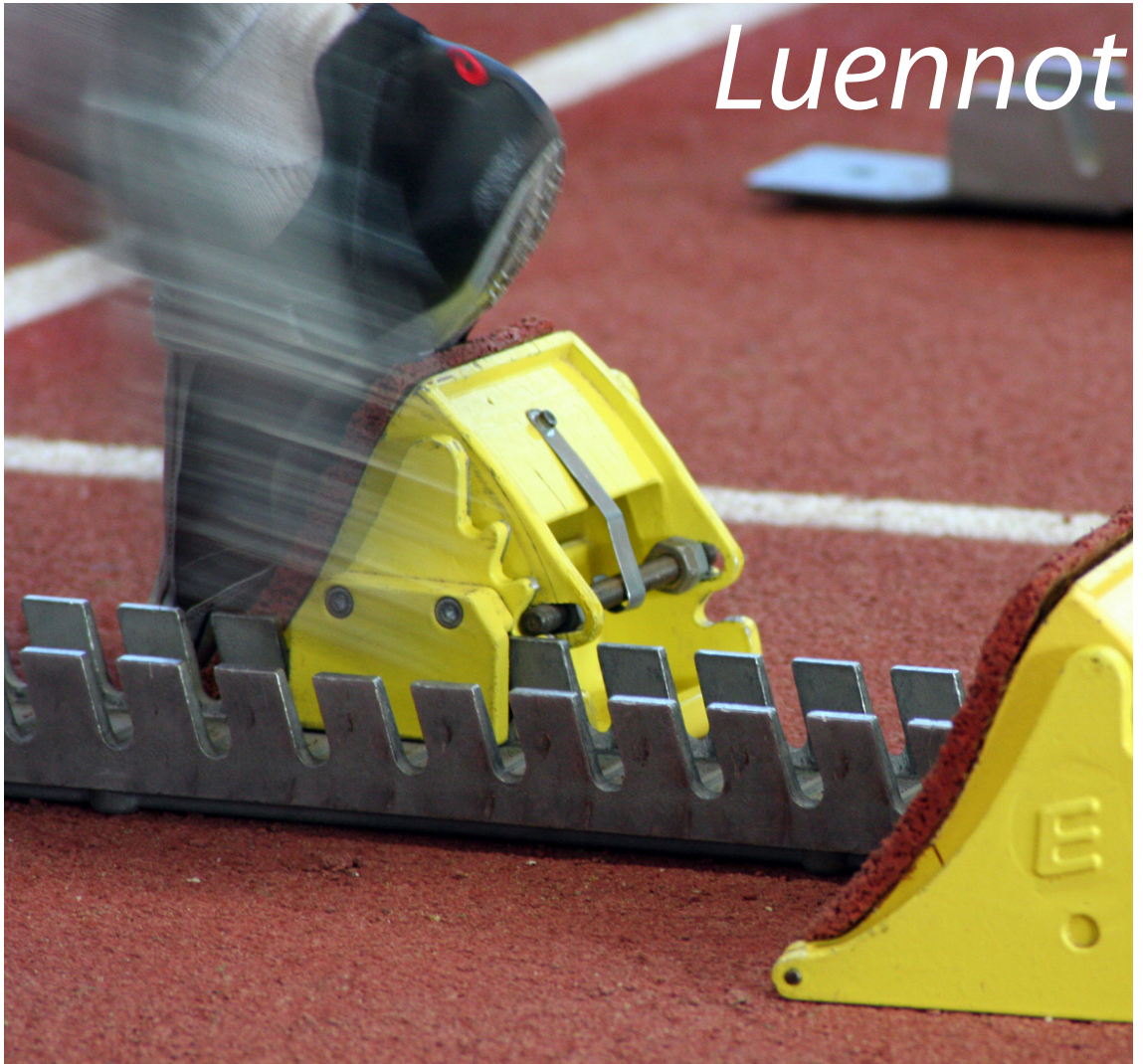


Biomekaniikka I

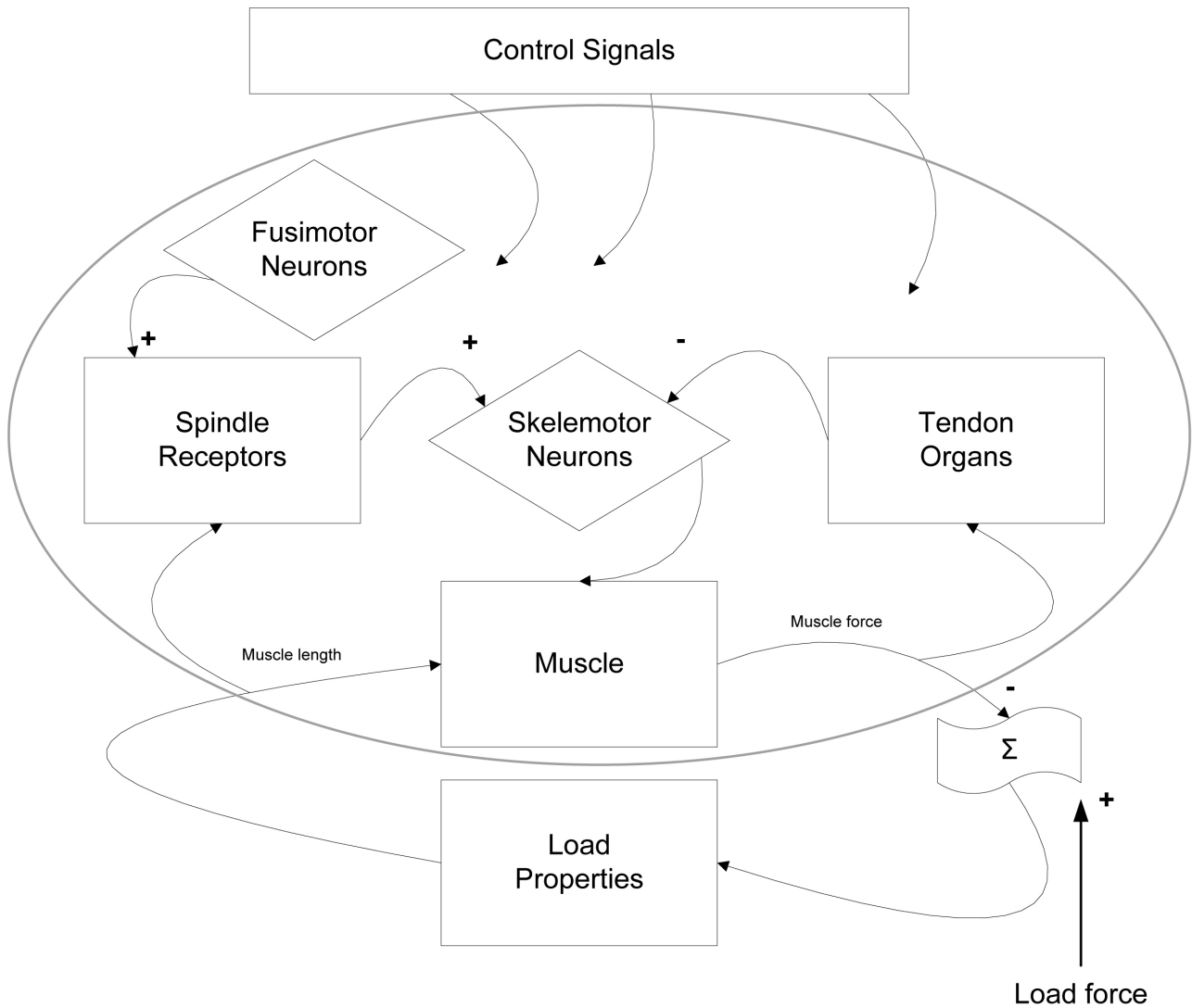
Luennot



Panu Moilanen
Jyväskylän yliopisto - 2005-2008

Luentorunko

1. Hermolihasjärjestelmän yleinen rakenne
2. Luurankolihasen perusrakenne ja toiminta
3. Lihasmekaniikka
4. Lihastyön kontrolli
5. Lihastoiminnan spinaalinen ohjaus
6. Lihastoiminnan sentraalinen ohjaus
7. Ihmisen liikkuminen: tahdonalaisen ja refleksitoiminnan yhteistyö



Basic organisational plan of the motor servo.

1. Hermolihasjärjestelmän yleinen rakenne

- Hermosto
 - Somaattinen hermosto
 - Keskushermosto ja ääreishermosto säätelevät luurankolihasien toimintaa.
 - Autonominen hermosto
 - Sympaattinen ja parasympaattinen hermosto
 - Säätelevät sisäelinten, sileän lihaksiston, sydämen ja umpieritysrauhasten toimintaa.
 - Aivot
 - Sijaitsevat kallo-ontelossa ja ovat niska-aukon kautta yhteydessä selkäyttimeen
 - Paino miehillä 1375 g ja naisilla 1245 g. Noin 37-39% harmaata ja loput valkeaa ainetta
 - Isoaivot (telencephalon, cerebrum)
 - Kaksi hemisfääriä, aivokurkiainen yhdistää
 - 75% koko hermojärjestelmän soomaosista
 - n. 50 aluetta
 - Isoaivokuorelta (cortex cerebri) lähtee n. 20 miljoonaa motorista hermosyötä aivorunkoon
 - Basaaligangliat (corpus striatum = isoivojen tyvitumakkeet), säätelevät liikkeen kontrollia ja hienosäätöä
 - Aivorunko (brain stem)
 - Väliaivot, keskiaivot, aivosilta ja ydinjatkos
 - Väliaivot
 - Talamus, epitalamus, hypotalamus ja subthalmus
 - Keskiaivot
 - Yhteydet pikkuaivoihin
 - Punatumake ja substantia nigra
 - Kontrolloi sensorisia ja motorisia toimintoja
 - Aivosilta
 - 5., 6., ja 7. Aivohermon tumakkeita
 - Välittää tieto liikkeestä isoista aivoista pikkuaivoihin
 - Ydinjatkos
 - Aivojen jatke selkäyttimeen
 - Pikkuaivot (cerebellum)
 - Kaksi symmetristä pikkuaivopuolisko
 - Kolme parillista pikkuaivoreittiä yhdistää aivorunkoon, keskiaivoihin, aivosiltaan ja ydinjatkokseen
 - Motorisen koordinaation keskus
 - Ajoitus, oppiminen ja koordinointi
 - Selkäydin (spinal cord)
 - Lähtee isosta niska-aukosta ja on 40-50 cm pitkä
 - Motoristen neuronien aksonit muodostavat selkäydinhermon etujuuren ja sensoriset neuronit yhdessä takajuuren hermosolmun kanssa takajuuren
 - Toimii välittäjänä keskushermoston ylempien osien ja lihasten välillä sekä monien refleksitoimintojen keskuksena.
 - Ääreishermosto
 - Aivohermot
 - 12 paria aivohermoja, jotka välittävät mm. aistimuksia sekä pään ja kaulan alueen lihaksia

- Selkäydinhermot
 - 31 paria
 - Periaatteessa jokaista nikama vastaa segmentti, josta lähtee hermojuuri
 - Takasarven muodostavat sensoriset aksonit ja selkäpuolen lihaksiston ja ihon motoriset aksonit
 - Etusarven muodostavat raajojen ja vartalon etuosan lihasten motoriset aksonit
- Lihaksisto
 - Ihmisellä on noin 640 lihasta
 - Noin 40% kehon painosta
 - Rakenteellinen luokitus
 - Sileä lihaskudos
 - Koostuu sukkulamaisista 0,02-0,5 mm pitkistä ja 3-10 um paksuista poikkijuovattomista soluista, joissa on yksi tuma keskellä
 - Sisältää aktiinia ja myosiinia, ei kuitenkaan järjestelmällistä rakennetta - ei yhdensuuntaisia filamentteja
 - Eivät kiinnity luihin
 - Toimintaa ei voi säädellä tahdonalaisesti
 - Verisuonten, hengitysteiden, ruoansulatuskanavan, virtsateiden ja sukupuolielinten lihaskerroksissa
 - Kun yksi solu ärsyyntyy, koko solukimppu ärsyyntyy Toimii kuten yksi solu (sähköinen synkutiumi)
 - Supistuvat hitaammin ja kehittävät vain noin kolmanneksen samankokoisen poikkijuovaisen voimasta
 - Eivät juuri väsy
 - Ärsyyntymistavat
 - Hermotus
 - Autonominen hermotus
 - Lepopotentiaali vaihtelee jatkuvasti
 - Ei varsinaisia hermolihaskytkimiä, (noradrenaliini ja asettylikoliini välittäjäaineina)
 - Solukalvojen uloimmat kerrokset ovat yhteenkasvaneita, joten impulssi leviää solusta toiseen suoraan ilman välittäjäaineita
 - Nopea venytys
 - Pitkä latenssiaika
 - Hidas depolarisaatio
 - Pitkäkestoinen supistus
 - Humoraalinen ärsytys
 - Monet verenkierrossa olevat hormonit (esim. katekoliamiinit) vaikuttavat sileän lihaksen ärsyyntymiskykyyn
 - Sydänlihas
 - Sydänlihassolut ovat poikkijuovaista kudosta
 - Autonominen hermosto hermottaa, mutta ei ole välttämätön sydänlihaksen toiminnan kannalta, sillä sydän supistuu automaattisesti (sinussolmuke)
 - Impulssi leviää solusta toiseen ilman välittäjäainetta
 - Repolarisaatiovaihe kestää pitkään
 - Sydämen absoluuttinen refraktaariaika on pitkä
 - Supistumisvoima suurempi kuin sileällä lihaksella
 - Poikkijuovainen lihaskudos
 - Toiminnallinen luokitus – tahdonalainen ja ei tahdonalainen

2. Luurankoliuksen rakenne ja toiminta

- Luurankoliukset ovat tahdonalaisia, ärtyviä, supistuvia, venyviä ja elastisia.
- Useimmat poikkijuovaiset lihakset ovat jänteiden avulla kiinni luissa. Vähintään yksi nivel jää aina tällöin väliin.
- Jotkin poikkijuovaiset lihakset kiinnittyvät pehmeisiin kudoksiin (esim. ihoon, mm. kasvoissa).
- Luurankoliukset muodostuvat 5-50 mm pitkistä ja 10-100 µm paksuista lihassyistä, joissa jopa useita satoja tumia.
- 85% lihasmassasta on fiibreitä (lihassoluja), loppu on kollageenia
- Nopeat ja hitaat lihassolut

Lihasten jakautuminen yhä pienempiin rakenteisiin

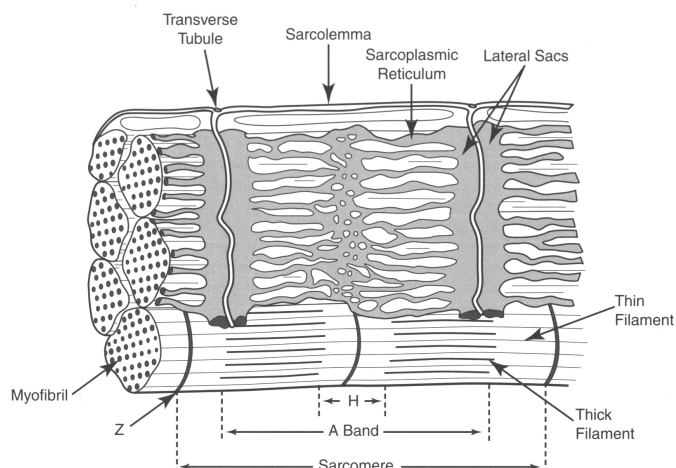
- Lihas – lihassolukimppu – lihassoluja/lihasfiibreitä – myofibrilli (n. 1000 kpl yhdessä fiiberissä) – myofilamentti (aktiini ja myosiini)
- Tärkeimmät lihaskalvot
 - Epimysium ympäröi lihasta
 - Perimysium ympäröi lihassolukimppua
 - Endomysium ympäröi lihassolua
 - Sarkolemma on solun pinnalla oleva kalvo, joka johtaa ärsytystä

2.1 Rakennetyypit

- Yhdensuuntainen lihas (parallel muscle)
 - Esim. sartorius ja rectus abdominis
 - Supistusnopeus suuri, voima ei välttämättä suuri
- Sukkulamainen lihas (fusiform muscle)
 - Esim. biceps brachii
- Viuhkamainen lihas (fan-shaped muscle)
 - Esim. pectoralis major, gluteus medius ja minimus
- Sulkamaiset lihakset (single pennate, double pennate, multipennate)
 - Esim. extensor digitorum longus (1-sulkainen), rectus femoris (2-sulkainen) ja tibialis anterior (monisulkainen)
 - Voimantuotto voi olla suuri

2.2 Luurankoliuksen hienorakenne

- Sarkomeeri on liuksen pienin toiminnallinen yksikkö, joka kattaa yhden Z-kalvojen välisen alueen, myofibrillien toiminnallinen yksikkö



- Sarkoplasma sisältää 75% vettä, 20% proteiinia ja 5% muuta materiaalia (= solun sisältö).
 - Proteiinit: aktiini ja myosiini (80% koko proteiinista suhteessa 1:3), tropomyosiini, tropo-
niini, C-proteiini, M-proteiinit, α -aktiini, β -aktiini ja aktomyosiini (= aktiini ja myosiini
kiinni toisissaan)
 - Myosiinin rakenne
 - HMM on raskas ja LMM kevyt meromyosiini
 - Trypsiini pilkkoo raskaan meromyosiinin alarakenteisiin (HMMS1
(pallomainen) ja HMMS2 = poikittaissillat)
 - Kaikkia ATP:n hajottamisentsyymit sijaitsevat HMMS1:ssä.
 - Troponiini T syrjäyttää troponiini I:n, kun kun kalsium tu-
lee sarkoplasmaan
 - Aktiinin rakenne
 - Jaetaan G- ja F-aktiineihin, joista G-aktiini siirtää ATP:n lihassupistukseen
tiukasti sitoutuneena pintaansa.
 - Troponiini I estää HMMS1:n kiinnittymisen aktiiniin eli
poikittaissillan kiinnittymisen. Vallitseva lepotilassa.
 - Troponiini C, kalsium pääsee kiinnittymään siihen.
 - Muu materiaali
 - Glykogeeni, lipidi, natrium, kalium, magnesium-
kloridi, kreatiinia (KP), adenosinotriifosfaattia (ATP), adenosinidifosfaattia
(ADP) ja laktiinia (La).
- Sarkoplasminen retikulum (kalvorakenne) koostuu pitkittäisistä ja poikittaisista tubuluksista (T-
tubulukset), jotka muodostavat Z-kalvon läheisyyteen triadin.
 - Toimii Ca-varastona, Ca tiukasti sitoutuneena pitkittäistubulussäkkeihin, jolloin Ca-
konsentraatio sarkoplasmassa on alhainen.

Luurankoliuksen supistuminen

- Aktiini- ja myosiinifilamentit liukuvat toistensa lomiin => sarkomeerin pituus lyhenee, I-alue ka-
toaa ainakin osittain, H-alue katoaa kokonaan

Vaiheet

1. Aktiopotentiaali ylittää motorisen päätelevyn, lihassolukalvo depolarisoituu
2. Aktiopotentiaali leviää sisäänpäin poikittaisessa tubulussysteemissä, ärsytys leviää myös pit-
kittäissäkkeihin aiheuttaen Ca^{2+} -läpäisevyyden lisääntymisen ja lopulta Ca^{2+} -ionien vapau-
tumisen sarkoplasmaan.
3. Ca^{2+} diffusoituu sarkoplasman läpi ja kiinnittyy troponiiniin.
4. Troponiinin paikka tropomyosiiniketjussa muuttuu tehden mahdolliseksi myosiini-S1-pään
kiinnittymisen aktiiniin (kaikki ATP:n hajottamisentsyymit sijaitsevat HMMS1:ssä). ATPaasi =
aktomyosiinikompleksi.
5. Kiinnittymisen jälkeen ko. pää muuttaa aktiivisesti rakennettaan siten, että kiinnittymiskulma
ohueen filamenttiin nähden muuttuu: ohut filamentti liukuu paksun filamentin ohi. Sillat
kiinnittyvät ja irrottavat useaan kertaan lihassupistuksen aikana.

Luurankoliuksen relaksoituminen

- Ca^{2+} -ionit palaavat takaisin sarkoplasmaan retikulumiin
- Lohmanin reaktio: $ATP \Rightarrow ADP + P_i$ (supistuksessa); $ADP + PCr \Rightarrow ATP + Cr$ (kreatiini-
fosforokinaasi)
- Lohmanin reaktio pitää ATP-tason vakiona
- Poikittaissillat irtoavat

2.3 Hitaan ja nopean lihaksen erot

- Lihaskiiberityypit aikuisen lihaksessa
 - Jako toiminnan mukaan
 - Tooniset lihaskiiberit
 - Asentoa ylläpitävät (esim. m. soleus; voimakas => myös tärkeä liikkumisen kannalta)
 - Matala voimataso
 - Paljon hitaita soluja, ventraalisia, syviä
 - Hitaita
 - Ei suurta vastetta stimulukselle
 - Alhainen myosiini-ATPaasi-aktiivisuus
 - Taloudellisia
 - Faasiset lihaskiiberit
 - Muuttavat asentoa
 - Nopeita
 - Jako histokemiallisen analyysin mukaan
 - Ranvier noin 100 vuotta sitten
 - Punaiset = hitaat
 - Tiheämpi verisuonisto ympärillä
 - Valkoiset = nopeat
 - Histokemialliset analyysit tiettyjen ominaisspesifisten analyysien avulla
 - MyosinATPaasi => supistumisnopeus (nopeat)
 - Glykonelilyysi/glykolyysi-entsyymit => anaerobinen työkyky
 - Oksidatiiviset entsyymit => aerobinen työkyky
 - Engel 1962 (myosinATPaasi-värjäykseen perustuen)
 - I = hitaasti supistuva
 - Ila = nopea, kestävä (pH 4,3)
 - Voidaan vaikuttaa harjoittelulla, hitaaksi tai nopeaksi
 - IIb = nopea (pH 4,6)
 - Osuudet vaihtelevat
 - Perinnöllisyys
 - Ikääntyessä nopeat solut degeneroituvat
 - Käyttö (= harjoittelu)
 - Vaikuttaa ainakin solujen pinta-alaan, jos ei lukumäärän
 - Lihassolunäytteestä voidaan määrittää lihassolujen jakauma. Otetaan neulabiopsiana yleisimmin m. vastus lateraliksesta, josta otetaan neljä näytettä, joista lasketaan keskiarvo
 - Hitaiden lihassolujen prosentiosuuksia eri urheilijoilla lajiryhmittäin
 - Pikajuoksu 35%
 - Hypyt 51%
 - 500 m – marathon 71%
 - Käsipallo 51%
 - Suunnistus 68%
 - Murtomaahiihto 71%
 - Jääkiekko 51%

- Motorinen yksikkö = α -motoneuroni ja kaikki sen hermottamat lihassolut
 - Sooma sijaitsee selkäytimen ventraalisessa sarvessa
 - Aksonit kulkevat selköydinhermojen mukana (ja osittain muodostavat ne) kohdelihakseen
 - Eri lihaksissa on eri määrä motorisia yksiköitä ja motoristen yksiköiden koko vaihtelee
 - Tarkka motorinen kontrolli => pieniä motorisia yksiköitä, esim. silmän motoriikka
 - Karkea motorinen kontrolli => suuret motoriset yksiköt
- Hitaan ja nopean motorisen yksikön rakenteellisia ja toiminnallisia eroja
 - Supistumisnopeus
 - Syttymistiheys
 - Rekrytointikynnys
 - Aiheuttajaa ei tunneta
- Motoristen yksiköiden kolme eri tyyppiä (rekrytointijärjestyksessä)x
 - S
 - Hitaasti supistuva ja hyvin väsymystä kestävä
 - Alhaisempi rekrytointikynnys
 - I-tyyppin lihassoluja
 - FR
 - Nopeasti supistuva, väsymystä kestävä
 - IIa-tyyppin lihassoluja
 - FF
 - Nopeasti supistuva, nopeasti väsyvä
 - Kooltaan suurempi => aktiopotentiaalin johtuminen nopeampaa
 - Lähinnä IIb-tyyppin lihassoluja
- Yhdellä motorisella yksiköllä on aina sama aktiopotentiaali (koko ja muoto)
 - Matala piikki EMG:ssä => hidas motorinen yksikkö
 - Korkea piikki EMG:ssä => nopea motorinen yksikkö
 - Amplitudi korkea
 - Kesto lyhyempi kuin hitaalla
- Kaksi tapaa lisätä voimaa
 - Lisätä motorisia yksiköitä
 - Lisätä syttymistiheyttä

3. Lihasmekaniikka

3.1 Supistuva ja elastinen komponentti

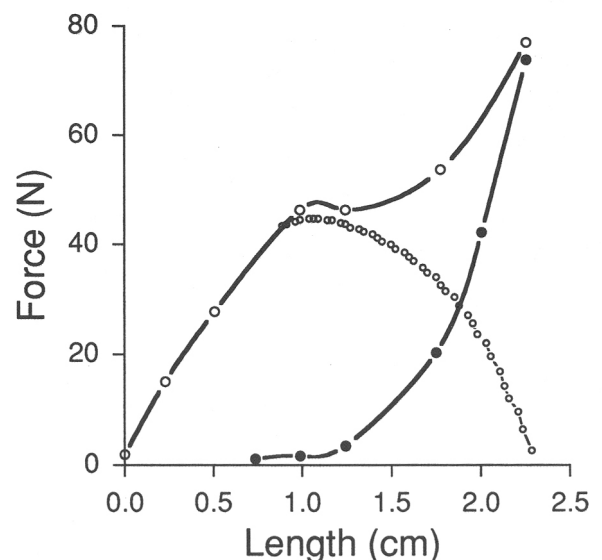
- Rinnakkaiset elastiset komponentit (parallel elastic components)
 - Endomysium
 - Perimysium
 - Epimysium
- Peräkkäiset elastiset komponentit (series elastic components)
 - Sarkomeerin poikittaissillat
 - Jänne
- Supistuva komponentti
 - Tuottaa voimaa (aktiivisesti), säätelee elastisia komponentteja, mm. jännettä
 - Lihaksen aktiivinen osa (active state)

3.2 Lihastyötavat

- Dynaaminen lihastyö
 - Lihaksen pituus muuttuu
 - *Positiivinen lihastyö* on puhdasta konsentrista työtä, jossa lihas supistuessaan lyhenee.
 - $W = F \times d$, (Työ = Voima x Matka)
 - Sisäistä järjestelyä: supistuva komponentti lyhenee ja peräkkäinen elastinen komponentti pitenee
 - Liike tapahtuu vasta, kun se voima, jolla supistuva komponentti vetää elastista komponenttia on yhtä suuri tai vähän suurempi kuin kuorman suuruus
 - Puhdas konsentrisen lihastyö: atraimen isku tuulastettaessa
 - *Negatiivinen lihastyö* on puhdasta eksentristä työtä, jossa lihas supistuessaan pitenee
 - $W = F \times (-d)$
 - Supistuva ja elastinen komponentti pitenevät
 - Aiheuttaa lihassoluvaurioita (esim. kuntosaliharjoittelu tauon jälkeen => lihakset kipeytyvät)
 - Esim. penkille istuutuminen puhtaasti eksentristä lihastyötä
 - Energiankulutus on pienempää kuin positiivisessa työssä
 - Suurempia lihasvoimia kuin puhtaasti konsentrisessa työssä
 - Lihasten elektrinen aktiivisuus vähäisempää kuin positiivisessa työssä
 - Eksentris-konsentrisessa lihastyössä eksentrisen lihastyö edeltää konsentrista lihastyötä
 - Lihaksen venymislyhenemissykli (SSC, stretch-shortening cycle)
 - Venytettäessä aktivoitunutta lihasta siihen varastoituu elastista energiaa, jota voidaan hyödyntää silloin, kun konsentrisen lihassupistus seuraa välittömästi venytystä
 - Jos venytystä ei seuraa välitön supistuminen, varastoitunut potentiaalienergia vapautuu lämpönä.
 - Lihaksen kyky varastoida ja hyödyntää elastista energiaa riippuu esivenytyksen nopeudesta, lihaspituudesta, voimasta esivenytyksen lopussa ja nivelen kulma-
muutoksista.
 - Nopea ja lyhyt esivenytys => positiivisen työn tehokkuus lisääntyy, koska lihasaktiivisuus ja energiankulutus ovat alhaisia => mekaaninen hyötysuhde korkea.
- Staattinen eli isometrinen lihastyö
 - Lihaksessa tapahtuu sisäistä uudelleenjärjestelyä, mutta lihaksen ulkoinen pituus ei muutu
 - $W = F \times 0$

3.2 Lihaksen voima-pituus -suhde

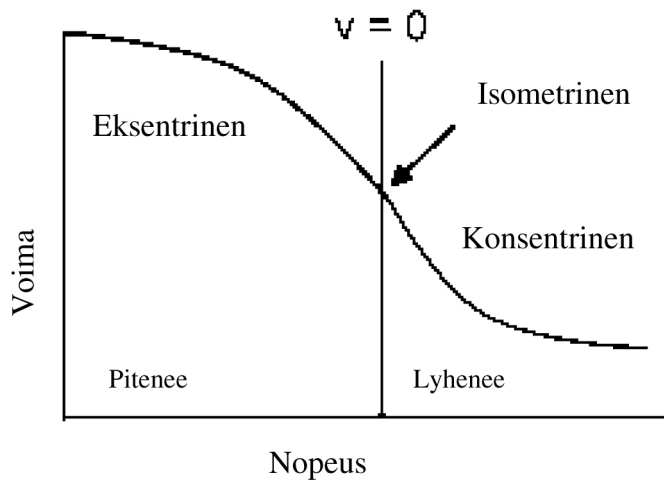
- Sarkomeerin voima-pituusriippuvuus
 - Jokaisella lihaksella ihanepituus, jossa voimantuotto on suurin
 - Voima-pituus-käyrä paraabelin muotoinen
 - Mitä enemmän kiinnittymismahdollisuuksia poikittaissilloille, sitä enemmän voimaa
- Lihaksen voima-pituusriippuvuus (kuva)
 - Aktiiviset ja passiiviset elastiset ominaisuudet: aktiivinen voima-pituuskäyrä (paraabeli) ja passiivinen voima-pituuskäyrä (ympyrät)



- Eristetyn lihaksen passiiviset ominaisuudet on helppo mitata: lihasta venytetään vakio-
tuuksilla ilman stimulusta.

3.4 Lihaksen voima-nopeussuhde

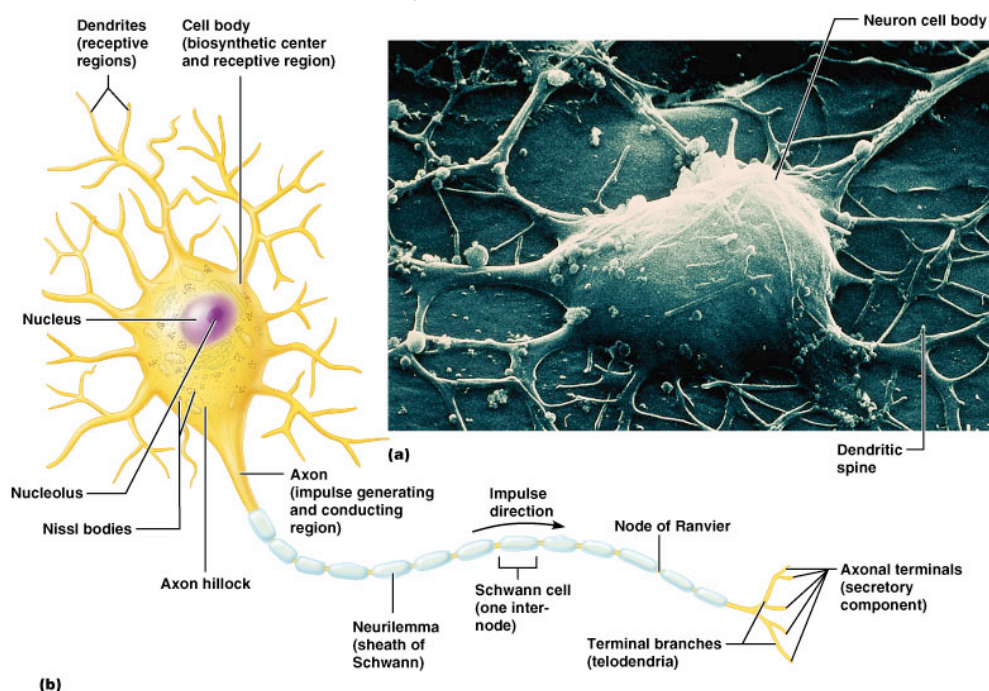
- Lihas supistuu nopeammin pienellä kuormalla
- Voiman ja lyhenemisnopeuden suhde on nonlinearinen



- Eksentrisesti voidaan tuottaa enemmän voimaa kuin isometrisesti ja konsentrisesti
 - Eksentrisessä lihatyössä usein inhibointia

Lihastyön kontrolli

- Luurankolihas on hermoston kontrolloima, ja hermosto määrää
 - mikä lihas supistuu
 - milloin
 - kuinka nopeasti
 - kuinka voimakkaasti
- Hermoston pienin toiminnallinen yksikkö on neuroni



- Neuronityypit
 - Reseptorineuronit (sooma, hermosolun runko-osa, on aksonissa)
 - sensorisia
 - afferentteja (tuovia, aivoihin päin)
 - Synaptiset neuronit
 - välineuronit
 - motoriset neuronit
 - efferenttejä (vieviä)

Motoriset neuronit

| Luokka | Läpimitta (μm) | Pääte-elin | Johtumisnopeus |
|-----------------------|-----------------------------|---|----------------|
| α -motoneuroni | 12-20 | lihas(solu) | 60-100 m/s |
| β -motoneuroni | 6-12 | lihas ja lihassukkula | 30-60 m/s |
| γ -motoneuroni | 2-6 | lihassukkula | 15-30 |
| B | 1-3 | autonomisen hermoston preganglioneuroni | 3-15 |
| C | 0,5-1 | postganglioneuroni | 0,5-3 |

Sensoriset neuronit

| Luokka | Läpimitta (μm) | Lähtöelin | Johtumisnopeus |
|--------|-----------------------------|-----------------|----------------|
| Ia | 13-22 | lihassukkula | 80-120 |
| Ib | 13-22 | GTO | 80-120 |
| II | 6-12 | lihassukkula | 30-70 |
| III | 1-6 | paine | 5-30 |
| IV | 0,5-1 | kipu, lämpötila | 0,5-2 |

- Ärsyksen johtumisnopeudella ja aksonin paksuudella on suhde: mitä paksumpi aksoni, sitä suurempi johtumisnopeus
- Ärsytyskynnys on sitä alhaisempi, mitä paksumpi aksoni => suurempi pinta-ala ionien vaihdolle
- Saltatorinen konduktio (ärsytyksen kulkeminen myeliinitupellisessa aksonissa)
 - Ärsyke kulkee noodista noodiin hyppien
- Aktiopotentiaali
 - Normaalityössä hermosolun sisä- ja ulkopuolen välillä vallitsee aina potentiaaliero siten, että sisäpuoli on negatiivisesti varautunut sisäpuoleen nähden
 - Lepopotentiaalia pidetään aktiivisesti yllä natrium-kaliumpumpun avulla
 - Hermosolun aktiopotentiaali on solun polaarisuuden nopea, muutaman millisekunnin kestoinen heilahdus negatiivisesta positiiviseen ja takaisin.
 - Muutos aiheutuu natriumionien virtaamisesta solun sisään natriumkanavien auetessa jonkin syyn (esim. välittäjäaine) johdosta.
 - Natriumkanavan avautuminen aiheuttaa myös viereisen Na-kanavan avautumisen => aktiopotentiaali etenee solukalvoa pitkin
 - Kun kalvojännite on noin +30 mV, Na-kanavat sulkeutuvat ja pysyvät hetken toimimattomina pystymättä heti osallistumaan mahdollisiin uusiin signaaleihin. Na-kanavien sulkeutuessa kaliumkanavat aukeavat.
 - Kaliumionit ovat natriumioneiden tavoin positiivisia ja kaliumkanavien avauduttua kaliumionit siirtyvät ulos positiivisesti varautuneelta

solukalvon sisäpinnalta. Näin kalvojännite palautuu negatiiviseksi, mitä kutsutaan repolarisaatioksi.

- o Noodissa (Ranvierin kurouma) ärsytyskynnys on erittäin alhainen

Hermolihasliitos

- Hermo- ja lihassolun välinen liitos (neuromuscular junction, motor end plate)
- Asetyylikoliini (ACH) toimii kemiallisena transmitterinä
 - o Tuotetaan presynaptisissa vesikkeleissä, joista se myös vapautetaan
 - o Vaikutus kohdistuu postsynaptiselle puolelle, jossa se reagoi tietyn reseptorikohdan kanssa saaden aikaan eksitatorisesti postsynaptisen potentiaalin (EPSP)
 - o Asetyylikoliini vapautuu aktiopotentialin aiheuttaman depolarisaation ansiosta.
 - o Vapautumista tapahtuu myös lepotilassa. Tällöin tehtävänä on valmiustilan ylläpitäminen.
- Eksitatorinen (EPSP, vain hermolihasliitoksessa) ja inhibitorinen (IPSP, synapsissa) postsynaptinen potentiaali
 - o Mikäli EPSP on riittävän suuri, postsynaptisessa solussa syntyy aktiopotentiali
 - o IPSP aiheuttaa saman ilmiön kuin hyperpolarisaatio (inhibitorinen välineuronin)
 - o Monosynaptinen yhteys on aina eksitatorinen/eksitoiva.
 - o Inhibitorinen postsynaptinen potentiaali vaatii aina vähintään yhden välineuronin (inhibitorinen neuronin); välineuronin voi esimerkiksi inhiboida α -motoneuronin.
 - Kaikki välineuronit eivät ole inhiboivia.

3.2 Lihassolun aktiopotentiali

- Kemiallinen voima
 - o Transmembraaniset konsentraatioerot (kalvon eri puolilla eri määrät ioneja, kemiallinen voima pyrkii tasoittamaan erot)
- Sähköinen voima
 - o Transmembraaniset potentiaalierot
- Transmembraaniset konsentraatioerot (kemiallinen voima) aiheuttaa sähköisen voiman, joka pitää yllä transmembraanisia konsentraatioeroja (kemiallista voimaa).

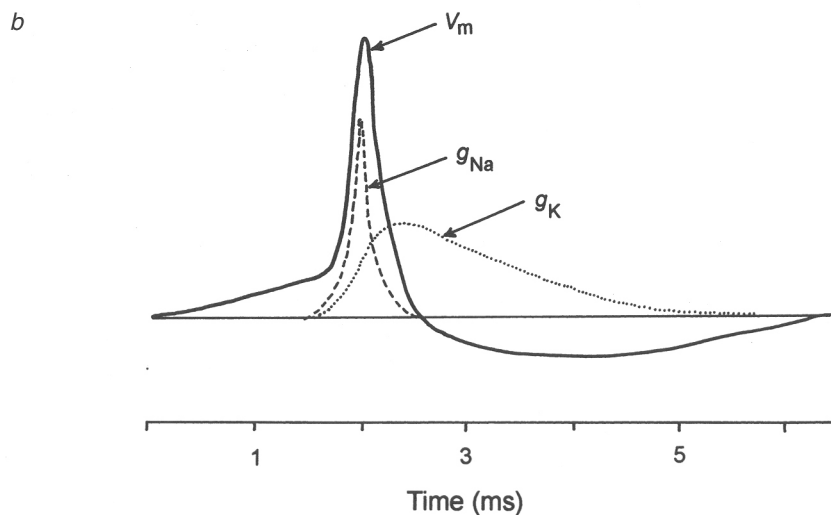
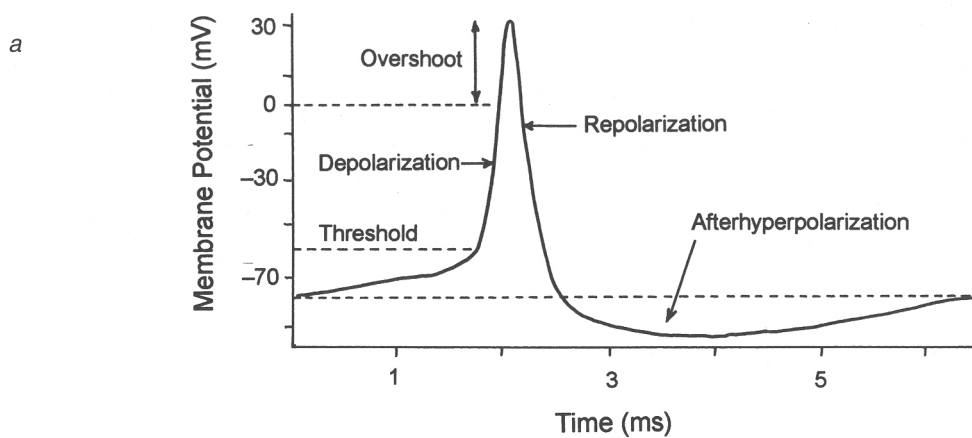
| Ioni | Ekstrasellulaarit. (mmol/l) | Intrasellulaarit. (mmol/l) | Läpäisevyys |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Na ⁺ | 145 | 12 | matala |
| K ⁺ | 4 | 155 | korkea |
| Cl ⁻ | 120 | 4 | keskimääräinen |
| Anioneita (molek.) | 130 | 155 | ei läpäisevyyttä (suurikokoisia) |

Oleellista on tietää, kummin päin konsentraatioero vallitsee.

- Lepotilassa solun sisäosa on solun ulko-osaan nähden negatiivisesti varautunut (-60 - -90 mV)
- Lepopotentialia ylläpitävät tekijät
 - o Aktiivinen Na-K-pumppu (tarvitsee toimiakseen ATP:tä)
 - o Cl⁻ pysyy sähköisen ja kemiallisen voiman tasapainon ansiosta
 - o Solukalvon rakenteesta johtuva mekaaninen vastus (porttimolekyylit)

Aktiopotentiali

- Edeltää synaptinen potentiaali
 - Sama mekanismi
 - Ei välttämättä johda aktiopotentialiin
 - "Kivi veteen" – aalto vaimenee
 - Vaatii yleensä hermossa summaatiota
 - Aktiopotentiali syntyy vasta, kun synaptinen potentiaali ylittää tietyn kynnystason aksonin kummussa
- Aktiopotentialissa solukalvon läpäisevyys muuttuu
 - Na-aktivaatio = depolarisaatio
 - K-aktivaatio ja Na-inaktivaatio = repolarisaatio
- Aktiopotentiali = suuriamplitudinen yksihiippuinen jännitteen heilahdus



Ärsytyskynnys

- Riittämättömät ärsykkeet summautuvat
- Temporaalinen summaatio
 - Ärsykkeet ovat peräisin samasta lähteestä
- Spatiaalinen summaatio
 - Ärsykeitä tulee eri lähteistä

- Aktiopotentialilla on aina tietty koko ja muoto, joka ei voi muuttua, kun se mitataan samasta paikasta (elektrodin sijoitus ja havainnoitavat motoriset yksiköt).
- Nopean motorisen yksikön aktiopotentialin amplitudi on korkeampi kuin hitaan motorisen yksikön.
 - Miten EMG:ssä näkyy uusien motoristen yksiköiden rekrytointi?
 - Ensin otetaan hitaat mukaan => korkeampia piikkejä
 - Miten EMG:ssä näkyy syttymistaajuuden lisäys?
 - Lisää piikkejä
 => Kumpikin muutos lisää pinta-EMG:n alaa
- EMG:tä käytetään yleisesti paljon väärin – pinta-EMG:tä ei oikeastaan voi mitata liikkeessä, koska elektrodin paikka muuttuu.

3.3 Motorinen yksikkö

- Motorinen yksikkö = α -motoneuroni ja kaikki sen hermottamat lihassolut
- Kaikki käskyt lihaksiin α -motoneuronien kautta
- Käsky saavuttaa jokaisen lihassolun lähes samanaikaisesti
- Eri lihaksissa on eri määrä motorisia yksiköitä ja motoristen yksiköiden koko vaihtelee
- Tarkka motorinen kontrolli edellyttää pieniä motorisia yksiköitä – esim. silmässä yksi neuroni hermottaa ainoastaan muutamaa lihassolua
- Karkea motorinen kontrolli => suuret motoriset yksiköt
 - Biceps brachii 750 lihassolua/my
 - Brachioradialis 390 lihassolua/my
 - Gastrocnemicus 1720 lihassolua/my
- Motoristen yksiköiden rekrytointiin vaikuttavia tekijöitä
 - Synapsien sijainti soomaan ja dendriitteihin nähden
 - Synaptisten terminaalien määrä neuronissa
 - Vapautuvan neurotransmitterin määrä kussakin synapsissa
 - Neurotransmitterireseptorien herkkyys
 - Motoneuronin sähköiset ominaisuudet

4. Lihastyön kontrolli

(Puuttuu)

5. Lihastoiminnan spinaalinen säätely

5.1 Lihasureseptorit

- Havainnoivat systeemin itsensä tuottamia stimuluksia

Lihassukkula

- Kapseli (2-20 mm), jonka sisällä 2-12 intrafusaalisolua (vrt. ekstrasfusaalisolu = lihassolu, jossa 36x enemmän voimaa).
 - Sijaitsee eri puolilla lihasta, 6-1 300 kpl/lihas, yhteensä noin 27500 kpl. Jänteen puolella enemmän.
 - Tumasäkkisoluja 1-3 kpl
 - Jatkuvat kapselin ulkopuolelle ja kiinnittyvät lihassolukalvoihin tai toiseen lihassukkulaan (tandemsukkula)

- Tumaketjusoluja 1-8 kpl
 - Päätyvät kapselin sisään

Lihassukkulan afferenttihermotus

- Primaaripäätte (annula spiral, primal ending)
 - Kaikissa intrafusaalisoluissa 1/solu
 - Ia (lähtee primääripäältä)
- Sekundaaripäätte (flower spray, secondary ending)
 - Yleensä vain tumaketjusoluissa, 1-5 kpl /solu
 - II (sensorinen neuron)
- Pääteissä tapahtuu reseptoripotentiaali => tieto keskushermostoon
- Pääteillä eri sensitiivisyys

Lihassukkulan efferenttihermotus

- Reseptorierikoisuus, myös motorinen hermotus
 - Intrafusaalisolun γ -motoneuronin (fusimotoneuronin)
 - Kahdenlaisia, 7-25 kpl/solu
 - Tumasäkkisoluihin nopea dynaaminen fusimotoneuronin (lisää dynaamista indeksiä, eksitoi)
 - Tumaketjusoluihin hidas staattinen fusimotoneuronin (vähentää dynaamista indeksiä/inhiboi)
 - α - ja γ -motoneuronit aktivoidaan samanaikaisesti
 - γ -motoneuronin aktiivisuus saa aikaan intrafusaalisolujen napaosien supistumisen
 - sisäinen venytys (myös lihaksen supistuessa) (reseptoriosa)
 - Ia-aktiivisuus, joka eksitoi α -motoneuronin
 - γ -looppi
 - Spinaalinen säätelyjärjestelmä perustuu tähän
 - γ -hermotus
 - Lisää lihasaktiivisuutta sekä lihaksen venyessä että supistuessa
- Lihasspindelijärjestelmän tehtävät
 - Määrittää kehon segmenttien ja liikkeiden suuntaa lihaspituusmuutoksien avulla
 - Reagoi nivelsegmenttisysteemiin kohdistuviin ympäristön aiheuttamiin herätteisiin

Golgin jänne-elin

- Jännesukkula. Aistinelin, joka välittää lihaksesta tulevaa tietoa koskien kehon asentoa ja liikkeitä. Reagoi lihasjännitykseen sijaiten lihasjanteessa, säätelee lihaksen supistumista ja estää liian voimakkaat ja nopeat lihaksen supistumiset.
 - Kapseli lihaksen ja janteen liitoskohdassa
 - Noin 0,2-1 mm pitkä, n 0,5 mm paksu
 - Määrällisesti noin 50% spindeleiden lukumäärästä
 - Elastinen kapseli, johon Ib-afferentit kiinnittyvät
 - Kollageeni puristaa ja ärsyttää Ib-afferenttia
 - Mekaaninen ärsyke saa aikaan Ib:n syyntymisen
 - Ei herkkä passiiviselle venytykselle
 - Aktiivinen venytys: syyntyminen lisääntyy jännityksen (voiman) funktiona

5.2 Nivelreseptorit

- Ruffinin endings, 5-9 μ m
 - Nivelen paikka ja paikan muutos/kulmanopeus, nivelten välinen paine

- Pacinian corpuscles, 8-12 μm
 - Nivelen kiihtyvyyden
- Vapaat hermopäät voivat säädellä epäsuorasti moduloimalla spindelin aktiivisuutta

5.4 Selkäydinrefleksit

- Suojelevat systeemiä odottamattomilta muutoksilta
- Nopea reagointi ärsykkeeseen: input-output (afferent-efferent) –refleksi
- *Monosynaptinen venytysrefleksi* (short latency reflex, SLR). Venytys saa aikaan reseptoripotentiaalilin intrafusaalisolujen reseptoriosassa => aktiivisuus => monosynaptinen yhteys α -motoneuroniiin => saa aikaan eksitatorisen postsynaptisen potentiaalilin (EPSP) => jos riittävän suuri aktiopotentiaali modifioidaan, presynaptinen inhibitio. Venytys siis aiheuttaa lihaksen äkillisen supistumisen, esimerkiksi polven ekstensio patellaan kohdistuvan iskun seurauksena.
- Tahdonalainen reagointi venytykseen (> 100 ms). Venytysrefleksin SLR-komponentit vaikuttavat
 - Amplitudi (miten suuresta venytyksestä on kyse)
 - Venytysnopeus
 - Lihaspituus (millä lihaspituudella lihasta venytetään)
 - Tausta-aktiivisuuden määrä ja tapa
- *Hoffmanin refleksi*. P. Hoffmann esitteli 1950-luvulla mittausmenetelmän, jolla voidaan karakterisoida ihmisellä venytysrefleksin kaltaista monosynaptista yhteyttä lihaksista selkäyttimeen ja takaisin. Tässä mittausmenetelmässä la-afferenttifiiberin hermorunkoa stimuloidaan sähköisesti ja se aiheuttaa hermosolun kalvon depolarisaation ja aktiopotentiaalilin etenemisen keskushermostoon ja sieltä takaisin alfa-motoneuroneita pitkin samaan lihakseen, jota stimuloitujen afferenttifiiberit hermottavat. Tätä EMG:llä mitattavaa refleksivastetta kutsutaan Hoffmannin refleksiksi tai H-refleksiksi.
- α -motoneuronialtaan ärtyvyyden mittausmenetelmä (selkäydintasolla)
 - Refleksi aiheutetaan ulkoisella sähköllä hermorunkoon
 - Etsitään paikka, jossa hermorunko on helposti stimuloitavissa
 - la-afferentti ärsyyntyy ensin, koska se on paksumpi
 - H-M-suhteen kasvu tarkoittaa pääsääntöisesti inhibition lisääntymistä
 - Yleisimmin testataan soleuksesta (tibialishermo)
- *Myostaattinen heijaste ja γ -luoppi*
 - Presynaptinen inhibitio
 - Ennen synapsia, estää la-afferentin toimintaa, ei vaikuta α -motoneuronialtaaseen
 - Postsynaptinen inhibitio
 - Vaikuttaa α -motoneuronin soomaosaan (?) ja estää kaiken käskytyksen lihakseen eli α -motoneuronialtaaseen.
- Resiprookkinen hermotus.
 - Esim. oikea hauis = agonisti, vasen hauis = kontralateraalinen agonisti (= agonistiin nähden selkäytimen toisella puolella).
 - Vuorotahminen kävely luonnollisin tapa liikkua, mutta riippuvuus voidaan murtaa tahdonalaisesti => tasajalkaa hyppiminen
- Kävelyn sykli
- Usean segmentin selkäydintason yhteistyö, synaptinen fasilitaatio ja inhibitio
- Presynaptinen inhibitio
 - Pieni välineuronin inhiboi afferenttineuronia ennen kuin se saavuttaa synapsin
 - Pienentää Ca^{2+} virtausta vähentäen välittäjäaineen määrää, minkä johdosta postsynaptinen potentiaali pienenee.

- Presynaptinen fasilitaatio
 - Pienentää K^+ määrää solussa pidentäen aktiopotentialia ja lisäten Ca^{2+} -virtausta => postsynaptinen potentiaali kasvaa
- Rinnakkainen inhibitio
 - Renshaw solu (inhibitorinen välineuroni aktivoitu u III ja IV -afferenteista (sekä se α -motoneuroni, jota ko. solu inhiboi.
 - Vastanottaa lisäksi haaran α -motoneuronista (axon collateral)
 - Aistii aksonissa kulkevan aktiopotentialin
 - Inhiboi alkuperäistä α -motoneuronia estäen sitä laukeamasta heti uudelleen => suojaimekanismi
 - Inhiboi pääasiassa hitaita motorisia yksiköitä

7. Ihmisen liikkuminen

- Tahdonalaisen ja reflektitoiminnan yhteistyö
 - Venytysrefleksin merkitys voimantuottoon
 - Väsymyksen jälkeen refleksikomponentti häviää
 - Vaikutus myös voimantuottoon
- Pudotushypyt eri korkeuksilta
- Juoksun aikana
 - Ischemia => verenkierto estetty lihaksesta => la-afferentti lakkaa toimimasta ensimmäisenä

Osa 2

Hermolihasjärjestelmän adaptoituminen

A) Akuutti adaptoituminen

1. Lämpötila

- Lihaksen voimantuotossa ei muutoksia.
- Aktiopotentialin johtumisnopeus kasvaa.
- Ks. esimerkki monisteessa. Tutkittu H-refleksiä, joka on keinotekoinen, ulkoisella sähköllä aiheutettava refleksi, joka kertoo lähinnä hitaiden motoristen yksiköiden rekrytoinnista.
- Refleksiherkkyys laskee (hitaat?), refleksiherkkyys kasvaa (nopeat?). Ääritilanteessa lämpötilan noustessa voi käydä niin, ettei hitaita motorisia yksiköitä pystytä enää rekrytoimaan.

2. Kylmä

- Isometrinen voima.
 - Ei muutu välillä 27-40°C
 - Laskee 11-19%, kun lihaksen lämpötila < 27°C.
 - "Endurance time" (kestävyysaika, ts. aika, joka suoritusta voidaan maksimissaan jatkaa) voi kasvaa submaksimaalisessa suorituksessa.
- Dynaaminen suoritus
 - Vaikutus suurempi
 - 2-10%/-1°C
 - Voimantuottonopeus on lämpötilasta riippuvainen
 - Hidastunut ATP-hydrolyysi (ts., ATP:tä saadaan hitaammin käyttöön.)
 - Ca^{2+} vapautuminen hidastunut, jolloin poikittaissiltojen muodostuminen heikkenee
 - Aktiopotentialin johtumisnopeus hidastuu sekä hermossa että lihassolukalvolla.
 - Venytysrefleksiherkkyys laskee (lihassukkulan aktiivisuus heikkenee)

3. Lihasvenytys

- Heikentää oleellisesti lihaksen suorituskykyä.
 - o Perusasia: Saadaan aikaan lihaksen löystyminen, jossa tapahtuu kaksi asiaa: viskoelastisuus heikkenee ja tapahtuu plastinen deformaatio. Kun lihas on venyneemmässä tilassa, lihas-solukimput saattavat sijoittua voima-pituuskäyrällä epäedulliseen paikkaan, jolloin ne tuottavat vähemmän voimaa. Myös voiman välittyminen saattaa heikentyä.
 - o Lihaksen tuottama voima (supistuminen) heikkenee, suurimmillaan muutokset ovat olleet jopa 40 %.
 - Jänne-lihaskompleksi löystyy venyttelyn seurauksena
 - Lihaksen viskoelastisuus heikkenee, ts. lihas vastustaa venytystä vähemmän
 - Plastinen deformaatio, ts. venytys aiheuttaa sen, että sidekudossäikeet muodostuvat enemmän samansuuntaiseksi, ts. sidekudos löystyy annetulla pituudella => löysyys kurottava pois, ennen kuin voidaan tuottaa voimaa (aktiivisilla toimilla lihas "kiristettävä"). Siirrytään siis voima-pituus –käyrällä vähemmän optimaaliseen tilanteeseen. Plastinen deformaatio on riippuvainen venytysajasta.
 - Neuraalinen ohjaus heikkenee johtuen disfasilitaatiosta.

4. Vesi

- Voimantuotto ei muutu
- EMG laskee
 - o Periaatteessa pienemmällä neuraalisella ohjauksella saadaan sama voima, ts. voimantuoton hyötysuhde paranee.
 - o Miten tämä on mahdollista?
 - Refleksiherkkyys laskee / inhibitio (paine?)
 - Kompensaatiomekanismi
 - Voima ja voimantuotto lisääntyy twitchissä ("lihasnykäys")

5. Lihasväsymys

- Kykenemättömyyttä ylläpitää vaadittua tai odotettua voimaa tai tehoa (Edwards, 1981)
- Joudutaan lisäämään yritystä vaaditun voiman tai tehon ylläpitämiseksi (Bigland-Ritchie, 1981).
 - o Pyritään lisäämään syttymisfrekvenssiä ja rekrytoimaan lisää motorisia yksiköitä, ts. lisäämään neuraalista ohjausta.
- (1) Sentraalinen väsymys
 - o Vähentynyt hermostollinen ohjaus lihakseen, joka johtaa motoristen yksiköiden määrän laskuun tai syttymisfrekvenssin alenemiseen.
 - o Voidaan tutkia sähköstimulaation avulla. (Ks. kuva monisteessa, kohta 5., 1. kuva)
 - o "Muscle wisdom" – neuraalisen ohjauksen hidastuminen samassa suhteessa kuin lihaksen supistumiskyky vähenee (laktaatin lisääntyminen) toonisen supistustilan estämiseksi.
- (2) Perifeerinen väsymys
 - o Heikentynyt ärsytys-supistus –kytkentä, ts. aktiopotentiaali siirtyy heikommin lihassupistukseksi
 - o Voidaan tutkia sähköstimulaation avulla hermosta tai lihaksesta (muscle twitch – "lihasnykäys", ks. kuva monisteessa – supramaksimaalinen ärsyke, joka aktivoi samanaikaisesti kaikki motoriset yksiköt)
- Lihasväsymyksen sijaintipaikat – ei tapahdu välttämättä aina kaikissa paikoissa, vaan lihasväsymyksen "sijainti" riippuu väsymyksen tyypistä, ts. siitä, miten väsymys on aiheutunut (intensiteetti ja kesto)
 - o (1) Motorinen aivokuori

- Ei lopullista tietoa siitä, voiko motorinen aivokuori väsyä.
 - Motivaatio
 - Motorisen aivokuoren hermosolujen ärsyntyiskynnys laskee (?)
 - Voitaneen mitata: MVC¹ + superimposed twitch, toisin sanoen tehdään vapaaehtoinen supistus ja sen jälkeen lisästimulaatio sähköllä. Ks. kuva monisteesta; TMS *transcranial magnetic stimulation*, motorisen aivokuoren magneettinen stimulointi (MEP)
- (2) Selkäydintaso
 - α -motoneuronaltaan² herkkyys, ts., kuinka monta neuronaa ärsyyntyy vakiostimuluksesta.
 - Voidaan tutkia esim. venytysrefleksin (esim. patellarefleksi) avulla. Aiheutetaan lihakseen venytys ja seurataan, millaisen EMG-vasteen se aiheuttaa. Vasteen amplitudiin vaikuttavat paitsi α -motoneuronaltaan herkkyys, niin myös lihasspindelin ongelma (ongelma). Venytysrefleksi ei siis spesifioi refleksiä nimenomaan α -motoneuronaltaaseen. Toinen vaihtoehto on H-refleksi, jossa ärsyke aiheutetaan keskelle hermorunkoa ulkoisella sähköärsykkeellä, mikä mahdollistaa ärsyksen vakioimisen. Tutkitaan H/M-suhdetta.
- (3) Motorinen hermo
 - Adaptaatio. Syttymistaajuuden lasku saattaa johtua motorisen hermon adaptaatiosta (taajuus, jolla ärsykettä tuotetaan, alenee)
 - Voitaneen tutkia johtumisnopeutta tutkimalla tai syttymisfrekvenssiä, jonka tutkiminen on kuitenkin vaikeampaa.
- (4) Hermo-lihasliitos
 - Välittäjäaineen loppuminen. Asetyylikoliinia ei siis vapaudu hermo-lihasliitokseen enää niin paljon.
 - Lihaskiiberin herkkyyden laskeminen (lepopotentiaali laskee K⁺-ionien ulosvirtauksesta johtuen), ts. lihassolussa samantyyppinen ilmiö kuin hermosolun inhibiatio. Lihassolussa on tietty lepopotentiaali, joka herkkyyden laskiessa alenee, ja kynnys ärsyntyä kasvaa (normaali lepopotentiaali \approx -90-55 mV)
 - Voidaan tutkia HFF:n (high frequency fatigue, korkeataajuusväsymys). Stimuloidaan lihasta korkealla taajuudella (80 tai 100 Hz), ja mitataan, kuinka paljon lihas pystyy tuottamaan voimaa tällä taajuudella. Jos voiman tuotto on heikentynyt, voidaan päätellä, että on tapahtunut korkeataajuusväsymystä, ts. lihas ei pysty enää reagoimaan korkeaan taajuuteen, mikä taas tarkoittaa sitä, että nimenomaan välittäjäaineen määrä on vähentynyt tai sensitiivisyys on laskenut lihassolukalvolla. Toinen testausmahdollisuus on maksimaalinen M-aalto, joka kuvastaa kaikkien motoristen yksiköiden yhtäaikaista syttymistä - se on ts. kaikkien aktiopotentiaalien summa. Jos jonkin motorisen yksikön hermo-lihasliitos ei toimi, M-aallon amplitudi (voimakkuus) pienenee, koska osa aktiopotentiaaleista jää pois.
- (5) Lihassolukalvo ja transversaalinen tubulaarisysteemi / Lihassolukalvosto
 - Na⁺- ja K⁺-ionien läpäisevyys ja johtuvuus heikkenee. (Ärsyksen muodostuminen perustuu näiden ionien läpäisevyyteen).
 - Voidaan tutkia mitaten ärsyksen johtumisnopeutta lihassolukalvolla.
 - Suorat menetelmät. Perusidea on se, että lihasfiberissä, johon tulee hermo-lihasliitos keskelle fiberiä, mitataan kahdella monopolaarisella elektrodilla ärsyksen eteneminen tutkien kahden aktiopotentiaalivälillä ajallista etäisyyttä, jonka perusteella voidaan laskea nopeus, koska elektrodien välinen etäisyys tunnetaan.
 - Epäsuorat menetelmät, joilla ei saada tarkkaa arvoa (m/s).
 - Tehotiheyspektri.

¹ Tahdonalainen maksimaalinen supistus

² Yhteen lihakseen menevien motoristen neuronien soomaosa.

- M-aalto (vakiostimuluksella mitattu, käytännössä siis maksimi M-aalto), jossa ollaan kiinnostuneita M-aallon kestosta, joka kertoo johtumisnopeuden muutoksista
- (6) Ca-vapautuminen, sitoutuminen ja poikittaissiltajännitys
 - Metabolinen kasautuminen (aineenvaihduntatuotteiden kasautuminen), esim. lakttaatti.
 - Energian saanti
 - Sarkomeerivauriot (huomataan lihaksen kipeytymisenä)
 - Jänne-lihaskompleksin joustavuus tai jäykkyys, joka vaikuttaa poikittaissiltajännitykseen.
 - Voidaan tutkia: a) LFF (low frequency fatigue, matalataajuusväsymys). Lihasta ärsytetään matalalla taajuudella (20 Hz) ja tutkitaan, paljonko lihas tuottaa voimaa. b) Passiivinen twitch. c) Voima-pituuskäyrä.
- Palautumismalli SSC-väsymyksen³ jälkeen bimodaalinen (Venytyksirefleksi - ensin akuutti lasku, sitten (parin päivän jälkeen) akuutti palautuminen, joiden jälkeen taas lievempi lasku ja sen palautuminen). Ensimmäisen muutoksen uskotaan johtuvan ennen kaikkea metabolisista muutoksista, jotka palautuvat nopeasti. Toisen muutoksen uskotaan taas johtuvan lihassoluvauriosta.

B) Pitkäaikainen adaptoituminen

1. Voimaharjoittelun vaikutus

- Kuva monisteessa. Ensimmäisen kahden viikon aikana voiman kehittyminen on melkein yksinomaan neuraalista. Hypertrofinen kehittyminen (johtuu proteiinien paksuuntumisesta) alkaa vasta myöhemmin. Neuraalinen kehittäminen: pienet toistot (isot painot, lyhyet sarjat; pienet painot, pitkät sarjat), hypertrofinen kehittäminen: toistot painoilla uupumukseen saakka.
- Neuraalisessa kehitymisessä saattaa olla kyse aktivaatiovajeen vähenemisestä. Ts., lihas pystyisi tuottamaan voimaa esim. 100 N, mutta henkilö pystyy aktivoimaan lihaksen tuottamaan voimaa vain 85 N. Harjoittelu kasvattaa aktivaatiokykyä.
 - Neuraalinen adaptaatio.
 - aEMG (keskiarvo-EMG) kasvaa, ts. neuraalinen ohjaus lisääntyy.
 - V-aalto kasvaa. V-aalto on tietyllä tavalla mitattu H-refleksi. V-aalto mitataan supramaksimaalisella ulkoisen sähkön intensiteetillä maksimaalisen aktivaation aikana. (Tahdonalaisesta aktivaatiosta johtuen läpi menevä H-refleksi.)
 - Syttymistiheys kasvaa.
 - Motoristen yksiköiden ärsytyskynnys laskee.
 - Synkronisaatio lisääntyy, ts. motoriset yksiköt syttyvät paremmin samassa tahdissa.
 - Koaktivaatio (agonisti ja antagonisti -lihasryhmien välillä) vähenee. Kun tahdonalaisesti käskytetään agonistia, antagonisti aktivoituu yleensä myös hieman (koaktivaatio), mikä johtaa voimantuoton vähenemiseen. Harjoittelu vähentää tätä koaktivaatiota.
 - Bilateraalinen vaje (kun esim. molemmilla jaloilla tehdään yhtäaikainen samanlainen voimasuoritus, saavutettava voima jää pienemmäksi kuin yksittäisillä jaloilla tehtyjen vastaavien voimasuoritusten summa) vähenee.
 - Koordinaatio paranee (vrt. myös kaksi edellistä)

2. Immobilisaation vaikutukset

³ Venytys-lyhemissyklistä aiheutuva väsymys (SSC = stretch shortening cycle).

- Voima ja EMG laskee.
- Atrofia, lihasmassan pieneneminen (surkastuminen).
- Hitaiden solujen määrä vähenee ja nopeiden kasvaa. (Nopeat motoriset yksiköt kestävät käyttämättömyyttä hitaita motorisia yksiköitä paremmin. Normaalielämässä hitaita motorisia yksiköitä käytetään päivittäin, nopeita ei.)
 - o Entsymaattinen muutos – ne muuttuvat eniten, joiden aktiivisuus vähenee eniten.
- Syttymiskynnys kasvaa.
- Syttymistiheys laskee.

3. Ikääntymisen vaikutukset

- Ikääntyminen vaikuttaa ihmisen liikuntakäyttäytymiseen: nuorempana nopeiden motoristen yksiköiden käyttöä edellyttävät lajit (palloilu jne.) korostuvat, vanhemmiten hitaita motorisia yksiköitä edellyttävät lajit (esim. käveleminen) alkavat vallita. Tästä johtuen on usein vaikea erottaa, mitkä muutokset johtuvat ikääntymisestä sinällään, mitkä taas oikeastaan edellä kuvatusta liikuntakäyttäytymisen muutoksesta.
- Voima ja nopeusvoima laskevat (> 60 vuotta).
- Motorisia yksiköitä kuolee
 - o Pääasiassa nopeita motorisia yksiköitä.
 - o Hitaiden koko (myös lihassolujen määrä) kasvaa.
- Alhaisempi H-refleksivaste (α -motoneuronialtaan herkkyys vähenee)
- Alhaisempi venytysrefleksivaste ja pitempi latenssiaika.
- Hermoimpulssin johtumisnopeus alenee
- Vastaliikkeet hidastuvat – vrt. esim. kaatumiset
- Liikelaajuus vähenee – sidekudoksen rakenne muuttuu ikääntymisen myötä.
- Koordinaatio heikkenee
- **Harjoitusvasteet ovat ikääntyneillä samanlaisia kuin nuorilla.**
- Voimaharjoittelu olisi hyvä yleensä aloittaa pienillä painoilla ja konsentrisilla suorituksilla, joilla vältetään lihassoluvauriot ja voimakkaat lihaskivut.

Liikeanalyysi

Filmi-/videoanalyysi

1. Datan kerääminen

- Kameroiden asettaminen
 - o Yhdellä kameralla kuvattaessa kameran optinen akseli kohtisuorassa liiketasoa vastaan sekä ylhäältä että sivulta katsoen.
 - o Kahdella kameralla kamerat kohtisuoraan toisiinsa nähden.
 - Sijoitus niin, että tarkasteltavat mittapisteet eivät jää piiloon.
 - Kuvattava mahdollisimman suurena kameran ikkunassa.
 - Käytetään synkronointimerkkiä, joka kuvataan kaikilla kameroilla.
- Keräystaajuus
 - o 30-200 kuvaa sekunnissa riippuen kuvattavasta liikkeestä