Svaly, které jsou základní hybnou silou kloubu v jednom směru, se nazývají **agonisté** tohoto pohybu. Svaly, které tomuto pohybu napomáhají, jsou **synergisté**. Svaly, které působí proti pohybu těchto svalů, tedy působí protipohybem, se nazývají **antagonisté**. Například dvojhlavý sval pažní a hluboký sval pažní jsou agonisté při flexi (ohybu) paže, sval vřetenní je synergista, zatímco trojhlavý sval pažní je při tomto pohybu antagonista.

Sval se obvykle upíná ke kostem ve dvou místech, a to rozdílným způsobem. Jedno místo se nazývá **začátek svalu**. Tento tzv. začátek může být buď nepatrné charakteristické místo na kosti, nebo velká plocha pokrývající podélně téměř celou kost. Začátek je obvykle na kosti uložené blíže středu těla. Druhé místo napojení svalu na kost se nazývá **úpon**. Tento konec svalu je obvykle spojen se **šlachou**, která přechází přes kloub, v němž vyvolává pohyb. Sval může mít více než jeden začátek i úpon. V takovýchto případech je sval rozdělen do několika částí, tzv. **hlav**. Ty umožňují jemné doladění pohybu (kdy hlavy fungují na stejném kloubu, ale v trochu jiných úhlech), nebo přechází přes více než jeden kloub, ale s vlivem na tyto na sobě nezávislé klouby. Například trojhlavý sval pažní má tři hlavy, které všechny zajišťují pohyb v loketním kloubu, zatímco pouze dvě jeho hlavy se podílí na pohybu v kloubu ramenním.

Obrázky 1.4a a 1.4b, a tabulka 1.1a a 1.1b, uvádějí hlavní svaly lidského těla, které jsou při posilovacích cvičeních zapojovány. Všimněte si, že některé svaly se skládají z několika hlav nebo částí, které se upínají na různá místa po těle, a že některé svaly přechází přes více než jeden kloub. Tyto znaky poskytují svalům funkci navíc. Například čtyřhlavý sval stehenní neprovádí pouze extenzi v kolenním kloubu, ale jedna z jeho hlav (střední) fixuje čéšku během natažení (viz str. 178), a další z hlav (přímý sval stehenní) se podílí na pohybu v kloubu kyčelním.

Svalová kontrakce

Huxleyho teorie klouzavých filament (viz Huxley 2004) vysvětluje, jak mohou svalová vlákna vyvinout tah. To vše se děje na úrovni sarkomery – vzájemným působením hlavních stavebních bílkovin v sarkomeře (obrázek 1.2).

Jak už jste se dověděli výše v této kapitole, v klidovém stadiu má sval příčně pruhovaný vzhled. Když je sval v kontrahovaném (plně zkráceném) stavu, stále jde o příčné pruhování svalové tkáně, ale s rozdílným vzorem. Tato změna ve vzoru příčného pruhování nastává z důvodu zasouvání aktinových vláken mezi myozinová. Aktinová vlákna jsou připevněna k Z-linii na každém konci sarkomery. V průběhu svalové kontrakce si A-proužky zachovávají svou délku, ale I-proužky se zkrátí stažením Z-linií blíže k sobě. To způsobí zmenšení H-zóny, jakmile se do ní aktinová vlákna zasunou a dají jí tmavší vzhled. I-proužky se zkrátí, jakmile se Z-linie přiblíží ke koncům myozinových vláken.

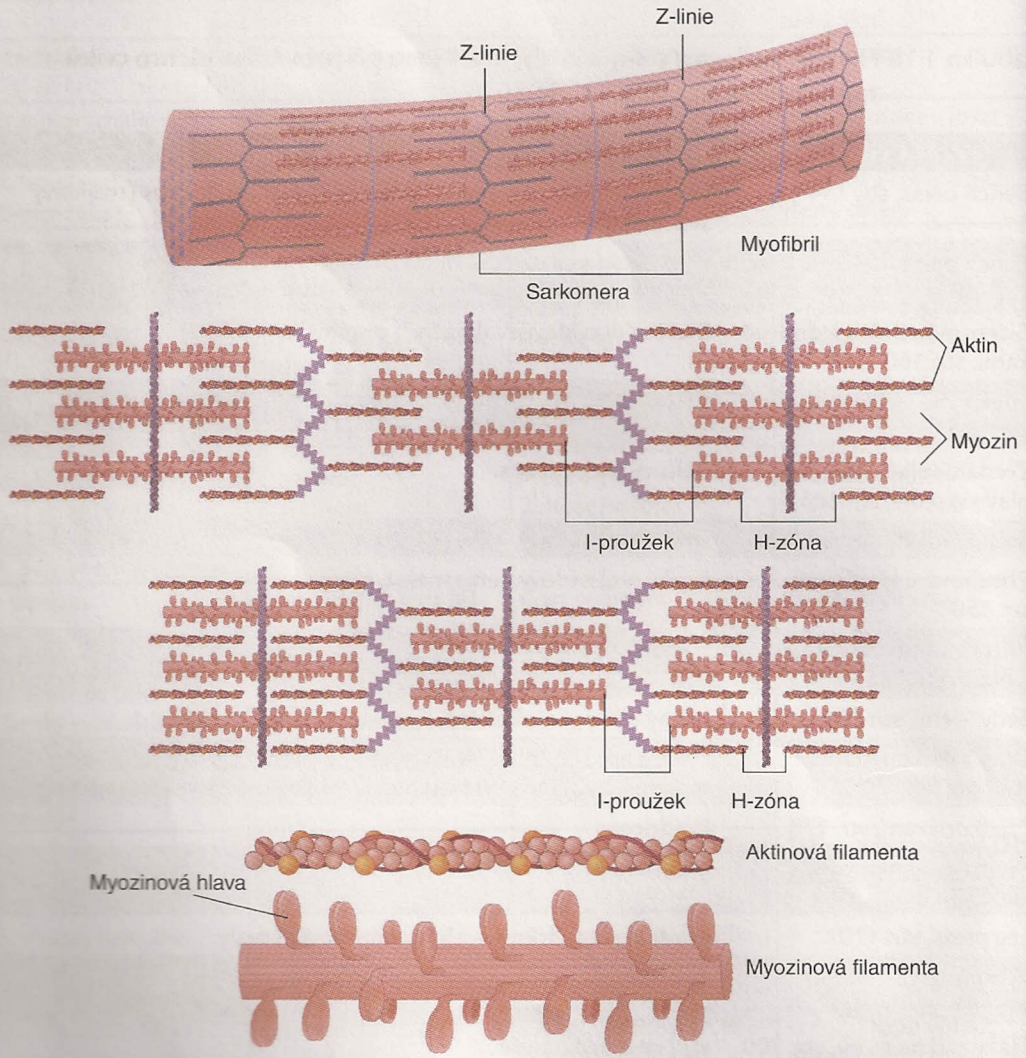
Když se sarkomera uvolní a vrátí se zpět do své původní délky, H-zóna a I-proužky opět získají svou původní velikost i vzhled (obrázek 1.5 a až d).

Nervové signály podílející se na svalové kontrakci směřují do těla alfa motorického neuronu nacházejícího se v míše. Tento neuron může být stimulován (nebo utlumen) centrálním nervovým systémem, senzorickými či reflexními neurony.

Když se sarkomera uvolní a vrátí se zpět do své původní délky, H-zóna a I-proužky opět získají svou původní velikost i vzhled (obrázek 1.5 a až d).

Je-li počet těchto stimulů (podnětů) pro vznik elektrického signálu (depolarizace) v těle motoneuronu dostatečný, šíří se potom tento signál (akční potenciál) podél axonu

(nervového výběžku) odvodného motorického neuronu směrem k neuromuskulárnímu spojení. Zde způsobuje uvolnění acetylcholinu (ACh) z nervového zakončení, a ACh následně putuje přes spojení k vnější membráně svalového vlákna (sarkolemě). Když ACh doputuje až k sarkolemě, napojí se na ACh receptory, čímž dojde k depolarizaci sarkolemy. Signál se dostane do svalového vlákna a rychle se šíří po celém jeho povrchu. Tento iontový proud uvede do pohybu kalciové ionty (Ca++) směrem ze sarkoplazmatického retikula do vnitřního moku svalového vlákna. Sarkoplazmatické retikulum je membránovitá struktura, která obaluje každé svalové vlákno a funguje jako sklad Ca++. Ionizovaný Ca++ se váže na troponinové molekuly. Tím dochází ke změně v uspořádání troponinu a tropomyozinu tak, že místa aktivace na aktinu jsou nekrytá a umožňují navázání myozi-



Obrázek 1.5 *Při svalové kontrakci se Z-linie stáhnou blíže k sobě, I-proužky se tak zkrátí, H-zóna zmenší, jen A-proužky si svou délku zachovávají. Naopak při natažení svalu se I-proužky prodlouží, H-zóna zvětší, jen A-proužky zůstávají stále beze změny.*

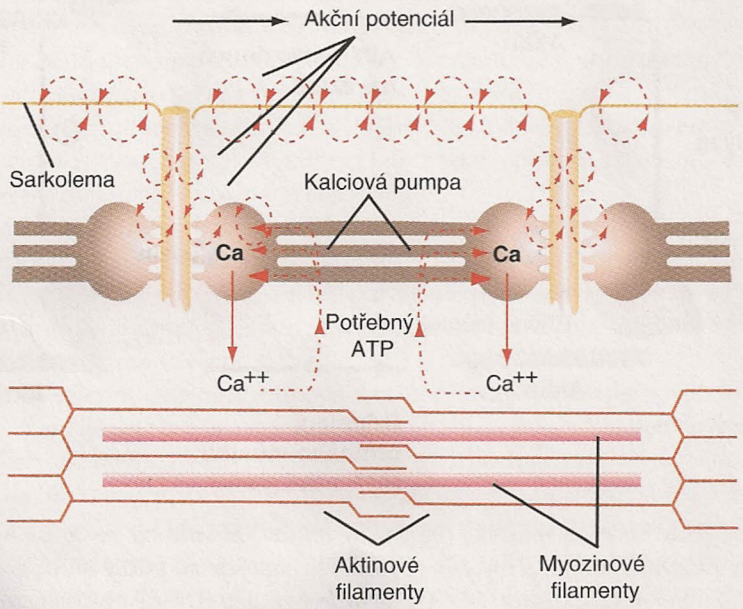
nových příčných můstků. Tato fáze se označuje jako excitační vazba kontrakčního procesu (obrázek 1.6).

Od doby, kdy Huxley přišel před 40 lety s teorií klouzavých filament, bylo učiněno mnoho objevů týkajících se vzájemného působení proteinových vláken ve svalu. Příčné můstky myozinových vláken mohou mít vliv na vlákna aktinová, ale jejich vzájemné působení nemůže způsobit svalové zkrácení.

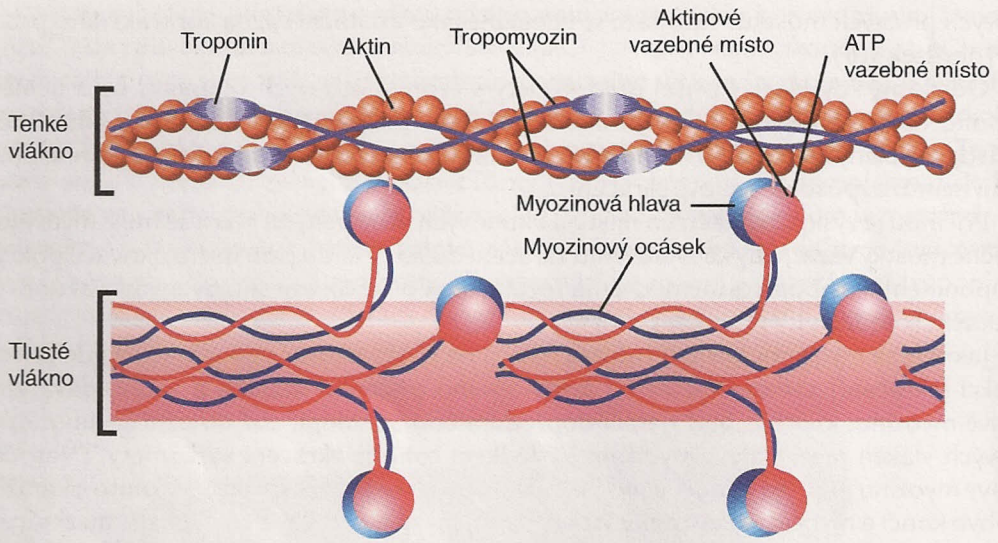
Příčinou je výskyt aktivačních míst na aktinových vláknech, na která se musí myozinové příčné můstky vázat, aby ke svalovému zkrácení došlo. V klidu jsou místa aktivace pokryta troponinem a tropomyozinem, dvěma regulačními bílkovinami spojovanými s aktinovým vláknem (obrázek 1.7).

Jakmile se myozinový příčný můstek napojí na místo aktivace na aktinu, dojde ke kontrakci (zkrácení) sarkomery. Vazba myozinového příčného můstku a aktinu dává vznik hlavě myozinu, která se buď natáčí dopředu, nebo se sklopí, což umožní zasunutí aktinových vláken mezi vlákna myozinu. Výsledkem toho je zkrácení sarkomery. (Natočení hlavy myozinu je často označováno jako uvolnění síly - power stroke). V tomto okamžiku pohyb končí a myozinový můstek zůstává napojen na aktin. Aby došlo k dalšímu zkrácení, musí se nejprve myozinový můstek odpojit od aktinu, natočit se dozadu a následně napojit na další místo aktivace na aktinovém vlákně - na místo, které je blíže Z-linii než místo, na které byl předtím napojen.

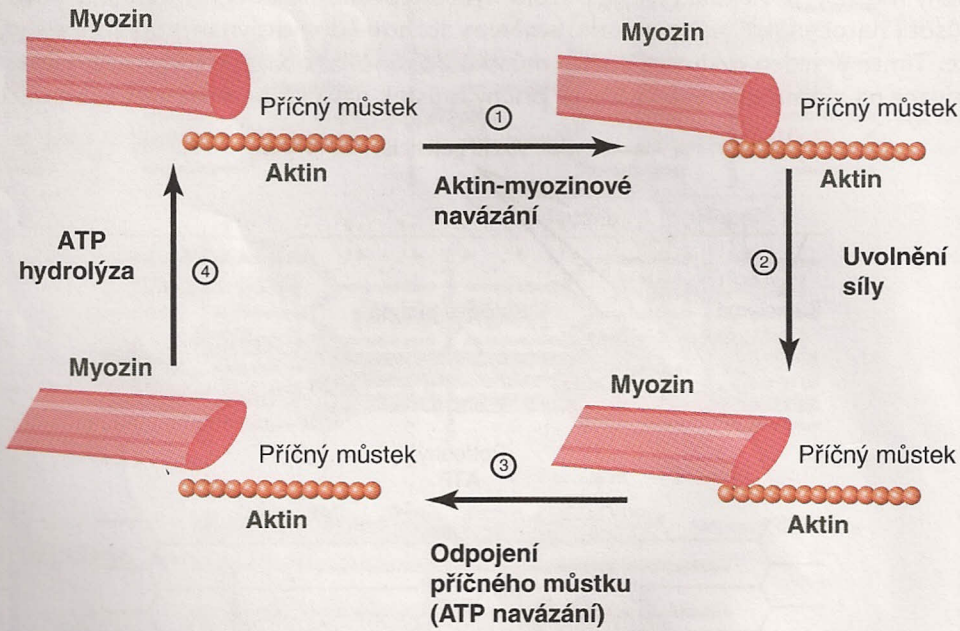
Odpojení od aktinu je způsobeno navázáním molekuly adenosintrifosfátu (ATP) na příčný můstek. Molekula ATP je potom hydrolyzována na adenosindifosfát (ADP), což způsobí natočení příčného můstku směrem dozadu (do narovnání) do své původní pozice. Tímto je jeden cyklus příčného můstku dokončen (obrázek 1.8). Jsou-li ještě místa aktivace na aktinu odkrytá, může se příčný můstek navázat na nové místo aktivace blíže



Obrázek 1.6 *Jakmile se signál pro kontrakci (akční potenciál) začne šířit po povrchu (sarkolemě) svalového vlákna, způsobí uvolnění Ca++ ze sarkoplazmatického retikula (SR). K uložení Ca++ zpět do SR je zapotřebí adenosintrifosfát (ATP).*



Obrázek 1.7 *V klidu jsou místa aktivace na aktinu pokryta troponinem a tropomyozinem. Jakmile dojde k navázání Ca++ na troponin, dají se troponin a tropomyozin do pohybu, místa aktivace na aktinu jsou tímto odkryta, a mohou se tudíž navázat na myozinové hlavy.*



Obrázek 1.8 *Cyklus příčného můstku. (1) Příčný můstek se váže na místo aktivace na aktinu. (2)Uvolnění síly zasouvá aktin mezi myozin. (3) ATP se napojuje na příčný můstek, který se posléze odpojuje od aktinového místa aktivace. (4) ATP je hydrolyzována ATPase v příčném můstku a můstek se natáčí směrem dozadu do své výchozí pozice. Jestliže je na aktinu stále ještě nějaké místo aktivace volné, můstek se na toto místo naváže a cyklus může pokračovat. (Pro detailnější schéma myozinových hlav viz obrázek 1.7.)*

Z-linii a sarkomera se může zkrátit ještě více. Jediným krokem tohoto cyklu, který vyžaduje energii, je narovnání myozinového příčného můstku. Energie se uvolňuje při rozkladu ATP enzymem zvaným myozinová adenosintrifosfatáza (ATPase), který se nachází na myozinovém příčném můstku. A tak pokud jde o buněčné činnosti, ATP je jediným zdrojem energie využívaným přímo pro svalové kontrakce.

Proces přerušení vazby s jedním místem aktivace a navázání na místo jiné se nazývá znovudobíjení. Tento cyklus (také označovaný jako teorie spirály) se opakuje tak dlouho, dokud není sarkomera zkrácena na maximum, není už žádný dostupný ATP nebo pokud nedošlo k uvolnění svalu.

K uvolnění svalu dochází, jakmile už impulz (nebo signál) z motorického neuronu není vysílán. Bez nepřetržitého toku signálů z motorického neuronu totiž nedochází k dalšímu uvolňování Ca++ a již uvolněný Ca++ je aktivně odčerpán zpět do sarkoplazmatického retikula. Pokud jde o cyklus příčných můstků, je k fungování tohoto odčerpávacího mechanizmu zapotřebí energie získaná rozkladem ATP. Proto je přítomnost ATP nutná nejen při kontrakci svalového vlákna, ale také při jeho uvolnění. Po přesunutí Ca++ zaujmou troponin i tropomyosin svou původní pozici na místech aktivace na aktinu. To znamená, že příčné můstky myozinového vlákna se nemají kam na aktin navázat. S uvolněním končí činnost příčných můstků ve svalu a sval zůstane ve zkrácené pozici, dokud není působením gravitace nebo nějaké vnější síly znovu natažen. Svaly jsou schopny aktivně se pouze zkracovat. Ve svalech neexistuje žádný mechanizmus, který by způsobil protažení daného svalu.

Stavba svalstva

Celková stavba svalstva má vliv na sílu i rychlost kontrakcí, a proto na ní velmi záleží. Čím více sarkomer je uspořádáno v sérii (a vytváří tak delší sval), tím je svalová kontrakce rychlejší. Každá sarkomera totiž rozhoduje o maximální rychlosti kontrakce. Celková rychlost svalové kontrakce se s počtem sarkomer zvyšuje, protože rychlosti sarkomer uspořádaných v jedné sérii se sčítají. Další výhodou takovéhoto uspořádání sarkomer je to, že mohou dosáhnout vysoké rychlosti kontrakce a přitom setrvávat téměř v takové délce, při které produkují maximální sílu.

Síla kontrakce se naopak zvyšuje s počtem sarkomer seřazených paralelně vedle sebe (vytvářejí mohutnější sval). Každá sarkomera má schopnost vyprodukovat maximální sílu. Jsou-li tedy sarkomery uspořádány paralelně, jejich schopnost silového výkonu se sčítá, čili zvyšuje. Sval je tedy chopen vyprodukovat obrovskou sílu, aniž by muselo dojít k nějaké významné změně v jeho délce.

Dalším důležitým aspektem celkové struktury svalstva je zpeřenost (obrázek 1.9). Zpeřenost svalu je vnitřní prostorové uspořádání svalových vláken uvnitř svalového bříška a jejich sklon vzhledem k úponové šlaše a rozhoduje o výsledném směru tahu svalu . Při větším úhlu může být v prostoru mezi začátkem a úponem svalu paralelně uspořádáno větší množství sarkomer, které způsobují zvýšení potenciální silové výkonnosti tohoto svalu. Zpeřenost má ale i jednu nevýhodu – zatímco se úhel zpeřenosti zvětšuje, výsledná síla, kterou daný sval vysílá do šlachy, slábne. Úhel zpeřenosti však musí být větší než 30 stupňů dříve, než se promarní další nárůst síly vzniklý vměstnáním většího počtu svalových vláken.