelaustuolin nopeus ja lineaariset suoransovitteet eri alkunopeuksilla tehdyistä ”coasting deceleration” -testeistä. Suoransovitteiden yhtälöt ja  $R^2$ -arvot on esitetty allekkain suurimmasta alkunopeudesta pienimpään.



KUVA 17. Uuden kelaustuolin nopeus ja lineaariset suoransovitteet eri alkunopeuksilla tehdyistä ”coasting deceleration” -testeistä. Suoransovitteiden yhtälöt ja  $R^2$ -arvot on esitetty allekkain suurimmasta alkunopeudesta pienimpään.

Kelausnopeuden ja tuolin kiihtyvyyden välisen yhteyden selvittämiseksi ”coasting deceleration” -testien nopeusdatan suoransovitteista sijoitettiin suorien yhtälöiden vakiotermit (tuolin alkunopeus) ja kulmakertoimet (kiihtyvyys) nopeus-kiihtyvyysskoordinaatistoon (kuva 18). Nopeus-kiihtyvyys-dataan tehdyt toisen asteen polynomisovitteet vastasivat hyvin mitattuja arvoja (uusi tuoli  $R^2 = 0,998$ , vanha tuoli  $R^2 = 0,991$ ). Vastustavien voimien suuruus eri nopeuksilla laskettiin kiihtyvyyden ja kelaustuoli-kelaaja-systeemin kokonaismassan tulona. Suuremmilla nopeuksilla vanhan kelaustuolin hidastuvuus ja vastustavat voimat olivat suurempia uuteen kelaustuoliin verrattuna.



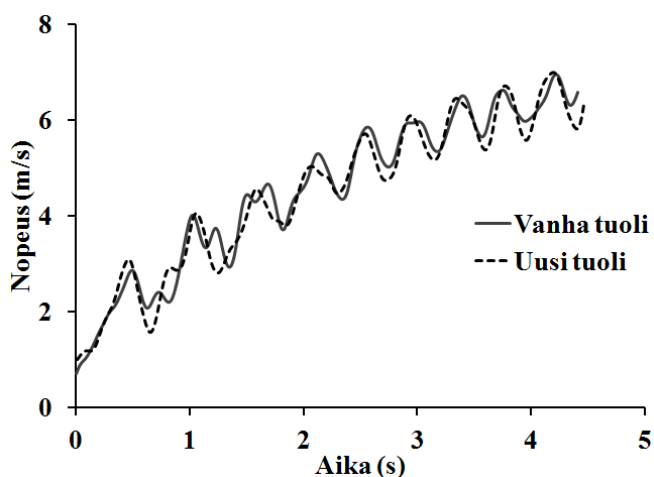
KUVA 18. Kelaustuolien kiihtyvyys ja vastustavien voimien suuruus nopeuden funktiona. Kuvaajista on nähtävissä, että vanhan kelaustuolin hidastuvuus ja vastustavat voimat olivat suurempia kuin uudessa kelaustuolissa.

## 7.2 Lähtökiihdytykset

Vanhalla ja uudella kelaustuolilla tehdyillä lähtökiihdytyksillä ei ollut eroa kelausaikojen tai keskimääräisten kelausnopeuksien suhteen (taulukko 2). Nopeimmat yksittäiset ajat kuitenkin kelattiin vanhalla kelaustuolilla (kuva 19).

TAULUKKO 2. Kelausajat vanhalla ja uudella kelaustuolilla 5, 10, 15 ja 20 metrin kohdilta, sekä keskimääräinen nopeus väleiltä 0-5, 5-10, 10-15 ja 15-20 metriä.

Matka (m)	5	10	15	20
Aika (s) - Vanha tuoli	1,77 ± 0,05	2,81 ± 0,04	3,68 ± 0,05	4,47 ± 0,06
Aika (s) - Uusi tuoli	1,80 ± 0,02	2,85 ± 0,03	3,72 ± 0,03	4,51 ± 0,03
Nopeus (m/s) - Vanha tuoli	2,85 ± 0,06	4,80 ± 0,10	5,76 ± 0,11	6,33 ± 0,12
Nopeus (m/s) - Uusi tuoli	2,78 ± 0,04	4,77 ± 0,05	5,78 ± 0,04	6,34 ± 0,07



KUVA 19. Nopeusprofiilit nopeimmasta vanhalla ja uudella kelaustuolilla tehdystä lähtökiihdytyksestä. Nopein vanhan tuolin 20 metrin aika oli 4,41 sekuntia ja nopein uuden tuolin aika 4,46 sekuntia.

Kelaussyklien kestot ja kelausfrekvenssi eri kelaustuoleilla poikkesivat toisistaan ainostaan ensimmäisen kelaussyklin osalta (taulukko 3). Ero ensimmäisen syklin kestossa johtui työntövaiheen pituudesta, mikä oli vanhalla tuolilla selvästi lyhyempi kuin uudella tuolilla. Palautusvaiheen kestossa ei ollut eroa tuolien välillä.

TAULUKKO 3. Sykliin, työntövaiheiden ja palautusvaiheiden kestot eri kelaussykleissä (\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ ).

Sykli	Syklin kesto (s)		Työntövaiheen kesto (s)		Palautusvaiheen kesto (s)	
	Vanha tuoli	Uusi tuoli	Vanha tuoli	Uusi tuoli	Vanha tuoli	Uusi tuoli
1	$0.95 \pm 0.05^*$	$1.02 \pm 0.06$	$0.66 \pm 0.05^{**}$	$0.74 \pm 0.06$	$0.29 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.01$
2	$0.62 \pm 0.01$	$0.63 \pm 0.03$	$0.37 \pm 0.01$	$0.38 \pm 0.02$	$0.25 \pm 0.01$	$0.24 \pm 0.01$
3	$0.53 \pm 0.01$	$0.53 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.01$	$0.29 \pm 0.01$	$0.24 \pm 0.01$	$0.24 \pm 0.01$
4	-	-	$0.23 \pm 0.01$	$0.25 \pm 0.01$	-	-

Nopeuden muutos oli suurinta ensimmäisen syklin aikana. Vanhan tuolin nopeuden muutos ensimmäisen syklin aikana oli suurempi kuin uuden tuolin nopeuden muutos (taulukko 4). Myös ensimmäisen syklin työntövaiheen keskimääräinen kiihtyvyys oli vanhalla tuolilla suurempi kuin uudella tuolilla. Toisen syklin aikana vastaavia eroja ei ollut havaittavissa, ja kolmannessa kelaussyklissä uuden tuolin nopeuden muutos oli jopa suurempaa kuin vanhassa kelaustuolissa. Palautusvaiheessa tuolien keskimääräisissä kiihtyvyyksissä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja.

TAULUKKO 4. Kelaustuolin nopeuden muutos syklin aikana sekä työntö- ja palautusvaiheiden keskimääräiset kiihtyvyydet (\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ ).

Sykli	Nopeuden muutos syklin aikana (m/s)		Työntövaiheen keskimääräinen kiihtyvyys (m/s <sup>2</sup> )		Palautusvaiheen keskimääräinen kiihtyvyys (m/s <sup>2</sup> )	
	Vanha tuoli	Uusi tuoli	Vanha tuoli	Uusi tuoli	Vanha tuoli	Uusi tuoli
1	2.13 ± 0.04**	1.95 ± 0.11	3.41 ± 0.20**	2.90 ± 0.19	-0.43 ± 0.26	-0.73 ± 0.42
2	1.00 ± 0.03	0.99 ± 0.07	4.15 ± 0.20	4.19 ± 0.42	-2.13 ± 0.25	-2.51 ± 0.63
3	0.74 ± 0.03*	0.79 ± 0.04	4.72 ± 0.16	4.90 ± 0.53	-2.46 ± 0.24	-2.73 ± 0.68
4	-	-	4.74 ± 0.61	4.87 ± 0.60	-	-

Kelaustuolien kelausasennot poikkesivat toisistaan siten, että uuden kelaustuolin istuma-asento oli taaempänä kuin vanhan kelaustuolin istuma-asento. Olkapää oli kelaussuuntaan nähden edempänä vanhassa tuolissa kuin uudessa tuolissa (taulukko 5). Tuolien erilainen istuma-asento näkyi myös käden kontakti- ja irrotuskulmissa (taulukko 6). Sekä kontakti- että irrotuskulmat olivat vanhalla tuolilla suurempia kuin uudella tuolilla. Rungon jäykkyys oli vanhassa tuolissa suurempi kuin uudessa kelaustuolissa (taulukko 7). Alkukiihdytyksissä suurimmat vääntymät runkoon syntyivät ensimmäisen syklin työntövaiheen aikana.

TAULUKKO 5. Olkapään paikka suhteessa taka-akseliin työntövaiheen alussa ja lopussa. Olkapään paikka on ilmoitettu kelaussuunnan suuntaisena etäisyytenä taka-akselista. (\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ )

Sykli	Olkapään paikka suhteessa taka-akseliin-työntövaiheen alku (m)		Olkapään paikka suhteessa taka-akseliin-työntövaiheen loppu (m)	
	Vanha tuoli	Uusi tuoli	Vanha tuoli	Uusi tuoli
1	0.361 ± 0.011	0.365 ± 0.015	0.372 ± 0.007**	0.354 ± 0.005
2	0.273 ± 0.009*	0.258 ± 0.008	0.358 ± 0.013**	0.327 ± 0.008
3	0.302 ± 0.005*	0.280 ± 0.015	0.371 ± 0.007	0.357 ± 0.013
4	0.325 ± 0.004*	0.306 ± 0.013	0.370 ± 0.005	0.355 ± 0.013

TAULUKKO 6. Käden kontakti-, irrotus- ja työntökulmat (\* p&lt;0.05, \*\* p&lt;0.01).

Sykli	Kontaktikulma (°)		Irrotuskulma (°)		Työntökulma (°)	
	Vanha tuoli	Uusi tuoli	Vanha tuoli	Uusi tuoli	Vanha tuoli	Uusi tuoli
1	44.0 ± 4.3	41.0 ± 1.8	142.5 ± 2.2	138.0 ± 3.8	98.6 ± 5.1	97.0 ± 4.5
2	-0.6 ± 2.5**	-5.4 ± 3.0	160.4 ± 2.9**	152.4 ± 3.7	161.0 ± 2.5	157.8 ± 3.8
3	5.4 ± 3.4	-2.6 ± 9.7	168.6 ± 3.2**	160.4 ± 5.4	163.3 ± 5.1	163.0 ± 8.2
4	15.0 ± 3.6**	3.7 ± 11.0	172.9 ± 2.5*	166.4 ± 6.4	157.9 ± 3.3	162.7 ± 8.9

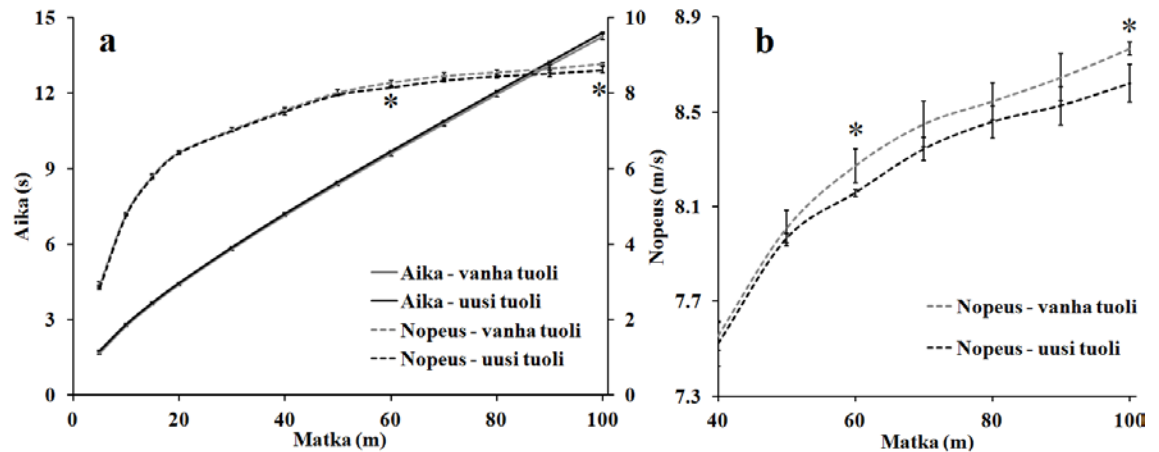
TAULUKKO 7. Rungon taipuminen työntö- ja palautusvaiheen aikana. (\*\* p&lt;0.01)

Sykli	Rungon kulman keskihajonta työntövaiheessa (°)		Rungon kulman keskihajonta palautusvaiheessa (°)	
	Vanha tuoli	Uusi tuoli	Vanha tuoli	Uusi tuoli
1	0.41 ± 0.15	0.42 ± 0.09	0.36 ± 0.30	0.27 ± 0.18
2	0.18 ± 0.04	0.29 ± 0.11	0.15 ± 0.06	0.15 ± 0.02
3	0.10 ± 0.04**	0.25 ± 0.09	0.12 ± 0.05**	0.27 ± 0.05
4	0.22 ± 0.07**	0.34 ± 0.04	-	-

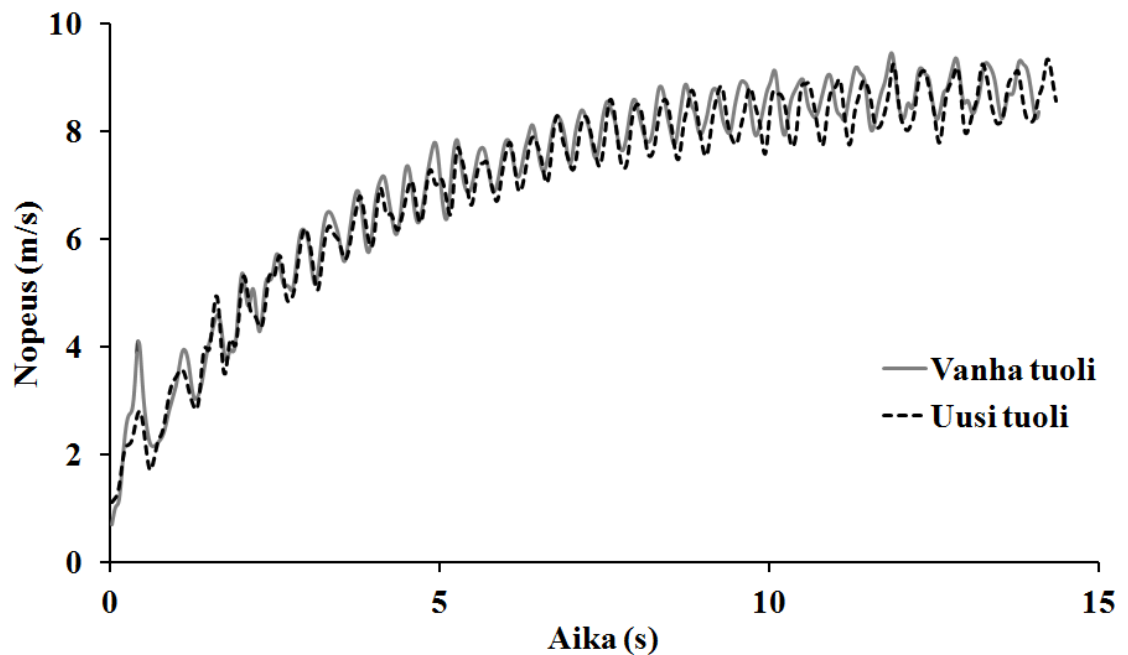
### 7.3 Sadan metrin kelaussuoritukset

Sadan metrin kelaussuoritusten loppuajoissa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa vanhan ja uuden kelaustuolin välillä (kuva 20). Kolme nopeinta kelausaikaa kelattiin kuitenkin vanhalla kelaustuolilla. Kelaustuolien keskimääräiset nopeudet väleillä 50-60 ja 90-100 metriä olivat vanhalla kelaustuolilla suurempia kuin uudella kelaustuolilla. Nopeusprofiilit nopeimmista vanhalla ja uudella kelaustuolilla kelatuista suorituksista on esitetty kuvassa 21.

Sykljen kestoissa ja kelausfrekvenssissä ei ollut eroa maksiminopeuden vaiheessa tuolien välillä. Vanhan kelaustuolin syklin kesto oli  $0,46 \pm 0,03$  ja uuden kelaustuolin  $0,45 \pm 0,01$  sekuntia. Vanhan kelaustuolin työntövaihe oli kuitenkin lyhyempi kuin uuden kelaustuolin työntövaihe ( $0,146 \pm 0,007$  s vs.  $0,154 \pm 0,009$  s;  $p < 0.05$ ). Palautusvaiheiden kestossa ei ollut eroa tuolien välillä. Vanhan kelaustuolin kelausfrekvenssi oli  $2,19 \pm 0,13$  Hz ja uuden kelaustuolin kelausfrekvenssi  $2,22 \pm 0,05$  Hz.



KUVA 20. Kelausajat vanhalla ja uudella kelaustuolilla 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ja 100 metrin kohdilta, sekä keskimääräinen nopeus väleiltä 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 80-90 ja 90-100 metriä (a). Keskimääräiset nopeudet 40-100 metrin matkalta on esitetty erikseen skaalatussa kuvaajassa tuolien välisten nopeuserojen havainnollistamiseksi (b). (\*  $p < 0.05$ )



KUVA 21. Nopeusprofiilit nopeimmasta vanhalla ja uudella kelaustuolilla tehdystä 100 metrin kelaussuorituksesta. Nopein 100 metrin kelausaika vanhalla tuolilla oli 14,09 sekuntia ja nopein kelausaika uudella tuolilla 14,36 sekuntia.

Vanhan kelaustuolin syklin, työntövaiheen ja palautusvaiheen keskimääräiset nopeudet olivat suurempia kuin uudella kelaustuolilla tehdyissä suorituksissa (taulukko 8). Uudella tuolilla nopeus kasvoi työntövaiheen aikana enemmän ja keskimääräinen kiihtyvyys oli suurempaa kuin vanhalla tuolilla, mutta vastaavasti nopeuden pieneneminen ja hi-

dastuvuus palautusvaiheen aikana olivat myös suurempia. Kelaustuolien nopeus työntövaiheen jälkeen oli yhtä suuri, mutta palautusvaiheen aikana uuden kelaustuolin nopeus tippui enemmän kuin vanhan kelaustuolin nopeus, jolloin nopeuksissa työntövaiheen alussa oli selvä ero.

TAULUKKO 8. Vanhan ja uuden kelaustuolin nopeus- ja kiihtyvyyssuuttujia kelaussyklin eri vaiheista (\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ ).

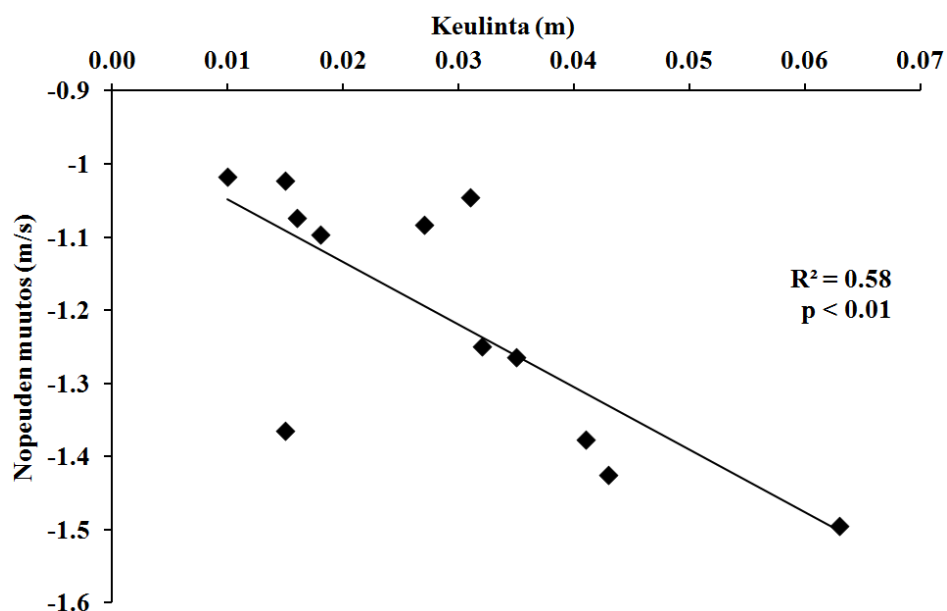
	Vanha tuoli	Uusi tuoli
Syklin keskimääräinen nopeus (m/s)	8.68 ± 0.07**	8.56 ± 0.02
Työntövaiheen keskimääräinen nopeus (m/s)	8.48 ± 0.08***	8.34 ± 0.04
Palautusvaiheen keskimääräinen nopeus (m/s)	8.77 ± 0.06**	8.67 ± 0.05
Nopeuden muutos syklin aikana (m/s)	-0.01 ± 0.09	-0.01 ± 0.09
Nopeuden muutos työntövaiheen aikana (m/s)	0.72 ± 0.11**	1.00 ± 0.11
Nopeuden muutos palautusvaiheen aikana (m/s)	-0.73 ± 0.13**	-1.01 ± 0.15
Nopeus työntövaiheen alussa (m/s)	8.12 ± 0.08***	7.87 ± 0.06
Nopeus työntövaiheen lopussa (m/s)	8.84 ± 0.09	8.87 ± 0.12
Työntövaiheen keskimääräinen kiihtyvyys (m/s <sup>2</sup> )	4.82 ± 0.59***	6.26 ± 0.67
Palautusvaiheen keskimääräinen kiihtyvyys (m/s <sup>2</sup> )	-2.27 ± 0.63*	-3.31 ± 0.53

Maksiminopeuden vaiheen kelaussykleistä oli huomattavissa samat asiat kelauksen istuma-asennosta ja rungon jäykkyydestä kuin lähtökiihdytyksissä. Istuma-asento oli uudessa kelaustuolissa hieman taaempänä kuin vanhassa kelaustuolissa. Tämä näkyi olkapään paikassa suhteessa taka-akseliin ja käden kontaktikulmissa työntörenkaaseen (taulukko 9). Vanhan tuolin rungon jäykkyys oli suurempi kuin uuden tuolin jäykkyys sekä työntö- että palautusvaiheen aikana.

Kelaussyklin aikainen keulinta oli uudella tuolilla suurempaa kuin vanhalla tuolilla ( $p < 0.05$ ). Vanha kelaustuoli keuli  $0,021 \pm 0,009$  metriä, kun taas uusi kelaustuoli keuli  $0,039 \pm 0,017$  metriä. Uusi kelaustuoli keuli 85 prosenttia enemmän kuin vanha tuoli. Keulinnan suuruus korreloi tilastollisesti merkitsevästi ( $R = 0.76$ ,  $p < 0.01$ ) palautusvaiheen nopeuden pienenemisen kanssa (kuva 22).

TAULUKKO 9. Olkapään paikka suhteessa taka-akseliin, kontakti-, irrotus- ja työntökulmat sekä rungon taipuminen työntö- ja palautusvaiheessa (\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.001$ ).

	Vanha tuoli	Uusi tuoli
Olkapään paikka suhteessa taka-akseliin-työntövaiheen alku (m)	$0.363 \pm 0.007^{***}$	$0.347 \pm 0.011$
Olkapään paikka suhteessa taka-akseliin-työntövaiheen loppu (m)	$0.397 \pm 0.007^{***}$	$0.381 \pm 0.007$
Kontaktikulma ( $^{\circ}$ )	$16.3 \pm 4.6^*$	$10.9 \pm 5.9$
Irrotuskulma ( $^{\circ}$ )	$195.9 \pm 7.1$	$194.7 \pm 11.1$
Työntökulma ( $^{\circ}$ )	$179.0 \pm 8.3$	$185.4 \pm 13.3$
Rungon kulman keskihajonta työntövaiheessa ( $^{\circ}$ )	$0.36 \pm 0.16^*$	$0.55 \pm 0.12$
Rungon kulman keskihajonta palautusvaiheessa ( $^{\circ}$ )	$0.45 \pm 0.13^*$	$0.66 \pm 0.15$



KUVA 22. Keulinnan ja palautusvaiheen aikaisen nopeuden muutoksen yhteys.



## 8 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää massaltaan kevyemmän kelaustuolin vaikutusta kelaussuoritukseen ja suorituskyykyyn. Kelaustuoleja vertailtiin toisiinsa lähtökiihdytyksistä ja täysimittaisista 100 metrin kelauksista mitattujen muuttujien perusteella. Lisäksi kelaustuoleihin vaikuttavia vastustavia voimia arvioitiin ”coasting deceleration” -testien perusteella.

Kelaustuoliin kohdistuvia vastustavia voimia mitattiin ”coasting deceleration” -testin avulla. Tässä tutkimuksessa mitatut vastustavat voimat olivat pienempiä kuin Couttsin (1991) mittaamat kelaustuolin liikettä vastustavat voimat. Tämä johtui osittain siitä syystä, että tässä tutkimuksessa ei pystytty ottamaan huomioon renkaisiin varastoituneen pyörimisenergian vaikutusta vastustavia voimia laskettaessa. Samanlaisilla renkailla tehdyt vastustavien voimien mittaukset eri kelaustuoleilla olivat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia.

”Coasting deceleration” -testin perusteella uuden kelaustuolin vastustavat voimat olivat pienempiä kuin vanhan kelaustuolin vastustavat voimat. Ero vastustavan voiman suuruudessa tuli esille kelausnopeuden kasvaessa. Kelaustuoli-kelaaja systeemien massojen ero oli niin pieni (<0,8 %), ettei massaeron olisi pitänyt näkyä vastustavien voimien mittauksessa. Myöskään pyörien laakereiden aiheuttaman sisäisen kitkan ei pitäisi näkyä vastustavien voimien suuruudessa, sillä hyvin huolletuilla laakereilla laakerointikitka on pienempi kuin 0,1 % vierimiskitkasta (van der Woude ym. 2000). Sen sijaan mittauksissa huomattiin kelausasennon muutos, jossa uudessa kelaustuolissa istuma-asento oli taaempaan kuin vanhassa kelaustuolissa, saattoi vaikuttaa vierimiskitkakertoimeen. Sekä lähtökiihdytyksissä että 100 metrin kelauksissa olkapään paikka kelaussyklin aikana suhteessa taka-akseliin oli uudessa tuolissa taaempaan kuin vanhassa tuolissa, ja lisäksi kontakti- ja irrotuskulmat olivat uudessa tuolissa pienempiä kuin vanhassa tuolissa. Tästä voidaan päätellä, että istuma-asento on uudessa tuolissa ollut taaempaan kuin vanhassa tuolissa. Van der Wouden ym. (2000) mukaan massakeskipisteen siirtyminen lähemmäs suurten takapyörien akselia pienentää vierimiskitkaa. Täten kelaustuoleissa ollut istuma-asennon ero saattoi näkyä vastustavien voimien suuruudessa, ja uu-

dessa kelaustuolissa vastustavat voimat olivat tästä syystä pienemmät kuin vanhassa kelaustuolissa.

Lähtökiihdytyksissä ei löytynyt tilastollisesti merkitsevää eroa kelausaikojen tai keskimääräisten kelausnopeuksien suhteen. Kolme nopeinta 20 metrin kelaussuoritusta tehtiin kuitenkin vanhalla kelaustuolilla. Tässä tutkimuksessa mitatut kiihdytysvaiheen nopeudet olivat selvästi suurempia kuin aiemmissa tutkimuksissa raportoidut nopeudet. Chow ja Chae (2007) raportoivat kilpakelaajien 100 metrin kelaussuorituksessa 0-10 metrin keskimääräiseksi nopeudeksi  $2,69 \pm 0,22$  m/s. Nyt mitattu testattavan keskimääräinen vanhan tuolin kelausnopeus 0-5 metrin matkalla oli  $2,85 \pm 0,06$  m/s ja 5-10 metrin matkalla  $4,80 \pm 0,10$  m/s. Chown ja Chaen (2007) tutkimuksessa nopein kelaaja saavutti 20 metrin kohdalla nopeuden 6 m/s, kun nyt mitattu testattavan keskimääräinen nopeus välillä 15-20 metriä oli 6,33 m/s.

Tässä tutkimuksessa mitatut ensimmäisten kelaussyklien kestot olivat hieman pidempiä kuin aikaisemmassa huippukelaajan lähdöstä tehdyssä tutkimuksessa raportoidut syklien kestot (Moss ym. 2005). Vanhalla tuolilla tehdyissä suorituksissa syklien kestot kolmessa ensimmäisessä syklissä olivat  $0,95 \pm 0,05$  s;  $0,62 \pm 0,01$  s ja  $0,53 \pm 0,01$  s, kun Moss ym. (2005) raportoivat kolmen ensimmäisen syklin kestoiksi  $0,82 \pm 0,02$  s;  $0,52 \pm 0,01$  s ja  $0,49 \pm 0,01$  s. Pidemmän syklien keston lisäksi tässä tutkimuksessa mitatut syklien työntökulmat olivat suurempia ja nopeus syklien lopussa suurempi kuin Mossin ym. (2005) raportoimat arvot. Ensimmäisen syklin työntökulma vanhalla tuolilla oli  $98,6 \pm 5,1$  astetta, kun Moss ym. (2005) raportoivat ensimmäisen syklin työntökulmaksi  $70 \pm 11$  astetta. Nopeus ensimmäisen syklin jälkeen oli tässä tutkimuksessa  $2,13 \pm 0,04$  m/s, kun Mossin ym. (2005) tutkimuksessa nopeus ensimmäisen syklin jälkeen oli  $1,2 \pm 0,0$  m/s. Tässä tutkimuksessa mitattu pidempi syklin kesto saattoi mahdollistaa suuremman työntökulman ja pidemmän voimantuottoajan, josta seurasi suurempi syklin loppunopeus.

Tässä tutkimuksessa kahta eri kelaustuolia vertailtaessa ensimmäinen kelaussykli poikkesi tuolien välillä toisistaan. Syklin kesto oli vanhalla tuolilla lyhyempi kuin uudella kelaustuolilla, mikä johtui vanhan tuolin lyhyemmästä työntövaiheen kestosta. Vanhalla kelaustuolilla myös ensimmäisen syklin aikainen nopeuden muutos ja työntövaiheen keskimääräinen kiihtyvyys olivat suurempia kuin uudella kelaustuolilla. Vastaavaa eroa

tuolien välillä ei enää ollut toisessa, kolmannessa tai neljännessä kelaussyklissä. Ensimmäisen syklin erot tuolien välillä olivat kuitenkin täysin ennako-oletusten vastaisia, sillä massaeron aiheuttaman hyödyn piti näkyä selvimmin juuri kiihdytysvaiheen alussa, jossa lähes kaikki tuotettu energia muuttuu kelaustuolin liike-energiaksi (Fuss 2009). Ensimmäisen kelaussyklin nopeus- ja kiihtyvyyserot tuolien välillä saattavat selittyä tuoleissa havaitun istuma-asentojen eron kautta. Tuolien geometrian piti vastata toisiinsa, mutta uudessa kelaustuolissa kelaus-asento oli taaempänä kuin vanhassa kelaustuolissa. Ilmeisesti tämä taaempänä oleva kelausasento oli epäedullinen voimantuoton tehokkuuden suhteen, sillä uudessa kelaustuolissa ensimmäisen syklin kesto piteni, nopeuden kasvu oli pienempää ja työntövaiheen kiihtyvyys oli pienempää uuden tuolin kevyemmästä liikutettavasta massasta huolimatta.

Täysimittaisissa 100 metrin kelauksissa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa kelausaikojen suhteen. Kolme nopeinta 100 metrin kelausaikaa kelattiin kuitenkin vanhalla kelaustuolilla. Matemaattisen mallinnuksen mukaan tuoleissa olleen massaeron olisi pitänyt pienentää kevyemmän tuolin loppuaikaa noin 0,07 s (Fuss 2009). Nyt vanhan raskaamman tuolin 100 metrin loppuaika oli  $14,26 \pm 0,12$  s, kun uuden kevyemmän tuolin loppuaika oli  $14,40 \pm 0,04$  s. Tässä tutkimuksessa mitatut maksimivaiheen nopeudet olivat suurempia kuin aikaisemmissa tutkimuksissa raportoidut nopeudet. Vanhalla tuolilla keskimääräinen nopeus välillä 90-100 metriä oli  $8,77 \pm 0,03$  m/s, kun Chown ja Chaen (2007) tutkimuksessa nopeimman kansainvälisen tason kelaajan maksiminopeus jäi 100 metrin kelauksessa alle 8 m/s. Pidemmässä 800 metrin kelauksessa kansainvälisen tason kelaajien maksiminopeus oli vain  $7,3 \pm 0,3$  m/s (Goosey ym. 1997). Kahdella eri tuolilla tehtyjen suoritusten nopeusprofiileja tarkasteltaessa vanhan ja uuden kelaustuolin keskimääräiset nopeudet suorituksen alussa vastasivat toisiaan, mutta maksiminopeuden vaihetta lähestyttäessä kelaustuolien nopeuksiin syntyi eroja. Vanhemman kelaustuolin keskimääräinen nopeus väleillä 50-60 ja 90-100 metriä oli suurempi kuin uuden kelaustuolin nopeus. Syklin, työntövaiheen ja palautusvaiheen keskimääräiset nopeudet olivat vanhalla kelaustuolilla suurempia kuin uudella kelaustuolilla. Uudella tuolilla nopeus kasvoi työntövaiheen aikana enemmän ja keskimääräinen kiihtyvyys oli suurempaa kuin vanhalla tuolilla, mutta vastaavasti nopeuden pieneminen ja hidastuvuus palautusvaiheen aikana olivat myös suurempia. Kelaustuolien nopeus työntövaiheen jälkeen oli yhtä suuri, mutta palautusvaiheen aikana uuden ke-

laustuolin nopeus tippui enemmän kuin vanhan kelaustuolin nopeus, jolloin nopeuksissa työntövaiheen alussa oli selvä ero.

Palautusvaiheen aikainen nopeuden pieneneminen oli selvästi suurempaa uudella kelaustuolilla kuin vanhalla kelaustuolilla. ”Coasting deceleration” -testien mukaan vastustavat voimat olivat kuitenkin uudella kelaustuolilla pienempiä kuin vanhalla kelaustuolilla. Tässä testissä kelaaja oli täysin liikkumattomana, joten kelaajan liikkeiden on täytynyt aiheuttaa vastustavien voimien kasvamisen ja ylimääräiset tehonhäviöt maksimivauhdin kelauksessa. Yksi mahdollisuus palautusvaiheen nopeuden pienenemisessä olleelle erolle on tuolien keulinnan suuruus. Etupyörä irtoaa maasta työntövaiheen jälkeen, ja iskeytyy takaisin maahan ennen seuraavan työntövaiheen alkua. Etupyörän keuliassa energiaa suuntautuu kelaussuunasta poikkeavaan suuntaan. Lisäksi pyörän iskeytyminen takaisin maahan saattaa hetkellisesti kasvattaa pyörän vierimiskitkaa. Uudessa kelaustuolissa etupyörän keulinta oli noin 85 % suurempaa kuin vanhassa kelaustuolissa (uusi tuoli  $3,9 \pm 1,7$  cm; vanha tuoli  $2,1 \pm 0,9$  cm). Etupyörän keulinnan ja palautusvaiheen aikaisen nopeuden hidastumisen välillä todettiin myös tilastollisesti merkitsevä korrelaatio ( $r = 0.76$ ,  $p < 0.01$ ). Uuden kelaustuolin suurempi etupyörän keulinta johtui luultavasti tuolin taaempaan olevasta istuma-asennosta. Kelaustuoli-kelaaja-systeemin massakeskipiste on tällöin ollut taaempaan ja lähempänä taka-akselia, jolloin tuoli on ollut alttiimpi keulinnalle.

Kelaustuolien rungon jäykkyydessä oli eroja sekä lähtökiihdytyksissä että täysimittaisissa 100 metrin kelauksissa. Vanhan tuolin runko oli jäykempi sekä lähtökiihdytyksissä että 100 metrin kelauksissa. Rungon taipuminen työntövaiheen aikana heikentää kelaajan voimantuottoa työntörenkasiin, kun kelaajan tuottamaa energiaa menee hukkaan rungon muodonmuutoksiin (van der Woude ym. 2000). Runkoon varastoituva energia palautuu rungon kuormituksen pienentyessä ja alkuperäisen muodon palautuessa, mutta tämä palautuva energia ei vaikuta tuolin nopeuteen kelaussuunnassa. Lisäksi rungon taipuminen ja muodon palautuminen saattoivat lisätä etupyörän keulintaa.

Tässä tutkimuksessa vertailtujen kelaustuolien massaero oli vain 0,56 kiloa, mikä on huomattavasti vähemmän kuin mitä tätä tutkimusta suunniteltaessa oletettiin. Näin pienen massaeron ei huomattu vaikuttavan kelauksen suorituskykyyn positiivisesti. Pienen massaeron tuomat mahdolliset hyödyt saattoivat hukkaa kevyemmän tuolin heikomman

kelausasennon tai rungon jäykkyysominaisuuksien seurauksena. Tutkimuksessa huomattu istuma-asennon siirtyminen lähemmäs taka-akselia johti vastustavien voimien pienenemiseen, mutta toisaalta myös keulinnan lisääntymiseen ja heikentyneeseen voimantuottoon ensimmäisen kelaussyklin aikana. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella kelausasennon optimointi näyttäisi olevan yksi kriittinen kohta tuolin suunnittelussa ja toteutuksessa suorituskyvyn optimoinnin kannalta.

## 9 LÄHTEET

Bhambhani, Y. 2002. Physiology of Wheelchair Racing in Athletes with Spinal Cord Injury. *Sports Medicine* 32 (1), 23-51.

Bregman, D., van Drongelen, S. & Veeger, H. 2009. Is Effective Force Application in Handrim Wheelchair Propulsion Also Efficient? *Clinical Biomechanics* 24, 13-19.

Chow, J. & Chae, W. 2007. Kinematic analysis of the 100-m wheelchair race. *Journal of Biomechanics* 40, 2564–2568.

Chow, W., Millikan, T., Carlton, L., Chae, W. & Morse, M. 2000. Effect of resistance load on biomechanical characteristics of racing wheelchair propulsion over a roller system. *Journal of Biomechanics* 33, 601-608.

Chow, W., Millikan, T., Carlton, L., Morse, M. & Chae, W. 2001. Biomechanical Comparison of Two Racing Wheelchair Propulsion Techniques. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 33 (3), 476-484.

Chua, J., Fuss, F. & Subic, A. 2010. Rolling friction of a rugby wheelchair. *Procedia Engineering* 2, 3071-3076.

Classification Handbook. 2010. IPC Athletics Classification Rules 2006. Elektroninen lähde: [http://ipc-athletics.paralympic.org/export/sites/ipc\\_sports\\_athletics/Classification/2010\\_07\\_16\\_IPC\\_Athletics\\_Classification\\_Handbook\\_2006.pdf](http://ipc-athletics.paralympic.org/export/sites/ipc_sports_athletics/Classification/2010_07_16_IPC_Athletics_Classification_Handbook_2006.pdf). Viitattu 26.5.2011.

Cooper, R., Boninger, M., Cooper, R., Robertson, R. & Baldini, F. 2003. Wheelchair racing efficiency. *Disability and Rehabilitation* 25, 207-212.

Costa, G., Rubio, M., Belloch, S. & Soriano, P. 2009. Case Study: Effect of Handrim Diameter on Performance in a Paralympic Wheelchair Athlete. *Adapted Physical Activity Quarterly* 26, 352-363.

Coutts, K. 1991. Dynamic characteristics of a sport wheelchair. *Journal of Rehabilitation Research and Development* 28 (3), 45-50.

Faupin, A., Gorce, P. & Thevenon, A. 2008. A Wheelchair Ergometer Adaptable to the Rear-wheel Camber. *International Journal of Industrial Ergonomics* 38, 601-607.

Fuss, F. 2009. Influence of mass on the speed of wheelchair racing. *Sports Engineering* 12, 41-53.

Goosey, V., Campbell, I. & Fowler, N. 1998. The Relationship Between Three-Dimensional Wheelchair Propulsion Techniques and Pushing Economy. *Journal of Applied Biomechanics* 14, 412-427.

Goosey, V. & Campbell, I. 1998a. Symmetry of the Elbow Kinematics During Racing Wheelchair Propulsion. *Ergonomics* 41 (12), 1810-1820.

Goosey, V. & Campbell, I. 1998b. Pushing Economy and Propulsion Technique of Wheelchair Racers at Three Speeds. *Adapted Physical Activity Quarterly* 15, 36-50.

Goosey, V., Fowler, N. & Campbell, I. 1997. A Kinematic Analysis of Wheelchair Propulsion Techniques in Senior Male, Senior Female, and Junior Male Athletes. *Adapted Physical Activity Quarterly* 14, 156-165.

Goosey-Tolfrey, V., Fowler, N., Campbell, I. & Iwnicki, S. 2001. A Kinetic Analysis of Trained Wheelchair Racers During Two Speeds of Propulsion. *Medical Engineering and Physics* 23, 259-266.

de Groot, S., Veeger, H., Hollander, A. & van der Woude, L. 2002. Consequence of Feedback-based learning of an Effective Hand Rim Wheelchair Force Production on Mechanical Efficiency. *Clinical Biomechanics* 17, 219-226.

Hedrick, B., Wang, Y., Moeinzadeh, M. & Adrian, M. 1990. Aerodynamic Positioning and Performance in Wheelchair Racing. *Adapted Physical Activity Quarterly* 7, 41-51.

Higgs, C. 1986. Propulsion of racing wheelchairs. *Teoksessa: Sport and Disabled Athletes* (toim. Sherrill, C.), 165-172. Human Kinetics, Champaign.

Hoffman, M., Millet, G., Hoch, A. & Candau, R. 2003. Assessment of Wheelchair Drag Resistance Using a Coasting Deceleration Technique. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation* 82, 880-889.

Kotajarvi, B., Sabick, M., An, K., Zhao, K., Kaufman, K. & Basford, J. 2004. The Effect of Seat Position on Wheelchair Propulsion Biomechanics. *Journal of Rehabilitation Research and Development* 41 (3B), 403-414.

Kotajärvi, B., Basford, J., An, K., Morrow, D. & Kaufman, K. 2006. The Effect of Visual Biofeedback on the Propulsion Effectiveness of Experienced Wheelchair Users. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 87, 510-515.

Kwarciak, A., Yarossi, M., Ramanujam, A., Dyson-Hudson, T. & Sisto, S. 2009. Evaluation of wheelchair tire rolling resistance using dynamometer-based coast-down tests. *Journal of Rehabilitation Research and Development* 46 (7), 931-938.

Mason, B., van der Woude, L., de Groot, S. & Goosey-Tolfrey, V. 2011. Effects of Camber on the Ergonomics of Propulsion in Wheelchair Athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 43 (2), 319-326.

Masse, L., Lamontagne, M. & O'Riain, M. 1992. Biomechanical analysis of wheelchair propulsion for various seating positions. *Journal of Rehabilitation Research and Development* 29 (3), 12-28.

Moss, A., Fowler, N. & Goosey-Tolfrey V. 2005. The intra-push velocity profile of the over-ground racing wheelchair sprint start. *Journal of Biomechanics* 38, 15-22.



O'Connor, T., Robertson, R. & Cooper, R. 1998. Three-Dimensional Kinematic Analysis and Physiologic Assessment of Racing Wheelchair Propulsion. *Adapted Physical Activity Quarterly* 15, 1-14.

Paralympic Games. Elektroninen lähde:

[http://www.paralympic.org/Paralympic\\_Games/](http://www.paralympic.org/Paralympic_Games/). Viitattu 27.5.2011.

Ridgway, M., Pope, C. & Wilkerson, J. 1988. A Kinematic Analysis of 800-Meter Wheelchair-Racing Techniques. *Adapted Physical Activity Quarterly* 5, 96-107.

Robertson, R., Boninger, M., Cooper, R. & Shimada, S. 1996. Pushrim Forces and Joint Kinetics During Wheelchair Propulsion. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 77, 856-864.

Roeleveld, K., Lute, E., Veeger, D., van der Woude, L. & Gwinn, T. 1994. Power Output and Technique of Wheelchair Athletes. *Adapted Physical Activity Quarterly* 11, 71-85.

Steadward, R. & Walsh, C. 1986. Training and Fitness Programs for Disabled Athletes: Past, Present, and Future. *Teoksessa: Sport and Disabled Athletes (toim. Sherill, C.)*, 3-17. Human Kinetic Publishers Inc, Champaign.

Vanlandewijck, Y., Spaepen, A. & Lysens, R. 1994. Wheelchair Propulsion Efficiency: Movement Pattern Adaptations to Speed Changes. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 26 (11), 1373-1381.

Vanlandewijck, Y., Theisen, D. & Daly, D. 2001. Wheelchair Propulsion Biomechanics Implications for Wheelchair Sports. *Sports Medicine* 31 (5), 339-367.

Veeger, H., van der Woude, L. & Rozendal, R. 1989a. Wheelchair Propulsion Technique at Different Speeds. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine* 21, 197-203.

Veeger, H., van der Woude, L. & Rozendal, R. 1989b. The effect of rear wheel camber in manual wheelchair propulsion. *Journal of Rehabilitation Research and Development* 26 (2), 37-46.

Veeger, H., van der Woude, L. & Rozendal, R. 1991. Within-cycle Characteristics of the Wheelchair Push in Sprinting on a Wheelchair Ergometer. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 23 (2), 264-271.

Wang, Y., Deutsch, H., Morse, M., Hedrick, B. & Millikan, T. 1995. Three-Dimensional Kinematics of Wheelchair Propulsion Across Racing Speeds. *Adapted Physical Activity Quarterly* 12, 78-89.

Wang, Y., Vrongistinos, K., & Xu, D. 2008. The Relationship Between Consistency of Propulsive Cycles and Maximum Angular Velocity During Wheelchair Racing. *Journal of Applied Biomechanics* 24, 280-287.

van der Woude., L., Veeger, H. & Dallmeijer, A. 2000. Manual Wheelchair Propulsion. *Teoksessa: Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention* (toim. Zatsiorsky, V.), 609-636. Blackwell Science, Oxford.

van der Woude., L., Veeger, H., Rozendal, R., van Ingen Schenau, G., Rooth, F. & van Nierop, P. 1988. Wheelchair Racing: Effects of Rim Diameter and Speed on Physiology and Technique. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 20 (5), 492-500.