

**Voimaharjoittelun ja harjoitustauon vaikutukset kortikospinaalisen radan toimintaan sekä maksimi- ja nopeusvoimaan harjoittelemattomilla aikuisilla**

Ella Häkkinen

Pro gradu -tutkielma

Valmennus- ja testausoppi

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Kevät 2023

## TIIVISTELMÄ

Häkkinen, E. 2023. Voimaharjoittelun ja harjoitustauon vaikutukset kortikospinaalisen radan toimintaan sekä maksimi- ja nopeusvoimaan harjoittelemattomilla aikuisilla. Jyväskylän yliopisto. Valmennus- ja testausopin pro gradu -tutkielma. 80 sivua.

Tutkimuksessa tarkastelun kohteena oli kortikospinaalisen ärsytettävyyden ja inhibition muutokset voimaharjoittelun sekä sitä seuraavan harjoitustauon myötä sekä kortikospinaalisen radan toiminnan muutosten yhteydet maksimi- ja nopeusvoimassa tapahtuviin muutoksiin. Kortikospinaalinen rata vastaa lähes kaikesta motorisen toiminnan ohjauksesta ja kortikospinaalisen ärsytettävyyden parantumisen sekä inhibition vähentymisen on todettu olevan yhteydessä parantuneeseen voimantuottoon. Tutkimuksia kortikospinaalisen radan muutoksista voimaharjoittelun myötä on jonkin verran, mutta muutosten yhteyksiä maksimi- ja nopeusvoimaan on tutkittu vain vähän, etenkin harjoitustauon jälkeen. Tämän lisäksi harjoitustauon vaikutuksista nopeusvoimaan on hyvin vähän tutkimustietoa ja tutkimusten välillä on havaittavissa paljon ristiriitaisuutta. Näin ollen aiheiden tutkiminen on perusteltua.

Tutkimukseen osallistui harjoittelemattomia aikuisia (n=15), jotka toteuttivat seitsemän viikon harjoitusjakson ja viiden viikon harjoitustauon. Tutkittavien voimantuoton muutoksia mitattiin maksimaalisella tahdonalaisella supistuksella (MVC) sekä voimantuotonopeudella (RFD 50 ms, 75 ms ja 100 ms ajalta). Kortikospinaalisen radan toiminnan muutoksia mitattiin rectus femoris lihaksesta maksimaalisella M-aallolla (Mmax) sekä transkraniaalisella magneettistimulaatiolla aikaansaataavilla motorisella herätevasteella (MEP) sekä ”hiljaisella jaksolla” (SP). Mittaukset suoritettiin ennen ja jälkeen harjoitusjakson sekä harjoitustauon jälkeen.

Voimaharjoittelun myötä RFD 50 ms ajalta heikkeni ( $p < 0,05$ ), mutta MVC:ssä tai kortikospinaalisen radan toiminnassa ei ollut havaittavissa merkitseviä muutoksia. Kortikospinaalisen inhibition vähentymisen ja RFD:n heikentymisen välillä oli kuitenkin havaittavissa positiivisia korrelaatioita. Voimantuotossa tai kortikospinaalisen radan toiminnassa ei ollut havaittavissa merkitseviä muutoksia harjoitustauon jälkeen, mutta yksilötasolla kortikospinaalisen ärsytettävyyden laskun ja MVC:n laskun välillä oli havaittavissa positiivinen korrelaatio.

Voimaharjoittelulla ei siis ollut vaikutusta maksimivoimaan tai kortikospinaaliseen radan toimintaan. Voimaharjoittelun havaittiin kuitenkin vaikuttavan heikentävästi RFD:n alkuosaan, minkä lisäksi kortikospinaalisen inhibition laskun todettiin olevan yhteydessä RFD:n heikentymiseen yksilötasolla. Muutosten vähäisyys selittyy todennäköisesti riittämättömällä voimaharjoittelulla ja/tai itse mittausmenetelmillä, jotka eivät olleet tarpeeksi sensitiivisiä havaitsemaan muutoksia eivätkä voimantuoton kohdalla vastanneet tarpeeksi hyvin harjoittelussa käytettyä lihastyötappaa tai nivelkulmia. Harjoitustauolla ei myöskään havaittu olevan vaikutusta maksimi- tai nopeusvoimaan, eikä kortikospinaalisen radan toimintaan. Harjoitustauon myötä ilmenneissä muutoksissa havaittiin kuitenkin yksilötasolla yhteys kortikospinaalisen ärsytettävyyden laskun ja maksimivoiman laskun välillä. Kyseinen tulos on merkittävä, sillä aihetta on tutkittu aiemmin vain vähän ja havainto osoittaa, että kortikospinaalisen radan toiminnan muutoksilla on mahdollisesti vaikutusta harjoitustauon myötä maksimivoimassa ilmeneviin muutoksiin. Tutkimuksia voimaharjoittelun ja etenkin harjoitustauon vaikutuksista kortikospinaaliseen rataan ja sen yhteyksistä voimantuottoon tarvitaan kuitenkin lisää, sillä tutkimus tuloksissa on havaittavissa suuria vaihteluita, kuten tämäkin tutkimus osoittaa. Tutkimusta olisi hyvä tehdä suuremmalla otoskoollla, sekä jakamalla naiset ja miehet erillisiin ryhmiin, jotta myös sukupuolten välisiä eroja voitaisiin tarkastella.

Asiasanat: voimaharjoittelu, maksimivoima, nopeusvoima, kortikospinaalinen rata, transkraniaalinen magneettistimulaatio, harjoitustauko

## ABSTRACT

Häkkinen, E. 2023. Effects of strength training and detraining on corticospinal tract and maximal strength and power in untrained adults. University of Jyväskylä. Master's thesis in Science of Sports Coaching and Fitness Testing. 80 pages.

The purpose of this study was to examine the changes in corticospinal excitability and inhibition after strength training and detraining. The study also examined the associations between the changes in corticospinal tract and maximal strength and power. The corticospinal pathway is responsible for almost all the control of motor function and improvements in corticospinal excitability and reductions in inhibition have been found to be associated with improved force output. Thus, while there has been some research on changes in the corticospinal tract after strength training, relatively little research has been done on the associations between those changes and changes in maximal strength and power. In addition, the amount of research on the changes and associations after detraining is even lower and some inconsistency between studies can be seen. Therefore, further research on this subject is needed.

The study involved untrained adults (n=15) who completed a 7-week training period and a 5-week detraining period. The changes in subjects' maximal strength were measured with maximal voluntary contraction (MVC) and rate of force development (RFD between 0–50 ms, 0–75 ms and 0–100 ms). Changes in the corticospinal tract were measured from rectus femoris with maximal M-wave (Mmax) and with motor evoked potential (MEP) and silent period (SP) which were induced by transcranial magnetic stimulation. Measurements were performed before and after the training period and after the detraining.

RFD between 0–50 ms decreased after strength training, but no significant changes were observed in MVC or in the corticospinal excitability or inhibition. However, positive correlations were observed at the individual level between the reduction in corticospinal inhibition and RFD. No significant changes in maximal strength, power or corticospinal excitability or inhibition were observed after the detraining, but a positive correlation was observed at the individual level between the decrease in corticospinal excitability and in MVC.

Strength training had no effect on maximal strength or corticospinal excitability or inhibition. However, strength training caused a decrease in the initial part of the RFD. In addition, decrease in corticospinal inhibition was found to be associated with the decrease in RFD at the individual level. The lack of changes in other parameters is likely to be explained by insufficient strength training and/or the measurement methods used, which were not sensitive enough to detect changes. The muscle contraction type and joint angles used in strength training and in the MVC- and RFD-measurements probably also differed too much and thus no changes could be seen in the parameters in question. In addition, detraining was found to have no significant effect on maximal strength or power, nor on corticospinal excitability or inhibition. However, an association was found between the decrease in corticospinal excitability and the decrease in maximal strength at the individual level. This result is significant since little research has been done on the topic and the finding indicates that changes in corticospinal tract may have an influence on the changes in maximal force during detraining. Nevertheless, more research on the effects of strength training and detraining on the corticospinal tract and especially its association to power is needed. As this study also shows, there is a lot of variability in the results of studies. It would be recommended to conduct the study with a larger sample size, and to divide women and men into separate groups, so that gender differences could also be examined.

Keywords: strength training, maximal strength, power, corticospinal tract, transcranial magnetic stimulation, detraining

## **LYHENTEET**

AMT active motor threshold, aktiivinen motorinen kynnys

MEP motor evoked potential, motorinen heräteväste

Mmax maximal M-wave, maksimaalinen M-aalto

MT motor threshold, motorinen kynnys

MVC maximal voluntary contraction, maksimaalinen tahdonalainen supistus

RFD rate of force development, voimantuottonopeus

SP silent period, hiljainen jakso

TMS transcranial magnetic stimulation, transkraniaalinen magneettistimulaatio

1 RM one-repetition maximum, yhden toiston maksimi

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENTEET

1	JOHDANTO.....	1
2	HERMO-LIHASJÄRJESTELMÄ.....	3
2.1	Keskushermosto .....	3
2.2	Ääreishermosto.....	5
2.3	Motorinen yksikkö.....	5
2.4	Kortikospinaalinen rata ja motorisen toiminnan ohjaus .....	7
3	MAKSIMI- JA NOPEUSVOIMA .....	9
3.1	Maksimaalinen tahdonalainen supistus .....	11
3.2	Voimantuottonopeus.....	11
4	VOIMAHARJOITTELUN VAIKUTUKSET HERMO-LIHASJESTELMÄÄN .....	14
4.1	Maksimi- ja nopeusvoiman muutokset.....	14
4.2	Hermostolliset ja morfologiset muutokset.....	16
4.3	Kortikospinaalinen ärsytettävyyys ja yhteys voimantuoton muutoksiin.....	18
4.4	Kortikospinaalinen inhibitio ja yhteys voimantuoton muutoksiin .....	22
5	HARJOITUSTAUON VAIKUTUKSET HERMO-LIHASJÄRJESTELMÄÄN.....	26
6	TRANSKRANIAALISEN MAGNEETTISTIMULAATION KÄYTTÖ VOIMANTUOTON TUTKIMISESSA .....	31
6.1	Motorinen heräteväste .....	32
6.2	Hiljainen jakso .....	33
7	TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESIT .....	34
8	TUTKIMUSMENETELMÄT .....	36

8.1	Tutkittavat.....	36
8.2	Tutkimussuunnitelma .....	37
8.3	Harjoitusohjelma .....	37
8.4	Mittaukset.....	39
8.4.1	Elektromyografia.....	40
8.4.2	Maksimaalinen M-aalto.....	41
8.4.3	Transkraniaalinen magneettistimulaatio.....	42
8.4.4	Maksimaalinen tahdonalainen supistus ja voimantuottonopeus.....	43
8.5	Tilastollinen analyysi.....	45
9	TULOKSET .....	46
9.1	Maksimaalinen tahdonalainen supistus (MVC) .....	47
9.2	Voimantuottonopeus (RFD) .....	47
9.3	Kortikospinaalisen radan toiminta.....	48
9.4	Muutosten väliset yhteydet.....	50
10	POHDINTA .....	53
10.1	Voimaharjoitteluintervention vaikutukset.....	54
10.2	Adaptaatioiden väliset yhteydet voimaharjoitteluintervention jälkeen .....	60
10.3	Harjoitustauon vaikutukset.....	61
10.4	Adaptaatioiden väliset yhteydet harjoitustauon jälkeen .....	64
10.5	Tutkimuksen vahvuudet ja heikkoudet.....	65
10.6	Yhteenveto.....	67
10.7	Käytännön sovellutukset .....	68
	LÄHTEET .....	70

# 1 JOHDANTO

Hermoston toimintaa ja siinä tapahtuvien muutosten vaikutuksia suorituskykyyn on tutkittu vuosien varrella paljon. Tässä tutkimuksessa keskityttiin kuitenkin vain yhteen hermoston osaan, kortikospinaaliseen rataan ja sen toiminnassa tapahtuviin muutoksiin voimaharjoittelun sekä sitä seuraavan harjoitustauon myötä. Tutkimuksen kohteena olivat myös kortikospinaalisen radan toiminnan muutosten yhteydet maksimi- ja nopeusvoimassa tapahtuviin muutoksiin.

Kortikospinaalinen rata vastaa lähes kaikesta motorisen toiminnan ohjauksesta ja saa alkunsa motoriselta aivokuorelta, josta impulssi kulkeutuu luurankolihasiin motorisia hermoja pitkin (Gyoton & Hall 2021, 699). Tässä tutkimuksessa keskityttiin kortikospinaaliseen ärsytettävyyteen, jota voidaan tutkia muun muassa transkraniaalisessa magneettistimulaatiossa mitattavan MEP-amplitudin avulla (Bestmann ja Krakauer 2015), sekä kortikospinaaliseen inhibitioon, jota voidaan tutkia MEP:iä seuraavan ”hiljaisen jakson” (silent period) keston kautta (Werhahn ym. 2007; Wilson ym. 1993).

Kortikospinaalisella ärsytettävyydellä sekä inhibitiolla on todettu olevan merkitystä voimantuottoon ja voimaharjoittelun onkin havaittu aikaan saavan muutoksia niin ärsytettävyydessä (Beck ym. 2007; Griffin & Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020; Tallent ym. 2017) kuin inhibitiiossakin (Christie & Kamen 2014; Kidgell ym. 2010; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012; Leung ym. 2017; Mason ym. 2020; Ridding ym. 1995; Weier ym. 2012). Parannukset kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä ovat yhteydessä muun muassa suurempaan maksimi- ja nopeusvoimaan (Griffin ja Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020). Tämän lisäksi myös kortikospinaalisen inhibition vähentymisellä on todettu olevan positiivinen vaikutus voimantuottoon (Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012). Kortikospinaalisen radan toiminnan muutoksia voimaharjoittelun myötä on tutkittu jonkin verran, mutta muutosten yhteyksiä maksimi- ja etenkin nopeusvoimaan on tutkittu vain vähän. Tämän vuoksi kyseisten muutosten ja yhteyksien tutkiminen on perusteltua. Maksimi- ja

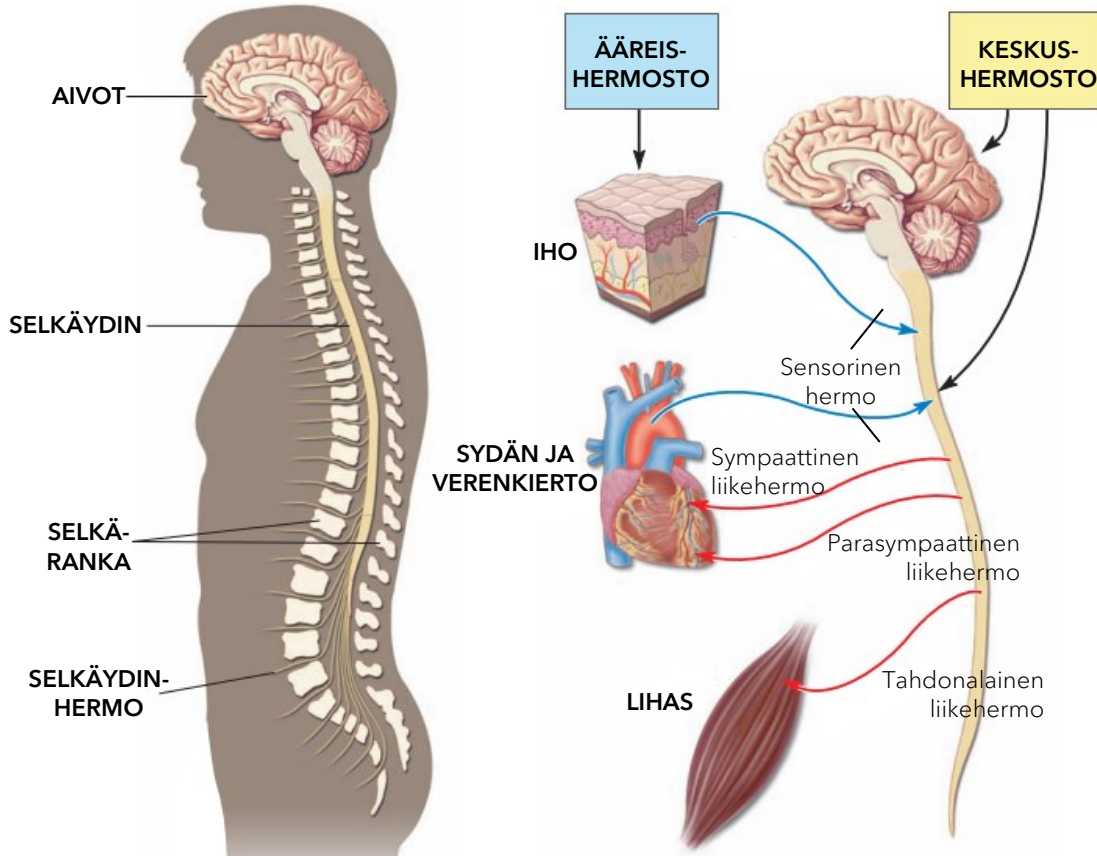
nopeusvoima ovat suuressa roolissa monissa urheilulajeissa, minkä takia kyseisten ominaisuuksien taustalla olevien hermostollisten adaptaatioiden parempi ymmärtäminen on tärkeää.

Voimaharjoittelun aikaansaamien muutosten lisäksi tässä tutkimuksessa tarkasteltiin myös voimaharjoittelua seuraavan harjoitustauon vaikutuksia niin kortikospinaalisen radan toimintaan kuin myös maksimi- ja nopeusvoimaan. Harjoittelemattomuuden on todettu vaikuttavan heikentävästi maksimivoimaan (Andersen ym. 2005; Colliander & Tesch 1992; Granacher ym. 2011; Houston ym. 1983; Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Sakugawa ym. 2019) sekä mahdollisesti myös nopeusvoimaan, hermostollisten ja morfologisten muutosten kautta (Andersen ym. 2005; Bosquet ym. 2013; Häkkinen ym. 1985; Mujika & Padilla 2000). Tutkimustuloksissa harjoitustauon vaikutuksista etenkin nopeusvoimaan on kuitenkin havaittavissa jonkin verran ristiriitaisuutta (Bosquet ym. 2013; Granacher ym. 2011; Sakugawa ym. 2019). Harjoitustauon vaikutuksia kortikospinaalisen ärsytettävyyteen ja inhibitioon on myös tutkittu vain vähän, samoin kuin kyseisten adaptaatioiden yhteyksiä voimantuoton muutoksiin. Aiheen tutkiminen on siis perusteltua, sillä urheilijat kohtaavat urallaan monesti tilanteita, joissa harjoittelusta joudutaan pitämään pidempiä taukoja esimerkiksi loukkaantumisten takia. Harjoitustauon aikaansaamiin muutoksiin suorituskyvyssä sekä taustalla vaikuttavien hermostollisten muutosten parempi ymmärtäminen on tämän vuoksi tärkeää.



## 2 HERMO-LIHASJÄRJESTELMÄ

Hermolihas-järjestelmä koostuu keskus- ja ääreishermostosta sekä sen hermottamista lihaksista. Keskushermoston osat ovat aivot ja selkäydin ja ääreishermoston osat taas selkäydinhermot ja autonominen hermosto (kuva 1). (Thau ym. 2019)

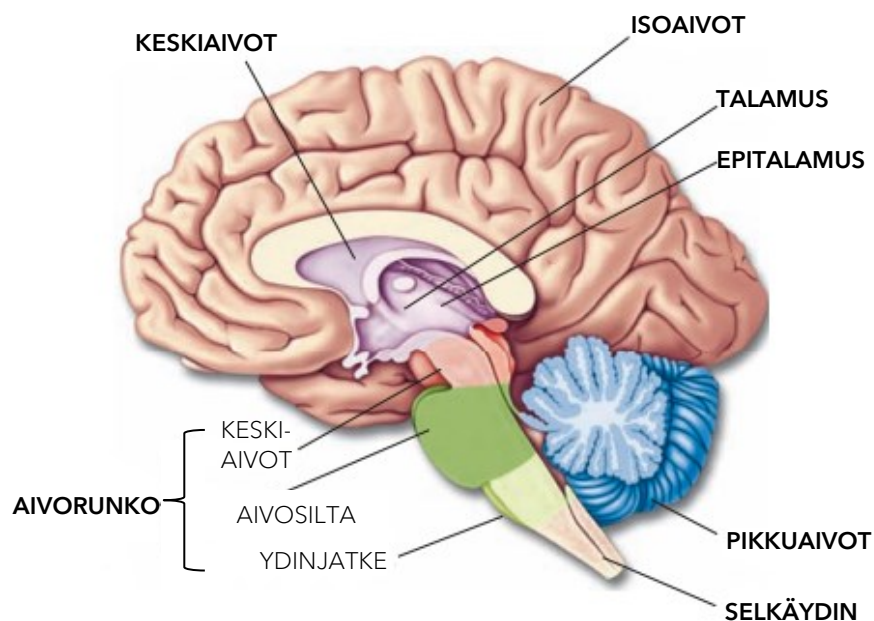


KUVA 1. Keskus- ja ääreishermoston rakenne (mukailtu McArdle ym. 2015, 378)

### 2.1 Keskushermosto

Aivojen osat ovat isoaiivot, aivorunko, joka pitää sisällään väliaivot, keskiaivot, aivosillan sekä ydinjatkeen, ja pikkuaivot (kuva 2). Isoaivojen kuorikerroksella ovat tuntoaivokuori sekä motorinen aivokuori. Motorinen aivokuori ohjaa nimensä mukaisesti kehon motorista toimintaa. Motorisen toiminnan ohjaukseen osallistuvat myös aivorunko, tyvitumakkeet

(asennon säätely, lihastonus ja motorisen toiminnan hienosäätö), pikkuaivot (liikkeiden ajoitus ja hienosäätö) ja selkäydin. Aivojen alempi taso vastaa siis automaattisista liikkeistä sekä välittömistä liikevasteista saadulle sensoriselle stimulukselle, kun taas aivojen korkeampi taso vastaa monimutkaisemmista ja tahdonalaisista liikkeistä. Primäärinen motorinen aivokuori eli M1 ohjaa kehon eri osien liikkeitä. Kehonosat sijaitsevat M1:llä eri kohdissa ja vievät alueesta eri kokoiset osat sen mukaan, kuinka monipuolista ja tarkkaa liikettä kehonosilta vaaditaan. Esimerkiksi sormien lihasten alue on huomattavasti suurempi kuin selän lihasten. (Guyton & Hall 2021, 570, 697–698; Thau ym. 2019)



KUVA 2. Aivojen rakenne (mukailtu McArdle ym. 2015, 379)

Selkäydin koostuu neuroneista (harmaa aine) ja aksoneista (valkea aine). Selkäytimen etujuuresta lähtevät motoriset hermot (alfa- ja gammamotoneuronit) lihakseen päin, kun taas takajuuresta kulkevat sensoriset hermot aivoihin päin. Motoriset ja sensoriset hermot ovat yhteydessä toisiinsa välineuronien kautta. Näiden hermojen aktivaatiomuutosten kautta säädellään refleksitoimintoja sekä ärsytettävyysherkkyyttä selkäytimen tasolla. Selkäytimen motoriset liikekeskukset myös aikaansaavat sekä säätelevät syklisiä liikkeitä, kuten kävelyä. (Guyton & Hall 2021, 571, 685–686; Mero ym. 2007, 38) Liikkeiden tuottamiseen ja kontrolloimiseen sekä refleksitoimintaan on suuri vaikutus myös kehon proprioceptoreilla,

kuten Golgin jänne-elimillä (jänteisiin kohdistuvien voimien muutokset) sekä lihassukkuloilla (lihaspituuden muutokset). (Kistemaker ym. 2013)

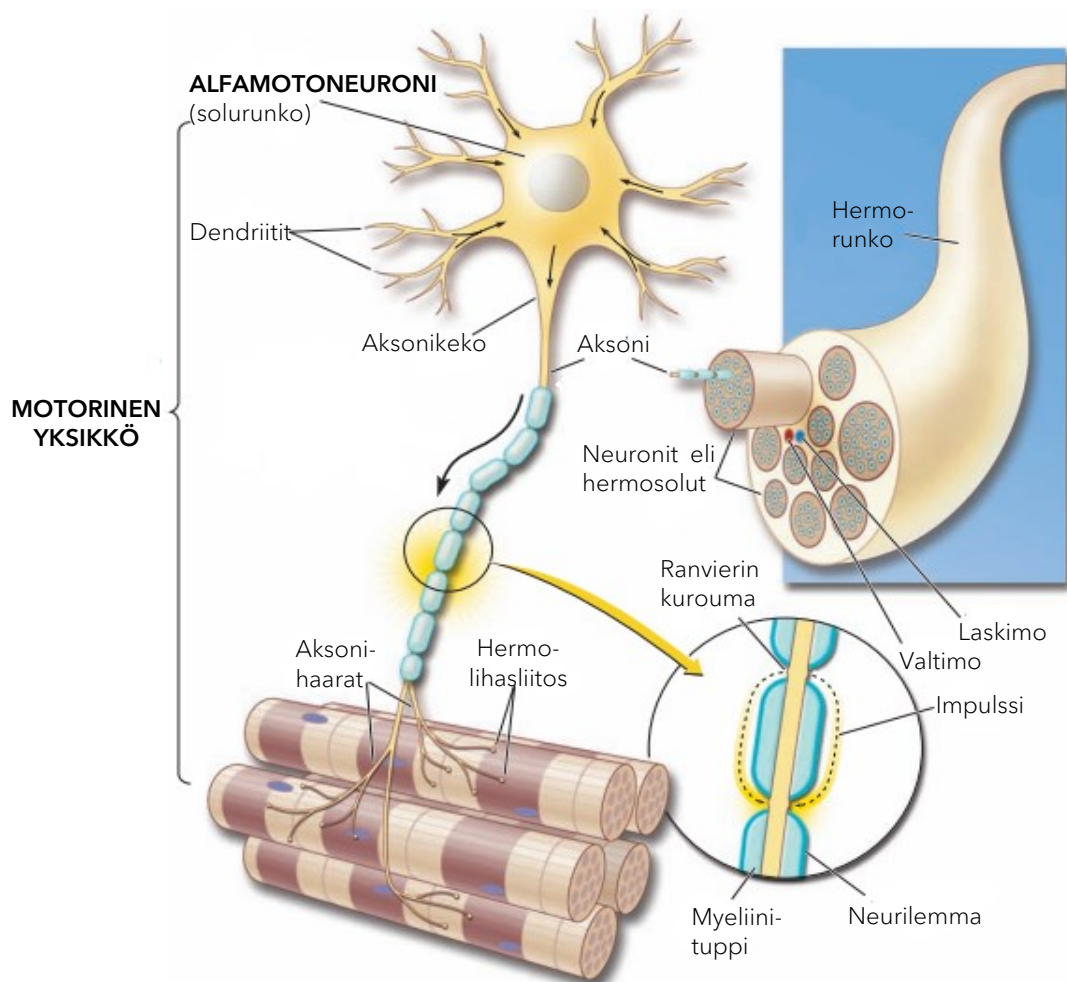
## 2.2 Ääreishermosto

Ääreishermoston tehtäviin kuuluu tiedonvälitys keskushermostoon sekä keskushermostolta muualle kehoon. Tiedonvälitys keskushermostolta kehon eri osiin tapahtuu motoristen hermojen välityksellä (efferentit hermot). Tiedonvälitys kehon ääreishermoston reseptoreista keskushermostoon taas tapahtuu sensoristen hermojen välityksellä (afferentit). Efferentit hermot jakautuvat somaattiseen (tahdonalainen) ja autonomiseen hermostoon (ei-tahdonalainen). Somaattinen hermosto ohjaa tahdonalaisia lihaksia (luurankolihakset) kun taas autonominen hermosto ohjaa ei-tahdonalaisia lihaksia (sydänlihas, sileä lihaskudos ja rauhaset). Autonominen hermosto jakautuu kahteen osaan; sympaattiseen ja parasympaattiseen. Sympaattisen hermoston tehtäviin kuuluu kehon elintoimintojen kuten sykkeen ja hengityksen kiihdyttäminen ja parasympaattisen hermoston tehtäviin taas kyseisten elintoimintojen hidastaminen. (Gyoton & Hall 2021, 569–570, 763; Mero ym. 2007, 40)

## 2.3 Motorinen yksikkö

Motorinen yksikkö (kuva 3) koostuu motoneuronista ja sen hermottamista lihassoluista. Kutakin lihassolua hermottaa yleensä yksi motoneuroni, mutta yksi motoneuroni voi kuitenkin hermottaa jopa tuhatta lihassolua, haarautuneen aksonin päätteen takia. Yhtä lihasta hermottavat motoneuronit taas pitää sisällään motoneuroniallas. Motoneuroni muodostuu solurungosta, aksonista (impulssin viejä) ja dendriiteistä (impulssin tuojat). Impulssin etenemiseen aksonissa vaikuttavat aksonin myelinisoituminen sekä Ranvierin kuroumat, joiden vuorottelu aksonia pitkin mahdollistaa impulssin hyppimisen solmusta solmuun ja näin nopeamman impulssin etenemisen. Motoneuronista impulssin lihassoluun välittää hermolihasliitos, joka on motoneuronin pään ja lihassolun välissä. Jokaisella luurankolihaksen lihassolulla on yleensä yksi hermolihasliitos. Kun impulssi saapuu hermolihasliitokseen, asetyylikoliini (ACh) vapautuu päteaksonista synaptiseen rako. Asetyylikoliini yhdistyy sitten välittäjäaine reseptoriin postsynaptisella kalvolla saaden aikaan muutoksen kalvon

sähköisessä varauksessa, minkä myötä aktiopotentiali syntyy ja saa aikaan lihassupistuksen käynnistymisen. (Gyoton & Hall 2021, 74, 88, 93–95; Mero ym. 2007, 41–42)

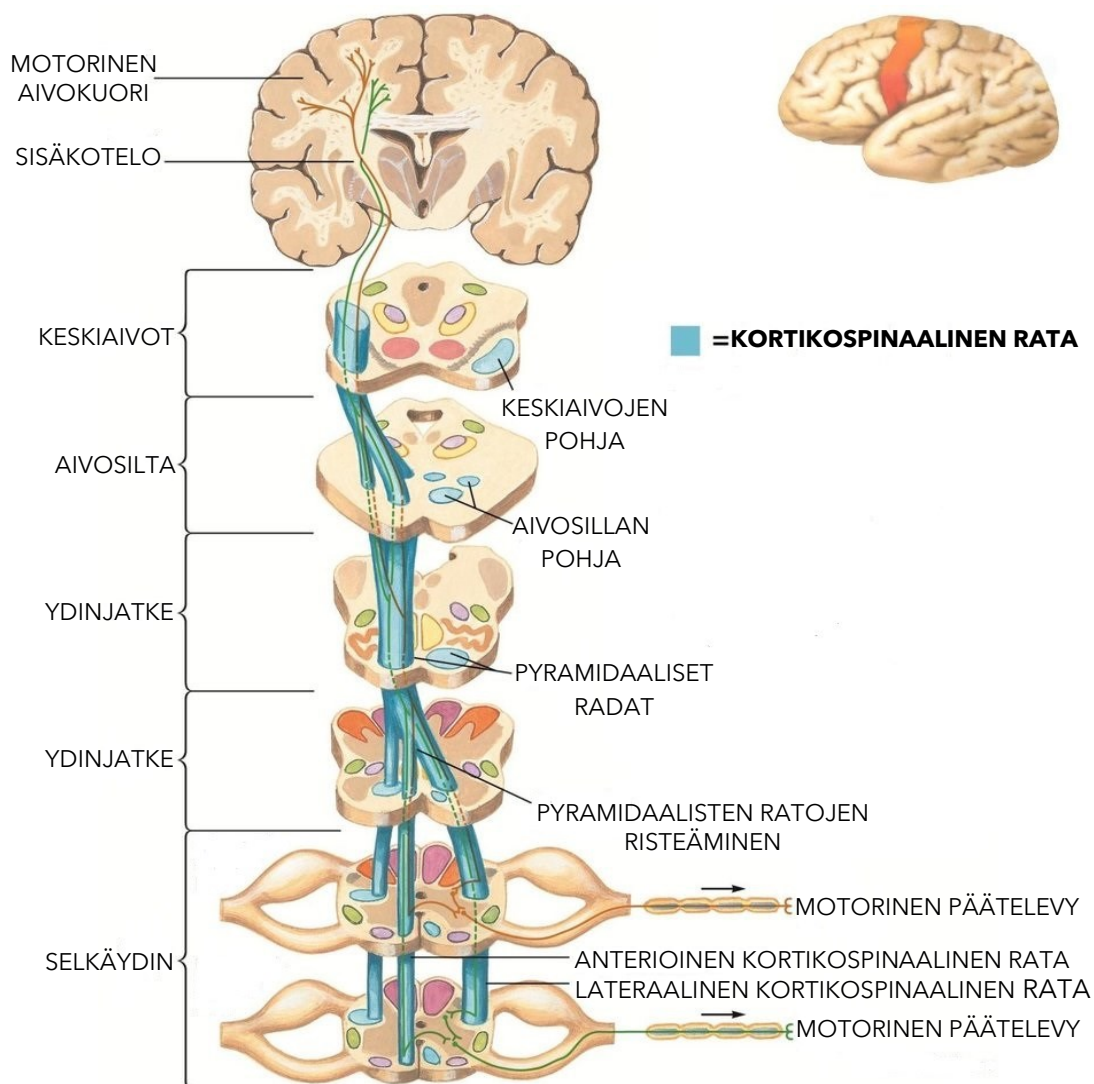


KUVA 3. Motorisen yksikön rakenne (mukailtu McArdle ym. 2015, 386)

Motorisia yksiköitä on kolmea eri tyyppiä; nopeat ja väsyvät (IIb), nopeat ja väsymystä kohtalaisesti sietävät (IIa) sekä hitaat ja hyvin väsymystä sietävät (I). Yhdessä motorisessa yksikössä on tyyppin mukaan joko vain nopeita tai hitaita lihassoluja ja eri motoristen yksiköiden rekrytointi tapahtuu kokoperiaatteen mukaisesti pienestä (hitaat) suurempaan (nopeat). Nopeuden lisäksi suuret motoriset yksiköt pystyvät myös tuottamaan enemmän voimaa kuin pienet. (English & Wolf 1982; Hodson-Tole & Wakeling 2009).

## 2.4 Kortikospinaalinen rata ja motorisen toiminnan ohjaus

Motorisesta toiminnasta vastaa pääasiassa kortikospinaalinen rata, jonka rakenne on nähtävissä alla olevassa kuvassa 4.



KUVA 4. Kortikospinaalinen rata (mukailtu Roos 2013).

Kortikospinaalinen rata saa alkunsa motoristen alueiden lisäksi myös primääriseltä somatosensoriselta aivokuorelta ja premotorisilta alueilta. Suurin osa kortikospinaalisen radan neuroneista on kuitenkin primääriseltä motoriselta aivokuorelta (M1), josta impulssi lähtee ja kulkeutuu sitten motorisia hermoja pitkin luurankolihakseen, jossa ärsytys saa aikaan liikkeen.

Tämän jälkeen lihaksesta kulkeutuu palaute takaisin aivoihin sensoristen hermojen kautta (Gyoton & Hall 2021, 699), joka vaikuttaa taas muun muassa kortikospinaalisen inhibition määrään (Christie & Kamen 2014). Kortikospinaalinen rata on monosynaptisista yhteyksistä suurin reitti motoriselta aivokuorelta motoneuroneille (Miles 1994), mutta sen lisäksi muita motoriseen säätelyyn osallistuvia ratoja ovat retikulospinaalinen, vestibulospinaalinen ja rubrospinaalinen rata (Gyoton & Hall 2021, 700).

Liikkeen tuottamiseen ja hallintaan on ärsytyksen lisäksi vaikutusta myös inhibitiolla. Toisin kuin kortikospinaalisen ärsytyksen kohdalla, kortikospinaalisen inhibition erilaiset mekanismit eivät ole vielä täysin selvillä. Tiedetään kuitenkin, että muun muassa jotkin presynaptiset terminaalit tuottavat inhiboivia impulsseja. Inhiboiva välittäjäaine lisää postsynaptisen kalvon läpäisevyyttä kalium- ja kloridi-ionien ulosvirtaukselle, jolloin solukalvon lepopotentiaali kasvaa ja syntyy inhiboiva postsynaptinen potentiaali. Inhiboiva postsynaptinen potentiaali hyperpolarisoi neuronin, mikä vaikeuttaa sen syttymistä. Suuri inhiboiva postsynaptinen potentiaali estää aktiopotentiaalin alkamisen, kun motoneuroni saa sekä eksitoivia että inhiboivia ärsykeitä. (McArdle ym. 2015, 396)

Tarkkaa neurokemiallista tekijää, joka aiheuttaa inhiboivan postsynaptisen potentiaalin, ei myöskään edelleen ole tiedossa, vaikka tiedetään että gamma-aminovoihappo (GABA) ja glysiini saavat aikaan inhibitorisia mekanismeja. Hermostollisella inhibitiolla on kuitenkin suuri merkitys motorisen toiminnan ohjaamiselle, sillä se ei ainoastaan toimi suojaavana tekijänä vaan myös vähentää ei-toivottuja ärsykeitä, saaden aikaan tasaisemman ja tarkoituksenmukaisen vasteen. (McArdle ym. 2015, 396)

### 3 MAKSIMI- JA NOPEUSVOIMA

Maksimivoimalla tarkoitetaan suurinta mahdollista voimaa, jonka henkilö pystyy tuottamaan (Pierce ym. 2022). Maksimivoiman tuottamisessa menee noin 0,5–2,5 sekuntia, riippuen liikkeestä, henkilön perimästä ja harjoitustaustasta (Ahtiainen & Häkkinen 2007, 138). Nopeusvoimalla taas tarkoitetaan kykyä tuottaa mahdollisimman suuri voima mahdollisimman nopeasti tai mahdollisimman suurella nopeudella (Aagaard ym. 2002). Nopeusvoima koostuu maksimivoimasta sekä nopeudesta, minkä vuoksi sitä voidaan kehittää maksimivoiman tai nopeuden paranemisen kautta. Parhaimmat tulokset nopeusvoiman kehittämässä on kuitenkin saatu yhdistämällä maksimivoima- ja nopeusharjoittelua (Harris 2000; Newton & Kramer 1994).

Nopeusvoiman merkitys korostuu suorituksissa, joissa voimantuottoaika on huomattavasti lyhyempi kuin mitä maksimivoiman tuottamiseen menee, kuten hyppyissä ja heitoissa (Aagaard ym. 2002; Haff & Nimphius 2012). Nopeusvoimalla on täten suuri merkitys monissa lajeissa (Asci & Açıkada 2007; Hernández-Davó & Sabido 2014), sillä useissa lajeissa voimantuottoaika on huomattavasti lyhyempi kuin mitä maksimivoiman tuottamiseen vaaditaan (Haff & Nimphius 2012; Maffiuletti ym. 2016). Esimerkiksi ponnistuksissa voimantuottoaika on noin 0,1–0,3 sekuntia ja pikajuoksussa askelkontaktin pituus voi olla jopa alle 0,1 sekuntia. Nopeusvoimaa ei kuitenkaan tarvita pelkästään räjähtävyyttä ja nopeita kiihdytyksiä vaativissa lajeissa vaan myös kestävyyslajeissa. Joissain tutkimuksissa nopeusvoimaharjoittelun on havaittu parantavan muun muassa juoksukestävyyttä hermoston lihaskäytön adaptaatioiden ja juoksun taloudellisuuden paranemisen kautta (Paavolainen ym. 1999). Sekä maksimi- että nopeusvoimaa voidaan mitata monilla eri tavoilla, kuten maksimaalista tahdonalaista supistusta (MVC) (De Luca 1997; Peltonen ym. 2018b) sekä voimantuottonopeutta (RFD) (Buckthorpe ym. 2012) mittaamalla, joita käytettiin tässä tutkimuksessa ja joita käsitellään myöhemmin tulevissa kappaleissa.

Koska maksimivoima on yksi nopeusvoiman osatekijä, vaikuttavat maksimi- ja nopeusvoimaan samat tekijät. Näitä voimantuottoon vaikuttavia biomekaanisia tekijöitä on sekä lihaskäytön biomekaanisia että hermostollisia. Lihaskäytön biomekaanisia tekijöitä ovat muun muassa

lihasrakenteeseen liittyvät tekijät, kuten lihaksen poikkipinta-ala, lihassolujen pennaatiokulma ja tyyppijakauma (I, IIa, IIb). Mitä suurempi lihaksen poikkipinta-ala, sitä suuremman voiman lihas kykenee tuottamaan. (Mero ym. 2007, 53, 57)

Voimantuottoon vaikuttavia lihasmekaanisia tekijöitä ovat myös lihastyötapa, lihaspituus ja voimantuottonopeus. Jokaisella lihassolulla on optimaalinen pituus, jolla se pystyy tuottamaan eniten voimaa. Optimipituus määräytyy sen mukaan kuinka paljon supistuvien sarkomeerien sisältämien aktiini- ja myosiinifilamenttien välille muodostuu poikittaissiltoja. Useimmiten suurimmat voimat saadaan tuotettua lihaksen keskipituuksilla, sillä tällöin poikittaissiltojen määrä on suurimmillaan. (Enoka 2015, 238–241) Voimantuottonopeuden vaikutus tuotetun voiman määrään taas riippuu siitä, onko kyseessä konsentrisen vai eksentrisen lihastyötapa. Konsentrisessä supistuksessa nopeuden kasvaessa voimantuotto laskee, kun taas eksentrisessä supistuksessa nopeuden kasvaessa nousee myös voimantuotto. (Kenney ym. 2015, 45–46)

Dynaamisessa liikkeessä voimantuottoon vaikuttaa myös venymis-lyhenemissyklus (Stone & O'Bryant 1987, Stone ym. 2007, Bompa & Haff 2009, 263 mukaan). Venymis-lyhenemissykluksella tarkoitetaan elastisen energian varastoitumista ja vapautumista eksentristä venytystä seuraavan nopean konsentrisen supistumisen myötä. Elastinen energia varastoituu eksentrisessä venytyksessä poikittaissiltoihin sekä lihaksien sidekudosrakenteisiin ja jos venytystä seuraa nopea konsentrisen supistuminen, voidaan elastinen energia hyödyntää lisävoimana suorituksessa. (Enoka 2015, 248) Venymis-lyhenemissyklukseen sekä lihasten voimantuottokykyyn vaikuttaa myös lihasjäykkyys, jonka lisääntymisen on havaittu parantavan suorituskykyä (Butler ym. 2003).

Kuten aiemmin mainittiin, vaikuttavat lihaksen voimantuottoon myös hermostolliset tekijät eli hermostollinen aktivaatio. Hermostollisella aktivaatiolla, johon vaikuttavat sekä supraspinaalisen tason ja spinaalisen tason mekanismit (Maffioletti ym. 2016), tarkoitetaan motoristen yksiköiden rekrytointia, syttymisfrekvenssiä ja synkronointia sekä hermo-lihasjärjestelmän inhibition määrää. (De Luca 1997; Stone & O'Bryant 1987, Stone ym. 2007, Bompa & Haff 2009, 263 mukaan)



### 3.1 Maksimaalinen tahdonalainen supistus

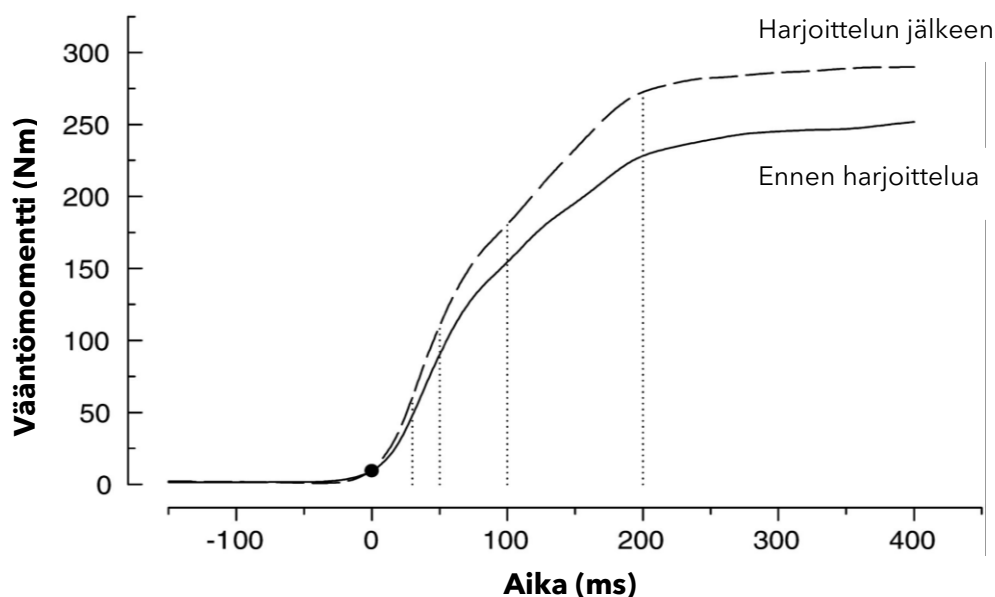
Maksimivoimaa voidaan mitata useilla eri tavoilla, niin dynaamisesti kuin isometrisestikin. (Peltonen ym. 2018b) Yksi yleisimmistä arviointitavoista on kuitenkin maksimaalisen tahdonalaisen supistuksen eli MVC:n (maximal voluntary contraction) mittaus (De Luca 1997; Peltonen ym. 2018b). MVC mittaa lihaksen tai lihasryhmän maksimaalista voimantuottokykyä (Takarada & Nozaki 2021) ja menetelmän on todettu olevan hyvä tapa lihasten toiminnan ja koehenkilöiden vertailuun (Vera-Garcia ym. 2009), sekä hermo-lihasjärjestelmässä tapahtuvien adaptaatioiden tarkasteluun (Folland ym. 2014). MVC:tä käytetäänkin yleensä yhdessä EMG:n kanssa, jolloin saadaan tarkempaa tietoa lihasten aktivaatiosta sekä toiminnasta (Roman-Liu & Bartuzi 2018). Isometrisessä polvenojennuksessa mitatun MVC:n on myös todettu omaavan korkea toistettavuus (Rainoldi ym. 2001). Huomioitavaa kuitenkin on, että polvikulmalla on merkittävä vaikutus isometrisessä polvenojennuksessa saatuihin tuloksiin (Babault ym. 2003).

MVC:n on todettu korreloivan dynaamisen maksimivoiman kanssa (Peltonen ym. 2018b) sekä nopeusvoima ominaisuuksien kanssa RFD:llä (rate of force development) ja RTD:llä (rate of torque development) mitattuna (Cossich & Maffioletti 2020; Peltonen ym. 2018b). RTD:n kanssa korrelaatiota oli kuitenkin havaittavissa vasta RTD:n myöhäisessä vaiheessa (>200ms) (Cossich & Maffioletti 2020). Tämän lisäksi MVC:n kehityksen on havaittu korreloivan lihasten poikkipinta-alan kasvun kanssa (Peltonen ym. 2018b).

### 3.2 Voimantuottonopeus

Tehontuoton lisäksi yksi yleisimmistä nopeusvoima ominaisuuksien arviointitavoista on voimantuottonopeuden eli RFD:n mittaaminen (Buckthorpe ym. 2012). Voimantuottonopeutta, joka saadaan räjähtävien tahdonalaisten supistusten aikana mitatuista voima- tai vääntömomentti-aikakäyristä (kuva 5), käytetään yleisesti niin urheilijoiden kuin iäkkäidenkin henkilöiden nopeusvoima-ominaisuuksien kuvaamiseen. (Aagaard ym. 2002) RFD:n on todettu omaavan korkea ulkoinen validiteetti dynaamisia suorituksia ajatellen (Hortobágyi ym. 1989). RFD:tä arvioidaan yleisesti isometrisissä yhden nivelen liikkeissä, koska ne tarjoavat kokeellisesti kontrolloidumman tilanteen. (Grgic & Grgic 2022; Maffioletti ym. 2016)

Polvenojennuksessa mitatun RFD:n onkin todettu omaavan kohtalainen tai korkea luotettavuus. RFD:n luotettavuus näyttäisi kuitenkin vaihtelevan sen mukaan, mitä ajanjaksoa mitataan. (Buckthorpe ym. 2012)



KUVA 5. Keskimääräiset vääntömomentti-aikakäyrät, ennen ja jälkeen voimaharjoittelun. Lihassupistuksen alkaminen on merkitty pisteellä ja 30, 50, 100 ja 200 ms:n aikavälit suhteessa lihassupistuksen alkamiseen pisteviivoilla. (Mukaiilu Aagaard ym. 2002)

RFD-muuttujia on erilaisia, joista yleisimmät ovat peak-RFD, keskiarvoistettu RFD sekä eri aikaväleiltä mitatut RFD:t (Aagaard ym. 2002; Drake ym. 2019; Maffioletti ym. 2016). Peak-RFD lasketaan vääntömomentti-aika- tai voima-aika-käyrän jyrkimmästä kohdasta, mutta kyseistä muuttujaa pidetään yleisesti vähemmän luotettavana (Maffioletti ym. 2016). Keskiarvoistettu RFD taas lasketaan tietylle osalle lihassupistusta, kun kyseessä ei ole ennalta määritelty ajanjakso, yleensä lihassupistuksen alusta suurimman voimantuoton kohtaan. Eri aikaväleiltä mitatut RFD:t ovat yleensä 0–200 ms:n ajalta ja voidaan myös jakaa alun (0–100 tai 150 ms) ja myöhäisen vaiheen (> 150 ms) RFD:hen. (Drake ym. 2019)

Nopean voimantuoton eri vaiheiden aikana suoritettujen peräkkäisten RFD-mittausten osalta on todettu, että RFD 50–100 ms:n ajalta on luotettavampi kuin RFD 0–50 ms:n ajalta tai RFD 100–150 ms:n ajalta. RFD:n 50–100 ms:n ajalta on todettu olevan luotettavuudeltaan samaa

luokkaa kuin peak-RFD:n, mikä ei ole yllättävää, koska peak-RFD tapahtuu tyypillisesti juuri 50–100 ms:n aikana. (Buckthorpe ym. 2012) RFD:n eri ajanjaksoilla tapahtuneet muutokset kertovat myös mahdollisesti erilaisista muutoksista hermoston toiminnassa. Esimerkiksi parannuksiin RFD:n alkuvaiheessa (ensimmäiset 50–75 ms) näyttäisi vaikuttavan eniten lihasten nopeutunut hermostollinen ohjaus (Gruber ym. 2004) ja lihaksen sisäisten supistumisominaisuuksien parantuminen (Andersen ym. 2010) eli muun muassa motoristen yksiköiden syttymiskynnyksen aleneminen ja syttymistiheyden kasvaminen (Maffioletti ym. 2016). Myöhäisessä vaiheessa tapahtuneisiin parannuksiin näyttäisi olevan vaikutusta lihasten parantuneen hermostollisen ohjauksen (Aagaard ym. 2002) lisäksi myös etenkin lihaksen poikkipinta-ala kasvulla (Sueatta ym. 2004) sekä jänteiden rakenteiden (mm. jänneaponeuroosikompleksin) jäykkyyden muutoksilla (Bojsen-Moller ym. 2005). Sekä alku-, että myöhäisen vaiheen RFD:n on todettu korreloivan MVC:n kanssa (Andersen & Aagaard 2006).

Harjoittelutavalla onkin vaikutusta siihen, millaisia muutoksia RFD:ssä saadaan aikaan eri ajanjaksoilla (Andersen ym. 2010; Maffioletti ym. 2016). Nopeusvoimaharjoittelulla on luonnollisestikin suuri positiivinen vaikutus RFD:hen, mutta myös raskaammilla kuormilla tehtävän voimaharjoittelun on todettu parantavan RFD:tä erityisesti RFD:n myöhäisemmässä vaiheessa, voiman nousun loppupuolella. (Maffioletti ym. 2016) Nopeusvoima tyypisen harjoittelun (liikkeet pyritään tekemään mahdollisimman räjähtävästi) on kuitenkin havaittu saavan aikaan suurempia parannuksia RFD:ssä kuin perinteisen voimaharjoittelun, jossa ei niinkään keskitytä liikkeen suoritusnopeuteen, vaikka käytetyt kuormat olisivat samat (Young & Bilby 1993).

RFD:tä mitatessa on tärkeää valita liike, jossa työtä tekevät lihasryhmät sekä nivelkulmat ovat mahdollisimman lajia vastaavia, sillä näillä tekijöillä on suuri vaikutus kyseiseen muuttujaan (Bellumori ym. 2011; De Ruiter ym. 2004). Nivelkulmalla on myös havaittu olevan vaikutusta RFD-mittausten luotettavuuteen (Drake ym. 2019). RFD-mittausten luotettavuuden kannalta on myös tutkimusten mukaan kannattavinta kerätä viisi suoritusta, joista sitten lasketaan kolmen parhaan keskiarvo. Suorituksissa ei myöskään saa ilmetä lihasaktiivisuutta tai kevennystä (countermovement) ennen lihassupistuksen alkamista, sillä tällä on suuri vaikutus RFD:hen. Ennen virallisia mittauksia tulisi mitattavien myös harjoitella suoritusta, tulosten luotettavuuden lisäämiseksi. (Maffioletti ym. 2016)

## 4 VOIMAHARJOITTELUN VAIKUTUKSET HERMO-LIHASJESTELMÄÄN

Voimaharjoittelun on todettu saavan aikaan adaptaatioita hermo-lihasjärjestelmän toiminnassa ja rakenteessa, sekä näiden myötä myös maksimi- ja nopeusvoimassa (Aagaard ym. 2002; Alegre ym. 2006; Christie & Kamen 2014; Grgic & Grgic 2022; Houston ym. 1983; Peltonen ym. 2018b). Tapahtuviin adaptaatioihin on todettu olevan vaikutusta harjoittelutavalla eli muun muassa harjoittelun intensiteetillä ja volyyymilla sekä aiemmalla harjoitustaustalla ja harjoittelun kestolla (Ahtiainen ym. 2003; Häkkinen & Komi 1983; Kraemer & Ratamess 2004).

### 4.1 Maksimi- ja nopeusvoiman muutokset

Voimaharjoittelun on todettu saavan aikaan merkittäviä parannuksia maksimi- (Aagaard ym. 2002; Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Kidgell ym. 2011; Latella ym. 2012; Peltonen ym. 2018b) ja nopeusvoimassa (Aagaard ym. 2002; Alegre ym. 2006; Grgic & Grgic 2022; Peltonen ym. 2018b). Voimaharjoittelu parantaa myös niin isometristä (Griffin & Cafarelli 2007; Peltonen ym. 2018b) kuin dynaamistakin maksimivoimaa (Houston ym. 1983; Kidgell ym. 2010; Peltonen ym. 2018b). Koska tässä tutkimuksessa käytettävät muuttujat ovat MVC sekä RFD 50, 75 ja 100 ms ajalta, esitetään tulevissa kappaleissa maksimi- ja nopeusvoiman muutoksia voimaharjoittelun jälkeen näillä muuttujilla mitattuina.

Voimaharjoittelun on havaittu aikaansaavan merkittäviä parannuksia MVC:ssä (Aagaard ym. 2002; Christie & Kamen 2014; Peltonen ym. 2018b), jopa vain neljän viikon voimaharjoittelun jälkeen (Kidgell & Pearce 2010). Eri voimaharjoittelutapoja vertailtaessa on myös havaittu sekä maksimi- että hypertrofisen voimaharjoittelun saavan aikaan parannuksia MVC:ssä. Seitsemän viikkoa kestäväällä harjoitusjaksolla hypertrofisen voimaharjoittelu saattaa kuitenkin aikaansaada suuremman parannuksen kuin maksimivoimaharjoittelu. (Peltonen ym. 2018b) Tallent ym. (2017) tutkimuksessa taas havaittiin sekä konsentrisen, että eksentrisen harjoittelun parantavan niin konsentrista kuin eksentristäkin MVC:tä.

Grgic & Grgic (2022) meta-analyysissä sekä Alegre ym. (2006) ja Aagaard ym. (2002) tutkimuksissa todettiin RFD:n paranevan voimaharjoittelun myötä. Aagaard ym. (2002)

tutkimuksessa 14 viikon voimaharjoittelu sai aikaan RFD:n parantumisen niin 30, 50, 100 kuin 200 ms ajanjakson aikana. Myös Peltosen ym. (2018) tutkimuksessa havaittiin sekä seitsemän viikon hypertrofisen, että seitsemän viikon maksimivoimaharjoittelun aikaansaavan samankaltaisia muutoksia RFD:ssä ensimmäisen 10 ms aikana. Toisaalta Oliveira ym. (2013) tutkimuksessa kuuden viikon nopeus- ja maksimivoimaharjoittelun jälkeen RFD parani vain 20 ms asti, mutta merkittäviä muutoksia myöhemmässä RFD:n vaiheessa ei ollut havaittavissa. Tutkimusten välillä on siis havaittavissa eroja RFD:n kehityksessä eri ajanjaksoilla. Alegre ym. (2006) tutkimuksessa taas tarkasteltiin huippu-RFD:tä (peak-RFD) eri ajanjaksojen aikana tapahtuvien muutosten sijaan. Kyseisessä tutkimuksessa 13 viikon voimaharjoittelun havaittiin kehittävän huippu-RFD:tä huomattavasti. Eri tutkimusten tulokset on esitelty alla olevassa taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Maksimi- ja nopeusvoiman muutokset voimaharjoittelun myötä.

<b>Tutkimus</b>	<b>Harjoitusjakson kesto (vko)</b>	<b>MVC:n muutokset (%)</b>	<b>RFD:n muutokset (%)</b>
<b>Aagaard ym. 2002</b>	14	14,1	30 ms: 20,7 50 ms: 18,1 100 ms: 14,6 200 ms: 16,3
<b>Alegre ym. 2006</b>	13	11,7	23,8
<b>Kidgell &amp; Pearce 2010</b>	4	33,8	-
<b>Oliveira ym. 2013</b>	6	19	10 ms: 28 20 ms: 22
<b>Peltonen ym. 2018b</b>	7	8 (MV) 19 (HT)	10 ms: 47 (MV) 10 ms: 44 (HT)

MVC= maximal voluntary contraction, RFD= rate of force development, MV= maksimivoimaharjoittelu, HT= hypertrofinen harjoittelu

Huomioitava kuitenkin on, että voimaharjoittelun aikaansaamiin muutoksiin vaikuttaa merkittävästi muun muassa harjoitusjakson kesto sekä harjoittelussa käytetyt intensiteetit ja volyymit, jotka voivat näin ollen myös selittää tutkimustulosten välisiä eroja (Peltonen ym. 2018b). Voimatasoissa tapahtuviin muutoksiin vaikuttavat myös harjoitustausta sekä harjoittelun vaihe (Ahtiainen ym. 2003; Häkkinen & Komi 1983). Harjoittelemattomilla havaittavissa olevat muutokset voimatasoissa ovat yleensä suhteellisesti suurempia kuin harjoitelleilla (Ahtiainen ym. 2003). Tämän lisäksi muun muassa maksimivoiman kehittymisen

on myös havaittu olevan voimaharjoittelun alkupuolella suurempaa kuin loppupuolella (Häkkinen & Komi 1983).

## 4.2 Hermostolliset ja morfologiset muutokset

Maksimivoiman parantumisen on todettu perustuvan harjoittelun alkuvaiheessa lähinnä hermostollisiin adaptaatioihin ja vasta myöhemmässä vaiheessa morfologisiin adaptaatioihin (Folland & Williams 2007; Häkkinen & Komi 1983). Muun muassa Häkkinen & Komi (1983) tutkimuksessa maksimivoiman parantumiseen liittyi merkittävää kasvua lihasten hermostollisessa aktivaatiossa, mutta IEMG:n ja maksimivoiman välinen suhde kuitenkin muuttui harjoitusjakson edetessä. Kyseinen havainto tukee ajatusta siitä, että voiman alkuvaiheen muutokset johtuvat hermostollisista tekijöistä ja morfologisten tekijöiden osuus kasvaa vähitellen harjoittelun edetessä. Merkittävää hypertrofiaa on todettu olevan havaittavissa harjoittelemattomilla noin kahden kuukauden voimaharjoittelun jälkeen (Folland & Williams 2007). Voimaharjoittelua seuraavia morfologisia muutoksia ovat muun muassa lihassolujen kasvu ja muutokset lihassolujen pennaatiokulmassa. (Folland & Williams 2007; Houston ym. 1983; Häkkinen 2000; Häkkinen & Komi 1983) Voimaharjoittelun on myös todettu pidentävän lihassäikeitä, millä on mahdollisesti vaikutusta voimantuottoon muun muassa tehostamalla voiman siirtymistä lihassoluista jänteeseen (Alegre ym. 2006). Yllä mainittujen adaptaatioiden lisäksi myös lihassolujen lisääntymisen (hyperplasia) on esitetty olevan yksi mahdollinen voimaharjoittelua seuraava morfologinen muutos, vaikka kyseisen adaptaation tutkiminen ihmisillä onkin haastavaa (Folland & Williams 2007; Sjöström ym. 1991).

Voimaharjoittelu vaikuttaa keskushermostoon jo ensimmäisestä harjoituskerrasta lähtien ja muutokset lisääntyvät harjoituskertojen myötä. Tämä johtuu hermostollisista mekanismeista, jotka liittyvät aivokuoren plastisuuteen. (Dayan & Cohen 2011) Yhden sekä toistuvien voimaharjoittelukertojen aikaansaamista hermostollisista adaptaatioista suurin osa näyttäisikin tapahtuvan motorisella aivokuorella (Mason ym. 2020). Hermostolliset adaptaatiot ja sitä seuraava muutokset voimantuotossa näyttäisivät aluksi painottuvan olemassa olevien synapsien toiminnan tehokkuuden muutoksiin, kun taas myöhemmin ilmenevät hermostolliset adaptaatiot

näyttäisivät painottuvan hermoston rakenteellisiin muutoksiin. (Carroll ym. 2009; Mason ym. 2020) Ajatusta tukevat muun muassa havainnot akuuteista inhibitoristen mekanismien muutoksista voimaharjoittelujakson alussa, sillä GABA-välitteisen inhibition väheneminen on välttämätöntä synapsien toiminnan tehokkuuden parantumiselle (Hess & Donoghue 1994). Akuuttien inhibitoristen vasteiden määrä kuitenkin vähenee harjoittelun jatkuessa, mikä taas mahdollisesti kertoisi hermoston rakenteellisten muutosten olevan vastuussa tapahtuneista adaptaatioista harjoittelun myöhemmässä vaiheessa (Mednick ym. 2011).

Voimaharjoittelun aikaansaamat hermostolliset adaptaatiot ovat siis sekä aktivaatioon että inhibitioon liittyviä. Voimaharjoittelu saa aikaan muutoksia lihasten aktivaation koordinoinnissa, vähentämällä antagonistilihasten koaktivaatiota ja parantamalla synergistilihasten aktivaatiota suorituksen aikana (Häkkinen 2000). Voimaharjoittelun on havaittu vähentävän antagonistilihasten aktivaatiota jopa jo kahden viikon jälkeen (Mason ym. 2020). Voimaharjoittelun myötä myös lihakseen kohdistuva hermostollinen ohjaus lisääntyy (Carroll ym. 2009; Duchateau ym. 2006) ja motoristen yksiköiden rekrytointi sekä aktivaatio parantuvat (Christie & Kamen 2014; Kraemer & Ratamess 2004). Rekrytoinnin ja aktivaation parantuminen tapahtuu muun muassa motoristen yksiköiden syttymistiheyden ja synkronisaation lisääntymisen myötä, sekä motoristen yksiköiden ärsytyskynnyksen laskun kautta (Christie & Kamen 2014; Farina & Holobar 2016; Kraemer & Ratamess 2004). Erilaiset motoristen yksiköiden toiminnan muutokset kertovat osaltaan siis kortikospinaalisen radan ja motorisen aivokuoren muutoksista, koska motoristen yksiköiden ohjaus tapahtuu motoriselta aivokuorelta motoneuronaltaaseen tapahtuvasta viestinnästä. Huomioitavaa kuitenkin on, että kortikospinaalisen radan lisäksi myös retikulospinaalisella radalla on roolinsa motoristen yksiköiden ohjauksessa. (Mason ym 2020)

Harjoitettavien lihasten hermostollisen ohjauksen muutokset määrittävät pitkälti harjoittelun laadun eli toistojen määrän, ajoituksen ja harjoituskuorman mukaan. Esimerkiksi hermostollisen ärsytettävyyden parantuminen vaatii muun muassa riittävän suurta harjoituskuormaa (vähintään noin 80 % 1 RM:stä). (Kraemer & Ratamess 2004) Hermostossa tapahtuvat muutokset ovat mahdollisesti myös tehtävästä riippuvia. Kortikospinaalisessa radassa tapahtuvat muutokset näyttäisivät keskittyvän niiden lihasten hermotukseen osallistuvien neuronien ärsytettävyyteen, joita tiettyä tehtävää tehdessä käytetään (Pearce ym.

2000), vaikka jonkin asteisia muutoksia on mahdollisesti nähtävissä myös harjoittamattomassa lihaksessa unilateraalisen harjoittelun jälkeen (Kidgell ym. 2011).

### **4.3 Kortikospinaalinen ärsytettävyyys ja yhteys voimantuoton muutoksiin**

Voimaharjoittelun on todettu parantavan kortikospinaalisen radan ärsytettävyyttä (Beck ym. 2007; Griffin & Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020; Tallent ym. 2017). Kortikospinaalisen radan ärsytettävyyttä voidaan mitata muun muassa motorisen herätevasteen avulla (motor evoked potential, MEP). MEP on transkraniaalisen magneettistimulaation vaste, joka voidaan havaita lihaksessa EMG:n avulla (Bestmann ja Krakauer 2015) ja MEP-amplitudin kasvamisesta voidaan päätellä kortikospinaalisen radan hermostollisen ohjauksen parantuneen. (Griffin & Cafarelli 2007). Huomioitavaa kuitenkin on, että voimaharjoittelun jälkeen havaitut muutokset MEP-amplitudissa voivat heijastaa myös muista hermoradoista tulevia muutoksia, jotka vaikuttavat olemassa olevien kortikospinaalisten solujen ärsytettävyyteen (Griffin & Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010). MEP-amplitudista ja tarkemmin sen hyödyntämisestä voimantuoton tutkimisessa kerrotaan lisää myöhemmissä kappaleissa.

Voimaharjoittelun myötä motorisen aivokuoren tason ärsytettävyyden lisäksi myös selkäytimen tasolla olevien motoneuronien ärsytettävyyys paranee (Christie & Kamen 2014). Kortikospinaalisen ärsytettävyyden parantuminen johtuu mahdollisesti synapsien toiminnan tehostumisesta, synkronoinnista ja tehostetussa lyhyt- ja pitkäaikaisesta potentiaatiosta (Christie & Kamen 2014), kortikaalisen ärsytyksen aikaansaamien stimulusten määrän ja koon kasvamisesta sekä aktivoituvien kortikospinaalisten solujen määrän kasvamisesta (Kidgell ym. 2010).

Tallent ym. (2017) tutkimuksessa havaittiin merkittävä parannus kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä MEP-amplitudilla mitattuna, niin neljän viikon eksentrisen, että konsentrisen harjoittelujakson jälkeen. Tallent ym. (2017) tutkimuksen tavoin myös Griffin ja Cafarellin (2007), Kidgell ym. (2010) sekä Kidgell ym. (2011) tutkimuksissa neljän viikon voimaharjoittelulla saatiin aikaan parannus kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä. Kidgell ym.



(2010) tutkimuksessa lihasmassassa ei kuitenkaan havaittu muutoksia, vaikka dynaaminen maksimivoima sekä kortikospinaalinen ärsytettävyyden paranivat, mikä viittaisikin siihen, että voimatasoissa tapahtuneet muutokset eivät johtuneet morfologisista vaan hermostollisista muutoksista.

Huomioitavaa on, että jopa alle neljä viikkoa kestäneen voimaharjoittelun on havaittu saavan aikaan muutoksia kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä. Mason ym. (2020) tutkimuksessa parannuksia kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä sekä dynaamisessa maksimivoimassa oli nähtävissä jo vain kahden viikon voimaharjoittelun jälkeen. Voimaharjoittelun aikaansaamat muutokset kortikospinaalisessa radassa eivät välttämättä myöskään rajoitu vain harjoitettuun lihakseen. Kidgell ym. (2011) tutkimuksessa neljän viikon unilateraalisen voimaharjoittelun havaittiin parantavan dynaamista maksimivoimaa ja MEP-amplitudia niin harjoitetussa kuin harjoittamattomassakin lihaksessa. Dynaaminen maksimivoima ja MEP-amplitudi paranivat harjoitetussa lihaksessa 28 % ja 53 % sekä harjoittamattomassa lihaksessa 19,2 % ja 30,3 %.

Useissa voimaharjoittelua ja kortikospinaalista ärsytettävyyttä tarkastelleissa tutkimuksissa tutkimuksen kohteena on ollut maksimivoima, eikä tutkimuksia kortikospinaalisen ärsytettävyyden ja nopeusvoiman muutoksista juurikaan ole. Kuten aiemmin mainittiin, on voimaharjoittelun havaittu parantavan kortikospinaalista ärsytettävyyttä ja maksimaalista voimantuottoa (Griffin ja Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020). Koska maksimivoima on yksi nopeusvoiman osatekijä (Harris 2000; Newton & Kramer 1994), voidaan olettaa, että kyseisissä tutkimuksissa havaitut parannukset maksimivoimassa saattavat merkitä myös jonkin asteisia parannuksia nopeusvoimassa. Tämän lisäksi voimaharjoittelun aikaansaamia muutoksia lihasten aktivaatiossa sekä nopeusvoimassa on tutkittu EMG:n avulla (De Ruyter ym. 2007; Vila-Chã ym. 2010). De Ruyter ym. (2007) ja Vila-Chã ym. (2010) tutkimuksissa voimaharjoittelun todettiin aikaansaavan EMG:llä mitatun lihasten aktiivisuuden kasvua sekä parannuksia RFD:ssä. De Ruyter ym. (2012) tutkimuksessa voimaharjoittelun EMG:ssä sekä RFD:ssä aikaansaamien muutosten todettiin myös korreloivan positiivisesti. Lihasten aktivaation parantumisen on siis todettu olevan yhteydessä nopeusvoima ominaisuuksien parantumiseen. Koska kortikospinaalinen ärsytettävyyden liittyy vahvasti lihasten aktivaatioon, voidaan mahdollisesti olettaa kortikospinaalisen ärsytettävyyden parantumisen

saavan aikaan myös parantumista nopeusvoimassa. Koska tutkimusta aiheesta on kuitenkin suhteellisen vähän, on kyseinen aihe yhtenä tutkimuksen kohteena tässä tutkimuksessa.

Vaikka suurimmassa osassa tutkimuksia voimaharjoittelun on todettu parantavan kortikospinaalista ärsytettävyyttä, osassa tutkimuksista tulokset ovat kuitenkin olleet poikkeavia ja MEP-amplitudi on jopa laskenut voimaharjoittelun jälkeen. Latella ym. (2012) tehdyssä tutkimuksessa maksimivoima kasvoi kahdeksan viikon voimaharjoittelun myötä, mutta kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä ei havaittu merkittäviä muutoksia. Carrol ym. (2002) tutkimuksessa neljän viikon isometrisen voimaharjoittelun jälkeen maksimivoima kasvoi, mutta kortikospinaalinen ärsytettävyyys ei muuttunut, vaan jopa laski akuutisti harjoittelun jälkeen. Kyseisessä tutkimuksessa MEP-amplitudi mitattiin levossa. Myöskään Kidgell ja Pearce (2010) tai Jensen ym. (2005) tekemissä tutkimuksissa neljän viikon voimaharjoittelun jälkeen MEP-amplitudissa ei ollut havaittavissa muutosta, vaikka maksimivoima kasvoi. Kidgell ja Pearce (2010) tutkimuksessa MEP-amplitudi mitattiin 5 % ja 20 % MVC-tasoilla ja Jensen ym. (2005) tutkimuksessa levossa sekä 5 % MVC-tasolla. Eri tutkimuksissa saadut tulokset on esitelty alla olevassa taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden ja maksimivoiman muutokset voimaharjoittelun jälkeen.

<b>Tutkimus</b>	<b>Harjoitusjakson kesto (vko)</b>	<b>MEP:n (%)</b>	<b>muutokset</b>	<b>Maksimivoiman muutokset (%)</b>
<b>Carrol ym. 2002</b>	4	–		+ 33
<b>Griffin &amp; Cafarelli 2007</b>	4	+ 32		+ 18
<b>Jensen ym. 2005</b>	4	–		+ 12,5
<b>Kidgell ym. 2010</b>	4	+ 53		+ 28
<b>Kidgell ym. 2011</b>	4	+ 30,3 (AMT) + 33 (+20% AMT) + 26,5 (MEPmax)		+ 28
<b>Kidgell &amp; Pearce 2010</b>	4	–		+ 33,8
<b>Latella ym. 2012</b>	8	–		+ 29
<b>Mason ym. 2020</b>	2	+ 53		+ 15,5

– = ei merkitsevää muutosta, AMT = aktiivisen motorisen kynnyksen kohdalla, +20% AMT = 20 % aktiivisen motorisen kynnyksen yläpuolella, MEPmax = MEPmaxin kohdalla

Eri tutkimusten tuloksia on kuitenkin vaikea vertailla keskenään, koska tutkimukset ovat eronneet niin TMS-protokollissa (olosuhteet ja käytetyn stimulaation voimakkuus) kuin tutkituissa lihaksissakin (Kidgell ym. 2010). Mitattavilla lihaksilla on tulosten kannalta suuri merkitys, sillä kortikospinaalisten soluprojektoiden jakautuminen selkärangan motoneuroneihin on erilainen ylä- ja alaraajojen lihasten välillä. (Devanne ym. 1997) Myös käytetyt harjoitusohjelmat ovat vaihdelleet tutkimusten välillä suuresti muun muassa käytetyissä kuormissa sekä sarjojen ja toistojen määrissä. (Carroll ym. 2002; Kidgell ym. 2010). Vaikuttaisikin, että voimaharjoittelun hermostossa aikaan saamiin muutoksiin vaikuttaa harjoitusintensiivisyys ja -volyymi, liikkeiden monimutkaisuus, sekä se kuinka paljon liikettä on tehty aiemmin (Kidgell ym. 2010; Weier ym. 2012). Voimaharjoittelussa merkittävää kortikospinaalisen ärsytettävyyden kannalta näyttäisi olevan etenkin riittävän suurten kuormien käyttäminen (Kidgell ym. 2010).

Harjoitustavalla näyttäisi myös ylipäänsä olevan suuri vaikutus kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä havaittaviin muutoksiin. Beck ym. (2007) vertasivat MEP-amplitudissa havaittuja muutoksia kahden ryhmän välillä, jotka tekivät joko nilkan asennon ylläpitoon keskittyvää harjoittelua tai ballistista nilkan voimaharjoittelua neljän viikon ajan. MEP-amplitudi kasvoi ballistisen voimaharjoittelun ryhmässä 9,5 %, kun taas asennon ylläpitoon keskittyvän harjoittelun ryhmässä MEP-amplitudi laski. Tähän syynä oli mahdollisesti se, että ballistista voimaharjoittelua tehneellä ryhmällä kortikospinaalinen ohjaus oli harjoittelun myötä tehostunut, minkä myötä MEP-amplitudi oli korkeampi. Asennon ylläpitoon keskittyvää harjoittelua tehneellä ryhmällä tapahtunut MEP-amplitudin lasku taas johtui mahdollisesti kortikaalisten inhibitoristen prosessien kautta tulleesta parantuneesta motorisesta kontrollista. (Beck ym. 2007) Harjoitustavalla on siis merkittävä vaikutus hermostossa tapahtuviin adaptaatioihin, minkä lisäksi vaikutusta on mahdollisesti myös harjoitustaustalla. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden on todettu paranevan pitkäkestoisen voimaharjoittelun myötä niin harjoittelemattomilla kuin urheilijoillakin, mutta parantuminen näyttäisi olevan suurempaa urheilijoilla. (Dai yms. 2016)

Voimaharjoittelun myötä tulleiden MEP-amplitudien muutosten on havaittu eroavan mahdollisesti myös sen mukaan, miten lähellä aktiivista motorista kynnystä (AMT) ollaan. Kidgell ym. (2010) tutkimuksessa voimaharjoittelun aikaan saamaan 28 % maksimivoiman

kasvuun liittyi myös 53 % kasvu MEP-amplitudissa AMT:n kohdalla. Nähtävissä oleva MEP-amplitudin parannus oli 20 % AMT:n yläpuolella kuitenkin matalampi, vain 33 % (Kidgell ym. 2010). Vaikutusta kortikospinaalisen ärsytyksen muutoksiin voi aiemmin mainituiden syiden lisäksi olla myös sukupuoli sekä iällä (Latella ym. 2018; Pitcher ym. 2003). Naisilla MEP-amplitudin kasvun eli kortikospinaalisen ärsytettävyyden on havaittu olevan akuutisti suhteellisesti suurempaa kuin miehillä, minkä lisäksi miehillä voimaharjoittelun jälkeinen akuutti MEP-amplitudin kasvu on viivästynyt verrattuna naisiin (30 minuutista tuntiin) (Latella ym. 2018). Naisilla MEP-amplitudin vaihtelu näyttäisi myös olevan suurempaa kuin miehillä. Iällä on kuitenkin todettu olevan sukupuolta suurempi vaikutus kortikospinaaliseen ärsytettävyyteen ja MEP-amplitudin vaihtelu näyttäisi iäkkäillä olevan suurempaa kuin nuorilla. (Pitcher ym. 2003)

#### **4.4 Kortikospinaalinen inhibitio ja yhteys voimantuoton muutoksiin**

Tutkimusten mukaan voimaharjoittelu ei ainoastaan lisää kortikospinaalista ärsytettävyyttä vaan myös laskee kortikospinaalista inhibitiota (Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012; Leung ym. 2017; Mason ym. 2020; Ridding ym. 1995; Weier ym. 2012). Kortikospinaalisen inhibition määrää voidaan mitata muun muassa tarkastelemalla MEP:iä seuraavaa silent periodia (SP) (Werhahn ym. 2007; Wilson ym. 1993). Verratessa ärsytys prosesseihin, inhibition rekrytointi on suhteellisesti voimakkaampaa ja saturoituu aikaisemmin. Tämä on linjassa sen käsityksen kanssa, että inhibitio on fysiologisesti erillinen prosessi ärsytettävyydestä ja että sillä on matalampi ärsytyskynnys. (Werhahn ym. 2007) SP:stä ja sen käyttämisestä voimantuoton tutkimisessa kerrotaan lisää myöhemmissä kappaleissa.

Voimaharjoittelu aikaansaa muutoksia niin spinaalisen kuin GABA<sub>B</sub>-välitteisen kortikaalisenkin tason inhibitiossa (Kidgell & Pearce 2010). Inhibitiossa tapahtuneet muutokset parantavat liikkeen säätelyä ja motorista suorituskykyä muun muassa M1:ltä tulevan hermostollisen ohjauksen keskittämisen ja kortikospinaalisiin soluihin tulevan eksitatorisen ohjauksen parantumisen sekä ärsytyksen nettomäärän kasvamisen kautta (Kidgell ja Pearce 2010; Latella ym. 2012; Perez ja Cohen 2008; Ridding ym. 1995). Mainitut adaptaatiot

parantavat suorituskykyä mahdollisesti myös liikenopeuden muutoksien kautta, sillä inhibition on havaittu olevan käänteisesti verrannollinen liikenopeuteen (De Beaumont ym. 2009).

Kortikospinaalisen inhibition vähentymisen on siis todettu olevan yhteydessä voimatasojen nousuun monissa eri tutkimuksissa (Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012). Christie & Kamen (2014) tutkimuksessa MVC:llä mitattu maksimivoima kasvoi niin nuorilla aikuisilla kuin ikääntyneilläkin, minkä lisäksi myös kortikaalinen inhibitio väheni SP:n kestolla mitattuna molemmilla ryhmillä. Myös Kidgell ja Pearce (2010) tekemässä tutkimuksessa neljän viikon voimaharjoittelun havaittiin aikaan saavan maksimivoiman parantumisen lisäksi myös inhihoivien prosessien vähentymistä. MVC:n ja SP:n keston havaittiin tutkimuksessa myös korreloivan käänteisesti. Koska Kidgell ja Pearce (2010) tutkimuksessa ei havaittu muutoksia MEP-amplitudissa, voitiin maksimivoiman parantumisen päätellä perustuvan juurikin hermostollisten inhihoivien prosessien vähentymiseen. Samankaltaisia tuloksia oli nähtävissä myös Latella ym. (2012) tekemässä tutkimuksessa, jossa kahdeksan viikon voimaharjoittelu sai aikaan kortikospinaalisen inhibition vähentymisen, vaikka kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä ei tapahtunut muutoksia. Tutkittavien dynaaminen maksimivoima parani SP:n keston lyhentymisen ohella, minkä myötä kyseisessä tutkimuksessa havaitun maksimivoiman kasvun voitiin päätellä johtuneen inhibitoristen mekanismien vähentymisestä.

Samoin kuin kortikospinaalisessa ärsytettävyydessäkin myös kortikospinaalisessa inhibitiossa on mahdollisesti nähtävissä muutoksia jopa jo kahden viikon voimaharjoittelun jälkeen. Mason ym. (2020) tutkimuksessa kahden viikon voimaharjoittelun havaittiin saavan aikaan kortikospinaalisen inhibition vähentymistä, maksimivoiman kasvun ohella. Toisaalta vaikka monissa tutkimuksissa kortikospinaalisen inhibition on todettu vähentyneen voimaharjoittelun myötä, myös vastakkaisia tuloksia saaneita tutkimuksia on. Esimerkiksi Kidgell ym. (2011) tutkimuksessa neljän viikon voimaharjoittelulla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta SP:n pituuteen, vaikka maksimivoimassa oli nähtävissä parantumista. Eri tutkimuksissa saadut tulokset on esitelty alla olevassa taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Kortikospinaalisen inhibition sekä maksimivoiman muutokset voimaharjoittelun jälkeen.

Tutkimus	Harjoitusjakson kesto (vko)	SP:n keston muutokset	Maksimivoiman muutokset
<b>Christie &amp; Kamen 2014</b>	2	- 15 ms (NA) - 12 ms (I)	+ 17.4 % (NA) + 19.8 % (I)
<b>Kidgell &amp; Pearce 2010</b>	4	- 16 ms (5%MVC) - 25 ms (20%MVC)	+ 33.8 %
<b>Kidgell ym. 2011</b>	4	–	+ 28 %
<b>Latella ym. 2012</b>	8	- 17,3 ms (AMT) - 17,1 ms (+20% AMT)	+ 29 %
<b>Mason ym. 2020</b>	2	- 8 %	+ 15,5 %

NA= nuoret aikuiset, I= ikääntyneet, – = ei merkitsevää muutosta, 5%MVC = 5 % MVC-tasolla, 20%MVC = 20 % MVC-tasolla, AMT = aktiivisen motorisen kynnyksen kohdalla, +20% AMT = 20 % aktiivisen motorisen kynnyksen yläpuolella

Samoin kuin kortikospinaalisen ärsytettävyyden ja nopeusvoiman kohdalla, myöskään kortikospinaalisen inhibition ja nopeusvoiman muutoksista voimaharjoittelun jälkeen ei ole juurikaan tutkimuksia. Koska voimaharjoittelun on kuitenkin todettu aikaansaavan maksimivoiman kasvua ja kortikospinaalisen inhibition vähentymistä (Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012; Mason ym. 2020), ja maksimivoima on yksi nopeusvoiman osatekijä (Harris 2000; Newton & Kramer 1994), voidaan muutoksia olettaa tapahtuneen kyseisissä tutkimuksissa mahdollisesti myös nopeusvoimassa.

Yksi mahdollinen selitys kortikospinaalisessa inhibitiassa voimaharjoittelun myötä tapahtuville muutoksille on supistuvilta lihaksilta kortikaaliselle ja subkortikaaliselle alueelle tuleva sensorinen palaute. Tarpeeksi monta kertaa harjoituksissa toistuva sensorisen palautteen saanti saa kortikospinaalisessa radassa aikaan muutoksia ja näin vähentää inhibition määrää. (Christie & Kamen 2014) Inhibitiassa tapahtuvat muutokset ovat mahdollisesti kuitenkin vain agonisti lihaksiin keskittyviä, sillä SP:tä tarkastellessa merkittäviä inhibition muutoksia ei ole havaittu antagonisti lihaksissa. (Kidgell ym. 2011; Ridding ym. 1995). Kortikospinaalisessa inhibitiassa tapahtuvat muutokset ovat siis spesifejä (Ridding ym. 1995). Samoin kuin kortikospinaalisen ärsytettävyyden kohdalla, myös inhibitiassa tapahtuneiden muutosten erot voivat johtua mitattavista lihaksista, sillä kortikospinaalisten soluprojektoiden jakautuminen selkärangan

motoneuroneihin on ala- ja yläraajojen lihasten välillä erilainen. (Devanne ym. 1997) Voimaharjoittelun myötä seuranneisiin muutoksiin kortikospinaalisessa inhibitiossa näyttäisi olevan vaikutusta myös harjoittelutavalla. Vertailtaessa eksentrisen ja konsentrisen voimaharjoittelun vaikutuksia huomattiin, että eksentrisellä voimaharjoittelulla oli suurempi vaikutus kortikaaliseen inhibitioon kuin konsentrisella (Kidgell ym. 2015). Tämän lisäksi myös sukupuolella näyttäisi olevan vaikutusta ainakin akuutteihin inhibitiossa tapahtuneisiin muutoksiin, sillä Latella ym. (2018) tutkimuksessa SP:n kesto lyheni voimaharjoittelun jälkeen suhteutettuna miehillä naisia enemmän.

## 5 HARJOITUSTAUON VAIKUTUKSET HERMO-LIHASJÄRJESTELMÄÄN

Pidempään jatkuva harjoitustauko saa aikaan muutoksia hermo-lihasjärjestelmässä ja näin ollen myös voimantuotossa (Andersen ym. 2005; Bosquet ym. 2013; Häkkinen ym. 1985). Maksimivoiman on todettu laskevan harjoitustauon myötä monissa tutkimuksissa (taulukko 4) (Andersen ym. 2005; Colliander & Tesch 1992; Granacher ym. 2011; Houston ym. 1983; Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Sakugawa ym. 2019). Huomioitavaa kuitenkin on, että monissa tutkimuksissa on havaittu harjoitustauon vaikutusten eri lihastyötavoilla tuotettuun maksimivoimaan vaihtelevan (Andersen ym. 2005; Colliander & Tesch 1992; Hortobágyi ym. 1993). Andersen ym. (2005) tutkimuksessa harjoitustauon myötä konsentrisen maksimivoima laski samalle tasolle kuin ennen harjoittelujaksoa, kun taas eksentrisen maksimivoima säilyi lähes ennallaan. Hortobágyi ym. (1993) tutkimuksessa harjoitustauko taas sai aikaan eksentrisen maksimivoiman laskua, mutta ei merkitsevää muutosta konsentrisessä tai isometrisessä maksimivoimassa. Harjoitustauko näyttäisi siis vaikuttavan eri lihastyötavoilla tuotettuun maksimivoimaan eri tavoin, vaikka tulokset tutkimusten välillä vaihtelevatkin.

Harjoitustauon vaikutukset nopeusvoimaan taas eivät ole yhtä selkeät kuin maksimivoiman kohdalla. Bosquet ym. (2013) meta-analyysissä todettiin harjoittelemattomuuden aiheuttavan nopeusvoiman heikentymistä, vaikkakin muutokset vaikuttaisivat olevan pienempiä kuin maksimivoimassa. Tämä selittyy mahdollisesti sillä, että nopeusvoimaan vaikuttavat maksimivoiman lisäksi myös nopeusominaisuudet, minkä vuoksi maksimivoiman lasku ei aiheuta yhtä suurta muutosta nopeusvoimassa. (Bosquet ym. 2013) Toisaalta useassa tutkimuksessa 7–24 viikon harjoitustauon ei ole havaittu aiheuttavan lainkaan nopeusvoiman heikentymistä (Granacher ym. 2011; Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Sakugawa ym. 2019) ja joissain tutkimuksissa nopeusvoiman on jopa havaittu parantuneen harjoitustauon jälkeen (Granacher ym. 2011). Grgic ja Grgic (2022) tekemässä meta-analyysissä ei myöskään havaittu nopeusvoiman heikentymistä 1–16 viikon harjoitustauon aikana, RFD:llä mitattuna. Huomioitavaa kuitenkin on, että eri tutkimuksissa niin harjoitusjakson kuin harjoitustauon pituudet ovat vaihdelleet, samoin kuin mittausmenetelmätkin.



TAULUKKO 4. Maksimi- ja nopeusvoiman muutokset harjoitustauon jälkeen.

<b>Tutkimus</b>	<b>Harjoitus- jakson kesto (vko)</b>	<b>Harjoitustauon kesto (vko)</b>	<b>Maksimi- voiman muutos (%)</b>	<b>Nopeus- voiman muutos (%)</b>
<b>Andersen ym. 2005</b>	13	13	- 100 (CON) - (ECC)	
<b>Colliander &amp; Tesch 1992</b>	12	12	- 9 (CON) - 10 (ECC)	
<b>Granacher ym. 2011</b>	8	7	- 7,1	+ 1,7
<b>Houston ym. 1983</b>	10	12	- 16–21	
<b>Hortobágyi ym. 1993</b>	U	2	- - (CON) - 12 (ECC)	-
<b>Häkkinen ym. 2000</b>	24	24	- 6 (CON) - 12	-
<b>Sakugawa ym. 2019</b>	12	16	- 14	-
<b>Tallent ym. 2017</b>	4	2	-	

- = ei merkitsevää muutosta, CON= konsentrisen maksimivoima, ECC= eksentrisen maksimivoima, U= urheilijoita

Harjoitustauon aikaansaamat muutokset voimantuotossa johtuvat sekä hermostollisista että morfologisista adaptaatioista, kuten lihassolujen pinta-alan pienentymisestä sekä lihasmassan vähenemisestä (Mujika & Padilla 2000). Harjoittelemattomuuden on havaittu aikaansaavan lihasten poikkipinta-alan pienentymistä, millä taas on negatiivinen vaikutus voimantuottoon (Andersen ym. 2005; Houston ym. 1983). Andersen ym (2005) tutkimuksessa nelipäisen reisilihaksen poikkipinta-ala pieneni konsentrisen maksimivoiman tavoin 13 viikon harjoitustauon myötä lähes samalle tasolle kuin ennen harjoitusjaksoa. Myös Houston ym. (1983) tutkimuksessa havaittiin 12 viikon harjoitustauon aikaansaavan 12 % laskun IIB-lihassolujen pinta-alassa, maksimivoiman laskun ohella.

Voimantuoton heikentymiseen vaikuttavia hermostollisia tekijöitä ovat muun muassa motoristen yksiköiden rekrytaation, synkronisaation ja syttymisfrekvenssin muutokset (Cormie ym. 2011) sekä tästä johtuva kortikospinaalisen ärsytettävyyden heikentyminen (Häkkinen ym. 1985; Häkkinen & Komi 1983). Lihasten aktivaation on havaittu heikentyvän harjoitustauon aikana EMG:llä mitattuna useammissa tutkimuksissa (Andersen ym. 2005; Hortobágyi ym. 1993). Andersen ym. (2005) tutkimuksessa konsentrisessä lihastyössä mitattu EMG laski 13

viikon aikana takaisin samalle tasolle kuin ennen 13 viikon harjoitusjaksoa. Toisaalta eksentrisessä lihastyössä mitatussa EMG:ssä ei havaittu merkittäviä muutoksia harjoitustauon jälkeen (Andersen ym. 2005). Hortobágyi ym. (1993) tutkimuksessa kahden viikon harjoitustauon jälkeen EMG:n havaittiin kuitenkin laskevan niin isometrisessä (- 8,4 %), eksentrisessä (- 10,1 %) kuin konsentrisessäkin (- 12,7 %) lihastyössä. Lihasten aktivaation lisäksi harjoittelemattomuuden on myös todettu heikentävän lihasten välistä koordinaatiota (Cormie ym. 2011).

Hermostossa on mahdollisesti havaittavissa muutoksia jo lyhyenkin harjoitustauon myötä. Tallent ym. (2017) tekemässä tutkimuksessa kortikospinaalinen ärsytettävyyden laski jo kahden viikon harjoittelemattomuuden jälkeen. Kortikospinaalisessa inhibitiossa ei kuitenkaan havaittu muutoksia. Huomioitavaa myös on, että kyseisessä tutkimuksessa harjoitustaukoa edeltänyt harjoittelujakso oli kestänyt vain neljä viikkoa ja harjoittelu oli ollut isokineettistä, joko eksentristä tai konsentristä, millä on voinut olla vaikutusta tuloksiin.

Harjoitustauon vaikutuksia spesifisti kortikospinaalisen radan toimintaan on tutkittu vain vähän, minkä takia aihetta käsitelläänkin tässä tutkimuksessa. Koska harjoitustauon on havaittu saavan aikaan laskua maksimivoimassa (Andersen ym. 2005; Houston ym. 1983; Häkkinen ym. 2000), voidaan kortikospinaalisen radan toiminnan muutosten kuitenkin olettaa olevan yksi vaikuttavista tekijöistä. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden ja inhibition muutosten on todettu muiden hermostollisten ja morfologisten muutosten ohella olevan yksi osatekijä voimankasvussa (Aagaard ym. 2002; Alegre ym. 2006; Christie & Kamen 2014; Grgic & Grgic 2022; Houston ym. 1983; Häkkinen & Komi 1983; Peltonen ym. 2018b), minkä vuoksi kyseisten tekijöiden voitaisiin olettaa liittyvän myös voimanlaskuun. Tämän lisäksi harjoitustauon aikaansaama motoristen yksiköiden toiminnan muuttuminen (Cormie ym. 2011) sekä tämän takia havaittu lihasten aktivaation heikentyminen (Andersen ym. 2005; Hortobágyi ym. 1993), liittyvät kortikospinaalisen radan toimintaan, minkä vuoksi kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä että inhibitiossa voidaan mahdollisesti myös olettaa näkyvän muutoksia harjoittelemattomuuden myötä.

Harjoittelemattomuuden aiheuttamat hermostolliset ja morfologiset adaptaatiot vaikuttaisivat tapahtuvan samassa järjestyksessä kuin harjoitellessakin. Harjoitustauon alkupuolella tapahtuva voimantuoton heikentyminen näyttäisi selittyvän hermostollisilla muutoksilla (motoristen yksiköiden rekrytointi ja synkronisaatio, syttymistiheys sekä lihasten välinen koordinaatio), mutta harjoitustauon jatkuessa pidempään morfologisilla muutoksilla (lihassolujen koko ja pennaatiokulma sekä jänteiden ominaisuudet). (Bosquet ym. 2013; Häkkinen ym. 1983; Häkkinen ym. 2000) Clark ym. (2006) tutkimuksessa myös esitettiin, että kokonaisuudessaan hermostolliset muutokset vastaisivat noin 48 % harjoittelemattomuuden aiheuttamasta voimantuoton heikentymisestä.

Harjoittelemattomuuden myötä tapahtuviin muutoksiin vaikuttavat merkittävästi harjoitustauon pituus, sekä millaista ja kuinka kauan jatkunutta harjoittelu oli ennen taukoa. Esimerkiksi Colliander ja Tesch (1992) tutkimuksessa 12 viikon harjoitustauon aikaansaama dynaamisen maksimivoiman lasku oli suurempaa konsentrisesti harjoitelleilla kuin eksentris-konsentrisesti harjoitelleilla, vaikka harjoitusjakso oli molemmilla ryhmillä samanpituisen. Bosquet ym. (2013) tehdyssä meta-analyysissä taas havaittiin, että harjoittelemattomilla harjoitustauon aikana tulleet muutokset maksimi- ja nopeusvoimassa olivat suurempia kuin pidempään harjoitelleilla. Tästä huolimatta harjoitustauon on havaittu saavan aikaan voimantuoton heikentymistä myös voimaharjoittelua pidempään harrastaneilla urheilijoilla, jos harjoittelemattomuutta jatkuu pidempään. Noin 8–12 viikon pituisen harjoitustauon on todettu saavan aikaan voimaharjoittelua tekevillä urheilijoilla 7–12 % laskun maksimivoimassa (Häkkinen ym. 1985; Häkkinen & Komi 1983). Harjoitustauon lisäksi vaikutusta näyttäisi olevan myös iällä, sillä ikääntyneillä (>65 vuotta) maksimi- ja nopeusvoiman laskun on havaittu olevan harjoittelemattomuuden aikana suurempaa kuin nuoremmilla (Bosquet ym. 2013). Muun muassa näiden tekijöiden vuoksi tutkimustulosten välillä on havaittavissa selkeitä eroja ja suora vertailu on hankalaa.

Kaikista adaptaatioihin vaikuttavista tekijöistä eniten vaikutusta näyttäisi kuitenkin olevan harjoitustauon pituudella. Tutkimusten mukaan lyhyemmällä harjoitustauolla ei ole merkittävää vaikutusta voimantuottoon (Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Tallent ym. 2017) ja joissain tapauksissa alle kahden viikon harjoitustauon on todettu mahdollisesti jopa saavan aikaan parannuksia nopeusvoimassa, vähentämällä hermostollista väsymystä (Cormie ym.

2011). Häkkinen ym. (2000) tehdyssä tutkimuksessa havaittiin, että kolme viikkoa kestäneellä harjoitustauolla ei ollut merkittävää vaikutusta räjähtävyyteen tai konsentriseen maksimivoimaan, minkä lisäksi isometrisessä maksimivoimassa tapahtunut lasku (6 %) oli myös suhteellisen vähäistä. Samankaltaisia tuloksia oli myös Tallent ym. (2017) sekä Hortobágyi ym. (1993) tutkimuksissa, joissa kahden viikon harjoittelemattomuudella ei ollut merkittävää vaikutusta maksimivoimaan (Tallent ym. 2017) tai nopeusvoimaan (Hortobágyi ym. 1993). Tallent ym. (2017) tutkimuksessa tutkittavat olivat ennen harjoitusjaksoa harjoittelemattomia, kun taas Hortobágyi ym. (1993) tutkimuksessa tutkittavat olivat teholajien urheilijoita. Myöskään Houston ym. (1983) tutkimuksessa neljä viikkoa kestäneellä harjoitustauolla ei ollut merkittävää vaikutusta maksimivoimaan. Maksimi- ja nopeusvoima näyttäisivätkin siis säilyvän hyvin noin 3–4 viikon harjoitustauon aikana (Bosquet ym. 2013; Houston ym. 1983; Shaver 1975), vaikkakin edeltäneen harjoitusjakson laadulla ja kestolla onkin vaikutusta ilmeneviin muutoksiin. Harjoitustauon aiheuttamat hermostolliset ja morfologiset muutokset vaikuttaisivatkin olevan sitä suurempia, mitä pidempään harjoittelemattomuus jatkuu. (Bosquet ym. 2013)

## 6 TRANSKRANIAALISEN MAGNEETTISTIMULAATION KÄYTTÖ VOIMANTUOTON TUTKIMISESSA

Transkraniaalisessa magneettistimulaatiossa voidaan lyhyellä korkeajännitteisellä stimuluksella noninvasiivisesti aktivoida ihmisen motorisella aivokuorella sijaitsevien kortikospinaalisten neuronien aksoneita lihassupistuksen aikaansaamiseksi (Merton ym. 1980). Transkraniaalista magneettistimulaatiota on kahta eri tyyppiä: yksi- tai paripulssinen TMS ja toistuva TMS (rTMS), joista tutkimuksissa käytetään yleensä yksi- ja paripulssista TMS:sää. Transkraniaalinen magneettistimulaatio käyttää ajallisesti vaihtelevia magneettikenttiä, jotka aikaansaavat sähkövirtoja stimuloitavassa hermokudoksessa. Jos TMS:sän aikaansaama sähkövirta on riittävän amplitudin omaava ja pitkäkestoinen, se depolarisoi välineuronien aksonit, jotka synaptoituvat kortikospinaalisiin hermosoluihin. Tämä tapahtuma kyetään havaitsemaan ja mittaamaan kohdelihaksen pintasähkökäyrässä motorisena herätevasteena eli MEP:inä. (Hallett 2007)

Kortikospinaalisten hermosolujen lisäksi TMS aktivoi kuitenkin myös muita soluja, jotka puolestaan vaikuttavat kortikospinaalisiin hermosoluihin. Nämä solut voivat olla peräisin M1:stä ja yhdistyä kortikospinaalisiin hermosoluihin intrakortikaalisten ratojen kautta. Ne voivat tulla myös muilta aivokuoren alueilta, kuten premotorisilta, somatosensorisilta ja parietaalisilta alueilta, tai subkortikaalisista rakenteista, kuten talamuksesta. Koska kortikospinaaliset hermosolut synaptoituvat selkäytimessä oleviin motoneuroneihin ennen kuin ne saavuttavat kohdelihaksensa, aikaansaatuihin MEP:hin vaikuttaa näin ollen myös selkäytimen ratojen ärsytettävyyys. (Duque ym. 2017)

TMS:llä voidaan mitata monia hermoston toiminnasta kertovia muuttujia, kuten motorinen kynnyks (motor threshold, MT), motorinen herätevaste (motor evoked potential, MEP) ja hiljainen jakso (silent period, SP) (Gruet ym. 2013). MT on stimulaation vähimmäismäärä, joka tarvitaan MEP:n aikaansaamiseksi ja kertoo kortikaalisesta ärsytettävyydestä (Ah Sen ym. 2017). MT voidaan havaita sekä lepotilassa olevassa lihaksessa (resting motor threshold, RMT) että toonisen tahdonalaisen supistuksen aikana (active motor threshold, AMT) (Kidgell ym. 2010). AMT ja MEP-amplitudi ovat kaksi toisiinsa liittyvää mutta itsenäistä ja kuitenkin

toisistaan riippumatonta kortikospinaalisesta ärsytettävyydestä kertovaa muuttujaa (Gruet ym. 2013).

## 6.1 Motorinen herätevaste

Motorinen herätevaste eli MEP kuvastaa siis kortikospinaalisen radan ärsytettävyyttä ja voidaan havaita, kun TMS kohdistetaan aivojen M1-alueelle (Carrol ym. 2001). MEP:n mitattavissa olevat muuttujat ovat: latenssi eli kortikospinaalisen radan johtumisaika, amplitudi ja MEP:n jälkeisen SP:n kesto eli kortikospinaalisen inhibition määrä (Hallett 2000). MEP:n kokoon vaikuttavat aivokuoren ja selkäytimen motoneuroneissa tapahtuvat ärsytettävyyden muutokset. Näin ollen TMS-menetelmää voidaan käyttää näiden motoneuronien ärsytettävyyden tutkimiseen erilaisissa tilanteissa. Jo pienikin tahdonalainen lihaksen aktivointi vaikuttaa MEP:n kokoon (Hess ym. 1987). Tahdonalainen supistuminen lisää selkärangan motoneuronien ärsytettävyyttä ja näin siis helpottaa aktivaation aikaansaamista TMS:llä. Tahdonalaisen supistumisen aikaansaama aktivaation helpottuminen vaihtelee kuitenkin eri lihasten välillä. (Lazzaro ym. 1998)

MEP on suhteellisen synkroninen lihaksen reaktio, joka koostuu kortikospinaalisten stimulusten sarjasta. TMS saa aluksi aikaan D-aallon (kortikospinaalisten hermosolujen suora eksitaatio), jota seuraa sitten 1–2 millisekunnin välillä tulevien I-aaltojen sarja (epäsuora aktivoituminen kortikaalisten välineuronien kautta) (Hallett 2000). D- ja I-aallot synnyttävät monosynaptisia eksitatorisia postsynaptisia potentiaaleja spinaalisten motoneuronien tasolla, jotka summautuvat ja saavat näin  $\alpha$ -motoneuronit saavuttamaan syttymiskynnyksen. Tuloksena on lihaksen supistuminen, joka voidaan nähdä MEP:inä, joka määritetään yleensä EMG:n avulla. MEP:n taustalla olevaan kortikospinaalisten stimulaatioiden sarjaan (aktiopotentiaaliin) vaikuttavat myös motoneuronialtaaseen tulevat suorat (monosynaptiset) ja epäsuorat (disynaptiset ja oligosynaptiset) inhibitoriset ja eksitatoriset kortikospinaaliset yhteydet (Burke & Pierrot-Deseilligny 2010; Rosler 2001).

## 6.2 Hiljainen jakso

Hiljainen jakso eli SP on MEP:iä seuraava selvä EMG:n non-aktiivisuuden jakso, joka kertoo kortikospinaalisen radan inhibitiosta (Werhahn ym. 2007; Wilson ym. 1993). Stimulaatiota seuraava SP voi kestää 50–300 millisekuntia ja SP:n keston lyhentymisestä voidaan päätellä inhibition määrän vähentyneen (Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012; Leung ym. 2017; Mason ym. 2020; Werhahn ym. 2007). SP:n kestoon vaikuttavat monet eri mekanismit. Sen on todettu muodostuvan perifeerisen (selkäytimen) ja kortikaalisen inhibition yhdistelmästä ja heijastavan näin inhibitoristen kortikospinaalisten reittien aktiivisuutta. (Wolters ym. 2008, Latella ym. 2012 mukaan) SP:n eri vaiheiden on myös todettu mahdollisesti edustavan eri inhibitoristen mekanismien toimintaa (Schnitzler & Benecke 1994; Inghilleri ym. 1993).

TMS:sän aikaansaaman SP:n alkuosa (50–75 ms) johtuu mahdollisesti ensisijaisesti spinaalisen tason inhibitiomekanismeista, kuten jälki-hyperpolarisaatiosta ja a-motoneuronien toistuvasta inhibitiosta. SP:n myöhempi osa (>75 ms) taas edustaa supraspinaalisen tason inhibitiomekanismeja, joissa välittäjinä toimivat muun muassa M1:ssä olevat GABA<sub>B</sub>-reseptorit. (Schnitzler & Benecke 1994; Inghilleri ym. 1993) Yksi pulssisen TMS:sän yhteydessä SP:n keston ajatellaan kuitenkin kertovan lähinnä aiemmin mainitun GABA<sub>B</sub> välitteisistä inhibitorisista prosesseista (Chen ym. 1999; Kidgell ym. 2010; Werhahn ym. 2007). SP:n on todettu olevan hyvä mittari muun muassa voimaharjoittelun myötä inhibitiossa tapahtuneiden muutosten tarkasteluun, sillä korrelaatio lyhentyneen SP:n ja voimatasojen nousun välillä kertoo välillisesti kortikospinaalisen inhibition vähentymisestä M1:n ja selkäytimen tasolla (Kidgell ym. 2010).

## 7 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESEIT

Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella kortikospinaalisen radan toiminnan sekä voimantuoton muutoksia voimaharjoitteluintervention sekä harjoitustauon jälkeen, sekä tutkia myös ilmenevien adaptaatioiden välisiä yhteyksiä. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden ja inhibition muutoksien vaikutuksia maksimi- ja etenkin nopeusvoimaan ei vielä täysin ymmärretä, minkä lisäksi etenkin harjoitustauon vaikutuksia kyseisiin muuttujiin on tutkittu hyvin vähän. Tämän vuoksi kyseisten aiheiden tutkiminen oli perusteltua.

*Tutkimuskysymys 1:* Onko kortikospinaalisen radan toiminnassa havaittavissa muutoksia voimaharjoitteluintervention aikana?

*Hypoteesi 1:* Kortikospinaalisen ärsytettävyyden on todettu parantuvan voimaharjoittelun myötä (Beck ym. 2007; Griffin & Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020; Tallent ym. 2017), minkä lisäksi voimaharjoittelun on myös todettu laskevan kortikospinaalista inhibitiota (Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012; Leung ym. 2017; Mason ym. 2020; Ridding ym. 1995; Weier ym. 2012).

*Tutkimuskysymys 2:* Onko voimantuotossa havaittavissa muutoksia voimaharjoitteluintervention aikana ja ovatko mahdolliset muutokset yhteydessä kortikospinaalisen radan toimintaan?

*Hypoteesi 2:* Voimaharjoittelun on todettu aikaansaavan maksimivoiman (Aagaard ym. 2002; Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Latella ym. 2012; Peltonen ym. 2018b) ja nopeusvoiman parantumista (Aagaard ym. 2002; Alegre ym. 2006; Grgic & Grgic 2022; Peltonen ym. 2018b). Voimantuotossa tapahtuvat muutokset ovat myös mahdollisesti yhteydessä kortikospinaalisen radan toiminnassa voimaharjoittelun myötä tapahtuviin muutoksiin, kuten kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvamiseen (Griffin & Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020) sekä kortikospinaalisen inhibition vähentymiseen (Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012; Mason ym. 2020).



*Tutkimuskysymys 3:* Onko kortikospinaalisen radan toiminnassa havaittavissa muutoksia harjoitustauon aikana?

*Hypoteesi 3:* Kortikospinaalisen ärsytettävyyden on todettu laskevan harjoitustauon aikana (Häkkinen ym. 1985; Häkkinen & Komi 1983; Tallent ym. 2017). Väitettä tukevat myös tutkimukset, joissa lihasten EMG-aktiivisuuden on havaittu laskevan harjoitustauon aikana, sillä EMG-aktiivisuuteen sekä MEP-amplitudiin vaikuttavat monet samat hermostolliset tekijät (Andersen ym. 2005; Hortobágyi ym. 1993). Vaikka kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä onkin havaittavissa muutoksia harjoitustauon myötä, harjoitustauolla ei ole havaittu olevan merkittävää vaikutusta kortikospinaaliseen inhibitioon (Tallent ym. 2017).

*Tutkimuskysymys 4:* Onko voimantuotossa havaittavissa muutoksia harjoitustauon aikana ja ovatko mahdolliset muutokset yhteydessä kortikospinaalisen radan toimintaan?

*Hypoteesi 4:* Harjoitustauon on havaittu saavan aikaan laskua maksimivoimassa (Andersen ym. 2005; Colliander & Tesch 1992; Granacher ym. 2011; Houston ym. 1983; Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Sakugawa ym. 2019), tauon kestäessä vähintään neljä viikkoa (Bosquet ym. 2013; Houston ym. 1983; Shaver 1975). Harjoitustauon vaikutukset nopeusvoimaan eivät ole yhtä selkeät, sillä osissa tutkimuksissa nopeusvoiman on havaittu heikentyvän harjoitustauon myötä (Bosquet ym. 2013), kun taas joissain nopeusvoiman on havaittu jopa parantuvan harjoitustauon aikana (Granacher ym. 2011). Suurimmassa osassa tutkimuksia nopeusvoimassa ei kuitenkaan ole havaittu merkittävää muutosta harjoitustauon jälkeen (Granacher ym. 2011; Grgic & Grgic 2022; Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Sakugawa ym. 2019). Kortikospinaalisen ärsytettävyyden ja inhibition muutosten on todettu muiden hermostollisten ja morfologisten muutosten ohella olevan yksi osatekijä voimankasvussa (Aagaard ym. 2002; Alegre ym. 2006; Christie & Kamen 2014; Grgic & Grgic 2022; Houston ym. 1983; Häkkinen & Komi 1983; Peltonen ym. 2018b), minkä vuoksi kyseisissä tekijöissä tapahtuvien muutosten, kuten kortikospinaalisen ärsytettävyyden laskun voitaisiin olettaa liittyvän myös voimanlaskuun, vaikka aiheesta onkin suhteellisen vähän tutkimuksia.

## 8 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämä tutkimus suoritettiin osana suurempaa Jyväskylän yliopiston tutkimusprojektia, jonka johtajana toimi Juha Ahtiainen. Tutkimus sai Jyväskylän yliopiston ihmistieteiden eettisen toimikunnan hyväksynnän ja kesti yhteensä 15 viikkoa. Tulevissa kappaleissa käydään läpi tutkittavat, tutkimussuunnitelma sekä mittausmenetelmät.

### 8.1 Tutkittavat

Tutkimuksessa oli yhteensä 15 tutkittavaa, joista kahdeksan oli miestä ja seitsemän naista. Tutkittavat olivat kaikki harjoittelemattomia eli he eivät olleet tehneet säännöllistä voimaharjoittelua viimeisen kuuden kuukauden aikana. Poissulkukriteereihin kuului myös kilpaurheilu sekä säännöllisen kuormittavan kestävyysurheilun harrastaminen. Tutkittavien antropometriset tiedot nähtävissä taulukossa 5.

Turvallisuussyistä sekä tutkimustulosten luotettavuuden vuoksi poissulkukriteereihin kuuluivat mahdolliset krooniset sairaudet, hermostoon tai tuki- ja liikuntaelimestön toimintaan vaikuttavat sairaudet, hermostoon vaikuttavan lääkityksen käyttäminen sekä implantoitu metalli- tai elektroninen laite.

TAULUKKO 5. Tutkittavien antropometriset tiedot.

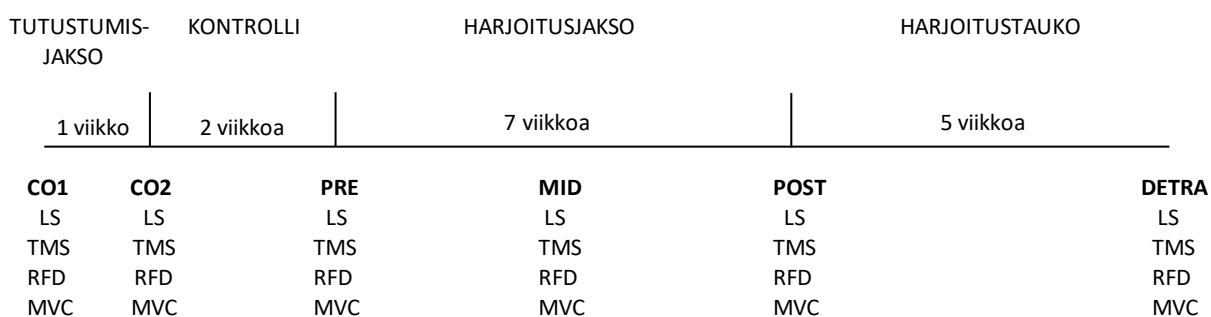
	<b>ikä</b>	<b>pituus (cm)</b>	<b>paino (kg)</b>	<b>rasvaprocentti (%)</b>
<b>naiset (n=7)</b>	27±5	168,0±9,6	68,7±17,6	29,7±7,0
<b>miehet (n=8)</b>	28±5	179,9±7,3	91,2±20,1	26,8±8,7

Tutkittavia ohjeistettiin pitämään ruokailutottumuksensa samanlaisina läpi koko tutkimuksen sekä välttämään tutkimuksen ulkopuolista voimaharjoittelua tai muuta kuormittavaa urheilua. Ennen tutkimuksen aloittamista tutkittavia informoitiin mahdollisista riskeistä sekä

mahdollisuudesta lopettaa tutkimukseen osallistuminen missä vaiheessa tahansa. Suorittaakseen tutkimuksen loppuun tutkittavat eivät kuitenkaan voineet jättää välistä kuin maksimissaan yhden harjoituskerran.

## 8.2 Tutkimussuunnitelma

Tutkimus koostui seitsemän viikkoa kestävästä harjoitusjaksosta, jota seurasi viisi viikkoa kestävä harjoitustauko. Mittaukset suoritettiin ennen harjoitusjakson alkua (pre), harjoitusjakson puolivälissä (mid), harjoitusjakson jälkeen (post) ja harjoitustauon jälkeen (detra). Tämän lisäksi tutkimus piti sisällään kontrollimittaukset (co1 ja co2), jotka suoritettiin harjoitusjaksoa edeltäneiden kahden viikon aikana. Ennen ensimmäisiä mittauksia tutkittavat kävivät myös tutustumismittauksissa, joissa heidät tutustutettiin mittausprotokollaan, oppimisen vaikutuksen minimoimiseksi kontrolli ja pre-mittausten välillä. Tässä tutkimuksessa huomioidut mittaukset ovat pre-, post- sekä detra-mittaukset. Tutkimus nähtävissä kokonaisuudessaan kuvassa 6.



KUVA 6. Tutkimussuunnitelma

## 8.3 Harjoitusohjelma

Harjoitusohjelma kesti yhteensä seitsemän viikkoa, jonka aikana tutkittavilla oli 13 harjoituskertaa. Tutkittavien tuli osallistua vähintään 12 harjoituskertaan, jotta heidän datansa voitiin hyväksyä. Harjoituskertoja oli kaksi kertaa viikossa ja kertojen välissä oli aina vähintään 48 tuntia, riittävän palautumisen varmistamiseksi. Tämän lisäksi kaikkia harjoituksia valvottiin

tutkimuksen henkilökunnan toimesta, huolehtien että liikkeet suoritetaan oikealla tekniikalla ja tahdilla. Tutkittavat kävivät harjoituksissa aina samaan aikaan päivästä läpi tutkimuksen (aamu/iltapäivä/ilta).

Lämmittely piti sisällään viiden minuutin pyöräilyn kuntopyörällä, itse valitulla tahdilla. Tämän jälkeen tutkittavat suorittivat dynaamisia liikkuvuus harjoitteita, tarkoituksena valmistaa tutkittavia tulevaan harjoitukseen. Suoritetut dynaamiset liikkuvuus harjoitteet olivat kyykky, askelkyykky, käsillä kävely seisonta-asennosta lankkupitoon ja takaisin, polvennosto pohjenousulla ja sivukyykky. Lämmittelyn jälkeen tutkittavat suorittivat viisi maksimaalista kevennyshyppyä, joiden jälkeen siirryttiin itse harjoitusohjelmaan. Harjoitusohjelma piti sisällään yhteensä viisi liikettä, jotka kuormittivat koko kehoa. Harjoitusohjelma nähtävissä taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Harjoitusohjelman liikkeet sekä käytetyt sarjat ja toistomäärät.

<b>Liike</b>	<b>Toistot</b>	<b>Sarjat</b>
<b>Jalkaprässi</b>	8–10*	3
<b>Polvenojennus</b>	8–10*	5
<b>Penkkipunnerrus</b>	8–10*	3
<b>Hauiskääntö</b>	8–10*	5
<b>Soutu istuen rintatuella</b>	8–10*	3

\*viikon toisessa harjoituksessa viimeinen sarja epäonnistumiseen asti

Kaikissa liikkeissä eksenttrinen vaihe suoritettiin hallitusti niin, että vaiheen kesto oli noin kaksi sekuntia, jonka jälkeen konsenttrinen vaihe suoritettiin mahdollisimman nopeasti ilman taukoa vaiheiden välillä. Tarkoituksena jokaisessa sarjassa (epäonnistumiseen asti suoritettavia sarjoja lukuun ottamatta) oli tehdä 8–10 toistoa niin, että varaa jäisi vielä 2–3 toistoon. Jokaisten sarjojen välissä pidettiin kahden minuutin palautus. Liikkeissä käytettävät kuormat määritettiin harjoitusohjelman alussa mitattujen 1 RM (polvenojennus ja hauiskääntö) ja 3–5 RM (jalkaprässi, penkkipunnerrus ja soutu istuen rintatuella) tulosten mukaan. Ensimmäisen viikon jälkeen kuormia muokattiin viikoittain sen mukaan, kuinka paljon tutkittavat saivat viikon toisessa harjoituksessa toistoja tehtyä epäonnistumiseen asti suoritetuissa sarjoissa (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Epäonnistumiseen asti suoritettujen sarjojen mukaan tehtävät muokkaukset liikkeiden kuormiin. Suoritetut toistot nähtävissä ylärivillä.

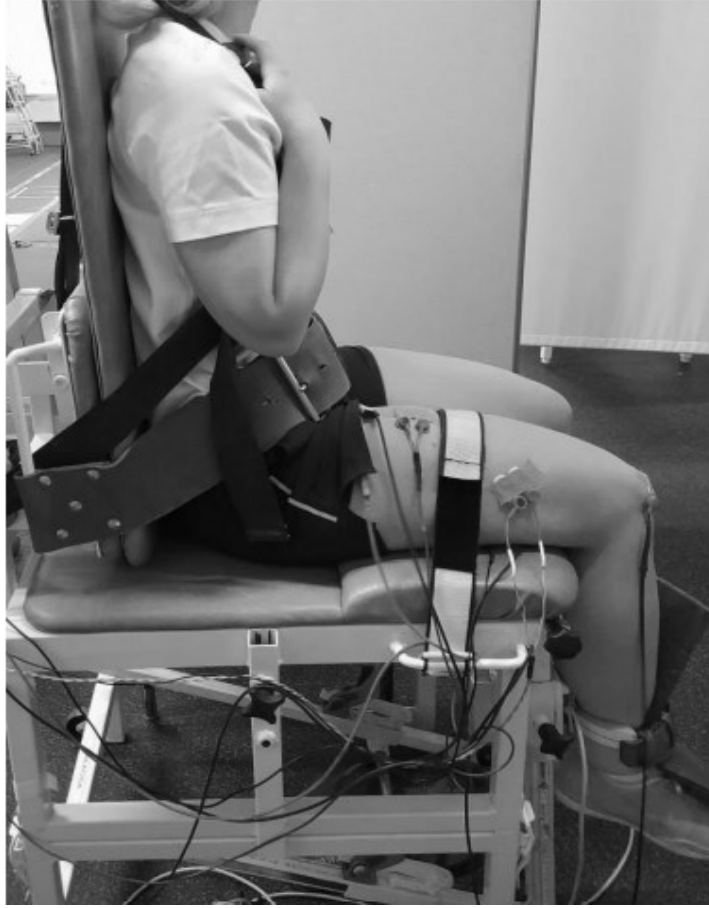
Liike	< 5	6–7	8–10	11–12	13–15	16–20	20 >
<b>Jalkaprässi</b>	-7,5 kg	-5 kg	0 kg	+2,5 kg	+5 kg	+7,5 kg	+10 kg
<b>Polvenojennus</b>	-7,5 kg	-5 kg	0 kg	+2,5 kg	+5 kg	+7,5 kg	+10 kg
<b>Penkkipunnerrus</b>	-5 kg	-2,5 kg	0 kg	+2,5 kg	+5 kg	+7,5 kg	+10 kg
<b>Hauiskääntö</b>	-2,5 kg	-1 kg	0 kg	+1 kg	+2,5 kg	+3,5 kg	+5 kg
<b>Soutu istuen rintatuella</b>	-2,5 kg	-1,25 kg	0 kg	+1,25 kg	+2,5 kg	+5 kg	+7,5 kg

Harjoitustauko kesti yhteensä viisi viikkoa, jonka aikana tutkittavat eivät suorittaneet minkäänlaista voima-, nopeus- tai korkean intensiteetin harjoittelua. Tutkittavia ohjeistettiin pitämään fyysisen aktiivisuuden tasonsa samana kuin koko tutkimuksen ajan sekä näin ollen välttämään aerobisen harjoittelun tai muun fyysisen aktiivisuuden lisäämistä.

#### 8.4 Mittaukset

Tutkimuksessa suoritettavat mittaukset oli jaettu kahdelle päivälle. Ensimmäisenä päivänä suoritettiin Maksimaalisen M-aallon eli Mmax:n (ennen ja jälkeen muiden mittausten), MVC:n sekä RFD:n mittaukset. Toisena mittauspäivänä, vähintään 48 h ensimmäisistä mittauksista, suoritettiin jälleen Mmax:n (ennen ja jälkeen muiden mittausten) ja MVC:n mittaukset sekä TMS-mittaukset.

Tutkittavat istuivat kaikkien mittausten ajan tuolissa, jossa asento vakioitiin selkä- sekä nilkkatuen (2 cm lateraalisen malleolin yläpuolella) avulla. Tutkittavien asennon vakiointi sekä paikallaan pysyminen varmistettiin myös tukemalla heidät hartioiden, vatsan sekä mitattavan jalan reiden alueelta. Tutkittavien lonkan sekä polven nivelkulma oli läpi kaikkien mittausten 90 astetta. Mittaustuoli asetuksineen sekä tutkittavien asento nähtävissä kuvassa 7.



KUVA 7. Mittaustuoli, sen asetukset sekä tutkittavien asento.

#### 8.4.1 Elektromyografia

Lihasten toimintaa mitattiin tutkimuksessa pinta-elektromyografian (sEMG) avulla. Tutkimuksessa mitattava lihas oli oikean jalan rectus femoris (RF), mutta tämän lisäksi sEMG mitattiin myös vastus lateralis (VL) ja bicep femoris (BF) lihaksista. Koska tässä tutkimuksessa käytettiin vain rectus femoris lihaksesta mitattuja signaaleja, keskitytään tulevissa kappaleissa vain kyseisen lihaksen mittaamiseen. Elektrodien paikat määritettiin SENIAM:n suositusten mukaisesti, palpoiden mitattavaa lihasta lihasjännityksen aikana. Rectus femoris lihaksen elektrodit asetettiin puoliväliin matkaa suoliluun etukärjestä patellan yläreunaan. Elektrodien paikat valmisteltiin yleisten ohjeiden mukaisesti (ihokarvojen poisto, ihon hionta ja desinfiointi), jonka jälkeen elektrodit asetettiin yhdensuuntaisesti niin, että sähkönjohtavuus oli samansuuntainen kuin mitatun lihaksen lihassäikeet. Elektrodien sähkönjohtavuuden

varmistettiin olevan alle 2 k $\Omega$  voltti-ampeeri-ohmimittarilla. Elektrodiin paikkojen vakioinnissa käytettiin apuna myös mittauspisteiden merkitsemistä permanenttitussilla. Paikkojen merkitseminen tapahtui ensimmäisellä mittauskerralla sen jälkeen, kun kaikkien elektrodiin paikat oli varmistettu oikeiksi. Jokaiselle tutkittavalle myös annettiin ohjeeksi vahvistaa tehtyjä merkkejä mittausten välissä.

Mittaamisessa käytettiin bipolaarista pintaelektrodiin kytkentää, jossa kahden rectus femoris lihaksesta asetettujen elektrodiin (Ambu® BlueSensor N 22x44 mm) signaalin poiminta-alueet olivat 10 mm ja elektrodiin etäisyys 20 mm. Vertailuelektrodi kiinnitettiin patellan keskiosaan. EMG-signaalin tallentamiseen käytettiin analogi-digitaalimuunninta (CED Power 1401–3, CED, Cambridge, UK). Lihaksesta tallennettu EMG-signaali synkronoitiin vastaavan voimasignaalin kanssa käyttäen samaa analogi-digitaalimuunninta ja Signal 4.10 -ohjelmistoa (Cambridge Electronic Design Ltd., Milton, Cambridge, Yhdistynyt kuningaskunta). Kaikki tallennus suoritettiin 3 kHz:n näytteenottotaajuudella, x1000 vahvistuksella, >120 dB:n yhteismuotoisella jännitteen vaimennussuhteella ja 16–1000 Hz:n ääritajuussuodattimella.

#### **8.4.2 Maksimaalinen M-aalto**

Jokaisen mittauskerran alussa tutkittavilta mitattiin päivän maksimaalinen M-aalto eli M<sub>max</sub>, jota käytettiin kaiken tutkimuksessa tallennetun sEMG:n normalisointiin. Normalisoimalla sEMG-signaali M<sub>max</sub>-tulokseen, pystyttiin parantamaan tutkittavien sekä mittausten tulosten sisäistä ja välistä tulkintaa. Normalisoinnissa käytettiin M<sub>max</sub>:n peak-to-peak amplitudia. M<sub>max</sub>:n muutoksia myös seurattiin mittauskerran sisällä, sillä M<sub>max</sub>:n on todettu pienentyvän pidempien tutkimusten aikana (Crone ym. 1999). Tämän vuoksi M<sub>max</sub> mitattiin jokaisen tutkimuskerran lopuksi uudelleen.

M<sub>max</sub> määritettiin sEMG:llä rectus femoris lihaksesta, antamalla sähköinen stimulaatio perifeeriseen reisihermoon. Sähköisen stimulaation paikka määritettiin palpoimalla tutkittavan oikeanpuoleisesta nivusesta pulssi ja asettamalla kaksi pintaelektrodiä (Polar Trode® 32 mm) pulssin molemmille puolille sillä oletuksella, että perifeerinen reisihermo kulkee samansuuntaisesti reisivaltimon kanssa. Elektrodit asetettiin paikalleen nivusen nivelsiteiden

suuntaisesti. Sähköinen stimulus (1,0 ms) välitettiin virtastimulaattorin (DS7AH, Digitimer Ltd, Welwyn Garden City, UK) välityksellä tutkittavan ollessa levossa tuetussa asennossa mittaustuolissa. Tutkittavan lihasten aktiivisuutta valvottiin tarkkailemalla EMG:n neliöjuuren keskiarvoa (EMGrms). Stimulus annettiin vain, jos lihasten aktiivisuutta ei ollut havaittavissa 100 ms ennen stimuluksen antoa. Intensiteettiä nostettiin stimulus stimulukselta, kunnes Mmax:n peak-to-peak amplitudi tasaantui eikä enää noussut. Tämän jälkeen löydetty Mmax varmistettiin vielä antamalla 150 % stimulus intensiteetistä, jolla Mmax:n peak-to-peak amplitudi tasaantui. Jos selvää nousua ei ollut havaittavissa, todettiin Mmax:n löytyneen ja käytetty intensiteetti (mA) sekä saatu Mmax (mV) kirjattiin ylös käytettäväksi myöhemmissä mittauksissa.

### **8.4.3 Transkraniaalinen magneettistimulaatio**

Tutkimuksessa transkraniaalinen magneettistimulaatio pyrittiin kohdentamaan mahdollisimman tarkasti motorisen aivokuoren rectus femoris lihasta ohjaavalle alueelle. Optimaalisen stimulaatiokohdan eli ”hotspotin” määrittäminen suoritettiin asettamalla stimulointikela M1:n vasemmalle puolelle kohtaan, jonka pitäisi stimuloida rectus femoris lihasta. Tämän jälkeen stimuluksia annettiin samalla kun stimulaatiokelan paikkaa säädettiin, etsien kohtaa, jossa saatiin aikaan suurin MEP. Kun suurin MEP saavutettiin eli hotspot löydettiin, merkattiin stimulaatiokelan paikka permanenttitussilla. Hotspot määritettiin jokaisen tutkimuskerran alussa uudelleen.

Kussakin mittauksessa käytettävien stimulaatioiden amplitudien määrittäminen aloitettiin etsimällä aktiivinen motorinen kynnyksarvo (AMT). Tutkittavaa ohjeistettiin ylläpitämään isometrisessä polvenojennuksessa voimatasoa, joka oli 10 % MVC:stä. TMS:sän lähtöintensiteetti oli 35 % maksimaalisesta stimulaatio intensiteetistä, josta intensiteettiä lähdettiin nostamaan 5 % nousuilla, kunnes positiivinen MEP-vaste ( $\geq 200\mu\text{V}$  peak-to-peak) saatiin aikaiseksi. Tästä eteenpäin intensiteettiä nostettiin 1 % kerrallaan, kunnes kolme viidestä stimuluksista sai aikaan riittävän ( $\geq 200\mu\text{V}$ ) MEP-vasteen. Aktiivinen motorinen kynnyks arvo määritettiin olevan alin intensiteetti, jolla kolme viidestä stimuluksista sai aikaan riittävän MEP-vasteen.



Mittauksissa yksittäisiä 1,0 ms:n magneettisia stimuluksia annettiin 10 yhtä mittausasetelmaa kohti. Mittausasetelmia oli yhteensä yhdeksän erilaista (taulukko 8), joista jokainen tehtiin kussakin mittauksessa, mutta satunnaistetussa järjestyksessä. Järjestyksen satunnaistaminen tehtiin tietokoneen avulla. Mittausasetelmissa vaihtelivat niin intensiteetti (120 %, 140 % ja 160 % aMT:stä) kuin tutkittavan polvenojennuksessa tuottama voimataso (lepo, 20 % ja 60 % MVC:stä). Kaiken kaikkiaan yhtä mittauskertaa kohde stimuluksia annettiin siis yhteensä 90. Myös eri mittausasetelmissä käytetyt stimulaatioväli vaihtelivat. Levossa sekä 20 % MVC:stä voimatasoilla stimulaatioväli oli 10 sekuntia, kun taas 60 % MVC:stä voimatasolla stimulaatioväli oli 30 sekuntia. Eri mittausasetelmien välinen tauko kesti yhden minuutin. Tässä tutkimuksessa tuloksissa keskityttiin kuitenkin vain 20 % MVC:stä tehtyihin suorituksiin.

TAULUKKO 8. Eri mittausasetelmat.

	<b>Voimataso (% MVC:stä)</b>	<b>Stimulusintensiteetti (% aMT:sta)</b>	<b>Stimulaatioiden määrä</b>	<b>Stimulaatioväli (s)</b>
<b>1.</b>	0	120	10	10
<b>2.</b>	0	140	10	10
<b>3.</b>	0	160	10	10
<b>4.</b>	20	120	10	10
<b>5.</b>	20	140	10	10
<b>6.</b>	20	160	10	10
<b>7.</b>	60	120	10	30
<b>8.</b>	60	140	10	30
<b>9.</b>	60	160	10	30

#### 8.4.4 Maksimaalinen tahdonalainen supistus ja voimantuottonopeus

MVC (maksimaalinen tahdonalainen supistus) mitattiin tutkimuksissa sekä LS- että TMS-mittauskerroilla, kun taas RFD (voimantuottonopeus) mitattiin vain LS-mittausten yhteydessä. Kuten kaikissa muissakin tutkimuksissa, myös voimatutkimuksissa mittaukset suoritettiin oikealle jalalle. Voimasignaali mitattiin isometrisessä polvenojennuksessa, aiemmin esitellyssä mittaustuolissa, jossa voima-anturi oli sijoitettu nilkan kohdalle nilkkaremmiin yhteyteen. Nilkkaremmi oli itsessään joustamatonta materiaalia mittaustulosten luotettavuuden

lisäämiseksi, mutta nilkan sekä remmin väliin asetettiin epämukavuuden vähentämiseksi 10 mm paksu vaahtomuovin pala. Paremman data-analyysin vuoksi kaikilta tutkittavilta myös laskettiin vipuvarren pituus voima-anturin keskipisteestä reisiluun lateraaliseen epikondyyliin, jolloin tuotettu voima (N) pystyttiin muuntamaan vääntömomentiksi (N/m).

Ennen MVC- ja RFD-mittauksia tutkittavat suorittivat kaksi minuuttia kestävän lämmittelyn, jonka aikana tutkittavat saivat harjoitella isometristä polvenojennusta (ilman esikevennystä). Lämmittelyn aikana tutkittavia myös ohjeistettiin suorittamaan neljä isometristä polvenojennusta, kaksi 50 % ja kaksi 80 % MVC:stä. Tutkittaville annettiin suuntaviivaksi viimekertaisista MVC-mittauksista lasketut 50 ja 80 % viivat heille näkyvissä olevalle voimakäyrälle, jolloin he pystyivät myös itse paremmin säätämään voimantuottoaan. Kyseiset polvenojennukset suoritettiin noin 10–20 sekunnin palautuksilla ja yhden suorituksen kesto oli noin 3–4 sekuntia.

Lämmittelyn jälkeen siirryttiin itse mittauksiin, joista ensin suoritettiin aina MVC. MVC-mittauksia suoritettiin yhteensä kolme, vähintään 60 sekunnin palautuksilla. Jos viimeinen suoritus oli kuitenkin yli 5 % parempi kuin edellinen, tekivät tutkittavat vielä yhden toiston lisää. Yksi suoritus kesti noin 2–3 sekuntia. Tutkittavia ohjeistettiin tekemään suoritus niin voimakkaasti kuin pystyvät, ilman minkäänlaista esikevennystä tai lihasten esijännitystä. Jokainen suoritus alkoi tutkijan antamalla lähtölaskennalla ”3–2–1–Paina!”, jonka jälkeen tutkittavia myös kannustettiin tutkijan toimesta, jokaisella suorituksella. Tutkittavat myös näkivät omat suorituksensa ruudulle jaetusta voimakäyrästä, minkä lisäksi viimeisin korkein tulos oli jatkuvasti näkyvissä ruudulla. MVC mitattiin aina myös tutkimuskerran päätteeksi, jotta pystyttiin seuraamaan tutkimusten aikana ilmennyt väsymystä. Tutkimuskerran päätteeksi MVC-mittauksia tehtiin kuitenkin vain kaksi.

MVC-mittausten jälkeen suoritettiin LS-mittauksissa seuraavaksi RFD-mittaukset. MVC-mittausten tavoin myös RFD-mittauksissa tutkittavat näkivät tuottamansa voimakäyrän edessään olevalla ruudulla, minkä lisäksi myös tutkijan antama lähtölaskenta oli sama (”3–2–1–Paina!”). Tutkittavia kannustettiin suorituksen ajan myös samoin kuin MVC-mittauksissa. Erona MVC-mittauksiin oli, että tutkittavia ohjeistettiin ”tuottamaan mahdollisimman paljon

voimaa, mahdollisimman nopeasti”. Suorituksia tehtiin yhteensä viisi, joista jokaisen välissä pidettiin vähintään 60 sekunnin palautus. Suorituksen kesto oli myös MVC-mittausta lyhyempi, noin yhden sekunnin. MVC-mittausten tavoin myöskään RFD-mittauksissa ei saanut ilmetä minkäänlaista esikevennystä tai lihasten esijännitystä, joita molempia valvottiin EMGrms-aktiivisuuden sekä voimakäyrän seuraamisen avulla. Sekä MVC- että RFD-mittauksissa rajana liiallisessa lihasten esijännityksessä toimi voimakäyrässä 0,5 N, suoritusta edeltävän 100 ms aikana. Tämän lisäksi RFD-suoritus hyväksyttiin mukaan analyysiin vain, jos saavutettu voimataso oli vähintään 80 % aiemmin mitatusta parhaasta MVC-suorituksesta. RFD-suorituksissa tutkittaville laitettiin 80 % raja näkyviin voimakäyrää näyttävälle ruudulle. Jos tutkittava saavutti yli 100 % aiemmin mitatusta MVC:stä, nostettiin 80 % rajaa vastaamaan kyseistä suoritusta.

## 8.5 Tilastolliset analyysit

Tilastolliset analyysit tehtiin käyttämällä SPSS 26 for Windows -ohjelmaa, jonka jälkeen histogrammit tehtiin Excel 2016 -ohjelmalla. Tilastollisissa analyyseissä käytettiin RFD:n kohdalla kahden parhaan suorituksen keskiarvoa mittauskertaa kohti ja MVC:n kohdalla mittausviikon parasta suoritusta. Johtuen tutkittavien poissaoloista tietyissä mittauksissa, on analyyseissä mukana olevien tutkittavien määrä joissain analyyseissä eri kuin toisissa. Eri analyyseissä käytettyjen tutkittavien määrät on kuitenkin ilmoitettu tuloksissa tulevassa kappaleessa. RFD-datan kohdalla käytettiin kahden tutkittavan kohdalla myös laskennallista kaavaa post-mittausten tulosten arvioimiseksi, sillä heillä kyseinen data ei ollut käyttökelpoista kyseisellä kerralla. Kerätyn datan normaalijakauma testattiin käyttämällä Shapiro-Wilk -testiä. Tämän jälkeen eri muuttujien pre-, post- ja detra-mittausten välillä tapahtuneiden muutosten merkitsevyys testattiin toistomittausten varianssianalyysi-testillä. Jos merkitseviä muutoksia havaittiin, selvitettiin minkä mittauspisteiden välillä merkitsevät muutokset olivat käyttämällä Bonferroni-testiä. Mahdolliset korrelaatiot kortikospinaalisen ärsytettävyyden (MEP) ja inhibition (SP) sekä maksimivoiman (MVC) ja nopeusvoiman (RFD) välillä testattiin käyttämällä normaalijakautuneelle datalle Pearsonin korrelaatio -testiä ja ei-normaalijakautuneelle datalle Spearmanin korrelaatio -testiä. Tilastollisen merkitsevyyden rajana oli  $p < 0,05$  ja tilastollisesti erittäin merkitsevän tuloksen rajana  $p < 0,01$ .

## 9 TULOKSET

Tutkimuksessa käytetyissä muuttujissa oli havaittavissa, että sisäkorrelaatiokerroin (ICC) oli matalin 120 % AMT ja 160 % AMT stimulusintensiteeteillä mitatuilla SP:n kestoilla. Kaikilla muilla muuttujilla sisäkorrelaatiokerroin oli yli 0,5 (taulukko 9). Variaatiokerroin (CV%) oli selvästi matalin MVC:llä (4,2 %) sekä 140 % AMT stimulusintensiteetillä mitatulla SP:n kestolla (6,8 %) ja muilla muuttujilla lähempänä kymmentä tai sen yli (taulukko 9).

TAULUKKO 9. Eri muuttujien sisäkorrelaatiokerroin (ICC) ja variaatiokerroin (CV%) laskettuna kontrollimitauksista 1 ja 2.

	ICC	CV%
<b>MEP120% AMT</b>	0,700	15,4
<b>MEP140% AMT</b>	0,793	10,9
<b>MEP160% AMT</b>	0,657	13,6
<b>SP120%AMT</b>	0,403	9,6
<b>SP140%AMT</b>	0,742	6,8
<b>SP160%AMT</b>	0,297	14,4
<b>MVC</b>	0,947	4,2
<b>RFD50ms</b>	0,867	15,0
<b>RFD75ms</b>	0,891	11,6
<b>RFD100ms</b>	0,897	9,7

CV%= Coefficient of variance, ICC= intraclass correlation

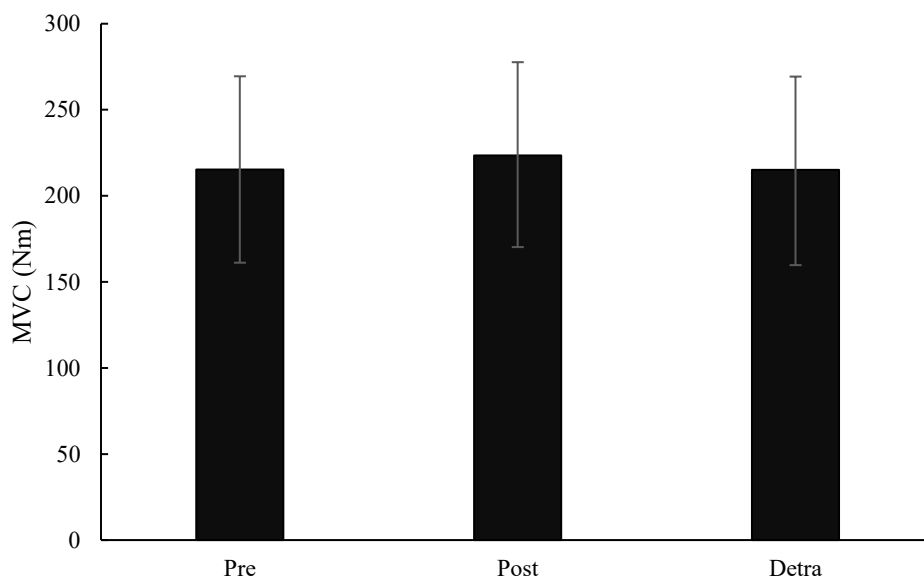
Maksimaalisessa M-aallossa tai aktiivisessa motorisessa kynnyksessä ei ollut havaittavissa tilastollisesti merkitseviä muutoksia ( $p > 0,05$ ) tutkimuksen aikana (taulukko 10).

TAULUKKO 10. Maksimaalinen M-aalto (Mmax) sekä aktiivinen motorinen kynnyks (AMT) pre-, post- ja detra-mittauksissa.

	Pre	Post	Detra
<b>Mmax</b>	2,5±0,7	2,4±0,7	2,5±0,6
<b>AMT</b>	33±4,99	30±4,09	31±4,81

## 9.1 Maksimaalinen tahdonalainen supistus (MVC)

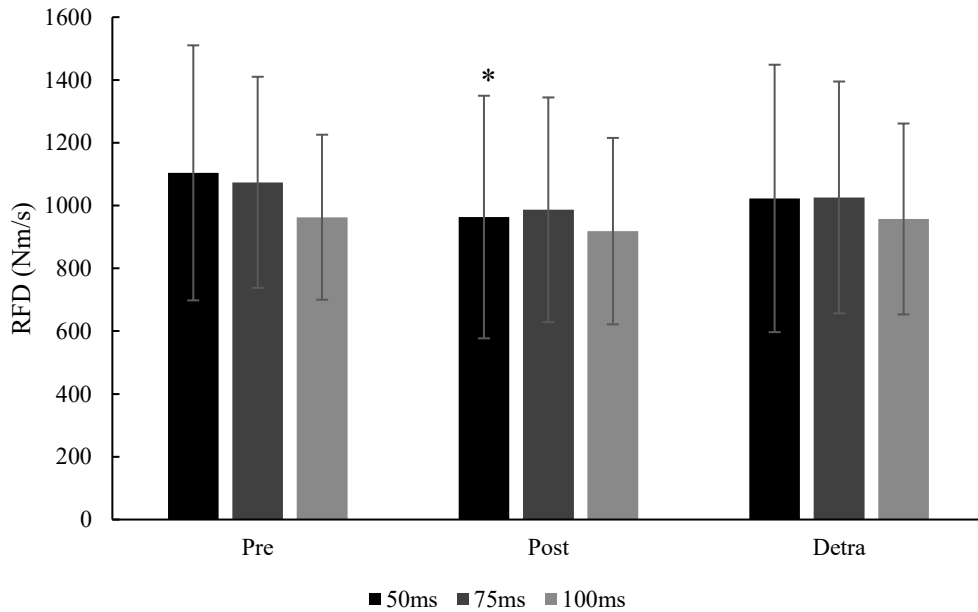
Maksimivoimassa, jota mitattiin MVC:n avulla, oli nähtävissä vähäistä kasvua pre- ja post-mittausten välillä (harjoitusjakso), sekä vähäistä pienentymistä post- ja detra-mittausten välillä (harjoitustauko). Muutokset eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkitseviä (kuvio 1).



KUVIO 1. MVC:n (maximal voluntary contraction) keskiarvo ja keskihajonta pre-, post- ja detra-mittauksissa (n=13). Yksikään muutoksista ei merkitsevä ( $p > 0,05$ ).

## 9.2 Voimantuottonopeus (RFD)

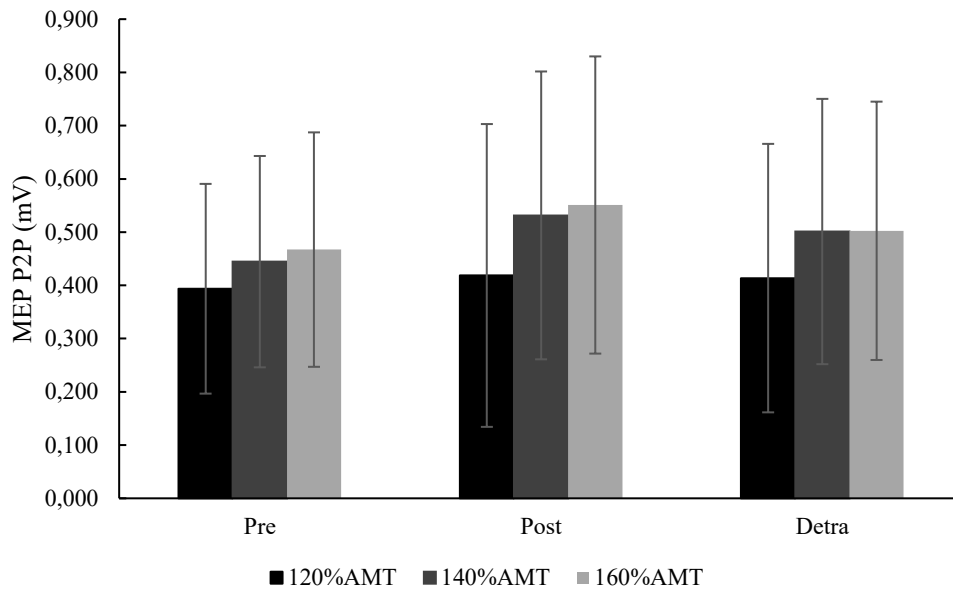
RFD:ssä oli tutkimuksen aikana havaittavissa yksi tilastollisesti merkitsevä muutos harjoitusjakson jälkeen (kuvio 2). RFD 50 ms kohdalla heikentyi pre- ja post-mittausten välillä ( $p < 0,05$ ). Muutokset post- ja detra-mittausten välillä eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkitseviä missään RFD:n vaiheista (0–50 ms, 0–75 ms, 0–100 ms).



KUVIO 2. RFD:n (rate of force development) keskiarvo ja keskihajonta 0–50 ms, 0–75 ms ja 0–100 ms välillä pre-, post- ja detra-mittauksissa (n=14). \* p<0,05 pre- ja post-mittausten välillä

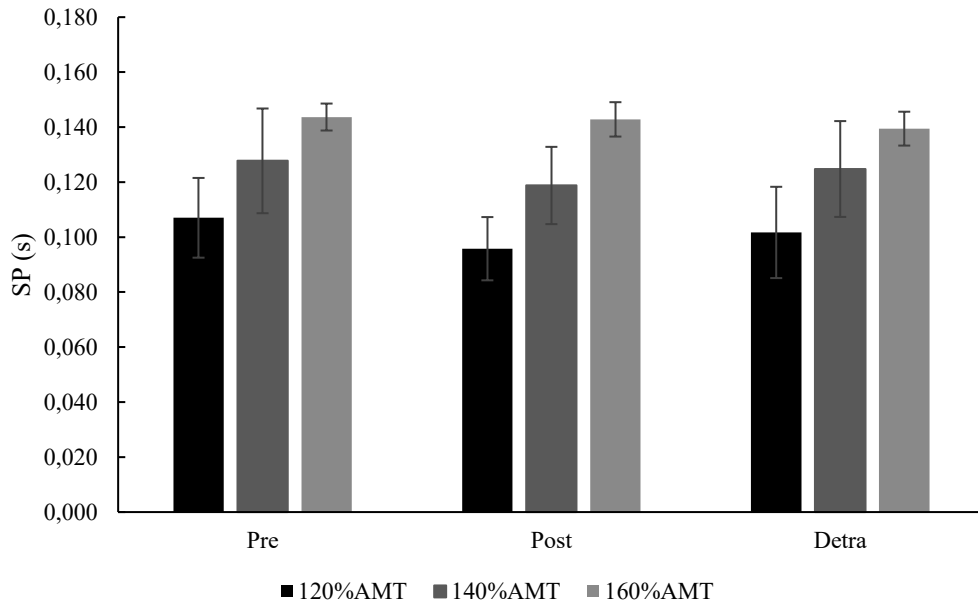
### 9.3 Kortikospinaalisen radan toiminta

Kortikospinaalisen radan ärsytettävyyttä tutkittiin tutkimuksessa siis MEP-amplitudin peak-to-peak:n (MEP P2P) muutosten kautta. MEP-amplitudin havaittiin parantuvan hiukan pre- ja post-mittausten välillä kaikilla stimulusintensiteeteillä, mutta yksikään havaituista muutoksista ei ollut tilastollisesti merkitsevää (kuvio 3). Myöskään post- ja detra-mittausten välillä havaitut MEP-amplitudin heikentymiset eivät olleet tilastollisesti merkitseviä millään stimulusintensiteeteistä (kuvio 3).



KUVIO 3. MEP-amplitudin (motor evoked potential) keskiarvo sekä keskihajonta pre-, post- ja detra-mittauksissa 120 %, 140 % ja 160 % AMT stimulusintensiteeteillä (n=11). Yksikään muutoksista ei merkitsevää ( $p>0,05$ ).

SP:n keston avulla mitatussa kortikospinaalisessa inhibitiossa oli myös kortikospinaalisen ärsytettävyyden tavoin havaittavissa pieniä muutoksia tutkimuksen aikana, mutta yksikään näistä muutoksista ei ollut tilastollisesti merkitsevää (kuviot 4). SP:n keston havaittiin lyhentyvän vähän pre- ja post-mittausten välillä kaikilla stimulusintensiteeteillä, mutta mikään havaituista muutoksista ei ollut tilastollisesti merkitsevää. Post- ja detra-mittausten välillä SP:n keston havaittiin kasvavan vähän 120 % AMT ja 140 % AMT stimulusintensiteeteillä ja lyhentyvän vähän 160 % AMT stimulusintensiteetillä, mutta myöskään näissä tapauksissa yksikään muutoksista ei ollut tilastollisesti merkitsevää.



KUVIO 4. SP:n (silent period) keston keskiarvo sekä keskihajonta pre-, post- ja detra-mittauksissa 120 %, 140 % ja 160 % AMT stimulusintensiteeteillä (n=11). Yksikään muutoksista ei merkitsevää ( $p>0,05$ ).

#### 9.4 Muutosten väliset yhteydet

Kortikospinaalisen radan toiminnan, sekä maksimi- ja nopeusvoiman muutosten lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin myös näiden muuttujien muutosten välisiä yhteyksiä. Pre- ja post-mittausten välillä MEP:ssä ja MVC:ssä tapahtuneiden muutosten välillä ei ollut havaittavissa tilastollisesti merkitsevää korrelaatiota millään stimulusintensiteeteistä (taulukko 11). Myöskään SP:n muutosten ja MVC:n muutosten välillä ei ollut havaittavissa merkitsevää korrelaatiota millään stimulusintensiteeteistä (taulukko 11).



TAULUKKO 11. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden (MEP) ja inhibition (SP) muutosten sekä MVC:n muutosten korrelaatio pre- ja post-mittausten välillä. (n=11)

MVC		
	<b>r</b>	<b>p</b>
<b>MEP120%</b>	0,546	0,082
<b>MEP140%</b>	0,238	0,48
<b>MEP160%</b>	0,073	0,832
<b>SP120%</b>	0,14	0,681
<b>SP140%</b>	0,324	0,331
<b>SP160%</b>	0,118	0,729

Yksikään korrelaatioista ei merkitsevää ( $p > 0,05$ )

Samoin myös post- ja detra-mittausten välillä tapahtuneissa muutoksissa oli havaittavissa vain vähän yhteyksiä (taulukko 12). MEP:n muutosten ja MVC:n muutosten välillä oli havaittavissa yksi tilastollisesti merkitsevä positiivinen korrelaatio 120 % AMT stimulusintensiteetillä. SP:n muutosten ja MVC:n muutosten välillä sen sijaan ei ollut havaittavissa yhtään merkitsevää korrelaatiota millään stimulusintensiteetistä.

TAULUKKO 12. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden (MEP) ja inhibition (SP) muutosten sekä MVC:n muutosten korrelaatio post- ja detra-mittausten välillä. (n=11)

MVC		
	<b>r</b>	<b>p</b>
<b>MEP120%</b>	0,636*	0,035
<b>MEP140%</b>	0,215	0,526
<b>MEP160%</b>	0,140	0,682
<b>SP120%</b>	-0,006	0,987
<b>SP140%</b>	-0,003	0,994
<b>SP160%</b>	-0,173	0,612

\*  $p < 0,05$

Kortikospinaalisen radan toiminnan ja maksimivoiman muutosten tavoin myös kortikospinaalisen radan toiminnan ja nopeusvoiman muutosten välillä oli havaittavissa vain vähän yhteyksiä. Pre- ja post-mittausten välillä ilmenneiden MEP:n muutosten ja RFD:n

muutosten välillä ei ollut havaittavissa tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita (taulukko 13). SP:n muutosten ja RFD:n muutosten kohdalla sen sijaan oli havaittavissa joitain tilastollisesti merkitseviä positiivisia korrelaatioita (taulukko 13). Harjoitusjakson myötä ilmennyt RFD:n heikentyminen 0–50 ms ja 0–75 ms ajanjaksolla oli positiivisesti yhteydessä 120 % AMT stimulusintensiteetillä mitattuun SP:n keston lyhenemiseen eli inhibition vähenemiseen. Tämän lisäksi myös 140 % AMT stimulusintensiteetillä mitatun SP:n keston lyheneminen oli positiivisesti yhteydessä RFD:n heikentymiseen 0–75 ms ja 0–100 ms ajanjaksolla.

TAULUKKO 13. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden (MEP) ja inhibition (SP) muutosten sekä RFD:n muutosten korrelaatiot pre- ja post-mittausten välillä. (n=10)

	RFD50ms		RFD75ms		RFD100ms	
	r	p	r	p	r	p
MEP120%	0,099	0,787	0,230	0,523	0,180	0,619
MEP140%	0,135	0,711	0,270	0,451	0,258	0,471
MEP160%	-0,366	0,298	-0,194	0,590	-0,174	0,632
SP120%	0,750*	0,012	0,656*	0,040	0,567	0,087
SP140%	0,629	0,051	0,727*	0,017	0,642*	0,045
SP160%	0,285	0,425	0,370	0,293	0,273	0,446

\* p<0,05

Myöskään post- ja detra-mittausten välillä ilmenneiden MEP:n ja SP:n muutosten sekä RFD:n muutosten välillä ei ollut havaittavissa tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita (taulukko 14).

TAULUKKO 14. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden (MEP) ja inhibition (SP) muutosten sekä RFD:n muutosten korrelaatiot post- ja detra-mittausten välillä (n=10).

	RFD50ms		RFD75ms		RFD100ms	
	r	p	r	p	r	p
MEP120%	0,033	0,927	-0,109	0,765	-0,079	0,828
MEP140%	0,258	0,472	0,079	0,829	0,052	0,886
MEP160%	0,062	0,865	-0,056	0,878	-0,065	0,858
SP120%	0,170	0,639	0,156	0,667	-0,057	0,875
SP140%	0,179	0,620	0,421	0,226	0,210	0,561
SP160%	-0,079	0,829	-0,042	0,907	-0,127	0,726

Yksikään korrelaatioista ei merkitsevää (p>0,05)

## 10 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella kortikospinaalisen radan toiminnan muutoksia harjoitusjakson ja harjoitustauon myötä sekä näiden muutosten yhteyttä mahdollisiin muutoksiin voimantuotossa. Tutkimuksen merkittävimmät löydökset olivat yksilötasolla havaitut yhteydet kortikospinaalisen ärsytettävyyden ja inhibition sekä voimantuoton muutosten välillä. Harjoitustauon jälkeen joillain yksilöillä ilmennyt kortikospinaalisen ärsytettävyyden lasku oli yhteydessä laskeneeseen maksimivoimaan, mikä todistaa kortikospinaalisten muutosten olevan mahdollisesti merkittävässä roolissa harjoitustauon myötä ilmenevissä voimantuoton muutoksissa. Tämän lisäksi joillain yksilöillä kortikospinaalisen inhibition vähentymisen havaittiin olevan yhteydessä laskeneeseen nopeusvoimaan voimaharjoittelun jälkeen. Tämä antaa vahvistusta sille, että aihetta tulisi tutkia lisää, sillä kyseinen havainto oli hypoteesin vastainen, minkä lisäksi aiempi tutkimustieto aiheesta on ristiriitaista. Kortikospinaalisen radan toiminnassa tarkasteltiin ärsytettävyyttä MEP-amplitudin muutosten ja inhibitiota SP:n muutosten kautta. Maksimivoiman ja nopeusvoiman muutoksia taas tarkasteltiin isometrisessä polvenojennuksessa mitattavan MVC:n sekä RFD:n kautta.

Tutkimuksessa hypoteesina oli, että voimaharjoitteluintervention myötä kortikospinaalisen radan toiminnassa olisi havaittavissa muutoksia. Aiempiin tutkimuksiin perustuen kortikospinaalisen ärsytettävyyden oletettiin parantuvan (Beck ym. 2007; Griffin & Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020; Tallent ym. 2017) ja kortikospinaalisen inhibition odotettiin laskevan (Christie & Kamen 2014; Kidgell ym. 2010; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012; Leung ym. 2017; Mason ym. 2020; Ridding ym. 1995; Weier ym. 2012). Tämän lisäksi hypoteesina oli, että voimaharjoitteluintervention myötä voimantuotossa olisi havaittavissa parannuksia maksimivoimassa (Aagaard ym. 2002; Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Latella ym. 2012; Peltonen ym. 2018b) ja nopeusvoimassa (Aagaard ym. 2002; Alegre ym. 2006; Grgic & Grgic 2022; Peltonen ym. 2018b) ja että kyseiset parannukset olisivat yhteydessä kortikospinaalisen radan toiminnan muutoksiin, eli kortikospinaalisen radan ärsytettävyyden kasvamiseen (Griffin & Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020) ja inhibition

vähentymiseen (Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012; Mason ym. 2020).

Voimaharjoittelun vaikutusten lisäksi tutkimuksen kohteena olivat myös harjoitustauon vaikutukset kortikospinaalisen radan toimintaan sekä voimantuottoon. Hypoteesina oli, että harjoitustauon myötä kortikospinaalinen ärsytettävyyden laski (Andersen ym. 2005; Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 1985; Häkkinen & Komi 1983; Tallent ym. 2017), mutta kortikospinaalinen inhibitio pysyisi muuttumattomana (Tallent ym. 2017). Tämän lisäksi hypoteesina oli, että harjoitustauon myötä maksimivoima laski (Andersen ym. 2005; Colliander & Tesch 1992; Granacher ym. 2011; Houston ym. 1983; Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Sakugawa ym. 2019), mutta nopeusvoimassa ei olisi havaittavissa muutoksia (Granacher ym. 2011; Grgic & Grgic 2022; Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Sakugawa ym. 2019), vaikka tutkimustieto harjoitustauon vaikutuksista nopeusvoimaan onkin ristiriitaista. Harjoitustauon myötä tapahtuvan maksimivoiman laskun uskottiin myös olevan yhteydessä mahdolliseen kortikospinaalisen radan ärsytettävyyden laskuun, koska kortikospinaalisen radan toiminnan muutosten on todettu olevan yksi osatekijä myös maksimivoiman parantumisessa (Aagaard ym. 2002; Alegre ym. 2006; Christie & Kamen 2014; Grgic & Grgic 2022; Houston ym. 1983; Häkkinen & Komi 1983; Peltonen ym. 2018b).

### **10.1 Voimaharjoitteluintervention vaikutukset**

Tutkimuksen tuloksena oli, ettei merkitseviä kortikospinaalisen radan muutoksia tapahtunut voimaharjoitteluintervention myötä eli tulokset olivat hypoteesin vastaisia. Kortikospinaalinen ärsytettävyyden parani pre- ja post mittauksen välillä kaikilla stimulusintensiteeteillä mitattuna, mutta yksikään muutoksista ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Vaikka voimaharjoittelun on monissa tutkimuksissa havaittu saavan aikaan kortikospinaalisen ärsytettävyyden parantumista (Beck ym. 2007; Griffin & Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020; Tallent ym. 2017), huomioitavaa kuitenkin on, että myös tämän tutkimuksen kanssa vastaavia tuloksia on saatu muissa tutkimuksissa (Carrol ym. 2002; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012).

Kortikospinaalisen ärsytettävyyden tavoin myöskään kortikospinaalisessa inhibitiossa ei ollut havaittavissa merkitseviä muutoksia, vaikka inhibitiossa olikin havaittavissa vähentymistä voimaharjoitteluintervention aikana. Tulokset olivat siis hypoteesin vastaisia myös kortikospinaalisen inhibition kohdalla. Kortikospinaalisen inhibition on havaittu laskevan voimaharjoittelun myötä monissa tutkimuksissa (Christie & Kamen 2014; Kidgell & Pearce 2010; Latella ym. 2012; Leung ym. 2017; Mason ym. 2020; Ridding ym. 1995; Weier ym. 2012), mutta jälleen myös tämän tutkimuksen kanssa samansuuntaisia tuloksia saaneita tutkimuksia on (Kidgell ym. 2011).

Mahdollisia syitä sille, miksi tässä tutkimuksessa kortikospinaalisessa radassa ei ollut havaittavissa muutoksia voimaharjoittelun myötä on monia. Yksi mahdollisesti vaikuttava tekijä on intervention aikainen voimaharjoittelu. Voimaharjoittelun kestolla on todettu olevan merkittävä vaikutus siihen, millaisia adaptaatioita hermostossa on nähtävissä (Dayan & Cohen 2011). Tässä tutkimuksessa voimaharjoittelun kesto oli yhteensä seitsemän viikkoa, jonka aikana harjoituksia tuli yhteensä 13. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden parantumista sekä kortikospinaalisen inhibition vähentymistä on kuitenkin havaittu tutkimuksissa jo alle neljän viikon voimaharjoittelun jälkeen (Mason ym. 2020), minkä vuoksi voidaan päätellä, että voimaharjoittelun keston olisi pitänyt olla riittävä adaptaatioiden ilmenemiselle.

Vaikka voimaharjoittelun kesto ei todennäköisesti siis ollutkaan syy siihen, miksi kortikospinaalisen radan toiminnassa ei havaittu merkitseviä muutoksia, on voimaharjoittelun laadulla voinut olla vaikutusta tuloksiin. Etenkin riittävän suurten harjoittelukuormien käyttämisen on todettu olevan merkittävässä roolissa kortikospinaalisen ärsytettävyyden parantumiselle (Kidgell ym. 2010). Tutkimuksessa harjoituskuormat laskettiin 1 RM ja 3–5 RM testien perusteella, mutta etenkin harjoitusintervention alussa osa tutkittavista ei ole välttämättä saanut tehtyä testeissä todellista maksimiaan kokemattomuuden vuoksi. Kokemuksen puute on voinut vaikuttaa muun muassa siihen, kuinka suuria kuormia he uskaltavat yrittää dynaamisissa maksimivoimatesteissä ja kuinka hyvin he ovat saaneet itsestään irti maksimivoimatesteissä ylipäänsä. Tämän takia harjoittelussa käytetyt kuormat ovat voineet olla aluksi liian pieniä, sillä kuormat on laskettu maksimeista, jotka eivät ole välttämättä vastanneet tutkittavien todellista maksimivoiman tasoa. Liian pienien kuormien käyttäminen on siis voinut mahdollisesti

osaltaan vaikuttaa siihen, miksi kortikospinaalisen radan toiminnassa ei ollut havaittavissa voimaharjoitteluintervention jälkeen juurikaan muutosta.

Kortikospinaalisen radan muuttujien (MEP ja SP) tuloksiin on voinut vaikuttaa myös itse mittaukset, kortikaalisten ja spinaalisen motoneuronien ärsytettävyyden luonnollinen vaihtelu sekä tutkittavan palautumisen ja vireyden tila (Rossini ym. 2015; Groppa ym. 2012; Venter 2012). Luonnollisen vaihtelun lisäksi myös yksilöllisyydellä on voinut olla vaikutusta tuloksiin. Esimerkiksi kortikospinaalisen ärsytettävyyden tuloksissa oli havaittavissa suuria vaihteluita keskihajonnassa pre- ja post-mittausten välillä niin 120 % AMT ( $1,0 \pm 33,5$  %), 140 % AMT ( $22,3 \pm 40,3$  %) kuin 160 % AMT stimulusintensiteetilläkin ( $29,8 \pm 58,1$  %). Tutkittavien mittauksia edeltäneiden päivien kuormittavuutta tai unen määrää ei tutkimuksessa seurattu, joten tutkittavien hermostollisessa väsymyksessä ja yleisessä vireystilassa on myös voinut olla mittauksissa hyvin suuriakin eroja, minkä vaikutusta tuloksiin ei näin ollen voida poissulkea.

TMS-mittaukset myös kestivät itsessään suhteellisen kauan (1–1,5 h) mikä on saattanut aiheuttaa hermostollista väsymystä. Hermostollinen väsymys on voinut saada aikaan tahdonalaisen supistumisen heikentymistä muun muassa motoristen yksiköiden syttymistäajuuden heikentymisen kautta sekä vaikeuttamalla korkeamman ärsytyskynnyksen omaavien motoristen yksiköiden syttymistä (Venter ym. 2012). Tämän lisäksi on myös huomioitava, että MEP-amplitudi sekä SP:n kesto mitattiin aina samoilla yhdeksällä eri mittausasetelmalla (120, 140 ja 160 % AMT stimulusintensiteetit sekä lepo, 20 % ja 60 % MVC:stä voimatasot), jotka suoritettiin satunnaistetussa järjestyksessä. Näin ollen 20 % MVC:stä tehdyt suoritukset on osassa mittauksia suoritettu ennen muita mittausasetelmia ja toisissa taas vasta muiden mittausasetelmien jälkeen. Tällä on mahdollisesti voinut olla vaikutusta tuloksiin, sillä tutkittavalla on saattanut olla jonkin asteista hermostollista väsymystä, jos hän on suorittanut jo muut mittausasetelmat ennen 20 % MVC:stä tehtäviä suorituksia. MEP-amplitudin ja SP:n keston mittauksiin on todettu olevan vaikutusta myös mittaustilanteissa olevilla taustäänillä (Rossini ym. 2015; Groppa ym. 2012), mutta tässä tutkimuksessa mittaustilanteissa ei ollut taustääniiä.

Yllä mainittujen tekijöiden lisäksi tuloksiin on todennäköisesti vaikuttanut merkittävästi itse mittausmenetelmä. Käytetty mittausmenetelmä ei välttämättä ollut tarpeeksi sensitiivinen havaitsemaan muutoksia MEP-amplitudissa tai SP:n kestossa. Muun muassa Kidgell ym. (2011) toi esiin tutkimuksessaan, että yksipulssinen TMS ei välttämättä aina onnistu huomioimaan muutoksia intrakortikaalisessa inhibitiossa, mikä voisi myös mahdollisesti selittää, miksei muutoksia ollut havaittavissa tässäkin tutkimuksessa. Tutkimusten mukaan myös stimulusintensiteetillä eli kuinka lähellä aktiivista motorista kynnystä ollaan, on myös vaikutusta tuloksiin ja osassa tutkimuksia MEP-amplitudissa on havaittu voimaharjoittelun myötä enemmän muutoksia aktiivisen motorisen kynnyksen kohdalla kuin sen yläpuolella (Kidgell ym. 2010). Mahdollisesti tässäkin tutkimuksessa olisi siis voinut olla havaittavissa merkitseviä muutoksia MEP-amplitudissa aktiivisen motorisen kynnyksen kohdalla, vaikka muutoksia ei ollutkaan havaittavissa aktiivisen motorisen kynnyksen yläpuolella. MEP-amplitudia ei kuitenkaan tutkimuksessa mitattu aktiivisen motorisen kynnyksen kohdalla.

Mittausmenetelmän lisäksi tutkittavien määrä on todennäköisesti vaikuttanut tulosten merkitsevyyteen. MEP-amplitudin ja SP:n keston muutoksia voitiin tarkastella tutkimuksessa vain 11 tutkittavalta, minkä takia otoskoko jäi suhteellisen pieneksi. Otskoon lisäksi on huomioitava, että tutkimuksessa miesten ja naisten tuloksia on tarkasteltu yhtenä ryhmänä, millä on voinut olla vaikutusta tuloksiin, sillä naiset ja miehet eroavat kortikospinaalisen radan toiminnan adaptoitumisessa tutkimusten mukaan jonkin verran toisistaan (Latella ym. 2018; Pitcher ym. 2003).

Maksimivoimassa oli havaittavissa jonkin verran kasvua voimaharjoitteluintervention jälkeen mutta tapahtunut muutos ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Tulos oli siis hypoteesin vastainen. MVC:n tavoin myös RFD:ssä oli havaittavissa muutoksia voimaharjoitteluintervention myötä, mutta muutokset olivat tilastollisesti merkitseviä vain 0–50 ms ajanjaksolla. Poikkeuksellista oli myös se, että parantumisen sijaan RFD heikkeni voimaharjoittelun myötä. Tulokset olivat siis myös RFD:n kohdalla hypoteesin vastaisia. Tuloksia tarkastellessa on kuitenkin huomioitava jälleen pieni otoskoko (MVC n=13, RFD n=14), joka on voinut vaikuttaa tulosten merkitsevyyteen.

Vaikka suurimmassa osassa tutkimuksia voimaharjoittelun on havaittu aikaan saavan nopeusvoiman parantumista, on joissain tutkimuksissa kuitenkin saatu myös tämän tutkimuksen kanssa vastaavia tuloksia. Häkkinen ym. (1985) ja Häkkinen ym. (1998) tutkimuksissa voimaharjoittelulla ei ollut vaikutusta alun vaiheen RFD:hen. Oliveira ym. (2013) tutkimuksessa voimaharjoittelu taas sai aikaan RFD:n parantumista vain 20 ms asti, mutta muutoksia ei ollut havaittavissa 20–250 ms välillä. Voimaharjoittelun RFD:ssä aikaan saamissa muutoksissa on siis havaittavissa paljon vaihtelua eri tutkimusten välillä, riippuen osittain muun muassa mitatusta RFD:n vaiheesta. Yksi mahdollisesti tuloksia selittävä tekijä saattaa olla mitattu RFD:n vaihe. Tässä tutkimuksessa RFD:tä tarkasteltiin vain 0–100 ms ajalta, mutta joissain tutkimuksissa on esitetty, että RFD:n alkuvaiheeseen vaikuttaisivat etenkin hermostollisen ohjauksen (Gruber ym. 2004) sekä motoristen yksiköiden toiminnan kuten syttymistiheyden muutokset (Maffioletti ym. 2016), kun taas myöhäisemmän vaiheeseen näiden lisäksi etenkin lihasten (Sueatta ym. 2004) ja jänteiden morfologiset muutokset (Bojsen-Moller ym. 2005). Hermostollisten adaptaatioiden vähäisyys voisi siis selittää, miksi RFD:ssä ei tässä tutkimuksessa ollut havaittavissa parantumista vaan jopa vähenemistä, sillä RFD mitattiin juuri alkuvaiheen ajalta (0–100 ms). Tämän lisäksi raskaammilla kuormilla tehtävän voimaharjoittelun, jota tässä tutkimuksessa tehtiin, on todettu parantavan juurikin RFD:n myöhäisempää vaihetta (Maffioletti ym. 2016). Positiivisia muutoksia olisi siis ehkä voinut olla havaittavissa RFD:n myöhäisemmässä vaiheessa, mutta kyseistä vaihetta ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu, kuten ei lihasten ja jänteiden morfologisia muutoksiakaan.

Lihasten morfologisilla muutokset, kuten lihassäikeiden pituuksien sekä lihassolujen pennaatiokulmien muutokset suhteessa käytettyyn mittaustapaan voivatkin osaltaan selittää saatuja tuloksia. Kyseiset muutokset voivat muuttaa vääntömomentti-nivelkulma suhdetta, millä taas voi olla positiivinen tai negatiivinen vaikutus RFD:hen riippuen siitä, millaisilla nivelkulmilla RFD:tä mitataan. (Blazevich ym. 2009; Drake ym. 2019; Seynnes ym. 2007) Näin ollen harjoittelun ja mittausten lihastyötavan ja nivelkulmien eroaminen voisi selittää, miksi voimaharjoittelun myötä RFD:ssä oli havaittavissa heikentymistä ja MVC:ssä ei ollut havaittavissa muutoksia (Blazevich ym. 2002; Oliveira ym. 2013). Voimaharjoittelu suoritettiin tutkimuksessa dynaamisesti mutta maksimivoiman (MVC) ja nopeusvoiman (RFD) mittausta isometrisesti. Dynaamisessa voimaharjoittelussa tutkittavat ovat muun muassa kyenneet hyödyntämään venymis-lyhenemissyklusta, jolla on merkittävä vaikutus voimantuottoon



(Stone & O'Bryant 1987, Stone ym. 2007, Bompa & Haff 2009, 263 mukaan), toisin kuin isometrisissä voimamittauksissa. Huomioitavaa myös on, että RFD-mittauksista saatavien tulosten on havaittu vaihtelevan yksilöiden välillä tutkimuksissa suhteellisen paljon (Peltonen ym. 2018a). Voimaharjoittelun myötä voimantuottonopeus on siis voinut myös parantua, mutta muutoksen havaitseminen olisi vaatinut erilaista mittausmenetelmää, joka olisi vastannut paremmin tehtyä voimaharjoittelua (Andersen ym. 2010).

Luonnollisesti voimantuoton muutoksiin on saattanut olla vaikutusta samoilla tekijöillä kuin kortikospinaalisen radan toiminnankin kohdalla, eli muun muassa voimaharjoittelun laadulla ja kestolla. Kuten aiemmin mainittiin, on hyvin voinut olla mahdollista, että etenkin harjoitusjakson alkupuolella käytetyt kuormat ovat olleet liian pieniä adaptaatioiden aikaansaamiseksi. Tämän lisäksi myös aiemmin mainitun tutkittavien kokemattomuuden vuoksi harjoitusliikkeiden oppiminen on voinut viedä aikaa, millä taas on voinut olla vaikutusta harjoittelun laatuun etenkin harjoitusjakson alkupuolella ja näin ollen myös tuloksiin.

Huomioitavaa myös on, että MVC:n kohdalla käytettiin koko viikon parasta tulosta, mikä lisää mittauksen luotettavuutta sillä maksimivoiman muutoksia on näin ollen seurattu tarkemmin. Nopeusvoimamittauksia eli RFD:n seuranta tehtiin taas vain kerran viikossa, minkä vuoksi kyseisessä muuttujassa havaitut muutokset eivät välttämättä ole yhtä luotettavia muun muassa aiemmin mainitun mahdollisen päiväkohtaisen hermostollisen väsymyksen vuoksi, jolla on voinut olla tuloksia heikentävä vaikutus (Knowles ym. 2018). Itse mittaustilanteista aiheutuvalla väsymyksellä ei todennäköisesti ole ollut vaikutusta voimamittauksista saatuihin tuloksiin, sillä MVC- ja RFD-mittaukset tehtiin aina mittauskertojen alussa. Tutkittavien palautumisen ja vireyden tilaa ei tutkimuksessa kuitenkaan seurattu ja heikko palautuminen ja tästä johtuva hermostollinen väsymys voisikin selittää, miksi MVC:ssä ei ollut havaittavissa parannusta ja miksi RFD 0–50 ms ajalta heikentyi (Knowles ym. 2018; Venter ym. 2012). Mittauksissa saatuihin tuloksiin on voinut myös vaikuttaa tutkittavien motivaatio maksimaalisten suoritusten tekemiseen, mikä on voinut vaihdella, vaikka mittauskerroilla heidän motivaatiotaan pyrittiinkin lisäämään kannustuksella.

Voimaharjoittelun aikaansaamissa adaptaatioissa on aina myös huomioitava yksilöllisyyden merkitys. Tutkimuksessa käytetty harjoitteluohjelma oli kaikilla tutkittavilla sama, mutta aikaansaadut vasteet ovat voineet yksilöllisten tekijöiden, kuten geeniperimän takia vaihdella. Etenkin nopeusvoimassa ja voimaharjoittelun siinä aikaan saamissa muutoksissa on todettu olevan merkittävää yksilöiden välistä vaihtelua (Tillin ym. 2010), ja huomioitavaa onkin, että muun muassa tutkittavien harjoittelutaustoissa oli huomattavia eroja, vaikkakin päästäkseen tutkimukseen tutkittavien tuli täyttää tietyt kriteerit.

Tuloksia tarkastellessa ei voida myöskään poissulkea ravitsemuksen vaikutusta tuloksiin, jota ei tutkittavilta tutkimuksessa seurattu. Voimaharjoittelussa ravitsemuksella on suuri vaikutus harjoituksen aikaansaamiin adaptaatioihin sekä myös itse harjoitteluun ja palautumiseen (McArdle ym. 2015, 80, 102–103). Huono ruokavalio ja riittämätön energiansaanti voivat siis osaltaan mahdollisesti selittää, miksi voimantuotossa ei ollut havaittavissa merkitseviä parannuksia voimaharjoitteluintervention jälkeen.

## **10.2 Adaptaatioiden väliset yhteydet voimaharjoitteluintervention jälkeen**

Kortikospinaalisen radan toiminnan muutosten sekä maksimivoiman muutosten välillä ei ollut havaittavissa tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita, eli tulokset olivat hypoteesin vastaisia. Vastaavanlaisia tuloksia, joissa kortikospinaalisen ärsytettävyyden ja maksimivoiman välillä ei ole havaittu yhteyttä voimaharjoittelun myötä, on kuitenkin saatu myös joissain muissa tutkimuksissa (Jensen ym. 2005). Selviä syitä korrelaatioiden vähäisyydelle ei ole selvillä, mutta tämän tutkimuksen kohdalla tuloksiin on todennäköisesti vaikuttanut muun muassa pieni otoskoko. Kortikospinaalisen radan toiminnan ja maksimivoiman muutosten korrelaatioita voitiin tarkastella tutkimuksessa vain 11 tutkittavalta. Myös kortikospinaalisen radan toiminnan tutkimisessa käytetyllä mittausmenetelmällä on voinut olla vaikutusta, sillä jos mittausmenetelmä ei ole ollut tarpeeksi sensitiivinen havaitsemaan mahdollisesti ilmenneitä muutoksia, on tällä luonnollisestikin voinut olla vaikutusta myös siihen miksi MEP:n ja SP:n sekä MVC:n muutosten välillä ei ollut havaittavissa merkitseviä korrelaatioita.

Toisin kuin maksimivoiman kohdalla, nopeusvoiman muutosten ja kortikospinaalisen radan toiminnan muutosten väillä oli yksilötasolla havaittavissa joitain tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita. Kortikospinaalisen inhibition sekä RFD:n muutosten välillä oli havaittavissa positiivinen korrelaatio 120 % AMT stimulusintensiteetillä mitatun SP:n keston sekä RFD 0–50 ms ( $r$  0,750,  $p$  0,012) ja RFD 0–75 ms ( $r$  0,656,  $p$  0,040) kohdalla. Kyseinen korrelaatio oli kuitenkin myös hypoteesien vastainen, sillä oletuksena oli, että kortikospinaalisen inhibition vähentyminen saisi aikaan RFD:n parantumisen, mutta tässä tutkimuksessa SP:n keston lyhentymisen olikin joillain yksilöillä yhteydessä RFD:n heikentymiseen. Samankaltainen hypoteesien vastainen korrelaatio oli yksilötasolla havaittavissa myös 140 % AMT stimulusintensiteetillä mitatun SP:n keston sekä RFD 0–75 ms ( $r$  0,727,  $p$  0,017) ja RFD 0–100 ms ( $r$  0,642,  $p$  0,045) kohdalla. Korrelaatioita tarkastellessa on kuitenkin huomioitava, että otoskoolla on voinut olla vaikutusta tuloksiin, sillä tutkittavia, joilta korrelaatioita voitiin tarkastella, oli vain 10.

Vaikka tulokset kortikospinaalisen inhibition ja RFD:n muutosten yhteyksien välillä olivatkin hypoteesin vastaisia, on huomioitava, ettei inhibition merkitys motoriselle suoritukseen ole aina yksiselitteinen. Inhibition on todettu olevan merkittävässä roolissa liikkeenhallinnassa, minkä vuoksi inhibitiolla ei suinkaan aina ole negatiivinen vaikutus motoriseen suoritukseen (Beck ym. 2007). Tämän tutkimuksen tulosten mukaan vähentynyt kortikospinaalinen inhibitio saattaa siis vaikuttaa negatiivisesti voimantuotonopeuteen, minkä myötä herää kysymys voisiko kasvanut inhibitio siis myös saada aikaan parannuksia voimantuotonopeudessa, mahdollisesti juuri aiemmin mainitun tarkemman motorisen kontrollin ja vähäisemmän ei-toivottujen ärsykkeiden määrän kautta (Beck ym. 2007; McArdle ym. 2015, 396). Kortikospinaalisen inhibition ja nopeusvoiman yhteyksiä tulisikin tutkia tulevaisuudessa lisää, jotta kyseisten muuttujien vaikutuksia toisiinsa voitaisiin ymmärtää paremmin. Tällä hetkellä aihetta on tutkittu suhteellisen vähän.

### **10.3 Harjoitustauon vaikutukset**

Harjoitustauon on useissa tutkimuksissa havaittu aikaansaavan kortikospinaalisen ärsytettävyyden vähentymistä (Häkkinen ym. 1985; Häkkinen & Komi 1983; Tallent ym.

2017), mutta tässä tutkimuksessa MEP-amplitudilla mitattuna kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä ei ollut havaittavissa merkitseviä muutoksia. Tulokset olivat siis hypoteesin vastaisia. Harjoitustauon vaikutuksista hermo-lihasjärjestelmään näyttäisi tutkimusten mukaan vaikuttavan eniten harjoitustauon pituus. Lyhyemmällä harjoitustauolla ei näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta voimantuottoon (Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Tallent ym. 2017) ja maksimi- ja nopeusvoiman onkin todettu säilyvän suhteellisen hyvin 3–4 viikon harjoitustauon aikana (Bosquet ym. 2013; Houston ym. 1983; Shaver 1975). Ottaen huomioon, että hermo-lihasjärjestelmässä harjoitustauon myötä tapahtuvat adaptaatiot tapahtuvat samassa järjestyksessä kuin harjoittelunkin myötä, eli aluksi tapahtuvat hermostolliset muutokset ja sitten vasta morfologiset (Bosquet ym. 2013; Häkkinen ym. 1983; Häkkinen ym. 2000), ei merkittäviä hermostollisia muutoksia välttämättä siis vielä tapahdu lyhyemmän harjoitustauon aikana.

Toisaalta on myös vastakkaisia tuloksia saaneita tutkimuksia, joissa muun muassa kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä on havaittu muutoksia jo kahden viikon harjoittelemattomuuden jälkeen (Tallent ym. 2007). Harjoitustauon vaikutuksia tutkineiden tutkimusten tuloksissa on siis havaittavissa jonkin verran ristiriitaisuutta. Tässä tutkimuksessa harjoitustauko kesti kuitenkin viisi viikkoa, eli tutkimusten mukaan kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä olisi pitänyt olla havaittavissa muutoksia. Huomioitavaa kuitenkin on, että harjoitustauon keston lisäksi vaikutusta on myös harjoitustaukoa edeltäneen harjoittelun kestolla ja laadulla (Bosquet ym. 2013; Houston ym. 1983; Shaver 1975). Muun muassa pidempään jatkuneen harjoittelun on todettu saavan aikaan pidempi kestoisia adaptaatioita (Bosquet ym. 2013). Tässä tutkimuksessa harjoitusjakso kesti yhteensä seitsemän viikkoa, jonka aikana oli yhteensä 13 harjoituskertaa. Tällä ei tutkimuksessa kuitenkaan havaittu olevan merkitsevää vaikutusta kortikospinaaliseen ärsytettävyyteen, mikä voi myös osaltaan selittää, miksei merkitseviä muutoksia ollut havaittavissa myöskään harjoitustauon aikana. Tuloksissa oli myös havaittavissa suuria keskihajontoja kaikilla stimulusintensiteeteillä, mistä voidaan päätellä tuloksissa olleen vaihtelua eri tutkittavien välillä. Tämä taas voi johtua muun muassa päiväkohtaisesta kortikaalisten ja spinaalisen motoneuronien ärsytettävyyden vaihtelusta (Rossini ym. 2015; Groppa ym. 2012) sekä yksilöllisyyden merkityksestä kortikospinaalisen radan toiminnan muutoksissa.

Toisin kuin kortikospinaalisen ärsytettävyyden kohdalla, kortikospinaalisen inhibition ei uskottu juurikaan muuttuvan harjoitustauon myötä. Tässä kohtaa tutkimuksen tulokset olivat siis hypoteesin mukaisia, sillä merkitsevää muutosta SP:n keston avulla mitatussa kortikospinaalisessa inhibitiossa ei ollut havaittavissa viiden viikon harjoitustauon jälkeen. Koska kortikospinaalisen inhibition mekanismit eivät ole vielä täysin selvillä, eikä harjoitustauon vaikutuksia kortikospinaaliseen inhibitioon ole tutkittu paljoa, on johtopäätösten tekeminen hankalaa. Mahdollisesti viiden viikon harjoitustauko ei vielä välttämättä saa aikaan muutoksia inhibitorisissa mekanismeissa, kuten inhiboivien välittäjäaineiden GABA:n ja glysiinin (McArdle ym. 2015, 396) toiminnassa. Huomioitavaa kuitenkin on, että aihetta voidaan tässä tutkimuksessa vain spekuloida ja tutkimuksia aiheesta tarvittaisiin lisää. Tämän lisäksi samoin kuin pre- ja post-mittausten välisten muutosten kohdalla, on post- ja detra-mittausten välillä tapahtuneiden muutosten vähäisyyteen voinut vaikuttaa mittausmenetelmä, joka ei välttämättä ollut tarpeeksi herkkä havaitsemaan muutoksia kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä tai inhibitiossa sekä aiemmin mainittu eri mittausasetelmien järjestyksen vaihtuminen mittausten välillä. Jos post-mittauksissa 20 % MVC:stä voimatasolla tehdyt mittaukset on tehty muiden mittausasetelmien jälkeen ja detra-mittauksissa taas toisinpäin, voi tällä olla ollut vaikutusta tuloksiin.

Maksimivoimassa oli havaittavissa vähäistä pienentymistä harjoitustauon aikana, mutta tapahtunut muutos ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Ottaen huomioon, että harjoitusintervention myötä MVC:ssä ei myöskään ollut havaittavissa merkitseviä parannuksia, voidaan harjoitustauon aikana ilmenneiden muutosten vähäisyyden uskoa liittyvän siihen, ettei kehitystä ollut juurikaan tullut voimaharjoitteluintervention aikana. Koska adaptaatioiden määrä oli mahdollisesti riittämättömän voimaharjoittelun myötä vähäinen, ei näin ollen myöskään voimaharjoittelun lopettaminen saanut aikaan suuria muutoksia. Tuloksia tarkastellessa on kuitenkin huomioitava, etteivät muutokset olleet tilastollisesti merkitseviä pre- ja post- tai post- ja detra-mittausten välillä.

RFD:ssä oli havaittavissa vähäistä parantumista 0–50, 0–75 ja 0–100 ms ajanjaksoilla harjoitustauon myötä, mutta yksikään näistä muutoksista ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Mahdollinen voimantuottonopeuden parantuminen (vaikkei tilastollisesti merkitsevä), on voinut johtua esimerkiksi vähemmästä hermostollisesta väsymyksestä harjoitustauon myötä,

jolla on todettu olevan positiivinen vaikutus nopeusvoimaan (Cormie ym. 2011). Todennäköisesti mittausmenetelmällä on kuitenkin ollut myös tässä kohtaa merkittävä vaikutus ilmenneille tuloksille, koska kuten aiemmin mainittiin, on muun muassa RFD:llä saatavien tulosten havaittu vaihtelevan paljon yksilöiden välillä (Peltonen ym. 2018a). Tuloksia tarkastellessa on myös huomioitava pieni otoskoko ja sen vaikutus tuloksiin niin kortikospinaalisen radan toiminnan (n=11) kuin voimantuoton (MVC n= 13, RFD n=14) muutostenkin kohdalla.

#### **10.4 Adaptaatioiden väliset yhteydet harjoitustauon jälkeen**

Kortikospinaalisen radan toiminnan muutosten sekä maksimivoiman muutosten välillä oli havaittavissa hyvin vähän tilastollisesti merkitseviä yhteyksiä harjoitustauon jälkeen. Muuttujien välillä oli yksilötasolla havaittavissa yksi positiivinen korrelaatio, 120 % AMT stimulusintensiteetillä mitatun MEP-amplitudin ja MVC:n välillä ( $r$  0,636,  $p$  0,035). Kyseinen korrelaatio oli siis hypoteesien mukainen, sillä kortikospinaalisen ärsytettävyyden vähenemisen uskottiin vaikuttavan heikentävästi maksimivoimaan muun muassa sen vuoksi, että kortikospinaalisen ärsytettävyyden parantumisen on todettu olevan yhteydessä parantuneeseen maksimivoimaan (Griffin & Cafarelli 2007; Kidgell ym. 2010; Kidgell ym. 2011; Mason ym. 2020) ja näin ollen sen uskottiin olevan yhteydessä myös maksimivoiman heikentymiseen harjoitustauon jälkeen. Aiheesta ei kuitenkaan ole juurikaan aiempaa tutkimustietoa eli kyseinen havainto on merkittävä, sillä se osoittaa kortikospinaalisten muutosten olevan mahdollisesti merkittävässä roolissa harjoitustauon myötä ilmenevissä voimantuoton muutoksissa. Kortikospinaalisen ärsytettävyyden lasku kertoo motoristen yksiköiden rekrytaation, synkronisaation ja syttymisfrekvenssin muutoksista (Cormie ym. 2011), minkä vuoksi sen laskulla on myös maksimivoimaan negatiivinen vaikutus. On kuitenkin huomioitava, että MEP-amplitudissa sekä MVC:ssä havaitut muutokset olivat itsessään hyvin pieniä.

Kortikospinaalisen radan toiminnan muutosten sekä nopeusvoiman muutosten välillä ei ollut havaittavissa lainkaan tilastollisesti merkitseviä yhteyksiä, toisin kuin harjoitusjakson jälkeen. Tutkimustulokset olivat siis hypoteesien vastaisia, minkä lisäksi tuloksissa oli nopeusvoiman

kohdalla havaittavissa ristiriitaisuuksia. Toisaalta kuten aiemmin mainittiin, on aiempikin tutkimustieto harjoittelun ja harjoitustauon vaikutuksista nopeusvoimaan ristiriitaista. Osassa tutkimuksia nopeusvoiman on havaittu heikentyvän harjoitustauon myötä (Bosquet ym. 2013), mutta on myös tutkimuksia, joissa tämän tutkimuksen tavoin harjoitustauon ei ole havaittu saavan aikaan merkitseviä muutoksia nopeusvoimassa (Granacher ym. 2011; Grgic & Grgic 2022; Hortobágyi ym. 1993; Häkkinen ym. 2000; Sakugawa ym. 2019). Huomioitavaa kuitenkin on, että samoin kuin voimaharjoitteluintervention jälkeisten adaptaatioiden välisten yhteyksien kohdalla, on pieni otoskoko ( $n=10-11$ ) ja itse mittausmenetelmät voineet vaikuttaa myös harjoitustauon jälkeisten korrelaatioiden vähäisyyteen. Aihetta tulisikin tutkia lisää, kortikospinaalisen radan toiminnan sekä voimantuoton muutosten välisten yhteyksien ymmärtämiseksi paremmin.

## **10.5 Tutkimuksen vahvuudet ja heikkoudet**

Tutkimuksen vahvuuksiin kuului muun muassa se, että tutkittavina oli sekä miehiä että naisia, vaikka toisaalta pienen otoskoon vuoksi tämä oli myös tutkimuksen heikkous. Tutkimalla sekä miehiä että naisia saatiin kattavampi kuva voimaharjoittelun vaikutuksista voimantuottoon ja kortikospinaalisen radan muutoksiin, mutta suurempi otoskoko olisi mahdollistanut sukupuolten erottelun kahteen ryhmään, jolloin olisi voitu vertailla myös sukupuolten välisiä eroja. Nyt tutkimuksen otoskoko ( $n=15$ ) oli niin pieni, ettei sukupuolten välinen vertailu ollut mahdollista, minkä lisäksi kaikkien muuttujien kohdalla kaikilta tutkittavilta saatu data ei ollut käyttökelpoista, jolloin otoskoko jäi joidenkin muuttujien ja korrelaatioiden kohdalla tätäkin pienemmäksi ( $n=10-14$ ).

Toinen vahvuuksista oli mittaus- ja harjoittelutilanteiden vakioiminen. Kaikki mittaukset pyrittiin suorittamaan läpi tutkimuksen aina samaan aikaan päivästä ja samana viikonpäivänä. Tämän lisäksi mittausprotokolla suoritettiin aina samalla tavalla ja mittaukset tehtiin samassa järjestyksessä, lukuun ottamatta TMS-mittausten osaa, jossa yhdeksän erilaista mittausasetelmaa (eri stimulaation vahvuus sekä voimantuotontaso) suoritettiin satunnaistetussa järjestyksessä. Mittauksissa käytetyn isometrisen polvenojennuspenkin säädöt

oli myös vakioitu jokaiselle tutkittavalle, minkä lisäksi mittausten ohjeistus sekä kannustus pysyi samana läpi tutkimuksen.

Mittaustilanteiden lisäksi myös harjoittelutilanteet oli vakioitu ja harjoittelua oli aina seuraamassa tutkija, joka varmisti harjoitusohjelman oikeaoppisen suorittamisen ja oikeaoppisten tekniikoiden käyttämisen eri liikkeissä. Tämän lisäksi myös harjoittelupaikka ja harjoitusaika pysyi samana läpi tutkimuksen. Tutkittaville annettiin myös ohjeistukset tutkimuksen ulkopuolella tapahtuvaan harjoitteluun eli esimerkiksi siihen kuinka paljon ja millaista liikuntaa tutkimuksen ulkopuolella oli sallittavaa tehdä.

Pienen otoskoon lisäksi tutkimuksessa esiin noussut heikkous oli harjoitusohjelmassa käytetty harjoituskuormien laskukaava. Tutkimuksen edetessä käytetty kaava osoittautui tarkemmaksi harjoitusohjelmaan kuuluvien moninivelliikkeiden kohdalla kuin mitä se oli yhden nivelen liikkeissä. Tämän vuoksi jokaisella harjoituskerralla ja jokaisella harjoitusjaksolla käytetyt suhteelliset harjoitusintensiteetit eivät olleet aina sellaisia kuin piti.

Myös tutkimuksessa käytettyihin mittausmenetelmiin liittyi jonkin verran heikkouksia. Tutkimuksessa EMG-elektrodien paikat vakioitiin merkitsemällä elektrodien paikat permanenttitussilla ja tutkittavia ohjeistettiin vahvistamaan tehtyjä merkkejä mittausten välillä. Joissain tapauksissa tutkittavat olivat kuitenkin unohtaneet vahvistaa tehtyjä merkkejä, minkä vuoksi oikeat paikat jouduttiin määrittämään uudestaan. Nivusiin tulevien elektrodien paikkaa ei myöskään voitu merkata, vaan paikka tuli määrittää jokaisella mittauskerralla aina uudestaan. Nivusiin laitettavien elektrodien paikassa on siis voinut olla jonkin verran vaihtelua, vaikka paikka määritettiinkin aina samalla tavalla (palpoimalla pulssi oikeasta nivusesta, sillä oletuksella että perifeerinen reisihermo kulkee samansuuntaisesti reisivaltimon kanssa). Myöskään hotspot kohtaa ei pystytty vakioimaan merkkäämällä mittauskertojen välillä, vaan kohta piti määrittää joka mittauskerralla uudestaan. Vaikka paikan etsinnässä olikin aina sama protokolla käytössä, on paikka voinut vaihdella jonkin verran eri mittausten välillä.

Mittausmenetelmien lisäksi tutkimuksen heikkousiin kuuluu myös se, että tuloksia analysoi useampi henkilö, jolloin tuloksiin on mahdollisesti voinut vaikuttaa myös tulosten



analysoinnissa tutkijoiden välillä ilmenneet erot. Tuloksia analysoi 3–5 henkilöä ja esimerkiksi SP:n loppumisen analysoinnissa EMG-käyrästä tutkijan subjektiivisella näkemyksellä on saattanut olla jonkin verran vaikutusta tuloksiin. Mahdollisiin eroihin pyrittiin kuitenkin vaikuttamaan sillä, että analysoituja tuloksia ja näkemuseroja joidenkin SP:n loppumisesta käytiin läpi myös kaikkien tutkijoiden kanssa yhdessä. Tämän lisäksi analysoinnin ohjeistukset olivatkin kaikilla samat. Tulosten analysoinnin subjektiivisuutta pyrittiin myös vähentämään mittaamalla SP:n kesto aina stimulaatiosta SP:n loppuun, eikä MEP:n lopusta SP:n loppuun, jolloin analysoijan näkemys MEP:n loppumiskohdasta ei vaikuttanut tuloksiin. Kuten aiemmin mainittiin, on palautumisen tasolla ja ravitsemuksella voinut olla vaikutusta tuloksiin, mutta kumpaakaan ei tutkimuksessa seurattu, mikä on myös yksi tutkimuksen heikkouksista.

## 10.6 Yhteenveto

Seitsemän viikon voimaharjoittelulla ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta maksimivoimaan tai kortikospinaaliseen ärsytettävyyteen tai inhibitioon. Voimaharjoittelun havaittiin kuitenkin vaikuttavan heikentävästi RFD:n alkuosaan (0–50 ms). Tämän lisäksi yksilötasolla kortikospinaalisen inhibition laskun todettiin olevan yhteydessä RFD:n heikentymiseen.

Mahdollisia syitä sille, miksi kortikospinaalisen radan toiminnassa tai voimantuotossa ei ollut havaittavissa parantumista voimaharjoittelun jälkeen, ovat muun muassa voimaharjoittelun riittämättömyys adaptaatioiden aikaansaamiseksi sekä itse mittausmenetelmät. Kortikospinaalisen radan toiminnan tutkimisessa käytetty menetelmä ei välttämättä ollut tarpeeksi sensitiivinen muutosten havaitsemiseen, minkä lisäksi voimantuoton muutoksia tutkittiin isometrisesti, vaikka itse harjoittelu suoritettiin dynaamisesti, millä on voinut olla vaikutusta tuloksiin.

Viiden viikon harjoitustauolla ei myöskään havaittu olevan tilastollisesti merkitsevää vaikutusta maksimi- tai nopeusvoimaan, eikä kortikospinaaliseen ärsytettävyyteen tai inhibitioon. Harjoitustauon myötä ilmenneissä muutoksissa havaittiin kuitenkin yksilötasolla yhteys kortikospinaalisen ärsytettävyyden laskun ja maksimivoiman laskun välillä. Kyseinen

tulos on merkittävä, sillä aiheesta ei ole juurikaan tutkimustietoa ja havainto osoittaa, että kortikospinaalisen radan toiminnan muutoksilla on mahdollisesti vaikutusta harjoitustauon myötä maksimivoimassa ilmeneviin muutoksiin. Samoin kuin voimaharjoittelun jälkeisten tulosten kohdalla, myös harjoitustauon myötä saatujen tulosten kohdalla on kuitenkin huomioitava mittausmenetelmien merkitys tuloksille.

Suurimmilta osin tutkimuksessa saadut tulokset olivat siis ristiriidassa aiemman tutkimustiedon kanssa. Tämän lisäksi etenkin nopeusvoiman ja kortikospinaalisen radan toiminnan muutosten välisiä yhteyksiä on tutkittu aiemminkin vain vähän, samoin kuin harjoitustauon vaikutuksia kortikospinaalisen radan toimintaan. Tämän vuoksi aiheesta tarvittaisiinkin lisää tutkimuksia. Tutkimusta olisi hyvä tehdä suuremmalla otoskoollla, sekä niin että naiset ja miehet jaettaisiin erillisiin ryhmiin, jotta myös sukupuolten välisiä eroja voitaisiin tarkastella. Tämän lisäksi kortikospinaalisen radan toiminnan muutoksia voitaisiin tarkastella myös aktiivisen motorisen kynnyksen kohdalla, mahdollisten adaptaatioiden tarkemmaksi havaitsemiseksi. Voimaharjoittelun ja maksimi- sekä nopeusvoiman mittaaminen tulisi myös suorittaa samalla lihastyötavalla ja nivelkulmilla, jotta mahdollisia muutoksia voitaisiin havaita paremmin.

## **10.7 Käytännön sovellutukset**

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että harjoittelussa spesifisyys on tärkeää myös harjoittelemattomien kohdalla, etenkin kun tarkoituksena on parantaa nopeusvoimaa. Tutkimuksen kannalta tämän tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä, että suoritettavan voimaharjoittelun ja mittausmenetelmien tulisi vastata mahdollisimman hyvin toisiaan lihastyötavaltaan sekä nivelkulmiltaan, mahdollisten adaptaatioiden havaitsemiseksi voimantuotossa. Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan myös todeta, ettei viisi viikkoa kestäväällä harjoitustauolla ole välttämättä heikentävää vaikutusta maksimi- tai nopeusvoimaan, jos voimaharjoittelusta joutuu pitämään taukoa esimerkiksi loukkaantumisen tai sairastumisen vuoksi. Viiden viikon harjoitustauolla ei myöskään näyttäisi välttämättä olevan vielä merkittäviä vaikutuksia kortikospinaalisen radan toimintaan. Tutkimuksia aiheesta tarvittaisiin kuitenkin lisää, sillä tämän tutkimuksen mukaan myöskään seitsemän viikon voimaharjoittelu ei vaikuttaisi merkittävästi kortikospinaalisen radan toimintaan. Tutkimuksia tarvittaisiin lisää

myös etenkin kortikospinaalisen inhibition ja nopeusvoiman muutosten yhteyksistä, sillä tämän tutkimuksen perusteella muun muassa inhibition vähentyminen ei välttämättä saa aikaan nopeusvoiman parantumista, vaan jopa päinvastoin.

## LÄHTEET

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002). Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *Journal of applied physiology*, 93(4), 1318-1326.
- Ah Sen, C. B., Fassett, H. J., El-Sayes, J., Turco, C. V., Hameer, M. M., & Nelson, A. J. (2017). Active and resting motor threshold are efficiently obtained with adaptive threshold hunting. *PLoS One*, 12(10), e0186007.
- Ahtiainen, J. P., Pakarinen, A., Alen, M., Kraemer, W. J., & Häkkinen, K. (2003). Muscle hypertrophy, hormonal adaptations and strength development during strength training in strength-trained and untrained men. *European journal of applied physiology*, 89(6), 555-563.
- Alegre, L. M., Jiménez, F., Gonzalo-Orden, J. M., Martín-Acero, R., & Aguado, X. (2006). Effects of dynamic resistance training on fascicle length and isometric strength. *Journal of sports sciences*, 24(05), 501-508.
- Andersen, L. L., Andersen, J. L., Magnusson, S. P., & Aagaard, P. (2005). Neuromuscular adaptations to detraining following resistance training in previously untrained subjects. *European journal of applied physiology*, 93(5), 511-518.
- Andersen, L. L., & Aagaard, P. (2006). Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *European journal of applied physiology*, 96(1), 46-52.
- Andersen, L. L., Andersen, J. L., Zebis, M. K., & Aagaard, P. (2010). Early and late rate of force development: differential adaptive responses to resistance training? *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 20(1), e162-e169.
- Asci, A., & Açıkkada, C. (2007). Power production among different sports with similar maximum strength. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(1), 10-16.
- Babault, N., Pousson, M., Michaut, A., & Van Hoecke, J. (2003). Effect of quadriceps femoris muscle length on neural activation during isometric and concentric contractions. *Journal of applied physiology*, 94(3), 983-990.
- Blazevich, A. J., Gill, N., & Newton, R. U. (2002). Reliability and validity of two isometric squat tests. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 16(2), 298-304.

- Bellumori, M., Jaric, S., & Knight, C. A. (2011). The rate of force development scaling factor (RFD-SF): protocol, reliability, and muscle comparisons. *Experimental brain research*, 212(3), 359-369.
- Beck, S., Taube, W., Gruber, M., Amtage, F., Gollhofer, A., & Schubert, M. (2007). Task-specific changes in motor evoked potentials of lower limb muscles after different training interventions. *Brain research*, 1179, 51-60.
- Bestmann, S., & Krakauer, J. W. (2015). The uses and interpretations of the motor-evoked potential for understanding behaviour. *Experimental brain research*, 233(3), 679-689.
- Blazevich, A. J., Cannavan, D., Horne, S., Coleman, D. R., & Aagaard, P. (2009). Changes in muscle force-length properties affect the early rise of force in vivo. *Muscle & nerve*, 39(4), 512-520.
- Bojsen-Møller, J., Magnusson, S. P., Rasmussen, L. R., Kjaer, M., & Aagaard, P. (2005). Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *Journal of applied physiology*, 99(3), 986-994.
- Bompa, T. O. & Haff, G. G. 2009. *Periodization: Theory and Methodology of training*. 5. painos. Champaign, IL: Human Kinetics Publishers
- Bosquet, L., Berryman, N., Dupuy, O., Mekary, S., Arvisais, D., Bherer, L., & Mujika, I. (2013). Effect of training cessation on muscular performance: A meta-analysis. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 23(3), e140-e149.
- Buckthorpe, M. W., Hannah, R., Pain, T. G., & Folland, J. P. (2012). Reliability of neuromuscular measurements during explosive isometric contractions, with special reference to electromyography normalization techniques. *Muscle & nerve*, 46(4), 566-576.
- Burke, D. & Pierrot-Deseilligny, E. (2010). Caveats when studying motor cortex excitability and the cortical control of movement using transcranial magnetic stimulation. *Clinical Neurophysiology*, 2(121), 121-123.
- Carroll, T. J., Riek, S., & Carson, R. G. (2001). Reliability of the input-output properties of the cortico-spinal pathway obtained from transcranial magnetic and electrical stimulation. *Journal of neuroscience methods*, 112(2), 193-202.
- Carroll, T. J., Riek, S. & Carson, R. G. (2002). The sites of neural adaptation induced by resistance training in humans. *The Journal of physiology*, 544(2), 641-652.

- Carroll, T. J., Barton, J., Hsu, M., & Lee, M. (2009). The effect of strength training on the force of twitches evoked by corticospinal stimulation in humans. *Acta physiologica*, 197(2), 161-173.
- Clark, B. C., Manini, T. M., Bolanowski, S. J., & Ploutz-Snyder, L. L. (2006). Adaptations in human neuromuscular function following prolonged unweighting: II. Neurological properties and motor imagery efficacy. *Journal of applied physiology*, 101(1), 264-272.
- Chen, R., Lozano, A. M., & Ashby, P. (1999). Mechanism of the silent period following transcranial magnetic stimulation evidence from epidural recordings. *Experimental brain research*, 128(4), 539-542.
- Christie, A., & Kamen, G. (2014). Cortical inhibition is reduced following short-term training in young and older adults. *Age*, 36(2), 749-758.
- Colliander, E. B., & Tesch, P. A. (1992). Effects of detraining following short term resistance training on eccentric and concentric muscle strength. *Acta Physiologica Scandinavica*, 144(1), 23-29.
- Cornie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2011). Developing maximal neuromuscular power. *Sports medicine*, 41(1), 17-38.
- Cossich, V., & Maffiuletti, N. A. (2020). Early vs. late rate of torque development: Relation with maximal strength and influencing factors. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 55, 102486.
- Crone, C., Hultborn, H., Mazieres, L., Morin, C., Nielsen, J. & Pierrot-Deseilligny, E. (1990). Sensitivity of monosynaptic test reflexes to facilitation and inhibition as a function of the test reflex size: a study in man and the cat. *Exp Brain Res* 81:35–45
- Dai, W., Pi, Y. L., Ni, Z., Tan, X. Y., Zhang, J., & Wu, Y. (2016). Maintenance of balance between motor cortical excitation and inhibition after long-term training. *Neuroscience*, 336, 114-122.
- Dayan, E., & Cohen, L. G. (2011). Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron*, 72(3), 443-454.
- De Beaumont, L., Theoret, H., Mongeon, D., Messier, J., Leclerc, S., Tremblay, S., ... & Lussier, M. (2009). Brain function decline in healthy retired athletes who sustained their last sports concussion in early adulthood. *Brain*, 132(3), 695-708.
- De Luca, C. J. (1997). The use of surface electromyography in biomechanics. *Journal of applied biomechanics*, 13(2), 135-163.

- De Ruiter, C. J., Kooistra, R. D., Paalman, M. I., & De Haan, A. (2004). Initial phase of maximal voluntary and electrically stimulated knee extension torque development at different knee angles. *Journal of Applied Physiology*, 97(5), 1693-1701.
- De Ruiter, C. J., Vermeulen, G., Toussaint, H. M., & De Haan, A. (2007). Isometric knee-extensor torque development and jump height in volleyball players. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(8), 1336-1346.
- De Ruiter, C. J., Hutter, V., Icke, C., Groen, B., Gemmink, A., Smilde, H., & De Haan, A. (2012). The effects of imagery training on fast isometric knee extensor torque development. *Journal of sports sciences*, 30(2), 166-174.
- Devanne, H., Lavoie, B. A., & Capaday, C. (1997). Input-output properties and gain changes in the human corticospinal pathway. *Experimental brain research*, 114(2), 329-338.
- Duchateau, J., Semmler, J. G., & Enoka, R. M. (2006). Training adaptations in the behavior of human motor units. *Journal of applied physiology*, 101(6), 1766-1775.
- English, A. W., & Wolf, S. L. (1982). The motor unit: Anatomy and physiology. *Physical Therapy*, 62(12), 1763-1772.
- Farina, D., & Holobar, A. (2016). Characterization of human motor units from surface EMG decomposition. *Proceedings of the IEEE*, 104(2), 353-373.
- Folland, J. P., Buckthorpe, M. W., & Hannah, R. (2014). Human capacity for explosive force production: neural and contractile determinants. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 24(6), 894-906.
- Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). Morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports medicine*, 37(2), 145-168.
- Granacher, U., Muehlbauer, T., Doerflinger, B., Strohmeier, R., & Gollhofer, A. (2011). Promoting strength and balance in adolescents during physical education: effects of a short-term resistance training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(4), 940-949.
- Grgic, J., & Grgic, I. (2022). Resistance Training–Induced Gains in Rate of Force Development Are Maintained During Training Cessation: A Meta-Analysis. *Strength & Conditioning Journal*, 10-1519.
- Griffin, L., & Cafarelli, E. (2007). Transcranial magnetic stimulation during resistance training of the tibialis anterior muscle. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 17(4), 446-452.

- Groppa, S., Oliviero, A., Eisen, A., Quartarone, A., Cohen, L. G., Mall, V., ... & Siebner, H. R. (2012). A practical guide to diagnostic transcranial magnetic stimulation: report of an IFCN committee. *Clinical Neurophysiology*, 123(5), 858-882.
- Gruber, M., & Gollhofer, A. (2004). Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *European journal of applied physiology*, 92(1), 98-105.
- Haff, G. G. & Nimphius, S. 2012. Training principles for power. *Strength & Conditioning Journal*, 34(6), 2-12.
- Hallett, M. (2000). Transcranial magnetic stimulation and the human brain. *Nature*, 406(6792), 147-150.
- Hallett, M. (2007). Transcranial magnetic stimulation: a primer. *Neuron*, 55(2), 187-199.
- Harris, G. R., Stone, M. H., O'bryant, H. S., Proulx, C. M. & Johnson, R. L. 2000. Short-term performance effects of high power, high force, or combined weight-training methods. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 14(1), 14-20.
- Hernández-Davó, J. L., & Sabido, R. (2014). Rate of force development: reliability, improvements and influence on performance. A review. *European Journal of Human Movement*, 33, 46-69.
- Hess, C. W., Mills, K. R. & Murray, N. M. (1987). Responses in small hand muscles from magnetic stimulation of the human brain. *The Journal of physiology*, 388(1), 397-419.
- Hess, G., & Donoghue, J. P. (1994). Long-term potentiation of horizontal connections provides a mechanism to reorganize cortical motor maps. *Journal of neurophysiology*, 71(6), 2543-2547.
- Hodson-Tole, E. F., & Wakeling, J. M. (2009). Motor unit recruitment for dynamic tasks: current understanding and future directions. *Journal of Comparative Physiology B*, 179(1), 57-66.
- Hortobágyi, T., Richardson, S. P., Lomarev, M., Shamim, E., Meunier, S., Russman, H., Dang, N. & Hallett, M. (2009). Chronic low-frequency rTMS of primary motor cortex diminishes exercise training-induced gains in maximal voluntary force in humans. *Journal of Applied Physiology*, 106(2), 403-411.
- Hortobágyi, T. I. B. O. R., Houmard, J. A., Stevenson, J. R., Fraser, D. D., Johns, R. A., & Israel, R. G. (1993). The effects of detraining on power athletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 25(8), 929-935.



- Hortobágyi, T., Katch, F. I., & LaChance, P. F. (1989). Interrelationships among various measures of upper body strength assessed by different contraction modes. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 58(7), 749-755.
- Houston, M. E., Froese, E. A., Valeriote, S. P., Green, H. J., & Ranney, D. A. (1983). Muscle performance, morphology and metabolic capacity during strength training and detraining: a one leg model. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 51(1), 25-35.
- Häkkinen, K., Alen, M., Kallinen, M., Newton, R. U., & Kraemer, W. J. (2000). Neuromuscular adaptation during prolonged strength training, detraining and re-strength-training in middle-aged and elderly people. *European journal of applied physiology*, 83(1), 51-62.
- Häkkinen, K., Alen, M., & Komi, P. V. (1985). Changes in isometric force-and relaxation-time, electromyographic and muscle fibre characteristics of human skeletal muscle during strength training and detraining. *Acta physiologica scandinavica*, 125(4), 573-585.
- Häkkinen, K. & Komi, P. V. (1983). Electromyographic changes during strength training and detraining. *Medicine and science in sports and exercise*, 15(6), 455-460.
- Häkkinen, K., Newton, R. U., Gordon, S. E., McCormick, M. R., Volek, J., Nindl, B. C., ... & Kraemer, W. J. (1998). Changes in muscle morphology, electromyographic activity, and force production during periodized strength training in young and old men. *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci*, 53, 415-423.
- Jensen, J. L., Marstrand, P. C., & Nielsen, J. B. (2005). Motor skill training and strength training are associated with different plastic changes in the central nervous system. *Journal of applied physiology*, 99(4), 1558-1568.
- Kidgell, D. J. & Pearce, A. J. (2010). Corticospinal properties following short-term strength training of an intrinsic hand muscle. *Human movement science*, 29(5), 631-641.
- Kidgell, D. J., Stokes, M. A., Castricum, T. J., & Pearce, A. J. (2010). Neurophysiological responses after short-term strength training of the biceps brachii muscle. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(11), 3123-3132.
- Kidgell, D. J., Stokes, M. A., & Pearce, A. J. (2011). Strength training of one limb increases corticomotor excitability projecting to the contralateral homologous limb. *Motor control*, 15(2), 247-266.
- Kidgell, D. J., Frazer, A. K., Rantalainen, T., Ruotsalainen, I., Ahtiainen, J., Avela, J., & Howatson, G. (2015). Increased cross-education of muscle strength and reduced

- corticospinal inhibition following eccentric strength training. *Neuroscience*, 300, 566-575.
- Kistemaker, D. A., Van Soest, A. J. K., Wong, J. D., Kurtzer, I., & Gribble, P. L. (2013). Control of position and movement is simplified by combined muscle spindle and Golgi tendon organ feedback. *Journal of neurophysiology*, 109(4), 1126-1139.
- Knowles, O. E., Drinkwater, E. J., Urwin, C. S., Lamon, S., & Aisbett, B. (2018). Inadequate sleep and muscle strength: Implications for resistance training. *Journal of science and medicine in sport*, 21(9), 959-968.
- Kraemer, W. J. & Ratamess, N. A. (2004). Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Medicine & science in sports & exercise*, 36(4), 674-688.
- Latella, C., Hendy, A., Vanderwesthuizen, D., & Teo, W. P. (2018). The modulation of corticospinal excitability and inhibition following acute resistance exercise in males and females. *European journal of sport science*, 18(7), 984-993.
- Latella, C., Kidgell, D. J., & Pearce, A. J. (2012). Reduction in corticospinal inhibition in the trained and untrained limb following unilateral leg strength training. *European journal of applied physiology*, 112(8), 3097-3107.
- Lazzaro, V. D., Restuccia, D., Oliviero, A., Profice, P., Ferrara, L., Insola, A., Mazzone, P., Tonali, P. & Rothwell, J. (1998). Effects of voluntary contraction on descending volleys evoked by transcranial stimulation in conscious humans. *The Journal of physiology*, 508(2), 625-633.
- Leung, M., Rantalainen, T., Teo, W. P., & Kidgell, D. (2017). The corticospinal responses of metronome-paced, but not self-paced strength training are similar to motor skill training. *European journal of applied physiology*, 117(12), 2479-2492.
- Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N., & Duchateau, J. (2016). Rate of force development: physiological and methodological considerations. *European journal of applied physiology*, 116(6), 1091-1116.
- Mason, J., Frazer, A. K., Avela, J., Pearce, A. J., Howatson, G., & Kidgell, D. J. (2020). Tracking the corticospinal responses to strength training. *European Journal of Applied Physiology*, 120(4), 783-798.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2015). *Exercise physiology: nutrition, energy, and human performance*. 2010. Lippincott Williams & Wilkins, 44, 45-46.

- Mednick, S. C., Cai, D. J., Shuman, T., Anagnostaras, S., & Wixted, J. T. (2011). An opportunistic theory of cellular and systems consolidation. *Trends in neurosciences*, 34(10), 504-514.
- Merton, P. A., & Morton, H. B. (1980). Stimulation of the cerebral cortex in the intact human subject. *Nature*, 285(5762), 227-227.
- Mero, A., Nummela, A., Keskinen, K., & Häkkinen, K. (2007). *Urheiluvammennus. 2. painos.* Lahti: VK-kustannus. 37-40
- Miles, T.S. 1994. The control of human motor units. *Clin Exp Phar Phys* 21, 511-520.
- Mirkov, D. M., Nedeljkovic, A., Milanovic, S., & Jaric, S. (2004). Muscle strength testing: evaluation of tests of explosive force production. *European journal of applied physiology*, 91(2), 147-154.
- Mujika, I., & Padilla, S. (2000). Detraining: Loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part II. *Sports Medicine*, 30(3), 145-154.
- Newton, R. U., & Kraemer, W. J. (1994). Developing explosive muscular power: Implications for a mixed methods training strategy. *Strength & Conditioning Journal*, 16(5), 20-31.
- Oliveira, F. B., Oliveira, A. S., Rizzato, G. F., & Denadai, B. S. (2013). Resistance training for explosive and maximal strength: effects on early and late rate of force development. *Journal of sports science & medicine*, 12(3), 402.
- Paavolainen, L., Hakkinen, K., Hamalainen, I., Nummela, A., & Rusko, H. 1999. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of applied physiology*, 86(5), 1527-1533.
- Pascual-Leone, A., Nguyet, D., Cohen, L. G., Brasil-Neto, J. P., Cammarota, A. & Hallett, M. (1995). Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *Journal of neurophysiology*, 74(3), 1037-1045.
- Pearce, A. J., Thickbroom, G. W., Byrnes, M. L., & Mastaglia, F. L. (2000). Functional reorganisation of the corticomotor projection to the hand in skilled racquet players. *Experimental brain research*, 130(2), 238-243.
- Pearce, A. J., & Kidgell, D. J. (2009). Corticomotor excitability during precision motor tasks. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(2), 280-283.

- Pearce, A. J., & Kidgell, D. J. (2010). Comparison of corticomotor excitability during visuomotor dynamic and static tasks. *Journal of science and medicine in sport*, 13(1), 167-171.
- Peltonen, H., Walker, S., Hackney, A. C., Avela, J., & Häkkinen, K. (2018a). Increased rate of force development during periodized maximum strength and power training is highly individual. *European journal of applied physiology*, 118(5), 1033-1042.
- Peltonen, H., Walker, S., Lähitie, A., Häkkinen, K., & Avela, J. (2018b). Isometric parameters in the monitoring of maximal strength, power, and hypertrophic resistance-training. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 43(2), 145-153.
- Pierce, K. C., Hornsby, W. G., & Stone, M. H. (2022). Weightlifting for children and adolescents: a narrative review. *Sports Health*, 14(1), 45-56.
- Perez, M. A., & Cohen, L. G. (2008). Mechanisms underlying functional changes in the primary motor cortex ipsilateral to an active hand. *Journal of Neuroscience*, 28(22), 5631-5640.
- Rainoldi, A., Bullock-Saxton, J. E., Cavarretta, F., & Hogan, N. (2001). Repeatability of maximal voluntary force and of surface EMG variables during voluntary isometric contraction of quadriceps muscles in healthy subjects. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11(6), 425-438.
- Ridding, M. C., Rothwell, J. C., & Inzelberg, R. (1995). Changes in excitability of motor cortical circuitry in patients with Parkinson's disease. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society*, 37(2), 181-188.
- Roman-Liu, D., & Bartuzi, P. (2018). Influence of type of MVC test on electromyography measures of biceps brachii and triceps brachii. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 24(2), 200-206.
- Roos, P. M. (2013). *Studies on metals in motor neuron disease*. Karolinska Institutet (Sweden).
- Rosler, K. M. (2001). Transcranial magnetic brain stimulation: a tool to investigate central motor pathways. *Physiology*, 16(6), 297-302.
- Rossini, P. M., Burke, D., Chen, R., Cohen, L. G., Daskalakis, Z., Di Iorio, R., ... & Ziemann, U. (2015). Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots and peripheral nerves: Basic principles and procedures for routine clinical and research application. An updated report from an IFCN Committee. *Clinical neurophysiology*, 126(6), 1071-1107.

- Sakugawa, R. L., Moura, B. M., Orssatto, L. B. D. R., Bezerra, E. D. S., Cadore, E. L., & Diefenthaler, F. (2019). Effects of resistance training, detraining, and retraining on strength and functional capacity in elderly. *Aging clinical and experimental research*, 31(1), 31-39.
- Schnitzler, A., & Benecke, R. (1994). The silent period after transcranial magnetic stimulation is of exclusive cortical origin: evidence from isolated cortical ischemic lesions in man. *Neuroscience letters*, 180(1), 41-45.
- Seynnes, O. R., de Boer, M., & Narici, M. V. (2007). Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *Journal of applied physiology*, 102(1), 368-373.
- Shaver, L. G. (1975). Cross transfer effects of conditioning and deconditioning on muscular strength. *Ergonomics*, 18(1), 9-16.
- Sjöström, M., Lexell, J., Eriksson, A., & Taylor, C. C. (1991). Evidence of fibre hyperplasia in human skeletal muscles from healthy young men?. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 62(5), 301-304.
- Suetta, C., Aagaard, P., Rosted, A., Jakobsen, A. K., Duss, B., Kjaer, M., & Magnusson, S. P. (2004). Training-induced changes in muscle CSA, muscle strength, EMG, and rate of force development in elderly subjects after long-term unilateral disuse. *Journal of Applied Physiology*, 97(5), 1954-1961.
- Takarada, Y., & Nozaki, D. (2021). Shouting strengthens maximal voluntary force and is associated with augmented pupillary dilation. *Scientific Reports*, 11(1), 1-11.
- Tallent, J., Goodall, S., Gibbon, K. C., Hortobágyi, T., & Howatson, G. (2017). Enhanced corticospinal excitability and volitional drive in response to shortening and lengthening strength training and changes following detraining. *Frontiers in physiology*, 8, 57.
- Thau, L., Reddy, V., & Singh, P. (2019). *Anatomy, Central Nervous System*.
- Tillin, N. A., Jimenez-Reyes, P., Pain, M. T., & Folland, J. P. (2010). Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals.
- Venter, R. E. 2012. Role of sleep in performance and recovery of athletes: a review article. *South African Journal for Research in Sport, Physical Education and Recreation*, 34(1), 167-184.

- Vera-Garcia, F. J., Moreside, J. M., & McGill, S. M. (2010). MVC techniques to normalize trunk muscle EMG in healthy women. *Journal of electromyography and kinesiology*, 20(1), 10-16.
- Vila-Chã, C., Falla, D., & Farina, D. (2010). Motor unit behavior during submaximal contractions following six weeks of either endurance or strength training. *Journal of Applied Physiology*, 109(5), 1455-1466.
- Weier, A. T., Pearce, A. J., & Kidgell, D. J. (2012). Strength training reduces intracortical inhibition. *Acta physiologica*, 206(2), 109-119.
- Werhahn, K. J., Behrang-Nia, M., Bott, M. C., & Klimpe, S. (2007). Does the recruitment of excitation and inhibition in the motor cortex differ? *Journal of Clinical Neurophysiology*, 24(5), 419-423.
- Wilson, S. A., Thickbroom, G. W., & Mastaglia, F. L. (1993). Transcranial magnetic stimulation mapping of the motor cortex in normal subjects: the representation of two intrinsic hand muscles. *Journal of the neurological sciences*, 118(2), 134-144.
- Yang, Y., Chen, S. C., Chen, C. N., Hsu, C. W., Zhou, W. S., & Chien, K. Y. (2021). Training Session and Detraining Duration Affect Lower Limb Muscle Strength Maintenance in Middle-Aged and Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Aging and Physical Activity*, 30(3), 552-566.
- Young, W. B., & Bilby, G. E. (1993). The effect of voluntary effort to influence speed of contraction on strength, muscular power, and hypertrophy development. *J Strength Cond Res*, 7(3), 172-8.