

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
FAKULTA ZDRAVOTNICKÝCH VĚD
Ústav fyzioterapie

Veronika Kučerová

**Strukturální a funkční podklady svalové kontrakce se zaměřením
na excentrickou aktivaci**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Radek Mlíka, Ph.D.

Olomouc 2019

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jen uvedené bibliografické a elektronické zdroje.

Olomouc 3. května 2019

podpis

Děkuji Mgr. Radkovi Mlíkovi, Ph.D. za odborné rady, trpělivost a ochotnou spolupráci při tvorbě této bakalářské práce.

Anotace

Typ závěrečné práce: bakalářská

Název práce: Strukturální a funkční podklady svalové kontrakce se zaměřením na excentrickou aktivaci

Název práce v AJ: Structural and functional bases of muscle contraction with a focus on eccentric activation

Datum zadání: 2019-01-31

Datum odevzdání: 2019-05-06

Vysoká škola, fakulta, ústav: Univerzita Palackého v Olomouci

Fakulta zdravotnických věd

Ústav fyzioterapie

Autor práce: Veronika Kučerová

Vedoucí práce: Mgr. Radek Mlíka, Ph.D.

Oponent práce: Mgr. Marek Tomsa

Abstrakt v ČJ: Základní stavební jednotkou kosterní svaloviny je kontraktilní svalové vlákno, jehož funkce je klíčová pro realizaci posturálních a lokomočních projevů jedince. Mezi svalovými kontrakcemi vyniká svými vlastnostmi kontrakce excentrická, neboť vyvíjí největší sílu při nejnižší spotřebě energie. Cílem práce je popsat stavbu a funkci kosterní svaloviny se zaměřením na vlastnosti excentrické kontrakce a její využití v rehabilitaci. Pro tento účel bylo použito 14 knižních publikací, 43 odborných článků a 8 studií vyhledaných podle klíčových slov: skeletal muscle, muscle contraction, eccentric contraction, rehabilitation. Bylo zjištěno, že při zařazení excentrických aktivit do rehabilitačního plánu je

při určitých diagnózách dosaženo lepších výsledků. Aktivní prodloužení svalu se nicméně pojí s poškozením svalových vláken, proto je žádoucí se mu v určitých případech vyhýbat.

Abstrakt v AJ: The basic component of skeletal muscle is a muscle fiber, which is able to contract, thereby plays crucial role in human postural and locomotor behaviour. Compared to other contraction types, eccentric muscle contraction is unique in several aspects, when generates the biggest force output with the lowest energy cost. The aim of this research is to subscribe skeletal muscle structure and function with a focus on eccentric contractions characteristics and its utilization in rehabilitation. In this research were used 14 books, 43 articles and 8 studies found by keywords such as: skeletal muscle, muscle contraction, eccentric contraction, rehabilitation. Better results were observed after adding eccentric-based activities to rehabilitation plan in specific diagnoses. Muscle active lengthening is however asociated with muscle fiber damage, therefore it is better to avoid in specific cases.

Klíčová slova v ČJ: kosterní svalovina, svalová kontrakce, excentrická kontrakce, rehabilitace

Klíčová slova v AJ: skeletal muscle, muscle contraction, eccentric contraction, rehabilitation

Rozsah: 55/0

Obsah

Úvod.....	8
1 Kosterní svalovina.....	10
1.1 Vývoj svalu.....	10
1.1.1 Vznik a diferenciacie svalového vlákna.....	10
1.1.2 Morfogeneze svalu.....	11
1.1.3 Regenerace svalového vlákna.....	12
1.2 Stavba svalu a svalového vlákna.....	12
1.2.1 Stavba svalového vlákna.....	12
1.2.2 Typy svalových vláken.....	13
1.2.3 Stavba svalu.....	14
1.2.4 Pomocná svalová zařízení.....	15
1.2.5 Cévní a nervové zásobení svalu.....	16
1.3 Rozdělení svalů.....	17
1.3.1 Podle vnějšího tvaru.....	17
1.3.2 Podle orientace svalových vláken.....	17
1.3.3 Podle vztahu ke kloubům.....	17
1.3.4 Podle vztahu k vykonávanému pohybu.....	19
2 Svalová kontrakce.....	20
2.1 Průběh svalové kontrakce.....	20
2.2 Řízení svalové kontrakce.....	20
2.2.1 Motorická jednotka.....	20
2.2.2 Nervosvalový přenos.....	21
2.3 Metabolismus kosterního svalu.....	22
2.4 Typy svalové kontrakce.....	22
2.4.1 Izometrická kontrakce.....	23
2.4.2 Koncentrická kontrakce.....	23
2.4.3 Excentrická kontrakce.....	23
2.4.4 Izotonická kontrakce.....	24
2.4.5 Izokinetická kontrakce.....	24
2.5 Vzájemné vztahy svalových kontrakcí.....	25
2.5.1 Srovnání izometrické, koncentrické a excentrické kontrakce.....	25
2.5.2 Ko-kontrakce.....	25

2.5.3	SS cyklus.....	26
2.6	Vazivová složka svalu.....	27
2.6.1	Role vaziva ve svalové kontrakci.....	27
2.6.2	Hillův model	28
2.7	Svalová síla.....	29
3	Vlastnosti a využití excentrické kontrakce	30
3.1	Parametry excentrické kontrakce	30
3.1.1	Vztah síly a rychlosti kontrakce.....	30
3.1.2	Energetické nároky	31
3.2	Adaptace svalu na opakované excentrické kontrakce	32
3.2.1	Zvýšení svalové síly.....	32
3.2.2	Změna objemu svalu	33
3.2.3	Vliv intenzity zátěže.....	34
3.2.4	Změny na svalovém vlákně.....	34
3.2.5	Aktivita motorických jednotek.....	35
3.2.6	Zlepšení neuromuskulární kontroly	36
3.2.7	Vliv excentrické kontrakce na šlachu	36
3.2.8	Aktivace satelitních buněk.....	37
3.3	Využití excentrické kontrakce v rehabilitaci.....	37
3.3.1	Tendinopatie.....	37
3.3.2	Rekonstrukce předního zkříženého vazů	38
3.3.3	Sarkopenie.....	39
3.3.4	Kardiovaskulární choroby.....	40
3.3.5	Chronická obstrukční plicní nemoc	41
3.4	Limity excentrické kontrakce	42
3.4.1	Traumatizace a únava svalu	42
3.4.2	Kontraindikace excentrických kontrakcí	42
	Závěr	44
	Referenční seznam	45
	Seznam zkratk	54
	Seznam obrázků.....	55

Úvod

Kosterní svalovina je jednou z nejplastičtějších a nejdynamičtějších tkání v lidském těle, kde se přibližně ze 40 % podílí na celkové hmotnosti (Frontera a Ochala, 2015, s. 183). Jedná se o vysoce organizovanou strukturu se schopností převádět energii chemických vazeb ve svalovou práci, čímž zajišťuje průběh respiračních, lokomočních a posturálních funkcí (Shadrin, Khodabukus a Bursac, 2016, s. 4176).

Hlavní funkcí kosterní svaloviny je schopnost kontrakce (Hamilton a Luttgens., 2002, s. 48). Kromě svalových vláken se na mechanických projevech svalu podílí také vazivo, což popisuje Hillův model, v němž je zohledněna interakce mezi kontraktilní (svalová vlákna) a elastickou (vazivo) komponentou svalu (Lieber et al., 2017, s. 7).

Svalovou kontrakci lze rozdělit na několik typů podle změn délky a změn napětí pracujícího svalu. Nejčastěji je používáno dělení na kontrakci izometrickou, koncentrickou a excentrickou (Frontera a Ochala, 2015, s. 188).

Excentrická kontrakce se od ostatních typů liší schopností produkovat větší sílu s nižšími energetickými nároky a zároveň se zapojením nižšího počtu motorických jednotek. Působí také výraznější aktivaci satelitních buněk a zlepšení neuromuskulární kontroly. Při zařazení excentrických kontrakcí do cvičebního plánu dochází k pozitivnímu ovlivnění svalové morfologie a výkonu. Úskalím intenzivního excentrického cvičení je rychlejší nástup svalové únavy a vyšší riziko poškození svalu (Douglas et al., 2017, s. 672).

Tato práce je zaměřena na stavbu a funkci kosterní svaloviny – svalovou kontrakci. Popisuje a porovnává jednotlivé typy kontrakcí, kdy klade důraz na výjimečné vlastnosti kontrakce excentrické a její využití v rehabilitaci. V závěru práce jsou popsány nežádoucí efekty tohoto typu kontrakce a podmínky, za kterých dochází k jejich manifestaci.

Pro vyhledávání odborných článků byly využity online databáze PubMed, EBSCO a Google Scholar. Vyhledávána byla klíčová slova: kosterní sval, svalová kontrakce, excentrická kontrakce, rehabilitace a jejich anglické ekvivalenty: skeletal muscle, muscle contraction, eccentric contraction, rehabilitation. Celkem bylo použito 43 odborných článků v anglickém jazyce, 8 zahraničních studií, jeden český článek a 14 anglických a českých monografií. Níže uvedené monografie sloužily jako vstupní literatura a byly využity pro orientaci v problematice:

ČIHÁK, R. 2016. *Anatomie* (3. vyd.). Praha: Grada. ISBN 978-80-247-3817-8.

DYLEVSKÝ, I. 2007. *Obecná kineziologie*. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-1649-7.

ENOKA, R. 2002. *Neuromechanics of human movement* (3rd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics. ISBN 0-7360-0251-0.

HAMILL, J., KNUTZEN, K. a DERRICK, T. R. 2015. *Biomechanical basis of human movement* (4th edition). Philadelphia: Wolters Kluwer Health. ISBN 978-1-4511-7730-5.

HAMILTON, N. a LUTTGENS K. 2002. *Kinesiology: scientific basis of human motion* (10th ed.). Boston, MA: McGraw-Hill. ISBN 0-07-112243-5.

1 Kosterní svalovina

1.1 Vývoj svalu

Kosterní svalovina vzniká v časném embryonálním stádiu z paraaxiálního mezodermu, tkáně, která ve formě dvou pruhů lemují neurální trubici (Chal a Porquié, 2017, s. 2104).

V kraniální oblasti tvoří buňky mesodermu souvislý pás, který je od okcipitální krajiny dále kaudálně segmentově uspořádán do somitů (Čihák, 2016, s. 359). Nesegmentovaná část mesodermu a somity jsou základem pro vývoj svaloviny končetin, hlavy, osového skeletu a tělní stěny (Sadler, 2011, s. 165).

Zralé somity obsahují tři hlavní oddíly: sklerotom, myotom a dermomyotom. Sklerotom je základní tkání pro vývoj skeletu a chrupavek páteře a hrudního koše. Z myotomu se diferencuje svalovina zad, břišní stěny a mezižeberní svaly. Dermomyotom obsahuje progenitorové buňky ostatních kosterních svalů a jejich vazivové složky (Musumeci et al., 2015, s. 318).

Epaxiální svaly se diferencují z dorsomediálního úseku dermomyotomu, z epimery. Hypomera, ventromediální část dermomyotomu, je zdrojem myogenních buněk pro vývoj svalů ležících ventrálně od frontální roviny, tedy pro svaly hypaxiální. (Čihák, 2016, s. 359). Z části dermomyotomu ležící nejbližší neurální trubici jsou diferencovány extenzorové skupiny svalů končetin. Flexorové skupiny mají původ ve vzdálenějším úseku dermomyotomu (Musumeci et al., 2015, s. 316-317).

Sadler (2011, s. 165) uvádí další možnost klasifikace svalstva na primaxiální a abaxiální podle odlišného původu mesenchymu. Mezi primaxiální řadí všechno epaxiální svalstvo a některé hypaxiální svaly (hluboké svaly krku a mezižeberní svaly), abaxiální svaly jsou svaly končetin a břišní svaly.

1.1.1 Vznik a diferenciací svalového vlákna

Specifikací myoblastů je v rámci somitu zahájen proces myogeneze, jenž je řízen a kontrolován množstvím kódujících proteinů. Dochází k diferenciaci myocytů – jednojaderných větvenovitých buněk. Po několika proliferačních cyklech nastává fúze myocytů, které se spojují do mnohjaderných útvarů zvaných myotuby (Chal a Porquié, 2017, s. 2104). Buněčná jádra se později přesunují k povrchu, čímž z myotubů vznikají svalová vlákna (Sadler, 2011, s. 165).

Nejdříve vznikají primární svalová vlákna. Během tvorby nervosvalových spojení vzniknou kolem primárních vláken sekundární svalová vlákna. Vlákna primární obvykle odpovídají pomalému typu vláken, sekundární vlákna typu rychlému (Čihák, 2016, s. 360).

Pro správný vývoj a pozdější funkci svalového vlákna je důležité jeho časné propojení s motoneuronem (Chal a Pourquié, 2017, s. 2114). Diferenciace svalových vláken je totiž ovlivněna typem motorické inervace svalových základů a tuto diferenciační kapacitu si svalová vlákna zachovávají i postnatálně, kdy je možné změnou inervace změnit typ svalového vlákna (Dylevský, 2007, s. 39-40).

Při narození je počet svalových vláken již téměř definitivní. Během růstu organismu rostou i vlákna do délky fúzí dalších myoblastů, růst do šířky probíhá syntézou dalších myofibril (Čihák, 2016, s. 360).

1.1.2 Morfogeneze svalu

Vznik svalu jako orgánu je zahájen procesem zvaným fascikulace, kdy jsou skupiny myoblastů a myotub od sebe odděleny mezenchymem v jednotlivé svazky (Dylevský, 2007, s. 40).

Souběžně s myogenezí probíhá také morfogeneze svalu, tedy proces, kdy jsou svalová vlákna spojována a seskupena ve svalové celky. Tento děj zahrnuje migraci progenitorových buněk do dané konkrétní oblasti, regulaci počtu myoblastů a diferenciaci progenitorových buněk v myofibrily. Dochází k prodlužování a celkovému růstu myofibril vlivem selektivní fúze myoblastů a tvorbě spojů mezi svalovými vlákny, vazivem, šlachou a skeletem (Sefton a Kardon, 2019, s. 142).

Od počátku jsou myogenní buňky obklopeny buňkami mezenchymu, z nichž postupně vzniká vazivové stroma svalu, šlachy a fascie. Vazivové stroma, které prostupuje celým svalem je připojeno k úponovým šlachám a aponeurózám, uplatňuje se tedy významně při přenosu svalové síly na skelet. Kromě toho také přivádí ke svalovým vláknům cévy a nervy (Čihák, 2016, s. 360).

Dylevský (2007, s. 41-42) popisuje význam pohybu ve stadiu embryonálního vývoje pro morfogenezi pojivové tkáně. Působením izometrického lineárního tahu dochází k orientaci fibroblastů ve směru tohoto tahu a ke vzniku kolagenních vláken, které se vyskytují v primární vláknité kosti, svalových úponech a šlachách. Mechanickým stresem je vyvolána mitotická aktivita zatížených buněk.

Přestože se kosterní svalovina vyvíjí v anatomicky i funkčně odlišné celky, hraje pojivová složka ústřední roli v regulaci svalové morfogeneze. Ovlivňuje výslednou orientaci myofibril, polohu i tvar svalu (Sefton a Kardon, 2019, s. 174).

1.1.3 Regenerace svalového vlákna

Platí, že proces regenerace poškozeného svalového vlákna je u dospělých velmi pomalý, děje se v malém rozsahu a má zanedbatelný funkční význam. Běžně dochází k hojení vazivovou jizvou a tím ke ztrátě kontrakční schopnosti poškozených vláken. Regenerace svalů nicméně za určitých podmínek probíhá díky existenci satelitních buněk (Dylevský, 2007, s. 172).

Satelitní buňky jsou dospělé kmenové buňky kosterní svaloviny. Jsou uloženy mezi sarkolemou a bazální laminou a účastní se růstových, reparačních a regeneračních procesů (Frontera a Ochala, 2015, s. 184). V normálním nepoškozeném svalovém vlákne náleží 2–7 % všech buněčných jader satelitním buňkám, které jsou v klidovém stadiu (Teixeira a Duarte, 2016, s. 786).

Podnětem k aktivaci satelitních buněk je narušení integrity svalového vlákna nebo růstové signály (Dumont et al., 2015, s. 1027). Po traumatizaci svalu je regenerace úspěšná pouze v případě, že není poškozeno současně vazivové stroma svalu a jeho cévní a nervové zásobení. Jsou-li poškozeny obě složky, nad proliferací satelitních buněk převáží proliferace vaziva a v místě poškození vzniká jizva (Čihák, 2016, s. 361). Regenerační potenciál je narušen také v případě některých patologických stavů, jakými jsou například svalové dystrofie (Dumont et al., 2015, s. 1027).

Jsou-li aktivovány, mají satelitní buňky schopnost dělit se asymetricky. Tím je umožněna jejich samo-regenerace zároveň s proliferací myoblastů (Chal a Pourquié, 2017, s. 2115).

1.2 Stavba svalu a svalového vlákna

1.2.1 Stavba svalového vlákna

Svalové vlákno je základní jednotkou příčně pruhované svaloviny. Jedná se o mnohojaderný útvar vzniklý splýváním svalových buněk. Každé vlákno je obaleno sarkolemou, pod níž jsou uložena buněčná jádra (Grim a Druga, 2016, s. 102). Sarkolema poskytuje vláknu strukturní stabilitu a umožňuje vedení nervového signálu (Chal a Pourquié, 2017, s. 2110).

Samotné svalové vlákno dosahuje délky od několika milimetrů až po 15 cm, průměr se pohybuje mezi 10–100 μm . Červené zbarvení svaloviny je dáno přítomností myoglobinu (Čihák, 2016, s. 24-26).

Kontraktilní mechanismus se odehrává na úrovni vysoce uspořádaných supramolekulárních struktur – sarkomer. Sarkomery jsou sdruženy v sériích a tvoří tak svalové vlákno. Svým paralelním uspořádáním podmiňují sarkomery příčné pruhování kosterní svaloviny (Schiaffino a Reggiani, 2011, s. 1468).

Sarkomera se skládá z několika typů myofilament. Myofilamenta jsou tvořena kontraktilními bílkovinami, jež zajišťují průběh kontrakce. K samotné realizaci svalového stahu slouží aktin a myozin, pružnost sarkomery je podmíněna titnem a nebulinem, regulační funkci mají troponin a tropomyozin (Dylevský, 2007, s. 160).

Myozinové vlákno se skládá ze zhruba 200 molekul myozinu, které mají schopnost štěpit adenosintrifosfát (ATP), a tím zajistit energii pro svalovou kontrakci. Aktinové vlákno sestává z dvoušroubovice aktinu s aktivními místy, která jsou kryta tropomyozinem a troponinem. Troponin jako regulační bílkovina slouží ke spojení aktinových a tropomyozinových vláken, čímž je celý komplex aktivován (Rokyta, 2000, s. 244). Kromě pružnosti sarkomery zabezpečují bílkoviny titin a nebulin stabilizaci polohy aktinových a myozinových vláken (Dylevský, 2007, s. 160).

Jednotlivé sarkomery jsou ohraničeny Z-liniemi, což je vazivově ztlustělé místo pro ukotvení aktinových filament. Myozinová vlákna probíhají paralelně s aktinovými a jsou fixována v místě zvaném M-linie, zhruba uprostřed sarkomery. Aktinová a myozinová vlákna se tedy částečně překrývají (Rokyta, 2000, s. 244). Proteiny titin a nebulin jsou také uloženy paralelně k průběhu aktinových a myozinových filament (Schiaffino a Reggiani, 2011, s. 1468). V místě výskytu pouze aktinových vláken se nachází zóna izotropní (I-proužek), uprostřed je předělena Z-linií. Anizotropní zónou (A-proužek) je označován úsek, kde se vyskytují aktinová i myozinová vlákna současně. Místo samostatného výskytu myozinových vláken je označováno jako H-zóna (Rokyta, 2000, s. 244).

1.2.2 Typy svalových vláken

Svalová vlákna jsou dělena na několik typů podle svých strukturálních a funkčních vlastností (Čihák, 2016, s. 26). Tyto vlastnosti jsou označovány jako fenotyp, který lze změnit vlivem hormonů nebo inervace, přičemž platí, že nervová aktivita je hlavním determinantem pro vývoj daného fenotypu (Schiaffino a Reggiani, 2011, s. 1447).

V závislosti na typu vláken se liší také architektonika kapilární sítě kvůli odlišným metabolickým nárokům jednotlivých typů (Frontera a Ochala, 2015, s. 187).

Svalová vlákna jsou rozdělena na čtyři základní typy: pomalá červená (typ I), rychlá červená (typ IIa), rychlá bílá (typ IIb) a přechodná vlákna (typ III) (Dylevský, 2007, s. 164).

Vlákna typu I jsou tenká a dlouhá. Jejich červené zbarvení je dáno přítomností většího množství myoglobinu a jsou také bohatě zásobena krví. Tato vlákna se zapojují při dlouhodobějších kontrakcích a dobře odolávají únavě, takže se účastní především posturálních aktivit (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 46). Pomalá červená vlákna jsou odolnější při patologických stavech spojených se svalovou atrofií (Frontera a Ochala, 2015, s. 187). Jsou označována také jako vlákna tonická (Dylevský, 2007, s. 164).

Vlákna typu IIa jsou schopna rychlé intenzivní kontrakce se značnou odolností vůči únavě (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 82). Jsou označována také jako vlákna fázická a vyskytují se ve větší míře ve svalech, které provádějí rychlé silové pohyby (Dylevský, 2007, s. 164).

Typ IIb je uzpůsoben k vyvinutí rychlé a silné kontrakce, která je ale krátkodobá. Ze všech typů jsou rychlá bílá vlákna schopna vyprodukovat největší sílu a svaly, v nichž tato vlákna převažují se dokáží kontrahovat vyšší rychlostí (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 82). Rychlá vlákna jsou během rychlých, prudkých pohybů mechanicky účinnější než vlákna pomalá, proto se vyskytují přednostně ve fázických svalech (Wakeling et al., 2011, s. 1560-1562).

Přechodová vlákna kombinují vlastnosti rychlých a pomalých svalových vláken (Čihák, 2016, s. 26). Jedná se o nediferencovaná vlákna, která jsou pravděpodobně zdrojem výše zmíněných tří typů (Dylevský, 2007, s. 164).

Heterogenita svalových vláken je základem flexibility svalů. Díky zastoupení různých typů vláken v rámci jednoho svalu je možná jeho aktivace pro různé úkony od nepřetržitých aktivit s nízkou intenzitou (posturální aktivity) přes repetitivní submaximální kontrakce (lokomoce) až po rychlé a dynamické pohyby (skoky, kopy) (Schiaffino a Reggiani, 2011, s. 1447).

V každém svalu jsou v různých poměrech zastoupeny všechny typy svalových vláken, kdy vyšší výskyt pomalých vláken je zaznamenán v oblasti zádových svalů kvůli jejich převážně posturální, tonické, funkci (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 46).

1.2.3 Stavba svalu

Samotný sval je složen z vody (75 %), bílkovin (20 %) a směsi anorganických solí, minerálů, uhlovodíků a tuků (5 %) (Frontera a Ochala, 2015, s. 183).

Sval je členěn na několik částí: méně pohyblivá část odstupující od skeletu se nazývá začátek – origo; opačná, více pohyblivá část se připojuje ke kosti jako úpon – insertio. Dále rozeznáváme svalové bříško – venter musculi, jehož podkladem jsou příčně pruhovaná svalová vlákna. Na začátku a v místě úponu sval obvykle přechází ve šlachy – tendo (dlouhé svaly končetin) nebo v širokou blánu – aponeurosis (ploché svaly). Výjimku tvoří svaly mimické, které se upínají do kůže a některé z nich mají své začátky ve vazivu jiného mimického svalu (Čihák, 2016, s. 349, 410).

Hamill, Knutzen a Derrick (2015, s. 71-72) považují rozlišování začátku a úponu svalu za fakticky nesprávné, neboť sval svou kontrakcí působí na oba úpony stejně a pouze vlivem stabilizace jinými svaly nebo vnější silou nedochází v jednom z úponů k pohybu. Jako příklad uvádí aktivitu m. iliopsoas, který při fixovaném trupu působí flexi v kyčelním kloubu, ale při fixované kyčli provádí flexi trupu, nelze tedy označit jeden z úponů za pohyblivější. Dylevský (2007, s. 164) označuje rozdělení na začátek a úpon pouze jako popisný znak, který je užitečný pro jednoznačnější analýzu svalové kontrakce.

Jednolivé svaly jsou obaleny vrstvou pojivové tkáně – epimysiem. Svalová vlákna jsou v rámci svalu uspořádána do snopců, které jsou od sebe odděleny obdobným typem tkáně – perimysiem. Menší skupiny svalových vláken i samotná svalová vlákna obaluje vazivová vrstva zvaná endomysium (Frontera a Ochala, 2015, s. 184). Přítomnost vazivových obalů je důležitá pro průběh látkové výměny mezi svalovými vlákny a pro krevní oběh ve svalu (Dylevský, 2007, s. 164).

Vazivo má význam také pro připojení svalu ke kosti, husté kolagenní vazivo tu tvoří tzv. Sharpeyova vlákna, která prorůstají skrz periost do základní hmoty kosti (Grim a Druga, 2016, s. 102-103).

Na povrchu většiny svalů se nacházejí vazivem formované obaly – fascie. Pomocí vazivových sept, která spojují jednotlivé fascie jsou vytvořeny různě velké osteofasciální prostory, v nichž jsou uloženy celé skupiny svalů (Dylevský, 2007, s. 164).

1.2.4 Pomocná svalová zařízení

Čihák (2016, s. 358) řadí mezi pomocná zařízení svalů fascie, tíhové váčky, šlachové pochvy a svalové kladky.

Fascie je důležitou strukturou pro přenos svalové síly, koordinaci a vnímání pohybu (Skalec a Egerbacher, 2017, s. 407). Jako vazivový obal svalu zajišťuje jeho tvar a polohu (Grim a Druga,

s. 103). Přítomností řídkého vaziva na povrchu fascie je usnadněn vzájemný posun svalů proti sobě (Čihák, 2016, s. 358). Při extrémním zkrácení fascie dochází ve svalu k útlaku cév a nervů, který při delším trvání vede k ischemické nekróze svalu (Véle, 2006, s. 38).

Šlachové pochvy (vaginae tendinum) obalují šlachy svalů v místech vystavených zvýšenému tření, a tím mechanicky brání poškození (Grim a Druga, 2016, s. 103). Jsou vyvinuty pouze v oblasti nohy, ruky a ramenního kloubu (Dylevský, 2007, s. 169).

Tíhové váčky (bursae mucosae) Jsou obvykle extraartikulárně uložené dutinky naplněné synoviální tekutinou, které mají schopnost komunikovat s koubem. Jejich funkcí je snižovat tření mezi šlachou a kostí (Ruangchaijatuporn et al., 2017, s. 445). V oblasti ramenního a kolenního kloubu jsou některé burzy přímo spojeny s intraartikulárním prostorem (Dylevský, 2007, s. 169).

Svalové kladky (trochleae musculares) slouží jako pevná poutka k připojení svalové šlachy ke skeletu. Nacházejí se v místě, kde se šlacha pod velkým úhlem ohýbá (Čihák, 2016, s. 359).

1.2.5 Cévní a nervové zásobení svalu

Svaly jsou hojně nervově i cévně zásobeny skrze neurovaskulární hilus, jímž cévy i nervy do svalu pronikají, aby se následně větvily. Při přerušení hilových cév a nervů se sval stává nefunkčním, atrofuje, a nakonec podléhá vazivové přeměně (Grim a Druga, 2016, s. 102).

Díky dilatační schopnosti arteriol je umožněno zvýšené prokrvení pracujícího svalu (Schiaffino a Reggiani, 2011, s. 1481). Během dynamické aktivity je sval bohatě prokrven vlivem střídání kontrakce a relaxace a nástup únavy je pomalý (Dylevský, 2007, s. 172). V porovnání se stavem relaxace je průtok krve pracujícím svalem až devítinásobný (Čihák, 2016, s. 356). Statickým zatížením svalu je prokrvení sníženo, neboť cévy jsou komprimovány a dochází tak rychleji k únavě (Dylevský, 2007, s. 172).

Inervace svalových vláken je uskutečněna dvěma typy nervových vláken. Motorická vlákna vedoucí podněty ke kontrakci z motoneuronů centrální nervové soustavy (CNS) a končí na nervosvalové ploténce zhruba v polovině délky svalového vlákna. Senzitivní vlákna převádějí do CNS informace o napětí svalu (Grim a Druga, 2016, s. 103).

1.3 Rozdělení svalů

1.3.1 Podle vnějšího tvaru

Svaly je možné rozdělit podle jejich vnějšího tvaru na větvenité, dvojhlavé, trojhlavé, čtyřhlavé, ploché a kruhové (Čihák, 2016, s. 350; Dylevský, 2007, s. 170; Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 64).

1.3.2 Podle orientace svalových vláken

Svalová vlákna nejsou vždy orientována paralelně k průběhu úponové šlachy. Geometrický vztah mezi orientací svalových vláken a šlachy je označen jako úhel zpeření a významně ovlivňuje výslednou funkci svalu (Infantolino a Challis, 2014, s. 363).

Svaly nezpeřené, jejichž vlákna probíhají paralelně s dlouhou osou svalu jsou schopny výrazného zkrácení a zajišťují rychlé pohyby, jelikož jsou většinou delší než ostatní typy a jejich kontraktlní část (svalová vlákna) svou délkou přesahuje délku úponové šlachy (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 63).

Svaly, které mají šikmý průběh vláken k úponové šlaše se označují jako zpeřené (Dylevský, 2007, s. 170). Takové svaly vykonávají pomalé pohyby menšího rozsahu než svaly nezpeřené, jsou ale schopny vyvinout větší sílu. Jsou rozlišovány svaly jednozpeřené (m. biceps femoris, m. semimembranosus), dvojjzpeřené (m. gastrocnemius, mm. vasti) a mnohozpeřené (m. deltoideus, m. gluteus maximus) (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 64).

1.3.3 Podle vztahu ke kloubům

Pohyb v jednom kloubu působí svaly jednokloubové, vícekloubové pak pohyb ve více kloubech (Čihák, 2016, s. 350).

Jednokloubový sval svou kontrakcí působí na obě kosti, ke kterým se upíná. Pokud je jedna z kostí fixována, sval přitahuje druhou kost a pohyb se tak děje právě v jednom kloubu (Dylevský, 2007, s. 163). Záleží také na vzdálenosti svalového úponu od kloubu (rameno síly). Sval s kratším ramenem síly musí vyvinout větší sílu pro dosažení stejného rozsahu pohybu než sval, který se upíná dále od kloubu (Enoka, 2002, s. 266-267).

Průběh vícekloubového svalu vede přes dva či více kloubů a v každém z nich může jeho aktivitou vzniknout pohyb. Vícekloubový sval působí nejvýraznější pohyb v tom kloubu,

ke kterému nejbliže se nachází jeho úpon. V kloubech, které sval svým průběhem pouze míjí má spíše pomocné funkce (Dylevský, 2007, s. 163).

Enoka (2002, s. 318) srovnává funkci jednokloubových a dvoukloubových svalů. Při výskoku m. gluteus maximus (jednokloubový extenzor kyčelního kloubu) produkuje hlavní hnací sílu, zatímco m. semimembranosus (dvoukloubový sval – extenzor kyčle a flexor kolene) zajišťuje koordinaci (Zajac, 1993 in Enoka, 2002, s. 318).

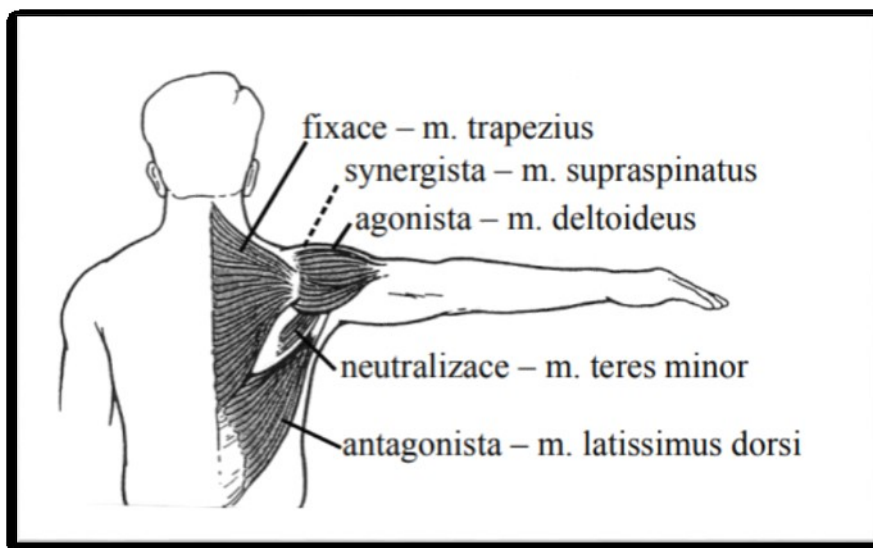
Vícekloubové svaly nejsou schopny provést maximální rozsah pohybu ve všech kloubech najednou, neboť by se musely nefyziologicky zkrátit. Tento jev se nazývá aktivní svalová insuficience (Dylevský, 2007, s. 163). Příkladem je situace, kdy není možné zároveň provést maximální extenzi v kyčelním kloubu a plnou flexi v kloubu kolenním kvůli aktivní insuficienci hamstringů (Čihák, 2016, s. 353).

Příkladem pasivní insuficience je stav plně extendovaného kolenního kloubu, který omezí rozsah pohybu do plné flexe v kloubu kyčelním. Extenzí kolene dojde k vyčerpání protažitelnosti hamstringů, které nemají kapacitu se více protáhnout (Gajdosik, Hallett a Slaughter, 1994, s. 377).

1.3.4 Podle vztahu k vykonávanému pohybu

Dalším kritériem pro rozdělení svalů je jejich funkce při provádění pohybu (Čihák, 2016, s. 353; Dylevský, 2007, s. 162; Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 64).

Hlavní svaly, iniciátoři a vykonavatelé pohybu se označují jako agonisté, svaly působící proti směru pohybu jako antagonisté. Svaly, které se spoluúčastní na jednom pohybu se nazývají synergisté – z nich jeden je pro daný pohyb svaalem hlavním, ostatní svaly pomocné. V průběhu pohybu je nutné fixovat tu část těla, která se nepohybuje. K tomuto slouží svaly fixační (stabilizační), které umožňují pohyb v tom smyslu, že vytvářejí pevný bod, udržují pohybující se segment v postavení, které je pro provedení daného pohybu nejvýhodnější. Jelikož svaly s více hlavami působí svou kontrakcí různé pohyby, je třeba nežádoucí pohybovou komponentu vyloučit, k čemuž slouží svaly neutralizační (příklad viz Obrázek 1) (Čihák, 2016, s. 353).



Obrázek 1 Funkce svalů při abdukci v ramenním kloubu (Hamill a Knutzen, 2018 in Janura, 2011, s. 43)

Z pohledu antagonistických svalů je nutná jejich relaxace, která dovolí pohyb aktivitou agonisty. Zároveň je ale žádoucí i určitý stupeň jejich kontrakce, kterou kontrolují a zpomalují prováděný pohyb. Během takové aktivity se sval zároveň kontrahuje a prodlužuje (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 74).

Sval považovaný za anatomickou jednotku může mít pro jeden pohyb různé funkce. Příkladem je aktivita m. quadriceps femoris (QF) při extenzi kolene, kdy samotný pohyb působí především m. rectus femoris a ostatní části svalu spíše fixují bérce v dosažené poloze (Dylevský, 2007, s. 163).

2 Svalová kontrakce

2.1 Průběh svalové kontrakce

Svalové kontrakci předchází excitace, přenos vzruchu z motorického nervu přes nervosvalovou ploténku na sarkolemu. Uvnitř vlákna dochází k uvolnění Ca^{2+} iontů ze sarkoplasmatického retikula, interakci aktinu a myozinu a tvorbě příčných můstků (Frontera a Ochala, 2015, s. 187).

Ionty Ca^{2+} se váží na troponin, tím je změněn jeho tvar, což dovoluje tropomyozinu, aby se zasunul mezi aktinová vlákna. Zasunutím tropomyozinu se odkrývají aktivní místa aktinu pro spojení s myozinem. Myozinové hlavičky se zasouvají do aktivních míst aktinových vláken a vytvářejí tak příčné můstky mezi aktinem a myozinem. Dochází ke zkrácení sarkomer, svalových vláken a celého svalu (Rokyta, 2000, s. 246).

Síla svalové kontrakce je dána počtem vzniklých aktino-myozinových příčných můstků (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 67).

2.2 Řízení svalové kontrakce

Fyziologický podnět pro svalovou kontrakci přichází z CNS. Podle náročnosti výsledného pohybu je rozlišováno několik úrovní řízení: autonomní, spinální, subkortikální a kortikální (Véle, 2006, s. 75).

Účelná motorika je zprostředkována správnou funkcí kortikospinálního traktu, což je nervová dráha, která spojuje mozkovou kůru (primární a sekundární motorickou oblast) s míšními interneurony a motoneurony předních míšních rohů. Na úrovni prodloužené míchy se dráha částečně kříží, čímž je dáno, že mozková kůra jedné hemisféry řídí hybnost kontralaterální poloviny těla (Ambler, 1999, s. 16).

2.2.1 Motorická jednotka

Motorická jednotka je tvořena motoneuronem a skupinou svalových vláken, které jsou jím inervovány (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 67). Těla motoneuronů jsou lokalizována v předních rozích míšních nebo v mozkovém kmeni, kde se seskupují v tzv. motorická jádra (Heckman a Enoka, 2012, s. 2630).

Počet svalových vláken motorické jednotky se liší podle nároků na přesnost pohybu. Motorické jednotky okohybných svalů jsou tvořeny méně než deseti svalovými vlákny, zatímco v m. gastrocnemius až 2000 vláken (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 71). Svalová vlákna náležící k jedné motorické jednotce neleží pohromadě, ale jsou rozptýlena mezi vlákna jiných jednotek (Heckman a Enoka, 2012, s. 2631).

Neurony motorických jednotek lze rozlišit podle způsobu generace vzruchu na tonické a fyzické a dále také podle velikosti buněčných těl (Schiaffino a Reggiani, 2011, s. 1452).

Při svalové kontrakci probíhá aktivace motorických jednotek postupně. Nejdříve se aktivují menší motoneurony malých motorických jednotek, které jsou excitabilnější než motoneurony větších jednotek. Tyto se přidávají později při přibývání vzruchů. Postupná aktivace motorických jednotek se nazývá nábor nebo reverberace. Jelikož mají větší motorické jednotky na starost více svalových vláken, přichází s jejich aktivací i větší síla kontrakce – gradace svalové aktivity v průběhu svalového stahu (Rokyta, 2000, s. 248). Nábor jednotek není synchronní, čímž je zajištěn hladký průběh pohybu (Véle, 2006, s. 38).

Je-li motorická jednotka aktivována dostatečně intenzivním vzruchem, všechna její vlákna se během několika milisekund kontrahují. Pokud je nervový impuls slabý, nedochází k žádné kontrakci (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 71).

Dlouhodobé udržení tonu bez známek únavy u posturálních svalů je možné díky střídavému zapojování jednotlivých motorických jednotek (Rokyta, 2000, s. 248).

2.2.2 Nervosvalový přenos

Místem interakce centrální nervové soustavy se svalovým vláknem je nervosvalová ploténka. Základem procesu nervosvalového přenosu je změna elektrické aktivity motoneuronu následována uvolněním chemické látky v jeho terminálním úseku. Chemická změna probíhá v těsné blízkosti svalového vlákna, kde působí lokální elektrickou depolarizaci, aktivaci a svalovou kontrakci (Slater, 2018, s. 1).

Nervosvalovou ploténku lze rozlišit na presynaptickou, synaptickou a postsynaptickou část. Presynaptická část se nachází v místě terminálního úseku axonu motorického nervu. Obsahuje váčky s neurotransmiterem acetylcholinem (ACh) a iontové kanály pro ionty Na^+ a K^+ , které kontrolují průběh akčního potenciálu. Změnou akčního potenciálu je ACh uvolněn do synaptické štěrbině, což je malý prostor mezi nervovým a svalovým vláknem. Postsynaptická část odpovídá membráně svalového vlákna obsahující receptory pro ACh, který se na tyto receptory váže.

Tím jsou otevřeny iontové kanály a akční potenciál se šíří po svalovém vláknu (Hirsch, 2007, s. 133). Vlivem akčního potenciálu jsou dále uvolňovány ionty Ca^{2+} ze sarkoplasmatického retikula, které zajišťují spojení aktinových a myozinových vláken (Vander, Sherman a Luciano, 1990, s. 296, 298).

Acetylcholin se po přenosu impulsu odbourává v synaptické štěrbině působením enzymu acetylcholinesterázy. Pokud by nedošlo k odbourání mediátoru, synapse by se stala nefunkční a sval by zůstal trvale kontrahován (Rokyta, 2000, s. 251).

2.3 Metabolismus kosterního svalu

Každá svalová aktivita vyžaduje dodání energie, která je uložena v chemických vazbách adenosintrifosfátu (ATP). Podle intenzity a trvání svalové práce je ATP metabolizován odlišnými způsoby. Při intenzivní ale krátkodobé aktivitě probíhá zpracování ATP bez přístupu kyslíku, aktivity trávající v řádu minut až hodin přítomnost kyslíku vyžadují. Kritický nedostatek kyslíku se projevuje zhoršením funkce a nástupem svalové únavy (Frontera a Ochala, 2015, s. 188)

Sval obsahuje malé množství ATP. Po vyčerpání této zásoby vzniká ATP především štěpením glukózy, jež je v organismu uložena ve formě glykogenu (Rokyta, 2000, s. 254).

2.4 Typy svalové kontrakce

Svalové kontrakce jsou rozlišovány podle směru a rozsahu výsledného pohybu a podle působení vnějších sil (Dylevský, 2007, s. 162).

Čihák (2016, s. 351) rozeznává kontrakci izometrickou a izotonickou, kterou dále dělí na kontrakci koncentrickou a excentrickou.

Dylevský (2007, s. 162) označuje použití termínu „izotonická“ za nesprávné a označuje kontrakci jako izokinetickou.

Hamilton a Luttgens (2002, s. 51) popisují i kontrakci izotonickou, ale zdůrazňují, že se nejedná o synonymum ke kontrakci koncentrické nebo excentrické, při kterých se mění kromě délky svalu i napětí, což odporuje významu slova izotonická.

Hamill, Knutzen a Derrick (2015, s. 75-77) popisují zvlášť kontrakci izometrickou, koncentrickou a excentrickou.

2.4.1 Izometrická kontrakce

Při izometrické kontrakci sval negeneruje pohyb, vzdálenost mezi jeho úpony zůstává konstantní (Dylevský, 2007, s. 162). Aktivita se projevuje změnou napětí svalu (Čihák, 2016, s. 351).

O izometrickou kontrakci se jedná, je-li sval aktivní a vyvíjí napětí bez viditelných změn pozice segmentu v kloubu (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 75).

Jsou popsány dva případy izometrické kontrakce, které se od sebe liší zdrojem působení zevní síly. První možností je současná izometrická aktivita dvou antagonistických svalů se záměrem udržet segment nehybný. V druhém případě sval působí izometrickou aktivitou proti síle, jejíž zdroj se nachází mimo organismus. Jedná se obvykle o gravitační sílu nebo zevní mechanickou či zevní svalovou sílu (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 50-51).

Příkladem izometrické kontrakce je aktivita extenzorů páteře (m. erector spinae) ve stoji při udržení trupu v pozici 30° flexe. Extenzory odolávají gravitační síle, čímž brání dalšímu zvětšování flexe trupu, kterou by bez jejich účasti gravitace způsobila (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s.75).

2.4.2 Koncentrická kontrakce

Při koncentrické kontrakci dochází k přiblížení svalových úponů a tím k viditelnému zkrácení svalu současně se zvětšením objemu svalového bříška. Síla kontrakce má stejný směr jako pohybující se segment, což je označováno jako pozitivní svalová práce (Dylevský, 2007, s. 163; Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 75).

Aby mohl správně proběhnout zamýšlený pohyb, musí být při koncentrické kontrakci jeden z úponů pracujícího svalu fixován. Pohyb se potom děje přiblížením volného segmentu k segmentu stabilnímu (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 50).

Kromě pohybu v kloubech je výsledkem koncentrické kontrakce také akcelerace pohybu (Dylevský, 2007, s. 162).

Příkladem koncentrické aktivity je působení m. brachialis při flexi v loketním kloubu prováděné z výchozí nulové pozice (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 75).

2.4.3 Excentrická kontrakce

Při excentrické kontrakci dochází k oddálení úponů pracujícího svalu – sval se prodlužuje (Dylevský, 2007, s. 162).

Hamilton a Lutgens (2002, s. 50) označují informaci o prodlužování svalu za zavádějící, neboť excentrické kontrakci obvykle předchází zkrácení svalu a excentrickou aktivitou je sval pouze uveden do výchozí délky. Jako příklad uvádějí excentrickou aktivitu abduktorů (m. deltoideus, m. supraspinatus) při addukci paže prováděné ve vertikále.

Excentrické kontrakce probíhá v případě, že je sval vystaven působení vnější síly, která je větší než síla, kterou sám působí. Dochází tedy k pohybu opačným směrem, než je směr působení síly pracujícího svalu a sval tak koná negativní práci. Vnější působící silou je obvykle gravitace nebo síla antagonistického svalu (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 75).

Účinkem excentrické kontrakce je zpomalení pohybu (Dylevský, 2007, s. 162; Hamilton a Lutgens, 2002, s. 50). Více než iniciován je pohyb excentricky pracujícím svalem kontrolován. Proto je-li porušena excentrická funkce, roste riziko úrazu (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 75-76).

2.4.4 Izotonická kontrakce

Sval působí izotonickou kontrakci, pokud nemění své napětí během přibližování nebo oddalování úponů (Hamilton a Lutgens, 2002, s. 51).

Kontrakce probíhá proti odporu zevní síly, kterou může být samotná hmotnost segmentu. Tato hmotnost je sice konstantní, ale i tak se v průběhu pohybu mění nárok na napětí, které musí pracující sval vyvinout. Řešením je zvolit takovou zátěž, která není větší než síla, již sval vyvine ve své nejslabší pozici v rámci rozsahu daného pohybu (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, 89).

2.4.5 Izokinetická kontrakce

Izokinetickou kontrakci působí sval tehdy, pokud se výsledný pohyb děje konstantní rychlostí, přičemž se mění napětí svalu (Hamilton a Lutgens, 2002, s. 51).

Tato kontrakce není typicky zastoupena v běžných denních činnostech (ADL) ani ve sportu (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 90).

Při izokinetické dynamometrii se s využitím přístroje měří svalová síla v otevřeném kinematickém řetězci, kdy testovaný sval působí právě izokinetickou kontrakci (Zapparoli a Riberto, 2017, s. 3).

2.5 Vzájemné vztahy svalových kontrakcí

2.5.1 Srovnání izometrické, koncentrické a excentrické kontrakce

Tyto tři kontrakce se liší ve svých energetických nárocích i v množství síly, již jsou schopny produkovat (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 76).

Největší sílu s nejnižší spotřebou kyslíku je schopen vyvinout excentricky pracující sval. Se zapojením nižšího počtu svalových vláken je během excentrické kontrakce vyvinuta stejná síla jako u ostatních dvou typů (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 76).

Z hlediska pohybových strategií probíhá excentrická kontrakce se zapojením nižšího počtu motorických jednotek (Enoka, 2002, s. 354). Kontrola CNS nad svalovými kontrakcemi se v případě excentrie liší, což je zřejmé na úrovni kortikální i svalové. Excentrická kontrakce probíhá s nižší elektromyografickou aktivací, ale s vyšší aktivitou mozkové kůry pravděpodobně proto, že je náročnější na koordinaci (Hoppeler, 2016, s. 4).

Nejmenší síla je generována kontrakcí koncentrickou, protože zkracuje-li se sval rostoucí rychlostí, snižuje se na úrovni svalového vlákna počet příčných můstků, čímž dochází ke snížení síly stahu (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 76).

2.5.2 Ko-kontrakce

Současná kontrakce agonisty a antagonisty je označována jako ko-kontrakce a slouží k zajištění určité pozice segmentu během statické i dynamické aktivity se zvýšenými nároky na stabilitu (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 58).

Ko-kontrakce se v rámci ADL vyskytuje při zvedání břemen ke stabilizaci účastných segmentů nebo při chůzi či běhu, kdy stabilizuje kotník (Winter, 2009, s. 151).

Enoka (2002, s. 352-353) popisuje studii zkoumající stupeň ko-kontrakční aktivity během učení nových pohybů. Byla snímána aktivita m. triceps brachii a m. biceps brachii u jedince, který se dva týdny učil vyřezávat dřívem. Intenzita ko-kontrakce se postupně snížila ve prospěch selektivních kontrakcí obou svalů.

Dosavadní studie zaznamenávají pouze několik antagonistických párů, které navíc svou ko-kontrakční aktivitu využívají pouze během specifických úkonů (Borzelli et al., 2018, s. 2).

Nadměrná ko-kontrakce se vyskytuje jako patologie při poruchách horního motoneuronu, kdy je aktivita agonisty doprovázena nežádoucí kontrakcí antagonisty. Tento problém je typický pro

Parkinsonovu chorobu, cerebelární ataxii, traumata míchy a obecně pro spastické choroby (Hirabayashi, 2019, s. 1).

2.5.3 SS cyklus

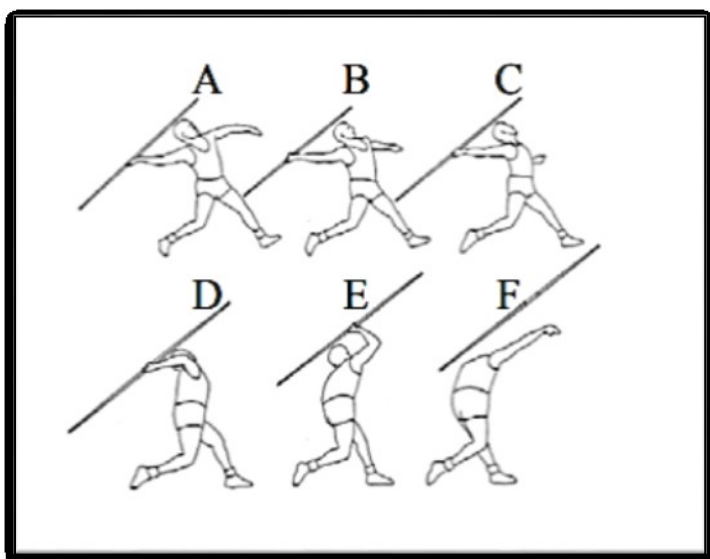
Pro průběh svalové aktivity je typické protažení svalu předcházející jeho následnému kontrakčnímu zkrácení (viz Obrázek 2), což je v zahraniční literatuře označováno jako stretch-shortening cycle (SSC) (Shenau et al., 1997 in Enoka, 2002, s. 273).

Předchází-li koncentrické kontrakci protažení svalu vlivem excentrické kontrakce, je výsledná koncentrická kontrakce schopna generovat větší sílu v porovnání se stejnou kontrakcí bez předchozího aktivního protažení (Seiberl et al., 2015, s. 2).

Sval i šlacha mají elastické vlastnosti. Dojde-li k jejich protažení, ukládá se v nich energie, která je uvolněna navrácením svalu do jeho původní délky (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 53).

Koncentrická kontrakce musí proběhnout velmi rychle (0,9 s) po protažení, jedině tehdy může být uložená energie využita pro svalovou práci. Pokud trvá protažení déle, přemění se uložená elastická energie v teplo (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 83).

Tohoto principu je využíváno při množství pohybových aktivit, jako je běh, kopy, hody nebo skoky (Prilutsky, 2000 in Enoka, 2002, s. 273). Enoka (2002, s. 273) dodává, že výjimkou je pravděpodobně plavání.



Obrázek 2 Ukázka využití SS cyklu – zrychlení pohybu ramene vpřed po předchozím protažení prsních svalů (Janura, 2011, s. 51)

2.6 Vazivová složka svalu

2.6.1 Role vaziva ve svalové kontrakci

Primárním zdrojem mechanické energie jsou svalová vlákna, vazivo je díky své pružnosti zdrojem sekundárním (Véle, 2006, s. 37).

Vazivo je obsaženo v obalech svalových vláken i celých svalů a v úponových šlachách (Čihák, 2016, s. 349; Dylevský, 2007, s. 164, 167).

Šlacha je tvořena převážně kolagenními vlákny, v malé míře jsou zastoupena vlákna elastická a vazivové buňky – tenocyty. Podobně jako ve svalu jsou svazky vláken obaleny řídkým vazivem, které kryje šlachu i na povrchu a ze 60–70 % se podílí na jejím celkovém objemu (Dylevský, 2007, s. 167).

Svazky kolagenních vláken jsou ve šlaše uspořádány paralelně se směrem působení síly svalu. Pevnost šlachy odolává vysokým tahovým silám svalu a v reakci na zatížení vykazuje elastické chování prostřednictvím zpětného rázu a díky pružnosti pojivové tkáně (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 68-69).

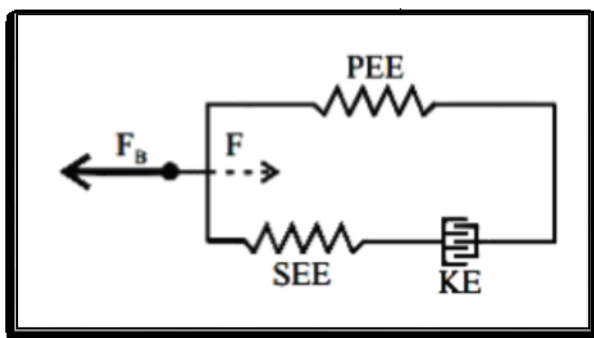
Šlacha funguje jako rezervoár elastické energie (Enoka, 2002, s. 225). Dylevský (2007, s. 167) mluví o energii deformační, která je šlachou ukládána a posléze uvolňována.

Místo přechodu svalu ve šlachu se nazývá myotendinózní junkce (Enoka, 2002, s. 227). Přechod se nenachází v jedné rovině, nýbrž v různých úrovních, což zajišťuje vysokou mechanickou odolnost spoje vůči tahovým silám (Dylevský, 2007, s. 167; Enoka, 2002, s. 277).

Na úrovni vláken je spojení uskutečněno přechodem endomyzia ve vmezeřené vazivo šlachy (Dylevský, 2007, s. 167).

2.6.2 Hillův model

Hillův model (viz Obrázek 3) na základě tří komponent popisuje mechanické chování svalu (Hamill, Knutzen a Derrick 2015, s. 70). Ústřední komponentou je kontraktilní element (KE), dalšími dvěma jsou paralelní elastický element (PEE) a sériový elastický element (SEE) (Kawakami a Lieber, 2000 in Enoka, 2002, s. 259).



Obrázek 3 Hillův tříprvkový model svalu (Janura, 2011, s. 50)

Legenda: KE – kontraktilní element, SEE – sériový elastický element, PEE – paralelní elastický element, F – tahová síla svalu, F_B – síla břemene, působení vnějšího prostředí

Kontraktilní element realizuje převod nervového signálu v sílu a reflektuje zkrácení svalu na úrovni myofibrily (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 70-71), znázorňuje silové a rychlostní možnosti svalu (Janura, 2011, s. 50). Je obklopen dvěma elastickými elementy, které reprezentují elasticitu vaziva a v modelu jsou znázorněny jako pružiny (Enoka, 2002, s. 259).

Sériový elastický element reprezentuje všechny elastické komponenty svalu uložené v sérii se strukturou generující sílu. Jedná se tedy především o úponovou šlachu. Jelikož se SEE nachází v sérii s KE, veškerá síla produkovaná KE je přenášena rovněž na SEE (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 71). Kromě úponové šlachy se SEE nachází na úrovni aktino-myozinových můstků. Slouží k přenosu a částečnému pohlcení mechanické energie vyprodukované KE, funguje jako pružina (Janura, 2011, s. 50).

Paralelní elastický element odpovídá vazivové složce, která je uložena paralelně ke KE (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 71), konkrétně epimysium, perimysium a sarkolema. Paralelní element brání nadměrnému pasivnímu protažení svalu a při nedostatečné schopnosti KE odolávat vnějším silám, kdy v krajním případě brání ruptuře svalu (Janura, 2011, s. 50).

Výsledná svalová síla je dána silou kontrakce, která vzniká interakcí aktinových a myozinových vláken a také napětím elastických komponent svalu a šlachy. Při maximálním protažení svalu je maximální i přírůstek elastické síly (Dylevský, 2007, s. 171).

2.7 Svalová síla

Celková síla svalu je výsledkem součtu síly aktivní a pasivní. Aktivní síla je dána počtem aktino-myozinových můstků, původní délkou svalových vláken, rychlostí svalové kontrakce a velikostí plochy průřezu svalu. Pasivní síla je výsledkem tření v kloubu, odporu kloubního pouzdra, ligament a kůže (Janura, 2011, s. 51).

Dylevský (2007, s. 171) řadí mezi faktory ovlivňující svalovou sílu počet svalových vláken, délku svalu, počet aktivovaných motorických jednotek a napětí elastických komponent svalu a šlachy. Hamill (2015, s. 80) přidává působení gravitační nebo jiné zevní síly.

Široké svaly velkého průřezu působí větší silou než svaly s malým průřezem. Srovnáme-li dva svaly stejného průřezu, z nichž jeden je zpeřený a druhý nezpeřený, větší silou působí sval zpeřený. Zpeřené svaly se v těle vyskytují v největším zastoupení a primárně se účastní silových pohybů (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 48).

3 Vlastnosti a využití excentrické kontrakce

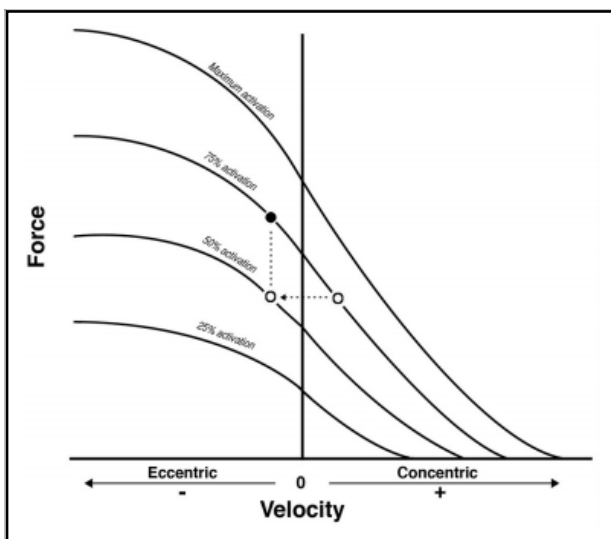
3.1 Parametry excentrické kontrakce

3.1.1 Vztah síly a rychlosti kontrakce

Rychlost svalové kontrakce závisí na síle, kterou musí sval vyvinout k realizaci pohybu. Platí, že se zvýšením nároků na svalovou sílu dochází k poklesu rychlosti (Hamilton a Luttgens, 2002, s. 53).

S rostoucí zátěží, proti které sval působí, dochází ke změně typu kontrakce. Při nejnižší zátěži dochází k nejrychlejší koncentrické kontrakci, se zvyšováním zátěže se rychlost blíží nule, kdy sval vykazuje izometrickou aktivitu. Pokud je zátěž nadále zvyšována, sval se prodlužuje a tím provádí excentrickou kontrakci zápornou rychlostí (viz Obrázek 4) (Vander, Sherman a Luciano, 1990, s. 303).

Rychlost prodlužování roste s rostoucí zátěží a zároveň se zvyšuje napětí svalových vláken. V okamžiku, kdy je zátěž o 50 % větší než při izometrické kontrakci, rychlost excentrické kontrakce je již vysoká. Křivka rychlosti excentrické kontrakce končí náhle v okamžiku, kdy sval není nadále schopen kontrolovat pohyb (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 80).

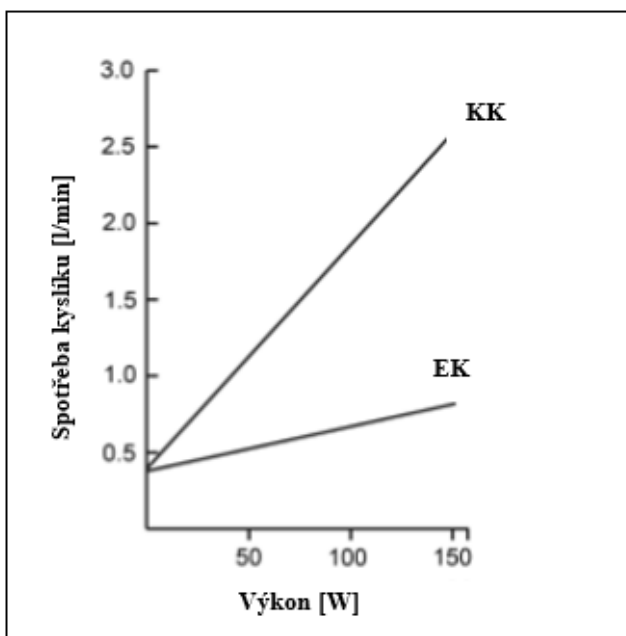


Obrázek 4 Křivka vztahu síly a rychlosti svalové kontrakce (Reeves et al., 2009 in Franchi, Reeves a Narici, 2017, s. 10)

3.1.2 Energetické nároky

Excentrická kontrakce je z hlediska energetických nároků považována za velmi efektivní, neboť při stejně intenzivním výkonu spotřebuje méně kyslíku, než je tomu u ostatních typů svalových kontrakcí (viz Obrázek 5) (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 76).

Při excentrické aktivitě je spotřebováno šestkrát méně energie než při stejně intenzivní koncentrické aktivitě (Bigland-Ritchie a Woods, 1976 in Franchi, Reeves a Narici, 2017, s. 3). Hoppeler (2016, s. 2) také srovnává energetickou náročnost kontrakcí. Podle jeho výzkumu je při koncentrické aktivitě spotřebováno čtyřikrát více energie ve srovnání s excentrickou. Nižší energetické nároky jsou důsledkem aktivace menšího počtu svalových vláken v průběhu excentrické kontrakce (Beaven et al., 2014, s. 5).

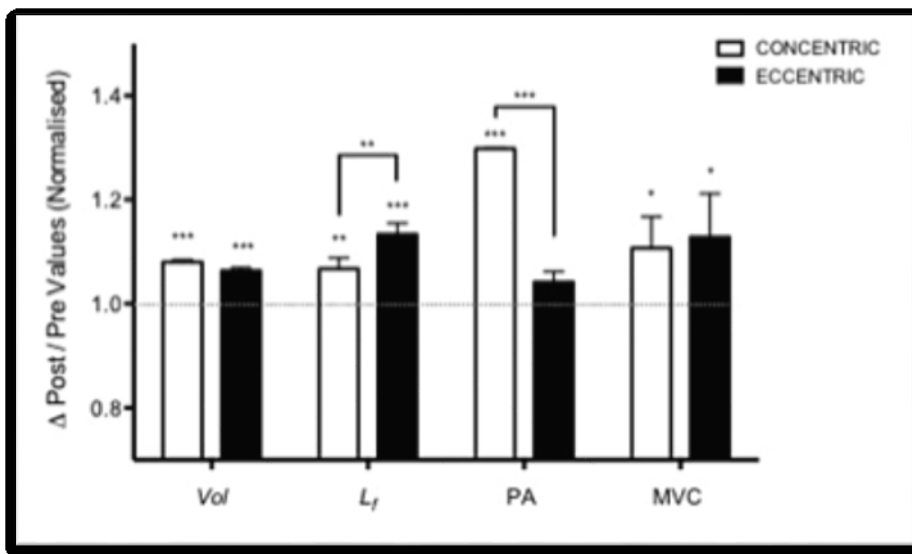


Obrázek 5 Srovnání spotřeby kyslíku při koncentrické (KK) a excentrické (EK) svalové kontrakci (Hoppeler, 2016, s. 2, upraveno)

3.2 Adaptace svalu na opakované excentrické kontrakce

Zařazení excentrických kontrakcí do cvičebního plánu je silným podnětem pro zlepšení mechaniky svalové funkce, zvýšení svalového výkonu a rychlosti. Dochází také k morfologickým a architektonickým úpravám na úrovni přechodu sval-šlacha (Douglas et al., 2017, s. 937).

Franchi et al. (2017, s. 8) popisují pozitivní změny jako zvětšení objemu svalu, délky svalových vláken, úhlu zpeření a zvýšení hodnoty maximální síly kontrakce díky excentrickému cvičení, které zároveň srovnává se cvičením koncentrickým (viz Obrázek 6).



Obrázek 6 Srovnání efektu koncentrické a excentrické kontrakce na změny parametrů svalu (Franchi et al., 2014 in Franchi, Reeves a Narici, 2017, s. 8)

Legenda: Vol – objem svalu, L_f – délka svalového vlákna, PA – úhel zpeření, MVC – maximální volní kontrakce

3.2.1 Zvýšení svalové síly

Excentrické cvičení působí prostřednictvím zlepšené strukturální a funkční adaptace na samotnou excentrickou kontrakci, což ovlivňuje také sílu kontrakce koncentrické. Excentrickou aktivitou dochází k výraznějšímu inerciálnímu protažení v rámci SS cyklu, čímž je zlepšena i výsledná koncentrická aktivita (Maroto-Izquierdo et al., 2017, s. 7).

Enoka (2002, s. 400) uvádí, že excentrické cvičení sice působí výraznější zvýšení svalové síly ve srovnání se cvičením koncentrickým, ale největší výtěžnost přisuzuje programu, který obě kontrakce kombinuje. Pro obhajobu excentrického cvičení před konvenčním programem svědčí

studie popisující trénink extenze kolene po dobu dvanácti týdnů, kdy excentricky posilující účastníci dosáhli zvýšení svalové síly o 46 %, naopak koncentrické cvičení vedlo k růstu pouze 13 % (Hortobágyi et al., 1996 in Enoka, 2002, s. 400).

3.2.2 Změna objemu svalu

Mechanické napětí způsobené excentrickým protažením vede ke svalové ischemii, která působí metabolickou adaptací kosterní svaloviny. Odpovědí na tento stres je anabolická aktivita vedoucí ke svalové hypertrofii (Hedayatpour a Falla, 2015, s. 2-3).

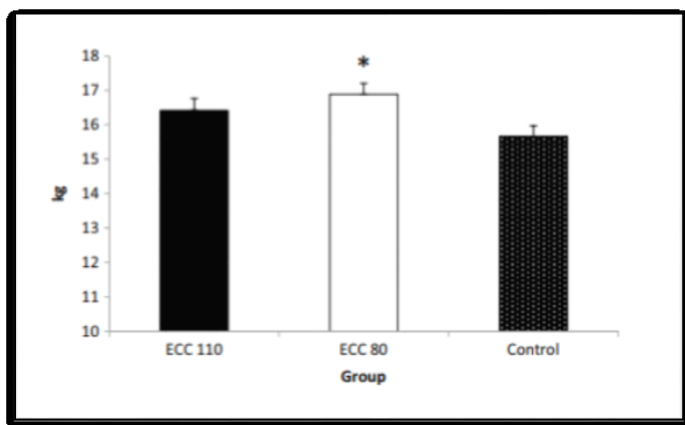
Ve srovnání s koncentrickým cvičením funguje excentrické cvičení jako efektivnější stimulace pro hypertrofii svalových vláken (Wong a Booth, 1990 in Enoka, 2002, s. 401).

Franchi et al. (2017, s. 8) zmiňují zvětšení objemu vlivem svalové aktivity, ale nepopisují výrazný rozdíl mezi koncentrickou a excentrickou kontrakcí ve vztahu k tomuto aspektu svalové adaptace.

3.2.3 Vliv intenzity zátěže

Intenzita tréninku je důležitým faktorem pro rozvoj svalové síly. Platí, že k dosažení největší síly je ideální krátkodobá maximální intenzita tréninku (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 86).

Krentz, Chilibeck a Farthing (2017, s. 2105-2106) popisují experiment zkoumající vliv intenzity zátěže při excentrickém cvičení na změnu svalové síly a objemu. Třicet dva dospělých mužů a žen bylo rozděleno do tří skupin podle intenzity tréninku. Intenzita supramaximální odpovídala 110 % maximální intenzity koncentrické kontrakce (ECC110), submaximální intenzita potom 80 % (ECC80), třetí skupina byla skupinou kontrolní a neprováděla žádný trénink. Během osmi týdnů prováděli účastníci zařazení do první a druhé skupiny excentrické posilování flexorů loketního kloubu jedné horní končetiny. Počet opakování není přesně udán, ale byl respektován nástup svalové únavy. Po osmi týdnech došlo v obou skupinách ke srovnatelnému zvětšení objemu svalu, ale svalová síla se zvýšila výrazněji ve skupině ECC80 než v ECC110 (viz Obrázek 7, s. 34). Excentrickým cvičením o nižší intenzitě lze tedy dosáhnout s vynaložením menší námahy lepších výsledků.



Obrázek 7 Srovnání hodnot svalové síly (Krentz, Chilibeck a Farthing, 2017, s. 2105)

3.2.4 Změny na svalovém vlákne

Svalová kontrakce vede k výraznější hypertrofii svalových vláken typu II, tedy vláken rychlých. Tento jev je uskutečněn především vlivem kontrakce excentrické a projevuje se zvětšením průřezu svalu (Douglas et al., 2016, s. 935).

Kromě hypertrofie stimuluje excentrická kontrakce také prodloužení svalových vláken. Vlivem excentrického cvičebního programu trvajících osm týdnů došlo k prodloužení svalových vláken m. biceps femoris o 23.9 % (Alonso-Fernandez, Docampo-Blanco a Martinez-Fernandez, 2018, s. 13). Toto je užitečnou prevencí proti zraněním svalu, neboť kratší svalová vlákna jsou náchylnější k poranění (Fyfe et al., 2013; Timmins et al., 2015 in Alonso-Fernandez, Docampo-Blanco a Martinez-Fernandez, 2018, s. 13).

Průměrná rychlost šíření akčního potenciálu po svalovém vlákně může být vlivem intenzivního excentrického cvičení akutně zhoršena (Piitulainen et al., 2012 in Nasrabadi et al., 2018, s. 4). Děje se tak kvůli poškození iontových kanálů na úrovni sarkomery, jejichž funkce je zásadní pro šíření akčního potenciálu. Rychlost šíření byla srovnána před a 24 hodin po excentrickém cvičení m. vastus lateralis. Výsledky experimentu potvrdily, že excentrická kontrakce bezprostředně vede ke snížení této rychlosti (Nasrabadi et al., 2018, s. 19).

3.2.5 Aktivita motorických jednotek

Během svalové kontrakce dochází ke zlepšení synchronizace motorických jednotek. Ve srovnání s koncentrickou a izometrickou kontrakcí je vliv excentrické kontrakce na motorické jednotky výraznější (Enoka, 2002, s. 400).

Zvýšení síly a výkonu svalu pravděpodobně souvisí se schopností zrychleného náboru motorických jednotek (Douglas et al., 2016, s. 937).

Bylo zjištěno, že pořadí motorických jednotek při náboru je při submaximální intenzitě kontrakce během koncentrické i excentrické aktivity shodné. Rozdíl spočívá v rychlosti inaktivace jednotek, která je systematicky nižší během aktivního prodlužování svalu (Duchateau a Enoka, 2016, s. 197).

Změna aktivity motorických jednotek přetrvává až sedm dní po excentrickém cvičení. Během této zotavovací fáze se objevuje snížená rychlost šíření akčního potenciálu, ale zvyšuje se také aktivita motorických jednotek, která zahrnuje jejich zvýšený nábor (Semmler, 2014, s. 764).

3.2.6 Zlepšení neuromuskulární kontroly

Neuromuskulární kontrola je ovlivněna změnami svalové morfologie a nervové aktivity. Excentrickým cvičením dochází k příznivé modifikaci základních faktorů svalové morfologie (průřez svalu, pracovní rozsah svalu a úhel zpeření) a je také prospěšné pro funkci nervového systému (Lepley et al., 2017, s. 334).

Během posledních desetiletí bylo provedeno několik experimentů, které dokazují rozdílnou kontrolní aktivitu CNS v průběhu koncentrické kontrakce ve srovnání s excentrickou (Duchateau a Baudry, 2014; Duchateau a Enoka, 2016; Enoka, 1996 in Duchateau a Enoka, 2016, s. 197).

Snížená neuromuskulární kontrola je rizikovým faktorem pro vznik zranění. Zlepšení jejích dílčích komponent může sloužit jako prevence. Excentrické cvičení je pro své vlastnosti v tomto případě vhodnou variantou. Na úrovni nervové a svalové činnosti zlepšuje aktivitu a zapojení alfa-motoneuronů, aktivitu sarkolemy, zvětšuje průřez svalu a celkově svalový výkon. Na úrovni mozkové kůry zvyšuje kortikospinální excitabilitu (Lepley et al., 2017, s. 334).

3.2.7 Vliv excentrické kontrakce na šlachu

Svalová aktivita ovlivňuje také šlachu. Působí zvýšený průtok krve, syntézu kolagenu a dlouhodobě hypertrofii tkáně. Rozsah adaptace závisí především na cvičebním režimu, intenzitě zátěže a převažujícím typu svalové kontrakce (Couppé, 2015, s.854).

Odpovědí šlacha na vysokou zátěž je v krajním případě apoptóza fibroblastů a degenerace tkáně šlacha, proto je nutné zvolit optimální zátěž (Arnoczky, Lavagnino a Egerbacher, 2007, s. 220). Na úrovni fibroblastů dochází v reakci na mikrotraumatizaci šlacha ke zvýšené syntéze kolagenu, který je využit k reparačním a remodelačním procesům (Wang, 2006, s. 1569).

Šlacha je z převážné části tvořena extracelulární matrix, která je na rozdíl od fibroblastů pasivní strukturou, nereaguje tedy aktivně na zátěž, může být ovšem aktivitou ovlivněna. Kumulace mikrotraumat na úrovni vláken šlacha je pravděpodobně rizikovým faktorem pro vznik tendinopatií (Shepherd a Screen, 2013 in Couppé, 2015, s. 855).

Šlacha na zvýšení napětí reaguje prodloužením (Couppé, 2015, s. 856). Fakt, že sval produkuje větší sílu při excentrické kontrakci je argumentem pro využití tohoto typu kontrakce k ovlivnění šlacha, neboť s vysokým napětím svalu dojde k výraznějšímu protažení šlacha (Alfredson, 2005, s. 255-256).

3.2.8 Aktivace satelitních buněk

Satelitní buňky jsou dospělé kmenové buňky kosterního svalu, lokalizované mezi sarkolemou a bazální laminou (Harridge, 2007 in Franchi, Reeves a Narici, 2017, s. 11).

Poraněním svalových vláken jsou vyvolány regenerační procesy, jejichž klíčovou složkou je proliferace a aktivace svalových satelitních buněk (Qaisar, Bhaskaran a Van Rammen, 2016, s. 62).

Různé typy svalové kontrakce modulují aktivitu satelitních buněk odlišně. Koncentrická kontrakce vede pravděpodobně ke zvýšení počtu rezervních satelitních buněk, zatímco excentrická kontrakce působí jejich aktivaci (Farup et al., 2014 in Franchi, Reeves a Narici, 2017, s. 11).

Byl testován i účinek svalové kontrakce na změnu počtu satelitních buněk. Během výzkumu byl srovnán vliv excentrické a koncentrické kontrakce m. vastus lateralis (VL) u skupiny dospělých mužů a žen na proliferaci satelitních buněk. U všech zúčastněných byl VL pravé strany trénován koncentricky a levý VL excentricky. K nejvýraznějšímu zvýšení počtu satelitních buněk došlo již po dvou dnech v levém VL, po pěti dnech byla zaznamenána zvýšená proliferace i v koncentricky trénovaném svalu (Imaoka et al., 2015, s. 1,6).

3.3 Využití excentrické kontrakce v rehabilitaci

3.3.1 Tendinopatie

Tendinopatie je označení pro klinický stav, jenž je charakterizován bolestí v oblasti postižené šlachy při aktivitě, lokalizovanou palpační citlivostí, otokem šlachy a zhoršením výkonu. Nejčastější příčinou vzniku je chronické přetěžování (Couppé et al., 2015, s. 853).

Výskyt tendinopatií je asociován převážně se sportovci, ale není výjimkou ani u méně aktivních jedinců. Souvisí také s rizikovými faktory mikrovaskulárních onemocnění, jimiž jsou především obezita, diabetes mellitus, hypertenze a vysoký věk (Frizziero et al., 2014, s. 48).

Martaugh a Ihm (2013, s. 175-179) popisují pozitivní vliv excentrického cvičení na tendinopatie Achillovy šlachy, lig. patellae, úponů svalů rotátorové manžety a tendinopatii v oblasti laterálního epikondyly humeru.

Po zařazení excentrických kontrakcí do rehabilitačního plánu tendinopatií dochází ke snížení bolesti, zlepšení funkce a vede také ke změně biochemických procesů ve šlaše, která se projevuje zvýšenou syntézou kolagenu (Couppé et al., 2015, s. 858).

Průběh tendinopatie bývá ve všech šlachách podobný v nezávislosti na jejich anatomické lokalizaci, stejný způsob cvičení z hlediska zvolených kontrakcí je tedy široce aplikovatelný (Martaugh a Ihm, 2013, s. 175, 180).

Jonsson (2015, s. 847) popisuje studii, ve které byl srovnán vliv excentrického a koncentrického posilování m. quadriceps femoris (QF) na bolest u pacientů trpících tendinopatií lig. patelae. Devatenáct sportovně aktivních mužů ve věku 25 let bylo rozděleno do dvou skupin: první skupina posilovala excentricky, druhá koncentricky. Pro hodnocení bolesti byla použita vizuální analogová škála (VAS, Visual Analogue Scale). Posilování s využitím 25° nakloněné roviny probíhalo v případě excentrie tak, že pacienti z plné extenze dolní končetiny (DK) pomalu uváděli kolenní kloub postižené DK do pozice 70° flexe. Koncentrické posilování bylo prováděno na stejné plošině a ve stejných pozicích, ale v opačném sledu, tedy ze 70° flexe kolene do plné extenze DK. Návrat do výchozí pozice byl v obou skupinách dosažen aktivitou zdravé DK (u bilaterální tendinopatie se zapojením horních končetin).

Výzkum trval dvanáct týdnů při denní frekvenci tréninku (15 opakování, 3 série, dvakrát denně). Probandy průměrně udávaná hodnota VAS byla srovnána na začátku a na konci výzkumu. U první skupiny došlo k poklesu hodnoty ze 7,3 na 2,4. U druhé skupiny bylo zlepšení daleko méně výrazné – hodnota klesla ze 7,4 na 6,8. Studie navíc udává, že během následujících tří let podstoupila celá druhá skupina chirurgickou léčbu, zatímco excentricky posilující skupina zůstala sportovně aktivní bez nutnosti intervence. Excentrické posilování na nakloněné rovině se tedy ukázalo být dobrou volbou pro pacienty trpící bolestmi vyvolanými tendinopatií lig. patelae (Jonsson, 2015, s. 487-488).

3.3.2 Rekonstrukce předního zkříženého vazů

Akutní ruptura předního zkříženého vazů (anterior cruciate ligament, ACL) je velmi častou ortopedicko-traumatologickou diagnózou. Terapií je obvykle rekonstrukce vazů štěpem ze šlachy m. semitendinosus, m. gracilis nebo z lig. patellae (bone-tendon-bone, BTB) (Domnick, Raschke a Herbort, 2016, s. 82, 87).

Zranění kolene a eventuální následná plastika ACL bývá typicky provázena hypotrofií m. quadriceps femoris (QF). Konvenční rehabilitační postupy jsou z hlediska rychlého obnovení

svalové síly efektivní, ale přesto není výjimkou trvalý 10–20 % deficit ve velikosti a síle QF, který vede k nepříznivému ovlivnění výkonu. Kromě QF dochází také k oslabení m. gluteus maximus (GMax) především na straně úrazu, ale v menším rozsahu i na straně nepostižené (Gerber et al., 2009a, s. 31, 37).

V současné době je excentrická kontrakce s úspěchem zařazována do cvičebních programů jako prostředek k posílení svalů a šlach. Má využití pro prevenci úrazů a také jako součást rehabilitačních plánů při akutních i chronických potížích pohybového aparátu (Hoppeler, 2016, s. 7).

Gerber et al. (2009b, s. 51-57) zkoumali výsledky rozdílných rehabilitačních přístupů u čtyřiceti pacientů po plastice ACL. Výzkum trval 15 týdnů, kdy během prvních 3 týdnů po operaci byla rehabilitace u všech pacientů zaměřena na zvětšování rozsahu pohybu v kolenním kloubu a aktivaci m. quadriceps femoris (QF). Pro následujících 12 týdnů byli pacienti rozděleni do dvou skupin, v obou skupinách byli rovnoměrně zastoupeni pacienti různého věku a pohlaví se všemi zmíněnými způsoby provedení plastiky (štěp z m. semitendinosus, m. gracilis a BTB štěp). První skupina praktikovala trénink excentrické kontrakce na tomu přizpůsobeném bicyklovém ergometru, druhá skupina na klasickém bicyklovém ergometru prováděla koncentrické kontrakce. Kromě toho obě skupiny pokračovaly v klasickém cvičení (zvyšování rozsahu pohybu, aktivace QF, funkční a odporované cvičení). Po patnácti týdnech od operačního výkonu byl zaznamenán růst objemu QF v první skupině o 23 %, ve druhé pouze o 9 %. Došlo také ke zvětšení objemu GMax, a to o 20,6 % v první a o 11,6 % ve druhé skupině. Objem hamstringů a m. gracilis vzrostl v obou skupinách bez významného rozdílu. Byla měřena také svalová síla QF, která se v první skupině zvýšila o 33 % a ve druhé skupině o 9 %. Z tohoto výzkumu vyplývá, že zařazením excentrického cvičení do rehabilitačního plánu po rekonstrukci ACL je dosaženo výraznějšího zvětšení objemu i svalové síly extenzoru kolenního kloubu, m. quadriceps femoris.

3.3.3 Sarkopenie

Termín sarkopenie označuje ztrátu svalové hmoty a snížení kvality svalové funkce vlivem anatomických a biochemických změn během stárnutí. S věkem dochází ke zmenšení průřezu svalu, zmnožení tukové a vazivové tkáně na úkor sníženého počtu svalových vláken, změnám na úrovni sarkomery a ke snížení počtu motorických jednotek (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 83).

Snížení svalové síly je v porovnání se ztrátou svalové hmoty výraznější (Enoka, 2002, s. 442). Svalová síla po padesátém roce života klesne během každého následujícího desetiletí průměrně

o 12-15 % (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 83). Pokles svalové síly je častou příčinou pádů vedoucích ke zraněním (Gluchowski et al., 2015, s. 1414).

Z hlediska udržení dlouhodobé samostatnosti a kvality života je žádoucí přiměřená fyzická aktivita i ve vyšším věku, aby došlo k minimalizaci a zpomalení progresu příznaků sarkopenie. Fyziologické stárnutí je často doprovázeno snížením aerobního výkonu, což je vzhledem k nízkým nárokům na spotřebu kyslíku během excentrické kontrakce silným argumentem pro její zařazení do cvičebního programu. Excentrické cvičení s mírným zatížením je volbou u pacientů se sníženou tolerancí fyzické aktivity a zejména u starších osob (Hoppeler, 2016, s. 6).

Byl zkoumán vliv fyzické aktivity na sílu a složení svalové tkáně u skupiny 46 mužů a žen průměrného věku 81 let. Bylo srovnáno klasické odporové cvičení k posílení svalů DKK (variace cviků extenze a flexe kyčelního a kolenního kloubu) a excentrický trénink s mírnou zátěží za použití bicyklového ergometru. Cvičení probíhalo dvakrát týdně po dobu dvanácti týdnů. Na závěr experimentu byly srovnány změny hodnot svalové síly extenzorů kolene, objem stehna a podíl tuku. Svalová síla při extenzi kolenního kloubu zaznamenala 7,5 % zvýšení vlivem excentrického cvičení, u koncentricky posilující skupiny se síla zvýšila o 2,3 %. V obou skupinách došlo ke zvětšení objemu stehna přibližně o 2 %. Excentrické cvičení také vedlo ke snížení množství tukové tkáně o 6,9 % v oblasti stehna a o 5 % v rámci celého těla. V případě koncentrického programu byl pokles tuku méně výrazný, na stehnu došlo ke snížení o 2,7 %, celkový tělesný tuk se snížil pouze o 0,6 % (Mueller et al., 2009, s. 145-146, 149).

3.3.4 Kardiovaskulární choroby

Projevy kardiovaskulárních (KVS) chorob přispívají ke snížení funkční kapacity jedince, což je schopnost provádět ADL samostatně a bez obtíží. Konvenčně je pacientům doporučováno aerobní cvičení, ovšem v poslední době byly také zkoumány příznivé vlivy excentrické kontrakce. Kromě vysoké efektivity s nízkými energetickými nároky je výhodou excentrické kontrakce v tom, že se vyskytuje v řadě běžných činností, jako je chůze z kopce nebo ze schodů (Karagiannis et al., 2017, s. 58-59).

Excentrické cvičení v porovnání s klasickým odporovým cvičením působí menší stres pro kardiovaskulární systém (Gluchowski et al., 2015, s. 1413).

Theodorou et al. (2013, s. 1-5) testovali vliv fyzické zátěže na skupinu dvanácti netrénovaných mužů ve věku 60-70 let trpících chronickým srdečním selháním. Pro účely výzkumu byl použit tréninkový eskalátor, na kterém první skupina prováděla chůzi do schodů (činnost s převahou koncentrické aktivity extenzorů kolene), druhá skupina chůzi ze schodů (aktivita s výrazným podílem excentrické kontrakce kolene). Výzkum probíhal šest týdnů, kdy byl trénink zařazen třikrát týdně. U druhé skupiny byly v počátku přítomny příznaky svalové únavy, které jsou spjaty s excentrickou kontrakcí, postupně ovšem tyto příznaky zmizely, což svědčí pro poměrně rychlou adaptaci kosterní svaloviny i ve vyšším věku. U všech zúčastněných došlo ke zvýšení svalové síly, které bylo výraznější v excentricky trénující skupině.

Tepová frekvence byla měřena v poslední minutě každého tréninku. V případě excentrické aktivity průměrně dosahovala hodnoty 98 ± 5 tepů/min, u koncentrické potom 139 ± 7 tepů/min. Také subjektivně vnímaná námaha v poslední minutě byla nižší při chůzi ze schodů. Výsledky studie prokazují benefity excentrického cvičení pro osoby s kardiovaskulární patologií ve formě chůze ze schodů, což je lehce dostupný způsob fyzické aktivity (Theodorou et al., 2013, s. 1-5).

3.3.5 Chronická obstrukční plicní nemoc

Pacienti trpící chronickou obstrukční plicní nemocí (CHOPN) vykazují v důsledku onemocnění značné svalové ztráty. Je pro ně typická fyzická de kondice, častý výskyt zánětů a hypoxemie. Snížená funkčnost kosterní svaloviny přispívá k rychlejší progresi onemocnění. Typická dušnost je v průběhu cvičení limitujícím faktorem, proto je pro tyto pacienty dobrou volbou excentrická zátěž díky svým nízkým nárokům na spotřebu kyslíku (Hoppeler, 2016, s. 9).

Byl zkoumán vliv tréninku na ergometru přizpůsobeného excentrickému cvičení na skupinu šesti mužů ve věku 54-71 let trpících závažnou formou CHOPN. Výzkum probíhal pět týdnů a tréninkový plán sestával ze tří dvacetiminutových tréninků týdně, kdy byla postupně zvyšována intenzita. Intenzita byla stanovena jako 60 % z maximálního výkonu dosaženého koncentrickým cvičením. Většina účastníků zaznamenala příznaky svalové únavy, které ale ustoupily, aniž by byl ovlivněn výkon. Po pěti týdnech byli účastníci schopni vyvinout pětikrát větší sílu ve srovnání s koncentrickým cvičením při stejných ventilačních parametrech. Bylo prokázáno, že excentrické cvičení s využitím ergometru a s postupným zvyšováním intenzity je pro pacienty s CHOPN vhodné a nehrozí při něm poškození svalu asociované s excentrickou kontrakcí (Rocha Vieira, 2011, s. 270-274).

3.4 Limity excentrické kontrakce

3.4.1 Traumatizace a únava svalu

Negativním důsledkem zařazení nezvyklých excentrických pohybů do cvičebního plánu bývá poškození svalu, bolestivost a za určitých podmínek až závažnější svalové poranění (Proske et al., 2004 in Semmler, 2014, s. 763).

Na svalovém vláknech poraněném vlivem excentrické kontrakce dochází k přechodnému snížení rychlosti šíření akčního potenciálu (Hedayatpour et al., 2009 in Nasrabadi et al., 2018, s. 4).

Dlouhodobá a silná nebo opakovaná svalová kontrakce kteréhokoliv typu působí svalovou únavu. Stupeň únavy se odvíjí od množství snížené zásoby svalového glykogenu, zvýšené hladiny kyseliny mléčné, snížené hodnoty pH tkáně a od změn perfúze. Díky značné rezervě je možné relativně dlouho po nástupu únavy pokračovat ve svalové práci bez skutečného poškození svalu. Po využití všech rezerv ale dochází k úplnému vyčerpání a hrozí strukturální poškození. Odolnost svalu vůči únavě je možné zvýšit tréninkem, kdy se svalový metabolismus postupně přizpůsobí novým nárokům (Rokyta, 2000, s. 255).

Únavu značí postupný pokles výkonosti, kdy prvním signálem je změna techniky provádění pohybu. Nástup únavy velmi závisí na kvalitě a také délce regenerace. Je důležité, aby fyziologická únava nepřešla v únavu patologickou, která se může stát až chronickým problémem (Kučera a Dylevský, 1999, s. 69).

Excentrické cvičení je označováno jako primární faktor pro vznik nadměrného svalového napětí. Po náročném koncentrickém nebo izometrickém cvičení nastává dočasná svalová únava, ale v případě excentrických kontrakcí trvají příznaky únavy (svalová slabost, bolest a ztuhlost) déle (Hamill, Knutzen a Derrick, 2015, s. 91).

3.4.2 Kontraindikace excentrických kontrakcí

U rychle progredujících myopatií způsobených odchylkou strukturálních proteinů není vhodné cvičení proti velkému odporu ani zapojení excentrických kontrakcí, neboť mohou vést k poranění svalu a destrukci svalových vláken. Typickým zástupcem této skupiny onemocnění je Duchenneova svalová dystrofie (Duchenne muscular dystrophy, DMD) (Ansved, 2003, s. 438).

Svalové dystrofie tvoří skupinu dědičných onemocnění, které se vyznačují strukturálními změnami svalového vlákna a svalovou slabostí. Strukturální změny jsou zapříčiněny přestavbou svalové tkáně v tkáň vazivovou a tukovou, která potom už není schopna kontrakce (Povýšil et al., 2007, s. 356).

Cílem rehabilitace u svalových dystrofií je zachovat pružnost svalů a plný rozsah pohybu v kloubech, zabránit nebo minimalizovat vznik kloubních kontraktur a fibrotizace svalů. Důležité je také zachovat mobilitu a symetrii hrudní stěny, což souvisí se správnou dechovou mechanikou (Birnkranz, 2018, s. 8).

Pro rehabilitaci u DMD je ideální nízkoodporové cvičení, při kterém nedochází k mechanickému poškození svalů, a které zároveň optimalizuje jeho metabolické a kontraktilní vlastnosti (Ansved, 2003, s. 438).

Intenzivní excentrická kontrakce poškozuje vlákna i zdravého svalu, ovšem svaly při svalových dystrofiích ztrácejí schopnost regenerovat, takže každé poškození je daleko závažnější. Z tohoto důvodu je pro pacienty žádoucí se excentrickým kontrakcím vyhýbat jak v terapii, tak v rámci ADL. Pacienti by měli být edukováni k posazování s rozložením hmotnosti i na horní končetiny, aby se snížila excentrická aktivita QF. Paravertebrální svaly jsou vystaveny excentrické kontrakci při předklonech, proto je pro pacienty nežádoucí aktivitou například luxování. Excentrická kontrakce nicméně hraje významnou roli ve většině komplexních pohybů, proto je v rámci pohybové léčby voleno spíše analytické cvičení dle Kenny či Jandova svalového testu, při kterém je minimalizována substituční aktivita okolních svalů (Vacek, 2005, s. 302).

Závěr

Hlavní funkcí kosterní svaloviny je svalová kontrakce, která zajišťuje posturální a lokomoční projevy jedince. Podnět ke svalové kontrakci přichází z centrální nervové soustavy a přes nervosvalovou ploténku je přenášen na svalové vlákno, které realizuje svalový stah. Energie pro funkci kosterního svalu pochází z chemických vazeb, ve svalu tedy probíhá přeměna chemické energie v energii mechanickou. Mechanika svalové kontrakce je také ovlivněna přítomností vazivové tkáně, jež má schopnost ukládat a následně uvolňovat mechanickou energii a zvýšit tak výslednou sílu svalové kontrakce.

Svalové kontrakce lze rozdělit podle změn délky a napětí svalu na několik typů. Nejčastěji je používáno dělení na kontrakci izometrickou, koncentrickou a excentrickou, které se při komplexních pohybech vzájemně doplňují. Jsou známy také kontrakce izotonická a kontrakce izokinetická, jejichž význam není pro popis běžně vykonávaných pohybů zásadní.

Mezi jednotlivými typy svalových kontrakcí vyniká svými výjimečnými vlastnostmi kontrakce excentrická. Jsou popsány příznivé výsledky při jejím zařazení do rehabilitačních programů, například u pacientů trpících patelární tendinopatií a u pacientů, kterým byla provedena rekonstrukce předního zkříženého vazů. Díky nízkým metabolickým nárokům jsou excentrické programy s úspěchem používány u starších osob s nízkou adaptací na fyzickou aktivitu, kdy v porovnání s koncentrickým cvičením působí výraznější zvýšení svalové síly a podle výsledků studie také snížení podílu tukové tkáně (Mueller et al., 2009, s. 149). Ze stejných důvodů je výhodné zařadit excentrii i u pacientů trpících kardiovaskulárními chorobami nebo chronickou obstrukční plicní nemocí, kdy takové cvičení pacienty méně vyčerpává a zároveň zlepšuje jejich fyzickou kondici. Z hlediska intenzity tréninku bylo excentrickým cvičením o submaximální intenzitě respektujícím svalovou únavu dosaženo v porovnání s intenzitou supramaximální lepších výsledků (Krentz, Chilibeck a Farthing, 2017, s. 2105-2106). Adaptací na excentrickou kontrakci dochází také ke zlepšení nervosvalové kontroly, čímž je sníženo riziko pádů a k aktivaci satelitních buněk, které se účastní při regeneračních procesech svalového vlákna.

Kromě množství pozitivních vlivů je opakovaná intenzivní excentrická kontrakce spojena s časným nástupem a delším trváním svalové únavy a poškozením svalových vláken. Při snížené regenerační schopnosti, která je typická pro svalové dystrofie je tedy excentrické kontrakce žádoucí omezovat, neboť poškození svalu je v tomto případě nevratné.

Referenční seznam

- ALFREDSON, H. 2005. The chronic painful Achilles and patellar tendon: research on basic biology and treatment. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* [online]. 15(4), 252-259, [cit. 2019-04-09]. ISSN: 0905-7188. Dostupné z: doi 10.1111/j.1600-0838.2005.00466.x.
- ALONSO-FERNANDEZ, D., DOCAMPO-BLANCO, P. a MARTINEZ-FERNANDEZ, J. 2018. Changes in muscle architecture of biceps femoris induced by eccentric strength training with nordic hamstring exercise. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* [online]. 28(1), 88-94, [cit. 2019-04-05]. ISSN: 09057188. Dostupné z: doi 10.1111/sms.12877.
- AMBLER, Z. 1999. *Neurologie: pro studenty všeobecného lékařství* (3. vyd.). Praha: Karolinum. ISBN: 80-7184-885-9.
- ANSVED, T. 2003. Muscular dystrophies: influence of physical conditioning on the disease evolution. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care* [online]. 6(4), 435-439, [cit. 2019-03-16]. ISSN: 1363-1950. Dostupné z: doi 10.1097/01.mco.0000078987.18774.d9.
- ARNOCZKY, S. P., LAVAGNINO, M. a EGERBACHER, M. 2007. The mechanobiological aetiopathogenesis of tendinopathy: is it the over-stimulation or the under-stimulation of tendon cells?. *International Journal of Experimental Pathology* [online]. 88(4), 217-226, [cit. 2019-04-09]. ISSN: 09599673. Dostupné z: doi 10.1111/j.1365-2613.2007.00548.x.
- BIRNKRANT, D. J., BUSHBY, K., BANN, C. M., et al. 2018. Diagnosis and management of Duchenne muscular dystrophy, part 1: diagnosis, and neuromuscular, rehabilitation, endocrine, and gastrointestinal and nutritional management. *The Lancet Neurology*[online]. 17(3), 251-267, [cit. 2019-03-16]. ISSN: 14744422. Dostupné z: doi 10.1016/S1474-4422(18)30024-3.
- BORZELLI, D., CESQUI, B., BERGER, D. J., BURDET, E., D'AVELLA, A. a CATTANEO, L. 2018. Muscle patterns underlying voluntary modulation of co-contraction. *PLOS ONE* [online]. 13(10), 1-30, [cit. 2019-04-02]. ISSN: 1932-6203. Dostupné z: doi 10.1371/journal.pone.0205911.

COUPPÉ, C., SVENSSON, R. B., SILBERNAGEL, K. G., LANGBERG, H. a MAGNUSSON, S. P. 2015. Eccentric or Concentric Exercises for the Treatment of Tendinopathies?. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy* [online]. 45(11), 853-863, [cit. 2019-04-06]. ISSN: 0190-6011. Dostupné z: doi 10.2519/jospt.2015.5910.

ČIHÁK, R. 2016. *Anatomie* (3. vyd.). Praha: Grada. ISBN: 978-80-247-3817-8.

DOMNICK, Ch., RASCHKE, M. J. a HERBORT, M. 2016. Biomechanics of the anterior cruciate ligament: Physiology, rupture and reconstruction techniques. *World Journal of Orthopedics* [online]. 7(2), 82-93, [cit. 2019-04-12]. ISSN: 2218-5836. Dostupné z: doi 10.5312/wjo.v7.i2.82.

DOUGLAS, J., PEARSON, S., ROSS, A. a MCGUIGAN, M. 2017. Chronic Adaptations to Eccentric Training: A Systematic Review. *Sports Medicine* [online]. 47(5), 917-941, [cit. 2019-04-05]. ISSN: 0112-1642. Dostupné z: doi 10.1007/s40279-016-0628-4.

DUCHATEAU, J. a ENOKA, R. M. 2016. Neural control of lengthening contractions. *The Journal of Experimental Biology*[online]. 219(2), 197-204, [cit. 2019-04-06]. ISSN: 0022-0949. Dostupné z: doi 10.1242/jeb.123158.

DUMONT, N. A., BENTZINGER, C. F., SINCENNES, M. C. a RUDNICKI, M. A. 2015. Satellite Cells and Skeletal Muscle Regeneration. *Comprehensive Physiology*[online]. 1027-1059, [cit. 2019-03-28]. ISBN: 9780470650714. Dostupné z: doi 10.1002/cphy.c140068.

DYLEVSKÝ, I. 2007. *Obecná kineziologie*. Praha: Grada. ISBN: 978-80-247-1649-7.

ENOKA, R. 2002. *Neuromechanics of human movement* (3rd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics. ISBN: 0-7360-0251-0.

FRIZZIERO, A., TRAINITO, S., OLIVA, F., NICOLI ALDINI, N., MASIERO, S. a MAFFULLI, N. 2014. The role of eccentric exercise in sport injuries rehabilitation. *British Medical Bulletin* [online]. 110(1), 47-75, [cit. 2019-04-06]. ISSN: 0007-1420. Dostupné z: doi 10.1093/bmb/ldu006.

FRONTERA, W., R. a OCHALA, J. 2015. Skeletal Muscle: A Brief Review of Structure and Function. *Calcified Tissue International* [online]. 96(3), 183-195, [cit. 2019-04-22]. ISSN: 0171-967X. Dostupné z: doi 10.1007/s00223-014-9915-y.

GAJDOSIK, R., L., HALLETT, J., P. a SLAUGHTER, L., L. 1994. Passive insufficiency of two-joint shoulder muscles. *Clinical Biomechanics* [online]. 9(6), 377-378, [cit. 2019-04-22]. ISSN: 02680033. Dostupné z: doi 10.1016/0268-0033(94)90069-8.

GERBER, J. P., MARCUS, R. L., DIBBLE, L. E. a LASTAYO, P. C. 2009a. The Use of Eccentrically Biased Resistance Exercise to Mitigate Muscle Impairments Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Short Review. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach* [online]. 1(1), 31-38, [cit. 2019-04-12]. ISSN: 1941-7381. Dostupné z: doi 10.1177/1941738108327531.

GERBER, J., P., MARCUS, R., L., DIBBLE, L., E., GREIS, P., E., BURKS, R. T. a LASTAYO, P., C. 2009b. Effects of Early Progressive Eccentric Exercise on Muscle Size and Function After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A 1-Year Follow-up Study of a Randomized Clinical Trial. *Physical Therapy* [online]. 89(1), 51-59, [cit. 2019-04-25]. ISSN: 0031-9023. Dostupné z: doi 10.2522/ptj.20070189.

GLUCHOWSKI, A., HARRIS, N., DULSON, D. a CRONIN, J. 2015. Chronic Eccentric Exercise and the Older Adult. *Sports Medicine* [online]. 45(10), 1413-1430 [cit. 2019-04-07]. ISSN: 0112-1642. Dostupné z: doi 10.1007/s40279-015-0373-0.

GRIM, M. a DRUGA, R. 2016. *Základy anatomie*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum. ISBN: 80-7262-111-4.

HAMILL, J., KNUTZEN, K. a DERRICK, T. R. 2015. *Biomechanical basis of human movement* (4th edition). Philadelphia: Wolters Kluwer Health. ISBN: 978-1-4511-7730-5.

HAMILTON, N. a LUTTGENS K. 2002. *Kinesiology: scientific basis of human motion* (10th ed.). Boston, MA: McGraw-Hill. ISBN: 0-07-112243-5.

HECKMAN, C., J. a ENOKA, R., M. 2012. Motor unit. In: TERJUNG, R. *Comprehensive Physiology* [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, [cit. 2019-04-27]. ISBN 9780470650714.

HEDAYATPOUR, N. a FALLA, D. 2015. Physiological and Neural Adaptations to Eccentric Exercise: Mechanisms and Considerations for Training. *BioMed Research International* [online]. 1-7 [cit. 2019-04-06]. ISSN: 2314-6133. Dostupné z: doi 10.1155/2015/193741.

HIRABAYASHI, R., EDAMA, M., KOJIMA, S., NAKAMURA, M., ITO, W., NAKAMURA, E., KIKUMOTO, T. a ONISHI, H. 2019. Effects of Reciprocal Ia Inhibition on Contraction Intensity of Co-contraction. *Frontiers in Human Neuroscience* [online]. 12, 1-7, [cit. 2019-04-02]. ISSN: 1662-5161. Dostupné z: doi 10.3389/fnhum.2018.00527.

HIRSCH, N.P. Neuromuscular junction in health and disease. *British Journal of Anaesthesia* [online]. 2007, 99(1), 132-138 [cit. 2019-04-27]. DOI: 10.1093/bja/aem144. ISSN 00070912. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007091217347979>

HOPPELER, Hans. 2016. Moderate Load Eccentric Exercise; A Distinct Novel Training Modality. *Frontiers in Physiology* [online]. 2016, 1-12, [cit. 2019-04-06]. ISSN: 1664-042X. Dostupné z: doi 10.3389/fphys.2016.00483.

CHAL, J. a POURQUIÉ, O. 2017. Making muscle: skeletal myogenesis in vivo and in vitro. *Development* [online]. 144(12), 2104-2122, [cit. 2019-04-19]. ISSN: 0950-1991. Dostupné z: doi 10.1242/dev.151035.

IMAOKA, Y., KAWAI, M., MORI, F. a MIYATA, H. 2015. Effect of eccentric contraction on satellite cell activation in human vastus lateralis muscle. *The Journal of Physiological Sciences* [online]. 65(5), 461-469, [cit. 2019-04-04]. ISSN: 1880-6546. Dostupné z: doi 10.1007/s12576-015-0385-4.

INFANTOLINO, B., W. a CHALLIS, J., H. 2014. Short Communication: Pennation Angle Variability in Human Muscle. *Journal of Applied Biomechanics* [online]. 30(5), 663-667, [cit. 2019-04-22]. ISSN: 1065-8483. Dostupné z: doi 10.1123/jab.2013-0334.

JANURA, M. 2011. *Biomechanika II*. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě. ISBN 978-80-7464-044-5.

JONSSON, P. 2005. Superior results with eccentric compared to concentric quadriceps training in patients with jumper's knee: a prospective randomised study. *British Journal of Sports Medicine* [online]. 39(11), 847-850, [cit. 2019-04-25]. ISSN: 0306-3674. Dostupné z: doi 10.1136/bjism.2005.018630.

KARAGIANNIS, C., SAVVA, C., MAMAI, I., EFSTATHIOU, M., MONTICONE M. a XANTHOS, T. 2017. Eccentric exercise in ischemic cardiac patients and functional capacity: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* [online]. 60(1), 58-64, [cit. 2019-04-07]. ISSN: 18770657. Dostupné z: doi 10.1016/j.rehab.2016.10.007.

KRENTZ, J. R., CHILIBECK, P. D. a FARTHING, J. P. 2017. The effects of supramaximal versus submaximal intensity eccentric training when performed until volitional fatigue. *European Journal of Applied Physiology* [online]. 117(10), 2099-2108, [cit. 2019-04-08]. ISSN: 1439-6319. Dostupné z: doi 10.1007/s00421-017-3700-3.

KUČERA, M. a DYLEVSKÝ, I. 1999. *Sportovní medicína*. Praha: Grada. ISBN: 80-7169-725-7.

LASTAYO, P. C., EWY, G. A., PIEROTTI, D. D., JOHNS, R. K. a LINDSTEDT, S. 2003. The Positive Effects of Negative Work: Increased Muscle Strength and Decreased Fall Risk in a Frail Elderly Population. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences* [online]. 58(5), 419-424, [cit. 2019-04-07]. ISSN: 1079-5006. Dostupné z: doi 10.1093/gerona/58.5.M419.

LEPLEY, L. K., LEPLY, A. S., ONATE, J. A. a GROOMS, D. R. 2017. Eccentric Exercise to Enhance Neuromuscular Control. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach* [online]. 9(4), 333-340, [cit. 2019-04-06]. ISSN: 1941-7381. Dostupné z: doi 10.1177/1941738117710913.

LIEBER, R., L., ROBERTS, T., J., BLEMKER, S., S., LEE, S., S., M., a HERZOG, W. 2017. Skeletal muscle mechanics, energetics and plasticity. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* [online]. 14(1), 1-16, [cit. 2019-04-26]. ISSN: 1743-0003. Dostupné z: doi 10.1186/s12984-017-0318-y.

MAROTO-IZQUIERDO, S., GARCÍA-LÓPEZ, D., FERNANDEZ-GONZALO, R., MOREIRA, O. C., GONZÁLEZ-GALLEGO, J. a DE PAZ, J. A. 2017. Skeletal muscle functional and structural adaptations after eccentric overload flywheel resistance training: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport* [online]. 20(10), 943-951, [cit. 2019-04-05]. ISSN: 14402440. Dostupné z: doi 10.1016/j.jsams.2017.03.004.

MUELLER, M., BREIL, F., A. a VOGT, M. 2009. Different response to eccentric and concentric training in older men and women. *European Journal of Applied Physiology* [online]. 107(2), 145-153, [cit. 2019-04-25]. ISSN: 1439-6319. Dostupné z: doi 10.1007/s00421-009-1108-4.

MURTAUGH, B. a IHM, J. M. 2013. Eccentric Training for the Treatment of Tendinopathies. *Current Sports Medicine Reports*[online]. 12(3), 175-182, [cit. 2019-04-06]. ISSN: 1537-890X. Dostupné z: doi 10.1249/JSR.0b013e3182933761.

MUSUMECI, G., CASTROGIOVANNI, P., COLEMAN, R., SZYCHLINSKA, M., A., SALVATORELLI, I., PARENTI, R., MAGRO, G. a IMBESI, R. 2015. Somitogenesis: From somite to skeletal muscle. *Acta Histochemica* [online]. 117(4-5), 313-328, [cit. 2019-04-19]. ISSN: 00651281. Dostupné z: doi 10.1016/j.acthis.2015.02.011.

NASRABADI, R., IZANLOO, Z., SHARIFNEZAD, A., HAMEDINIA, M. R. a HEDAYATPOUR, N. 2018. Muscle fiber conduction velocity of the vastus medialis and lateralis muscle after eccentric exercise induced-muscle damage. *Journal of Electromyography and Kinesiology* [online]. 43, 118-126, [cit. 2019-04-05]. ISSN: 10506411. Dostupné z: doi 10.1016/j.jelekin.2018.06.008.

POVÝŠIL, C. a ŠTEINER, I. 2007. *Speciální patologie* (2. vyd.). Praha: Galén. ISBN: 978-80-7262-494-2.

QAISAR, R., BHASKARAN, S. a VAN REMMEN, H. 2016. Muscle fiber type diversification during exercise and regeneration. *Free Radical Biology and Medicine* [online]. 98, 56-67, [cit. 2019-04-04]. ISSN: 08915849. Dostupné z: doi 10.1016/j.freeradbiomed.2016.03.025.

ROCHA VIEIRA, D. S., BARIL, J., RICHARD, R., PERRAULT, H., BOURBEAU, J. a TAIVASSALO, T. Eccentric Cycle Exercise in Severe COPD: Feasibility of Application. *COPD: Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease* [online]. 2011, 8(4), 270-274, [cit. 2019-04-07]. ISSN: 1541-2555. Dostupné z: doi 10.3109/15412555.2011.579926.

ROKYTA, R. 2000. *Fyziologie pro bakalářská studia v medicíně, přírodovědných a tělovýchovných oborech*. Praha: ISV. ISBN: 80-85866-45-5.

RUANGCHAIJATUPORN, T., GAETKE-UDAGER, K, JACOBSON, J., A., YABLON, C., M. a MORAG, Y. 2017. Ultrasound evaluation of bursae: anatomy and pathological appearances. *Skeletal Radiology*[online]. 46(4), 445-462, [cit. 2019-04-22]. ISSN: 0364-2348. Dostupné z: doi 10.1007/s00256-017-2577-x.

SADLER, T. W. 2011. *Langmanova lékařská embryologie*. Praha: Grada. ISBN: 978-80-247-2640-3.

SEFTON, E., M. a KARDON, G. 2019. Connecting muscle development, birth defects, and evolution: An essential role for muscle connective tissue. *Organ Development* [online]. 137-176, [cit. 2019-04-19]. ISBN: 9780128104897. Dostupné z: doi 10.1016/bs.ctdb.2018.12.004.

SEIBERL, W., POWER, G. A., HERZOG, W. a HAHN, D. 2015. The stretch-shortening cycle (SSC) revisited: residual force enhancement contributes to increased performance during fast SSCs of human m. adductor pollicis. *Physiological Reports* [online]. 3(5), 1-12, [cit. 2019-04-01]. ISSN: 2051817X. Dostupné z: doi 10.14814/phy2.12401.

SEMMLER, J. G. 2014. Motor unit activity after eccentric exercise and muscle damage in humans. *Acta Physiologica* [online]. 210(4), 754-767, [cit. 2019-04-04]. ISSN: 17481708. Dostupné z: doi 10.1111/apha.12232.

SHADRIN, I. Y., KHODABUKUS, A. a BURSAC, N. 2016. Striated muscle function, regeneration, and repair. *Cellular and Molecular Life Sciences* [online]. 73(22), 4175-4202, [cit. 2019-04-26]. ISSN: 1420-682X. Dostupné z: doi 10.1007/s00018-016-2285-z.

SCHIAFFINO, S. a REGGIANI, C. 2011. Fiber Types in Mammalian Skeletal Muscles. *Physiological Reviews* [online]. 91(4), 1447-1531, [cit. 2019-04-22]. ISSN: 0031-9333. Dostupné z: doi 10.1152/physrev.00031.2010.

SKALEC, A. a EGERBACHER, M. 2017. The deep fascia and retinacula of the equine forelimb - structure and innervation. *Journal of Anatomy* [online]. 231(3), 405-416, [cit. 2019-04-22]. ISSN: 00218782. Dostupné z: doi 10.1111/joa.12643.

SLATER, C. 2017. The Structure of Human Neuromuscular Junctions: Some Unanswered Molecular Questions. *International Journal of Molecular Sciences* [online]. 18(10), 1-18, [cit. 2019-04-22]. ISSN: 1422-0067. Dostupné z: doi 10.3390/ijms18102183.

TEIXEIRA, E. a DUARTE, J., A. 2016. Skeletal Muscle Loading Changes its Regenerative Capacity. *Sports Medicine* [online]. 46(6), 783-792, [cit. 2019-04-19]. ISSN: 0112-1642. Dostupné z: doi 10.1007/s40279-015-0462-0.

THEODOROU, A. A., PANAYIOTOU G., PASCHALIS, V., NIKOLAIDIS, M. G., KYPAROS, A., MADEMLI, L., GRIVAS, G. V. a VRABAS, I. S. 2013. Stair descending exercise increases muscle strength in elderly males with chronic heart failure. *BMC Research Notes* [online]. 6(1), 1-5, [cit. 2019-04-07]. ISSN: 1756-0500. Dostupné z: doi 10.1186/1756-0500-6-87.

VACEK, J. 2005. Léčebná rehabilitace u svalových dystrofií. *Solen*[online]. 6(6), 302-305, [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.solen.cz/pdfs/neu/2005/06/04.pdf>.

VANDER, A. J., SHERMAN, J. H. a LUCIANO, D. H. 1990. *Human Physiology: The mechanisms of body function* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Publishing Company. ISBN: 0070669694.

VÉLE, F. 2006. *Kineziologie: přehled klinické kineziologie a patokineziologie pro diagnostiku a terapii poruch pohybové soustavy* (3. vyd.). Praha: Triton. ISBN: 80-7254-837-9.

WAKELING, J. M., BLAKE, O., M., WONG, I., RANA, M. a LEE, S., S., M. 2011. Movement mechanics as a determinate of muscle structure, recruitment and coordination. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* [online]. 366(1570), 1554-1564, [cit. 2019-04-22]. ISSN: 0962-8436. Dostupné z: doi 10.1098/rstb.2010.0294.

WANG, J., H., C. 2006. Mechanobiology of tendon. *Journal of Biomechanics* [online]. 39(9), 1563-1582, [cit. 2019-04-23]. ISSN: 00219290. Dostupné z: doi 10.1016/j.jbiomech.2005.05.011.

WINTER, D. A. 2009. *Biomechanics and motor control of human movement* (4th ed.). Hoboken, N.J.: Wiley. ISBN 978-0-470-39818-0.

Seznam zkratek

ACL	anterior cruciate ligament, přední zkřížený vaz
ACh	acetylcholin
ADL	aktivity daily living, běžné denní činnosti
ATP	adenosintrifosfát
BTB	bone-tendon-bone
CNS	centrální nervová soustava
DK	dolní končetina
DMD	Duchenneova svalová dystrofie
ECC	excentrická kontrakce
GMax	m. gluteus maximus
CHOPN	chronická obstrukční plicní nemoc
KE	kontraktilní element
KVS	kardiovaskulární
PEE	pasivní elastický element
QF	m. quadriceps femoris
SEE	sériový elastický element
SSC	stretch-schortening cycle
VAS	Vizuální analogová škála

Seznam obrázků

Obrázek 1 Funkce svalů při abdukci v ramenním kloubu (Hamill a Knutzen, 2018 in Janura, 2011, s. 43)19

Obrázek 2 Ukázka využití SS cyklu – zrychlení pohybu ramene vpřed po předchozím protažení prsních svalů (Janura, 2011, s. 51)26

Obrázek 3 Hillův tříprvkový model svalu (Janura, 2011, s. 50)28

Obrázek 4 Křivka vztahu síly a rychlosti svalové kontrakce (Reeves et al., 2009 in Franchi, Reeves a Narici, 2017, s. 10)30

Obrázek 5 Srovnání spotřeby kyslíku při koncentrické (KK) a excentrické (EK) svalové kontrakci (Hoppeler, 2016, s. 2, upraveno)31

Obrázek 6 Srovnání efektu koncentrické a excentrické kontrakce na změny parametrů svalu (Franchi et al., 2014 in Franchi, Reeves a Narici, 2017, s. 8)32

Obrázek 7 Srovnání hodnot svalové síly (Krentz, Chilibeck a Farthing, 2017, s. 2105)34