

**MOTORISEN OPPIMISEN VAIKUTUS VOIMANTUOTON MUUTOKSIIN 10
VIIKON VOIMAHARJOITUSJAKSON JA -TAUON SEKÄ TOISEN
HARJOITUSJAKSON AIKANA**

Petrus Lipsanen

Valmennus- ja testausopin pro gradu -tutkielma

Liikuntatieteellinen tiedekunta

Jyväskylän yliopisto

Kevät 2023

Ohjaaja: Juha Ahtiainen

TIIVISTELMÄ

Lipsanen, P. 2023. Motorisen oppimisen vaikutus voimantuoton muutoksiin 10 viikon voimaharjoitusjakson ja -tauon sekä toisen harjoitusjakson aikana. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, valmennus- ja testausopin pro gradu -tutkielma 60 s.

Voimaharjoittelu on nykyään yleinen harjoittelun muoto niin perusliikkujilla kuin myös urheilijoilla. Voimaharjoittelun yleisenä tavoitteena on voimantuoton ja lihasmassan kasvattaminen. Motorisen oppimisen rooli voimantuoton kehittämisessä perinteisellä vastusharjoittelulla on kuitenkin epäselvä. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää motorisen oppimisen vaikutusta voimantuoton muutoksiin harjoitus- ja harjoittelemattomuusjaksojen aikana aiemmin harjoittelemattomilla henkilöillä.

Tutkimus toteutettiin osana isompaa voimaharjoittelututkimusta, josta tähän tutkimukseen sisällytettiin toinen harjoitusryhmistä. Tutkittavat eivät olleet osallistuneet säännölliseen voimaharjoitteluun aiemmin ($n = 20$, 18–40 v.). Tutkimuksessa tutkittavat toteuttivat 10 viikon voimaharjoittelujakson, 10 viikon harjoittelemattomuusjakson ja toisen 10 viikon voimaharjoittelujakson. Harjoittelu tapahtui 2 kertaa viikossa, ja kaikki harjoitukset olivat valvottuja. Harjoituksissa seurattiin kuormia ja toistoja kaikissa harjoitetuissa liikkeissä. Tutkittavilta mitattiin bilateraali 1 toiston maksimi (1 RM) jalkaprässi, maksimaalinen unilateraalinen isometrinen polvenojennus (IPO) ja vastus lateraalisen poikkipinta-ala (VLA) harjoitusjaksojen alussa, 5 viikon kohdalla ja harjoitusjaksojen lopuksi.

Jalkaprässin 1 RM (JP), IPO, VLA ja jalkaprässin harjoituskuorma (JPHA) kehittyivät molempien harjoitusjaksojen aikana ($p < 0.05$). Ensimmäisen ja toisen harjoitusjakson aikana JPHA (+ 43 % ja + 30 %) kehittyi suhteessa enemmän verrattuna JP (+ 22 % ja +15 %) ($p < 0.05$) ja JP kehittyi enemmän verrattuna IPO (+ 12 % ja + 9 %) ($p < 0.05$). Toisen harjoitusjakson aikana VLA:n muutokset (+ 15 %) olivat suurempia kuin IPO:n ($p < 0.05$). Lisäksi IPO palasi harjoitustauon aikana takaisin lähtötasolle, kun taas JPHA ja JP pysyivät koholla verrattuna lähtötilanteeseen harjoitustauon aikana.

Tutkimuksessa havaitut erot harjoittelun toiminnallisissa ja rakenteellisissa adaptaatioissa sekä niiden pysyvyydessä tukevat motorisen oppimisen roolia voimaharjoittelussa. Erityisesti harjoitustauon aikaiset muutokset tukevat motorisen oppimisen roolia ja neuraalisten adaptaatioiden pysyvyyttä verrattuna rakenteellisiin. Aiemmin harjoittelemattomien harjoittelussa motorinen oppiminen kannattaa ottaa huomioon tavoitteiden puitteissa, sillä toiminnallisilla muutoksilla ei ollut vaikutusta lihashypertrofiaan harjoitusjaksoilla.

Asiasanat: voimaharjoittelu, taitoharjoittelu, taitavuus, keskushermosto

ABSTRACT

Lipsanen, P. 2023. Effects of motor learning in changes of muscular force production during 10-week periods of strength training, detraining, and retraining. Faculty of Sport and Health Sciences, University of Jyväskylä, Sports coaching and fitness testing master's thesis, 60 pp.

Strength training is a common form of exercise for the general public as well as for athletes. Common goals for strength training are increase in muscular force production and muscle hypertrophy. The role of motor learning in increases of muscular strength due to training is still unclear. The aim of this study is to investigate the effect of motor learning on the changes in muscular force during strength training, detraining, and retraining on previously untrained people.

The study was conducted as a part of a larger project, of which one of the experimental groups were included in this study. Participants were previously untrained ($n = 20$, 18-40 y.). The study consisted of a 10-week training period, 10 weeks of detraining, and 10 weeks of retraining. Training was conducted 2 times a week and all training sessions were supervised. All sets and repetitions were recorded. Measurements during the study were 1 repetition maximum 1RM bilateral dynamic leg press (JP), maximal unilateral isometric voluntary contraction of the knee extensors (IPO) and cross-sectional area of vastus lateralis (VLA). Measurements were done at the beginning of training periods, at 5-week interval during training periods and at the end of the training periods.

Leg press 1RM, IPO, VLA and training load of the leg press (JPHA) all increased during both training periods ($p < 0.05$). During both training periods JPHA (+ 43 % and + 30 %) increased more than JP (+ 22 % and +15 %) ($p < 0.05$) and JP improved more than IPO (+ 12 % and + 9 %) ($p < 0.05$). Proportional changes in VLA (+ 15 %) were greater than changes in IPO during retraining period ($p < 0.05$). Additionally, IPO regressed back to the pretraining levels during detraining, whereas JP and JPHA remained elevated.

The differences in structural and functional adaptations and differences in their timescales provide evidence for the role of motor learning in strength development. Especially changes during detraining support motor learning and the relative stability of neural changes when compared to structural changes in musculature. Motor learning should be considered when designing strength training plans especially for previously untrained people, because changes in muscle function didn't affect changes in muscle hypertrophy.

Keywords: strength training, skill training, skill, central nervous system

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	1
2	VOIMANTUOTTO JA SEN HARJOITTAMINEN.....	2
2.1	Voimantuotto.....	2
2.2	Voimaharjoittelu.....	3
2.3	Voimaharjoittelun adaptaatiot	5
2.3.1	Voimaharjoittelun rakenteelliset adaptaatiot.....	5
2.3.2	Voimaharjoittelun hermostolliset adaptaatiot.....	8
2.3.3	Voimaharjoittelun toiminnalliset adaptaatiot	11
2.4	Harjoittelemattomuus	12
3	MOTORINEN OPPIMINEN JA TAITOHARJOITTELU	14
3.1	Taitavuus ja motorinen oppiminen.....	14
3.2	Taitoharjoittelu	15
3.3	Taitoharjoittelun adaptaatiot.....	19
3.3.1	Taitoharjoittelun hermostolliset adaptaatiot	19
3.3.2	Taitoharjoittelun toiminnalliset adaptaatiot.....	22
4	MOTORISEN OPPIMISEN MEKANISMIT VOIMANTUOTON KEHITTÄMISESSÄ 24	
5	TUTKIMUSKYSYMYKSET	29
6	TUTKIMUSMENETELMÄT	30
6.1	Tutkittavat.....	30
6.2	Tutkimusasetelma.....	31
6.3	Voimaharjoittelu.....	32
6.3.1	Harjoitusohjelma	32

6.4	Voimatestit	37
6.4.1	Isometrinen voimantestaus	38
6.4.2	Voimatestaus jalkaprässissä	38
6.4.3	Voimatestaus hauiskäännössä.....	39
6.5	Lihaskoon mittaus	40
6.6	Tilastolliset menetelmät.....	40
7	TULOKSET	42
7.1	Voimatestien, jalkaprässin harjoituskuorman ja lihaskoon muutokset	42
7.2	Erot voimatestien, jalkaprässin harjoituskuorman ja lihaskoon muutoksissa	42
8	POHDINTA.....	44
8.1	Maksimivoimatestien suhteelliset muutokset.....	44
8.2	Maksimivoimatestien ja lihaskoon muutokset	45
8.3	Jalkaprässin 1 RM:n ja jalkaprässin harjoituskuorman muutosten erot	46
8.4	Tutkimuksen vahvuudet ja heikkoudet.....	47
8.5	Johtopäätökset	48
8.6	Tulevat tutkimusaiheet	49
8.7	Käytännön sovellutukset	49
	LÄHTEET	50

1 JOHDANTO

Lihaksiston voimantuottoa ja sen kehittymistä on tutkittu runsaasti, ja voimaharjoittelun sekä voiman kehittymisen periaatteiden ymmärtäminen on tärkeää niin urheilijoilla kuin tavallisille kansalaisillekin. Lihashypertrofian ja hermostollisten adaptaatioiden rooli on tunnistettu jo varhain ja havaittu tutkimusmenetelmien kehittyessä (Moritani & DeVries 1970). Samoin motorista oppimista ja sen mekanismeja on tutkittu monelta eri näkökulmalta, mutta tutkimukset motorisen oppimisen merkityksestä voimantuoton kehittymiseen ovat kohtuu vähäisiä.

Sale ym. (1988) tunnistivat motorisen oppimisen roolin voimantuoton kehittämisessä synergisti- ja antagonistilihasten aktivaation muutoksina harjoittelun edetessä. Viime vuosina myös taito- ja voimaharjoittelun sentraalisten adaptaatioiden tarkastelu yhdessä on yleistynyt (Tallent ym. 2021). Ihmisillä tehdyistä voima- ja taitoharjoittelun sentraalisista adaptaatioista ja niiden mahdollisista samankaltaisuuksista ei kuitenkaan voida tehdä suoria johtopäätöksiä, sillä tarkkojen mekanismien tutkiminen on hyvin vaikeaa ja tutkimustulokset ovat osaltaan vaihtelevia.

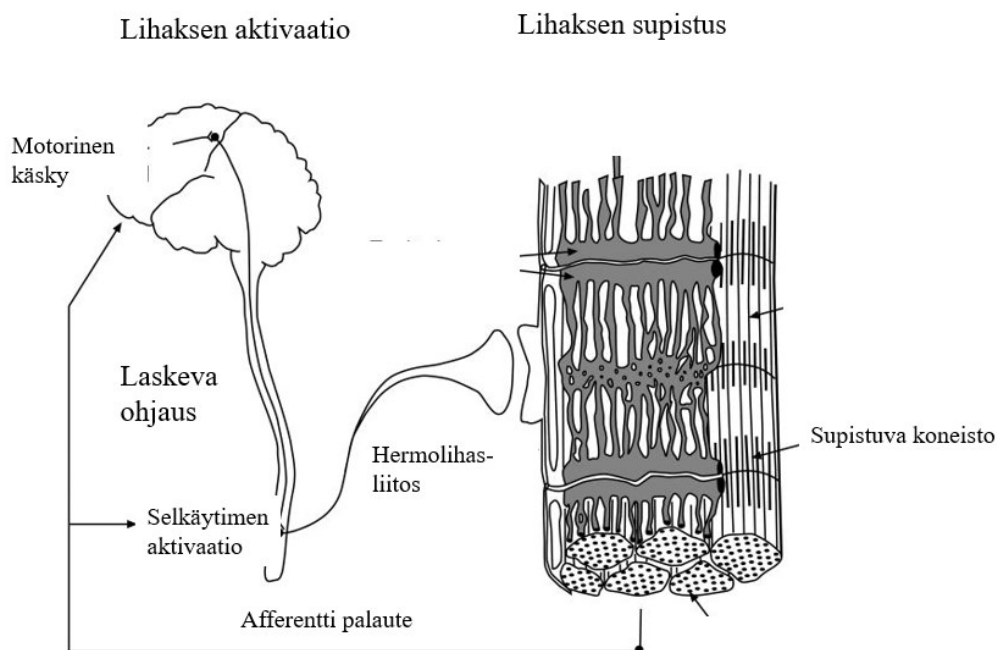
Taito- ja voimaharjoittelun toiminnalliset muutokset ja harjoittelun periaatteet kuitenkin tukevat mahdollista linkkiä. Molempien harjoitusmenetelmien jälkeen on havaittu ristiin oppimista, väsymys on häirinnyt kehitystä, palaute on tehostanut kehitystä, toiminnalliset muutokset voivat ilmetä nopeasti ja saavutettu toiminnallinen kehitys on verrattain pysyvää harjoitustauosta huolimatta.

Voimantuoton kehityksessä ja motorisessa oppimisessa on siis paljon samankaltaisuuksia kehon sisäisistä adaptaatioista ulkoisiin käyttäytymisen muutoksiin. Lihashypertrofia on kuitenkin voimaharjoittelulle spesifi adaptaatio ja voi hämärtää yhtäläisyyksiä tutkimustuloksissa ja vaikuttaa voiman kehittymiseen harjoittelun alkuvaiheen jälkeen enemmän kuin motorinen oppiminen. Tämän työn tavoitteena on selvittää voima- ja taitoharjoittelun periaatteita ja supraspinaalisia adaptaatioita sekä selvittää mahdollisia samankaltaisuuksia ja eroja tutkimustuloksissa.

2 VOIMANTUOTTO JA SEN HARJOITTAMINEN

2.1 Voimantuotto

Lihassoima voi yleisessä tai tieteellisessä keskustelussa tarkoittaa montaa asiaa. Enokan (1988) mukaan lihasvoima tarkoittaa maksimaalisessa isometrisessä supistuksessa tuotettua voimaa, johon vaikuttaa hermosto, lihaksisto sekä mekaaniset tekijät. Näin ollen lihasvoimaan ei vaikuta supistusnopeus tai lihaspituus. Taitavuuden rooli voi jäädä myös hyvin vähäiseksi, sillä suoritus on hyvin yksinkertainen eikä vaadi nopeaa liikettä. Isometrinen voimantuotto on kuitenkin hyvin harvinainen suoritus ja käytännön voimaharjoittelu tai urheilusuoritukset ovat yleensä dynaamisia, joten useissa voimaharjoittelututkimuksissa mitataan sekä isometristä että dynaamista voimantuottoa tai vain dynaamista voimantuottoa. Carroll ym. (2001) määrittivätkin lihasvoiman kapasiteetiksi tuottaa voimaa spesifissä tilanteessa. Dynaamiseen voimantuottoon vaikuttaa lihaksen supistumisnopeus (Hill 1938), lihaksen pituus (Chang et al. 1999), lihaksen koko ja monimutkaisemmissa liikkeissä myös eri lihasten aktiivisuuden/voimantuoton ajoitus (Enoka 1988) (kuva 1.). Lihaksen voimantuottoon vaikuttaa siis sekä hermolihaksjärjestelmän ominaisuudet ja ulkoiset vaatimukset (esim. testaustapa).



KUVA 1. Voimantuottoon vaikuttavia sisäisiä tekijöitä. (Mukailtu Enoka & Duchateau 2016)

2.2 Voimaharjoittelu

Voimaharjoittelulla tarkoitetaan säännöllistä toimintaa, joka koostuu useista voimaharjoituksista ja voimaharjoittelun tavoitteena on yleensä lihasvoiman tai -massan kehittäminen. Voimaharjoitteluohjelman suunnitteluun vaikuttaa mm. harjoitusjakson tavoitteet ja harjoittelijoiden tausta. Yleinen voimaharjoittelun muoto on vastusharjoittelu, jossa liikettä tehdään ulkoista vastusta vastaan, jolloin liikkeen tekeminen vaikeutuu ja voimantuoton vaatimus kasvaa. Yleisimpiä voimaharjoittelun muuttujia on käytetty kuorma (Refalo ym. 2021; Schoenfeld ym. 2021), harjoittelun määrä (Baz-Valle ym. 2021; Schoenfeld ym. 2016), harjoittelufrekvenssi (Grgic ym. 2018; Schoenfeld ym. 2018), väsymys/uupumukseen harjoittelu (Grgic ym. 2022; Pareja-Blanco ym. 2020), harjoitetut liikkeet (Spitz ym. 2022), supistuksen kesto ja supistusnopeus (Balshaw ym. 2016) sekä harjoitusjärjestys (Nunes ym. 2020).

Käytetty kuorma määritetään voimaharjoittelussa yleisesti prosentteina 1 toiston maksimista (%-1 RM) tai toistomaksimina, eli kuormana millä voidaan suorittaa tietty määrä toistoja (esim. 5 RM on 5 toiston maksimi). Jossain määrin toistomaksimeista voi ennustaa 1 RM kuorman ja toisinpäin (Helms ym. 2016). Käytetyllä kuormalla vaikuttaa olevan suora vaikutus voimantuoton kehittymiseen riippumatta välttämättä harjoittelun kokonaiskuormasta (Schoenfeld ym. 2021). Refalo ym. (2021) havaitsivat meta-analyysissään, että yli 60 %:n tai yli 15 RM kuormilla harjoitelleet kehittivät sekä dynaamisessa 1 RM että isometrisessä maksimaalisessa voimantuotossa enemmän kuin pienemmällä kuormilla harjoitelleet. Hypertrofiassa tai kehonkoostumuksen muutoksissa ei kuitenkaan havaittu eroja. (Refalo ym. 2021) Suhteellisen kestovoiman on havaittu kehittyvän enemmän pienemmällä kuormilla harjoiteltaessa, kunhan sarjat tehdään uupumukseen (Schoenfeld ym. 2015).

Harjoittelun määrästä puhuttaessa tulee ensin määritellä, mitä määrällä tarkoitetaan. Harjoittelun määränä voidaan pitää harjoituksen aikana kerrytettyä kokonaiskuormaa (toistot * sarjat * kilot) tai sarjamäärää. Sarjamäärän käyttäminen harjoitusvolyymien määrittämiseen voi olla yksinkertaisempaa tieteellisessä kirjallisuudessa, sillä kokonaiskuorman tasaaminen eri koeryhmien välillä voi olla haastavaa (Schoenfeld ym. 2021). Tämän lisäksi Schoenfeld ym. (2016) havaitsivat meta-analyysissään lihashypertrofian ja viikoittaisen sarjamäärän välillä annosvasteen, eli suurempi sarjamäärä johti suurempaan lihashypertrofiaan. Schoenfeldin ym. (2016) artikkelin rajoite oli suurimman analysoidun ryhmän sarjamäärän olleen vain 10 tai

enemmän sarjaa viikossa. Baz-Valle ym. (2021) sen sijaan analysoivat suurempia haarukoita, ja havaitsivat heidän keräämän datansa viittavan lihashypertrofian kehittymisen kannalta optimaalisen viikoittaisen sarjamäärän olevan 12–20. Lihasvoiman suhteen harjoitusmäärän vaikutuksen on havaittu olevan samankaltainen. Ralston ym. (2017) havaitsivat meta-analyysissään 5–9 viikoittaisen sarjan kehittävän voimaa enemmän kuin alle 5, ja kokeneemmat harjoittelijat saattavat saada hyötyä jopa suuremmasta harjoitusmäärästä.

Harjoittelufrekvenssillä tarkoitetaan yleensä tietyn liikkeen tai lihaksen harjoituskertoja viikon aikana. Harjoitusfrekvenssillä ei ole havaittu merkittävää vaikutusta lihashypertrofiaan (Schoenfeld ym. 2019) tai -voiman kehittymiseen (Grgic ym. 2018) meta-analyyseissä, jos harjoitusvolyymi on vakioitu. Harjoitusfrekvenssillä on havaittu olleen vaikutus, jos harjoitusvolyymiä ei ole vakioitu, mutta tämä on todennäköisesti johtunut suuremman frekvenssin aiheuttamasta suuremmasta harjoitusvolyymistä (Grgic ym. 2018, Schoenfeld ym. 2018).

Uupumuksella tarkoitetaan tässä yhteydessä sarjan lopetus pistettä harjoittelussa. Sarja voidaan tehdä uupumukseen tai lopettaa tietyssä pisteessä ennen uupumuksen saavuttamista. Pareja-Blanco ym. (2020) havaitsivat vajaiksi jätetyiden sarjojen johtaneen positiivisiin neuraalisiin adaptaatioihin, kun taas melkein uupumukseen tehdyt sarjat johtivat suurempaan lihashypertrofiaan. Voimantuoton kehittymisessä ryhmien välillä ei havaittu eroja riippumatta eroista suoritettujen toistojen määrässä. (Pareja-Blanco ym. 2020) Grgic ym. (2022) eivät meta-analyysissään havainneet eroja lihashypertrofian tai -voiman kehittymisessä, kun harjoitusvolyymi oli identtinen. Kuitenkin alaryhmä analyysissa he havaitsivat jo ennen tutkimusta harjoitelleiden hypertrofian olleen suurempaa, kun harjoittelu tehtiin uupumukseen. (Grgic ym. 2022) On tärkeää huomioda, että analyysiin sisällytetyissä tutkimuksissa käytettiin pääasiassa kohtuullisia kuormia ($> 60\% 1\text{ RM}$), ja että pienemmillä kuormilla harjoitellessa, uupumukseen harjoittelu voi olla tärkeämpää (Lasevicius ym. 2022). Harjoitusvolyymien ollessa vakioitu maksimaalisen voimantuoton ja lihashypertrofian kehityksen välillä ei vaikuta olevan eroja riippumatta siitä, tehdäänkö sarjat uupumukseen. Kuitenkin harjoitusvolyymien ollessa erilainen, eroja voidaan havaita hermostollisissa ja rakenteellisissa adaptaatioissa.

Harjoitetut liikkeet ja niiden variaatioiden valinta on tärkeä osa voimaharjoittelua. Lihaksen voimantuotto kehittyy parhaiten harjoitetulla liikelaajuudella (Kubo ym. 2019) ja liikelaajuudella voi myös olla vaikutusta hypertrofiaan joissain lihaksissa (Ottinger ym. 2022,

Kubo ym. 2019). Lisäksi lihastyötapa ja harjoitettu liike voi vaikuttaa harjoitusvasteeseen, sillä isometrisen ja dynaamisen voiharjoittelun voima-adaptaatiot ovat joissain määrin lihastyötapaspesifejä ja voimantuotto kehittyy eniten harjoitetussa liikkeessä (Spitz ym. 2022).

Harjoitusjärjestyksellä tarkoitetaan, mikä tai mitkä liikkeet tehdään harjoituksen aluksi ja mitkä lopuksi. Voimantuoton kehittymisen kannalta harjoitusjärjestyksellä vaikuttaa olevan vaikutusta, ja liikkeet/lihakset, joissa halutaan eniten kehitystä kannattaa sijoittaa harjoituksen alkuun. Lihashypertrofiassa harjoitusjärjestyksellä ei vaikuta olevan vaikutusta. (Nunes ym. 2020)

Supistuksen kestolla ja tarkoituksella tarkoitetaan eroa räjähtävän ja tasaisemman voimantuoton välillä. Räjähtävän voimantuoton harjoittelussa voimaa pyritään tuottamaan mahdollisimman nopeasti ja supistus on yleensä kestolta lyhyt (alle 1 s). Räjähtävän ja tasaisen voimantuoton on havaittu johtavan erilaisiin hermostollisiin, rakenteellisiin ja toiminnallisiin adaptaatioihin. (Balshaw ym. 2016)

Kappaleessa esitetyt seikat ovat merkityksellisiä voimaharjoittelun adaptaatioiden kannalta ja otettava huomioon voimaharjoittelua suunniteltaessa. Voimaharjoittelun kokonaisuuteen voi siis vaikuttaa monilla eri asioilla, ja adaptaatioiden kannalta tärkeintä on eri palasten sovittaminen yhteen halutun lopputuloksen aikaansaamiseksi. Tämän lisäksi voimaharjoittelun suunnittelussa olisi hyvä ottaa huomioon yksilön tai ryhmän ominaisuudet ja kokemus voimaharjoittelusta sekä harjoittelun progressio.

2.3 Voimaharjoittelun adaptaatiot

2.3.1 Voimaharjoittelun rakenteelliset adaptaatiot

Näkyvin voimaharjoittelun rakenteellisista adaptaatioista on lihashypertrofia, eli lihaksen kasvu, jota mitataan yleensä lihaksen kokonaisvolyymien, poikkipinta-alan tai paksuuden avulla (Hornsby ym. 2018). Lihashypertrofian suurimpana stimuluksena pidetään lihaksen kokemaa mekaanista jännitystä, joka aktivoi mekanoreseptorit. Mekanoreseptoreiden aktivoituminen käynnistää monimutkaisen prosessin, jonka lopputuloksena on lihasproteiinisynteesin

lisääntyminen kuormitetussa lihaksessa, mistä seuraa lihashypertrofia. (Wackerhage ym. 2019) Lihashypertrofia siis seuraa lihaksen sisäisen nettoproteiinitasapainon (proteiinisynteesi – proteiinikatabolia) muutoksesta lihasproteiinisynteesin suuntaan, mikä johtaa suurempaan lihaskokoon (Krzysztofik ym. 2019). Lihaskasvua on tutkimuksissa havaittu 20 päivän (9 harjoitusta) jälkeen (Seynnes ym. 2007). Viive harjoittelun aloittamisen ja hypertrofian havaitsemisen välillä voi osaltaan johtua mittaus - ja tilastollisten menetelmien epäherkkyydestä havaita muutoksia lihaskoossa luotettavasti, ja tarkkaa alkamisajankohtaa on hankala määrittää (DeFreitas ym. 2011), mutta lihasproteiinisynteesi on koholla jo ensimmäisen harjoituksen jälkeen (Mitchell ym. 2014).

On yleisesti hyväksyttyä, että lihaksen koko vaikuttaa voimantuottoon. Lihaksen kasvun onkin monissa tutkimuksissa nähty olevan yhteydessä voimantuoton kehitykseen (Aagaard ym. 2001; Ahtiainen ym. 2016; Erskine ym. 2014; Ikai & Fukunaga 1970; Moritani & deVries 1979) ja suurempien lihasten on nähty kykenevän suurempaan voimantuottoon poikkileikkaustutkimuksissa (Akagi ym. 2018; Bamman ym. 2000; Fukunaga ym. 2001; Erskine ym. 2014; Maden-Wilkinson ym. 2020). Logiikka voimantuoton ja lihaskoon yhteyteen on lihaksen sisäisten supistuvien komponenttien määrän kasvaminen rinnakkain, jolloin suurempi määrä supistuvia komponentteja tuottaa suuremman voiman (Taber ym. 2019). Hypertrofian vaikutuksesta voimantuottoon viittaa myös tutkimustulokset, joissa yksittäisen lihassolun koko on ollut yhteydessä lihassolun voimantuottoon (Krivickas ym. 2011) ja myös yksittäisten lihassolujen koon ja voimantuoton kasvaminen voimaharjoittelun seurauksena (Trappe ym. 2000; Trappe ym. 2001). Lihashypertrofian roolista voimantuoton kehittymisessä on kuitenkin väitelty viime vuosina (Buckner ym. 2016; Dankel ym. 2018; Hornsby ym. 2018; Vigotsky ym. 2018). Kaikissa tutkimuksissa lihashypertrofian ja lihaksen voimantuoton välillä ei ole havaittu yhteyttä (Sale ym. 1992), yhteydet ovat olleet heikkoja tai on ollut tutkittavia, joiden voimantuotto ei ole kehittynyt lihashypertrofiasta huolimatta (Ahtiainen ym. 2016).

Erot tilastollisissa - ja tutkimusmetodologioissa voi vaikuttaa lihaskoon ja lihasvoiman yhteyteen, joka havaitaan tutkimuksissa (Dankel ym. 2018; Vigotsky ym. 2018). Vigotsky ym. (2018) esittivät erilaisia mahdollisia yhteyksiä, joita voidaan havaita riippuen erilaisista metodeista, joita käytetään. Toisaalta on myös mahdollista, että kohtuu marginaalisen lihashypertrofian rooli lyhyissä voimaharjoittelututkimuksissa voiman kehittymiseen on hyvin pieni (Dankel ym. 2018) erityisesti harjoittelemattomilla henkilöillä. Hyvin pitkät voimaharjoittelututkimukset ovat harvinaisia, mutta tutkittaessa harjoitelleiden ja

harjoittelemattomien lihaksen rakenteen ja voimantuoton eroja, lihaksen tilavuuden on havaittu selittävän jopa 81 % voimantuoton varianssista (Maden-Wilkinson ym. 2020). Muita mahdollisia rakenteellisia adaptaatioita ovat lihasten sisäiset voiman varsien muutokset ja pennaatiokulman muutokset.

Lihaksen nivelen yli tuotetun voiman varsien muutoksia voimaharjoittelun seurauksena on tutkittu kohtuullisen vähän. Voiman varren kasvaminen samaan aikaan lihaksen kanssa johtaisi suurempaan resultanttivoimaan kuin pelkkä supistuvien komponenttien määrän lisääntyminen. Simulaatiotutkimuksessa on havaittu voiman varren kasvua hypertrofian seurauksena ja pienenemistä atrofian seurauksena. (Vigotsky ym. 2015) Voiman varren muutos on havaittu myös harjoittelun seurauksena yhdessä lihashypertrofian kanssa, mutta muutokset olivat odotettua pienemmät (Sugisaki ym. 2015) ja voiman varren on havaittu olleen suurempi voimaharjoitelleilla yksilöillä kuin harjoittelemattomilla (Maden-Wilkinson ym. 2020). Maden-Wilkinsonin ym. (2020) tutkimuksessa voimanvarren osuus voimantuoton eroista harjoitelleiden ja harjoittelemattomien välillä oli kuitenkin hyvin vähäinen. Voiman varren muutokset siis voivat vaikuttaa mitatun voimantuoton muutokseen, mutta vaikutuksen suuruus voi olla hyvin vähäinen.

Lihaksen pennaatiokulma, eli kulma viuhkamaisen lihaksen lihassolun supistumissuunnan ja aponeuroosin välillä, voi myös vaikuttaa voimantuottoon kahdella tavalla, toinen negatiivisesti ja toinen positiivisesti. Negatiivinen vaikutus johtuu kulman (α) aiheuttamasta lihassolun sivulle aponeuroosista suuntautuvasta voiman komponentista, minkä vuoksi lihassolun voimantuotto on suhteellinen $\cos(\alpha)$:n. Eli mitä suurempi pennaatiokulma, sitä pienempi on yksittäisen lihassolun aponeuroosiin tuottama voima. Toisaalta pennaatiokulman kasvaessa kasvaa myös lihaksen funktionaalinen pinta-ala, eli samaan anatomiseen pinta-alaan mahtuu enemmän lihassoluja. Pennaatiokulman negatiivisen ja positiivisen vaikutuksen suhde on monimutkainen, mutta yhden mallin mukaan lihaksen voimantuotto kasvaa 45° α :n asti. (Rutherford & Jones 1992) Pennaatiokulman on havaittu kasvavan voimaharjoittelun seurauksena (Aagaard ym. 2001; Seynnes ym. 2007) ja se on johtanut suurempaan muutokseen lihaksen fysiologisessa kuin anatomisessa poikkipinta-alassa (Aagaard ym. 2001). Aagaard ym. (2001) esittivät suuremman fysiologisen pinta-alan johtaneen suurempaan suhteelliseen voimantuoton (16 %) kuin lihaksen poikkipinta-alan kasvuun (10 %).

2.3.2 Voimaharjoittelun hermostolliset adaptaatiot

On yleisesti hyväksyttyä, että voimaharjoittelun ensimmäisten viikkojen aikana voimankehittyminen aiheutuu pitkälti neuraalisten adaptaatioiden ansiosta. Moritani ja deVries (1979) havaitsivat EMG signaalin ja voiman kasvavan voimaharjoittelun seurauksena jo 2 viikon harjoittelun jälkeen ilman merkittävää lihaskasvua. Lihaskasvun merkitys voimantuoton kehitykseen kasvoi kuitenkin tutkimuksen edetessä. (Moritani & deVries 1979) Samankaltaisesti Seynes ym. (2007) havaitsivat isometrisessä voimantuotossa merkittävää kehitystä (> 20 %) vain 10 päivän harjoittelun jälkeen. Kirjoittajat arvelivat voimantuoton kasvaneen neuraalisen ohjauksen kehittymisen ansiosta, sillä EMG amplitudi kasvoi samalla aikavälillä n. 20 %, mutta lihaskoossa ei ollut merkittäviä muutoksia. (Seynes ym. 2007) Hermostollisten adaptaatioiden roolia kannattaa myös tutkimustulokset, joissa ei ole havaittu muutoksia M-aallossa, vaikka maksimaalinen voimantuotto onkin kasvanut harjoittelun seurauksena. Näin ollen muutos ei todennäköisesti johdu lihaksen supistumiskoneiston muutoksista. (Van Cutsem 1998)

Pinta EMG ja sen amplitudin summaatio ei kuitenkaan kerro koko totuutta. Osassa voimaharjoittelututkimuksista ei ole havaittu EMG amplitudin kasvua voimantuoton kasvusta huolimatta (Carolan & Cafarelli 1992), johon voi vaikuttaa hermoston ja lihaksen toiminnasta riippumattomat tekijät esim. ihonalaisen rasvakerroksen paksuus ja elektrodien sijoittaminen. EMG amplitudi voi myös kasvaa tai laskea monen eri hermo-lihasjärjestelmän toiminnan muutoksen seurauksena, kuten esim. motoristen yksiköiden rekrytoinnissa, -sytymistaajuuksissa tai -sytymissyynkronaatiassa tapahtuvien muutosten seurauksena. (Aagaard 2003) Sytymissyynkronaatiolla tarkoitetaan eri motoristen yksiköiden syttymistä samaan tai eri aikaan. Eriaikainen syttyminen voi tuottaa interferenssiä mikä näkyy EMG:n laskuna, kun taas samanaikaisen syttymisen aiheuttama summaatio näkyy EMG:n kasvuna, mutta ei vaikuta maksimaaliseen voimantuottoon. (Yao ym. 2000)

Syttymistaajuuden muutoksilla tarkoitetaan hermon lihakseen johtamien sähköimpulssien frekvenssin muutoksia voimantuoton aikana. Syttymistaajuus voi kasvaa maksimaalisessa voimantuotossa harjoittelun seurauksena, ja syttymistaajuuden kasvun on havaittu olevan yhteydessä voiman kasvuun 2 viikon voimaharjoittelun jälkeen (Christie & Kamen 2009). Aiemmassa tutkimuksessa Kamen & Knight (2004) havaitsivat syttymistaajuuden kasvua maksimaalisessa lihassupistuksessa, mutta suurimmat muutokset tapahtuivat jo ennen

harjoittelua 2 testauskerran välillä, ja harjoitusjakson muutokset olivat vähäisiä. Sama trendi näkyi myös maksimaalisen voimantuoton ja syttymistäajuuden yhteyden välillä. Syttymistäajuuden ja voimantuoton kehittymisen yhteys (Pearson r) kasvoi syttymistäajuuden ja voimantuoton kasvaessa ensimmäisten testauskertojen välillä, mutta palasi lähtötasolle tutkimuksen loppuun mennessä, sillä syttymistäajuus ei enää kasvanut, mutta voimantuotto kehittyi (Kamen & Knight 2004). Näiden tulosten perusteella adaptaatiot syttymistäajuudessa maksimaalisen lihassupistuksen aikana tapahtuvat hyvin nopeasti (1 testauskerta) ja syttymistäajuuden muutosten vaikutus maksimaaliseen lihasvoimaan pienenee tämän jälkeen.

Syttymistäajuuden muutoksia voi tapahtua harjoittelun seurauksena myös lihassupistuksen alussa. Van Cutsem ym. (1998) havaitsivat syttymistäajuuden muutoksia ballistisen supistuksen alussa ballistisen voimaharjoittelun seurauksena. Syttymisfrekvenssin tarkastelu rajoittui vain ensimmäiseen 3 lihasnykäyksen väliaikoihin (interspike interval), mutta muutokset olivat merkittäviä. Lisäksi tuplasyttymisiä (doublet: motorisen yksikö syttymisintervalli 2–5 ms) esiintyi harjoittelun jälkeen n. 33 % motorisista yksiköistä, kun ennen harjoittelua doubletteja esiintyi vain n. 5 % motorisista yksiköistä. (Van Cutsem ym. 1998) Valitettavasti tutkijat eivät testanneet 12 viikon voimaharjoittelujakson aikana, joten harjoitusadaptaatioiden nopeus jää hämärän peittoon.

Motoristen yksiköiden rekrytoimisen muutoksilla tarkoitetaan joko motoristen yksiköiden aktivoitumiskyvyn muutoksia suhteessa tuotettuun voimaan tai muutoksia kyvyssä aktivoida kaikki motoriset yksiköt maksimaalisessa supistuksessa. Knight & Kamen (2001) havaitsivat aiemmin harjoittelemattomien tutkittavien kyvyn aktivoida kaikki motoriset yksiköt kehittyvän 6 viikon voimaharjoittelujakson jälkeen. Tulokset eivät ole kuitenkaan yksiselitteisiä, ja esim. aiempi harjoitustausta voi vaikuttaa aktivaation kehittymiseen (Lee ym. 2009). Motoristen yksiköiden aktivoitumisen aikaistumista on havaittu ballistisen harjoittelun jälkeen, jossa tutkittavat pyrkivät tuottamaan voimaa mahdollisimman nopeasti, eli isommat motoriset yksiköt aktivoituivat aiemmin suhteessa tuotettuun voimaan maksimaalisesta voimantutotosta. (Van Cutsem ym. 1998) Lihaksen pinnalta havaitun aktivaation on myös havaittu kasvavan nopeammin räjähtävätyyppistä harjoittelua tehneillä verrattuna tasaisemmin voimaa tuottaneeseen ryhmään (Balshaw ym. 2016).

Yksi hermostollisista adaptaatioista, jotka vaikuttavat lihaksen tuottamiin resultanttivoimiin on antagonistin koaktivaation väheneminen. Antagonistin koaktivaatiolla tarkoitetaan

antagonistilihaksen tahdosta riippumatonta supistumista, kun agonistilihaksella tuotetaan voimaa. Antagonistin koaktivaation on arveltu vaikuttavan esim. polven stabiliteettiin. (Baratta ym. 1988) Antagonistin koaktivaation on havaittu vähenevän harjoittelun seurauksena ja se vaikuttaa tapahtuvan ilman samanaikaista agonistin lisääntyntä aktivaatiota. Antagonistin koaktivaation laskun on havaittu tapahtuvan ensimmäisen harjoitusviikon aikana (3 harjoitusta) (Carolan & Cafarelli 1992; Mason ym. 2020), mutta koaktivaation on havaittu myös voivan jatkaa laskua toisen harjoitusviikon aikana (Mason ym. 2020). Pienempi antagonistin koaktivaatio siis johtaa suurempiin mitattaviin resultanttivoimiin.

EMG:ssa havaittujen perifeeristen muutosten lisäksi neuraalisia muutoksia on havaittu myös hermolihasjärjestelmän toimintaa ohjaavassa keskushermostossa. Mason ym. (2020) esittivätkin, että EMG:n avulla havaitut perifeeriset muutokset voivat johtua sentraalisen ohjauksen muutoksista. Keskushermoston muutoksia on ihmisillä tutkittu motoriselle aivokuorelle (M1) TMS:n (transcranial magnetic stimulation) avulla tuotetun sähköimpulssin aiheuttamaa motorista aktivaatiota lihaksissa (MEP, motor-evoked potential). MEP:n muutokset harjoittelun seurauksena kertovat kortikospinaalisten hermosolujen selkäydinhermoille antaman käskyn muutoksista (Kidgell ym. 2017).

Voimaharjoittelun yhteydessä on tutkittu lähinnä M1:n kautta kortikospinaalisen radan ärsytettävyyttä sekä inhibitiota. Tutkimustulokset eivät kuitenkaan ole täysin yksiselitteisiä. Osassa tutkimuksista kortikospinaalisen ärsytettävyyden nousua on havaittu voimaharjoittelun seurauksena samanaikaisesti voiman kehittymisen kanssa (Kidgell ym. 2010; Mason ym. 2020; Griffin & Carafelli 2011) ja osassa ei (Carroll ym. 2002; Latella ym. 2012). Meta-analyysissä ei havaittu selkeää ärsytettävyyden kasvua (*borderline effect*) 2–8 viikon voimaharjoittelujaksojen jälkeen, mutta erot yksittäisissä tutkimuksissa voivat johtua erilaisista tutkimusmetodeista (Kidgell ym. 2017). Kuitenkin akuutisti yhden voimaharjoituksen jälkeen kortikospinaalisen ärsytettävyyden on havaittu olevan koholla meta-analyysin perusteella (Mason ym. 2019). Kortikospinaalisen inhibition lasku on ollut johdonmukaisempi tutkimustulos. Kidgell ym. (2017) havaitsivat meta-analyysissään selkeää kortikospinaalisen inhibition vähenemistä 2–8 viikon voimaharjoittelun seurauksena. Aivojen plastisuutta voimaharjoittelun seurauksena on havaittu myös akuutisti. Mason ym. (2019) havaitsivat kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvua jo yhden harjoituskerran jälkeen.

Kortikospinaalisen plastisuuden merkitystä voiman kehittymiseen ei tarkkaan ymmärretä. Ottaen huomioon, että kortikospinaalisen ärsytettävyyden madaltaminen toisteisella TMS protokollalla harjoittelun jälkeen madaltaa voiman kehittymistä harjoittelun seurauksena (Hortobagyi ym. 2009), aivojen adaptaation rooli voiman kehittämisessä voi olla merkittävä. Kuten Mason ym. (2020) esittivätkin, kortikospinaalisen plastisuuden mekanismit saattavat johtaa tehokkaampaan motoristen yksiköiden rekrytointiin ja korkeampaan syttymistäajuuteen, mikä nähdään suurempana voimantuotona. Kortikaalinen plastisuus voi myös vaikuttaa pienempään antagonistin koaktivaatioon. (Mason ym. 2020)

2.3.3 Voimaharjoittelun toiminnalliset adaptaatiot

Voimaharjoittelun seurauksena yksi yleisimmin tutkituista toiminnallisista adaptaatioista on maksimaalisen voimantuoton kehittyminen. Voimantuoton kehittymistä on tutkittu monilla eri tavoilla. Voimantuoton testaus voidaan jakaa isometriseen ja dynaamiseen voimantestaukseen, joista dynaaminen jakautuu vielä isokineettiseen ja isotoniseen. Isometrisessä voimantestauksessa lihasjännekompleksin pituus ei muutu, vaan mitattava nivel on köytetty liikkumattomaksi. Isokineettisessä voimantestauksessa liikenoisuus ei muutu, ja se vaatii usein erikoisvälineistöä. Isotonisessa voimantestauksessa vastus ei muutu, ja se sisältää mm. suurimman osan tavallisista kenttätesteistä/kuntosaliliikkeistä. Isokineettinen ja isotoninen voidaan vielä jakaa testaustavan mukaan eksentriseen ja konsentriseen lihastyötapaan. Lisäksi edellä mainituilla testaustavoilla voidaan myös tutkia voimantuotonopeutta ja kestovoimaa.

Yleisellä tasolla voimaharjoittelu johtaa keskimäärin maksimaalisen voimantuoton kehittymiseen, mutta keskiarvoisesti kehittyneessä joukossa voi hyvinkin esiintyä poikkeuksia, joiden voimantuotto ei kehity (Ahtiainen ym. 2016). Syytä tähän ei tarkkaan tiedetä. Maksimaalisen voimantuoton kehittyminen on kuitenkin jossain määrin testaustapaspesifiä. Spitz ym. (2022) selvittivät meta-analyysissään voimaharjoittelun siirtovaikutusta spesifillä ja epäspesifillä testaustavalla verrattuna toteutettuun harjoitteluun, ja havaitsivat voimankehittymisen olleen huomattavasti suurempaa spesifillä testaustavalla ($d=1,8$) kuin epäspesifillä ($d=0,8$). Tutkimuksissa harjoittelu oli tehty isotonisesti ja epäspesifit testaustavat olivat samassa liikkeessä isometrisiä tai isokineettisiä. Analyysin tutkimuksista vain 3/12 olivat raportoineet tilastollisesti merkitsevän siirtovaikutuksen. (Spitz ym. 2022) Sama harjoittelun spesifisyyden hyöty suhteessa testiin on havaittu myös kuorman ja siten toistojen määrän sekä

lihassupistuksen voimantuottonopeuden kanssa. Maksimaalinen voimantuotto on kehittynyt enemmän suurempaa suhteellista kuormaa käyttäneellä ryhmällä ja suhteellisen kestovoiman kehittyneen pienempää suhteellista kuormaa käyttäneellä ryhmällä, kun sarjat tehtiin uupumukseen saakka (Campos ym. 2002). Voimantuottonopeuden on puolestaan havaittu kehittyvän enemmän räjähtävän voimantuoton ryhmässä kuin tasaisen kiihtyvyyden voimantuoton ryhmässä. Mielenkiintoisesti tasaisen kiihtyvyyden voimantuoton ryhmän maksimaalinen voimantuotto kehittyi enemmän kuin räjähtävän voimantuoton ryhmällä, vaikka räjähtävän voimantuoton ryhmä tuotti hetkellisesti suhteellisesti suurempia voimia (n. 90 % vs. n. 75 % 1 RM:sta). (Balshaw ym. 2016)

Voimaharjoittelun yleisimmin tarkastellut toiminnalliset adaptaatiot ovat siis maksimaalinen voimantuotto, voimantuottonopeus ja lihaskestävyys submaksimaalisella kuormalla. Eri adaptaatioita voidaan painottaa erilaisilla harjoitusprotokollilla, mutta adaptaatioissa on myös päällekkäisyyksiä. Esimerkiksi Balshaw:n ym. (2016) tutkimuksessa sekä räjähtävän voimantuoton ryhmä että tasaisen kiihtyvyyden voimantuoton ryhmä kehittivät maksimivoimassa ja voimantuottonopeudessa. Myös eri lihastyötavoilla/testausmenetelmillä voidaan havaita voimantuoton kehitystä jonkinasteisen siirtovaikutuksen ansiosta.

2.4 Harjoittelemattomuus

Harjoittelemattomuuden vaikutus voimaharjoittelun adaptaatioihin voi vaihdella. Ogasawara ym. (2011) havaitsivat 6 viikon harjoitusjakson aikana saavutetun kasvun voimantuotossa ja lihaksen koossa säilyvän 3 viikon harjoittelemattomuusjakson jälkeen aiemmin harjoittelemattomilla tutkittavilla. Lemmer ym. (1999) havaitsivat dynaamisen 1 RM:n säilyvän 12 viikon harjoittelemattomuusjakson ajan riippumatta iästä ja sukupuolesta harjoittelemattomalla koejoukolla, mutta harjoittelemattomuusviikkojen 12–31 aikana havaittiin merkittävä 1 RM:n lasku. Weir ym (1997) havaitsivat 8 viikon harjoittelujaksolla merkittävää dynaamisen 1 RM:n ja maksimaalisen isometrisen voimantuoton kasvua, kun taas saman pituisella harjoittelemattomuusjaksolla dynaaminen 1 RM säilytti kehittyneen tasonsa, kun taas isometrinen maksimivoima palasi lähtötasolle.

Yksilöllinen vaihtelu voimaharjoittelun adaptaatioihin on kuitenkin suurta. Ranttilä ym. (2021) havaitsivat merkittäviä eroja yksilöllisissä lihashypertrofisissa vasteissa 10 viikon

voimaharjoittelujakson jälkeen. Voimaharjoittelua seuranneella harjoittelemattomuusjaksolla erot lihashypertrofian muutoksissa säilyivät, eli vain eniten kehittyneessä kolmanneksessa havaittiin merkittävää lihasatrofiaa 6 viikon harjoittelemattomuusjakson jälkeen. Voimaharjoittelujakson jälkeen EMG:n avulla havaittiin neuraalisia adaptaatioita vain kohtalaisesti lihaksen kokoa kasvattaneella ryhmällä, mutta muutos palautui tilastollisesti merkityksettömäksi harjoittelemattomuusjakson aikana. Kaikkien tutkittavien keskiarvoiset muutokset harjoittelemattomuusjaksolla olivat -1,2 % voimassa, kun taas lihaksen poikkipinta-alalla vastaava oli -4,9 %. (Räntilä ym. 2021)

Harjoittelemattomuuden vaikutukset ovat siis verrattain yksilöllisiä. Kuitenkin koko ryhmiä tarkasteltaessa n. 3 viikon harjoittelemattomuusjakso ei välttämättä aiheuta merkittäviä muutoksia harjoitusryhmien keskiarvoissa voimantuotossa tai lihaskoossa. Harjoittelemattomuusjakson pidentyessä muutoksista tulee selkeämpiä, vaikkakin voimantuotto vaikuttaa säilyvän lihashypertrofiaa paremmin.

3 MOTORINEN OPPIMINEN JA TAITOHARJOITTELU

3.1 Taitavuus ja motorinen oppiminen

Taidon ja taitavuuden määritelmistä on aikojen saatossa ollut monia näkökantoja (Stanley & Krakauer 2013). Taitoa ja taitavuutta voi olla vaikea määritellä ilman selkeää kontekstia ja rajoja. Newell (1978) kuvasi motorisia taitoja toiminnan kategoriaksi, jossa toiminnalla on tarkoituksenmukainen ja funktionaalinen lopputulos kuten esim. urheilussa. Lukioikäinen urheilija omaa taitoja lajissaan ja hänet voi nähdä taitavana, mutta ammattiurheilijat ovat kuitenkin *taitavampia* (Clark 2007). Kuvattaessa yksilöä taitavaksi (*skilled*), hän on yleensä edistynyt taidossaan huomattavasti verrattuna lähtötasoon tai johonkin muuhun määritettyyn tasoon. Jos taas sanotaan yksilön omaavan taidon (*having a skill*), se ei vaadi samankaltaista tasomääritelmää, vaan yksilö kykenee kyseiseen toimintaan paremmin kuin lähtötilanteessa harjoittelun seurauksena (esim. käsikirjoittaminen eri ikävaiheissa). (Stanley & Krakauer 2013) Yleisesti puhekielessä taitavuus viittaa suoritustasoon Newellin (1978) kuvailun kaltaisessa toiminnassa.

Motorinen oppiminen (*motor learning*) voidaan määritellä jonkin liikkeen tai tekniikan suorituksen vakiintumiseksi, jolloin suurin osa suorituksista voidaan tehdä ”oikein” ideaalisen biomekaanisen mallin mukaan (Raiola & Di Domenico 2021). Toisaalta motorisen taidon oppiminen on myös nähty kehittyneenä tarkkuutena ajassa ja tilassa (esim. nopeampi ja tarkempi liike) (Willingham 1998), ja muutoksen suhteellinen pysyvyys on nähty tärkeänä osana oppimisen määritelmää (Wulf ym. 2009). Laajimmillaan motorinen oppiminen on määritelty kokemusperäisenä kehityksenä suorituskyvyyssä. Motorisen oppimisen ymmärtämiseksi on kehitetty useampia teorioita esim. kognitiivinen teoria, ekologisdynaaminen teoria (Raiola & Di Domenico 2021), ja neuropsykologinen teoria (Willingham 1998), joissa samankaltaisille asioille voi olla eroavia määritelmiä. Motorinen oppiminen nähdään kuitenkin yleisesti liiketaitavuuden pysyvänä kehittymisenä, esim. telinevoimistelija oppii uuden liikesuorituksen tai kehittyä jo osaamassaan. Motorinen oppiminen on pohjimmiltaan prosessi, johon vaikuttaa aiemmat kokemukset/taidot ja joka johtaa joko uuden taidon oppimiseen tai jo osatun liikkeen vakiintumiseen ja kehittymiseen (Raiola & Di Domenico 2021). Motorinen oppiminen ja kehittyminen alkaa jo

varhaislapsuudessa ja jatkuu koko elämän (Clark 2007), joten eri ihmisten lähtötilanteet ovat väkisin erilaisia.

Motorisen oppimisen ja suorituskyvyn kehittymisen tietyssä tehtävässä voi nähdä kulkevan käsi kädessä, mutta näin ei välttämättä ole. Suorituskky voi harjoituksen tai harjoitusjakson aikana kehittyä useammasta eri syystä, jotka eivät välttämättä ole vielä varsinaista motorista oppimista esim. oppii mikä ei toimi. Tämän vuoksi motorista oppimista tutkittaessa tehdään usein pysyvyys tai taidon siirtovaikutus testejä. Voi olla tilanne, jossa toisen ryhmän suorituskky harjoitusjakson aikana kehittyy enemmän toisella harjoitusryhmällä, kun taas harjoitusjakson jälkeisessä pysyvyydestissä hitaammin suorituskvyssä harjoitusjakson aikana kehittynyt ryhmä suoriutuukin tehtävästä paremmin (Merbah & Meulomans 2011), mikä nähdään suorituskvyn ja oppimisen erona.

Taito, taitavuus, suorituskvyn muutokset ja motorinen oppiminen ovat siis eri asioita, mutta keskenään linkittyneitä. Erilaisia viitekehyksiä ja näkemyksiä em. konseptien selittämiseksi on kehitetty aikojen saatossa. Kuitenkin riippumatta viitekehuksesta, motorisen oppimisen ja suorituskvyn kehittymisen nähdään olevan seurausta taitoharjoittelusta.

3.2 Taitoharjoittelu

Taitoharjoittelulla tarkoitetaan säännöllistä toimintaa, joka koostuu yksittäisestä tai useista taitoharjoituksista ja, jonka tavoitteena on yleensä motorinen oppiminen eli jossain liiketehtävässä kehittyminen. Taitoharjoitteluohjelman suunnitteluun vaikuttaa mm. harjoitusjakson tavoitteet ja harjoittelijoiden tausta. Merbah & Meulemans (2011) toteavatkin, että yksittäistä kaikille sopivaa harjoitusohjelmaa ei ole olemassa. Yleisimpiä taitoharjoittelun muuttujia on harjoiteltu tehtävä ja sen vaikeus, harjoittelun kesto ja toistojen määrä, harjoittelun organisointi, väsymys ja palaute.

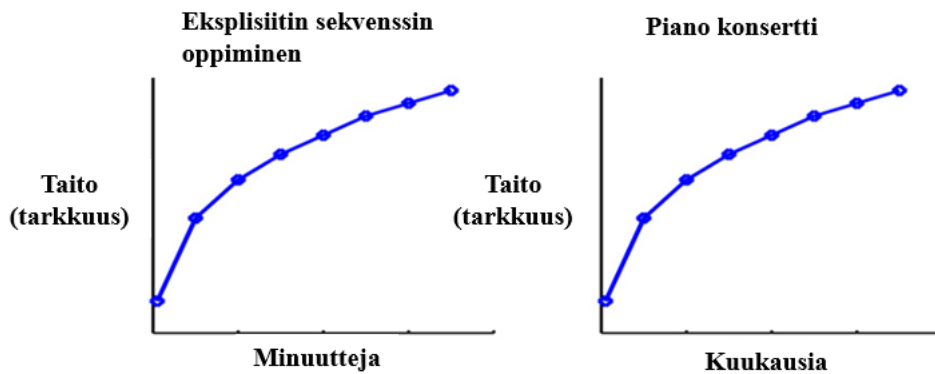
Harjoittelun kesto on hyvin vaihteleva tilanteen mukaan. Eksperttiyys urheilulajissa voi vaatia yli vuosikymmenen harjoittelua ja kokemusta (Ericsson 2008), mutta motorista oppimista tutkitaan myös vain yksittäisen (Chua ym. 2019) tai muutaman harjoituskerran yhteydessä (Wang ym. 2022). Lyhyissä laboratoriotutkimuksissa tehtävä on usein hyvin yksinkertainen ja erilainen jokapäiväisistä tilanteista, mikä mahdollistaa kehittymisen havaitsemisen lyhyellä

ajanjaksolla (Merbah & Meulemans 2011). Yleisesti suurempi harjoitusmäärä johtaa parempiin oppimistuloksiin, jos muut asiat harjoittelussa on vakioitu. Harjoittelun keston kanssa tulee huomioida myös motorisen oppimisen nopea ja hidas vaihe (kuva 2). Nopea vaihe on harjoittelun alkuvaiheessa ja muutoksia suorituskyyvyssä voidaan havaita jo yhden harjoituskerran aikana, kun taas myöhemmin ilmenevässä hitaassa vaiheessa vaaditaan useampia harjoituksia kehityksen havaitsemiseksi. Nopean ja hitaan vaiheen kesto vaihtelee tehtävän monimutkaisuuden mukaan, esim. nopean vaiheen kesto voi vaihdella minuuteista kuukausiin. (Dayan & Cohen 2012)

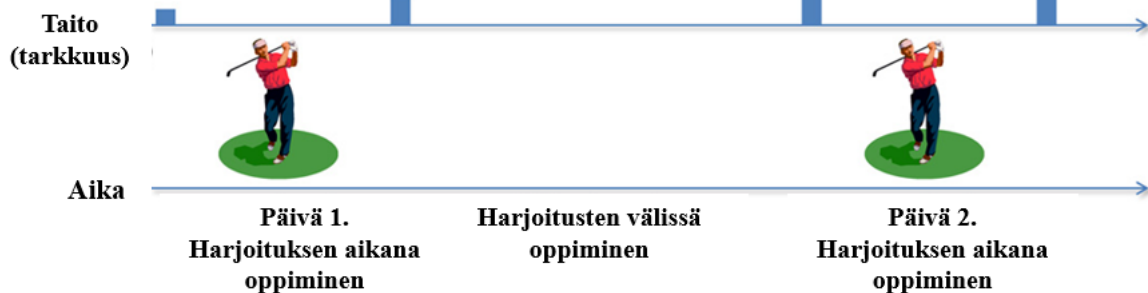
A.



B.



C.



KUVA 2. Motorisen oppimisen eri vaiheet. (A) Motorinen oppiminen voidaan jakaa nopeaan ja hitaaseen vaiheeseen. (B) Nopean ja hitaan vaiheen kesto voi riippua harjoiteltavasta taidosta. Osan taidoista nopea vaihe voi kestää minuutteja, kun taas toisten jopa kuukausia. (C) Motorinen oppiminen voi tapahtua harjoituksen aikana kuin myös harjoitusten välissä. (Mukaieltu Dayan & Cohen 2012)

Tehtävä ja sen vaikeus voi vaikuttaa motoriseen oppimiseen monella tavalla. Yksinkertainen tehtävä on nopea oppia, kun taas vaikeampi tehtävä vaatii enemmän aikaa ja toistoja. Tehtävän vaikeustaso tulisi myös suhteuttaa oppijaan, sillä liian vaikea tai helppo tehtävä ei välttämättä johda oppimiseen. Tehtävän vaikeus on kohtuu abstrakti käsite, ja määrittelyyn on yritetty käyttää tehtävän monimutkaisuutta. Tehtävän monimutkaisuuden määrittämiseen on käytetty mm. liikkeen vapausasteita ja suorituksen variabiliteettia, mutta monimutkaisuusjatkumon määrittäminen on silti hankalaa. Yksittäisiä tehtäviä voidaan kuitenkin verrata tietyillä muuttujilla. Tehtävän on nähty olevan yksinkertainen, jos siinä on vain yksi vapausaste, se voidaan oppia yhdellä harjoituskerralla ja se vaikuttaa 'teennäiseltä' (artificial) (Wulf & Shea 2002) Tehtävän vaikeustasoa muokattaessa progressiivisesti oppijan tason mukaan taidon kehittyminen on nopeampaa kuin toistettaessa samaa tehtävää. Myös tasannevaihe saavutetaan nopeammin samaa tehtävää toistettaessa, eli taidon kehittyminen jatkuu pidempään progressiivisella harjoittelulla. (Christiansen ym 2018)

Harjoittelun haastavuuteen voi vaikuttaa myös harjoitettavien tehtävien järjestyksen organisointi. Vaihtelevan harjoittelujärjestyksen (esim. ABCABC) on havaittu johtavan parempaan oppimisen pysyvyyteen laboratoriokokeissa kuin blokitetun harjoittelun, jossa yhtä tehtävää harjoitellaan useamman kerran ennen toista (esim. AABBC). Blokitetun harjoitusjärjestyksen taas on havaittu johtavan parempaan suorituskäyttöön heti harjoittelun jälkeen. Ekologisia kenttätehtäviä harjoiteltaessa (esim. pallopelit) tulokset eivät ole olleet yhtä yksiselitteisiä. Tämän eron tutkimustuloksissa voi selittää tehtävien monimutkaisuus ja niiden kognitiivinen vaativuus. Laboratoriotutkimuksissa tehtävät ovat usein yksinkertaisia ja nopeasti opittavissa toisin kuin kenttätehtävissä, ja vaihteleva harjoittelujärjestys lisää harjoittelun haastavuutta ja kognitiivista kuormitusta. Harjoittelun on siis oltava sopivan haastavaa suhteessa oppijan tasoon, jos taidon kehittyminen halutaan maksimoida. (Merbah & Meulemans 2011)

Harjoittelun haastavuuden lisäksi harjoitusjärjestyksen mahdollisiin vaikutuksiin voi vaikuttaa retroaktiivinen interferenssi ja tarkkaavaisuuden kohdentaminen. Retroaktiivisella interferenssilla tarkoitetaan myöhemmin harjoiteltujen tehtävien aiheuttamaa interferenssiä aiemmin harjoiteltujen tehtävien oppimiseen. Eli blokitetussa harjoittelussa (AABBC) tehtävä C opitaan parhaiten, sillä sen harjoittelulla on interferenssiefekti myöhemmin harjoiteltuihin tehtäviin. (Merbah & Meulemans 2011) Tarkkaavaisuuden kohdentamisella kehon ulkopuolelle on havaittu olevan hyötyä taidon oppimiseen. Vaihteleva harjoitusjärjestys (esim.

heittotehtävissä heiton pituuden vaihtelu) voi itsessään lisätä tarkkaavaisuuden kohdentamista kehon ulkopuolelle, millä voi olla positiivinen vaikutus motoriseen oppimiseen. (Chua ym. 2019)

Taidon oppimiseen ja suorituskyykyyn voi vaikuttaa elimistön tila. Väsymyksen lisääntyessä suorituskyyky keskimäärin laskee, mutta harjoittelemalla väsyneenä voidaan vähentää väsymyksen vaikutuksia. Väsyneenä harjoittelu ei välttämättä paranna suorituskyykyä 'ilman väsymystä' ainakaan taitavilla ja kokeneilla tutkittavilla (Alder ym. 2019). Samoin lisääntynyt ahdistus voi laskea suorituskyykyä harjoiteltaessa ja pysyvyydestissä, mutta ahdistuneena harjoittelu vähentää ahdistuksen aiheuttamaa suorituskyykyyn laskua testitilanteessa (Lawrence ym. 2014).

Branscheidt ym. (2019) tutkivat väsymyksen vaikutusta motoriseen oppimiseen voimantuotosäätelytehtävissä. Tutkittavat jaettiin kahteen ryhmään: kontrolliryhmä ja väsyttävä ryhmä. Väsyttävä ryhmä teki väsytyksenä maksimaalisen isometrisen supistuksen, jonka aikana voimantuotto putosi n. 60 %: a. Tämän jälkeen molemmat ryhmät harjoittelivat voimantuotosäätelytehtävää kahtena peräkkäisenä päivänä. Väsyttetyt ryhmän oppimistulokset olivat heikompia molempina päivinä harjoitellulla kädellä ja myös siirtyvyydestissä harjoittelemattomalla kädellä. Väsyttetyt ryhmän virheet johtuivat pääasiassa liian suuresta voimantuotosta (overshoot errors). Väsyttetyt ryhmän oppimisnopeus oli samalla tasolla kuitenkin kolmantena harjoituspäivänä. Tutkijat toistivat kokeen uusilla tutkittavilla, mutta tällä kertaa väsyttetyt ryhmän M1 osaa aivokuoresta häirittiin toisteisella transkraniaalisella magneettistimulaatiolla (rTMS) ensimmäisen päivän harjoittelun jälkeen, minkä on todettu heikentävän motorisen oppimisen pysyvyyttä. Uudessa tutkimuksessa oli myös väsyttämätön kontrolli sekä väsyttävä kontrolli, joka sai saman stimulaation eri osaan aivoja (plasebo). Tässä kokeessa väsyttetyt ryhmien oppiminen oli ensimmäisenä päivänä keskenään samankaltaista ja matalampaa kuin väsyttämättömän ryhmän, mutta toisena päivänä rTMS:n M1:lle saama ryhmä oppi paremmin kuin plasebon saanut ryhmä ja oppiminen oli samankaltaista kuin väsyttämättömän ryhmän. (Branscheidt ym. 2019)

Branscheidt ym. (2019) siis havaitsivat väsymyksen heikentäneen oppimista sekä akuutisti että seuraavana harjoittelupäivänä ja motorisen oppimisen pysyvyyttä heikentävän rTMS stimulaation nopeuttaneen väsyttetyt ryhmän oppimista toisena päivänä verrattuna plaseboryhmään. Ensimmäisen päivän heikomman oppimisen/suorituskyykyyn ja liian suuren

voimantuoton kirjoittajat arvelivat johtuvan sensorisen palautteen muutoksista väsytystehtävän seurauksena. Toisen harjoituspäivän madaltuneen oppimisen plaseboryhmässä kirjoittajat arvelivat johtuneen oppimisesta ja muistojen luomisesta väsyneenä, mikä johti epäoptimaaliseen motoriseen ohjaukseen väsymyksen puuttuessa toisena päivänä ja hidasti oppimisprosessia. Tätä kantaa vahvistaa havainnot toisesta kokeesta, jossa oppimisen pysyvyyttä häiritsemällä tTSM:lla oppiminen toisena päivänä ei ollut madaltunut. (Brandscheidt ym. 2019)

3.3 Taitoharjoittelun adaptaatiot

3.3.1 Taitoharjoittelun hermostolliset adaptaatiot

Taitoharjoittelun hermostollisia adaptaatioita on useita ja niiden roolit muuttuvat taitoharjoittelun etenemisen myötä. Hermostollisia muutoksia ja adaptaatioita kutsutaan yleisellä tasolla neuroplastisuudeksi (Tallent ym. 2021). M1:n rooli taidon oppimisessa liittyy todennäköisesti taidon varastoimiseen. Eli harjoittelun kautta opitut taidot säilyvät M1:ssa, josta ne aktivoidaan käyttöön. Taitoharjoittelun on havaittu lisäävän kortikospinaalista ärsytettävyyttä ja aiheuttavan pitkäaikaisen potentiaation kaltaista plastisuutta (LTP). LTP:n aikana uusi opittu taito on altis häirinnälle, esim. samankaltaisen taidon harjoittelu. LTP:n häivyttäminen M1:lta stimulaation avulla myös häiritsee taidon varastoitumista ja johtaa heikompaan oppimistulokseen taidon pysyvyydestissä verrattuna ei häirittyyn kontrolliin. (Cantarero ym. 2013)

Motorisella aivokuorella taitoharjoittelu aiheuttaa synapsien muutoksia, synaptogeneesia, neuronien myelinaatiota sekä liikerepresentaation uudelleenorganisointumista. Rottien M1:lla havaittiin synapsien muutoksia harjoittelun alkuvaiheessa. Olemassa olevat eksitoivat synapsit vahvistuivat, kun taas inhiboivat synapsit heikkenivät reseptorien määrän ja välittäjäaineiden vapautumisherkkyuden muutoksien myötä. (Kida ym. 2016) Xu ym. (2009) havaitsivat hyvin nopeaa neuroplastisuutta rottien aivokuorella oppimisen myötä. Tunti uuden kurotustehtävän harjoittelun alkamisesta enemmän uusia postsynaptisia dendriittien okamaisia ulokkeita (dendritic spine) havaittiin harjoittelusta tassusta kontralateraalilla aivokuorella verrattuna harjoittelemattomaan kontrolliryhmään sekä kahteen harjoitteluryhmään, joiden toiminta ei

johtanut oppimiseen. Tutkijat arvelivat, että uuden oppiminen ja taidon 'hiominen' on tärkeä komponentti aivojen plastisuuden alkamisessa. Samassa tutkimuksessa tarkasteltiin dendriittien muutoksia myös pidemmällä aikavälillä. 2 päivän harjoittelun jälkeen havaittiin myös kiihtynyttä dendriittien ulokkeiden poistoa verrattuna kontrolliryhmään. Uusien dendriittisten okahaarakkeiden kehittyminen oli selkeästi kiihtynyttä harjoitusryhmällä taitotason kehittymisen ajan (0–4 pvä) verrattuna loppuharjoittelujaksoon (5–16 pvä), jonka aikana suorituksen taitavuus ei enää kehittynyt. 16 päivän tarkastelujakson lopussa havaittiin harjoitelleen ryhmän dendriittisten ulokkeiden 'tiheyden' palanneen lähtötilanteeseen, mikä todennäköisesti johtui kiihtyneestä ulokkeiden poistumisesta. Taitoharjoittelun myötä stabiloituneen dendriittiset okamaiset ulokkeet (0–4 pvä harjoittelu) säilyivät paremmin kuin myöhemmin kehittyneet uudet ulokkeet taitoharjoitteluryhmässä (5–16 pvä harjoittelu) ja myös verrattaessa kontrolliryhmään. 4 kk tauon jälkeen taitotaso ja dendriittiset okamaiset ulokkeet olivat säilyneet taitoharjoitteluryhmällä. (Xu ym. 2009)

Neuronien myelinaatiolla tarkoitetaan myeliinin kertymistä aksonien ympärille. Myeliini eristää aksonin ja kiihdyttää sähköimpulssin kulkua hermossa. Eläimillä on oppimisen aikana havaittu myeliinikerroksen muokkausta aksoneissa, jotka ovat aktiivisia oppimisessa. Oppimisen alkuvaiheessa myeliini aktiivisten aksonien ympärillä väheni, kun taas oppimisen edetessä myeliinikerroksesta tuli yhtenäisempi kuin alkuvaiheessa. Kirjoittajat arvelivat, että myeliinin väheneminen oppimisen alkuvaiheessa voi liittyä ajoituksen muutoksiin oppimisen alkuvaiheessa, aksonin lisääntyneeseen energiantarpeeseen tai uusien yhteyksien mahdollistamiseen. Oppimisen edetessä myeliinia kuitenkin kertyy aksonin ympärille enemmän kuin ennen harjoittelua, mikä mahdollistaa nopean sähköimpulssin johtamisen. (Bacmeister ym. 2022) Ihmisillä keskushermoston muutoksia on tutkittu lähinnä kuvantamalla, mutta viime vuosina menetelmien kehittyessä on saatu näyttöä myös ihmisillä tapahtuvasta myelinaatiosta osana aivojen valkoisen materian plastisuutta (Kirby ym. 2022).

Kortikaalisella liikerepresentaatiolla tarkoitetaan motorisen aivokuoren aluetta, jota stimuloimalla saadaan aikaan liikettä tietyllä alueella. Kortikaalisen liikerepresentaation on havaittu muuttuvan harjoittelun seurauksena. Kurotustehtävää harjoitelleilla rotilla kurottaneen etutassun distaalisen lihaksiston kortikaalisen liikerepresentaation alue laajeni merkittävästi 30 päivän kurotusharjoittelun jälkeen, eli laajemmalla alueella aivoja saatiin sähköstimulaation avulla liikettä etutassussa kuin ennen harjoittelua. (Remple ym. 2001) Samoin liikerepresentaation laajenemisen yhteydessä on havaittu myös kaksoisresponsien

representaation kasvua apinoissa. Eli samalla stimulaatiolla saatiin liikettä 2 tai 3 nivelessä. (Nudo ym. 1996)

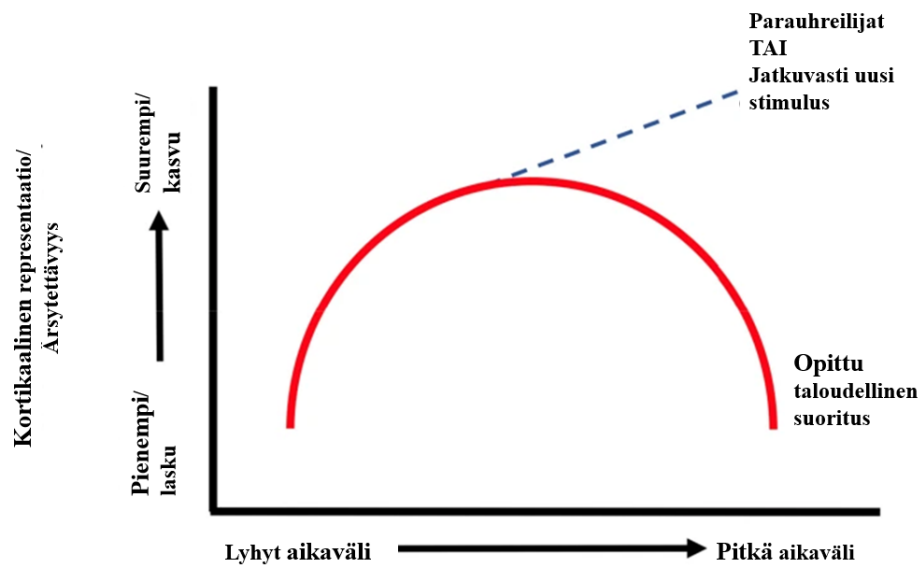
M1:n liikerepresentaation kasvua motorisen oppimisen seurauksena on havaittu ihmisillä TMS:n avulla. 5 päivän (2 h/pvä) hienomotorisen tehtävän harjoittelun jälkeen Pascual-Leone ym. (1995) havaitsivat M1:n liikerepresentaation kasvua. Poikkileikkaustutkimuksissa paraurheilijalla on havaittu selkeää alavartalon lihaksiston M1:n liikerepresentaation kasvua verrattuna kontrolliryhmään (Nakagawa ym. 2020). Lisäksi eliittitason mailapelaajilla on havaittu pelaavaa kättä ohjaavan M1:n liikerepresentaation muutoksia verrattuna ei dominoivaan käteen (Pearce ym. 2000).

Ihmisillä on noninvasiivisesti TMS:n avulla havaittu myös kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvua ja kortikospinaalisen inhibition laskua. Ljubisavljevicin (2006) mukaan kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvu ja kortikaalisen inhibition lasku on tutkimuksissa assosioitu motorisen oppimisen kanssa. Havaittuja muutoksia kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä on yleensä perusteltu solukalvojen ärsytettävyyden ja synapsien voimakkuuksien muutoksilla. Toinen mahdollisuus on, että havaitut muutokset voivat indikoida tilaa, joka on aivoille edullinen oppimisen kannalta (kuin LTP), jolloin kortikospinaalinen ärsytettävyyden kasvu ja kortikaalisen inhibition lasku olisivat tärkeitä tehokkaalle taidon oppimiselle. Tarkkaa merkitystä kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvun ja motorisen oppimisen yhteydelle ei kuitenkaan tiedetä. (Ljubisavljevic 2006)

Christiansen ym. (2020) havaitsivat kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvua uuden harjoitustehtävän seurauksena, minkä nähdään ainakin osittain aiheutuvan aivojen plastisista muutoksista. Harjoittelun jatkuessa kortikospinaalinen ärsytettävyys ei enää kasvanut harjoittelun jälkeen samaa tehtävää harjoitelleella ryhmällä, mutta vaikeustasoa kasvatetulla ryhmällä kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvua harjoittelun jatkon seurauksena havaittiin. (Christiansen ym. 2020) Tehtävän uutuudella tai subjektiivisella vaikeustasolla voi siis olla vaikutus havaittavaan kortikospinaalisen ärsytettävyyden muutokseen.

Tallent ym. (2021) esittivät mahdollisen teorian motorisen oppimisen neuraalisten adaptaatioiden muutoksille harjoittelun aikana (kuva 3). Harjoittelun alkuvaiheessa kortikospinaalinen ärsytettävyys ja liikerepresentaatio kasvavat merkittävästi oppimisen myötä. Ilman jatkuvaa progressiota tai uutta stimulusta taitoharjoittelussa muutokset tasaantuvat tai

taantuvat, mikä johtaa taidolle tärkeiden synapsien toiminnan taloudellisuuden kasvamiseen. (Tallent ym. 2021) Tallentin ym. (2021) teoriaa tukee havainnot vähenevistä kortikospinaalisen ärsytettävyyden muutoksista taitoharjoittelun edetessä (Christiansen ym. 2020), havainnot vain harjoitellulle tehtävälle merkityksellisten synapsien vakiintumisesta rottien aivokuorella (Xu ym. 2009) ja havainnot huippu-urheilijoiden vähentyneestä aivoaktiivisuudesta liiketehtävässä verrattuna amatööriurheilijoihin (Tallent ym. 2021).



KUVA 3. M1:n muutokset motorisessa oppimisessa suhteessa harjoittelun määrään. (Mukailtu Tallent ym. 2021)

Motoriseen oppimiseen liitetyt neuraalisen plastisuuden prosessit ovat siis hyvin nopeita ja muutoksia voidaan havaita jo 1 harjoituskerran jälkeen. Erilaisia muutoksia voidaan havaita eri aikajännteillä ja adaptaation päätyminen, kun taito on opittu, voi johtaa oppimisvaiheessa havaittujen muutosten regressioon.

3.3.2 Taitoharjoittelun toiminnalliset adaptaatiot

Taitoharjoittelun toiminnalliset muutokset ovat hyvin ilmaistu Willingamin (1998) määritelmässä: taitoharjoittelun adaptaatiot ilmenevät usein liikkeen tarkkuutena ajassa ja tilassa (esim. nopeampi ja tarkempi liike). Usein myös voimantuoton kontrolli kehittyy. Eri tutkimuksissa erilaisia protokollia on käytetty hyvin paljon, ja testaaminen kohdentuu yleensä kyseiseen tehtävään. Taitoharjoittelulle ja sitä seuraavalle motoriselle oppimiselle tyypillisiä

toiminnallisia adaptaatioita harjoitetussa tehtävässä kehittymisen lisäksi ovat suorituskyvyn pysyvyys ja harjoittelun lateraalinen siirtovaikutus.

Suorituskyvyn pysyvyyttä on tutkittu eri pituisilla harjoittelemattomuusjaksoilla. Motoriselle oppimiselle on tyypillistä neuraalisten adaptaatioiden pysyvyys (Xu ym. 2009). Christiansen ym. (2020) havaitsivat 6 viikon harjoittelun jälkeen saavutetun suorituskyvyn säilyneen 8 päivän ajan, mutta laskeneen hieman 14 kuukauden jälkeen. Taitoharjoittelua seuraavat toiminnalliset adaptaatiot ovat siis verrattain pysyviä jopa 14 kk harjoittelemattomuuden jälkeen, mutta täysin samaa tasoa ei säilytetä ilman harjoittelua.

Harjoittelun lateraalisella siirtovaikutuksella tarkoitetaan ilmiötä, jossa vain toisen puolen raajalla harjoiteltaessa havaitaan kehitystä molemmissa raajoissa, mikä on todettu monissa tutkimuksissa. Tähän ilmiöön vaikuttaa linkittyvän vahvasti aivokuori. Harjoittamatonta puolta ohjaavan aivokuoren muutosten on havaittu vaikuttavan oppimiseen harjoittelemattomassa raajassa, kun taas harjoitellutta puolta ohjaavan aivokuoren muutoksilla ei ollut vaikutusta harjoittelemattoman raajan suorituskyyyn. (Lee ym. 2010) Vain toisen puolen harjoittelu aiheuttaa siis muutoksia molemmilla puolilla aivokuorta, ja nämä muutokset voidaan nähdä taitavuuden kehittymisenä.

4 MOTORISEN OPPIMISEN MEKANISMIT VOIMANTUOTON KEHITTYMISESSÄ

Motorista oppimista ja voiman kehittymistä on harvoin tutkittu yhdessä tarkastellen adaptaatioita samaan aikaan. Tähän voi olla osasyynä useiden voimaharjoitteiden/testien verrattainen yksinkertaisuus liikkeenä (esim. isometrinen voimantestaus, Wulf & Shea 2002), minkä vuoksi motorisen oppimisen rooli voidaan nähdä pienenä tehtävän kehittämisessä. Tutkimusmenetelmien kehittyessä on kuitenkin saatu enemmän näyttöä mahdollisista yhtäläisyyksistä motorisen oppimisen ja voimaharjoittelun neuraalisten adaptaatioiden välillä.

Kortikospinaalisen ärsytettävyyden akuuttia vastetta voima- ja taitoharjoitteluun on tutkittu kahdessa tutkimuksessa. Mason ym. (2019) ja Leung ym. (2015) havaitsivat molemmat samankaltaisen kortikospinaalisen ärsytettävyyden muutoksen taito- ja voimaharjoitteluryhmien välillä, kun voimaharjoittelun toistojen kesto oli määritetty ja metronomi tahditti liikettä. Leungin ym. (2015) tutkimuksessa muutoksia ei havaittu voimaharjoitteluryhmässä, joka teki toistot omaan tahtiin. Samoin Leungin ym. (2017) tutkimuksessa havaittiin taito- ja metronomilla tahditetun voimaharjoittelun nostavan kortikospinaalista ärsytettävyyttä 2 ja 4 viikon harjoittelun jälkeen, kun taas omaan tahtiin tehneellä ryhmällä ei havaittu eroja.

Taito- ja voimaharjoittelua on tutkittu samassa tutkimuksessa myös rotilla. Remple ym. (2001) tutkivat rotille uudella kurotustehtävällä taito- ja voimaharjoittelun vaikutusta eturaajan kortikaaliseen liikerepresentaatioon. Taitoharjoitteluryhmällä tehtävänä oli kurotus ja ohuen pastan rikkominen, kun taas voimaharjoitteluryhmällä oli sama kurotustehtävä, mutta pastan rikkomiseen vaadittu voima kasvoi progressiivisesti harjoittelujakson ajan. Molemmilla harjoitusryhmillä havaittiin samankaltaista etutassun distaalisen lihaksiston liikerepresentaation kasvua, mutta kutistumista proksimaalisen lihaksiston liikerepresentaatioissa. Tämä johti tutkimusryhmän lopputulokseen, että vain taitoharjoittelu johtaa kortikaaliseen liikerepresentaation uudelleenorganisointumiseen. Lopputulosta perusteltiin sillä, että tutkijoiden mielestä voimaharjoitelleella ryhmällä olisi pitänyt näkyä myös proksimaalisen lihaksiston liikerepresentaation kasvua, jotta voimaharjoittelun olisi voinut nähdä aiheuttavan liikerepresentaation uudelleenorganisointumista. (Remple ym. 2001)

Remplen ym. (2001) tutkimuksessa on kuitenkin puutteita. Tutkimuksessa ei tarkasteltu rottien eturaajan lihaksiston toimintaa kurotustehtävässä, joten johtopäätöstä proksimaalisen lihaksiston roolista voimaharjoitteluryhmällä tukee vain heidän hypoteesinsa. Tutkimustuloksen voi myös tulkita uuden tehtävän aiheuttaneen kortikaalisen liikerepresentaation uudelleenorganisoidumista riippumatta oliko tehtävässä vastusta tai ei, mikä taasen ei kerro voimaharjoittelun aiheuttamasta aivojen plastisuudesta itsessään. Samankaltaisen tutkimustuloksen ihmisillä, mutta toiseen suuntaan, havaitsivat Carroll ym. (2002). Ihmisillä yksinkertainen dynaaminen sormen koukistajan voimaharjoitus tai vastaavan liikkeen harjoittelu ilman kuormaa ei vaikuttanut kortikospinaaliseen ärsytettävyyteen kummassakaan ryhmässä, huolimatta voimaharjoitteluryhmän voimantuoton kehittymisestä. (Carroll ym. 2002)

Voimaharjoittelututkimuksissa, joissa on havaittu kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvua, on myös usein käytetty metronomia tahdittamaan lihassupistuksia (Kidgell ym. 2010; Leung ym. 2017; Mason ym. 2020). Myös isometrisellä maksimivoimaharjoittelulla (Griffin & Cafarelli 2007) ja ballistisella voimaharjoittelulla (Beck ym. 2007) on havaittu kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvua harjoittelun jälkeen. Toisaalta esim. Latella ym. (2011) eivät havainneet kortikospinaalisen ärsytettävyyden muutoksia voimaharjoittelun jälkeen, mutta heidän harjoitusliikkeensä oli jalkaprässi ja mittaus oli rectus femoriksesta. Rectus femoriksen rooli jalkaprässissä voi jäädä pieneksi samanaikaisen polven ja lonkanojennuksen vuoksi. Voimaharjoittelu- ja testausprotokolla voi siis merkittävästi vaikuttaa havaittaviin muutoksiin.

Voimaharjoittelun ja motorisen oppimisen kortikospinaaliset adaptaatiot TMS:n/MEP:n avulla tarkasteltuna voivat olla hyvin samankaltaisia. Motorista oppimista on myös tutkittu hyvin samankaltaisella asetelmalla kuin voimaharjoittelua. Muellbacher ym. (2001) tutkimuksessa selvitettiin ballistisen ja tasaisen voimantuoton eroja kortikospinaalisiin adaptaatioihin. Tutkimuksessa oli 2 koeryhmää, kontrolliryhmä sekä 3 tutkittavan sivuryhmä. Toinen koeryhmistä harjoitteli räväkkiä (brisk) isometrisiä etusormen ja peukalon puristuksia, joissa tavoitteena oli tuottaa voimaa nopeasti (EMG:n kasvu alle 50 ms) ja pitää EMG-signaalin muoto samanlaisen supistuksien välillä. Toinen koeryhmistä oli tasaisen voimantuoton ryhmä, joilla tehtävänä oli tuottaa voimaa rauhallisemmin (EMG kasvu 300–500 ms), ja supistuksen EMG-signaalin keston tuli olla 500–1000 ms. Molempia ryhmiä tahditti metronomi. Molemmat ryhmät harjoittelivat tehtävää 60 min, joka oli jaettu kahteen osaan 15 min tauolla. Hitaampaa

voimantuottoa harjoitellut ryhmä ei kehittynyt harjoittelun jälkeen, mutta nopeampaa voimantuottoa harjoitellut ryhmä kehittyi merkittävästi voimantuottonopeudessa ja voimantuotossa 30 ja 60 min harjoittelun jälkeen verrattuna testeihin ennen harjoitusta. 3 tutkittavan sivuryhmä harjoitteli ballistista tehtävää myös ilman palautetta (EMG-käyrä) tai verbaalista kannustusta, ja tällä ryhmällä voimantuottonopeus jopa laski. Kontrolliryhmän, joka teki testit mutta ei harjoitusta, voimantuotossa ei havaittu muutoksia. TMS:n avulla luotu MEP kasvoi ballistisella harjoitusryhmällä, mutta muutoksia ei havaittu, kun stimulaatio annettiin keskushermoston matalammille tasoille, mikä viittaa muutoksiin M1:lla. Osa ballistisen harjoittelun ryhmästä suoritti saman harjoitusprotokollan myöhemmin uudestaan, mutta tilastollisesti merkitseviä muutoksia voimantuotossa (+9 %) tai MEP:ssa ei havaittu toisen harjoituskerran jälkeen. (Muellbacher ym. 2001)

Muellbacherin ym. (2001) tutkimus osoittaa, että voimantuotto voi myös kehittyä harjoittelulla, joka voidaan nähdä enemmän taitoharjoitteluna. Em. tutkimuksessa tärkeinä tekijöinä voimankehittymisessä ja kortikospinaalisen ärsytettävyyden muutoksissa olivat harjoituksen vieraus (uusi harjoite), supistuksen nopeus ja palaute. Isometrisessä voima-/taitoharjoittelussa palautteen rooli voi korostua, sillä harjoittelija ei saa selkeää visuaalista tai proprioseptista palautetta tehtävän suorittamisesta, vaikka palautteen on havaittu vaikuttavan myös dynaamisen voimantuoton kehittymiseen (Weakley ym. 2019). Tehtävän vieraus tutkittaville voi myös vaikuttaa kortikospinaalisen ärsytettävyyden muutoksiin. Toisella harjoituskerralla ärsytettävyyden muutoksia ei enää havaittu. Muellbacher ym. (2001) uskoivat tämän johtuvan tehtävän ylioppimisesta (overlearning), mikä on myös myöhemmin havaittu toisessa tutkimuksessa toistettaessa samaa harjoitetta, vaikka suorituskyvyn kehittyminen jatkuisikin (Christiansen ym. 2018). Supistuksen nopeus itsessään ei vaikuta kuitenkaan olevan määrittävä tekijä kortikospinaaliseen plastisuuteen. Nuzzo ym. (2016) havaitsivat TMS:n MEP:n kasvua myös hitaamman isometrisen voimantuottotehtävän jälkeen, mutta tässä tutkimuksessa oli hyvin selkeät parametrit supistukselle (2 s voimankasvu, 75 % maksimista) ja mahdollisesti suurempi voimantuotto. Aiempi motorista taitoa ja voiman kontrollia selvittänyt tutkimus havaitsi hitaan voimantuoton seurauksena muutoksen, jossa motoriset yksiköt aktivoidaan myöhemmin suhteessa tuotettuun voimaan ja antagonistin aktiivisuus laskee, mikä voi selittää havaitun neuroplastisuuden hitaan voimantuoton harjoittelun jälkeen (Bernardi ym. 1996).

Edellä esitettyjen tutkimushavaintojen perusteella voimaharjoittelulla ja taitoharjoittelulla voidaan havaita samankaltaisia muutoksia kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä, mutta

voimaharjoittelu voi vaatia tiettyjä taitoharjoittelun kaltaisia komponentteja aiheuttaakseen muutoksia. Yksinkertainen itse tahditettu kyynärpäähän koukistus vapailla painoilla ei ole aiheuttanut muutoksia kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä, mutta metronomin tahdittamana muutoksia on havaittu (Leung ym. 2017). Samoin ballististyyppisen voima- ja taitoharjoittelun (Muellbacher ym. 2001; Beck ym. 2007) sekä maksimaalisen voimaharjoittelun (Griffin & Cafarelli 2007) on havaittu aiheuttavan kortikospinaalisen ärsytettävyyden muutoksia. Myös hitaamman submaksimaalisen voimantuoton harjoittelulla on havaittu kortikospinaalisen ärsytettävyyden kasvua, kun tehtävällä on ollut riittävän suuri voimantuoton vaade sekä selkeä voiman kiihtymisen parametri (Nuzzo ym. 2016). Voi olla, että voimaharjoittelun pitää olla riittävän uudenlaista/haastavaa tai vaatia 'kovaa yrittämistä/keskittymistä' (esim. riittävä voimantuoton vaade) muutoksien havaitsemiseksi kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä. Näidenkin ehtojen täytyessä havaittavat muutokset voivat tietyn ajanjakson jälkeen regressoitua Tallentin ym. (2021) teorian mukaan. Samankaltaisesti taitoharjoittelussa jo opitun tehtävän toistaminen ei välttämättä johda parempaan oppimiseen, aivojen rakenteen muutoksiin (Xu ym. 2016) tai kortikospinaalisen ärsytettävyyden muutoksiin (Christiansen ym. 2018). Myös uudenlaisen tehtävän on havaittu vaikuttavan M1:n liikerepresentaation muutoksiin riippumatta voimantuoton vaatimuksesta tehtävän suorittamiseen (Remple ym. 2001). Toisaalta suorituskkyky taitotehtävässä voi kehittyä myös ilman muutoksia kortikospinaalisessa ärsytettävyydessä, mikä voi johtua oppimisen hitaasta komponentista.

Samankaltaisuuksia taito- ja voimaharjoittelun toiminnallisissa adaptaatioissa ovat väsymyksen vaikutus, lateraalinen siirtovaikutus sekä adaptaatioiden nopeus ja pysyvyys. Perinteisessä voimaharjoittelussa väsymyksen kertyminen on hyvin tyypillistä (Tufano ym. 2016), mikä myös omalta osaltaan voi vaikuttaa harjoitusmäärään ja mahdollisesti adaptaatioihin (Pareja-Blanco ym. 2020). Lihaksen paikallinen väsytyksen ennen taitoharjoittelun aloittamista (Brandscheidt ym. 2019) ja taitoharjoittelun aikana (Siekirk ym. 2019) voi vaikuttaa negatiivisesti motoriseen oppimiseen ja taidon pysyvyyteen. Brandscheidt ym. (2019) arvelivat havaintojensa johtuneen tehtävän vaatimasta erilaisesta neuraalisesta käskytyksestä väsyneenä kuin ilman väsymystä tehtäessä ja siitä seuranneesta epäoptimaalisesta oppimisesta. Lisäksi Rodriguez-Rosell ym. (2020) havaitsivat voimaharjoittelun toiminnallisissa adaptaatioissa edun matalamman väsymyksen ryhmissä harjoittelun alkuvaiheessa, mikä voi kertoa tehokkaammasta motorisesta oppimisesta. Ottaen huomioon myös yksittäisissä lihassoluissa havaittavat aktiivisuuden muutokset väsyttävän lihassupistuksen aikana (Cristova & Kossev 2001), on mahdollista, että väsyttävää voimaharjoitusprotokollaa tehtäessä adaptaatio

kohdistuu enemmän väsyneenä selviytymiseen. Tätä näkökantaa tukee Pareja-Blanco ym. (2020) ja Rodriguez-Rosell ym. (2020) tutkimukset, joissa voimantuoton kasvulle positiivisia neuraalisia adaptaatioita havaittiin vain matalamman väsymyksen ryhmissä, kun tutkimusten ryhmät harjoittelivat samalla suhteellisella kuormalla. Väsymys voi siis vaikuttaa motoriseen oppimiseen ja sitä seuraaviin käyttäytymisen muutoksiin.

Lateraalista siirtovaikutusta on myös havaittu sekä motorisen oppimisen että voimaharjoittelun jälkeen. Aivojen toiminnassa on havaittu lateraalisisä siirtovaikutuksessa samankaltaisia muutoksia voima- ja taitoharjoittelun jälkeen harjoitellulla ja harjoittelemattomalla puolella (Farthin ym. 2007).

Adaptaatioiden pysyvyys ja aikajänne tukee adaptaatioiden samankaltaisuutta. Voimaharjoittelun neuraalisia ja toiminnallisia adaptaatioita voidaan nähdä yhden harjoituskerran jälkeen (Christie & Kamen 2004) samoin kuin taitoharjoittelussa (Brandscheidt ym. 2019). Voimantuoton pysyvyys harjoitetussa tehtävässä on myös samankaltainen kuin taitoharjoittelussa. Weir ym. (1997) havaitsivat harjoittelulle spesifin dynaamisen voimantuoton säilyvän harjoitustauosta huolimatta, kun taas harjoittelulle epäspesifi isometrinen voimantuotto laski harjoittelua edeltäneelle tasolle. Harjoittelun tehtävän suorituskyvyn säilyminen on hyvin samankaltainen ilmiö, mikä on havaittu myös taitoharjoittelun yhteydessä jopa 14 kk tauon jälkeen (Christiansen ym. 2020).

Ottaen huomioon edellä mainitut seikat, on mahdollista, että taito- ja voimaharjoittelun hermostolliset adaptaatiot ovat peräisin samasta lähteestä. Yhtäläisyyksien havaitsemista ja tutkimista monimutkaistaa lihassolun rakenteelliset adaptaatiot ja motorisen oppimisen hidas komponentti. Voiman kehittymisen rakenteelliset adaptaatiot ilmenevät kuitenkin keskimäärin myöhemmin harjoitusjaksolla ja atrofioiduvat nopeammin harjoitustauolla verrattuna neuraalisiin adaptaatioihin, mikä voi mahdollistaa adaptaatioiden erottelun.

5 TUTKIMUSKYSYMYKSET

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää motorisen oppimisen roolia voimankehittämisessä hypertrofisessa maksimivoimaharjoittelussa verrattain yksinkertaisilla voimatehtävillä aiemmin harjoittelemattomilla ihmisillä.

Tutkimuskysymys 1. Eroavatko dynaamisen jalkaprässin ja isometrisen polvenojennuksen voimantuoton muutokset toisistaan harjoitus- ja harjoittelemattomuusjaksojen aikana?

Hypoteesi 1. Kyllä. Voiman kehittymisen on havaittu olevan spesifiä harjoitusmetodille (Spitz ym. 2022), eikä tutkimuksessa harjoitella isometristä voimantuottoa.

Tutkimuskysymys 2. Eroavatko lihasvoiman ja lihaskoon muutokset harjoitusjaksojen ja harjoittelemattomuusjakson aikana?

Hypoteesi 2. Kyllä. Lihasvoiman muutokset ovat todennäköisesti suuremmat harjoittelun alkuvaiheessa, mutta harjoitusjakson edetessä erot todennäköisesti pienenevät (Moritani & DeVries 1979). Harjoitustauolla nähdään todennäköisesti suurempia muutoksia lihaksen koossa kuin voimantuotossa (Räntilä ym. 2021).

Tutkimuskysymys 3. Eroavatko dynaamisen jalkaprässin 1 RM:n ja dynaamisen jalkaprässin harjoituskuormien muutokset toisistaan harjoitus- ja harjoittelemattomuusjaksojen aikana?

Hypoteesi 3. Kyllä. Voimantuoton on havaittu kehittyvän parhaiten harjoitellulla kuormalla (Campos ym. 2002). Motorisen oppimisen ja harjoittelun spesifisyyden periaatteen mukaan voimantuotto kehittyy eniten spesifisti harjoittelussa (Spitz ym 2022).

6 TUTKIMUSMENETELMÄT

6.1 Tutkittavat

Tutkittavat olivat Keski-Suomen alueelta rekrytoituja 18–40-vuotiaita naisia ja miehiä. Tutkimuksen poissulkukriteereinä olivat: aiempi voima- tai kestävyysharjoittelutausta, voimaharjoittelu edellisen 12 kk aikana, kestävyysharjoittelu edellisen 6 kk aikana (yli 2 * 30 min harjoitusta/vko), lihavuus tai alipaino (BMI 18,5-30 kg/m² välin ulkopuolella), ravintolisien käyttö (hiilihydraatti- ja proteiinilisät, kivennäisaineet, vitamiinit ja kalaöljytuotteet olivat sallittuja), aiempi tai säännöllinen lääkitys millä voi olla vaikutus harjoitusvasteeseen ja akuutti tai krooninen sairaus, mikä vaikuttaa sydän- ja verenkiertoelimistöön, hengityselimistöön, tuki- ja liikuntaelimistöön tai endokriiniseen toimintaan. Tutkimuksen aikana tutkittavia ohjeistettiin säilyttämään aiempi fyysinen aktiivisuus.

Halukkaista (n > 300) tutkittavista rekrytoitiin lopulta 55 (naisia: 29, miehiä: 26) esitetokyselyn perusteella parhaiten soveltuvinta. Tähän tutkimukseen sisällytettiin vain toinen tutkimusryhmä, joilla oli harjoittelutauko (n = 28). Näistä keskeytti 8 henkilökohtaisista syistä tai sairastumisen vuoksi. Lopullisessa analyysissä mukana olevien tutkittavien antropometriset tiedot on esitetty taulukossa 1 (n = 20, 9 naista, 11 miestä).

TAULUKKO 1. Tutkittavien antropometriset tiedot. Tulos keskiarvo ± keskihajonta.

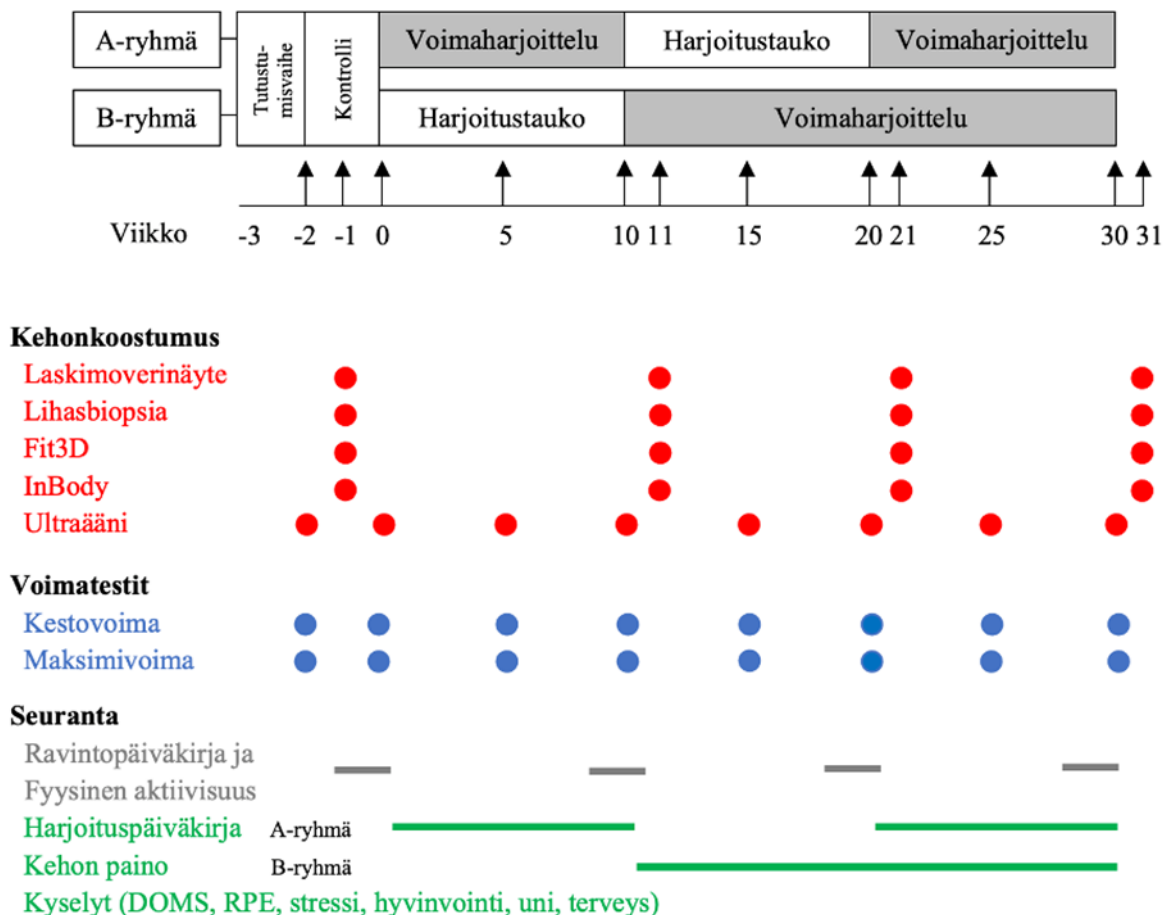
	Ikä (v)	Pituus (cm)	Massa (kg)	BMI (kg/m ²)
n = 20	32,9 ± 5,9	174,2 ± 9,7	78,2 ± 15,2	25,6 ± 3,4

BMI, painoindeksi.

Tutkimukseen osallistuminen oli tutkittaville vapaaehtoista ja tutkittaville kerrottiin mahdollisista tutkimuksesta aiheutuvista haitoista. Tutkittavilla oli mahdollisuus jättäytyä pois tutkimuksesta missä vaiheessa tahansa. Jyväskylän yliopiston eettinen toimikunta antoi lausuntonsa tutkimuksesta ennen sen käynnistämistä.

6.2 Tutkimusasetelma

Tutkimus toteutettiin osan laajempaa projektia. Tutkittavat arvottiin kahteen ryhmään, joista toisella ryhmällä oli harjoitustauko (A-ryhmä) ja toinen ryhmä harjoitteli jatkuvasti (B-ryhmä). A-ryhmällä oli tutkimuksen tutustumisvaiheen jälkeen 10 viikon voimaharjoittelujakso, 10 viikon harjoittelemattomuusjakson ja toinen 10 viikon harjoittelujakso. B-ryhmällä oli tutkimuksen tutustumisvaiheen jälkeen 10 viikon harjoittelemattomuusjakso, jota seurasi 20 viikon harjoittelujakso. Muuten tutkimukseen osallistuneiden ryhmien harjoittelu oli samanlaista. Molemmilla ryhmillä oli samanlainen tutustumis- ja kontrollivaihe sekä voimamittausprotokolla tutkimuksen alussa, lopussa ja harjoitusjaksojen aikana 5 viikon välein. Vain A-ryhmän maksimivoimatestit, harjoituspäiväkirjat ja ultraäänikuvat sisällytettiin tähän tutkimukseen. Tutkimuksen kulku on esitetty kuvassa 4.



KUVA 4. Tutkimuksen aikajana ryhmittäin. Nuolet indikoivat mittausajankohtaa ja niiden alapuolella olevat pallot kertovat mitä mitattiin kyseisellä mittauskerralla. DOMS, viivästynyt lihasarkuus; RPE, koettu kuormittavuus.

6.3 Voimaharjoittelu

Tutustumisvaiheessa tutkittavat kävivät laboratoriolta ohjatusti tutustumassa harjoituspaikkaan, -liikkeisiin ja -laitteisiin. Tutustuminen sisälsi yhden 5–8 toiston sarjan hauiskääntöä ja jalkaprässiä kevyellä kuormalla, joista tutkittavia pyydettiin arvioimaan toistoreservi (RIR, reps in reserve). Sarjojen RIR:a hyödynnettiin ensimmäisessä voimamittauksessa lähestymissarjojen suunnitteluun. Tutustumiskäynnillä myös määritettiin yksilölliset asetukset laitteisiin, joissa niitä tarvittiin (jalkaprässi, polvenojennus, hauiskäännön selkätuki). Laitteasetukset pysyivät samoina loppututkimuksen.

Harjoitusohjelma sisälsi 2 voimaharjoitusta/vko, joissa toistettiin samat liikkeet. Harjoitusten väli ei ollut vakioitu, mutta mahdollisuuksien mukaan pyrittiin vähintään yhteen kokonaiseen lepopäivään harjoitusten välillä. Mikäli tutkittavalla jäi harjoitus/harjoituksia välistä, tuleville viikoille järjestettiin 3 harjoituskertaa viikkoon, jotta kokonaisharjoitusmäärä tutkimusjaksolla ei muuttunut. Ensimmäisen 2 harjoitusviikon aikana harjoitukset olivat kullekin tutkittavalle henkilökohtaisesti ohjattuja tutkijoiden toimesta, jotta tutkittavat oppivat turvalliset ja tehokkaat suoritustekniikat, harjoituspäiväkirjojen täyttämisen, kuormien ja laitteiden säätämisen, harjoitusliikkeiden järjestyksen ja sarjojen välisen palautuksen. Ohjaajina toimivat tutkijat olivat kokeneita voimaharjoittelussa. 2 harjoitusviikon jälkeen loppuharjoitusjakso oli itsenäistä harjoittelua. Itsenäisessä harjoittelussa laboratoriolta oli kerrallaan enintään 6 tutkittavaa ja vähintään yksi tutkijoista, joka seurasi harjoittelua ja auttoi tarvittaessa. Tutkittavat raportoivat tehdyt sarjat harjoituspäiväkirjaan käsin, minkä jälkeen tutkija kirjasi datan sähköiseen harjoituspäiväkirjaan.

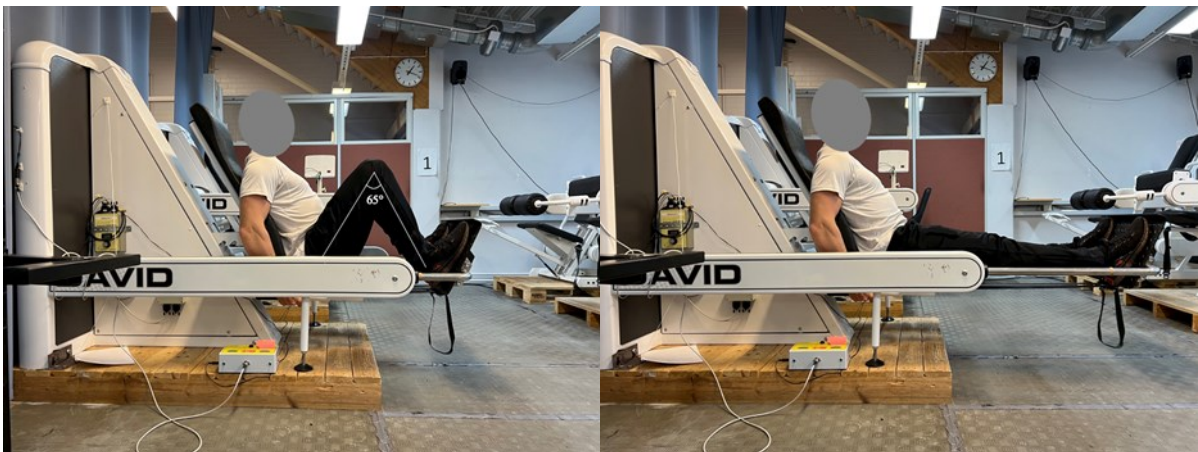
6.3.1 Harjoitusohjelma

Harjoitusohjelma sisälsi 2 voimaharjoitusta viikossa, jotka alkoivat samalla lämmittelyprotokollalla, jonka jälkeen mitattiin esikevennyshypyn lentoaika (3 hyppyä/harjoitus). Tutkittavien kehonpaino mitattiin aina viikon toisen harjoituksen aluksi. Varsinaisessa voimaharjoituksessa liikkeinä oli horisontaalinen jalkaprässi, polvenojennus, penkkipunnerrus Smith-laitteessa, hauiskääntö ja tuettu soutu. Kaikki harjoitusliikkeet olivat bilateraalisia. Harjoitusliikkeet tehtiin lähtökohtaisesti em. järjestyksessä, mutta laboratorion ruuhkautuessa harjoittelun sallittiin alkavan myös penkkipunnerruksella. Tärkeimpänä nähtiin,

että jalkaprässi tehdään ennen polvenojennusta ja hauiskääntö ennen tuettua soutua. Penkkipunnerruksessa tehtiin 3 sarjaa/harjoitus, kun taas muissa liikkeissä tehtiin 4 sarjaa/harjoitus. Harjoituksessa kaikki sarjat oli tarkoitus tehdä samalla kuormalla. Sarjojen ja liikkeiden välillä oli 2–3 min palautus. Toistoja oli 8–10/sarja, joista tutkittavia ohjeistettiin jättämään ensimmäisissä 3 sarjassa RIR 2–3, jotta viimeinen sarja ei jäisi liian lyhyeksi. Viikon toisen harjoituksen viimeinen sarja tehtiin uupumukseen joka liikkeessä riippumatta toistojen määrästä.

Lämmittely. Lämmittely alkoi 3 min kuntopyöräilyllä omavalintaisella vastuksella. Pyöräilyn jälkeen tutkittavat tekivät 10 kehonpainokyykyä, 5 askelkyykyä per jalka, viisi 'mittarimatoa' (alkaa eteentaivutuksesta, josta tutkittavat siirtyivät käsillä punnerrusasentoon ja takaisin) ja viisi polven halausta päkiän varaan noustessa.

Horisontaalinen jalkaprässi. Tutkittavat istuivat jalkaprässilaitteessa (DAVID 210 jalkaprässi, Helsinki, Suomi) selkä kiinni selkänojassa pitäen kahvoista kiinni, ja selkätukea säädettiin jokaiselle tutkittavalle siten, että polvikulma oli lähtöasennossa mahdollisimman tarkasti 65°. Polvikulma mitattiin goniometrillä. Harjoittelussa liike aloitettiin jalat koukussa, josta laitteen painopakkaa nostettiin ojentamalla jalat suoraksi, mikä laskettiin hyväksytyksi toistoksi (kuva 5). Laskuvaiheessa tutkittavia ohjeistettiin jarruttamaan painoa siten, että eksentrisen lihastyö kesti n. 2 s.



KUVA 5. Horisontaalisen jalkaprässin aloitusasento (vasemmalla) ja hyväksytyyn toiston loppuasento (oikealla).

Kahden jalan polvenojennus. Tutkittavat istuivat jalkaprässilaitteessa (DAVID 210 jalkaprässi, Helsinki, Suomi) selkä kiinni selkänojassa pitäen kahvoista kiinni, turvavyö suljettuna ja selkänoja sekä nilkkojen päälle asetettujen rullien korkeus säädettiin sopivaksi. Lähtöasennossa polven tuli olla penkin ulkopuolella, nilkkojen pehmusteiden korkeudella ja polven kulman 90° . Harjoittelussa liike alkoi polvet koukussa, josta polvet ojennettiin suoraksi, mikä laskettiin hyväksytyksi toistoksi (kuva 6). Laskuvaiheessa tutkittavia ohjeistettiin jarruttamaan painoa siten, että eksentrisen lihastyö kesti n. 2 s.



KUVA 6. Polvenojennuksen alkuasento (vasemmalla) ja hyväksytyn toiston loppuasento (oikealla).

Penkkipunnerrus Smith-laitteessa. Penkkipunnerrus tehtiin Smith-laitteessa (Marbo Sport, Starachowice, Puola). Penkkipunnerruksessa tutkittavat pitivät pään, hartiat, selän ja pakarat kiinni penkissä ja jalat maassa. Oteleveyden tuli olla hartioita leveämpi (+30–40 cm), mutta sitä ei vakioitu. Liike alkoi kädet suorina, jonka jälkeen kyynärpäätä koukistamalla ja olkapäätä ojentamalla tanko laskettiin hallitusti koskemaan rintaa. Hyväksytyssä toistossa olkapää koukistuu ja kyynärvarsi ojentuu suoraksi (kuva 7) ja tankoa ei pompautettu rinnalta.



KUVA 7. Penkkipunnerruksen aloitus- ja lopetusasento (vasemmalla) ja ala-asento (oikealla).

Hauiskääntö. Hauiskääntö tehtiin selkä tuettuna. Hartiatuen yläreuna laitettiin lapaluun harjanteen tasolle ja alempi selkätuki ristiluun-suoliluunivelen tasolle. Tutkittava vyötettiin tukeen kiinni vyötäröltä. Liikkeessä käytettiin suoraa levytankoa (7,5 kg tai 20 kg) ja levypainoja (Leoko Oy, Tampere, Suomi). Hauiskäännön aloitusasennossa kädet olivat suorina ja tanko lepäsi reisiä vasten. Hyväksytyssä toistossa tutkittava koukisti kyynärpäätä ja toi tangon leuan alle (kuva 8). Tangon laskua ei vakioitu, mutta tutkittavia ohjeistettiin tuomaan tanko hallitusti lähtöasentoon.



KUVA 8. Hauiskäännön aloitusasento (vasemmalla) ja hyväksyty loppuasento (oikealla).

Tuettu soutu. Tutkittavat istuivat soutilaitteessa (Matrix Fitness MG-PL34 Seated Row, Wisconsin, Yhdysvallat) rintakehä kiinni tuessa. Penkin korkeus säädettiin tutkittavalle sopivaksi, ja suorituksessa käytettiin neutraalia ranteen asentoa. Liike alkoi kädet ojennettuina, ja toisto laskettiin hyväksytyksi, kun tutkittava veti kyynärpäät kylkien tasolle tai niiden yli (kuva X) ja rintakehä pysyi kiinni tuessa (kuva 9). Eksentrisen vaihe ohjeistettiin tekemään hallitusti. Kuormana käytettiin levypainoja (Leoko Oy, Tampere, Suomi).



KUVA 9. Tuetun kulmasoudun alkuasento (vasemmalla) ja hyväksytyyn toiston loppuasento (oikealla).

Harjoituskuormien määrittäminen. Harjoittelun alussa jalkaprässin ja hauiskäännön harjoituskuormat määritettiin jo mitattujen 1 RM tulosten perusteella, kun taas polvenojennukseen, penkkipunnerrukseen ja tuettuun soutuun selvitettiin 3–5 RM tulos ensimmäisellä harjoituskerralla, mitä käytettiin harjoituskuormien määrittämiseen. Mitattu 3–5 RM tulos muutettiin arvoiduksi 1 RM tulokseksi Helmsin ym. (2016) taulukkoa (taulukko 2) käyttäen. Harjoitustauon jälkeen harjoituskuormat määritettiin samalla tavalla. Moninivelliikkeissä (jalkaprässi, penkkipunnerrus, tuettu kulmasoutu) harjoituskuormana käytettiin ensimmäisellä harjoituskerralla 70 %-1RM:sta ja yhden nivelen liikkeissä (hauiskääntö, polvenojennus) 50 %-1RM:sta. Harjoittelussa kuormia säädettiin viikkojen välillä perustuen viikon 2. harjoituksen uupumukseen tehtyjen sarjojen toistomääristä (taulukko 3). Harjoituskuormat rekisteröitiin sekä paperiseen että sähköiseen harjoituspäiväkirjaan. Jalkaprässin harjoituskuorman muutokset saatiin harjoituspäiväkirjoista.

TAULUKKO 2. Prosenttiosuus 1 RM:sta suhteutettuna tehtyihin toistoihin sekä toistoreserviin (RIR) perustuvaan RPE:en (mukailtu Helms ym. 2016).

RPE	Tehtyjen toistojen määrä							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10	100.0 %	95.0 %	91.0 %	87.0 %	85.0 %	83.0 %	81.0 %	79.0 %
9.5	97.0 %	93.0 %	89.0 %	86.0 %	84.0 %	82.0 %	80.0 %	77.5 %
9	95.0 %	91.0 %	87.0 %	85.0 %	83.0 %	81.0 %	79.0 %	76.0 %
8.5	93.0 %	89.0 %	86.0 %	84.0 %	82.0 %	80.0 %	77.5 %	74.5 %
8	91.0 %	87.0 %	85.0 %	83.0 %	81.0 %	79.0 %	76.0 %	73.0 %
7.5	89.0 %	86.0 %	84.0 %	82.0 %	80.0 %	77.5 %	74.5 %	71.5 %
7	87.0 %	85.0 %	83.0 %	81.0 %	79.0 %	76.0 %	73.0 %	70.0 %

RPE, koettu kuormittavuus.

TAULUKKO 3. Uupumukseen tehtyjen sarjojen toistoista määritetyt sarjapainojen korotukset tai vähennykset kilogrammoissa (kg) liikkeittäin.

Toistot	Jalkaprässi	Polvien ojennus	Penkkipunnerrus	Hauiskääntö	Tuettu kulmasoutu
< 5	-7.5	-7.5	-5	-2.5	-2.5
6–7	-5	-5	-2.5	-1	-1.25
8–10	0	0	0	0	0
11–12	2.5	2.5	2.5	1	1.25
13–15	5	5	5	2.5	2.5
16–20	7.5	7.5	7.5	3.5	5
> 20	10	10	10	5	7.5

6.4 Voimatestit

Voimatestit toteutettiin tutkimuksen aikana 7 kertaa (kuva 4). Kerran ennen tutkimusjaksoa ja 5 viikon välein harjoitusjaksojen ajan alkaen viikolla 1. Harjoitusjakson aikana voimantestaus korvasi viikon 2. harjoituksen. Voimatestauskerta sisälsi järjestyksessä ultraäänikuvat oikean käden hauislihaksesta (ei käytetty tässä tutkimuksessa) ja oikean jalan vastus lateraliksesta, lämmittelyyn, esikevennyshyppytestin, maksimaalisen isometrisen oikean jalan polvenojennuksen, 1 RM:n ja toistomaksimitestin jalkaprässissä sekä 1 RM:n ja toistomaksimitestin hauiskäännössä (toistomaksimitestejä ei käytetty tässä tutkimuksessa).

6.4.1 Isometrinen voimantestaus

Isometrinen polvenojennuksen maksimaalinen voimantuotto testattiin kaikilta koehenkilöiltä oikeasta jalasta kustomoidulla voimapenkillä (Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä, Suomi). Tutkittavat istuivat penkkiin siten, että polvinivel tuli penkin reunan yli ja jalka roikkui vapaasti. Tutkittava kiinnitettiin penkkiin vyötärön ympäri tulevalla turvavyöllä ja nilkan remmillä. Nilkan ympärille tuleva remmi säädettiin sopivalle korkeudelle lateraalisen malleolin yläpuolelle. Tutkittavat tekivät penkissä 1 lämmittelytoiston n. 50 %:lla maksimista ennen varsinaista datankeruuta. Mittauksen aikana tutkittava piti penkin reunoista kiinni ja ojensi polveaan niin kovaa kuin pystyi. Tutkittavia rohkaistiin potkaisemaan polvi suoraksi niin kovaa kuin mahdollista ja tutkija kannusti suorituksen ajan. Voimaa mitattiin n. 3 s ajan 3 kertaa. Mittausten välissä oli 1 min tauko. Voimantuotto rekisteröitiin kustomoidulla voima-anturilla (Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä, Suomi) ja Signal 4.11-ohjelmistolla (Cambridge Electronic Gesign Ltd., Iso-Britannia).

6.4.2 Voimatestaus jalkaprässissä

Voimatestaukseen käytettiin samaa jalkaprässiä kuin harjoittelussa. Ennen 1 RM yrityksiä tutkittavat tekivät 2 lämmittelysarjaa: 10 toistoa 40–60 %:lla ja 5 toistoa 60–80 %:lla arvoidusta 1 RM. Lämmittelysarjojen välillä oli 1 minuutin palautus. Tutkittaville ohjeistettiin 1 RM testaus jokaisella voimatestauskerralla ennen 1 RM yrityksiä. Harjoittelusta poiketen 1 RM yritys alkoi jalat ojennettuina (kuva 5). Tutkija auttoi ennen varsinaista yritystä tehtävässä jalkojen ojennuksessa vetämällä jalkatuesta. Varsinainen yritys alkoi tutkijan antamasta merkistä pian jalkojen ojennuksen jälkeen. Tutkittava palautti jalat koukkuun haluamallaan vauhdilla. Kun jalkaprässi oli pysähtynyt ala-asentoon (kuva 5), tutkija antoi äänimerkin, minkä jälkeen tutkija yritti ojentaa jalat. Hyväksytyyn suorituksen kriteerit olivat samat kuin harjoittelussa. Suoritus hylättiin, jos tutkittava aloitti jalkojen ojentamisen ennen äänimerkkiä, jolla pyrittiin eliminoimaan painopakan ponnahduksen vaikutus ja varmistamaan täysi liikelaajuus. 1 RM yritysten välissä oli 3 minuutin tauko. Kuormaa lisättiin tutkijan ja tutkittavan arvion mukaan. 1 RM määritettiin 2,5 kg tarkkuudella, joten ensimmäisen yrityksen tai yli 2,5 kg lisäyksen jälkeisen yrityksen epäonnistuttua kuormaa vähennettiin 1 RM arvon haarukoinnissa. Onnistuneen suorituksen jälkeen kuormaa lisättiin epäonnistumiseen saakka. 1

RM pyrittiin selvittämään 3–5 yrityksen aikana. Tutkija kannusti tutkittavaa jokaisella yrityksellä.

1 RM testauksen ja toistomaksimitestin välillä oli 3 minuuttia. Kontrolliviikolla ja ensimmäisellä harjoitusviikolla testissä käytettiin 85 %:a toistomaksimitestiä edeltäneestä 1 RM testin tuloksesta. Lopuissa toistomaksimitesteissä käytettiin 85 %:a ensimmäisen harjoitusviikon 1 RM tuloksesta, jotta testeissä olisi sama absoluuttinen kuorma. Toistomaksimitestin protokolla vastasi muuten 1 RM testiä, mutta yhden toiston sijaan tutkittavat tekivät yhden sarjan uupumukseen saakka. Lyhyt hengitystauko oli sallittu toistojen välissä. Aikataulullisten syiden vuoksi sarjan maksimipituudeksi määritettiin 100 toistoa, minkä jälkeen sarja keskeytettiin.

6.4.3 Voimatestausta hauiskäännössä

Jalkaprässissä tehtyjen voimamittausten jälkeen tutkittavien annettiin levätä 10–15 min ennen hauiskääntö testien aloittamista. Hauiskääntötestin lämmittelyprotokolla oli sama kuin jalkaprässissä. Hauiskäännön voimatestauksessa toistot hyväksyttiin samoilla perusteilla kuin harjoittelussa (kuva 8). Hauiskäännön 1 RM testissä tutkittavalle nostettiin tanko, minkä jälkeen tutkittava sai aloittaa noston, kun koki olevansa valmis. Kuormaa lisättiin ja vähennettiin muuten samalla periaatteella kuin 1 RM jalkaprässi testissä, mutta hauiskäännön 1 RM selvitettiin 0,5 kg:n tarkkuudella. Yksittäiset tutkittavat käyttivät kaikilla testikerroilla samaa levytankoa.

Hauiskäännön toistomaksimitesti toteutettiin muuten samoilla periaatteilla kuin jalkaprässin toistomaksimitesti, paitsi että kuorma oli 80 %:a 1 RM testin tuloksista kontrolliviikolla ja 1. harjoitusviikolla, minkä jälkeen kuorma oli 80 %:a 1. harjoitusviikon 1 RM tuloksesta. Hauiskäännön ala-asennossa oli sallittu lyhyt hengitystauko toistomaksimitestin aikana ja tanko oli pidettävä käsissä koko testin ajan. Toistojen kriteerit olivat samat kuin harjoittelussa.

6.5 Lihaskoon mittaus

Lihaskoko mitattiin ultraäänikuvasta. Ultraäänikuvat otettiin tutkimuksen aikana 7 kertaa aina ennen voimatestejä. Ultraäänikuvat otettiin ultraäänilaitteella (SSD- α 10, Aloka, Tokio, Japani) oikean käden biceps brachii -lihaksesta ja oikean jalan vastus lateralis -lihaksesta. Biceps brachii ultraäänikuvan kuvauskohta oli 2/3 olkaluun mitasta (olkalisäke – olkaluun distaalisen pään lateraalinen sivunasta) olkapäästä katsottuna. Vastus lateraliuksen kuvauskohta oli 1/2 reisiluun mitasta (iso sarvennoinen – polvilumpion yläkärki). Kuvauskohdat merkattiin permanenttitussilla ja tutkittavia ohjeistettiin vahvistamaan merkintöjä tutkimuksen aikana, mutta mittauskohdat määritettiin kuitenkin joka mittauskerralla. Molemmista kuvauskohdista otettiin joka mittauskerralla vähintään 3 poikkaisuuntaista ja 3 pitkittäissuuntaista kuvaa. Poikkaisuuntaisista ultraäänikuvista määritettiin lihaksen poikkipinta-ala ja pitkittäissuuntaisista kuvista määritettiin lihaksen pennaatiokulmat manuaalisesti ImageJ-ohjelmistolla (National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, Yhdysvallat). Jokaiselta mittauskerralta analysoitiin 3 poikkiaista ja 3 pitkittäistä kuvaa per lihas. Poikkiaisista kuvista 3 tuloksesta 2 lähempänä toisiaan olevien tulosten keskiarvo määritettiin poikkipinta-alaksi ja pitkittäisistä kuvista pennaatiokulmaksi.

6.6 Tilastolliset menetelmät

Tulokset käsiteltiin SPSS Statistics 26.0 (IBM Corporation, Armonk, NY, Yhdysvallat) – ja Office 365 Excel versio 2102 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, Yhdysvallat) -ohjelmilla. Muuttujien datan normalisuus testattiin Shapiro-Wilkin testillä, sillä datapisteitä per muuttuja oli < 50. Yksittäisessä testissä molempien muuttujien datan ollessa normaalisti jakautunutta yksittäisen muuttujan kehitystä tutkittiin toistovarianssianalyysillä (repeated ANOVA), ja normaalijakautuneisuuden puuttuessa Friedmanin testillä. Toistovarianssianalyysin ja Friedmanin testin parivertailussa käytettiin Bonferronin korjauskerrointa tilastollisen merkitsevyyden määrittämiseen. Suhteellisten muutosten samankaltaisuutta tutkittiin riippuvien otosten t-testillä (normaalijakautunut) tai Wilcoxonin testillä (ei normaalijakautunut). Suhteellisia muutoksia verrattaessa lähtötaso oli muissa paitsi jalkaprässin harjoituskuormassa kontrollimittaus. Jalkaprässin ensimmäinen harjoituskuorma oli selvillä vasta viikolla 1, joten jalkaprässin harjoituskuormaan verrattaessa muut muuttujat normalisoitiin viikon 1 tulokseen.

Yhdellä tutkittavalla lihaskoon ultraäänimittaus epäonnistui kontrollikerralla. Puuttuva datapiste korvattiin ensimmäisen viikon lihaskoolla, sillä ryhmätasolla muutos näiden mittauspisteiden välillä oli hyvin pieni ($< 1\%$), eikä merkittävästi vaikuttanut tulokseen. Jalkaprässin harjoituskuormista puuttui muutamia datapisteitä ja nämä datapisteet korvattiin edellisen viikon harjoituskuormalla, paitsi jos puuttuva mittauspiste oli viikolla 20 niin seuraavan viikon harjoituskuormalla.

7 TULOKSET

7.1 Voimatestien, jalkaprässin harjoituskuorman ja lihaskoon muutokset

Jalkaprässin 1 RM, isometrinen polvenojennus, jalkaprässin harjoituskuorma ja vastus lateralis kasvoivat ensimmäisen ja toisen 10 viikon harjoitusjakson aikana sekä lasivat harjoittelemattomuusjakson aikana. Jalkaprässin 1 RM ja harjoituskuorma palasivat harjoitustauon aikana harjoitustaukoa edeltäneelle tasolle, kun taas isometrinen polvenojennus ja vastus lateraloksen koko palasivat kontrollimittauksen tasolle (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Maksimaalisten voimatestien, jalkaprässin harjoituskuorman (HA) ja vastus lateraloksen poikkipinta-alan tulokset tutkimuksen eri vaiheissa. Tuloksen ryhmän sisäisiä keskiarvoja \pm keskihajonta.

Mittaus	Jalkaprässi 1 RM (kg)	Isom. polvenojennus (N)	Jalkaprässin HA (kg)	Vastus lateraloksen ala (cm ²)
KTRL	164,5 \pm 45,0	614,5 \pm 141,2	-	25,9 \pm 5,6
V1	165,5 \pm 45,7	623,8 \pm 133,5	119,8 \pm 30,4	26,1 \pm 5,6
V5	187,6 \pm 46,1 ^{*y}	678,4 \pm 152,3 ^{*y}	148,6 \pm 30,6 ^{*y}	28,8 \pm 6,4 ^{*y}
V10	197,6 \pm 46,3 ^{*y}	680,7 \pm 139,7 [*]	168,8 \pm 36,2 ^{*y}	30,1 \pm 6,9 ^{*y}
V20	187,5 \pm 46,8 ^{*y}	594,6 \pm 133,1 ^y	145,6 \pm 33,8 ^{*y}	27,1 \pm 5,7 ^y
V25	201,5 \pm 48,7 ^{*y}	630,4 \pm 140,4 ^y	170,4 \pm 38,2 ^{*y}	30,0 \pm 7,1 ^{*y}
V30	209,3 \pm 49,4 ^{*y}	654,4 \pm 148,0 ^y	179,1 \pm 36,8 ^{*y}	31,1 \pm 7,0 ^{*y}

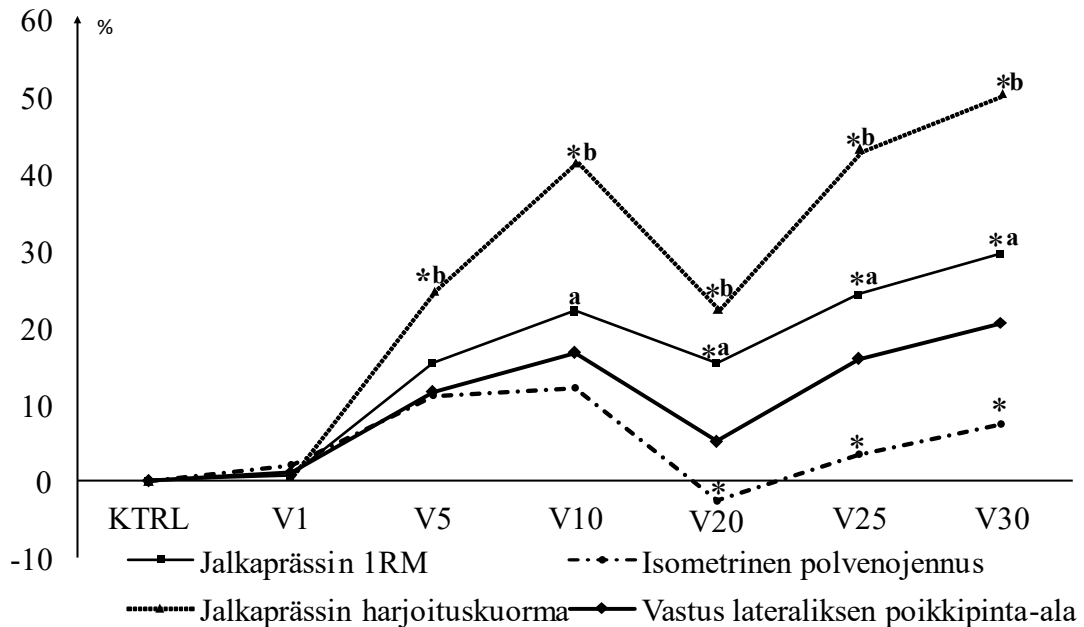
KTRL, kontrollimittaus; V1, viikon 1 mittaus; V5, viikon 5 mittaus; V10, viikon 10 mittaus; V20, viikon 20 mittaus; V25, viikon 25 mittaus; V30, viikon 30 mittaus; 1 RM, yhden toiston maksimi; Isom., isometrinen; HA, harjoituskuorma.

* = eroaa lähtötasosta ($p < 0.05$), ^y = eroaa edellisestä mittauksesta ($p < 0.05$)

7.2 Erot voimatestien, jalkaprässin harjoituskuorman ja lihaskoon muutoksissa

Jalkaprässin 1 RM ja polvenojennuksen isometrisen maksimin muutokset olivat samankaltaisia kontrollimittauksen ja viikon 5 mittauksen välillä, minkä jälkeen jalkaprässin 1 RM:n muutokset suhteessa lähtötasoon olivat suurempia. Jalkaprässin harjoituskuorman suhteelliset muutokset olivat tutkimuksen ajan suurempia verrattuna jalkaprässin 1 RM:n muutoksiin.

Jalkaprässin harjoituskuorman suhteellinen muutos erosi vastus lateraloksen poikkipinta-alan suhteellisesta muutoksesta viikosta 5 alkaen. Jalkaprässin 1 RM:n ja maksimaalisen isometrisen polvenojennuksen suhteellinen muutos erosi lihaskoon suhteellisesta muutoksesta viikolta 20 alkaen. Suhteellisten muutosten erot on esitetty kuvassa 7.



KUVA 7. Jalkaprässin 1 RM:n, maksimaalisen isometrisen polvenojennuksen, jalkaprässin harjoituskuorman ja vastus lateraloksen poikkipinta-alan tutkimuksen aikaiset alkutilanteeseen suhteutetut muutokset. KTRL, kontrollimittaus; V1, viikon 1 mittaus; V5, viikon 5 mittaus; V10, viikon 10 mittaus; V20, viikon 20 mittaus; V25, viikon 25 mittaus; V30, viikon 30 mittaus. * = muutos eroaa saman mittauskerran vastus lateraloksen poikkipinta-alan suhteellisesta muutoksesta, a = jalkaprässin 1 RM:n muutos eroaa saman mittauskerran polvenojennuksen MVC:n suhteellisesta muutoksesta, b = Jalkaprässin harjoituskuorman muutos eroaa saman viikon jalkaprässin 1 RM:n suhteellisesta muutoksesta.

8 POHDINTA

Tutkimuksen päälöydös on harjoitteluspesifisyyden vaikutus harjoittelua seuraaviin voimantuoton muutoksiin. Voimantuoton muutokset olivat suurempia mitä harjoitteluspesifimpi muuttuja oli. Jalkaprässin harjoituskuorma kehittyi +50 %, jalkaprässin 1 RM +29 % ja isometrinen polvenojennus +7 %. Lisäksi vastus lateraaliksen poikkipinta-alan suhteellinen muutos oli suurempi kuin isometrisen polvenojennuksen, mikä näkyi myös lihaskokoon suhteutetun voimantuoton laskuna.

8.1 Maksimivoimatestien suhteelliset muutokset

Dynaaminen jalkaprässi kehittyi molempien harjoitusjaksojen testauskertojen välillä ja laski harjoitustauon aikana viikon 5 tasolle. Isometrinen polvenojennus kehittyi ensimmäisen 5 harjoitusviikon, pysyi muuttumattomana harjoitusviikkojen 5–10 aikana, laski takaisin lähtötasolle harjoitustauon aikana ja kehittyi viimeisen harjoitusjakson aikana, mutta ei tutkimuksen lopussa eronnut lähtötasosta. Jalkaprässin kehitys lähtötilanteesta verrattuna polvenojennuksen kehitykseen oli suurempi viikosta 10 lähtien, ja jalkaprässin kehitys oli myös suurempaa loppututkimuksen ajan. Tulokset vastaavat osittain aiempaa tutkimusnäyttöä. Spitz ym. (2022) havaitsivat meta-analyysissään harjoittelulle spesifin lihastyötavan voimatestin kehittyvän enemmän harjoittelun seurauksena verrattuna epäspesifiin testiin. Weir ym. (1997) havaitsivat samankaltaisia muutoksia harjoitusjakson ja 8 viikon harjoittelemattomuusjakson aikana, kun harjoittelulle spesifi dynaaminen polvenojennuksen 1 RM ja isometrinen polvenojennus kehittyivät harjoitusjakson aikana. 8 viikon harjoittelemattomuusjakson jälkeen dynaaminen polvenojennus ei eronnut harjoittelun jälkeisestä tuloksesta, kun taas isometrinen voimantuotto oli laskenut harjoittelua edeltävälle tasolle. (Weir ym. 1997)

Erot johtuvat todennäköisemmin harjoitusspesifisyydestä ja motorisesta oppimisesta kuin lihaksiston rakenteellisista muutoksista. Liikkeissä työskentelevät lihakset toki eroavat, sillä jalkaprässissä työskentelee enemmän lihaksia johtuen samanaikaisesta lonkan, polven ja nilkan ojentumisesta. Pääsääntöisesti lihashypertrofia on kuitenkin suurempaa harjoitusvolyymien kasvaessa (Baz-Valle ym. 2021) ja polvenojentajia harjoiteltiin tässä tutkimuksessa myös

eristetysti, joten muiden lihasten rakenteelliset muutokset eivät todennäköisesti olleet suurempia kuin polvenojentajien.

Spitz ym. (2022) ja Weir:n ym. (1997) tutkimusten perusteella muutokset voimatesteissä harjoitusjaksojen ja harjoittelemattomuusjakson aikana olivat odotettavia. Moritani & deVries (1979) tunnistivat neuraalisten tekijöiden vaikutuksen voimankehityksessä harjoittelun alussa, mikä sopii myös spesifin voimantuoton suurempaan kehitykseen 1. harjoitusjaksolla (Spitz ym. 2022). Weir ym. (1997) arvelivat taidon oppimisen olevan taustalla harjoitusspesifin voimatestin paremmassa pysyvyydessä verrattuna isometriseen voimatestiin harjoittelemattomuusjakson aikana. Eläimillä havaitut erot neuraalisten muutoksien pysyvyydessä ja ohimenevyydessä sekä suorituskyvyn muutoksissa taidonoppimisen ja harjoittelemattomuusjakson seurauksena (Xu ym. 2009) tukevat näkemystä taidonoppimisen roolista suorituskyvyn pysyvyydessä. Harjoittelulle spesifiä testiä harjoitellaan luonnollisesti enemmän, joten mahdollisuudet taidon adaptaatioille ovat suuremmat. Testaustilanteissa tutkittavat toki pääsivät harjoittelemaan maksimaalista isometristä polvenojennusta tutkimuksen aikana, mutta ottaen huomioon testausjärjestyksen, oppiminen voi jäädä hyvin pieneksi taidon oppimisessa havaitun retroaktiivisen interferenssin vuoksi (Merbah & Meulemans 2011).

8.2 Maksimivoimatestien ja lihaskoon muutokset

Vastus lateraloksen lihaskoko kasvoi 1. ja 2. harjoitusjakson aikana, mutta palasi takaisin lähtötasolle harjoittelemattomuusjakson aikana. Tulos vastaa aiempaa tutkimusnäyttöä. Lihashypertrofiaa ja -atrofiaa on havaittu voimaharjoitus- ja harjoittelemattomuusjaksojen aikana (Räntilä ym. 2022). Räntilä ym. (2022) tutkimuksessa keskiarvoinen atrofia 6 viikon harjoittelemattomuusjakson aikana oli -4,9 %, kun taas tässä tutkimuksessa muutos oli n. -10 % 10 viikon harjoittelemattomuusjakson aikana. Isometrisen voimantuoton suhteellinen lasku harjoitustauon aikana oli kuitenkin suurempi, minkä jälkeen lihaskoon suhteellinen muutos oli suurempi kuin isometrisen voimantuoton. Tutkimuksen lopussa lihaskoko oli kasvanut verrattuna lähtötilanteeseen ja isometriseen voimantuottoon, kun taas isometrinen voimantuotto ei keskiarvoisesti eronnut lähtötilanteesta. Tämä näkyi myös vastus lateraloksen kokoon suhteutetun isometrisen voimantuoton laskuna tutkimuksen loppupuolella.

Tulos on poikkeava suhteessa aiempaan tutkimusnäyttöön. Kuten kirjallisuuskatsauksessa mainittiin, lihahypertrofian ja voimantuoton kehittymisen suhde voi olla hyvinkin vaihteleva yksilötasolla, mutta tämänkaltainen tutkimustulos on silti harvinainen. Yleisempi havainto on voimantuoton suurempi suhteellinen kasvu verrattuna lihaksen poikkipinta-alaan (Moritani & deVries 1979; Seynnes ym. 2007; Van Cutsem 1998), minkä on nähty johtuvan neuraalisista adaptaatioista. Tämä sopii myös tässä tutkimuksessa havaittuihin jalkaprässin 1 RM:n ja lihaskoon muutoksiin, joissa jalkaprässin 1 RM:n muutos oli suurempi kuin lihaskoon.

Mahdollisia selityksiä havainnoille on muutamia. Sale ym. (1992) myös havaitsivat tutkimuksessaan polvenojentajien lihaskoon kasvua ilman isometrisen polvenojennuksen voimantuoton kasvua, kun taas harjoitellun dynaamisen jalkaprässin 1 RM kehittyi. Tutkijat pohtivat mahdollisia selityksiä: lihahypertrofiolla ei ollut vaikutusta havaittuun voimantuoton muutokseen jalkaprässissä (muutokset selittyvät neuraalisilla muutoksilla) tai harjoittelu johti lisääntyneeseen antagonistin koaktivaatioon, mikä tasapainotti suuremman lihaksen tuottaman voiman isometrisessä polvenojennuksessa. (Sale ym. 1992) Antagonistin koaktivaation kasvu on mahdollinen adaptaatio harjoittelulle, mutta aiempi tutkimusnäyttö on hyvin vähäinen. Useammin antagonistin koaktivaatio on laskenut tai pysynyt muuttumattomana. Tässä tutkimuksessa havaittu spesifin voimantuoton lasku voi kuitenkin johtua mittausvirheistä, joista lisää tutkimuksen rajoitteissa. Jalkaprässin 1 RM:n ja lihaskoon muutokset ja niiden suhde on kuitenkin samankaltainen kuin aiemmissa tutkimuksissa, ja ero johtuu todennäköisesti neuraalisista adaptaatioista ja motorisesta oppimisesta.

8.3 Jalkaprässin 1 RM:n ja jalkaprässin harjoituskuorman muutosten erot

Jalkaprässin harjoituskuorma kehittyi enemmän koko tutkimusjakson ajan verrattuna jalkaprässin 1 RM:n. Muutoksia tarkasteltaessa on kuitenkin hyvä muistaa, että ennen harjoittelun alkua tutkimuksen alussa ja harjoitustauon jälkeen jalkaprässin harjoituskuorma määritettiin jalkaprässin 1 RM:n perusteella. Harjoituskuorma kehittyi kuitenkin enemmän myös harjoitusjaksojen toisella 5 viikon tarkastelujaksolla, jolloin harjoituskuorman alkumäärityksen vaikutus on jo todennäköisesti vähäinen.

Aiempaa tutkimusnäyttöä harjoituskuorman muutoksista ei ole, mutta samankaltainen tulos on maksimiin suhteutetun toistomaksimin muutokset harjoittelun seurauksena. Matalammilla

kuormilla ja pidemmillä sarjoilla harjoittelun on havaittu johtavan parempaan lihaskestävyyteen 1 RM:n suhteutetuilla painoilla, kun on verrattu suurempiin kuormiin ja lyhyempiin sarjoihin, jotka johtivat suurempaan kehitykseen 1 RM testissä. (Campos ym. 2002). Tämä tarkoittaisi myös tässä tutkimuksessa havaittua harjoitusspesifien harjoituskuormien suurempaa suhteellista kasvua verrattuna 1 RM:n. Campos ym. (2002) tutkimuksessa ero paikallisessa lihaskestävyydessä oli havaittavissa huolimatta samankaltaisista muutoksista lihashypertrofiassa 2:n ryhmän välillä. Rakenteellisten muutosten ollessa samankaltaisia, erot suorituskyvyn adaptaatioissa saattoivat johtua neuraalisista tekijöistä.

Suuremmilla kuormilla harjoittelun on havaittu johtavan suurempaan 1 RM:n kehittymiseen (Schoenfeld ym. 2021) ja harjoittelun spesifisyyden on havaittu olevan tärkeä elementti toiminnallisissa adaptaatioissa (Spitz ym. 2021). Voimantuottoa ja sen nopeutta tukevia neuraalisia adaptaatioita (aikaistunut motoristen yksiköiden aktivaatio) on havaittu ballistisen harjoittelun seurauksena (Van Cutsem ym. 1998), mutta voimaharjoittelulla on havaittu olevan myös mahdollisuus viivästyttää motoristen yksiköiden aktivoitumista (Bernardi ym. 1996). Motoristen yksiköiden aktiivisuuden viivästyminen johtui Bernardin ym. (1996) tutkimuksessa todennäköisesti harjoitellun tehtävän tarkkuusvaatimuksista ja motorisesta oppimisesta. Motoristen yksiköiden aktiivisuuden viivästyminen ei ole 1 RM testeissä havaittu samankaltaisten harjoitusprotokollien seurauksena, mutta muutoksia lihasaktiivisuudessa on havaittu pitkissä ja väsyttävissä submaksimaalisissa supistuksissa (Cristova & Kossev 2001) Väsymyksen on myös havaittu olevan yksi komponentti, mikä voi merkittävästi vaikuttaa motorisen oppimisen seurauksena havaittuihin suorituskyvyn muutoksiin (Branscheidt ym. 2019). Ottaen edellisen datan huomioon, on mahdollista, että harjoittelussa optimoitui harjoitusprotokollan suorittaminen, jolloin taloudellisuuden kasvaminen harjoiteltaessa näkyisi suurempana kehityksenä harjoituskuormissa kuin 1 RM testissä. Taloudellisuuden muutokset eivät välttämättä näkyisi merkittävästi 1 RM testissä, sillä 1 RM testi on neuraalisen aktivaation vaatimuksiltaan kohtuu epäspesifi verrattuna harjoitteluun, eikä siirtovaikutusta välttämättä ole.

8.4 Tutkimuksen vahvuudet ja heikkoudet

Tutkimuksen suurin vahvuus oli kaiken harjoittelun valvonta tutkijoiden toimesta. Harjoittelun tarkka valvonta varmisti harjoittelun laadun ja mahdollisti harjoituskuormien tarkan seurannan.

Harjoituskuorman muutoksia ei ole aiemmin verrattu maksimaalisen voimantuoton tai lihaksen rakenteellisiin muutoksiin, mikä tuo uutta tietoa harjoittelun vaikutuksista. Harjoitusjaksojen ja -tauon pituuksien voi myös nähdä vahvuutena, sillä adaptaatiot ovat varmasti havaittavissa vasta riittävä pitkien jaksojen jälkeen. Tutkimuksessa seurattiin myös tutkittavien elämäntapoja laajemminkin (stressi, ravinto), mikä mahdollistaa kokonaisuutta rakennettaessa tiettyjen mahdollisesti sekoittavien tekijöiden poissulkemisen.

Tutkimuksen suurimpana heikkoutena voidaan nähdä isometrisen polvenojennuksen mittauksen. Polvenojennuspenkin nilkkatuen sijaintia ei vakioitu tarkasti, ja lisäksi nilkkatuen remmi vaihdettiin tutkimuksen aikana vanhan rikkoutuessa tutkimuksen puolivälin tienoilla. Koko laajemman tutkimuksen toisella ryhmällä (ei tässä työssä käsitelty) isometrinen polvenojennus myös laski harjoitusjakson aikana samassa ajankohdassa kuin tämän tutkimuksen ryhmällä. Ottaen huomioon molempien ryhmien muutosten suuruudet, tämän tutkimuksen isometrisen polvenojennuksen trendi on todennäköisesti oikea, mutta tarkkoihin arvoihin harjoitusjakson jälkeen kannattaa suhtautua varautuen. Suoritustekniikkaa ja sen muutoksia olisi myös voinut tarkastella tutkimuksessa, mikä olisi mahdollistanut taitavuuden tarkastelun suuremmin.

8.5 Johtopäätökset

Tutkimuksessa havaitut erot harjoittelun toiminnallisissa ja rakenteellisissa adaptaatioissa sekä niiden pysyvyydessä tukevat motorisen oppimisen roolia voimaharjoittelussa. Harjoitustauon aikaisissa muutoksissa oli selkeitä eroja harjoitusspesifien voimantuoton muutoksissa verrattuna lihaskoon muutoksiin. Epäspesifin voimantuoton muutokset ovat tässä tutkimuksessa suuntaa antavia, mutta aiemman tutkimustiedon mukaisia, ja tukevat motorisen oppimisen osuutta. Lisäksi jalkaprässin harjoituskuorma kehittyi suhteessa enemmän verrattuna jalkaprässin 1 RM:n. Liikespesifisyys ja sitä kautta motorinen oppiminen vaikuttaa olevan tärkeä tekijä voimantuoton muutoksissa ja suorituskyvyn pysyvyydessä harjoitusjakson ja -tauon aikana.

8.6 Tulevat tutkimusaiheet

Tulevissa motorisen oppimisen roolia voimaharjoittelussa tutkivissa tutkimuksissa tulisi selvittää missä määrin motoriselle oppimiselle edulliset piirteet vaikuttavat voimaharjoittelun adaptaatioihin harjoitus- ja harjoittelemattomuusjakson aikana. Motorisessa oppimisessa muutokset voivat tapahtua hyvin nopeasti ja harjoittelun tulee olla riittävän haastavaa, jotta kehitys jatkuu (esim. Tallent ym. 2021). Voimaharjoittelussa sen sijaan voidaan nähdä harjoittelun suhteellinen helppous ja monotonisuus positiivisena asiana, jotta voidaan tarkastella voimaharjoittelulle spesifejä adaptaatioita (esim. lihashypertrofia) ja kehityksen seuranta on yksinkertaista. Tässä tutkimuksessa toiminnallisilla adaptaatioilla ja harjoituskuormien kehityksellä harjoitusjaksojen välillä ei kuitenkaan ollut merkitystä absoluuttiseen lihashypertrofiaan. Mielenkiintoinen tutkimusasetelma hyödyntäisi taitoharjoittelun periaatteita (esim. liikevariaatioita, harjoitteiden järjestyksen satunnaistaminen yms.) tietyissä rajoissa voimaharjoittelun sisällä, kun taas toinen ryhmä tekisi hyvin monotonista voimaharjoittelua. Spesifeillä ja epäspesifeillä testeillä, harjoittelemattomuusjaksolla ja lihaksen rakenteellisten muutosten kuvantamisella voitaisiin päästä käsiksi mahdollisiin eroihin harjoitusohjelmien toiminnallisissa ja rakenteellisissa adaptaatioissa.

8.7 Käytännön sovellutukset

Tämän tutkimuksen perusteella motorinen oppiminen voi olla voimaharjoittelun alkuvaiheessa merkittävä tekijä voimantuoton kehittymisessä, ja muutokset voimantuotossa säilyvät harjoitetussa liikkeessä verrattain hyvin jopa 10 viikon harjoittelutauon aikana. Harjoittelulla on siirtovaikutus myös muunlaiseen voimantuottoon, mutta se on huomattavasti vähäisempi kuin liikespesifi muutos. Lihaskasvu ei tässä tutkimuksessa eronnut harjoitusjaksojen välillä liiketaitavuuden kehityksestä huolimatta (+4 cm² molemmilla jaksoilla). Näin ollen aloittelevalle kuntoilijalle voimaharjoitteluohjelmaa suunniteltaessa motorinen oppiminen kannattaa ottaa huomioon harjoittelun tavoitteiden puitteissa. Liikevariaatiolla voitaisiin saavuttaa monipuolisempi siirtovaikutus muille elämän osa-alueille, sillä voimantuoton kehitys on osittain liikespesifiä. Erityisesti terveysliikkuville monipuolinen voimantuoton kehittäminen olisi perusteltua.

LÄHTEET

- Aagaard, P. (2003). Training-induced changes in neural function. *Exercise and sport sciences reviews*, 31(2), 61-67. <https://doi.org/10.1097/00003677-200304000-00002>
- Aagaard, P., Andersen, J. L., Dyhre-Poulsen, P., Leffers, A., Wagner, A., Magnusson, S. P., Simonsen, E. B. (2001). A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: Changes in muscle architecture. *The Journal of physiology*, 534(2), 613-623. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00613.x>
- Akagi, R., Suzuki, M., Kawaguchi, E., Miyamoto, N., Yamada, Y., & Ema, R. (2018). Muscle size-strength relationship including ultrasonographic echo intensity and voluntary activation level of a muscle group. *Archives of gerontology and geriatrics*, 75, 185-190. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2017.12.012>
- Alder, D. B., Broadbent, D. P., Stead, J., & Poolton, J. (2019). The impact of physiological load on anticipation skills in badminton: From testing to training. *Journal of sports sciences*, 37(16), 1816-1823. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1596051>
- Bacmeister, C. M., Huang, R., Osso, L. A., Thornton, M. A., Conant, L., Chavez, A. R., Poleg-Polsk, A., Hughes, E. G. (2022). Motor learning drives dynamic patterns of intermittent myelination on learning-activated axons. *Nature neuroscience*, 25(10), 1300-1313. <https://doi.org/10.1038/s41593-022-01169-4>
- Balshaw, T. G., Massey, G. J., Maden-Wilkinson, T. M., Tillin, N. A., & Folland, J. P. (2016). Training-specific functional, neural, and hypertrophic adaptations to explosive- vs. sustained-contraction strength training. *Journal of applied physiology* (1985), 120(11), 1364-1373. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00091.2016>
- Bamman, M. M., Newcomer, B. R., Larson-Meyer, D. E., Weinsier, R. L., & Hunter, G. R. (2000). Evaluation of the strength-size relationship in vivo using various muscle size indices. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(7), 1307-1313. <https://doi.org/10.1097/00005768-200007000-00019>
- Baratta, R., Solomonow, M., Zhou, B., Letson, D., Chuinard, R., & D'Ambrosia, R. (1988). Muscular coactivation: The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. *The American journal of sports medicine*, 16(2), 113-122. <https://doi.org/10.1177/036354658801600205>
- Baz-Valle, E., Balsalobre-Fernández, C., Alix-Fages, C., & Santos-Concejero, J. (2022). A Systematic Review of the Effects of Different Resistance Training Volumes on Muscle

- Hypertrophy. *Journal of human kinetics*, 81(1), 199-210. <https://doi.org/10.2478/hukin-b2022-0017>
- 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.
- Bernardi, M., Solomonow, M., Nguyen, G., Smith, A., & Baratta, R. (1996). Motor unit recruitment strategy changes with skill acquisition. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 74, 52-59.
- Buckner, S. L., Dankel, S. J., Mattocks, K. T., Jessee, M. B., Mouser, J. G., Counts, B. R., & Loenneke, J. P. (2016). The problem Of muscle hypertrophy: Revisited: Issues & Opinions: Problems with Muscle Growth. *Muscle & nerve*, 54(6), 1012-1014. <https://doi.org/10.1002/mus.25420>
- Branscheidt, M., Kassavetis, P., Anaya, M., Rogers, D., Huang, H. D., Lindquist, M. A., & Celnik, P. (2019). Fatigue induces long-lasting detrimental changes in motor-skill learning. *bioRxiv*, 8. <https://doi.org/10.1101/406520>
- Campos, G., Luecke, T., Wendeln, H., Toma, K., Hagerman, F., Murray, T., Ragg, K., Ratamess, N., Kraemer, W., Staron, R. (2002). Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: Specificity of repetition maximum training zones. *European journal of applied physiology*, 88(1-2), 50-60. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0681-6>
- Cantarero, G., Tang, B., O'Malley, R., Salas, R., & Celnik, P. (2013). Motor learning interference is proportional to occlusion of LTP-like plasticity. *Journal of Neuroscience*, 33(11), 4634-4641.
- Carolan, B., & Cafarelli, E. (1992). Adaptations in coactivation after isometric resistance training. *Journal of Applied Physiology*, 73(3), 911-917. <https://doi.org/10.1152/jappl.1992.73.3.911>
- Chang, Y., Su, F., Wu, H. & An, K. (1999). Optimum length of muscle contraction. *Clinical biomechanics (Bristol)*, 14(8), 537-542. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(99\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(99)00014-5)
- Christiansen, L., Larsen, M. N., Madsen, M. J., Grey, M. J., Nielsen, J. B., & Lundbye-Jensen, J. (2020). Long-term motor skill training with individually adjusted progressive difficulty enhances learning and promotes corticospinal plasticity. *Scientific reports*, 10(1), 15588. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72139-8>

- Christiansen, L., Madsen, M., Bojsen-Møller, E., Thomas, R., Nielsen, J., & Lundbye-Jensen, J. (2018). Progressive practice promotes motor learning and repeated transient increases in corticospinal excitability across multiple days. *Brain stimulation*, 11(2), 346-357. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.11.005>
- Chua, L., Dimapilis, M. K., Iwatsuki, T., Abdollahipour, R., Lewthwaite, R., & Wulf, G. (2019). Practice variability promotes an external focus of attention and enhances motor skill learning. *Human movement science*, 64, 307-319. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.02.015>
- 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., Riek, S., & Carson, R. G. (2001). Neural adaptations to resistance training: implications for movement control. *Sports medicine*, 31, 829-840.
- Christova, P., & Kossev, A. (2001). Human motor unit recruitment and derecruitment during long lasting intermittent contractions. *Journal of electromyography and kinesiology*, 11(3), 189-196. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(00\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(00)00052-3)
- Clark, J. (2007) On the Problem of Motor Skill Development, *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 78:5, 39-44, DOI: 10.1080/07303084.2007.10598023
- Cutsem, M., Duchateau, J., & Hainaut, K. (1998). Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *The Journal of physiology*, 513(1), 295-305. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1998.295by.x>
- Dankel, S. J., Buckner, S. L., Jessee, M. B., Grant Mouser, J., Mattocks, K. T., Abe, T., & Loenneke, J. P. (2018). Correlations Do Not Show Cause and Effect: Not Even for Changes in Muscle Size and Strength. *Sports medicine (Auckland)*, 48(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0774-3>
- Dayan, E., & Cohen, L. (2011). Neuroplasticity Subservicing Motor Skill Learning. *Neuron (Cambridge, Mass.)*, 72(3), 443-454. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.008>
- DeFreitas, J. M., Beck, T. W., Stock, M. S., Dillon, M. A., & Kasishke, P. R. (2011). An examination of the time course of training-induced skeletal muscle hypertrophy. *European journal of applied physiology*, 111(11), 2785-2790. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-1905-4>
- Del Vecchio, A., Casolo, A., Negro, F., Scorcelletti, M., Bazzucchi, I., Enoka, R., . . . Farina, D. (2019). The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated

- by adaptations in motor unit recruitment and rate coding. *The Journal of physiology*, 597(7), 1873-1887. <https://doi.org/10.1113/JP277250>
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2016). Translating Fatigue to Human Performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 48(11), 2228-2238. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000929>
- Enoka, R. M. (1988). Muscle strength and its development. New perspectives. *Sports medicine (Auckland)*, 6(3), 146-168. <https://doi.org/10.2165/00007256-198806030-00003>
- Ericsson, K. (2008). Deliberate Practice and Acquisition of Expert Performance: A General Overview. *Academic emergency medicine*, 15(11), 988-994. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2008.00227.x>
- Erskine, R. M., Fletcher, G., & Folland, J. P. (2014). The contribution of muscle hypertrophy to strength changes following resistance training. *European journal of applied physiology*, 114(6), 1239-1249. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2855-4>
- Farthing, J. P., Borowsky, R., Chilibeck, P. D., Binsted, G., & Sarty, G. E. (2007). Neurophysiological adaptations associated with cross-education of strength. *Brain topography*, 20(2), 77.
- Grgic, J., Schoenfeld, B. J., Davies, T. B., Lazinica, B., Krieger, J. W., & Pedisic, Z. (2018). Effect of Resistance Training Frequency on Gains in Muscular Strength: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports medicine (Auckland)*, 48(5), 1207-1220. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0872-x>
- Grgic, J., Schoenfeld, B. J., Orazem, J., & Sabol, F. (2022). Effects of resistance training performed to repetition failure or non-failure on muscular strength and hypertrophy: A systematic review and meta-analysis. *Journal of sport and health science*, 11(2), 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.01.007>
- 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.
- Helms, E. R., Cronin, J., Storey, A., & Zourdos, M. C. (2016). Application of the Repetitions in Reserve-Based Rating of Perceived Exertion Scale for Resistance Training. *Strength and conditioning journal*, 38(4), 42-49. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000218>
- Hill, A. V. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 126(843), 136-195. <https://doi.org/10.1098/rspb.1938.0050>

- Hornsby, W. G., Gentles, J. A., Haff, G. G., Stone, M. H., Buckner, S. L., Dankel, S. J., Loenneke, J. P. (2018). What is the Impact of Muscle Hypertrophy on Strength and Sport Performance? *Strength and conditioning journal*, 40(6), 99-111. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000432>
- Hortobagyi, T., Richardson, S. P., Lomarev, M., Shamim, E., Meunier, S., Russman, H., 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. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90701.2008>
- Ikai, M., & Fukunaga, T. (1970). A study on training effect on strength per unit cross-sectional area of muscle by means of ultrasonic measurement. *European journal of applied physiology*, 28(3), 173-180. <https://doi.org/10.1007/BF00696025>
- Kida, H., & Mitsushima, D. (2018). Mechanisms of motor learning mediated by synaptic plasticity in rat primary motor cortex. *Neuroscience Research*, 128, 14-18.
- Kidgell, D. J., Bonanno, D. R., Frazer, A. K., Howatson, G., & Pearce, A. J. (2017). Corticospinal responses following strength training: A systematic review and meta-analysis. *The European journal of neuroscience*, 46(11), 2648-2661. <https://doi.org/10.1111/ejn.13710>
- 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.
- Kirby, E. D., Frizzell, T. O., Grajauskas, L. A., Song, X., Gawryluk, J. R., Lakhani, B., Boyd, L., D'Arcy, R. C. (2022). Increased myelination plays a central role in white matter neuroplasticity. *NeuroImage (Orlando, Fla.)*, 263, 119644. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119644>
- Knight, C., & Kamen, G. (2001). Adaptations in muscular activation of the knee extensor muscles with strength training in young and older adults. *Journal of electromyography and kinesiology*, 11(6), 405-412. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(01\)00023-2](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(01)00023-2)
- Krzysztofik, M., Wilk, M., Wojdała, G., & Gołaś, A. (2019). Maximizing Muscle Hypertrophy: A Systematic Review of Advanced Resistance Training Techniques and Methods. *International journal of environmental research and public health*, 16(24), 4897. <https://doi.org/10.3390/ijerph16244897>
- Kubo, K., Ikebukuro, T., & Yata, H. (2019). Effects of squat training with different depths on lower limb muscle volumes. *European journal of applied physiology*, 119(9), 1933-1942. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04181-y>

- Krivickas, L. S., Dorer, D. J., Ochala, J., & Frontera, W. R. (2011). Relationship between force and size in human single muscle fibres. *Experimental physiology*, 96(5), 539-547. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2010.055269>
- Lasevicius, T., Schoenfeld, B. J., Silva-Batista, C., Barros, T. d. S., Aihara, A. Y., Brendon, H., Longo, A. R., Tricoli, V., Peres B. A., Teixeira, E. L. (2019). Muscle Failure Promotes Greater Muscle Hypertrophy in Low-Load but Not in High-Load Resistance Training. *Journal of strength and conditioning research*, 36(2), 346-351. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003454>
- 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.
- Lawrence, G. P., Cassell, V. E., Beattie, S., Woodman, T., Khan, M. A., Hardy, L., & Gottwald, V. M. (2014). Practice with anxiety improves performance, but only when anxious: Evidence for the specificity of practice hypothesis. *Psychological research*, 78(5), 634-650. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0521-9>
- Lee, M., Gandevia, S. C., & Carroll, T. J. (2009). Short-Term Strength Training Does Not Change Cortical Voluntary Activation. *Medicine and science in sports and exercise*, 41(7), 1452-1460. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181998837>
- Lee, M., Hinder, M. R., Gandevia, S. C., & Carroll, T. J. (2010). The ipsilateral motor cortex contributes to cross-limb transfer of performance gains after ballistic motor practice. *The Journal of physiology*, 588(1), 201-212. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2009.183855>
- Lemmer, J. T., Hurlbut, D. E., Martel, G. F., Tracy, B. L., Ey Iv, F. M., Metter, E. J. & Hurley, B. F. (2000). Age and gender responses to strength training and detraining. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(8), 1505-1512.
- Leung, Michael, et al. "Motor cortex excitability is not differentially modulated following skill and strength training." *Neuroscience* 305 (2015): 99-108.
- 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, 2479-2492.
- Ljubisavljevic, M. (2006). Transcranial magnetic stimulation and the motor learning-associated cortical plasticity. *Experimental brain research*, 173(2), 215-222. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0538-z>

- Maden-Wilkinson, T. M., Balshaw, T. G., Massey, G. J., & Folland, J. P. (2020). What makes long-term resistance-trained individuals so strong? A comparison of skeletal muscle morphology, architecture, and joint mechanics. *Journal of applied physiology* (1985), 128(4), 1000-1011. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00224.2019>
- 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.
- Mason, J., Frazer, A. K., Pearce, A. J., Goodwill, A. M., Howatson, G., Jaberzadeh, S., & Kidgell, D. J. (2019). Determining the early corticospinal-motoneuronal responses to strength training: A systematic review and meta-analysis. *Reviews in the neurosciences*, 30(5), 463-476. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2018-0054>
- Mitchell, C. J., Churchward-Venne, T. A., Parise, G., Bellamy, L., Baker, S. K., Smith, K., Atherton, P. J., Phillips, S. M. (2014). Acute post-exercise myofibrillar protein synthesis is not correlated with resistance training-induced muscle hypertrophy in young men. *PloS one*, 9(2), e89431. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089431>
- Moritani, T., & deVries, H. A. (1979). Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *American journal of physical medicine*, 58(3), 115-130.
- Muellbacher, W., Ziemann, U., Boroojerdi, B., Cohen, L., & Hallett, M. (2001). Role of the human motor cortex in rapid motor learning. *Experimental brain research*, 136(4), 431-438. <https://doi.org/10.1007/s002210000614>
- Nakagawa, K., Takemi, M., Nakanishi, T., Sasaki, A., & Nakazawa, K. (2020). Cortical reorganization of lower-limb motor representations in an elite archery athlete with congenital amputation of both arms. *NeuroImage clinical*, 25, 102144. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2019.102144>
- Newell, K.M. (1978). Some issues on action plans. In G.E. Stelmach (Ed.), *Information processing in motor control and learning*. New York, NY: Academic Press.
- Nunes, J. P., Grgic, J., Cunha, P. M., Ribeiro, A. S., Schoenfeld, B. J., de Salles, B. F., & Cyrino, E. S. (2021). What influence does resistance exercise order have on muscular strength gains and muscle hypertrophy? A systematic review and meta-analysis. *European journal of sport science*, 21(2), 149-157. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1733672>
- Nuzzo, J. L., Barry, B. K., Gandevia, S. C., & Taylor, J. L. (2016). Acute Strength Training Increases Responses to Stimulation of Corticospinal Axons. *Medicine and science in sports and exercise*, 48(1), 139-150. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000733>

- Ogasawara, R., Yasuda, T., Sakamaki, M., Ozaki, H., & Abe, T. (2011). Effects of periodic and continued resistance training on muscle CSA and strength in previously untrained men. *Clinical physiology and functional imaging*, 31(5), 399-404.
- Ottinger, C. R., Sharp, M. H., Stefan, M. W., Gheith, R. H., de la Espriella, F., Wilson, J. M. (2022) Muscle Hypertrophy Response to Range of Motion in Strength Training: A Novel Approach to Understanding the Findings. *Strength and Conditioning Journal* <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000737>
- Pareja-Blanco, F., Alcazar, J., Cornejo-Daza, P. J., Sánchez-Valdepeñas, J., Rodriguez-Lopez, C., Hidalgo-de Mora, J., Ortega-Becerra, M. (2020). Effects of velocity loss in the bench press exercise on strength gains, neuromuscular adaptations, and muscle hypertrophy. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 30(11), 2154-2166. <https://doi.org/10.1111/sms.13775>
- 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. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.74.3.1037>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s002219900236>
- Ralston, G. W., Kilgore, L., Wyatt, F. B., & Baker, J. S. (2017). The Effect of Weekly Set Volume on Strength Gain: A Meta-Analysis. *Sports medicine (Auckland)*, 47(12), 2585-2601. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0762-7>
- Raiola, G., & Di Domenico, F. (2021). Approaches to motor learning: Cognitive approach versus ecological dynamic one. *Journal of Human Sport and Exercise*, 16(3proc), S1477-S1491. <https://doi.org/10.14198/jhse.2021.16.Proc3.65>
- Refalo, M. C., Hamilton, D. L., Paval, D. R., Gallagher, I. J., Feros, S. A., & Fyfe, J. J. (2021). Influence of resistance training load on measures of skeletal muscle hypertrophy and improvements in maximal strength and neuromuscular task performance: A systematic review and meta-analysis. *Journal of sports sciences*, 39(15), 1723-1745. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1898094>
- Remple, M. S., Bruneau, R. M., VandenBerg, P. M., Goertzen, C., & Kleim, J. A. (2001). Sensitivity of cortical movement representations to motor experience: evidence that skill learning but not strength training induces cortical reorganization. *Behavioural brain research*, 123(2), 133-141.

- Rodríguez-Rosell, D., Yáñez-García, J. M., Mora-Custodio, R., Pareja-Blanco, F., Ravelo-García, A. G., Ribas-Serna, J., & González-Badillo, J. J. (2020). Velocity-based resistance training: impact of velocity loss in the set on neuromuscular performance and hormonal response. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 45(8), 817-828.
- Rutheford, O. M., & Jones, D. A. (1992). Measurement of fibre pennation using ultrasound in the human quadriceps in vivo. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 65(5), 433-437. <https://doi.org/10.1007/BF00243510>
- Räntilä, A., Ahtiainen, J. P., Avela, J., Restuccia, J., Kidgell, D., & Häkkinen, K. (2021). High responders to hypertrophic strength training also tend to lose more muscle mass and strength during detraining than low responders. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(6), 1500-1511.
- Sale, D. G. (1988). Neural adaptation to resistance training. *Medicine and science in sports and exercise*, 20(5 Suppl), S135-45.
- Sale, D. G., Martin, J. E., & Moroz, D. E. (1992). Hypertrophy without increased isometric strength after weight training. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 64, 51-55.
- Schoenfeld, B. J., Contreras, B., Vigotsky, A. D., & Peterson, M. (2016). Differential Effects of Heavy Versus Moderate Loads on Measures of Strength and Hypertrophy in Resistance-Trained Men. *Journal of sports science & medicine*, 15(4), 715-722.
- Schoenfeld, B. J., Grgic, J., & Krieger, J. (2018). How many times per week should a muscle be trained to maximize muscle hypertrophy? A systematic review and meta-analysis of studies examining the effects of resistance training frequency. *Journal of sports sciences*, 37(11), 1286-1295. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1555906>
- Schoenfeld, B. J., Grgic, J., Van Every, D. W., & Plotkin, D. L. (2021). Loading Recommendations for Muscle Strength, Hypertrophy, and Local Endurance: A Re-Examination of the Repetition Continuum. *Sports (Basel)*, 9(2), 32. <https://doi.org/10.3390/sports9020032>
- Schoenfeld, B. J., Peterson, M. D., Ogborn, D., Contreras, B., & Sonmez, G. T. (2015). Effects of Low- vs. High-Load Resistance Training on Muscle Strength and Hypertrophy in Well-Trained Men. *Journal of strength and conditioning research*, 29(10), 2954-2963. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000958>
- 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. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00789.2006>

- Siekirk, N., Lai, Q., & Kendall, B. (2019). Effects of Limb-Specific Fatigue on Motor Learning during an Upper Extremity Proprioceptive Task. *International Journal of Motor Control and Learning*, 1(2), 41-46.
- Spitz, R. W., Kataoka, R., Dankel, S. J., Bell, Z. W., Song, J. S., Wong, V., Yamada, Y., Loenneke, J. P. (2022). Quantifying the Generality of Strength Adaptation: A Meta-Analysis. *Sports medicine (Auckland)*. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01790-0>
- Sugisaki, N., Wakahara, T., Murata, K., Miyamoto, N., Kawakami, Y., Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2015). Influence of muscle hypertrophy on the moment arm of the triceps brachii muscle. *Journal of applied biomechanics*, 31(2), 111-116. <https://doi.org/10.1123/JAB.2014-0126>
- Taber, C. B., Vigotsky, A., Nuckols, G., & Haun, C. T. (2019). Exercise-Induced Myofibrillar Hypertrophy is a Contributory Cause of Gains in Muscle Strength. *Sports medicine (Auckland)*, 49(7), 993-997. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01107-8>
- Trappe, S., Godard, M., Gallagher, P., Carroll, C., Rowden, G., & Porter, D. (2001). Resistance training improves single muscle fiber contractile function in older women. *American Journal of Physiology - Cell Physiology*, 281(2), 398-406. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.2001.281.2.C398>
- Trappe, S., Williamson, D., Godard, M., Porter, D., Rowden, G., & Costill, D. (2000). Effect of resistance training on single muscle fiber contractile function in older men. *Journal of Applied Physiology*, 89(1), 143-152. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.89.1.143>
- Tufano, J. J., Conlon, J. A., Nimphius, S., Brown, L. E., Seitz, L. B., Williamson, B. D., & Haff, G. G. (2016). Maintenance of Velocity and Power With Cluster Sets During High-Volume Back Squats. *International journal of sports physiology and performance*, 11(7), 885-892. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0602>
- Vigotsky, A. D., Contreras, B., & Beardsley, C. (2015). Biomechanical implications of skeletal muscle hypertrophy and atrophy: A musculoskeletal model. *PeerJ (San Francisco, CA)*, 3, e1462. <https://doi.org/10.7717/peerj.1462>
- Vigotsky, A. D., Schoenfeld, B. J., Than, C., & Brown, J. M. (2018). Methods matter: The relationship between strength and hypertrophy depends on methods of measurement and analysis. *PeerJ (San Francisco, CA)*, 6, e5071. <https://doi.org/10.7717/peerj.5071>
- Wang, F., Jiang, Y., & Hou, L. (2022). Effects of different exercise intensities on motor skill learning capability and process. *Science & sports*. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2021.09.006>

- Wackerhage, H., Schoenfeld, B. J., Hamilton, D. L., Lehti, M., & Hulmi, J. J. (2019). Stimuli and sensors that initiate skeletal muscle hypertrophy following resistance exercise. *Journal of applied physiology* (1985), 126(1), 30-43. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00685.2018>
- Weakley, J., Till, K., Sampson, J., Banyard, H., Leduc, C., Wilson, K., Jones, B. (2019). The Effects of Augmented Feedback on Sprint, Jump, and Strength Adaptations in Rugby Union Players After a 4-Week Training Program. *International journal of sports physiology and performance*, 14(9), 1205-1211. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0523>
- Weir, J., Housh, D., Housh, T., & Weir, L. (1997). The effect of unilateral concentric weight training and detraining on joint angle specificity, cross-training, and the bilateral deficit. *The journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 25(4), 264-270. <https://doi.org/10.2519/jospt.1997.25.4.264>
- Willingham, D. B. (1998). A Neuropsychological Theory of Motor Skill Learning. *Psychological review*, 105(3), 558-584. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.105.3.558>
- Xu, T., Yu, X., Perlik, A. J., Tobin, W. F., Zweig, J. A., Tennant, K., . . . Zuo, Y. (2009). Rapid formation and selective stabilization of synapses for enduring motor memories. *Nature (London)*, 462(7275), 915-U108. <https://doi.org/10.1038/nature08389>
- Yao, W., Fuglevand, R. J., & Enoka, R. M. (2000). Motor-Unit Synchronization Increases EMG Amplitude and Decreases Force Steadiness of Simulated Contractions. *Journal of Neurophysiology*, 83(1), 441-452. <https://doi.org/10.1152/jn.2000.83.1.441>