

Univerzita Palackého v Olomouci

Fakulta tělesné kultury

**Pohlavní odlišnosti v neuromuskulárních indikátorech rizika zranění  
kolenního kloubu v průběhu růstu a zranění v týmových sportech**

Diplomová práce

(magisterská)

Autor: Bc. Tereza Odehnalová, Fyzioterapie

Vedoucí práce: doc. PaedDr. Michal Lehnert, Dr.

Olomouc 2021

**Jméno a příjmení autora:** Tereza Odehnalová

**Název diplomové práce:** Pohlavní odlišnosti v neuromuskulárních indikátorech rizika zranění kolenního kloubu v průběhu růstu a zrání v týmových sportech

**Pracoviště:** Univerzita Palackého, Fakulta tělesné kultury, Katedra fyzioterapie

**Vedoucí diplomové práce:** doc. PaedDr. Michal Lehnert, Dr.

**Rok obhajoby diplomové práce:** 2021

**Abstrakt:**

Cílem práce bylo identifikovat potenciální pohlavní rozdíly v neuromuskulárních indikátorech rizika zranění kolenního kloubu u dospívajících v týmových sportech. Hodnoceni byli chlapci a dívky ve věku 13 let (soutěžní kategorie U14; dívky: n=31, chlapci: n=32) a 15 let (soutěžní kategorie U16; dívky: n=20, chlapci: n=33). Výzkumný soubor obsahoval hráče a hráčky basketbalu, florbalu, fotbalu a házené. Neuromuskulární kontrola kolenního kloubu byla hodnocena pomocí parametrů absolutní tuhost dolních končetin (ALS), relativní tuhost dolních končetin (RLS) a reaktivní silový index (RSI). Měření bylo provedeno ve dvou po sobě jdoucích letech přibližně po 2–3 utkáních na počátku soutěžního období. Výsledky měření ukázaly přítomnost pohlavních rozdílů ALS u skupiny U14 ( $p = 0,022$ ,  $\eta^2 = 0,084$ ) i u skupiny U16 ( $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,224$ ). V případě RLS byly zjištěny pohlavní rozdíly u skupiny U14 ( $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,195$ ) i u skupiny U16 ( $p = 0,008$ ,  $\eta^2 = 0,128$ ). Při porovnání hodnot RSI nebyly zjištěny pohlavní rozdíly u skupiny U14 ( $p = 0,446$ ,  $\eta^2 = 0,013$ ), zatímco rozdíly byly zjištěny mezi chlapci a dívkami u skupiny U16 ( $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,429$ ). Interakce věku a pohlaví byla významná pouze v případě ALS u skupiny U14 ( $p = 0,030$ ,  $\eta^2 = 0,076$ ).

**Klíčová slova:** cyklus protažení a zkrácení svalu, kolenní kloub, poranění, reaktivní silový index, růst, tuhost dolních končetin, zrání

Diplomová práce byla zpracována s podporou vědeckého grantu Grantové agentury ČR "Kumulativní efekt únavy na neuromuskulární řízení kolene a riziko zranění u mladých sportovců během růstu a zrání" (č. 16-13750S).

Souhlasím s půjčováním diplomové práce v rámci knihovních služeb.

**Autor's first name and surname:** Tereza Odehnalová

**Title of the master thesis:** Gender differences in neuromuscular indicators of the risk of knee injury during growth and maturation in team sports

**Department:** Palacky University, Faculty of Physical Culture, Department of Physiotherapy

**Supervisor:** doc. PaedDr. Michal Lehnert, Dr.

**The year of presentation:** 2021

**Abstract:**

The aim of the thesis was to identify potential gender differences in neuromuscular indicators of the risk of knee injury in adolescents in team sports. Boys and girls aged 13 years (competition category U14; girls:  $n = 31$ , boys:  $n = 32$ ) and 15 years (competition category U16; girls:  $n = 20$ , boys:  $n = 33$ ) were evaluated. The research set included players of basketball, floorball, football and handball. Neuromuscular control of the knee joint was evaluated using the parameters absolute leg stiffness (ALS), relative leg stiffness (RLS) and reactive strength index (RSI). The measurement was performed in two consecutive years after approximately 2-3 matches at the beginning of the competition period. The measurement results showed the presence of gender differences in ALS in the U14 group ( $p = 0.022$ ,  $\eta^2 = 0.084$ ) and in the U16 group ( $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.224$ ). In the case of RLS, gender differences were found in the U14 group ( $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.195$ ) and in the U16 group ( $p = 0.008$ ,  $\eta^2 = 0.128$ ). When comparing RSI values, no gender differences were found in the U14 group ( $p = 0.446$ ,  $\eta^2 = 0.013$ ), while differences were found between boys and girls in the U16 group ( $p < 0.001$ ,  $\eta^2 = 0.429$ ). The interaction of age and gender was significant only in the case of ALS in the U14 group ( $p = 0.030$ ,  $\eta^2 = 0.076$ ).

**Key words:** growth, injury, knee joint, maturation, leg stiffness, reactive strength index stretch-shortening cycle

The diploma thesis was supported by the research grant of the Czech Science Foundation "Accumulated effects of fatigue on neuromuscular control of the knee and injury risk in youth athletes during growth and maturation" (No. 16-13750S).

I agree with lending of the thesis within the library service.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. PaedDr. Michala Lehnerta, Dr., uvedla všechny použité literární a odborné zdroje a dodržovala zásady vědecké etiky.

V Olomouci dne 7. 4. 2021

.....

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce Doc. PaedDr. Michalu Lehnertovi, Dr. za vstřícnost a podnětné rady při psaní diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat všem účastníkům, kteří se podíleli na měření.

## **OBSAH**

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED POZNATKŮ .....</b>	<b>11</b>
2.1	Epidemiologie poranění kolenního kloubu .....	11
2.1.1	Poranění kolenního kloubu u sportující mládeže .....	12
2.1.2	Mechanismy a typy poranění kolenního kloubu .....	13
2.1.3	Poranění kolenního kloubu během utkání a tréninku.....	14
2.2	Rizikové faktory poranění kolenního kloubu .....	16
2.3	Vliv růstu a zrání na poranění kolenního kloubu .....	23
2.4	Vliv růstu a zrání na neuromuskulární kontrolu kolenního kloubu.....	28
2.4.1	Kineziologické aspekty .....	28
2.4.2	Propriocepce.....	29
2.4.3	Neuromuskulární koordinace .....	30
2.4.4	Cyklus protažení a zkrácení svalu.....	32
2.4.5	Strukturální adaptace.....	32
2.4.6	Neuromuskulární adaptace.....	36
2.5	Hodnocení neuromuskulární kontroly kolenního kloubu.....	39
2.5.1	Tuhost dolních končetin.....	40
2.5.2	Reaktivní silový index.....	42
<b>3</b>	<b>SHRNUTÍ SYNTÉZY POZNATKŮ .....</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>CÍLE .....</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>METODIKA .....</b>	<b>46</b>
5.1	Výzkumný soubor .....	46
5.2	Harmonogram měření.....	47
5.3	Metodika sběru dat .....	47
5.4	Postup měření .....	48
5.5	Statistická analýza dat .....	49

<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY</b> .....	<b>51</b>
6.1	Absolutní tuhost dolních končetin.....	51
6.2	Relativní tuhost dolních končetin .....	51
6.3	Reaktivní silový index .....	52
<b>7</b>	<b>DISKUZE</b> .....	<b>53</b>
7.1	Tuhost dolních končetin .....	54
7.2	Reaktivní silový index.....	58
7.3	Limity studie .....	61
7.4	Odpovědi na výzkumné otázky .....	61
<b>8</b>	<b>ZÁVĚRY</b> .....	<b>63</b>
<b>9</b>	<b>SOUHRN</b> .....	<b>64</b>
<b>10</b>	<b>SUMMARY</b> .....	<b>65</b>
<b>11</b>	<b>REFERENČNÍ SEZNAM</b> .....	<b>66</b>
<b>12</b>	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>96</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ACL	přední zkřížený vaz, anterior cruciate ligament
CSA	průřezová plocha svalu, cross sectional area
DKK	dolní končetiny
EMD	elektromechanické zpoždění svalu, electromechanical delay
kg	kilogram
LS	tuhost dolních končetin, leg stiffness
m	metr
m.	musculus
mm.	musculi
ms	milisekunda
MTU	svalově-šlachová jednotka, muscle tendon unit
PCSA	fyziologická průřezová plocha svalu, physiological cross sectional area
PHV	vrchol růstového spurtu, peak high velocity
RFD	silový gradient, rate of force development
RLS	relativní tuhost dolních končetin, relative leg stiffness
RSI	reaktivní silový index, reactive strength index
s	sekunda
SSC	cyklus protažení a zkrácení svalu, stretch-shortening cycle



# 1 ÚVOD

K poraněním kolenního kloubu v týmových sportech dochází ve všech věkových kategoriích a na všech výkonnostních úrovních, přičemž v poslední době počty poranění kolenního kloubu narůstají (Kaeding et al., 2017; Musahl & Karlsson, 2019). Od sportovců je vyžadován intenzivnější trénink a jsou neustále zvyšovány nároky na úroveň výkonnosti, což vede ke zvýšení frekvence zranění (Majewski et al., 2006). Mezi sporty s nejvyšší incidencí poranění kolenního kloubu je nejčastěji řazeno sjezdové lyžování a poté zejména fotbal a další míčové, převážně kontaktní sporty, vyžadující rychlé změny pohybu (Adirim & Cheng, 2003). Kolenní kloub bývá označován nejčastěji poraněným kloubem u mladých sportovců. Jedná se o komplexní strukturu, která je během sportovních aktivit zatížena působením sil z více směrů. Poranění kolenního kloubu mnohdy vyžadují chirurgický zákrok nebo dlouhotrvající rehabilitaci pro dosažení původní funkčnosti kloubu, s čímž jsou spojeny vysoké ekonomické náklady a celkové zatížení zdravotní péče (Louw et al., 2008).

Z dosavadních poznatků vyplývá, že poranění ACL jsou způsobena zejména narušením dynamických stabilizačních mechanismů (Hughes & Watkins, 2006). Deficit v oblasti neuromuskulární kontroly způsobuje nadměrnou zátěž pasivních stabilizačních struktur. Následně může dojít k překročení mezních hodnot tahu těchto struktur, což vede k jejich mechanickému selhání. Tato zjištění navyšují význam ovlivňování modifikovatelných neuromuskulárních faktorů (Powell & Barber-Foss, 2000). Hewett (2000) uvádí, že ženy, které se účastní sportovních aktivit zahrnující výskoky, dopady a rychlé změny pohybu, mají 4–6krát více úrazů kolenního kloubu v porovnání s muži věnujícím se stejným aktivitám. Velké množství těchto poranění zahrnuje poranění ACL a dochází k nim bezkontaktními mechanismy. U sportujících žen se častěji projevuje nerovnováha v síle, timingu a aktivaci svalů dolních končetin, které vedou k narušení neuromuskulární koordinace kolenního kloubu. Větší náchylnost ženského pohlaví k poranění kolenního kloubu je zřejmě multifaktoriální (Henry & Kaeding, 2001). Současně byl zjištěn mnohonásobně vyšší výskyt poranění u dívek s významným poklesem neuromuskulární kontroly v průběhu růstu a zrání (Radnor et al., 2018).

Neuromuskulární kontrolu kolenního kloubu lze hodnotit mnoha způsoby. Jednou z možností je hodnocení neuromuskulární kontroly prostřednictvím vertikálních skoků, které mimo jiné hodnotí cyklus protažení a zkrácení svalu (Ramirez-Campillo et al., 2018). Současná literatura řadí k indikátorům neuromuskulárního řízení absolutní tuhost

dolních končetin (ALS), relativní tuhost dolních končetin (RLS) a reaktivní silový index (RSI). Pomocí těchto parametrů je možné identifikovat změny neuromuskulárního řízení, které by mohly ovlivnit riziko výskytu poranění ACL (Suchomel et al., 2015). Sledování výše zmíněných neuromuskulárních indikátorů rizika poranění kolenního kloubu lze využít k získání informací o stavu hráče v průběhu utkání, soutěžního období a k zaznamenávání změn v průběhu růstu a zrání. Problematikou neuromuskulárního řízení u dospívajících v průběhu růstu a zrání se doposud zabývalo omezené množství studií. Záměrem této práce je získání nových poznatků v této oblasti.

## 2 PŘEHLED POZNATKŮ

### 2.1 Epidemiologie poranění kolenního kloubu

Vyhledání lékařské pomoci z důvodu akutního poranění kolenního kloubu je poměrně běžnou záležitostí. Problematika poranění kolenního kloubu je však nesmírně rozsáhlá, proto publikované epidemiologické studie zabývající se touto tematikou mají ve většině případů již určitá zaměření. Převážně se jedná o studie dělící široké spektrum pacientů podle konkrétního léčebného zařízení, ve kterém byli přijati, podle specifické diagnózy, věku a pohlaví, případně selektující určitou skupinu, jako je například sportující populace (Yawn et al., 2000). Přesto se však některé studie, zabývající se epidemiologickými daty, snaží toto rozsáhlé spektrum obsáhnout.

Peat et al. (2014) prezentuje data poranění měkkých struktur kolenního kloubu u populace jižního Švédska z let 2004–2012. Uvádí roční incidenci 766 u mužů a 676 u žen na 100 000 obyvatel. Při porovnání roční incidence s dalšími studiemi dochází Ferry et al. (2014) k podobným závěrům jako Peat et al. (2014). Yawn et al. (2000) uvádí 278 poranění na 100 000 obyvatel, data však vychází z užšího výběru probandů. Naopak studie z Finska a Dánska udávají roční incidenci 1080 a 1160 na 100 000 obyvatel, zahrnují ale i mimo poranění měkkých struktur kolenního kloubu také zlomeniny (Kannus & Järvinen, 1989; Nielsen & Yde, 1991).

Maximální míru výskytu poranění uvádí Peat et al. (2014) u mužů i žen mezi 15 a 19 lety věku. U mužů po tomto období dochází k postupnému snížení výskytu poranění až po dosažení plató fáze ve věku 65 let, naopak u žen dochází po dosažení nejvyšších hodnot a poklesu k opětovnému nárůstu četnosti v období 35–49 let věku. Od 50 let věku je dále incidence poranění vyšší u žen než u mužů. Ferry et al. (2014) prezentuje maximální míru výskytu v širším časovém úseku a to mezi 15 a 24 lety věku, podobně jako Gage et al. (2012), Yawn et al. (2000) u mužů dokonce až do věku 29 let.

Nejčastěji dochází k poranění kolenního kloubu během sportu a rekreace, podle Gage et al. (2012) až ve 49 % případů, po období středního věku pak klesají počty úrazů při sportu a přibývají úrazy spojené s pády, které nebyly zapříčiněny sportovní aktivitou. Během sportovních aktivit dochází ve větší míře k poranění mužů (61 %). Tato skutečnost je vysvětlována zejména větší mírou zájmu mužů o sportovní aktivity po období adolescence. Stejně tak zde může hrát roli volba sportovní aktivity, kde je předpokládána

vyšší míra účasti mužů při sportech s vyšším rizikem poranění kolenního kloubu (Yawn et al., 2000).

Riziko poranění kolenního kloubu v týmových sportech se vyskytuje ve všech věkových kategoriích a výkonnostních úrovních. V týmových sportech dochází v poslední době k nárůstu počtu zranění kolenního kloubu (Kaeding et al., 2017; Musahl & Karlsson, 2019). Na sportovce jsou kladeny vyšší nároky než v minulosti, vyžadován je intenzivnější trénink pro dosažení vyšší úrovně výkonnosti, což vede ke zvýšení frekvence zranění (Majewski et al., 2006). Mezi sporty, při kterých dochází k poranění kolenního kloubu, je nejčastěji řazeno sjezdové lyžování, u kterého počet zranění hlavně v posledních letech roste (Tarka et al., 2019). Dále je to zejména fotbal a další míčové, převážně kontaktní sporty, vyžadující rychlé změny pohybu (Adirim & Cheng, 2003).

### **2.1.1 Poranění kolenního kloubu u sportující mládeže**

Sportovní úrazy u adolescentů jsou problémem veřejného zdraví, jelikož mají nepříznivý vliv na zdraví mladých sportovců. Celosvětově dochází ke zvyšování konkurenceschopnosti, která od sportovců vyžaduje absolvování delších a náročnějších tréninkových programů. Vyšší počet tréninkových hodin, ke kterým je mnohdy nutno připočítat vyšší frekvenci utkání, se odráží ve zvýšení rizika traumatických poranění pohybového aparátu (Yang et al., 2005). Kolenní kloub bývá označován nejčastěji poraněným kloubem u mladých sportovců. Jedná se o komplexní, složitou strukturu, která je během sportovních aktivit zatížena působením sil z více směrů. Tato skutečnost může vysvětlovat, proč jsou úrazy kolenního kloubu mnohdy závažnější než poranění v jiných tělesných regionech. Tyto úrazy často vyžadují chirurgický zákrok nebo dlouho trvající rehabilitaci pro dosažení původní funkčnosti kloubu, s čímž jsou spojeny vysoké ekonomické náklady a celkové zatížení zdravotní péče (Louw et al., 2008). Kujala et al. (1995) ve studii zkoumající sportovce z více sportovních odvětví uvádí, že poranění kolenního kloubu byla nejčastější příčinou ukončení sportovní činnosti.

Současně je u poranění kolenního kloubu zvýšené riziko včasného rozvoje gonartrózy, která následně může bránit účasti při sportovních i běžných fyzických aktivitách a vést k invaliditě. Z tohoto důvodu by tato poranění neměla být podceňována (Poulsen et al., 2019). Základem managementu poranění kolenního kloubu u mladých sportovců by měly být zejména preventivní tréninkové programy zaměřené na zlepšení

neuromuskulární kontroly a techniky, díky kterým by mohlo dojít k výraznému snížení úrazů kolenního kloubu u sportující mládeže (Emery, 2005).

### **2.1.2 Mechanismy a typy poranění kolenního kloubu**

K poranění kolenního kloubu dochází u adolescentů zejména při týmových sportech, které kladou vysoké nároky na dynamickou stabilitu dolních končetin (DKK). Mezi sporty s nejvyšší incidencí poranění kolenního kloubu jsou řazeny zejména týmové sporty jako je například fotbal, basketbal a házená (Lohmander et al., 2007). Součástí těchto sportů jsou změny směru, změny rychlosti, výskoky, kopy, klíčky a rotační pohyby, při kterých působí na kolenní kloub vysoké externí síly, a které mohou přispívat ke vzniku poranění kolenního kloubu. Při těchto pohybech sportovci využívají tzv. cyklus protažení a zkrácení svalu (stretch-shortening cycle, SSC). Jedná se o střídající se kombinaci rychlé excentrické a následně koncentrické kontrakce svalů. SSC hraje významnou roli především při pohybech s vysokou intenzitou. K jeho uplatnění však dochází i při zajištění stability kolenního kloubu a v prevenci poranění (De Ste Croix et al., 2017).

Mezi nejčastěji poraněné struktury kolenního kloubu v týmových sportech patří přední zkřížený vaz (ACL). Ve většině případů však nedochází k jeho izolovanému poranění, ale postiženy bývají i kolaterální vazy a zadní zkřížený vaz kolenního kloubu spolu s menisky. Během flexe kolenního kloubu jsou k poranění nejvíce náchylná ligamenta a menisky, při extenzi pak povrchy kloubních ploch a ligamenta (Kapandji, 2011). Poranění ACL je možné rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. Míra bezkontaktních poranění ACL se pohybuje mezi 70–84 % u mužů i žen. Přestože například Arendt a Dick (1995) dochází k závěru, že poměr kontaktních a bezkontaktních poranění je podobný, většina studií se přiklání k převaze bezkontaktních mechanismů úrazu (Faunø & Wulff Jakobsen, 2006).

Ke zranění ACL dochází zejména při změnách pohybu, které jsou kombinovány se zrychlením, zpomalením, výskoky, doskoky a otočkami, často při plné extenzi kolenního kloubu (Boden et al., 2000). Další popsané mechanismy úrazu zahrnují hyperextenzi a hyperflexi kolenního kloubu. Tyto situace zahrnují valgózní i varózní postavení kolenního kloubu, rotační a translační pohyby. Samostatně tato postavení a pohyby nemusí způsobit přílišné zatížení ACL, dojde-li však k jejich kombinaci spolu s působením větší síly, riziko poranění ACL se zvyšuje. Typickým úrazovým

mechanismem je působení sil do valgozity kolenního kloubu spojené s vnitřní rotací a anteriorní translací tibie. I zde se autoři ve většině případů shodují, že se jedná o kombinaci více faktorů, například samotným působením sil do valgozity dojde nejprve k poranění mediálního kolaterálního vazy před poraněním ACL. Riziko vzniku poranění ACL zvyšuje dopředu působící translační síla při úhlu 20–30° flexe kolenního kloubu (Olsen et al., 2004; Yu & Garrett, 2007). Působení této síly je vyvoláno aktivací m. quadriceps femoris (DeMorat et al., 2004).

### **2.1.3 Poranění kolenního kloubu během utkání a tréninku**

Během fotbalového utkání i tréninku dochází nejčastěji k úrazům na dolních končetinách, dostupné studie uvádějí hodnoty v rozmezí 80–85 %. Jedná se převážně o natažení svalů zadní strany stehů, poranění vazů kolenního kloubu a distorze hlezna. Nejvíce postiženou částí těla je pak dle studie Kakavelakis et al. (2003) kolenní kloub (36 %) . K vyššímu riziku poranění dochází až ke konci obou poločasů, kdy dochází k sumaci vysoké intenzity, délky zatížení a nástupu únavy, která může vyvolat biomechanické změny a zhoršit stabilitu jednotlivých segmentů (Ekstrand et al., 2011). Dříve provedené studie naznačují, že dospívající elitní fotbalisté jsou náchylnější ke zraněním. K poranění u mladých fotbalistů dochází během utkání 5× častěji než během tréninku (Ergün et al., 2013). Většina prospektivních studií je však zaměřena převážně na dospělé fotbalisty, což ztěžuje porovnání mezi oběma skupinami a současně mohou být výsledky u mládeže značně zkreslené.

Pfiffmann et al. (2016) analyzuje rozdíly v incidenci poranění dospělých a dospívajících elitních fotbalistů. U dospívajících fotbalistů uvádí incidenci 2–19,4 poranění na 1000 odehraných hodin, s rozdělením 9,5–48,7 během utkání a 3,7–11,14 během tréninků. U dospělých fotbalistů pak celkově 2,48–9,4 na 1000 odehraných hodin, přičemž k 8,7–65,9 dochází během utkání a k 1,37–5,8 v průběhu tréninku. Z výsledků analyzovaných studií vyplývá, že u dospívajících fotbalistů je riziko zranění vyšší než u dospělých. U dospívajících i dospělých dochází k větší míře poranění během utkání než během tréninku. Významný rozdíl je však mezi dospělými a dospívajícími v počtu poranění vzniklých během tréninku, kdy je u dospívajících fotbalistů incidence poranění až dvakrát vyšší. Tento rozdíl může být způsoben odlišnou skladbou tréninků obou skupin, popřípadě nižší fyzickou a technickou zdatností dospívajících, kterým se ale tréninkové dávky v průběhu dospívání zvyšují. Dospívající hráči jsou také nuceni často spojit trénink se vzděláváním, a i když u některých elitních hráčů vzdělávání probíhá

podle individuálního plánu, dochází ke snížení časových možností pro kompenzaci a optimalizaci schopností a dovedností (Pfirrmann et al., 2016).

Incidenci poranění hráčů fotbalu lze porovnat s dalšími týmovými sporty, ve kterých je incidence poranění kolenního kloubu vysoká. Leppänen et al. (2016) se zaměřuje na riziko poranění ACL u hráček basketbalu a florbalu ve věku 12–21 let. Uvádí incidenci poranění 3,4 na 1000 odehraných hodin během utkání u basketbalistek a 4,1 u florbalistek. Během tréninků udává incidenci 0,1 u obou zkoumaných skupin.

Z velkého množství studií zaměřující se na frekvenci poranění kolenního kloubu během ročního tréninkového cyklu vyplývá, že k výskytu zranění nedochází rovnoměrně v průběhu roku. Některé studie uvádí dva vrcholy četnosti výskytu poranění. První vrchol se vyskytuje na začátku soutěžního období. Zde může hrát roli přechod z přípravného do soutěžního období a také se zde může odrážet vliv intenzivní fyzické přípravy před začátkem závodního období. Druhý vrchol se nachází ke konci soutěžního období. Utkání v závěru soutěžního období jsou často klíčová pro postup nebo konečné pořadí v dlouhodobých soutěžích a na sportovce tak působí mnohé stresové faktory, které ovlivňují nejen výkon, ale i četnost poranění (Carling et al., 2010; Grassi et al., 2019).

Zásadní roli zde hraje i kumulace únavy v průběhu soutěžního období. Anderson et al. (2019) poukazuje na to, že poranění kolenního kloubu, zvláště pak ACL, je mnohdy výsledkem déle trvající únavy. Ve studii zaměřující se na hráče lakrosu, basketbalu a fotbalu uvádí, že na začátku soutěžního období dochází k poranění zejména v první půlce utkání, v závěru soutěžního období je ale frekvence poranění kolenního kloubu vyšší ve druhé půlce utkání.

Faktorem významně snižujícím riziko poranění při utkání i tréninku je kvalitní rozcvičení (Rumpf & Cronin, 2012). Z tohoto důvodu by měl být kladen důraz právě na kvalitu tréninkového procesu, a to jak z hlediska na rozvoje silových, vytrvalostních i koordinačních schopností, tak z hlediska prevence (Wrigley et al., 2012).

## **2.2 Rizikové faktory poranění kolenního kloubu**

Rizikové faktory poranění kolenního kloubu lze rozdělit na vnější a vnitřní. Mezi vnější faktory jsou řazeny enviromentální podmínky, druh povrchu a obuvi a další specifické faktory, které záleží na druhu vykonávané sportovní aktivity. Vzhledem k zaměření práce budou dále popsány zejména vnitřní rizikové faktory, a to anatomické, hormonální a neuromuskulární (Griffin et al., 2006).

### **2.2.1 Anatomické rizikové faktory**

Za rizikový faktor poranění kolenního kloubu je považována generalizovaná kloubní laxita a zvýšená laxita kolenního kloubu, přičemž zvýšená laxita se vyskytuje ve větší míře u žen (Junge et al., 2019; Pacey et al., 2010). Ergün et al. (2004) uvádí, že zvýšená laxita kolenního kloubu významně ovlivňuje dynamiku dolní končetiny a může způsobit větší náchylnost jedince k ruptuře ligament. Söderman et al. (2001) dochází k závěru, že hráčky fotbalu se zvýšenou kloubní laxitou mají zvýšené riziko poranění dolních končetin. Řada studií se zabývá konkrétně rizikem poranění ACL a generalizovanou kloubní laxitou. Podle některých je při generalizované kloubní laxitě riziko poranění ACL až 2,8× vyšší (Uhorchak et al., 2003). Vyšší riziko bezkontaktního poranění ACL bylo také pozorováno u žen se zvýšenou předozadní laxitou kolenního kloubu (Ramesh et al., 2005). Laxita kolenního kloubu je spojena se zvýšením valgosity a varozity, vnitřní a zevní rotace kolenního kloubu. V důsledku zvětšení rozsahu těchto pohybů může dojít k poranění typickými úrazovými mechanismy (Ford et al., 2003).

Za další anatomický rizikový faktor poranění kolenního kloubu, konkrétně ACL, je některými autory považována šířka fossa intercondylaris femoris. Autoři uvádí, že její snížená šířka způsobuje zvýšenou iritaci ACL během zevní rotace a abdukce tibie, díky čemuž je riziko poranění vyšší (Hoteya et al., 2011; Souryal & Freeman, 1993). Naopak Lombardo et al. (2005), jehož studie zahrnuje 615 profesionálních hráčů basketbalu, dochází k závěru, že šířka fossa intercondylaris femoris není vhodným prediktorem rizika poranění ACL.

Dalším potenciálním rizikovým faktorem je vyšší Q-úhel. Q-úhel se nachází mezi dvěma přímkami, jedna z nich je tvořena spojnicí středu patelly a spina iliaca anterior superior, druhá pak spojnicí středu patelly a tuberositas tibiae. Vlivem zvýšeného Q-úhlu může být kolenní kloub vystaven vyššímu riziku valgózního zatížení při statických i dynamických situacích (Mizuno et al., 2001). Ve studii Shambaugh et al. (1991) bylo



zjištěno, že basketbalistky s poraněním kolenního kloubu měly průměrně větší Q–úhel než nezraněné hráčky. V jiných studiích však vyšší Q–úhel není s rizikem poranění kolenního kloubu spojován (Mohamed et al., 2012). Řada recentních studií se zabývá především Q–úhlem ve spojitosti s patelofemorálním syndromem (Neal et al., 2019). Vztah Q–úhlu a rizika poranění kolenního kloubu by tak měl být předmětem dalšího zkoumání (Heiderscheit et al., 2000; Söderman et al., 2001).

Při hodnocení anatomických rizikových faktorů však nelze pozornost zaměřit izolovaně na kolenní kloub, ale je třeba uvažovat v biomechanických souvislostech. Na mechaniku kolenního kloubu má značný vliv postavení pánve, kyčelního i hlezenního kloubu. Je-li pánev v antevertzi, dochází ke změně pozice kyčelního kloubu směrem do vnitřní rotace a flexe, současně se mění postavení i funkce hamstringů a gluteálních svalů. Hamstringy se podílejí na stabilizaci kolenního kloubu, zabraňují jeho rekurvaci a anteriornímu posunu tibie. Gluteální svaly stabilizují postavení kyčelního kloubu, dojde-li k narušení jejich funkce, zvyšuje se riziko poranění kolenního kloubu valgózním úrazovým mechanismem. Antevertze pánve je rovněž spojena se zvýšenou antevertzí krčku femuru. Zvětšení tohoto úhlu může také způsobit neoptimální zapojení m. gluteus medius a zhoršení stability kyčelního kloubu. Hewett et al. (2007) uvádí, že tyto změny se u jedinců s poraněním kolenního kloubu vyskytují významně častěji než u zdravých jedinců. Je tedy třeba si uvědomit, že postavení pánve je klíčové pro kinetiku i kinematiku dolní končetiny (Zazulak et al., 2007).

Podle výsledků některých studií je mezi rizikové faktory řazen i pokles os naviculare a zvýšené pronační postavení subtalárního kloubu (Allen & Glasoe, 2000). Mnohé studie zabývající se touto problematikou však dochází k odlišným výsledkům. Například Jenkins et al. (2007) zkoumající spojitost postavení subtalárního kloubu, os naviculare a rizika poranění ACL u mladých hráčů a hráček basketbalu a fotbalu dochází k závěru, že v naměřených hodnotách nebyly rozdíly u zdravých ani zraněných hráčů a hráček. Mitchell et al. (2008) v teoretickém podkladu své studie uvádí, že pronačním postavením subtalárního kloubu kompenzačně dochází k nárůstu vnitřní rotace tibie při extenzi kolene. Prolongovaná vnitřní rotace tibie může vystavit ACL vyššímu stresu a navyšovat tak riziko jeho poranění. Vnitřně rotační postavení tibie má vliv i na další struktury, působí dále na postavení femuru, jehož vnitřní rotace a valgózní postavení kolenního kloubu také zvyšují riziko poranění ACL (Beckett et al., 1992; Powers, 2003).

Mezi anatomické rizikové faktory je některými autory zařazován vyšší index tělesné hmotnosti, a to zejména u dospívajících hráček fotbalu (Hewett et al., 2017). V jiných studiích však autoři dochází k protichůdným výsledkům a nenachází korelaci mezi indexem tělesné hmotnosti a rizikem poranění kolenního kloubu u dospívajících sportovců, proto tomuto faktoru nelze přikládat příliš velkou váhu (Ostenberg & Roos, 2000).

### **2.2.2 Hormonální rizikové faktory**

Předpokládá se, že hormonální rizikové faktory hrají určitou roli v bezkontaktním poranění ACL. Převážně se jedná o vyšší riziko poranění ACL u mladých sportovkyň vlivem působení pohlavních hormonů. Dostupné studie se zaměřují převážně na riziko poranění během jednotlivých fází menstruačního cyklu, hodnotí hladiny estradiolu, progesteronu a relaxinu a také vliv užívání hormonální antikoncepce (Arendt et al., 2002; Hewett, 2000). Předpokládá se, že hormonální výkyvy v průběhu menstruačního cyklu zvyšují laxitu vazů, což zvyšuje riziko poranění ACL (Herzberg et al., 2017). Studie zaměřené na vliv užívání hormonální antikoncepce naznačují snížení laxity ligament, čímž dochází ke zlepšení dynamické stability kolenního kloubu a tím k potenciálnímu snížení rizika poranění ACL (Gray et al., 2016; Rahr-Wagner et al., 2014).

### **2.2.3 Neuromuskulární rizikové faktory**

Neuromuskulární kontrola kolenního kloubu je zajišťována prostřednictvím dynamických stabilizátorů tohoto kloubu, které reagují na senzorické podněty. Jedná se především o souhrn svalových a nervosvalových akcí m. quadriceps femoris a hamstringů. Neuromuskulární rizikové faktory lze na rozdíl od anatomických a hormonálních faktorů lépe ovlivnit (Ahmad et al., 2006). Mimo dynamických stabilizátorů je stabilita kolenního kloubu zajišťována i pasivními, nekontraktilními složkami. V dostupné literatuře však autoři dochází k závěru, že poranění ACL jsou způsobena zejména narušením dynamických stabilizačních mechanismů, což dále navyšuje význam ovlivňování těchto modifikovatelných faktorů (Hughes & Watkins, 2006). Deficit v oblasti neuromuskulární kontroly způsobuje nadměrnou zátěž pasivních stabilizačních struktur. Následně může dojít k překročení mezních hodnot tahu těchto struktur, což vede k jejich mechanickému selhání. Nelze jednoznačně říci, že přítomnost nedostatků v neuromuskulárním řízení je příčinným faktorem poranění, je však nutno poznamenat, že k poranění vazů kolenního kloubu dochází častěji, nejsou-li aktivní

svalové složky schopny zajistit adekvátní rozložení sil na kolenní kloub v průběhu pohybu (Powell & Barber-Foss, 2000).

Součástí komplexních pohybů ve fotbale jsou často náhlá zpomalení z velké rychlosti. K tomu je třeba značné excentrické síly extenzorů kolenního kloubu. Pokud není tato síla adekvátně tlumena silou hamstringů, tak se zvyšuje riziko bezkontaktního poranění vazů kolenního kloubu. Pro dynamickou stabilizaci kolenního kloubu je totiž důležitá rovnováha mezi poměrem sil extenzorů a flexorů tohoto kloubu. Pro hodnocení dynamické stability je často využíván poměr mezi maximální excentrickou silou hamstringů a maximální koncentrickou silou *m. quadriceps femoris*. Tento poměr nazýváme jako funkční H/Q poměr (na rozdíl od konvenčního H/Q poměru, který využívá maximální síly při koncentrické činnosti). Při hodnotách funkčního H/Q poměru menších než 0,6 (60 %) je dynamická stabilizace kolenního kloubu významně narušena a riziko poranění měkkých struktur v této oblasti se značně zvyšuje (Ayala et al., 2012; Dauty et al., 2003; Dvir et al., 1989). Rozdíly v hodnotách funkčního H/Q poměru v období adolescence a dospělosti nejsou známy, lze však předpokládat rozdíly v dětství a dospívání, vzniklé v důsledku neuromuskulárního vývoje (De Ste Croix, 2007). U mladých fotbalistů mohou být změny funkčního H/Q poměru vyvolány zvýšenou aktivitou *m. quadriceps femoris*, která je způsobena zřejmě vlivem specifického tréninku. V důsledku působení velkých sil *m. quadriceps femoris* během rychlých pohybů dochází ke zvýšení nároků na aktivitu hamstringů. Nejsou-li tyto svaly schopny vyšším požadavkům vyhovět, tak je výsledkem narušení vzájemné svalové rovnováhy a tím dochází i ke zhoršení dynamických stabilizačních mechanismů (Iga et al., 2009).

Riziko poranění kolenního kloubu se zvyšuje i při svalové dysbalanci dolních končetin, díky které mohou být u končetin přítomny rozdíly v síle, koordinaci a kontrole pohybu. Prediktorem poranění bývá udáván rozdíl přesahující 15 % (Croisier & Crielaard, 2000; Myer et al., 2004). V důsledku tohoto rozdílu je slabší končetina vystavena vyššímu stresu a tím predisponuje ke vzniku poranění. Příkladem může být jednostranné zatěžování dolní končetiny při specifických pohybech ve fotbale. Výsledky dostupných studií, zaměřující se na prevalenci poranění dominantní a nedominantní dolní končetiny, jsou však kontroverzní (Boo et al., 2020).

Ke snížení dynamické stability kolenního kloubu významně přispívá únava, vlivem které dochází k biomechanickým i neuromuskulárním změnám. Únava zvyšuje anteriorní translaci tibie a způsobuje opožděné zapojení hamstringů do svalové činnosti. Současně

v důsledku reciproční inhibice dochází k útlumu jejich funkce, což snižuje stabilitu tohoto kloubu (Melnik & Gollhofer, 2007; Padua et al., 2006a). Ratel a Martin (2015) uvádí, že ke změnám dochází v průběhu dospívání, kdy se zřejmě snižuje fyziologická ochrana proti únavě při vysoké intenzitě cvičení. Působením únavy pak dochází ke zvýšenému riziku bezkontaktního poranění ACL (De Ste Croix et al., 2017). K poranění ACL dochází častěji v pozdějších fázích sportovního výkonu, kdy dochází ke kumulaci únavy (Small et al., 2010). Borotikar et al. (2008) udává, že riziko poranění ACL signifikantně stoupá kombinací únavy a neplánovaně provedeného pohybu, kdy dochází k přílišné zátěži centrálních řídicích mechanismů. Bourne et al. (2019) ovšem uvádí, že únava nezpůsobuje konzistentní změny kinetiky a kinematiky dolních končetin, o kterých je známo, že zvyšují riziko poranění ACL.

#### **2.2.4 Pohlaví jako rizikový faktor**

Hewett (2000) uvádí, že ženy, které se účastní sportovních aktivit zahrnující výskoky, dopady a rychlé změny pohybu, mají 4–6krát více úrazů kolenního kloubu v porovnání s muži věnujícím se stejným aktivitám. Velké množství těchto poranění zahrnuje poranění ACL a dochází k nim bezkontaktními mechanismy. Henry a Kaeding (2001) udávají, že u sportovkyň se častěji projevuje nerovnováha v síle, timingu a aktivaci svalů dolních končetin, které vedou k narušení neuromuskulární koordinace kolenního kloubu. Větší náchylnost ženského pohlaví k poranění kolenního kloubu je zřejmě multifaktoriální.

Z anatomických faktorů je podle některých autorů uváděno zvýšené riziko poranění kolenního kloubu u žen z důvodu odlišné stavby pánve obou pohlaví, která následně ovlivňuje postavení i funkci dolních končetin (Powell & Barber-Foss, 2000). Dalšími autory je uváděna i snížená šířka fossa intercondylaris femoris u žen (Shelbourne et al., 1998; Zeng et al., 2013). Jiní autoři však docházejí k odlišným závěrům, podle nichž nelze tyto anatomické faktory považovat za prediktory zvýšeného rizika poranění kolenního kloubu konkrétně u ženského pohlaví (Domzalski et al., 2010).

Zvýšené riziko poranění kolenního kloubu je dle některých autorů způsobeno vlivem působení ženských pohlavních hormonů, které mohou přímo či nepřímo ovlivňovat neuromuskulární systém žen (Sipilä et al., 2015). Sarwar et al. (1996) uvádí, že během ovulace dochází ke zvýšení síly m. quadriceps femoris a k významnému snížení schopnosti svalové relaxace. Během jednotlivých fází menstruačního cyklu dochází

ke změnám v hladinách estrogenu, ten ovlivňuje nejen funkci svalů, ale i sílu šlach a ligament. Současně tak dochází ke změnám neuromuskulárních funkcí, jejichž narušení může potenciálně riziko poranění kolenního kloubu navýšit (Oosthuysse & Bosch, 2010). Některé zdroje uvádí také zvýšení laxity ligament v důsledku působení estrogenu, jiné zdroje však tato tvrzení vyvrací (Janse de Jonge et al., 2001).

Důležitou roli však hrají převážně faktory neuromuskulární, které mohou být ovlivňovány prostřednictvím intervenčních strategií. Z výsledků doposud provedených studií vyplývá, že neuromuskulární kontrola se u žen a mužů liší ve všech anatomických rovinách, a to jak v oblasti trupu, tak v oblasti dolních končetin. U žen je přítomna větší flexe i lateroflexe trupu se současnou zvýšenou flexí trupu při realizaci dopadu na jednu dolní končetinu (Mendiguchia et al., 2011). Autoři mnoha studií uvádí, že rozdíly v neuromuskulárních strategiích dopadu spolu se zvýšenou kloubní laxitou a sníženou tuhostí kolenního kloubu mohou navýšit riziko poranění ACL (Harrison et al., 2011; Myer et al., 2008; Quatman et al., 2008).

Bylo zjištěno, že při sportovních aktivitách vykazují ženy odlišnou strategii aktivace m. quadriceps femoris a hamstringů v porovnání s muži. Při dopadech na kolenní kloub u žen jsou působící síly tlumeny preferenčně prostřednictvím m. quadriceps femoris. Tato skutečnost negativně ovlivňuje hodnoty funkčního H/Q poměru, kdy dochází k jejich snížení, což se může projevit snížením dynamické stability kolenního kloubu a zvýšením rizika poranění ACL (Ahmad et al., 2006; Ford et al., 2011). Současně také dochází ke zvyšování zátěže na kolenní kloub ve frontální rovině (Ford et al., 2010a). Naopak muži k zajištění stability kolenního kloubu při dopadu využívají ve větší míře hamstringy a mm. gastrocnemii, což může být považováno za protektivní mechanismus vůči působícím silám (Hewett et al., 1996).

Stejně tak Huston a Wojtys (1996) uvádí, že k zajištění stability kolenního kloubu je prvotní reakcí žen na anteriorní translaci tibie nejprve aktivace m. quadriceps femoris, kdežto muži dříve aktivují hamstringy. Podobné ochranné mechanismy se uplatňují při reakci na torzní zatížení, kde byly pozorovány rovněž rozdíly mezi muži a ženami. Ve studii porovávající rozdíly zajištění svalové kontroly při rotacích kolenního kloubu u sportujících mužů a žen Wojtys et al. (2003) udává, že ženy vykazují větší vnitřní rotaci tibie při svalové relaxaci i aktivaci oproti mužům. Nárůst tuhosti kloubu je však u žen při zatížení do vnitřní rotace významně nižší než u mužů a svalová ochrana kolenního kloubu je tak u žen nižší.

Ke zvýšenému riziku poranění ACL u žen může přispívat však nejenom nepoměr aktivity svalových skupin, ale i neúměrná aktivita jednotlivých svalů nebo jeho součástí. Rozzi et al. (1999) uvádí jako rizikový faktor nepřiměřený firing z laterálních hamstringů. Myer et al. (2005) dále popisuje u žen snížený poměr aktivity m. quadriceps medialis a lateralis. Pokles tohoto poměru spolu s nedostatečnou aktivitou mediálních hamstringů může zapříčinit sníženou kontrolu kolenního kloubu při zatížení působícím ve frontální rovině. Výše zmíněné faktory vedou ke kompresi v laterální části kloubu a k distrakci v části mediální, což v kombinaci s anteriorní translací tibie může potencionálně vést k přímému poranění ACL (Ford et al., 2003).

Rozdíly jsou přítomny i v oblasti kyčelního kloubu. Zazulak et al. (2005) uvádí, že při doskoku na jednu dolní končetinu je u žen snížená aktivita m. gluteus maximus a zvýšená aktivita m. rectus femoris, což může přispívat ke zvýšení náchylnosti k bezkontaktnímu poranění kolenního kloubu. Stejně tak je tomu u zvýšené abdukce kolenního kloubu při doskoku (Ford et al., 2010b; Radnor et al., 2018).

### 2.3 Vliv růstu a zrání na poranění kolenního kloubu

Růst a zrání jsou pojmy, které spolu úzce souvisí. Je však důležité si uvědomit, že růst a zrání probíhají v odlišných časových osách a pravděpodobně jsou i řízeny samostatnou biologickou regulací (Armstrong & Welsman, 1996). Jako růst je označováno zvětšování těla nebo kterékoliv jeho části. Jedná se o cyklický proces, během kterého jsou jednotlivé tkáně lidského těla neustále v procesu růstu, smrti a regenerace. Růst jednotlivých segmentů těla však neprobíhá stejnou rychlostí. Velikost a tvar tkání se v průběhu celého životního cyklu mění, což specificky ovlivňuje i motorickou kontrolu daného jedince. Biologické zrání lze definovat jako proces jehož výsledkem je dosažení dospělosti. Zrání stejně jako růst probíhá různou rychlostí, oproti růstu však všichni jedinci dosáhnou stejného koncového bodu, tedy stavu dospělosti (Lehnert et al., 2019).

V průběhu růstu a zrání dochází u jedinců k anatomickým, hormonálním, neuromuskulárním a biomechanickým změnám. Tyto změny se významně liší mezi oběma pohlavími, a jejich prostřednictvím lze částečně vysvětlit rozdíly v míře poranění ACL během dospívání u chlapců a dívek (Hewett et al., 2016). Během dospívání dochází u většiny jedinců k růstovému spurtu, jehož projevem je rychlý nárůst tělesné výšky. Počátek a rychlost růstu je u dospívajících vysoce individuální. Towlson et al. (2018) uvádí, že u mladých fotbalistů dochází ke zrychlenému růstu nejčastěji mezi 10 až 15 lety věku. Tato zvýšená rychlost růstu bývá běžně označována jako peak high velocity (PHV) a může být využívána jako indikátor zralosti. Jedinec, který projde růstovým spurtem rychleji, tak bude zralejší než jeho vrstevníci.

Znalost počátku období PHV může být pomocným parametrem při zjišťování náchylnosti ke zranění dospívajícího sportovce. Předpokládá se, že u dospívajících sportovců v období PHV je náchylnost k poranění signifikantně vyšší při srovnání s mladšími a staršími jedinci (Van Der Sluis et al., 2014). Současně jsou poranění mající původ v PHV období často závažnější, převládají poranění traumatického charakteru, přičemž po období PHV se ve větší míře vyskytují poranění z přetížení (Ford et al., 2010a; Radnor et al., 2018). Ve studii Johnson et al. (2020) bylo analyzováno 76 dospívajících hráčů fotbalu po dobu dvou soutěžních období. Z výsledků studie vyplývá, že období PHV bylo u hráčů spojeno s významně vyšší incidencí poranění než období před PHV. Konkrétně 24,5 poranění na 1000 hodin zátěže v období PHV v porovnání s 11,5 úrazy na 1000 hodin zátěže před obdobím PHV.

Vliv počátku a rychlosti zrání na riziko poranění kolenního kloubu je v současné době nejasný a autoři řady studií mnohdy dochází k odlišným závěrům. Například Van Der Sluis et al. (2014) zjistili, že později dospívající hráči jsou vystaveni vyššímu riziku poranění. Naopak Le Gall et al. (2006) uvádí zvýšené riziko poranění u mladších, dříve vyspělých hráčů fotbalu. Z výsledků studie Bult et al. (2018) vyplývá, že zvýšené riziko poranění se vyskytuje v období 6 měsíců po PHV. Oproti tomu Johnson et al. (2020) nepovažuje počátek zrání za ovlivňující faktor, souhlasí ale s tím, že PHV riziko poranění zvyšuje.

Bez ohledu na počátek a rychlost růstu a zrání dochází u obou pohlaví k poměrně rychlému nárůstu výšky a tělesné hmotnosti. Během tohoto období mohou sportovci vyrůst o 7 až 12 cm za rok, čímž lze částečně vysvětlit zhoršení motoriky v tomto období (Mirwald et al., 2002). Dochází ke zvětšování délky trupu a dolních končetin, avšak měkké tkáně potřebují dostatek času, aby se mohly přizpůsobit novým podmínkám. Vlivem těchto změn se mění i poloha těžiště těla. Následně jsou na jedince kladeny vyšší nároky z hlediska zajištění kvalitní neuromuskulární kontroly. Výrazné prodloužení délky femuru i tibie má dopad na biomechaniku kolenního kloubu, kde vlivem nárůstu ramen páky dochází ke zvýšenému působení sil na kolenní kloub (Hewett et al., 2016). Spolu s růstem dochází ke změnám momentů setrvačnosti. V důsledku toho je třeba využít větší množství svalové síly k provedení komplexních pohybů, kterého se účastní končetiny (Dam et al., 2009).

Autoři studií uvádí, že pravděpodobnost výskytu svalové nerovnováhy v období růstového spurtu je vysoká. V důsledku toho mohou jedinci vykazovat abnormální motorické projevy, které negativně ovlivňují výkon (Davies & Rose, 2000; Sheehan & Lienhard, 2019). Tyto neuromuskulární změny, které autoři často označují jako zhoršené koordinační schopnosti, jsou však hodnoceny na základě konkrétních pohybových úkonů. V důsledku toho mohou jednotlivé studie docházet k odlišným závěrům. Lze předpokládat, že narušení motorických koordinačních schopností bude výraznější v komplexních pohybech, prováděných ve více stupních volnosti, v porovnání s pohybovými úkony závisujícími zejména na silových schopnostech daného jedince (Hirtz & Starosta, 2002). Tito autoři také uvádí, že růstový spurt vedl u jedinců buď k okamžitému nebo opožděnému zhoršení koordinačních schopností, které se projevilo přibližně jeden rok po období růstového spurtu. Současně bylo toto narušení



koordinačních schopností výraznější při provádění časově náročnějších, rytmických pohybů, vyžadujících kinestetickou diferenciaci.

Také Quatman-Yates et al. (2012) uvádí, že u některých jedinců dochází vlivem růstového spurtu až k regresi neuromuskulárních funkcí. Rychlá změna charakteru muskuloskeletálních struktur vyžaduje adaptaci k opětovnému zisku relativní síly a k zajištění stability. Na zajištění stability se podílí více tělních systémů, které se v průběhu růstu a zrání mění (Assaiante et al., 2005). Assaiante (1998) popisuje dospívání jako zlomový bod ve vývoji posturální kontroly. Pohyby, které byly dříve prováděny s využitím „en bloc“ strategie pro zjednodušení dosažení pohybového cíle jsou nyní více diferenciovány a pohyby v jednotlivých segmentech jsou prováděny nezávisle na sobě. Podle Van Der Sluis et al. (2014) je rychlost adaptace individuálně variabilní, a je ovlivňována také rychlostí růstu a zrání, což způsobuje rozdíly ve výkonu i predispozici k poranění. Ve studii zahrnující 101 dospívajících hráčů fotbalu ve věku 11–19 let bylo autory zjištěno, že hráči, kteří vyrostli o více než 0,6 cm v předchozím měsíci, měli 1,63× větší riziko poranění (Kemper et al., 2015).

V prepubertálním období nebyly pozorovány významné biomechanické a neuromuskulární rozdíly na dolních končetinách mezi oběma pohlavími. Oproti tomu po nástupu puberty vykazují dívky odlišné neuromuskulární strategie v porovnání s chlapci, těmto rozdílům je věnována předchozí kapitola (Hewett et al., 2004). U chlapců i dívek dochází v průběhu růstu a zrání ke zvýšení tuhosti kolenního kloubu. Chlapci však ve srovnání s dívkami vykazují signifikantnější zvýšení tuhosti, a to jak v oblasti kyčelního a kolenního, tak i hlezenního kloubu (Ford et al., 2010a). Současně tyto autoři uvádí, že na rozdíl od dívek dochází u chlapců také k vyššímu neuromuskulárnímu spurtu neboli nárůstu síly a koordinačních schopností. Nárůst svalové hmoty u chlapců je považován za významný faktor přispívající k lepšímu sportovnímu výkonu. Tyto změny způsobují nejen nárůst síly, ale i aerobního výkonu. Zatímco u dívek může docházet vlivem vyššího nárůstu tukové hmoty v dospívání ke snížení výkonu. Naopak dívky, u kterých ke zrání dochází později, vykazují menší poměr hmotnosti a výšky, menší poměr šířky boků a ramen, delší nohy a nižší poměr tukové hmoty, což jsou faktory, které jsou uváděny jako prediktory úspěchu při sportovních výkonech (Lehnert et al., 2019).

Absence neuromuskulárního spurtu u dívek může potenciálně zvýšit riziko poranění kolenního kloubu, jelikož nedostatky v neuromuskulárním řízení způsobují

sníženou schopnost adaptace na změny doprovázející proces růstu a zrání (Quatman et al., 2006). (Ford et al., 2010a) dodávají, že růstový spurt způsobuje i změny kostní denzity, což přispívá k celkové fragilitě jedinců. Současné tréninkové postupy u dospívajících hráčů obvykle ve velké míře zahrnují hry na malém prostoru ve snaze zvýšit kontakt s míčem, zlepšit specifické dovednosti a zároveň tak zvýšit kondici časově efektivním způsobem. Při hře na malém prostoru lze předpokládat zvýšení frekvence mechanicky i technicky náročných pohybů, které zahrnují výskoky, dopady a rychlé změny směru. Tato opakovaná zátěž na mnohdy nedostatečně zadaptovaný muskuloskeletální systém dospívajícího může být faktorem přispívajícím ke zvýšenému výskytu poranění (Verheul et al., 2020).

Existují studie zkoumající odezvu hráčů při účasti v turnajích, kde jsou hráči rozděleni do skupin podle stavu biologického zrání. Cílem je snížit interindividuální rozdíly přítomné v důsledku růstu a zrání. Ve studii Cumming et al. (2018) bylo úkolem hráčů tuto zkušenost porovnat s účastí v turnajích, kde jsou hráči rozděleni do skupin podle chronologického věku. Hráči, kteří byli ve věku 11–14 let, popsali všichni tuto zkušenost jako pozitivní. Skupina více vyspělých hráčů popsala tento turnaj jako fyzicky náročnější. Současně uvedli, že museli přizpůsobit styl hry, a klást větší důraz na taktiku a techniku v průběhu utkání. Skupina méně vyspělých hráčů naopak považovala hru za fyzicky méně náročnou. Ocenili však více příležitostí k rozvoji a demonstraci svých schopností v oblasti strategie a techniky. Ke stejným závěrům dochází i Bradley et al. (2019). Probandi této studie dále uvádí, že v průběhu turnaje vnímali menší riziko poranění než při turnajích s tradičním formátem. Tyto experimentální turnaje, popřípadě tréninková utkání, nejsou plnou náhradou standardního dělení hráčů dle chronologického věku. Touto cestou však účastníci získávají řadu cenných zkušeností. Trenéři mohou získat důležité informace z oblasti motorického projevu hráčů, což může přispět k optimálnímu rozvoji dospívajících jedinců a současně se tak alespoň částečně vyvarovat potenciálním rizikům (Malina et al., 2019).

Je zajímavé, že i když je vzájemný vztah mezi růstem, zráním a zvýšeným rizikem poranění u sportující populace podpořen mnoha studiemi, tak u studií zaměřených i na nesportující část populace k této korelaci nedochází. Tyto výsledky naznačují, že nadměrná sportovní zátěž v období růstu a zrání vystavuje dospívající sportovce zvýšenému riziku ke vzniku úrazů, které mohou mít potenciálně vliv na opakované úrazy a úrazy z přetížení (Swain et al., 2018). Podle současné evidence je však zřejmé, že

pravidelná účast při sportovních aktivitách by měla být podporována po celé období růstu a zrání a má pozitivní vliv na zdraví dětí i dospívajících, pokud dochází k adekvátnímu dávkování tréninkové zátěže (McKay et al., 2019).

## **2.4 Vliv růstu a zrání na neuromuskulární kontrolu kolenního kloubu**

Neuromuskulární kontrola je termínem, který může odkazovat na kterýkoli z aspektů zahrnující řízení svalové aktivity prostřednictvím nervového systému a na faktory přispívající k provedení pohybového úkonu. Z hlediska stability kloubu je neuromuskulární kontrola popisována jako nevědomá aktivace dynamických stabilizátorů, ke které dochází při zatížení kloubu, a to před nebo v průběhu realizace pohybu za účelem udržení funkční kloubní stability. V určité formě je neuromuskulární kontrola součástí všech motorických aktivit. Nezbytnou součástí tvoří proprioceptivní informace týkající se stavu kloubu a okolních struktur (Riemann & Lephart, 2002).

Statické a dynamické stabilizátory při zajišťování funkční stability spoléhají na dopředné a zpětnovazebné mechanismy (Wikstrom et al., 2006). Systém dopředné vazby (feedforward) zahrnuje předvídatelné svalové akce, které očekávají příchod stimulu a ke kterým dochází před senzorigickou detekcí. Tyto akce se vyznačují preventivní svalovou činností. Dopředná vazba je důležitá zejména z hlediska rizika poranění, kdy jsou například svaly kolenního kloubu připraveny na očekávanou změnu směru nebo dopad z výskoku. Naopak systém zpětné vazby (feedback) umožňuje korekční odpověď nervosvalového systému na základě senzorigické detekce. Bylo zjištěno, že stabilita kloubu a jeho ochrana před poraněním závisí na kvalitě dopředných a zpětnovazebných mechanismů, což přispívá ke zvýšení svalové tuhosti během pohybových úkonů. Pro udržení stability kloubu je důležitá zejména svalová síla spolu s tuhostí kloubu, k jejímuž zvýšení dochází prostřednictvím kokontrakce antagonistů (Riemann & Lephart, 2002). Současná evidence naznačuje, že kvalita dopředného a zpětnovazebného řízení je vyšší u dospělých jedinců v porovnání s dospívajícími. Dospívající jedinci jsou tak náchylnější k poranění pohybového aparátu (Lazaridis et al., 2010, 2018; Scarborough et al., 2019).

### **2.4.1 Kineziologické aspekty**

Kolenní kloub je nosným kloubem a tvoří prostřední část kinetického řetězce dolní končetiny. Kapandji (2011) uvádí, že kolenní kloub je kloubem s jedním stupněm volnosti v sagitální rovině ve směru flexe a extenze. Přidatnými pohyby jsou potom zevní a vnitřní rotace bérce, které jsou ale nemožné při plné extenzi kolenního kloubu.

Z mechanického hlediska jsou na kolenní kloub kladeny odlišné požadavky, které je potřeba skloubit. Kolenní kloub musí zajistit stabilitu ve stoji a odolat tak stresu, který

na kolenní kloub v plné extenzi působí. Zároveň je od něj ale po dosažení určité míry flexe vyžadována značná pohyblivost. Tato pohyblivost je zásadní pro správnou funkci nohy vzhledem k nerovnostem podložky (Kapandji, 2011).

Stabilita je zajištěna souhrou pasivních stabilizátorů, kam je řazeno kloubní pouzdro, vazy a menisky, a dynamických stabilizátorů, které tvoří svaly v okolí kolenního kloubu. Vazy prostřednictvím proprioceptorů zlepšují souhru synergistů a zároveň omezují extrémní rozsahy pohybu (Wendsche & Veselý, 2015). Během extenze je kolenní kloub stabilní díky svému vertikálnímu uspořádání, kongruenci kloubních ploch a gravitaci. Při flexi vyžaduje stabilizaci pomocí kloubního pouzdra, ligament a okolních svalů (Hamill et al., 2015).

Klíčovým stabilizačním mechanismem kolenního kloubu je kokontrakční aktivita agonistů a antagonistů, která je popisována jako Lombardův paradox. Jedná se o vzájemnou synchronní aktivitu flexorové a extenzorové skupiny kolenního kloubu. Při napřímení ze dřepu nebo stoje je koleno extendováno díky m. quadriceps femoris, zároveň se však kontrahují i flexory kolenního kloubu, které by měly dle zásad reciproční inervace extenzi bránit. Lze tedy říct, že svalová činnost těchto svalových skupin se mění podmínkami funkce. Když dojde ke změně podmínky funkce, dochází i ke změně svalové činnosti, a kloub je tak schopen stabilizace (Gregor et al., 1985; Véle, 2006).

#### **2.4.2 Propriocepce**

Náš organismus musí neustále zpracovávat značný počet informací, které přijímá jak z endogenního, tak z exogenního prostředí. Informace mu podávají receptory, které reagují na příslušné stimuly. Velké množství aferentních informací ani naše tělo nevnímá, aferentní signalizace má ale zásadní význam pro realizaci a koordinaci pohybu (Pfeiffer, 2007). Pro správnou propriocepci, vnímání polohy a pohybu našeho těla nebo jeho částí je důležitá souhra několika receptorových systémů. Na propriocepci se podílejí receptory svalů, šlach, fascií, periostu, kostí, kloubu i receptory středního ucha. Prostřednictvím těchto receptorů vnímáme nejen polohu a pohyb těla, ale jsme schopni stanovit sílu a odpor pro konkrétní pohyb. Proprioceptivní informace částečně zprostředkovávají i představu o tělesném schématu, a umožňují tak lepší orientaci na vlastním těle (Langmeier, 2009). Informace z proprioceptorů jsou vedeny pomocí lemniskálního neboli zadně provazcového systému (Kolář, 2009).

Propriocepce kolenního kloubu je zajištěna aferentními signály z vlastních proprioceptorů kolenního kloubu a zároveň je i ovlivněna signály z okolního prostředí, kam je možno zařadit vestibulární systém, sensorický systém a informace z proprioceptorů dalších částí těla. Mimo svalová vřetenka a šlachová tělíska mezi vlastní receptory patří receptory, jež připomínají svou stavbou Paciniho tělíska zaznamenávající dynamické změny v kloubu. Nacházejí se v kloubním pouzdru. Dále jsou to receptory, které svou stavbou připomínají Ruffiniho tělíska vnímající změny úhlu v kloubu, hlavně extrémní polohy, změny intraartikulárního tlaku, rychlosti a napětí. Oba typy těchto receptorů se nachází ve stratum fibrosum kloubního pouzdra. Důležité je zmínit také volná nervová zakončení, z nichž se většina řadí mezi nociceptory. Ty se nacházejí v kloubním pouzdru, ligamentech i v řídkém vazivu v kloubním okolí. Zaznamenat mohou například zánět nebo nadměrnou iritaci tkáně. Oba zkřížené vazy kolenního kloubu jsou bohatě inervovány a vyskytuje se v nich mnoho kloubních receptorů. U předního zkříženého vazy je prokázán větší výskyt receptorů v distální části vazy, zatímco u zadního zkříženého vazy v proximální i distální části vazy. Receptory se nachází i v meniscích kolenního kloubu, a to hlavně v jeho předním i zadním rohu, což koreluje s obecně vyšší hustotou receptorů pro biomechanicky významné struktury, kam se zkřížené vazy i menisky řadí. Podstatnou součástí proprioceptivní aferentace jsou i receptory umístěné ve vazivových strukturách kolem svalu, kam řadíme fascie, intersticiální vazivo a periartikulární vazivo (Knoop et al., 2011; Švestková et al., 2017).

Díky proprioceptivním informacím je kolenní kloub chráněn před potenciale traumatickými pohyby a je stabilizován i při statických polohách. Zároveň je zajištěno koordinované a přesné provádění komplexních pohybů (Jan et al., 2009; Lin et al., 2007). Dojde-li k poruše aferentace z receptorů, dochází následně ke změně regulačních mechanismů. Vzniklým traumatem i mikrotraumatem v kloubu dojde nejen k poranění nitrokloubních struktur, ale zároveň se změní i aferentní signalizace z traumatizované oblasti. Příkladem může být ruptura ACL. Kromě poruchy biomechaniky je i poruchou regulační, jelikož zhruba 2 % ACL představují proprioceptory. Proprioceptivní aference je tedy omezena, naproti tomu signalizace z nociceptorů je zvýšená. Jedinci mající tuto poruchu mají větší riziko vzniku traumat vlivem opožděné svalové reakce (Kolář, 2009).

### **2.4.3 Neuromuskulární koordinace**

Neuromuskulární koordinace je zcela zásadní pro kvalitní provedení motoricky náročných pohybových úkonů. Současně zvyšuje efektivitu tvorby pohybových strategií,

zlepšuje ekonomiku pohybu a umožňuje jedinci vykonávat širokou škálu pohybových dovedností (Missitzi et al., 2004). Není-li pohybová dovednost náležitě zautomatizována, není ani samotné technické provedení realizováno odpovídajícím způsobem a kvalita celého pohybového výkonu může být narušena. Pro vykonání obtížných pohybů je třeba koordinace neuromuskulárních komponent pro snížení zátěže působící na klouby těla, usměrnění trajektorie pohybu a pro zachování rovnováhy. V případě narušení koordinace neuromuskulárních komponent se riziko vzniku traumat zvyšuje (Bompa & Buzzichelli, 2018).

Pro zajištění kvalitní neuromuskulární koordinace je vhodné zapojení co největšího množství motorických jednotek. Motorická jednotka je složena z určitého počtu svalových vláken inervovaných jedním motoneuronem. Samotná svalová akce je zajišťována prostřednictvím šíření akčního potenciálu svalovým vláknem. Ke vzniku akčního potenciálu dochází transformací nervového impulsu v místě nervosvalové ploténky (Bednařík et al., 2010). Motoneurony jsou schopny tvořit impulzy excitační a inhibiční. Prostřednictvím excitačních impulsů je zahájena svalová akce. Inhibiční impulzy mají ochrannou funkci. Zabezpečují sval před nadměrnou námahou, která by mohla poškodit sval a přilehlé tkáně a kostěné struktury. Předpokladem pro neuromuskulární koordinaci je intermuskulární a intramuskulární koordinace. Jako intermuskulární koordinace je nazývána součinnost zapojených svalů, které se účastní pohybu. Velikost svalové akce podléhá intramuskulární koordinaci, tedy množství aktivovaných a relaxovaných motorických jednotek. Je-li navýšen počet excitačních impulsů, tak se motorické jednotky účastní svalové akce. Převyšuje-li počet inhibičních impulsů, tak motorické jednotky relaxují. Vlivem působení tréninku jsou potlačovány inhibiční impulsy a výsledná svalová akce je silnější (Bompa, 1999).

Neuromuskulární koordinace dospívajících sportovců je často snižena. K jejímu zlepšení dochází vlivem opakovaného tréninku. V průběhu maximálního a submaximálního zatížení je zvyšován firing z motorických jednotek. Zdokonalování intermuskulární koordinace pozitivně působí na kvalitu intramuskulární koordinace. Provedení pohybu tak vyžaduje menší míru energie a úroveň výkonu je navýšena. Díky tomu dochází k prodloužení doby trvání svalové práce jedince. Vlivem působení tréninku dochází k efektivnějšímu a ekonomičtějšímu zapojování svalů. Postupně dochází k nervové adaptaci jejímž projevem je lepší kooperace agonistů a antagonistů. K efektivnímu svalovému zapojení přispívá také schopnost relaxace antagonistů.

Nervosvalová adaptace v procesu motorického učení vede ke zlepšení neuromuskulární koordinace (Bompa & Buzzichelli, 2018).

#### **2.4.4 Cyklus protažení a zkrácení svalu**

Cyklus protažení a zkrácení svalu je považován za přirozenou součást svalových akcí pro většinu forem lidské lokomoce. Je obsažen ve sportovních aktivitách, které využívají specifické pohyby, jako jsou například změny směru, výskoky, přeskoky a kličky. Tyto pohybové komponenty jsou často klíčovou součástí pro úspěch v mnoha týmových sportech (Radnor et al., 2018). Využívají kombinace střídající se rychlé excentrické a následně koncentrické kontrakce svalů (Nicol et al., 2006). Bylo prokázáno, že předchází-li koncentrické kontrakci excentrická kontrakce, tak je výsledný výkon svalu vyšší v porovnání s izolovanou koncentrickou kontrakcí svalu (Flanagan & Comyns, 2008; Komi, 2000). SSC je rozdělován na rychlé a pomalé akce podle doby kontaktu se zemí. U rychlých SSC akcí je doba kontaktu se zemí kratší než 250 ms, tyto akce stimulují vyšší rychlost pohybu s využitím elastické energie a vyšší nervové excitace z předchozího protažení svalu. Naopak u pomalých SSC akcí je doba kontaktu delší než 250 ms a umožňují větší produkci síly v důsledku prodloužené doby kontrakce a většímu rozsahu pohybu. K jeho uplatnění tedy dochází při zajištění stability kolenního kloubu a hraje roli i v prevenci poranění kolenního kloubu (Flanagan & Comyns, 2008; Turner & Jeffreys, 2010).

SSC je řízen neuromuskulárně a vyžaduje efektivní interakci mezi nervovým a svalovým systémem (Komi, 2000; Nicol et al., 2006). Kvalitní spolupráce těchto systémů umožňuje efektivnější provedení pohybu a pomáhá optimalizovat sílu generovanou motorickými jednotkami (Lichtwark & Wilson, 2007, 2008). V průběhu růstu a zrání dochází k významným změnám na neuromuskulární úrovni, které tak ovlivňují i funkci cyklu protažení a zkrácení svalu. Tyto změny jsou označovány jako strukturální a neuromuskulární adaptace. Vlivem rozvíjení SSC v průběhu růstu a zrání jeho změny ovlivňují svalovou akci tak dochází ke zvýšení síly a zlepšení výkonnosti (Radnor et al., 2018).

#### **2.4.5 Strukturální adaptace**

Z dostupných studií nelze usuzovat jasnou shodu v rozdílném zastoupení typů svalových vláken mezi dětmi a dospělými (Dotan et al., 2012). Lexell et al. (1992) uvádí, že podíl vláken typu I klesá ve věku od 5 do 20 let z 65 % na 50 %. Současně byly



pozorovány pohlavní rozdíly v zastoupení svalových vláken na přechodu dospívání a dospělosti. U žen podíl vláken typu I od 16 do 27 let mírně stoupal, kdežto u mužů významně klesal. Existují však i studie podporující podobné zastoupení svalových vláken u dětí i dospělých (Bell et al., 1980), přesto však většina dostupných studií tyto rozdíly připouští. Jelikož vlákna typu II umožňují rychlejší kontrakci a větší produkci síly, jejich vyšší podíl zastoupení vytváří značné benefity v SSC (Bottinelli et al., 1996).

V průběhu růstu a zrání dochází u řady svalů dolních končetin k podstatnému zvětšení jejich velikosti (O'Brien et al., 2010b). Dospělí jedinci vykazují větší tloušťku svalů než děti, stejně tak starší dospívající v porovnání s mladšími adolescenty (Kubo et al., 2014). Folland a Williams (2007) uvádí, že hyperplazie přispívá ke zvětšování velikosti průřezové plochy svalu (CSA) pouze malým dílem, a proto je nárůst velikosti svalu připisován zejména nárůstem svalové hypertrofie. CSA (cross sectional area) je hlavním prediktorem maximální síly u dětí i dospělých, zvětšování tohoto parametru tak přispívá k většímu produkci síly v průběhu růstu a zrání, což přispívá ke zlepšení výkonu během SSC aktivit (Jones et al., 2008; Tonson et al., 2008).

Se zvětšováním velikosti svalů v průběhu růstu a zrání lze dosáhnout většího silového výkonu jak v koncentrické, tak v excentrické fázi SSC (Kubo et al., 2001; O'Brien et al., 2010a, 2010b). Při izolované koncentrické a excentrické kontrakci m. quadriceps femoris a hamstringů byla prokázána korelace velikosti svalu s velikostí produkované síly (Evangelidis et al., 2016). Výhodou větší koncentrické síly v průběhu SSC je vznik většího impulsu, který pozitivně ovlivňuje například sprint a výskoky (McLellan et al., 2011; Suchomel et al., 2016; Tillin et al., 2013). Benefity větší excentrické síly v průběhu SSC jsou však méně jasné. Během SSC výše generované síly však závisí na kvalitě excentrické fáze. Produkce větší síly v průběhu excentrické fáze může mít vliv na nárůst aktivních aktinomyozinových komplexů, čímž dochází k navýšení účinku svalové kontrakce. Současně větší síla při excentrické fázi pravděpodobně přispívá k lepší odolnosti svalu vůči protažení a efektivnějšímu ukládání elastické energie (Cormie et al., 2010; Henchoz et al., 2006).

Svalové uspořádání je specifické pro svalové skupiny nebo konkrétní sval a je zcela zásadní pro optimální funkci svalu (Lieber & Ward, 2011). Zatímco zvýšení CSA přímo koreluje s navýšením síly v průběhu růstu a zrání, poznatky o změnách svalové architektury během dospívání neodkazují k přímým závěrům. Jedná se zejména o změnu délky svalových vláken a úhlu mezi podélnou osou svalu a jeho vlákny

(Blazevich & Sharp, 2005). Mezi zpeřenými svaly však existuje značná variabilita a jejich heterogenita ztěžuje srovnání mezi jednotlivými svalovými skupinami (Azizi et al., 2008; Wakeling et al., 2011).

Délka svalových vláken pravděpodobně ovlivňuje funkci svalu prostřednictvím rychlosti svalového zkrácení. Delší svalová vlákna mají lepší schopnost produkce síly při vysokých rychlostech a při větším rozsahu pohybu (Blazevich, 2006). Trénovaní sprinteři mají delší svalová vlákna v porovnání s vytrvalostními běžci, což potvrzuje význam délky svalových vláken pro rychlost zkrácení svalu a produkci výbušné síly (Abe et al., 2000). Byla zjištěna větší délka svalových vláken svalů dolních končetin u mužů a žen v porovnání s chlapci a dívkami (Kubo et al., 2001; O'Brien et al., 2010b). Současně byla zjištěna větší délka svalových vláken u adolescentů ve věku 15 let při srovnání s dětmi, oproti dospělým jedincům se ale délka svalových vláken nelišila. Výsledky naznačují, že délka svalových vláken dosáhne úrovně dospělých jedinců přibližně ve věku 15 let, je však třeba dalšího výzkumu pro průkaz těchto tvrzení (Kubo et al., 2001). Delší svalová vlákna mají pozitivní vliv na silový gradient (RFD). Bylo zjištěno, že délka svalových vláken m. gastrocnemius lateralis je pozitivním prediktorem RFD během skoku s protipohybem u dospělých jedinců. Tyto výsledky mohou zdůraznit význam zlepšování funkce SSC v průběhu růstu a zrání a navýšení schopnosti rychlé produkce síly dospívajícího jedince (Earp et al., 2010). Schopnost rychle vyvinout sílu může kvalitu SSC ovlivnit snížením doby kontaktu se zemí, což vede ke zlepšení opětovného využití elastické energie a zesílení účinku excentrické i koncentrické kontrakce (Henchoz et al., 2006; Wilson et al., 1991).

Změna úhlu mezi podélnou osou svalu a jeho vlákny v průběhu růstu a zrání je zřejmě specifická pro konkrétní sval a určitou lokaci na svalu. Z dosavadních zjištění vyplývá, že úhel zůstává konzistentní u m. quadriceps femoris, zatímco u m. gastrocnemius medialis se tento úhel zřejmě od narození zvětšuje a stabilizuje se až po období adolescence. Toto tvrzení naznačuje, že dochází ke změně úhlu v souvislosti s růstem svalů a kostí, čímž dochází k adaptaci svalových vláken v daných segmentech dolních končetin při nových podmínkách (Binzoni et al., 2001; Kubo et al., 2001; O'Brien et al., 2010b). Lze očekávat, že zvětšení úhlu mezi podélnou osou svalu a jeho vlákny v průběhu růstu a zrání zvětšuje schopnost svalu generovat sílu a tím pozitivně ovlivňuje SSC (Lieber & Fridén, 2000). Vlivem zvětšení úhlu dochází i ke zvětšení fyziologické průřezové plochy svalu (PCSA) (Fukunaga et al., 2001). Následkem toho je

navýšen počet kontraktilních elementů připojených ke šlaše nebo aponeuróze, což umožňuje větší přenos síly (Kawakami et al., 1995). Změna postavení svalových vláken ovlivňuje i kontrakci, kdy se jednotlivá svalová vlákna nemusí tolik zkrátit. To umožňuje svalů fungovat optimálněji z hlediska síly i rychlosti po delší dobu, aniž by tím byla ovlivněna kvalita rychle vykonaného pohybu (Wakeling et al., 2011). Současně má větší úhel vliv na zvětšení pasivního odporu a následně zvýšení tuhosti končetin během SSC (Earp et al., 2010; Secomb et al., 2015). Předpokládá se, že vlivem těchto změn je sval více odolný vůči působení vnějších sil a zvýšená tuhost by mohla vést opět ke kratší době kontaktu se zemí, a tedy k lepšímu opětovnému využití plastické energie (Henchoz et al., 2006).

Šlachy hrají klíčovou roli ve funkci SSC. Přenáší síly ze svalů na kosti a ovlivňují tak pohyb i stabilitu v okolí daného kloubu. Šlachy jsou složeny převážně z kolagenních vláken. Jejich fibroelastická povaha a orientace jednotlivých fibril jim umožňuje odolávat velkému zatížení a zajišťuje přenos síly s minimálními ztrátami energie při zachování strukturální integrity. Šlachy v průběhu růstu a zrání podléhají změnám z hlediska rozměru i struktury. Bylo zjištěno, že délka patelární šlachy u chlapců ve věku 11 let byla významně kratší, než délka patelární šlachy chlapců ve věku 14 let a dospělých mužů (Kubo et al., 2014). Současně bylo zjištěno, že s narůstajícím věkem dochází k navýšení průřezové plochy šlachy. Při porovnání s Achillovou šlachou byly pozorovány podobné rozměry a průřezy u chlapců ve věku 14 let a dospělých mužů. U chlapců ve věku 11 let byly obě hodnoty významně nižší. Tyto výsledky naznačují, že se tyto proměnné u Achillovy šlachy mohou ve věku 14 let stabilizovat (Kubo et al., 2014). K podobným výsledkům dochází i Waugh et al. (2012). Zároveň uvádí, že v průběhu růstu a zrání dochází ve větší míře k navýšení průřezové plochy šlachy oproti nárůstu délky, čímž dochází k navýšení tuhosti šlachy. Zvětšení průřezové plochy je zřejmě adaptací na zvýšení hmotnosti jedince a reakcí na větší zatížení šlachy. Současně je v průběhu růstu a zrání navýšena hustota i průměr kolagenových fibril (Bailey et al., 1998).

Výsledky studií naznačují, že mechanické vlastnosti patelární šlachy dosahují podobných hodnot u chlapců ve věku 15 let v porovnání s dospělými muži, což naznačuje, že šlachy dospívajících jedinců mohou dosáhnout stejných vlastností v porovnání s dospělými jedinci přibližně v období vrcholu PHV. Tato zjištění také naznačují, že rozdíly ve funkci SSC mezi dospělými a adolescenty nemusí být dány rozdílem v tuhosti šlach (Kubo et al., 2001; Radnor et al., 2018). Klíčovým faktorem

celkové tuhosti svalově-šlachové jednotky (MTU) je tuhost kontraktálního prvku. Pokud kontraktální prvek nevykazuje větší tuhost než šlacha, dochází k nadměrnému namáhání svalu, který následně není schopen optimálně generovat sílu. Lze proto předpokládat, že v průběhu růstu a zrání jedinci nejsou schopni zajistit tuhost svalu prostřednictvím optimální svalové aktivace a náboru motorických jednotek (Dotan et al., 2012).

Někteří autoři uvádějí rozdíly v tuhosti šlach u mužů a žen. Rozdíly se podle výsledků studií vyskytují v oblasti patelární i Achillovy šlachy, přičemž jsou tyto odlišnosti zdůvodňovány rozdílnými rozměry šlach u obou pohlaví (Hicks et al., 2013; Kubo et al., 2003). Naopak O'Brien et al. (2010a) pohlavní rozdíly v tuhosti šlach při porovnání mužů s ženami a chlapců s dívkami neuvádí. Současně však tyto autoři uvádí, že i když nebyly zjištěny pohlavní rozdíly, tak se mohou mechanismy ke zvýšení tuhosti šlach v průběhu růstu a zrání mezi pohlavími lišit. U mužů došlo k relativnímu nárůstu délky šlachy a její průřezové plochy přibližně v podobné míře, kdežto u žen převažovalo zvětšení průřezové plochy nad nárůstem délky. U mužů je tak zřejmě navýšení tuhosti šlachy způsobeno změnou vlastností materiálu, zatímco u žen se jedná spíše u hypertrofickou adaptaci šlachy. Ke stanovení jednoznačných závěrů je však v této oblasti třeba dalšího výzkumu.

Tuhost šlachy může ovlivňovat silový gradient, který determinuje produkci síly (Bojsen-Møller et al., 2005). Řada studií uvádí, že RFD je snížen u dětí v porovnání s dospělými jedinci, což lze částečně vysvětlit sníženou tuhostí šlach (Falk et al., 2009; Grosset et al., 2005). Generaci síly ovlivňuje také elektromechanické zpoždění svalu (EMD). Jedná se o časový úsek mezi aktivací svalu a jeho mechanickou činností, která je aktivací vyvolána. (Blazevich et al., 2008; Grosset et al., 2009). U dětí je EMD delší než u dospělých a v průběhu neuromuskulárního dozrávání dítěte klesá a pozitivně tak ovlivňuje funkci SSC (Asai & Aoki, 1996; Falk et al., 2009; Grosset et al., 2005).

#### **2.4.6 Neuromuskulární adaptace**

Zatímco mechanické vlastnosti svalu a šlachy významně regulují SSC, tak interakce svalového a nervového systému řídí SSC (Nicol et al., 2006). Neuromuskulární adaptace v průběhu růstu a zrání má však významný dopad na schopnosti regulovat SSC (Lloyd et al., 2012). U dětí dochází v průběhu volní kontrakce k zapojení menšího počtu motorických jednotek než u dospělých, což se odráží na produkci síly (Grosset et al., 2008; Stackhouse et al., 2005). Nižší aktivace motorických jednotek byla zjištěna také

při porovnání chlapců s muži během extenze kolenního kloubu (Gisolfi & Lamb, 1989). Motorické jednotky svalových vláken typu II mají vysokou prahovou hodnotu aktivace, jsou schopny silné kontrakce s vysokou rychlostí vedení a produkcí velké síly (Sale, 1987). Předpokládá se, že nižší aktivace motorických jednotek svalových vláken II typu se odráží na nižší schopnosti generace síly u dětí (Halin et al., 2003). Bylo zjištěno, že chlapci mají vyšší prahovou hodnotu EMG v porovnání s muži, což naznačuje opožděné a snížené využití těchto motorických jednotek u chlapců (Pitt et al., 2015). Vzhledem k těmto rozdílům se předpokládá, že postupné dozrávání centrálního nervového systému přispívá k efektivnějšímu využití motorických jednotek svalových vláken typu II, a tím ke zlepšení svalové činnosti během SSC (Radnor et al., 2018).

Jako kokontrakce je označována současná aktivace agonistických a antagonistických svalů, která je součástí stabilizačních mechanismů daného kloubu (Croce et al., 2004). U dětí byla zjištěna vyšší kokontrakce m. triceps surae a m. tibialis anterior než u dospělých, s věkem však dochází k jejímu postupnému poklesu (Frost et al., 1997; Grosset et al., 2008; Lambertz et al., 2003). Kokontrakce sice pomáhá zajistit stabilitu kloubu, ale nadměrná aktivace antagonistů zvýší náklady na práci agonistů a dochází ke snížení silového výkonu (Frost et al., 2002; Malina et al., 2004). Odchytky ve svalové kokontrakci pravděpodobně snižují propriocepci a efektivitu pohybu. Když je svalově-šlachová jednotka během aktivit SSC vystavena nadměrnému tahu, dochází ke zvýšení aferentní aktivity Golgiho šlachových tělísek, čímž dochází k inhibici motoneuronů agonisty a facilitaci motorických jednotek antagonisty (Brooks et al., 1996). Následkem toho je snížena celková účinnost SSC vlivem zvýšení doby kontaktu se zemí a snížením výkonu. U dětí byla zaznamenána větší koncentrace Golgiho šlachových tělísek než u dospělých, které však v průběhu růstu a zrání procházejí procesem desenzibilace (Ovalie, 1987). V důsledku toho dochází ke snížení inhibice agonisty, což vede k efektivnější činnosti SSC. Snížená kokontrakční aktivita by mohla umožnit větší protažení svalu během excentrické fáze SSC a pozitivně tak ovlivnit opětovné využití elastické energie (Flanagan & Comyns, 2008).

Pojem preaktivace svalu je využíván k popisu úrovně svalové aktivity před kontaktem končetiny s podložkou (Hobara et al., 2008). Tato neuromuskulární strategie bývá často hodnocena během bilaterální skoků. Jedná se o svalovou aktivaci v rozmezí 50–100 ms před kontaktem se zemí (Hobara et al., 2007). Při porovnání skoků o nižších frekvencích vykazovali chlapci podobnou preaktivaci svalů jako muži,

při skocích o vyšších frekvencích však byla preaktivace u chlapců významně nižší (Oliver & Smith, 2010). Podobné výsledky byly zjištěny při testování seskoků, kdy u dětí byla míra preaktivace signifikantně nižší v porovnání s dospělými (Lazaridis et al., 2010). Z uvedených poznatků vyplývá, že děti mají sníženou schopnost využívat dopředné mechanismy, a dochází tak k prodloužení doby kontaktu se zemí, což negativně ovlivňuje funkci SSC. (Oliver & Smith, 2010). Vzhledem ke korelaci snížené preaktivace a snížené svalové tuhosti je snížená schopnost využití dopředného řízení ochranným mechanismem před přetížením svalově-šlachové jednotky při kontaktu se zemí. Během růstu a zrání dochází ke zlepšení funkce SSC, jelikož dospívající postupně přechází z reaktivních mechanismů na preaktivační (Lloyd et al., 2012).

## 2.5 Hodnocení neuromuskulární kontroly kolenního kloubu

Neuromuskulární kontrolu kolenního kloubu lze hodnotit mnoha způsoby. Jednou z možností je hodnocení neuromuskulární kontroly prostřednictvím vertikálních skoků, které umožňují posoudit účinnost cyklu protažení a zkrácení svalu. SSC je přirozenou součástí sportovních aktivit obsahujících řadu specifických pohybů, kam jsou řazeny i výskoky (Čoh et al., 2016). Během těchto pohybů dochází k tvorbě energie, která působí na podložku, kde dochází k její absorpci a následně se vrací zpět formou elastické energie. V průběhu SSC se svaly, šlachy a vazy střídavě natahují a zkracují, čímž dochází k ukládání a poté k uvolnění elastické energie v průběhu doby kontaktu nohy s podložkou (Cavagna et al., 1988).

Účinnost SSC je tak možno hodnotit prostřednictvím odlišných biomechanických modelů, kdy nejčastěji využívaným modelem je pružinový model vertikálního charakteru. Zásadním faktorem tohoto výhradně vertikálního modelu je tuhost dolních končetin (LS), jelikož vertikální pohyb a doba kontaktu se zemí závisí na tuhosti dolních končetin a úhlu flexe v kolenních kloubech. Bylo zjištěno, že míra tuhosti dolních končetin má vztah k úrovni vyvinuté síly v průběhu skoku (Laffaye et al., 2016; McMahon & Cheng, 1990). Pomocí vertikálních skoků tak lze posoudit současně sílu dolních končetin, která ovlivňuje funkci SSC. Pro efektivní produkci síly je důležitá generace větší síly v průběhu excentrické kontrakce v porovnání koncentrickou kontrakcí. Prostřednictvím těchto procesů dochází ke zpětnému využití přijímané energie v průběhu cyklu protažení a zkrácení svalu. K tomu dochází například při běhu ale při fotbalově-specifických pohybech, kde je SSC uplatňován (Farley et al., 1993; Komi & Gollhofer, 1997).

Při vertikálním skoku je síla odrazu vyhodnocována pomocí klasifikačního protokolu. Výskok z podřepu (squat jump) hodnotí koncentrickou kontrakci. Vertikální skok z místa (countermovement jump) a skok po seskoku z vyvýšeného místa (drop jump) klasifikuje excentrickou kontrakci s následující koncentrickou kontrakcí. Kvalita provedení vertikálního skoku je ovlivňována kvalitou úrovně a rychlosti koordinačních mechanismů tělesných segmentů. Tyto mechanismy jsou podmíněny optimální aktivitou neuromuskulárního systému (Čoh et al., 2016).

### 2.5.1 Tuhost dolních končetin

Řada studií hodnotící úroveň tuhosti dolních končetin se touto problematikou zabývá v souvislosti s optimalizací cyklu protažení a zkrácení svalu (Laffaye et al., 2016; Lazaridis et al., 2018). Autoři uvádějí, že dostatečná úroveň tuhosti minimalizuje riziko poranění muskuloskeletálních struktur a jejich opětovná poranění (Maquirriain, 2012; Watsford et al., 2010). Současně je zvýšená tuhost dolních končetin spojována se zvýšeným rizikem poranění kostních struktur, zatímco nedostatečná úroveň tuhosti navyšuje riziko poranění měkkých struktur (Granata et al., 2002b; McMahon et al., 2012). Tuhost dolních končetin lze definovat jako poměr maximální reaktivní síly vyvinuté na podložku k maximální kompresi DKK v polovině stojné fáze. Výsledná tuhost se ale liší v závislosti na pokynu, jelikož dochází k nárůstu LS při zvýšení skoků nebo zvýšení jejich frekvence (Hobara et al., 2009). LS lze rozdělit na aktivní a pasivní tuhost. Prostřednictvím aktivní tuhosti je možné tvořit svalovou sílu a končetina je tak schopna odolávat zatížení v průběhu pohybu, kam lze zařadit i přechod z excentrické do koncentrické kontrakce. Konkrétním příkladem je aktivita dynamických stabilizátorů kolenního kloubu bránící nežádoucím pohybům mezi femurem a tibií. Tímto způsobem je zajišťována stabilita v kloubu ve spolupráci s pasivní tuhostí. Pasivní komponenty během protažení kumulují energii, kterou lze následně využít při zkrácení působením aktivních složek (Padua et al., 2006a).

Tuhost dolních končetin je ovlivňována tuhostí kloubů dolních končetin. Farley a Morgenroth (1999) uvádí, že v průběhu submaximálního skoku je výsledná LS ovlivňována především tuhostí hlezenního kloubu. Arampatzis et al. (2001) zjistili, že během skákání na odpruženém povrchu je LS ovlivňována zejména tuhostí kolenního kloubu. Výsledky studie Hobara et al. (2009) naznačují, že v průběhu maximálního skoku tuhost kolenního kloubu ovlivňuje výslednou LS podstatně více, než tuhost hlezenního a kyčelního kloubu. Současně uvádí, že dle výsledků studie lze tuhost kolenního kloubu považovat za determinující faktor LS během maximálního skoku.

Tuhost kloubů dolních končetin ovlivňována elastickými vlastnostmi jednotlivých svalů, kdy na tuhost hlezenního kloubu mají vliv především plantární flexory (Farley & Morgenroth, 1999; Fukashiro & Komi, 1987). Výkon během doskoku závisí na regulaci kolenního kloubu, a to zejména na excentrické funkci extenzorů tohoto kloubu. Kolenní kloub má současně vliv i na výšku skoku, jelikož mu větší rozsah pohybu umožňuje vyšší produkci energie vlivem působení mechanické síly extenzorů



(Arampatzis et al., 2001; Horita et al., 2002). Aktivní stabilizátory kolenního kloubu disponují dlouhými vlákny, velkým objemem a širokým příčným průřezem. Díky těmto morfologickým vlastnostem jsou tyto svaly schopny větší produkce síly než svaly v okolí kyčelního a hlezenního kloubu v průběhu maximálního skoku. Tuhost v oblasti kolenních kloubů tak determinuje tuhost dolních končetin při běhu, sprintu a také během maximálních skoků. Optimální funkce extenzorového aparátu kolenního kloubu tímto způsobem může zajistit zvýšení výkonu při sportovních aktivitách obsahující tyto pohybové komponenty (Hobara et al., 2009).

Ke změnám tuhosti dolních končetin dochází při změně frekvence skoků. Při nárůstu frekvence skoků současně roste LS a dochází k odlišné svalové aktivaci. Zvyšující se frekvence snižuje dobu kontaktu s podložkou, zatímco čas letu se prodlužuje. Se zvýšením frekvence se zvyšuje tuhost v oblasti kyčelního a kolenního kloubu, zatímco v oblasti hlezenního kloubu se prakticky nemění (Hobara et al., 2010; Kuitunen et al., 2011). Lloyd et al. (2012) udává neoptimálnější frekvenci skoků 2,5 Hz, jelikož při této frekvenci je pohybový projev jedince nejvíce podobný pružinovému modelu.

Při hodnocení tuhosti dolních končetin se využívají zejména dynamické pohybové úkony představující pružinový model, kam je řazen například běh nebo skoky. Testována je zejména mechanická tuhost zahrnující vertikální tuhost, tuhost dolních končetin a tuhost kloubu. Využívány jsou především testy submaximální a maximální intenzity skoků. Měření je obvykle prováděno v laboratorních podmínkách s využitím silových plošin. Výsledné hodnoty měření mohou být uváděny jako absolutní LS (ALS) nebo jako relativní LS (RLS), která je normalizována s ohledem na délku DKK a hmotnost testovaného jedince (Granata et al., 2002b; Chelly & Denis, 2001).

Mezi testy hodnotící LS při submaximální intenzitě skoků je řazeno testování 20 opakujících se skoků s využitím kontaktní plošiny a frekvenci skoků od 2 Hz do 2,5 Hz (Lloyd et al., 2009). Dále lze využít skoky prováděné na silové plošině s rukama v bok po dobu 10 sekund se změnou frekvence od 1,8 Hz do 4 Hz, kdy je tato frekvence udržena prostřednictvím elektronického metronomu (Dalleau et al., 2004).

Pro hodnocení LS je možno využít i testy při maximální intenzitě, a to test pěti maximálních skoků prováděný na kontaktní plošině maximální intenzitou a test deseti maximálních skoků, který je realizován na silové plošině s kontaktním kobercem

a rukama v bok, kdy je cílem testovaného udržet co nejvíce extendované dolní končetiny (Dalleau et al., 2004; Laffaye et al., 2016; Lloyd et al., 2009).

Pohlavními rozdíly tuhosti dolních končetin v průběhu růstu a zrání se doposud zabývalo omezené množství studií. Předchozí výzkumy naznačují rozdíly v LS mezi chlapci a dívkami, kdy u chlapců byly zjištěny vyšší hodnoty LS při srovnání s dívkami stejného věku (Blackburn et al., 2004; Granata et al., 2002a; Kitamura et al., 2017). Studie Laffaye et al. (2016) zahrnuje adolescenty ve věku 11–20 let, kteří nemají zkušenost se sportem na soutěžní úrovni. Autoři uvádí významné rozdíly mezi chlapci a dívkami v případě absolutní tuhosti dolních končetin. Vyšší hodnoty LS byly zjištěny zejména u chlapců ve věku 17–18 let. Hewett et al. (2004) udává významný pokles neuromuskulární kontroly v oblasti kolenního kloubu u dívek v období dospívání, což u chlapců zahrnutých ve studii nebylo pozorováno. Z dosavadních zjištění také vyplývá, že LS je u chlapců nižší v porovnání s muži a kvalita neuromuskulárních funkcí se u dětí zvyšuje až do období okolo 15–16 let věku (Giminiani & Visca, 2017; Laffaye et al., 2016; Lloyd et al., 2011, 2012; Oliver & Smith, 2010). Pouze u několika studií zaměřených na dívky autoři došli k protichůdným výsledkům (De Ste Croix, 2012). Vzhledem k omezenému množství publikované literatury ohledně tuhosti dolních končetin u dětí však současná zjištění vyžadují další výzkum (De Ste Croix et al., 2019; Strniště et al., 2019).

### **2.5.2 Reaktivní silový index**

Reaktivní síla je využívána zejména v odhodových a odrazových pohybech. Při tělesném zatížení dochází ke změnám reaktivní síly. Jedná se o schopnost vyprodukovat co největší silový impuls v průběhu SSC. V jednotlivých cyklech protažení a zkrácení svalu se v excentrické fázi ve svalu hromadí elastická energie, která je poté využita v koncentrické fázi. Využití této síly se uplatňuje zejména v plyometrických pohybech, které obsahují výskoky a změny směru bezprostředně po kontaktu s podložkou (Lehnert et al., 2010). SSC lze tedy mimo tuhost dolních končetin hodnotit také pomocí reaktivního silového indexu (RSI). Jedná se o poměr výšky skoku (m) a doby kontaktu s podložkou (s) (Flanagan & Comyns, 2008; Laffaye et al., 2016).

Při měření reaktivní síly se využívají kontaktní podložky, pomocí kterých je vyhodnocována doba kontaktní a bezkontaktní fáze a dále pak výška skoku. Případně je možné využít silové plošiny pro jednotlivé vertikální skoky. Používána je široká škála

skoků, ze kterých se dá dopočítat RSI (Granata et al., 2002a). Reaktivní síla je hodnocena zejména testy při maximální intenzitě skoků. Lze využít test pěti maximálních skoků prováděný na kontaktní plošině maximální intenzitou, test deseti maximálních skoků, který je realizován na silové plošině s kontaktním kobercem a rukama v bok, kdy je cílem testovaného udržet co nejvíce extendované dolní končetiny, skok po seskoku z vyvýšeného místa a skoky prováděné na silové plošině s rukama v bok po dobu 10 sekund se změnou frekvence od 1,8 Hz do 4 Hz, kdy je tato frekvence udržena prostřednictvím elektronického metronomu (Dalleau et al., 2004; Fitzpatrick et al., 2019; Lloyd et al., 2009, 2015). LS a RSI tak tvoří dva nástroje ke zhodnocení změny excentrické a koncentrické kontrakce v průběhu dynamické skokové aktivity (Laffaye et al., 2016).

Bylo zjištěno, že nízké hodnoty RSI mají dopad na neoptimální funkci SSC u sportovců a jsou tak potenciálním rizikovým faktorem při poranění ACL (Lloyd et al., 2009). Tyto předpoklady potvrzuje i longitudinální studie zkoumající rizikové faktory poranění ACL. Autoři studie uvádí, že nízká hodnota RSI byla jedním z osmi hlavních prediktorů poranění ACL (Raschner et al., 2012). Müller et al. (2017) poukazuje na rozdíly v hodnotách RSI u zraněných a nezraněných lyžařů v průběhu růstu a zrání. V důsledku toho dochází k závěru, že RSI se jeví jako nejpředvídatelnější faktor rizika poranění u dospívajících lyžařů. Jiní autoři uvádí, že RSI se zvyšuje s úrovní výkonu, což naznačuje potenciální vliv tréninku nad působení přirozeného vývoje v důsledku růstu a zrání (Flanagan & Comyns, 2008).

Longitudinální studie zaměřené na pohlavní rozdíly funkce SSC nejsou dostupné, a tak jsou současné poznatky založeny na průřezových studiích, což je značně limitující. Ve studii Laffaye et al. (2016) byly u chlapců pozorovány vyšší hodnoty RSI od věku 15–16 let s významnými rozdíly ve věku 17–18 a 19–20 let. Autoři studie uvádí věk 15–16 let jako prahovou hodnotu pohlavní diferenciaci účinnosti SSC. Nedávné studie zaměřené primárně na reakce spojené s únavou při fotbalu a basketbalu u dospívajících chlapců však tyto věkové rozdíly nenachází (De Ste Croix et al., 2019; Lehnert et al., 2018). Studie zabývající se vlivem věku na hodnoty RSI poukazují na postupné zlepšování reaktivní síly během dospívání v důsledku zvýšení motorické kontroly (Lloyd et al., 2011, 2012).

### 3 SHRnutí SYNTÉZY POZNATKŮ

Z výsledků epidemiologických studií je zřejmé, že v týmových sportech dochází v poslední době k nárůstu počtu poranění kolenního kloubu, a to zejména v období adolescence. Současně byl zjištěn mnohonásobně vyšší výskyt poranění u dívek s významným poklesem neuromuskulární kontroly v průběhu růstu a zrání. Na dospívající sportovce jsou kladeny vyšší nároky než v minulosti, je vyžadován intenzivnější trénink pro dosažení vyšší úrovně výkonnosti, což vede ke zvýšení frekvence zranění. Úrazy kolenního kloubu často vyžadují chirurgický zákrok nebo dlouho trvající rehabilitaci s čímž jsou spojeny vysoké ekonomické náklady a celkové zatížení zdravotní péče. V týmových sportech patří mezi nejčastěji poraněné struktury kolenního kloubu přední zkřížený vaz. Poranění předního zkříženého vazy jsou způsobena zejména narušením dynamických stabilizačních mechanismů, což poukazuje na význam ovlivňování těchto modifikovatelných faktorů. Mezi sporty s nejvyšší incidencí poranění kolenního kloubu jsou řazeny zejména týmové sporty jako je například fotbal, basketbal a házená. Součástí těchto sportů jsou změny směru, změny rychlosti, výskoky, kopy, kličky a rotační pohyby, při kterých působí na kolenní kloub vysoké externí síly a které mohou přispívat ke vzniku poranění kolenního kloubu. Při těchto pohybech sportovci využívají cyklus protažení a zkrácení svalu. K jeho uplatnění dochází i při zajištění stability kolenního kloubu a při prevenci poranění. V průběhu růstu a zrání dochází k významným změnám na neuromuskulární úrovni, které tak ovlivňují i funkci cyklu protažení a zkrácení svalu. Tyto změny jsou označovány jako strukturální a neuromuskulární adaptace. Vlivem rozvíjení cyklu protažení a zkrácení svalu v průběhu růstu a zrání tyto změny ovlivňují svalovou akci a dochází tak ke zlepšení neuromuskulárních funkcí. Neuromuskulární kontrolu kolenního kloubu lze hodnotit mnoha způsoby. Jednou z možností je hodnocení neuromuskulární kontroly prostřednictvím vertikálních skoků, které umožňují posoudit účinnost cyklu protažení a zkrácení svalu. Ke sledovaným parametrům je řazena tuhost dolních končetin a reaktivní silový index, které jsou popisovány jako modifikovatelné rizikové faktory a jejich výzkumné sledování by mohlo přispět ke snížení incidence bezkontaktních poranění kolenního kloubu u dospívajících sportovců. Základem managementu poranění kolenního kloubu u mladých sportovců by měly být zejména preventivní tréninkové programy zaměřené na zlepšení neuromuskulární kontroly a techniky, díky kterým by mohlo dojít k podstatnému snížení úrazů kolenního kloubu u sportující mládeže.

## **4 CÍLE**

### **Hlavní cíl**

Cílem práce bylo stanovit potenciální pohlavní rozdíly v neuromuskulárních indikátorech rizika zranění kolenního kloubu u dospívajících v týmových sportech.

### **Dílčí cíle**

1. Identifikovat pohlavní rozdíly v tuhosti dolních končetin a reaktivního silového indexu u dospívajících hráčů a hráček kategorie U14.
2. Identifikovat pohlavní rozdíly v tuhosti dolních končetin a reaktivního silového indexu u dospívajících hráčů a hráček kategorie U16.
3. Porovnat rozdíly v tuhosti dolních končetin a v reaktivním silovém indexu mezi prvním a druhým měřením u dospívajících hráčů a hráček kategorie U14.
4. Porovnat rozdíly v tuhosti dolních končetin a v reaktivním silovém indexu mezi prvním a druhým měřením u dospívajících hráčů a hráček kategorie U16.

### **Výzkumné otázky**

1. Liší se úroveň sledovaných indikátorů mezi hráči a hráčkami v kategorii U14?
2. Liší se úroveň sledovaných indikátorů mezi hráči a hráčkami v kategorii U16?
3. Liší se difference v úrovni sledovaných indikátorů mezi prvním a druhým měřením u hráčů a hráček v kategorii U14?
4. Liší se difference v úrovni sledovaných indikátorů mezi prvním a druhým měřením u hráčů a hráček v kategorii U16?

## 5 METODIKA

Diplomová práce vznikla za podpory projektu grantové agentury České republiky č. GA16-13750S s názvem „Kumulativní efekt únavy na neuromuskulární řízení kolene a riziko zranění u mladých sportovců během růstu a zrání“.

Tento výzkum byl schválen lokální etickou komisí Fakulty tělesné kultury Univerzity Palackého v Olomouci (Příloha 1.). Před zahájením výzkumu byli všichni hráči seznámeni s cílem a metodikou studie, souhlasili s účastí na výzkumu a s použitím získaných dat pro výzkumné účely. Vzhledem k nezletilosti hráčů informovaný souhlas podepsal jejich zákonný zástupce v souladu s Helsinskou deklarací (Příloha 2.).

### 5.1 Výzkumný soubor

Výzkumu se zúčastnilo 149 dospívajících hráčů a hráček. Hodnoceni byli chlapci a dívky ve věku 13 let (soutěžní kategorie U14; dívky: n=39, chlapci: n=44) a 15 let (soutěžní kategorie U16; dívky: n=21, chlapci: n=45). Výzkumný soubor obsahoval hráče a hráčky basketbalu, florbalu, fotbalu a házené, kteří ve svém sportu hráli nejvyšší možnou národní ligu. Účastníci studie v průměru trénovali pět dní v týdnu a během soutěžního období absolvovali obvykle jedno utkání týdně. Kritérii pro zařazení do tohoto výzkumu byla absence vážných poranění v oblasti stehna a kolenního kloubu v posledních šesti měsících před prvním měřením a účast na jednotlivých testováních.

Ve výsledku byla data hodnocena u 51 dívek (U14: n=31, U16 n=20) a 65 chlapců (U14: n=32, U16: n=33). Důvodem pro vyloučení účastníků z výzkumného souboru bylo přerušení tréninků z důvodu zranění trvajícím déle než čtyři týdny v průběhu sledovaného období, absence při testování, změna klubu nebo ukončení smlouvy.

Základní charakteristika hráčů a hráček výzkumného souboru v závislosti na pohlaví, soutěžní kategorii a roku měření je uvedena v Tabulce 1.

## Tabulka 1

### Základní charakteristika hráčů a hráček výzkumného souboru

Parametr	Pohlaví	U14		U16	
		M1	M2	M1	M2
Počet	Dívky	31	31	20	20
	Chlapci	32	32	33	33
Výška (cm)	Dívky	162,4 ± 7,4	164,0 ± 13,6	166,1 ± 5,8	167,3 ± 6,3
	Chlapci	166,0 ± 9,3	172,8 ± 9,5	179,2 ± 7,2	182,0 ± 5,9
Váha (kg)	Dívky	54,4 ± 10,3	59,0 ± 9,2	59,1 ± 7,9	61,5 ± 8,0
	Chlapci	52,6 ± 9,8	60,9 ± 9,7	66,7 ± 9,3	72,8 ± 9,3
Posun od PHV (roky)	Dívky	-0,5 ± 0,8	0,3 ± 0,7	0,9 ± 0,5	1,7 ± 0,6
	Chlapci	-0,1 ± 0,7	0,6 ± 0,7	1,7 ± 0,7	2,7 ± 0,7

Vysvětlivky: U14 – soutěžní kategorie U14; U16 – soutěžní kategorie U16; M1 – první měření; M2 – druhé měření; PHV – vrchol růstového spurtu

## 5.2 Harmonogram měření

Všichni účastníci výzkumu byli měřeni přibližně po 2–3 utkáních na počátku soutěžního období, aby byly minimalizovány případné rozdíly vyskytující se v přípravném nebo přechodném období. Měření bylo provedeno na počátku soutěžních sezón 2016/2017 a 2017/2018. Současně bylo měření provedeno nejméně tři dny po soutěžním utkání a den před testováním hráči nebyli vystaveni pohybové aktivitě s vysokou intenzitou zatížení.

## 5.3 Metodika sběru dat

Délka dolních končetin (DKK), tibie a tělesná výška v sedu a stojí byla měřena pomocí A-226 Anthropometer (Trystom, Olomouc, Česká republika). Tělesná hmotnost byla měřena pomocí Tanita UM-075 váhy (Tanita, Tokio, Japonsko). Aktuální úroveň biologického zrání byla určena pomocí výpočtu dle Mirwald et al. (2002).

Neuromuskulární kontrola kolenního kloubu byla hodnocena pomocí parametrů absolutní tuhost dolních končetin (ALS), relativní tuhost dolních končetin (RLS) a reaktivní silový index (RSI). Tuhost dolních končetin byla vypočtena z charakteristik získaných měřeními na silové plošině PS-2142 (Pasco, Roseville, USA), RSI pak z charakteristik získaných měřeními na výskokovém ergometru FITRO Jumper (Fitronic, Bratislava, Slovensko).

## 5.4 Postup měření

Na začátku každého testování se hráči a hráčky 20 minut rozcvičili. Jednalo se o rozvečnění obdobné rozvečnění probanda před tréninkem nebo utkáním. Součástí byl především běh (vpřed, vzad, stranou) a dynamický strečink (kyvadlové pohyby, ná kroky, výpady do různých stran, výskoky, dřepy), který byl zaměřen převážně na dolní končetiny.

Použitými metodami testování byly dva motorické testy, a to test opakovaných submaximálních vertikálních skoků a test 5 maximálních vertikálních skoků z místa.

### 5.4.1 Test opakovaných submaximálních vertikálních skoků z místa

Tento test slouží ke stanovení absolutní a relativní tuhosti dolních končetin (Lloyd et al., 2009). V průběhu měření měl na sobě testovaný jedinec sportovní obuv. Silová plošina PS-2142 byla na začátku měření zkalibrována. Nejprve byl proband vyzván k zaujetí stoji na silové plošině prostřednictvím pokynu „Nastup si.“. Šířka postoje byla uzpůsobena rovnoměrnému rozložení hmotnosti na obou dolních končetinách. V průběhu testování měl proband ruce v bok, aby test nebyl zásadně ovlivňován horní polovinou těla. Pokyny „Připrav se.“ a „Můžeš.“ byl následně vyzván k provedení 20 opakovaných skoků o submaximální intenzitě s cílem udržet frekvenci 2,5 Hz. Současně jedinec skoky prováděl s minimální flexí kolenních kloubů, s doskokem na stejné místo a s pohledem zaměřeným na fixní bod zajišťující větší stabilitu. Frekvence 2,5 Hz byla udržována mechanickým metronomem Wittner (GmbH & Co. KG, Isny, Německo) a umožnila tak zobrazit typické chování pružinového modelu. Testování bylo provedeno ve třech sériích, kdy první série byla zkušební a další dvě série byly měřené. Pro analýzu byla využita série, která se nejvíce přibližovala požadované frekvenci skoků 2,5 Hz. Z této série nebyly první 4 skoky počítány a využito bylo následujících 10 skoků, které byly provedeny nejbližší frekvenci 2,5 Hz. Měření probíhalo ve skupinách po 3 a mezi jednotlivými sériemi měl testovaný jedinec pauzu 4 minuty (Lloyd et al., 2009).

Absolutní tuhost dolních končetin ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ) byla vypočtena z parametrů tělesné hmotnosti (kg), doby letu (ms) a doby kontaktu (ms). Relativní tuhost dolních končetin byla normalizována podle hmotnosti a délky DKK daného jedince, která byla měřena jako rozdíl mezi výškou ve stoji a sedu. Tyto údaje byly získány z průběhu reakční síly podložky měřené silovou plošinou. Tato metoda je považována za validní a reliabilní



metodu pro děti a dospívající. Absolutní tuhost dolních končetin byla vypočítána podle následujícího vzorce (Dalleau et al., 2004; Lloyd et al., 2009).

$$K_N = \frac{[M \times \pi(T_f + T_c)]}{T_c^2 \times \left[ \left( T_f + \frac{T_c}{\pi} \right) - \left( \frac{T_c}{4} \right) \right]}$$

*Vysvětlivky: M – tělesná hmotnost, T<sub>c</sub> – doba kontaktu (ms), T<sub>f</sub> – doba letu (ms), π – matematická konstanta*

#### **5.4.2 Test 5 maximálních vertikálních skoků z místa**

Tento test slouží ke stanovení reaktivního silového indexu (Laffaye et al., 2016). V průběhu měření měl na sobě testovaný jedinec sportovní obuv. Nejprve byl proband vyzván k zaujetí stoje na výskokovém ergometru FITRO Jumper prostřednictvím pokynu „Nastup si.“. Šířka postoje byla uzpůsobena rovnoměrnému rozložení hmotnosti na obou dolních končetinách. Plošina byla pevně uchycena k zemi pro zaručení bezpečnosti testovaných jedinců. V průběhu testu si proband mohl při skoku pomoci švihem paží. Pokyny „Připrav se.“ a „Můžeš.“ byl následně vyzván k provedení 5 maximálních vertikálních skoků se snahou minimalizovat dobu kontaktu s podložkou a omezit flexi kolen při odrazu. Po posledním doskoku zůstal testovaný jedinec stát na kontaktní plošině a teprve na pokyn sestoupil dolů. Testování bylo provedeno ve třech sériích. Měření probíhalo ve skupinách po 3 a mezi jednotlivými sériemi měl proband pauzu 2 minuty (Dalleau et al., 2004).

První skok v sérii byl využit jako impuls pro další skoky a nebyl započítáván do měření. Z následujících čtyřech skoků byl vypočítán aritmetický průměr. Pro analýzu RSI byla použita nejvyšší průměrná hodnota daného jedince. Tato metoda je považována za validní a reliabilní metodu pro děti a dospívající (Lloyd et al., 2009).

Reaktivní silový index byl vypočten jako poměr výšky skoku (h, m) a doby kontaktu (T<sub>c</sub>, s) (Flanagan & Comyns, 2008).

### **5.5 Statistická analýza dat**

Naměřená data byla statisticky analyzována s využitím softwaru pro analýzu dat Statistica, verze 12 (StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA). Nejdříve byla pomocí testu Kolmogorov-Smirnov zkontrolována normalita rozložení dat. U sledovaných parametrů měření byla provedena základní popisná statistika (aritmetický průměr a směrodatná odchylka). Pro analýzu efektu času a jednotlivých skupin na zkoumané proměnné (pohlaví, věková skupina, ALS/RLS/RSI) byla použita dvoufaktorová ANOVA.

K porovnání ročních změn u věkových skupin byl využit Mann-Whitney U-test. Dále byl využit Scheffe post hoc test pro posouzení významných rozdílů mezi jednotlivými testováními. Velikost účinku byla vyjádřena koeficientem eta squared ( $\eta^2$ ). Velikosti účinků byly klasifikovány jako malé ( $\eta^2 \leq 0,05$ ), střední ( $0,06 \leq \eta^2 \leq 0,13$ ) a velké ( $\eta^2 \geq 0,14$ ). Pro posouzení statistické významnosti rozdílů byla zvolena hladina významnosti  $p \leq 0,05$ .

## 6 VÝSLEDKY

Výsledky měření chlapců a dívek ze soutěžních kategorií U14 i U16 jsou uvedeny v Tabulce 2.

**Tabulka 2**

*Výsledné hodnoty ALS, RLS a RSI (průměrné hodnoty a směrodatné odchylky)*

Parametr	Pohlaví	U14		U16	
		M1	M2	M1	M2
ALS	Dívky	21,4 ± 4,5	22,4 ± 4,0	24,6 ± 5,0	21,9 ± 3,5
	Chlapci	25,4 ± 5,8	23,8 ± 5,8	28,1 ± 5,7	27,9 ± 4,8
RLS	Dívky	30,5 ± 4,6	30,8 ± 4,8	34,1 ± 6,8	28,6 ± 3,9
	Chlapci	36,3 ± 6,2	33,8 ± 6,2	36,9 ± 7,6	34,1 ± 5,0
RSI	Dívky	1,36 ± 0,23	1,45 ± 0,28	1,34 ± 0,24	1,28 ± 0,21
	Chlapci	1,31 ± 0,28	1,95 ± 2,13	1,74 ± 0,33	1,82 ± 0,33

*Vysvětlivky: ALS – absolutní tuhost dolních končetin; RLS – relativní tuhost dolních končetin; RSI – reaktivní silový index; U14 – soutěžní kategorie U14; U16 – soutěžní kategorie U16; M1 – první měření; M2 – druhé měření*

### 6.1 Absolutní tuhost dolních končetin

Výsledky měření ukázaly přítomnost pohlavních rozdílů v ALS u skupiny U14 ( $p = 0,022$ ,  $\eta^2 = 0,084$ ) i u skupiny U16 ( $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,224$ ). Vyšší hodnoty byly zjištěny v obou případech u chlapců v porovnání s dívkami, a to při prvním i druhém měření. Signifikantní pohlavní rozdíly byly u skupiny U14 zjištěny v případě prvního měření ( $p = 0,027$ ), zatímco u skupiny U16 v případě druhého měření ( $p < 0,001$ ). Interakce věku a pohlaví byla významná pouze u skupiny U14 ( $p = 0,030$ ,  $\eta^2 = 0,076$ ). Změny ALS mezi prvním a druhým měřením u chlapců U14 se významně lišily ( $p = 0,013$ ,  $Z = -2,48$ ) od změn u dívek U14. U chlapců došlo k poklesu hodnot, zatímco u dívek se hodnoty nezměnily (Tabulka 2).

### 6.2 Relativní tuhost dolních končetin

V případě RLS byly zjištěny pohlavní rozdíly u skupiny U14 ( $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,195$ ) i u skupiny U16 ( $p = 0,008$ ,  $\eta^2 = 0,128$ ). Vyšší hodnoty byly zjištěny v obou případech u chlapců v porovnání s dívkami, a to při prvním i druhém měření. Významné pohlavní rozdíly byly u skupiny U14 zjištěny v případě prvního měření ( $p = 0,001$ ), zatímco u skupiny U16 v případě druhého měření ( $p = 0,022$ ). Interakce věku a pohlaví nebyla

významná ve skupině U14 ani ve skupině U16. K poklesu RLS mezi prvním a druhým měřením došlo u chlapců U14 ( $p = 0,036$ ,  $Z = -2,09$ ), chlapců U16 ( $p = 0,047$ ,  $Z = -1,99$ ) a dívek U16 ( $p < 0,01$ ,  $Z = -3,63$ ), kdežto u dívek U14 nedošlo k poklesu hodnot (Tabulka 2).

### **6.3 Reaktivní silový index**

Při porovnání hodnot RSI nebyly zjištěny pohlavní rozdíly v případě skupiny U14 ( $p = 0,446$ ,  $\eta^2 = 0,013$ ), zatímco rozdíly byly pozorovány mezi chlapci a dívkami u skupiny U16 ( $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,429$ ). Vyšší hodnoty byly zjištěny u chlapců v porovnání s dívkami při prvním i druhém měření ( $p = 0,001$ ,  $p < 0,001$ ) u kategorie U16. V případě kategorie U14 byly pohlavní rozdíly nevýznamné při prvním i druhém měření. Při prvním měření byly výsledné hodnoty chlapců a dívek téměř shodné ( $p = 0,997$ ) a při druhém měření chlapci dosáhli vyšších hodnot než dívky ( $p = 0,635$ ). Interakce věku a pohlaví nebyla významná ve skupině U14 ani ve skupině U16. Mezi prvním a druhým měřením došlo k nesignifikantnímu nárůstu RSI u chlapců U14 ( $p = 0,280$ ), zatímco u dívek U14 změny nebyly pozorovány ( $p = 1,000$ ). V případě kategorie U16 došlo k nesignifikantnímu nárůstu RSI u chlapců ( $p = 0,459$ ) a nesignifikantnímu poklesu RSI u dívek ( $p = 0,939$ ) (Tabulka 2).

## 7 DISKUZE

V diplomové práci byly u hráčů a hráček týmových sportů kategorií U14 a U16 hodnoceny parametry neuromuskulárního řízení, a to absolutní tuhost dolních končetin, relativní tuhost dolních končetin a reaktivní silový index. Tyto parametry jsou považovány za indikátory rizika poranění kolenního kloubu. Pomocí těchto indikátorů je možné posoudit rozdíly nebo případné změny neuromuskulárního řízení a hodnotit tak i změny funkce SSC v průběhu růstu a zrání. V této práci byli sledováni hráči a hráčky soutěžních kategorií U14 a U16 ve věku 13 a 15 let. Sledovány byly změny vybraných parametrů těchto jedinců po dobu dvou let. Hodnoceny byly pohlavní rozdíly sledovaných parametrů.

Mezi hlavní zjištění práce je možné zařadit přítomnost rozdílů mezi chlapci a dívkami u sledovaných parametrů. U dospívajících hráček ve věku 13–16 let (kategorie U14 i U16) byly zjištěny nižší hodnoty ALS a RLS v porovnání s dospívajícími hráči. V případě hodnot RSI byly signifikantní pohlavní rozdíly zjištěny u hráčů a hráček ve věku 15–16 let (kategorie U16) s vyššími hodnotami ve prospěch chlapců. Pohlavními rozdíly tuhosti dolních končetin a reaktivního silového indexu v průběhu růstu a zrání se doposud zabývalo omezené množství studií. Výsledná zjištění jsou však v souladu s předchozími výzkumy, které naznačují sníženou funkci SSC u dospívajících dívek v porovnání s chlapci (Granata et al., 2002a; Laffaye et al., 2016).

Z výsledků této práce vyplývá, že interakce věku a pohlaví byla významná v případě ALS u skupiny U14. K nesignifikantnímu nárůstu hodnot došlo pouze při hodnocení RSI u chlapců kategorií U14 i U16. U dívek zvýšení hodnot nebylo pozorováno. Výsledky této práce se tak se současnými poznatky shodují pouze částečně. Ze studií zabývajících se vlivem věku na hodnoty vybraných parametrů vyplývá, že tuhost dolních končetin se u dětí postupně zvyšuje až do období adolescence, a adolescenti dosahují nižších hodnot v porovnání s dospělými jedinci (Korff et al., 2009; Laffaye et al., 2016; L. Wang et al., 2004). Stejně tak studie hodnotící změny reaktivního silového indexu v průběhu růstu a zrání poukazují na postupné zlepšování reaktivní síly během adolescence (Laffaye et al., 2016; Lloyd et al., 2009, 2012).

## 7.1 Tuhost dolních končetin

Z uvedených výsledků práce vyplývá, že v průběhu růstu a zrání jsou přítomny u chlapců a dívek rozdíly v oblasti neuromuskulárního řízení. Byly zjištěny pohlavní rozdíly v absolutní i relativní tuhosti dolních končetin v soutěžních kategoriích U14 i U16, přičemž vyšších hodnot dosáhli chlapci při prvním i druhém měření. V procentuálním vyjádření se jednalo o +6,3 % a +18,7 % v případě hodnocení ALS a +19,0 % a +9,7 % při hodnocení RLS u soutěžní kategorie U14. U soutěžní kategorie U16 byla ALS u chlapců vyšší o +14,2 % a +27,4 %, v případě RLS pak o +8,2 % a +19,2 %. U kategorie U14 byla velikost účinku posouzena jako střední pro ALS a velká pro RLS, zatímco u kategorie U16 byla velikost účinku hodnocena jako velká pro ALS a střední pro RLS.

Problematika pohlavních rozdílů v tuhosti dolních končetin je předmětem zkoumání řady studií (Demirbüken et al., 2009; Granata et al., 2002a, 2002b; Hobara et al., 2012; Laffaye et al., 2016; Padua et al., 2005, 2006a; Ward et al., 2019). Mnohé z nich však hodnotí pasivní tuhost jednotlivých kloubů nebo aktivní tuhost svalových skupin (Blackburn et al., 2004; Martín-San Agustín et al., 2021; D. Wang et al., 2015, 2017). Autoři studií se nicméně shodují, že snížená tuhost dolních končetin u dívek může způsobit zvýšenou predispozici k poranění dolních končetin, zejména pak kolenního kloubu. Z tohoto důvodu je třeba zvýšit svalovou sílu a tuhost dolních končetin, kdy tyto faktory mohou pozitivně ovlivnit výkon, ale i snížit riziko poranění.

Hewett et al. (2004) uvádí výrazný pokles neuromuskulární kontroly v oblasti kolenního kloubu u dívek na počátku dospívání. Ueno et al. (2020) poukazuje na sníženou preaktivní aktivitu stabilizátorů kolenního kloubu u dívek spolu se sníženou pasivní tuhostí dolních končetin, která vyžaduje zvýšenou kompenzaci aktivními komponenty. V souladu s výsledky této práce Granata et al. (2002a) udává sníženou aktivní tuhost dolních končetin u sportovkyň, které ve výzkumu dosahovaly 56–73 % hodnot aktivní tuhosti dolních končetin naměřených u sportovců. Stejně tak McMahon et al. (2012) se zabývá problematikou snížené tuhosti dolních končetin u dívek. Udává, že snížení LS u dívek může být predispozicí k poranění dolních končetin, zejména pak ACL.

Ward et al. (2019) se ve studii zabývá primárně rozdíly v tuhosti dolních končetin mezi profesionálními tanečnicemi a hráči týmových sportů (fotbal, basketbal, volejbal, rugby). Z výsledků studie vyplývá, že hráči týmových sportů dosahují vyšších hodnot

tuhosti dolních končetin v porovnání s tanečnicí. Při porovnání výsledků mezi pohlavími u hráčů a hráček týmových sportů hráči dosáhli vyšších hodnot ALS (+ 24 %) v porovnání s hráčkami, v případě RLS však nebyly přítomny pohlavní rozdíly. Současně však uvádí, že po normalizaci ALS na RLS se rozdíly v naměřených hodnotách téměř nevyskytovaly. K podobným výsledkům s vyššími hodnotami ALS ve prospěch mužů dochází i další autoři, a to +18 % (Padua et al., 2005), +16 % (Padua et al., 2006b), +23 % (Hughes & Watkins, 2008). Vyšší LS u mužů v porovnání s ženami uvádějí i Márquez et al. (2017) a D. Wang et al. (2015). Zjištění těchto autorů jsou v souladu s výsledky této práce, a to zejména při porovnání hodnot soutěžní kategorie U16, kde byly vyšší hodnoty ALS u chlapců zjištěny při prvním i druhém měření (+14,2 % a +27,4 %). Je však nutné zmínit, že výše zmíněné studie zahrnují dospělé, nikoliv dospívající sportovce.

Ve studii Demirbüken et al. (2009) jsou zkoumány pohlavní rozdíly v tuhosti dolních končetin v závislosti na měnících se podmínkách. Nejprve byla porovnávána LS při preferované frekvenci skoků, kde muži dosahovali vyšších hodnot LS v porovnání s ženami. Průměrná preferovaná frekvence skoků byla přibližně 2,2 Hz. Poté byly testovány skoky s vysokou frekvencí, kdy měli probandi skoky provádět co nejrychleji, zde došlo k významnému snížení rozdílů v LS mezi muži a ženami. Muži i ženy byli schopni dosáhnout opět přibližně podobné frekvence skoků, a to průměrně 4,16 Hz. Následně byly testovány skoky s přidanou zátěží 10 % váhy daného jedince, kde opět vyšších hodnot LS dosahovali muži. Pohlavními rozdíly v tuhosti dolních končetin při změnách frekvence skoků se zabývá i Hobara et al. (2012). V této studii však byla frekvence skoků předem určena a to na 2,0; 2,5 a 3,0 Hz. I v této studii byly zjištěny pohlavní rozdíly v hodnotách LS ve prospěch mužů. Výsledné hodnoty však byly podobné u všech třech frekvencí. Granata et al. (2002b) hodnotí rozdíly v LS při preferované frekvenci skoků a dále při frekvencích 2,5 a 3,0 Hz. S rostoucí frekvencí skoků docházelo k navyšování LS, vyšší hodnoty však byly ve všech třech případech naměřeny u mužů. Při měření LS pro účely této práce byla využita Frekvence 2,5 Hz, která byla prokázána jako nejbližší hodnota podobná pružinovému modelu (Lloyd et al., 2012).

Hodnocením LS u dospívajících se zabývá studie Laffaye et al. (2016), která hodnotila LS u 147 dívek a 148 chlapců ve věku 11–20 let, kteří se pravidelně neúčastnili sportovních soutěží a sportovali méně než třikrát týdně. Výsledky studie ukazují vyšší hodnoty ALS u chlapců ( $32,7 \pm 13,4 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ) v porovnání s dívkami

( $30,8 \pm 10,3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ), což je ve shodě s výsledky této práce. Účastníci studie byli rozděleni do pěti věkových skupin (11–12, 13–14, 15–16, 17–18 a 19–20 let). Nejvýznamnější rozdíly mezi chlapci a dívkami byly pozorovány ve věkové skupině 17–18 let, kdy hodnoty ALS byly u chlapců o 24,8 % vyšší než u dívek. Po normalizaci hodnot ALS na RLS nebyly v hodnotách chlapců a dívek rozdíly s výjimkou věkové skupiny 17–18 let, ve které chlapci dosáhli vyšších hodnot s větším rozdílem než v ostatních věkových skupinách. V této práci byly hodnoty RLS vyšší u chlapců v případě kategorie U14 i kategorie U16 a ke shodě výsledků tak v tomto případě nedochází.

Další zjištění této práce nenaznačují lineární nárůst LS v závislosti na věku. V případě soutěžní kategorie U14 nedošlo při druhém měření k nárůstu hodnot LS u dívek (–4,7 % ALS, +1 % RLS) ani u chlapců (–6,3 % ALS, –6,9 % RLS). U soutěžní kategorie U16 byly při druhém měření u chlapců hodnoty ALS téměř beze změn (–7,6 % RLS), u dívek došlo k mírnému poklesu hodnot (–11 % ALS, –16,1 % RLS). Naměřené hodnoty ALS tak nejsou v souladu s předpokladem, že bude s nárůstem tělesné hmotnosti docházet k lineárnímu nárůstu ALS pro zachování pohybového chování představující pružinový model (Granata et al., 2002b).

Bylo zjištěno, že k nárůstu LS dochází lineárně s nárůstem tělesné hmoty (Farley et al., 1991; Granata et al., 2002b). Z dosavadních zjištění vyplývá, že v průběhu růstu a zrání se zvyšuje kvalita neuromuskulárních funkcí, a dochází tedy i k nárůstu hodnot LS, a to zejména u chlapců (Giminiani & Visca, 2017; Laffaye et al., 2016; Lloyd et al., 2011, 2012). L. Wang et al. (2004) uvádí, že při srovnání skupin probandů ve věku 6 a 18 let byla zjištěna signifikantně nižší LS u mladší skupiny zahrnuté do studie. Nižších hodnot LS dosahují i dospívající ve srovnání s dospělými jedinci. Oliver a Smith (2010) porovnávají rozdíly v tuhosti dolních u mužů ve věku 19–30 let a chlapců ve věku 11–12 let. Hodnocena byla ALS i RLS při frekvenci skoků 1,5 Hz, preferované frekvenci skoků (přibližně 2 Hz) a 3,0 Hz. Ve všech případech muži dosahovali vyšších hodnot LS v porovnání s chlapci, významnější rozdíly v RLS však byly pozorovány zejména při frekvenci skoků 3 Hz a při preferované frekvenci skoků.

Korff et al. (2009) porovnává LS u skupiny preadolescentů (11–13 let) a adolescentů (16–18 let). V případě ALS skupina adolescentů dosáhla vyšších hodnot v porovnání s mladšími účastníky studie, po normalizaci hodnot na tělesnou hmotnost se však rozdíly téměř nevyskytovaly, což je shodě s nárůstem LS v závislosti na nárůstu tělesné hmoty podle poznatků Granata et al. (2002b). Podobně Lloyd et al. (2011) hodnotí



LS u chlapců ve věku 7–17 let. Z výsledků práce je zřejmé, že u ALS došlo k plynulému nárůstu hodnot v závislosti na věku, kdežto v případě RLS přibližně od věku 13 let již nedošlo k dalšímu nárůstu hodnot. Při porovnání výsledků této práce s poznatky Lloyd et al. (2011) ke shodě nedochází, jelikož v této práci nedošlo k lineárnímu nárůstu hodnot ALS, ale naopak k poklesu. Současně byl pozorován pokles hodnot u chlapců U14, U16 a dívek U16. Ke shodě tak dochází pouze v případě stagnace hodnot RLS u dívek kategorie U14.

Lloyd et al. (2012) hodnotí LS u skupin chlapců ve věku 9, 12 a 15 let. Uvádí, že jedinci ve věku 15 let dosahovali významně vyšších hodnot ALS v porovnání s mladšími věkovými skupinami. Současně ale zjišťuje i signifikantně vyšší hodnoty RLS oproti mladším probandům a naznačuje, že věkové rozdíly v tuhosti dolních končetin tak nemusí být způsobeny pouze antropometrickými faktory, ale jsou vázány na vývojové faktory zahrnující zvyšující se úroveň neuromuskulárního řízení v průběhu růstu a zrání. Zjištění této práce nejsou ve shodě s těmito poznatky Lloyd et al. (2012). Hodnocení LS v průběhu růstu a zrání je i součástí studie Giminiiani a Visca (2017), která zkoumá elitní hráče fotbalu ve věku 13 let po dobu tří let. Z výsledků studie vyplývá, že v období 13–14 let došlo u hráčů k nárůstu LS o 12,9 %, kdežto mezi 14–15 lety věku došlo naopak k mírnému poklesu LS.

Výše zmíněná studie Laffaye et al. (2016) hodnotí také změny LS v průběhu růstu a zrání. V případě ALS docházelo u chlapců k plynulému nárůstu veličin od věkové skupiny 11–12 let ( $24,7 \pm 10,6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ) až po hodnoty  $44,1 \pm 14 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$  u věkové skupiny 18–19 let. Zatímco u dívek byly pozorovány dva vrcholy v dosažených hodnotách ALS, a to ve věku 15–16 let ( $34 \pm 5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a 19–20 let ( $39,4 \pm 11,1 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ), tak u hodnot RLS nebyl rostoucí trend pozorován, což je ve shodě s výsledky této práce. Snížení RLS u dívek ve věku 15–16 let se částečně shoduje se studií De Ste Croix (2012) ve které autoři nezaznamenali významný rozdíl v hodnotách RLS u dívek ve věku 12–17 let a u věkové skupiny 16–17 byl pozorován statisticky nevýznamný pokles v porovnání s mladšími věkovými skupinami.

Z výsledků této práce dále vyplývá, že interakce věku a pohlaví byla významná pouze v případě ALS u dívek soutěžní kategorie U14. V této skupině výzkumného souboru došlo ke snížení ALS s rostoucím věkem u chlapců a ke zvýšení u dívek, tudíž došlo s rostoucím věkem ke snížení rozdílů mezi oběma skupinami. Je však nutné zmínit, že tyto změny v obou případech nebyly velké ( $-6,3 \%$  chlapci a  $+4,7 \%$  dívky). Tyto

výsledky však nejsou v souladu s tvrzením Laffaye et al. (2016) jenž uvádí, že k hlavnímu nárůstu LS dochází od 14 let věku, a to k vyššímu nárůstu ve prospěch chlapců. Předpokladem pro nárůst LS je podle tohoto autora nárůst svalové hmoty, který ovlivňuje hodnoty ALS a v průběhu dospívání se tak bude u chlapců a dívek lišit.

## **7.2 Reaktivní silový index**

Výsledky této práce naznačují rozdíly v RSI mezi chlapci a dívkami. U soutěžní kategorie U14 se pohlavní rozdíly objevily při druhém měření, kdy chlapci dosáhli o 15 % vyšších hodnot než dívky. Rozdíly byly pozorovány i v případě soutěžní kategorie U16, kdy byly hodnoty RSI vyšší u chlapců při prvním (+13 %) i druhém měření (+14,2 %). Tato zjištění jsou tak v souladu s poznatkami, že v průběhu růstu a zrání se rozdíly v hodnotách RSI zvětšují v důsledku hormonálních změn a odlišné neuromuskulární adaptaci u chlapců a dívek (Beunen & Malina, 1988; Radnor et al., 2018).

Z dosavadních zjištění vyplývá, že nízké hodnoty RSI mají dopad na neoptimální funkci SSC u sportovců a jsou tak potenciálním rizikovým faktorem při poranění ACL (Lloyd et al., 2009). Tyto předpoklady potvrzuje i longitudinální studie (Raschner et al., 2012) zkoumající rizikové faktory poranění ACL. Nízká hodnota RSI je těmito autory uváděna jako jeden z osmi hlavních prediktorů poranění ACL. Na souvislost RSI a riziko poranění ACL poukazuje i Müller et al. (2017). V této studii je hodnocen RSI u zraněných a nezraněných lyžařů v průběhu růstu a zrání. Z výsledků studie vyplývá, že RSI se jeví jako nejpředvídatelnější faktor rizika poranění ACL u dospívajících lyžařů.

Longitudinální studie zaměřené na pohlavní rozdíly funkce SSC nejsou dostupné, a tak jsou současné poznatky založeny na průřezových studiích, což je značně limitující. V dostupných studiích však autoři prezentují vyšší hodnoty RSI u mužů v porovnání s ženami, což je v souladu s výsledky této práce. Toto tvrzení potvrzuje ve studii Ebben et al. (2009), přičemž výzkumný soubor zde tvořili sportující jedinci ve věku 20 let. K podobným závěrům dochází i Rubio-Peiretén et al. (2021). Součástí výzkumu Sole et al. (2018) je i hodnocení pohlavních rozdílů modifikovaného RSI u hráčů a hráček tenisu, basketbalu, fotbalu, baseballu ve věku 18–23 let. I v této studii byly zjištěny vyšší hodnoty u mužů, a to o 29,8 %. Tato zjištění jsou ve shodě s výsledky studií Beckham et al. (2019) a Suchomel et al. (2015). Hodnocení modifikovaného RSI je validní a reliabilní metodou k hodnocení funkcí SSC (Kipp et al., 2016; McMahon et al., 2018).

Zjištěné pohlavní rozdíly v hodnotách RSI této práce jsou ve shodě se zjištěním Laffaye et al. (2016), jenž uvádí pohlavní rozdíly v hodnotách RSI u dospívající jedinců ve věku 11–20 let, ačkoliv významnější rozdíly u chlapců a dívek byly pozorovány až ve věku 17 let (+42 % skupina 17–18, +27,2 % skupina 19–20). Současně udávají věk 15–16 let jako prahovou hodnotu pohlavní diference účinnosti SSC. Výsledky této práce poukazují na pohlavní rozdíly již ve věku 15 let. Lze předpokládat, že tyto rozdíly jsou způsobeny větší mírou aktivace neuromuskulárních adaptačních procesů, ke kterým dochází u chlapců v reakci na působení pravidelného tréninkové zatížení. Zjištěné pohlavní rozdíly v hodnotách RSI mohou ovlivňovat výkon jedinců s nižšími hodnotami a mohou být potenciálně vystaveni většímu riziku poranění. Griffin et al. (2006) uvádí, že narůstající rozdíly v síle jsou spojovány s vyšším rizikem poranění ACL u jedinců ve věku 14–18 let. Je však nutné zmínit, že při analýze výsledků této práce nebyla zjištěna významná interakce věku a pohlaví, mezi hráči a hráčkami nebyly pozorovány rozdíly ve změnách hodnot RSI mezi prvním a druhým měřením.

Další zjištění této práce nenaznačují lineární nárůst RSI v závislosti na věku u dívek. U dívek soutěžní kategorie U14 se hodnoty RSI téměř nezměnily a u dívek U16 došlo k nesignifikantnímu poklesu hodnot. U chlapců sledovaných v této práci však došlo k nárůstu RSI o 14,6 % v případě soutěžní kategorie U14 a o 10,5 % u hráčů U16, což je ve shodě s poznatky dalších autorů (Laffaye et al., 2016; Lloyd et al., 2011, 2012).

Flanagan a Comyns (2008) uvádí, že dochází ke zvyšování hodnot RSI v závislosti na zvyšování úrovně výkonu. Naznačují tak, že zvyšování hodnot RSI během růstu a zrání v důsledku zvyšování reaktivní síly a motorické kontroly je ovlivňováno také působením pravidelného tréninku, díky kterému jsou podpořeny neuromuskulární adaptační procesy. Zlepšení účinnosti SSC je způsobeno také změnami nervosvalového systému kam je řazeno zvyšování svalové hmoty, zvětšení průřezu a délky svalových vláken, změna poměru typu zastoupených svalových vláken a svalového uspořádání (Radnor et al., 2018). Oliver a Smith (2010) poukazují na sníženou schopnost dětí využívat dopředné mechanismy, což ovlivňuje negativně funkci SSC. Dopředné řízení je současně ochranným mechanismem před přetížením svalově-šlachové jednotky při kontaktu se zemí. Během růstu a zrání dochází ke zlepšení dopředných mechanismů a tím i ke zlepšení funkce SSC (Lloyd et al., 2012).

Lloyd et al. (2011) hodnotí RSI u chlapců ve věku 7–17 let. Z výsledků práce vyplývá, že v průběhu dospívání dochází k postupnému nárůstu RSI. Ke zvyšování však

nedochází lineárně, nárůst hodnot byl pozorován mezi 10–11, 13–14 a 15–16 letými chlapci, což je v souladu s výsledky této práce. Ve studii Lloyd et al. (2011) byl nicméně pozorován pokles RSI mezi 11–12 letými chlapci, který je autory zdůvodňován obdobím PHV, ve kterém se tito jedinci nacházeli. Období PHV je prezentováno jako období zvýšeného rizika poranění se současným snížením kvality neuromuskulárních funkcí dospívajícího jedince (Johnson et al., 2020; Mirwald et al., 2002). Změny RSI v průběhu růstu a zrání hodnotí Lloyd et al. (2012) také u skupin chlapců ve věku 9, 12 a 15 let. Rovněž zde je možné pozorovat nárůst hodnot RSI, kdy nejvyšších hodnot dosahovali chlapci ve věku 15 let oproti mladším jedincům.

Autoři studie Laffaye et al. (2016) uvádí nárůst hodnot RSI v průběhu růstu a zrání u dívek i chlapců při zkoumání věkových skupin zahrnující dospívající ve věku 11–20 let. Ke zvýšení RSI došlo u dívek mezi skupinou 13–14 a 15–16 letých (+33,7 %), poté ke snížení u skupiny 17–18 letých (–27,4 %) a opět ke zvýšení u skupiny 19–20 letých (+32,2 %). V porovnání nejmladší skupiny (11–12 let) a nejstarší skupiny dívek (19–20 let), však byly hodnoty RSI významně vyšší u skupiny 19–20 ( $1,67 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) oproti skupině 11–12 ( $1,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Při porovnání těchto výsledků se zjištěními této práce se však výsledky neshodují, jelikož u dívek soutěžní kategorie U14 se hodnoty RSI téměř nezměnily a u dívek U16 došlo k nesignifikantnímu poklesu hodnot. U chlapců uvádí (Laffaye et al., 2016) signifikantní nárůst RSI mezi skupinami 13–14 a 15–16 letých (+58,1 %) a mezi skupinami 17–18 a 19–20 letých (+20 %). Při porovnání RSI u nejmladší skupiny (11–12 let) a nejstarší skupiny chlapců (19–20 let), byly hodnoty významně vyšší u skupiny 19–20 ( $2,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) oproti skupině 11–12 ( $1,39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). U hráčů sledovaných v této práci došlo k nárůstu RSI o 14,6 % v případě soutěžní kategorie U14 a o 10,5 % u hráčů U16, což je ve shodě s výsledky studie Laffaye et al. (2016). Tito autoři také uvádí, že zatímco se u chlapců v průběhu růstu a zrání navyšují hodnoty RSI, tak doba kontaktu se po dosažení věku 13–14 let nemění, přičemž dochází ke zvyšování výšky skoku. Lze tak předpokládat zvýšení schopnosti produkce síly během krátkého časového úseku, což může být indikátorem vyššího sportovního výkonu, ale i vyššího rizika poranění.

### **7.3 Limity studie**

Mezi limity této práce je možné zařadit zkoumání pohlavních rozdílů pouze po dobu dvou let. Současně už jedinci prošli obdobím PHV. Je nutné zmínit, že rozdíly ve vybraných parametrech mohly být ovlivněny odlišnostmi jednotlivých sportů (basketbal, fotbal, florbal, házená), jelikož sledované skupiny se mohly lišit specifiky sportovní přípravy a skladbou či intenzitou tréninkové a soutěžní zátěže.

### **7.4 Odpovědi na výzkumné otázky**

#### **1. Liší se úroveň sledovaných indikátorů mezi hráči a hráčkami v kategorii U14?**

Výsledky měření ukázaly přítomnost pohlavních rozdílů v ALS u skupiny U14, a to zejména v případě prvního měření. Při hodnocení RLS byly u skupiny U14 zjištěny pohlavní rozdíly. Rozdíly byly zjištěny u prvního měření. Při porovnání hodnot RSI nebyly zjištěny pohlavní rozdíly. Při prvním měření byly výsledné hodnoty chlapců a dívek téměř shodné a při druhém měření chlapci dosáhli vyšších hodnot než dívky.

#### **2. Liší se úroveň sledovaných indikátorů mezi hráči a hráčkami v kategorii U16?**

Výsledky měření ukázaly přítomnost pohlavních rozdílů v ALS u skupiny U16, a to zejména v případě druhého měření. Při hodnocení RLS byly u skupiny U16 zjištěny pohlavní rozdíly. Rozdíly byly pozorovány v případě druhého měření. Při porovnání hodnot RSI byly zjištěny rozdíly mezi chlapci a dívkami u skupiny U16, a to při prvním i druhém měření.

#### **3. Liší se difference v úrovni sledovaných indikátorů mezi prvním a druhým měřením u hráčů a hráček v kategorii U14?**

Změny ALS mezi prvním a druhým měřením byly významně větší u chlapců ve srovnání s dívkami U14. U chlapců byl zaznamenán pokles hodnot, zatímco u dívek hodnoty stagnovaly. V případě RLS se však difference mezi prvním a druhým měřením mezi pohlavími v kategorii U14 významně nelišila. Mezi prvním a druhým měřením došlo u chlapců U14 k poklesu hodnot RLS, kdežto u dívek byla zaznamenána stagnace hodnot. Rovněž v případě RSI se difference mezi prvním a druhým měřením mezi pohlavími významně nelišila. Mezi prvním a druhým měřením došlo k nevýznamnému nárůstu RSI u chlapců U14, zatímco u dívek změny nebyly pozorovány.

#### **4. Liší se difference v úrovni sledovaných indikátorů mezi prvním a druhým měřením u hráčů a hráček v kategorii U16?**

Diference mezi prvním a druhým měřením mezi pohlavími v kategorii U16 se v případě ALS významně nelišila. U chlapců hodnoty ALS téměř stagnovaly, u dívek došlo k nevýznamnému poklesu hodnot. Rovněž v případě RLS se difference mezi prvním a druhým měřením mezi pohlavími v kategorii U16 signifikantně nelišila. Mezi prvním a druhým měřením došlo k poklesu hodnot RLS u chlapců i dívek. Změny RSI mezi prvním a druhým měřením mezi pohlavími v kategorii U16 nebyly významné. Došlo k nesignifikantnímu nárůstu RSI u chlapců a nesignifikantnímu poklesu RSI u dívek.

## 8 ZÁVĚRY

Mezi hlavní zjištění této práce patří identifikace pohlavních rozdílů v neuromuskulárních indikátorech rizika zranění kolenního kloubu. U dospívajících hráček ve věku 13–16 let (kategorie U14 i U16) byly zjištěny nižší hodnoty ALS a RLS v porovnání s dospívajícími hráči stejného věku. V případě hodnot RSI byly signifikantní pohlavní rozdíly zjištěny pouze u hráčů a hráček ve věku 15–16 let (kategorie U16), kdy vyšší hodnoty byly přítomny u chlapců. Výsledná zjištění jsou v souladu s předchozími výzkumy, které naznačují sníženou funkci SSC u dospívajících dívek v porovnání s chlapci. Při hodnocení difference v úrovni sledovaných indikátorů mezi prvním a druhým měřením u hráčů a hráček byly pozorovány odlišné změny pouze v případě ALS u kategorie U14. U ostatních sledovaných indikátorů se difference mezi prvním a druhým měřením mezi pohlavími významně nelišila u kategorie U14 ani u U16. Nesignifikantní nárůstu hodnot byl pozorován v případě RSI u chlapců kategorie U14 i U16. U ostatních sledovaných parametrů u chlapců i dívek kategorií U14 i U16 byl pozorován nesignifikantní pokles nebo stagnace hodnot. Tato zjištění tak částečně podporují tvrzení, že kvalita neuromuskulárních funkcí s věkem v období růstu a zrání narůstá. Poznatky a výsledky této práce mohou být přínosné pro pochopení problematiky pohlavních rozdílů v průběhu růstu a zrání a podpořit tak identifikaci modifikovatelných rizikových faktorů. Jejich výzkumné sledování by mohlo přispět ke snížení incidence bezkontaktních poranění kolenního kloubu u dospívajících sportovců.

## 9 SOUHRN

Cílem práce bylo identifikovat potenciální pohlavní rozdíly v neuromuskulárních indikátorech rizika zranění kolenního kloubu u dospívajících v týmových sportech. Dílčími cíli pak identifikace pohlavních rozdílů v tuhosti dolních končetin a reaktivním silovém indexu u dospívajících hráčů a hráček kategorie U14 a U16 a porovnání rozdílů v tuhosti dolních končetin a v reaktivním silovém indexu mezi prvním a druhým měřením u dospívajících hráčů a hráček kategorií U14 a U16. V teoretické části práce byla popsána epidemiologie, mechanismy a rizikové faktory poranění kolenního kloubu v průběhu růstu a zrání. Dále byl popsán vliv růstu a zrání na neuromuskulární kontrolu kolenního kloubu, cyklus protažení a zkrácení svalu a vybrané parametry vhodné k hodnocení neuromuskulární kontroly.

Výzkumu se zúčastnili dospívající hráči a hráčky basketbalu, florbalu, fotbalu a házené ve věku 13–15 let, kteří ve svém sportu hráli nejvyšší možnou národní ligu. Neuromuskulární kontrola kolenního kloubu byla hodnocena pomocí parametrů absolutní tuhost dolních končetin (ALS), relativní tuhost dolních končetin (RLS) a reaktivní silový index (RSI). Tuhost dolních končetin byla hodnocena pomocí testu opakovaných submaximálních vertikálních skoků a vypočtena z charakteristik získaných měřením na silové plošině PS-2142 (Pasco, Roseville, USA). RSI byl hodnocen z charakteristik získaných měřením testem 5 maximálních vertikálních skoků z místa na výskokovém ergometru FITRO Jumper (Fitronic, Bratislava, Slovensko). Měření bylo provedeno ve dvou po sobě jdoucích letech přibližně po 2–3 utkáních na počátku soutěžních období, aby byly minimalizovány případné rozdíly vyskytující se v přípravném nebo přechodném období.

Mezi hlavní zjištění práce lze zařadit přítomnost rozdílů mezi chlapci a dívkami u sledovaných parametrů. U dospívajících hráček ve věku 13–16 let (kategorie U14 i U16) byly zjištěny nižší hodnoty ALS a RLS v porovnání s dospívajícími hráči. V případě hodnot RSI byly zjištěny signifikantní rozdíly mezi hráči a hráčkami ve věku 15–16 let (kategorie U16) s vyššími hodnotami ve prospěch chlapců. Diference mezi prvním a druhým měřením mezi pohlavími byla zjištěna pouze v případě ALS u kategorie U14. Mezi prvním a druhým měřením byl zjištěn nesignifikantní nárůst hodnot RSI u chlapců kategorie U14 a kategorie U16. U dívek U14 ani U16 zvýšení hodnot RSI nebylo pozorováno. Současně nedošlo k nárůstu hodnot ALS a RLS u chlapců ani dívek kategorií U14 a U16.



## 10 SUMMARY

The aim of the thesis was to identify potential gender differences in neuromuscular indicators of the risk of knee injury in adolescents in team sports. The sub-objectives were to identify gender differences in leg stiffness and reactive strength index in adolescents U14 and U16 and to compare differences in leg stiffness and reactive strength index between the first and second measurement in adolescents and U14 and U16 players. The theoretical part of the work describes the epidemiology, mechanisms and risk factors of knee injuries during growth and maturation. Furthermore, the effect of growth and maturation on the neuromuscular control of the knee joint, the stretch-shortening cycle and selected parameters suitable for the evaluation of neuromuscular control were described.

The research involved adolescent players of basketball, floorball, football and handball aged 13-15, who played the highest possible national league in their sport. Neuromuscular control of the knee joint was evaluated using the parameters absolute leg stiffness (ALS), relative leg stiffness (RLS) and reactive strength index (RSI). Leg stiffness was assessed using a sub-maximal bilateral hopping protocol and calculated from characteristics obtained by measurements on a PS-2142 force plate (Pasco, Roseville, USA). RSI was evaluated from the characteristics obtained by measuring the 5 maximum hop test, which was performed on a mobile contact mat (FITRO Jumper, Fitronic, Bratislava, Slovakia). The measurements were performed in two consecutive years after approximately 2-3 matches at the beginning of the competition periods, in order to minimize any differences occurring during the preparation or transition period.

The main findings of the thesis include the presence of differences between boys and girls in the monitored parameters. Adolescent players aged 13–16 years (categories U14 and U16) had lower ALS and RLS values compared to adolescent players. In the case of RSI values, significant differences were found between players aged 15–16 (category U16) with higher values in favor of boys. The difference between the first and second measurement between boys and girls was found only in the case of ALS in category U14. Between the first and second measurement, a non-significant increase in RSI values was found in boys in category U14 and category U16. No increase in RSI values was observed in U14 or U16 girls. At the same time, there was no increase in ALS and RLS values in boys or girls in the U14 and U16 categories.

## 11 REFERENČNÍ SEZNAM

- Abe, T., Kumagai, K., & Brechue, W. (2000). Fascicle length of leg muscles is greater in sprinters than distance runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 32, 1125–1129. <https://doi.org/10.1097/00005768-200006000-00014>
- Adirim, T. A., & Cheng, T. L. (2003). Overview of injuries in the young athlete. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 33(1), 75–81. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333010-00006>
- Ahmad, C. S., Clark, A. M., Heilmann, N., Schoeb, J. S., Gardner, T. R., & Levine, W. N. (2006). Effect of gender and maturity on quadriceps-to-hamstring strength ratio and anterior cruciate ligament laxity. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(3), 370–374. <https://doi.org/10.1177/0363546505280426>
- Allen, M. K., & Glasoe, W. M. (2000). Metrecom measurement of navicular drop in subjects with anterior cruciate ligament injury. *Journal of Athletic Training*, 35(4), 403–406.
- Anderson, T., Wasserman, E. B., & Shultz, S. J. (2019). Anterior Cruciate Ligament Injury Risk by Season Period and Competition Segment: An Analysis of National Collegiate Athletic Association Injury Surveillance Data. *Journal of Athletic Training*, 54(7), 787–795. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-501-17>
- Arampatzis, A., Brüggemann, G.-P., & Klapsing, G. M. (2001). Leg stiffness and mechanical energetic processes during jumping on a sprung surface. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(6), 923–931. Scopus. <https://doi.org/10.1097/00005768-200106000-00011>
- Arendt, E. A., Bershadsky, B., & Agel, J. (2002). Periodicity of noncontact anterior cruciate ligament injuries during the menstrual cycle. *The Journal of Gender-Specific Medicine: JGSM: The Official Journal of the Partnership for Women's Health at Columbia*, 5(2), 19–26.
- Arendt, E., & Dick, R. (1995). Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature. *The American Journal of Sports Medicine*, 23(6), 694–701. <https://doi.org/10.1177/036354659502300611>
- Armstrong, N., & Welsman, J. (1996). *Young People and Physical Activity* (1st edition). Oxford University Press.

- Asai, H., & Aoki, J. (1996). Force development of dynamic and static contractions in children and adults. *International Journal of Sports Medicine*, *17*(3), 170–174. <https://doi.org/10.1055/s-2007-972827>
- Assaiante, C. (1998). Development of Locomotor Balance Control in Healthy Children. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *22*(4), 527–532. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(97\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(97)00040-7)
- Assaiante, C., Mallau, S., Viel, S., Jover, M., & Schmitz, C. (2005). Development of postural control in healthy children: A functional approach. *Neural Plasticity*, *12*(2–3), 109–118; discussion 263-272. <https://doi.org/10.1155/NP.2005.109>
- Ayala, F., De Ste Croix, M., Sainz de Baranda, P., & Santonja, F. (2012). Absolute reliability of hamstring to quadriceps strength imbalance ratios calculated using peak torque, joint angle-specific torque and joint ROM-specific torque values. *International Journal of Sports Medicine*, *33*(11), 909–916. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1311586>
- Azizi, E., Brainerd, E. L., & Roberts, T. J. (2008). Variable gearing in pennate muscles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(5), 1745–1750. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709212105>
- Bailey, A. J., Paul, R. G., & Knott, L. (1998). Mechanisms of maturation and ageing of collagen. *Mechanisms of Ageing and Development*, *106*(1–2), 1–56. [https://doi.org/10.1016/s0047-6374\(98\)00119-5](https://doi.org/10.1016/s0047-6374(98)00119-5)
- Beckett, M. E., Massie, D. L., Bowers, K. D., & Stoll, D. A. (1992). Incidence of Hyperpronation in the ACL Injured Knee: A Clinical Perspective. *Journal of Athletic Training*, *27*(1), 58–62.
- Beckham, G. K., Suchomel, T. J., Sole, C. J., Bailey, C. A., Grazer, J. L., Kim, S. B., Talbot, K. B., & Stone, M. H. (2019). Influence of Sex and Maximum Strength on Reactive Strength Index-Modified. *Journal of Sports Science & Medicine*, *18*(1), 65–72.
- Bednařík, J., Růžička, E., & Ambler, Z. (2010). *Klinická neurologie*. (Krajská knihovna Karlovy Vary). Praha : Triton, 2010; Souborný katalog České Republiky / Union Catalogue of the Czech Republic. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat05607a&AN=ucr.006444635&lang=cs>

- Bell, R. D., MacDougall, J. D., Billeter, R., & Howald, H. (1980). Muscle fiber types and morphometric analysis of skeletal muscle in six-year-old children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *12*(1), 28–31.
- Beunen, G., & Malina, R. M. (1988). Growth and physical performance relative to the timing of the adolescent spurt. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *16*, 503–540.
- Binzoni, T., Bianchi, S., Hanquinet, S., Kaelin, A., Sayegh, Y., Dumont, M., & Jéquier, S. (2001). Human *gastrocnemius medialis* Pennation Angle as a Function of Age: From Newborn to the Elderly. *Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science*, *20*(5), 293–298. <https://doi.org/10.2114/jpa.20.293>
- Blackburn, J. T., Riemann, B. L., Padua, D. A., & Guskiewicz, K. M. (2004). Sex comparison of extensibility, passive, and active stiffness of the knee flexors. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, *19*(1), 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2003.09.003>
- Blazevich, A. J. (2006). Effects of physical training and detraining, immobilisation, growth and aging on human fascicle geometry. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *36*(12), 1003–1017. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636120-00002>
- Blazevich, A. J., Horne, S., Cannavan, D., Coleman, D. R., & Aagaard, P. (2008). Effect of contraction mode of slow-speed resistance training on the maximum rate of force development in the human quadriceps. *Muscle & Nerve*, *38*(3), 1133–1146. <https://doi.org/10.1002/mus.21021>
- Blazevich, A. J., & Sharp, N. C. C. (2005). Understanding muscle architectural adaptation: Macro- and micro-level research. *Cells, Tissues, Organs*, *181*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1159/000089964>
- Boden, B. P., Dean, G. S., Feagin, J. A., & Garrett, W. E. (2000). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics*, *23*(6), 573–578.
- Bojsen-Møller, J., Magnusson, S. P., Rasmussen, L. R., Kjaer, M., & Aagaard, P. (2005). Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, *99*(3), 986–994. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01305.2004>
- Bompa, T., & Buzzichelli, C. (2018). *Periodization-6th Edition: Theory and Methodology of Training*. Human Kinetics.
- Bompa, T. O. (1999). *Periodization training for sports*. Human Kinetics.

- Boo, H., Howe, T., & Koh, J. S. (2020). Effect of leg dominance on early functional outcomes and return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of Orthopaedic Surgery*, 28(1), 2309499019896232. <https://doi.org/10.1177/2309499019896232>
- Borotikar, B. S., Newcomer, R., Koppes, R., & McLean, S. G. (2008). Combined effects of fatigue and decision making on female lower limb landing postures: Central and peripheral contributions to ACL injury risk. *Clinical Biomechanics*, 23(1), 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2007.08.008>
- Bottinelli, R., Canepari, M., Pellegrino, M. A., & Reggiani, C. (1996). Force-velocity properties of human skeletal muscle fibres: Myosin heavy chain isoform and temperature dependence. *The Journal of Physiology*, 495 ( Pt 2), 573–586. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1996.sp021617>
- Bourne, M. N., Webster, K. E., & Hewett, T. E. (2019). Is Fatigue a Risk Factor for Anterior Cruciate Ligament Rupture? *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 49(11), 1629–1635. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01134-5>
- Bradley, B., Johnson, D., Hill, M., McGee, D., Kana-Ah, A., Sharpin, C., Sharp, P., Kelly, A., Cumming, S. P., & Malina, R. M. (2019). Bio-banding in academy football: Player’s perceptions of a maturity matched tournament. *Annals of Human Biology*, 46(5), 400–408. <https://doi.org/10.1080/03014460.2019.1640284>
- Brooks, G. A., Fahey, T. D., & White, T. P. (1996). Exercise physiology: Human bioenergetics and its applications. *Exercise Physiology: Human Bioenergetics and Its Applications.*, Ed. 2. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19961408241>
- Bult, H. J., Barendrecht, M., & Tak, I. J. R. (2018). Injury Risk and Injury Burden Are Related to Age Group and Peak Height Velocity Among Talented Male Youth Soccer Players. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 6(12), 2325967118811042. <https://doi.org/10.1177/2325967118811042>
- Carling, C., Orhant, E., & LeGall, F. (2010). Match injuries in professional soccer: Inter-seasonal variation and effects of competition type, match congestion and positional role. *International Journal of Sports Medicine*, 31(4), 271–276. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1243646>

- Cavagna, G. A., Franzetti, P., Heglund, N. C., & Willems, P. (1988). The determinants of the step frequency in running, trotting and hopping in man and other vertebrates. *The Journal of Physiology*, 399, 81–92. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1988.sp017069>
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2010). Changes in the eccentric phase contribute to improved stretch-shorten cycle performance after training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(9), 1731–1744. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181d392e8>
- Croce, R. V., Russell, P. J., Swartz, E. E., & Decoster, L. C. (2004). Knee muscular response strategies differ by developmental level but not gender during jump landing. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, 44(6), 339–348.
- Croisier, J.-L., & Crielaard, J.-M. (2000). Hamstring muscle tear with recurrent complaints: An isokinetic profile. *Isokinetics and Exercise Science*, 8(3), 175–180. <https://doi.org/10.3233/IES-2000-0048>
- Cumming, S. P., Brown, D. J., Mitchell, S., Bunce, J., Hunt, D., Hedges, C., Crane, G., Gross, A., Scott, S., Franklin, E., Breakspear, D., Dennison, L., White, P., Cain, A., Eisenmann, J. C., & Malina, R. M. (2018). Premier League academy soccer players' experiences of competing in a tournament bio-banded for biological maturation. *Journal of Sports Sciences*, 36(7), 757–765. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1340656>
- Čoh, M., Živković, V., & Žvan, M. (2016). Biodynamic Analysis of the Vertical Jumping. *Research in Physical Education, Sport & Health*, 5(2), 3–10.
- Dalleau, G., Belli, A., Viale, F., Lacour, J. R., & Bourdin, M. (2004). A simple method for field measurements of leg stiffness in hopping. *International Journal of Sports Medicine*, 25(3), 170–176. <https://doi.org/10.1055/s-2003-45252>
- Dam, M. V., Halleman, A., & Aerts, P. (2009). Growth of segment parameters and a morphological classification for children between 15 and 36 months. *Journal of Anatomy*, 214(1), 79–90. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2008.01016.x>
- Dauty, M., Potiron-Josse, M., & Rochcongar, P. (2003). Identification of previous hamstring muscle injury by isokinetic concentric and eccentric torque measurement in elite soccer player. *Isokinetics and Exercise Science*, 11(3), 139–144. <https://doi.org/10.3233/IES-2003-0140>

- Davies, P. L., & Rose, J. D. (2000). Motor Skills of Typically Developing Adolescents. *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics*, 20(1), 19–42. [https://doi.org/10.1080/J006v20n01\\_03](https://doi.org/10.1080/J006v20n01_03)
- De Ste Croix, M. B. A. (2007). Advances in Paediatric Strength Assessment: Changing Our Perspective on Strength Development. *Journal of Sports Science & Medicine*, 6(3), 292–304.
- De Ste Croix, M. B. A. (2012). *The effect of football specific fatigue on dynamic knee stability in female youth players (UEFA Research Grant Programme Final Report)*.
- De Ste Croix, M. B. A., Hughes, J. D., Lloyd, R. S., Oliver, J. L., & Read, P. J. (2017). Leg Stiffness in Female Soccer Players: Intersession Reliability and the Fatiguing Effects of Soccer-Specific Exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(11), 3052–3058. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001715>
- De Ste Croix, M., Lehnert, M., Maixnerová, E., Zaatari, A., Svoboda, Z., Botek, M., Vařeková, R., & Stastny, P. (2019). Does maturation influence neuromuscular performance and muscle damage after competitive match-play in youth male soccer players? *European Journal of Sport Science*, 19, 1–10. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1575913>
- Demirbüken, I., Yurdalan, S. U., Savelberg, H., & Meijer, K. (2009). Gender specific strategies in demanding hopping conditions. *Journal of Sports Science & Medicine*, 8(2), 265–270.
- DeMorat, G., Weinhold, P., Blackburn, T., Chudik, S., & Garrett, W. (2004). Aggressive quadriceps loading can induce noncontact anterior cruciate ligament injury. *The American Journal of Sports Medicine*, 32(2), 477–483. <https://doi.org/10.1177/0363546503258928>
- Domzalski, M., Grzelak, P., & Gabos, P. (2010). Risk factors for Anterior Cruciate Ligament injury in skeletally immature patients: Analysis of intercondylar notch width using Magnetic Resonance Imaging. *International Orthopaedics*, 34(5), 703–707. <https://doi.org/10.1007/s00264-010-0987-7>
- Dotan, R., Mitchell, C., Cohen, R., Klentrou, P., Gabriel, D., & Falk, B. (2012). Child—Adult Differences in Muscle Activation—A Review. *Pediatric exercise science*, 24(1), 2–21.

- Dvir, Z., Eger, G., Halperin, N., & Shklar, A. (1989). Thigh muscle activity and anterior cruciate ligament insufficiency. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*, 4(2), 87–91. [https://doi.org/10.1016/0268-0033\(89\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0268-0033(89)90044-2)
- Earp, J. E., Joseph, M., Kraemer, W. J., Newton, R. U., Comstock, B. A., Fragala, M. S., Dunn-Lewis, C., Solomon-Hill, G., Penwell, Z. R., Powell, M. D., Volek, J. S., Denegar, C. R., Häkkinen, K., & Maresh, C. M. (2010). Lower-body muscle structure and its role in jump performance during squat, countermovement, and depth drop jumps. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(3), 722–729. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181d32c04>
- Ebben, W. P., Flanagan, E., & Jensen, R. L. (2009). Bilateral Facilitation and Laterality during the Countermovement Jump. *Perceptual and Motor Skills*, 108(1), 251–258. <https://doi.org/10.2466/pms.108.1.251-258>
- Ekstrand, J., Hägglund, M., & Waldén, M. (2011). Injury incidence and injury patterns in professional football: The UEFA injury study. *British Journal of Sports Medicine*, 45(7), 553–558. <https://doi.org/10.1136/bjism.2009.060582>
- Emery, C. A. (2005). Injury prevention and future research. *Medicine and Sport Science*, 49, 170–191. <https://doi.org/10.1159/000085396>
- Ergün, M., İşlegen, C., & Taşkıran, E. (2004). A cross-sectional analysis of sagittal knee laxity and isokinetic muscle strength in soccer players. *International Journal of Sports Medicine*, 25(8), 594–598. <https://doi.org/10.1055/s-2004-821116>
- Ergün, Metin, Denerel, H., Binnet, M., & Ertat, K. (2013). Injuries in elite youth football players: A prospective three-year study. *Acta orthopaedica et traumatologica turcica*, 47, 339–346.
- Evangelidis, P. E., Massey, G. J., Pain, M. T. G., & Folland, J. P. (2016). Strength and size relationships of the quadriceps and hamstrings with special reference to reciprocal muscle balance. *European Journal of Applied Physiology*, 116(3), 593–600. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3321-7>
- Falk, B., Usselman, C., Dotan, R., Brunton, L., Klentrou, P., Shaw, J., & Gabriel, D. (2009). Child-adult differences in muscle strength and activation pattern during isometric elbow flexion and extension. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme*, 34(4), 609–615. <https://doi.org/10.1139/H09-020>



- Farley, C. T., Blickhan, R., Saito, J., & Taylor, C. R. (1991). Hopping frequency in humans: A test of how springs set stride frequency in bouncing gaits. *Journal of Applied Physiology*, 71(6), 2127–2132. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.71.6.2127>
- Farley, C. T., Glasheen, J., & McMahon, T. A. (1993). Running springs: Speed and animal size. *Journal of Experimental Biology*, 185(1), 71–86.
- Farley, C. T., & Morgenroth, D. C. (1999). Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *Journal of Biomechanics*, 32(3), 267–273. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(98\)00170-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(98)00170-5)
- Faunø, P., & Wulff Jakobsen, B. (2006). Mechanism of anterior cruciate ligament injuries in soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 27(1), 75–79. <https://doi.org/10.1055/s-2005-837485>
- Ferry, T., Bergström, U., Hedström, E. M., Lorentzon, R., & Zeisig, E. (2014). Epidemiology of acute knee injuries seen at the Emergency Department at Umeå University Hospital, Sweden, during 15 years. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, 22(5), 1149–1155. <https://doi.org/10.1007/s00167-013-2555-3>
- Fitzpatrick, J. F., Akenhead, R., Russell, M., Hicks, K. M., & Hayes, P. R. (2019). Sensitivity and reproducibility of a fatigue response in elite youth football players. *Science and Medicine in Football*, 3(3), 214–220. <https://doi.org/10.1080/24733938.2019.1571685>
- Flanagan, E. P., & Comyns, T. M. (2008). The Use of Contact Time and the Reactive Strength Index to Optimize Fast Stretch-Shortening Cycle Training. *Strength & Conditioning Journal*, 30(5), 32–38. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e318187e25b>
- Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). The adaptations to strength training: Morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(2), 145–168. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737020-00004>
- Ford, K. R., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2003). Valgus knee motion during landing in high school female and male basketball players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(10), 1745–1750. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000089346.85744.D9>

- Ford, K. R., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2010). Longitudinal Effects of Maturation on Lower Extremity Joint Stiffness in Adolescent Athletes. *The American journal of sports medicine*, 38(9), 1829–1837. <https://doi.org/10.1177/0363546510367425>
- Ford, K. R., Myer, G. D., Schmitt, L. C., Uhl, T. L., & Hewett, T. E. (2011). Preferential quadriceps activation in female athletes with incremental increases in landing intensity. *Journal of Applied Biomechanics*, 27(3), 215–222. <https://doi.org/10.1123/jab.27.3.215>
- Ford, K. R., Shapiro, R., Myer, G. D., Bogert, A. J. van den, & Hewett, T. E. (2010). Longitudinal Sex Differences during Landing in Knee Abduction in Young Athletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 42(10), 1923–1931. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181dc99b1>
- Frost, G., Dowling, J., Dyson, K., & Bar-Or, O. (1997). Cocontraction in three age groups of children during treadmill locomotion. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 7(3), 179–186. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(97\)84626-3](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(97)84626-3)
- Frost, Gail, Bar-Or, O., Dowling, J., & Dyson, K. (2002). Explaining differences in the metabolic cost and efficiency of treadmill locomotion in children. *Journal of Sports Sciences*, 20(6), 451–461. <https://doi.org/10.1080/02640410252925125>
- Fukashiro, S., & Komi, P. V. (1987). Joint Moment and Mechanical Power Flow of the Lower Limb During Vertical Jump. *International Journal of Sports Medicine*, 08(S 1), S15–S21. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025699>
- Fukunaga, T., Miyatani, M., Tachi, M., Kouzaki, M., Kawakami, Y., & Kanehisa, H. (2001). Muscle volume is a major determinant of joint torque in humans. *Acta Physiologica Scandinavica*, 172(4), 249–255. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.2001.00867.x>
- Gage, B. E., McIlvain, N. M., Collins, C. L., Fields, S. K., & Comstock, R. D. (2012). Epidemiology of 6.6 million knee injuries presenting to United States emergency departments from 1999 through 2008. *Academic Emergency Medicine: Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, 19(4), 378–385. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2012.01315.x>
- Giminiani, R. D., & Visca, C. (2017). Explosive strength and endurance adaptations in young elite soccer players during two soccer seasons. *PLOS ONE*, 12(2), e0171734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171734>

- Gisolfi, C. V., & Lamb, D. R. (1989). Perspectives in exercise and sports medicine. Vol. 2: Youth, exercise and sport. Indianapolis: Benchmark Press. 1989. *American Journal of Human Biology*, 2(3), 331–333. <https://doi.org/10.1002/ajhb.1310020316>
- Granata, K. P., Wilson, S. E., & Padua, D. A. (2002a). Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part I. Quantification in controlled measurements of knee joint dynamics. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 12(2), 119–126. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(02\)00002-0](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(02)00002-0)
- Granata, K. P., Wilson, S. E., & Padua, D. A. (2002b). Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part II. Quantification of leg stiffness during functional hopping tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 12(2), 127–135. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(02)00003-2)
- Grassi, A., Macchiarella, L., Filippini, M., Lucidi, G. A., Villa, F. D., & Zaffagnini, S. (2019). Epidemiology of Anterior Cruciate Ligament Injury in Italian First Division Soccer Players: *Sports Health*. <https://doi.org/10.1177/1941738119885642>
- Gray, A. M., Gugala, Z., & Baillargeon, J. G. (2016). Effects of Oral Contraceptive Use on Anterior Cruciate Ligament Injury Epidemiology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(4), 648–654. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000806>
- Gregor, R. J., Cavanagh, P. R., & LaFortune, M. (1985). Knee flexor moments during propulsion in cycling-A creative solution to Lombard's Paradox. *Journal of Biomechanics*, 18(5), 307–316. Scopus. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(85\)90286-6](https://doi.org/10.1016/0021-9290(85)90286-6)
- Griffin, L. Y., Albohm, M. J., Arendt, E. A., Bahr, R., Beynnon, B. D., Demaio, M., Dick, R. W., Engebretsen, L., Garrett, W. E., Hannafin, J. A., Hewett, T. E., Huston, L. J., Ireland, M. L., Johnson, R. J., Lephart, S., Mandelbaum, B. R., Mann, B. J., Marks, P. H., Marshall, S. W., ... Yu, B. (2006). Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries: A review of the Hunt Valley II meeting, January 2005. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(9), 1512–1532. <https://doi.org/10.1177/0363546506286866>

- Grosset, J. F., Mora, I., Lambertz, D., & Pérot, C. (2008). Voluntary activation of the triceps surae in prepubertal children. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 18(3), 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2006.11.002>
- Grosset, J.-F., Mora, I., Lambertz, D., & Perot, C. (2005). Age-related changes in twitch properties of plantar flexor muscles in prepubertal children. *Pediatric Research*, 58(5), 966–970. <https://doi.org/10.1203/01.PDR.0000181375.61935.7D>
- Grosset, J.-F., Piscione, J., Lambertz, D., & Pérot, C. (2009). Paired changes in electromechanical delay and musculo-tendinous stiffness after endurance or plyometric training. *European Journal of Applied Physiology*, 105(1), 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0882-8>
- Halin, R., Germain, P., Bercier, S., Kapitaniak, B., & Buttelli, O. (2003). Neuromuscular response of young boys versus men during sustained maximal contraction. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(6), 1042–1048. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000069407.02648.47>
- Hamill, J., Knutzen, K., & Derrick, T. R. (2015). *Biomechanical basis of human movement* (4th edition). Wolters Kluwer.
- Harrison, A. D., Ford, K. R., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2011). Sex differences in force attenuation: A clinical assessment of single-leg hop performance on a portable force plate. *British Journal of Sports Medicine*, 45(3), 198–202. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.061788>
- Heiderscheit, B. C., Hamill, J., & Caldwell, G. E. (2000). Influence of Q-angle on lower-extremity running kinematics. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 30(5), 271–278. <https://doi.org/10.2519/jospt.2000.30.5.271>
- Henchoz, Y., Malatesta, D., Gremion, G., & Belli, A. (2006). Effects of the transition time between muscle-tendon stretch and shortening on mechanical efficiency. *European Journal of Applied Physiology*, 96(6), 665–671. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-0124-2>
- Henry, J. C., & Kaeding, C. (2001). Neuromuscular differences between male and female athletes. *Current Women's Health Reports*, 1(3), 241–244.
- Herzberg, S. D., Motu'apuaka, M. L., Lambert, W., Fu, R., Brady, J., & Guise, J.-M. (2017). The Effect of Menstrual Cycle and Contraceptives on ACL Injuries and Laxity: A Systematic Review and Meta-analysis: *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1177/2325967117718781>

- Hewett, Stroupe, A. L., Nance, T. A., & Noyes, F. R. (1996). Plyometric training in female athletes. Decreased impact forces and increased hamstring torques. *The American Journal of Sports Medicine*, 24(6), 765–773. <https://doi.org/10.1177/036354659602400611>
- Hewett, T. E. (2000). Neuromuscular and hormonal factors associated with knee injuries in female athletes. Strategies for intervention. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 29(5), 313–327. <https://doi.org/10.2165/00007256-200029050-00003>
- Hewett, T., Shultz, S., & Griffin, L. (2007). *Understanding and Preventing Noncontact ACL Injuries*. Human Kinetics 1.
- Hewett, Timothy E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2004). Decrease in neuromuscular control about the knee with maturation in female athletes. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 86(8), 1601–1608. <https://doi.org/10.2106/00004623-200408000-00001>
- Hewett, Timothy E., Myer, G. D., & Ford, K. R. (2017). Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes: Part 1, Mechanisms and Risk Factors. *The American Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1177/0363546505284183>
- Hewett, Timothy E., Myer, G. D., Ford, K. R., Paterno, M. V., & Quatman, C. E. (2016). Mechanisms, prediction, and prevention of ACL injuries: Cut risk with three sharpened and validated tools. *Journal of Orthopaedic Research*, 34(11), 1843–1855. <https://doi.org/10.1002/jor.23414>
- Hicks, K. M., Onambele-Pearson, G. L., Winwood, K., & Morse, C. I. (2013). Gender differences in fascicular lengthening during eccentric contractions: The role of the patella tendon stiffness. *Acta Physiologica*, 209(3), 235–244. <https://doi.org/10.1111/apha.12159>
- Hirtz, P., & Starosta, W. (2002). Sensitive and critical periods of motor co-ordination development and its relation to motor learning. *Journal of Human Kinetics*, 7, 19–28.
- Hobara, H., Kanosue, K., & Suzuki, S. (2007). Changes in muscle activity with increase in leg stiffness during hopping. *Neuroscience Letters*, 418(1), 55–59. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.02.064>
- Hobara, H., Kato, E., Kobayashi, Y., & Ogata, T. (2012). Sex differences in relationship between passive ankle stiffness and leg stiffness during hopping. *Journal of Biomechanics*, 45(16), 2750–2754. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.09.008>

- Hobara, H., Kimura, K., Omuro, K., Gomi, K., Muraoka, T., Iso, S., & Kanosue, K. (2008). Determinants of difference in leg stiffness between endurance- and power-trained athletes. *Journal of Biomechanics*, *41*(3), 506–514. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.10.014>
- Hobara, H., Kimura, K., Omuro, K., Gomi, K., Muraoka, T., Sakamoto, M., & Kanosue, K. (2010). Differences in lower extremity stiffness between endurance-trained athletes and untrained subjects. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *13*(1), 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2008.08.002>
- Hobara, H., Muraoka, T., Omuro, K., Gomi, K., Sakamoto, M., Inoue, K., & Kanosue, K. (2009). Knee stiffness is a major determinant of leg stiffness during maximal hopping. *Journal of Biomechanics*, *42*(11), 1768–1771. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.04.047>
- Horita, T., Komi, P., Nicol, C., & Kyröläinen, H. (2002). Interaction between pre-landing activities and stiffness regulation of the knee joint musculoskeletal system in the drop jump: Implications to performance. *European Journal of Applied Physiology*, *88*(1), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0673-6>
- Hoteya, K., Kato, Y., Motojima, S., Ingham, S. J., Horaguchi, T., Saito, A., & Tokuhashi, Y. (2011). Association between intercondylar notch narrowing and bilateral anterior cruciate ligament injuries in athletes. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, *131*(3), 371–376. <https://doi.org/10.1007/s00402-010-1254-5>
- Hughes, G., & Watkins, J. (2006). A risk-factor model for anterior cruciate ligament injury. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *36*(5), 411–428. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636050-00004>
- Hughes, G., & Watkins, J. (2008). Lower limb coordination and stiffness during landing from volleyball block jumps. *Research in Sports Medicine (Print)*, *16*(2), 138–154. <https://doi.org/10.1080/15438620802103999>
- Huston, L. J., & Wojtys, E. M. (1996). Neuromuscular performance characteristics in elite female athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, *24*(4), 427–436. <https://doi.org/10.1177/036354659602400405>
- Chelly, S. M., & Denis, C. (2001). Leg power and hopping stiffness: Relationship with sprint running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *33*(2), 326–333. <https://doi.org/10.1097/00005768-200102000-00024>

- Iga, J., George, K., Lees, A., & Reilly, T. (2009). Cross-sectional investigation of indices of isokinetic leg strength in youth soccer players and untrained individuals. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 19(5), 714–719. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2008.00822.x>
- Jan, M.-H., Lin, C.-H., Lin, Y.-F., Lin, J.-J., & Lin, D.-H. (2009). Effects of Weight-Bearing Versus Nonweight-Bearing Exercise on Function, Walking Speed, and Position Sense in Participants With Knee Osteoarthritis: A Randomized Controlled Trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 90(6), 897–904. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2008.11.018>
- Janse de Jonge, X. A., Boot, C. R., Thom, J. M., Ruell, P. A., & Thompson, M. W. (2001). The influence of menstrual cycle phase on skeletal muscle contractile characteristics in humans. *The Journal of Physiology*, 530(Pt 1), 161–166. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.0161m.x>
- Jenkins, W. L., Killian, C. B., Williams, D. S., Loudon, J., & Raedeke, S. G. (2007). Anterior cruciate ligament injury in female and male athletes: The relationship between foot structure and injury. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 97(5), 371–376. <https://doi.org/10.7547/0970371>
- Johnson, D. M., Williams, S., Bradley, B., Sayer, S., Fisher, J. M., & Cumming, S. (2020). Growing pains: Maturity associated variation in injury risk in academy football. *European Journal of Sport Science*, 20(4), 544–552. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1633416>
- Jones, E. J., Bishop, P. A., Woods, A. K., & Green, J. M. (2008). Cross-sectional area and muscular strength: A brief review. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 38(12), 987–994. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838120-00003>
- Junge, T., Henriksen, P., Hansen, S., Østengaard, L., Golightly, Y. M., & Juul-Kristensen, B. (2019). Generalised joint hypermobility and knee joint hypermobility: Prevalence, knee joint symptoms and health-related quality of life in a Danish adult population. *International Journal of Rheumatic Diseases*, 22(2), 288–296. <https://doi.org/10.1111/1756-185X.13205>
- Kaeding, C. C., Léger-St-Jean, B., & Magnussen, R. A. (2017). Epidemiology and Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Clinics in Sports Medicine*, 36(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2016.08.001>

- Kakavelakis, K. N., Vlazakis, S., Vlahakis, I., & Charissis, G. (2003). Soccer injuries in childhood. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *13*(3), 175–178. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2003.00294.x>
- Kannus, P., & Järvinen, M. (1989). Incidence of knee injuries and the need for further care. A one-year prospective follow-up study. *The Journal of sports medicine and physical fitness*.
- Kapandji, A. I. (2011). *The physiology of the joints. Volume 2: The lower limb* (6th ed). Churchill Livingstone.
- Kawakami, Y., Abe, T., Kuno, S. Y., & Fukunaga, T. (1995). Training-induced changes in muscle architecture and specific tension. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *72*(1–2), 37–43. <https://doi.org/10.1007/BF00964112>
- Kemper, G. L. J., Van Der Sluis, A., Brink, M. S., Visscher, C., Frencken, W. G. P., & Elferink-Gemser, M. T. (2015). Anthropometric Injury Risk Factors in Elite-standard Youth Soccer. *International Journal of Sports Medicine*, *36*(13), 1112–1117. Scopus. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1555778>
- Kipp, K., Kiely, M. T., & Geiser, C. F. (2016). Reactive Strength Index Modified Is a Valid Measure of Explosiveness in Collegiate Female Volleyball Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *30*(5), 1341–1347. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001226>
- Kitamura, K., Pereira, L. A., Kobal, R., Cal Abad, C. C., Finotti, R., Nakamura, F. Y., & Loturco, I. (2017). Loaded and unloaded jump performance of top-level volleyball players from different age categories. *Biology of Sport*, *34*(3), 273–278. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2017.67123>
- Knoop, J., Steultjens, M. P. M., van der Leeden, M., van der Esch, M., Thorstensson, C. A., Roorda, L. D., Lems, W. F., & Dekker, J. (2011). Proprioception in knee osteoarthritis: A narrative review. *Osteoarthritis and Cartilage*, *19*(4), 381–388. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2011.01.003>
- Kolář, P. (2009). *Rehabilitace v klinické praxi* (1. vyd). Galén.
- Komi, P., & Gollhofer, A. (1997). Stretch Reflexes Can Have an Important Role in Force Enhancement during SSC Exercise. *Journal of Applied Biomechanics*, *13*, 451–460.



- Komi, P. V. (2000). Stretch-shortening cycle: A powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics*, 33(10), 1197–1206. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(00\)00064-6](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(00)00064-6)
- Korff, T., Horne, S. L., Cullen, S. J., & Blazevich, A. J. (2009). Development of lower limb stiffness and its contribution to maximum vertical jumping power during adolescence. *The Journal of Experimental Biology*, 212(Pt 22), 3737–3742. <https://doi.org/10.1242/jeb.033191>
- Kubo, K., Kanehisa, H., Kawakami, Y., & Fukanaga, T. (2001). Growth changes in the elastic properties of human tendon structures. *International Journal of Sports Medicine*, 22(2), 138–143. <https://doi.org/10.1055/s-2001-11337>
- Kubo, K., Teshima, T., Hirose, N., & Tsunoda, N. (2014). A cross-sectional study of the plantar flexor muscle and tendon during growth. *International Journal of Sports Medicine*, 35(10), 828–834. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1367011>
- Kubo, Keitaro, Kanehisa, H., & Fukunaga, T. (2003). Gender differences in the viscoelastic properties of tendon structures. *European Journal of Applied Physiology*, 88(6), 520–526. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0744-8>
- Kubo, Keitaro, Teshima, T., Hirose, N., & Tsunoda, N. (2014). Growth changes in morphological and mechanical properties of human patellar tendon in vivo. *Journal of Applied Biomechanics*, 30(3), 415–422. <https://doi.org/10.1123/jab.2013-0220>
- Kuitunen, S., Ogiso, K., & Komi, P. V. (2011). Leg and joint stiffness in human hopping. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(6), e159-167. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01202.x>
- Kujala, U. M., Taimela, S., Antti-Poika, I., Orava, S., Tuominen, R., & Myllynen, P. (1995). Acute injuries in soccer, ice hockey, volleyball, basketball, judo, and karate: Analysis of national registry data. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 311(7018), 1465–1468. <https://doi.org/10.1136/bmj.311.7018.1465>
- Laffaye, G., Choukou, M., Benguigui, N., & Padulo, J. (2016). Age- and gender-related development of stretch shortening cycle during a sub-maximal hopping task. *Biology of Sport*, 33(1), 29–35. <https://doi.org/10.5604/20831862.1180169>
- Lambertz, D., Mora, I., Grosset, J.-F., & Perot, C. (2003). Evaluation of musculotendinous stiffness in prepubertal children and adults, taking into account muscle activity. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 95(1), 64–72. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00885.2002>

- Langmeier, M. (2009). *Základy lékařské fyziologie* (1. vyd). Grada.
- Lazaridis, S., Bassa, E., Patikas, D., Giakas, G., Gollhofer, A., & Kotzamanidis, C. (2010). Neuromuscular differences between prepubescents boys and adult men during drop jump. *European Journal of Applied Physiology*, *110*(1), 67–74. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1452-4>
- Lazaridis, S., Patikas, D. A., Bassa, E., Tsatalas, T., Hatzikotoulas, K., Ftikas, C., & Kotzamanidis, C. (2018). The acute effects of an intense stretch-shortening cycle fatigue protocol on the neuromechanical parameters of lower limbs in men and prepubescent boys. *Journal of Sports Sciences*, *36*(2), 131–139. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1287932>
- Le Gall, F., Carling, C., Reilly, T., Vandewalle, H., Church, J., & Rochcongar, P. (2006). Incidence of injuries in elite French youth soccer players: A 10-season study. *American Journal of Sports Medicine*, *34*(6), 928–938. Scopus. <https://doi.org/10.1177/0363546505283271>
- Lehnert, M., Croix, M. D. S., Šťastný, P., Maixnerová, E., Zaatar, A., Botek, M., Vařeková, R., Hůlka, K., Petr, M., Elfmark, M., & Lipinska, P. (2019). *The influence of fatigue on injury risk in male youth soccer*. Palacký University Olomouc.
- Lehnert, M., Hůlka, K., De Ste Croix, M. B., & Horutová, K. (2018). Acute effect of basketball-specific exercise on lower limb injury risk mechanisms in male basketball players U16 and U18. *Research and Investigations in Sports Medicine*, *2*(3), 1–6. <https://doi.org/10.31031/RISM.2018.02.000539>
- Lehnert, M., Novosad, J., Neuls, F., Langer, F., & Botek, M. (2010). Trénink kondice ve sportu. *Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci*.
- Leppänen, M., Pasanen, K., Kujala, U. M., Vasankari, T., Kannus, P., Äyrämö, S., Krosshaug, T., Bahr, R., Avela, J., Perttunen, J., & Parkkari, J. (2016). Stiff Landings Are Associated With Increased ACL Injury Risk in Young Female Basketball and Floorball Players: *The American Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1177/0363546516665810>
- Lexell, J., Sjöström, M., Nordlund, A. S., & Taylor, C. C. (1992). Growth and development of human muscle: A quantitative morphological study of whole vastus lateralis from childhood to adult age. *Muscle & Nerve*, *15*(3), 404–409. <https://doi.org/10.1002/mus.880150323>

- Lieber, R. L., & Fridén, J. (2000). Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle & Nerve*, 23(11), 1647–1666. [https://doi.org/10.1002/1097-4598\(200011\)23:11<1647::aid-mus1>3.0.co;2-m](https://doi.org/10.1002/1097-4598(200011)23:11<1647::aid-mus1>3.0.co;2-m)
- Lieber, Richard L., & Ward, S. R. (2011). Skeletal muscle design to meet functional demands. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1570), 1466–1476. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0316>
- Lichtwark, G. A., & Wilson, A. M. (2007). Is Achilles tendon compliance optimised for maximum muscle efficiency during locomotion? *Journal of Biomechanics*, 40(8), 1768–1775. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2006.07.025>
- Lichtwark, G. A., & Wilson, A. M. (2008). Optimal muscle fascicle length and tendon stiffness for maximising gastrocnemius efficiency during human walking and running. *Journal of Theoretical Biology*, 252(4), 662–673. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2008.01.018>
- Lin, D.-H., Lin, Y.-F., Chai, H.-M., Han, Y.-C., & Jan, M. (2007). Comparison of proprioceptive functions between computerized proprioception facilitation exercise and closed kinetic chain exercise in patients with knee osteoarthritis. *Clinical Rheumatology*, 26(4), 520–528. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10067-006-0324-0>
- Lloyd, R. S., Oliver, J. L., Hughes, M. G., & Williams, C. A. (2009). Reliability and validity of field-based measures of leg stiffness and reactive strength index in youths. *Journal of Sports Sciences*, 27(14), 1565–1573. <https://doi.org/10.1080/02640410903311572>
- Lloyd, R. S., Oliver, J. L., Hughes, M. G., & Williams, C. A. (2011). The influence of chronological age on periods of accelerated adaptation of stretch-shortening cycle performance in pre and postpubescent boys. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(7), 1889–1897. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e7faa8>
- Lloyd, R. S., Oliver, J. L., Hughes, M. G., & Williams, C. A. (2012). Age-related differences in the neural regulation of stretch-shortening cycle activities in male youths during maximal and sub-maximal hopping. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 22(1), 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2011.09.008>

- Lloyd, R. S., Radnor, J. M., De Ste Croix, M. B. A., Cronin, J. B., & Oliver, J. (2015). *Changes in sprint and jump performance following traditional, plyometric and combined resistance training in male youth pre- and post-peak height velocity*. <http://dx.doi.org/10.1519/JSC.0000000000001216>
- Lohmander, L. S., Englund, P. M., Dahl, L. L., & Roos, E. M. (2007). The Long-term Consequence of Anterior Cruciate Ligament and Meniscus Injuries: Osteoarthritis. *The American Journal of Sports Medicine*, *35*(10), 1756–1769. <https://doi.org/10.1177/0363546507307396>
- Lombardo, S., Sethi, P. M., & Starkey, C. (2005). Intercondylar notch stenosis is not a risk factor for anterior cruciate ligament tears in professional male basketball players: An 11-year prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, *33*(1), 29–34. <https://doi.org/10.1177/0363546504266482>
- Louw, Q. A., Manilall, J., & Grimmer, K. A. (2008). Epidemiology of knee injuries among adolescents: A systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, *42*(1), 2–10. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.035360>
- Majewski, M., Susanne, H., & Klaus, S. (2006). Epidemiology of athletic knee injuries: A 10-year study. *The Knee*, *13*(3), 184–188. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2006.01.005>
- Malina, R. M., Bouchard, C., & Bar-Or, O. (2004). *Growth, Maturation, and Physical Activity*. Human Kinetics.
- Malina, R. M., Cumming, S. P., Rogol, A. D., Coelho-e-Silva, M. J., Figueiredo, A. J., Konarski, J. M., & Kozieł, S. M. (2019). Bio-Banding in Youth Sports: Background, Concept, and Application. *Sports Medicine*, *49*(11), 1671–1685. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01166-x>
- Maquirriain, J. (2012). Leg stiffness changes in athletes with achilles tendinopathy. *International Journal of Sports Medicine*, *33*(7), 567–571. Scopus. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1304644>
- Márquez, G., Alegre, L. M., Jaén, D., Martín-Casado, L., & Aguado, X. (2017). Sex differences in kinetic and neuromuscular control during jumping and landing. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, *17*(1), 409–416.

- Martín-San Agustín, R., Benítez-Martínez, J. C., Medina-Mirapeix, F., & Casaña-Granell, J. (2021). Sex Differences and Patterns of Muscle Stiffness in the Knee Flexor and Extensor Musculature Through Analysis of Isolated Bellies. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(4), 1044–1049. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002883>
- McKay, C. D., Cumming, S. P., & Blake, T. (2019). Youth sport: Friend or Foe? *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 33(1), 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.berh.2019.01.017>
- McLellan, C. P., Lovell, D. I., & Gass, G. C. (2011). The role of rate of force development on vertical jump performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(2), 379–385. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181be305c>
- McMahon, J. J., Jones, P. A., Suchomel, T. J., Lake, J., & Comfort, P. (2018). Influence of the Reactive Strength Index Modified on Force- and Power-Time Curves. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(2), 220–227. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0056>
- McMahon, J.J., Comfort, P., & Pearson, S. (2012). Lower limb stiffness: Considerations for female athletes. *Strength and Conditioning Journal*, 34(5), 70–73. Scopus. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e318268131f>
- McMahon, T. A., & Cheng, G. C. (1990). The mechanics of running: How does stiffness couple with speed? *Journal of Biomechanics*, 23, 65–78. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(90\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0021-9290(90)90042-2)
- Melnyk, M., & Gollhofer, A. (2007). Submaximal fatigue of the hamstrings impairs specific reflex components and knee stability. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 15, 525–532. <https://doi.org/10.1007/s00167-006-0226-3>
- Mendiguchia, J., Ford, K. R., Quatman, C. E., Alentorn-Geli, E., & Hewett, T. E. (2011). Sex differences in proximal control of the knee joint. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 41(7), 541–557. <https://doi.org/10.2165/11589140-000000000-00000>
- Mirwald, R., Baxter-Jones, A., Bailey, D., & Beunen, G. (2002). An assessment of maturity from anthropometric measurements. *Medicine and science in sports and exercise*, 34, 689–694. <https://doi.org/10.1097/00005768-200204000-00020>

- Missitzi, J., Geladas, N., & Klissouras, V. (2004). Heritability in neuromuscular coordination: Implications for motor control strategies. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(2), 233–240. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000113479.98631.C4>
- Mitchell, L. C. J., Ford, K. R., Minning, S., Myer, G. D., Mangine, R. E., & Hewett, T. E. (2008). Medial Foot Loading on Ankle and Knee Biomechanics. *North American Journal of Sports Physical Therapy : NAJSPT*, 3(3), 133–140.
- Mizuno, Y., Kumagai, M., Mattessich, S. M., Elias, J. J., Ramrattan, N., Cosgarea, A. J., & Chao, E. Y. (2001). Q-angle influences tibiofemoral and patellofemoral kinematics. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 19(5), 834–840. [https://doi.org/10.1016/S0736-0266\(01\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0736-0266(01)00008-0)
- Mohamed, E. E., Useh, U., & Mtshali, B. F. (2012). Q-angle, Pelvic width, and Intercondylar notch width as predictors of knee injuries in women soccer players in South Africa. *African Health Sciences*, 12(2), 174–180. <https://doi.org/10.4314/ahs.v12i2.15>
- Müller, L., Hildebrandt, C., Müller, E., Fink, C., & Raschner, C. (2017). Long-Term Athletic Development in Youth Alpine Ski Racing: The Effect of Physical Fitness, Ski Racing Technique, Anthropometrics and Biological Maturity Status on Injuries. *Frontiers in Physiology*, 8, 656. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00656>
- Musahl, V., & Karlsson, J. (2019). Anterior Cruciate Ligament Tear. *New England Journal of Medicine*. <https://doi.org/10.1056/NEJMcp1805931>
- Myer, G. D., Ford, K. R., & Hewett, T. E. (2004). Rationale and Clinical Techniques for Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention Among Female Athletes. *Journal of Athletic Training*, 39(4), 352–364.
- Myer, G. D., Ford, K. R., & Hewett, T. E. (2005). The effects of gender on quadriceps muscle activation strategies during a maneuver that mimics a high ACL injury risk position. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 15(2), 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2004.08.006>

- Myer, G. D., Ford, K. R., Paterno, M. V., Nick, T. G., & Hewett, T. E. (2008). The effects of generalized joint laxity on risk of anterior cruciate ligament injury in young female athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, *36*(6), 1073–1080. <https://doi.org/10.1177/0363546507313572>
- Neal, B. S., Lack, S. D., Lankhorst, N. E., Raye, A., Morrissey, D., & van Middelkoop, M. (2019). Risk factors for patellofemoral pain: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, *53*(5), 270–281. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098890>
- Nicol, C., Avela, J., & Komi, P. V. (2006). The stretch-shortening cycle: A model to study naturally occurring neuromuscular fatigue. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *36*(11), 977–999. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636110-00004>
- Nielsen, A. B., & Yde, J. (1991). Epidemiology of acute knee injuries: A prospective hospital investigation. *The Journal of Trauma*, *31*(12), 1644–1648. <https://doi.org/10.1097/00005373-199112000-00014>
- O'Brien, T. D., Reeves, N. D., Baltzopoulos, V., Jones, D. A., & Maganaris, C. N. (2010a). Mechanical properties of the patellar tendon in adults and children. *Journal of Biomechanics*, *43*(6), 1190–1195. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.11.028>
- O'Brien, T. D., Reeves, N. D., Baltzopoulos, V., Jones, D. A., & Maganaris, C. N. (2010b). Muscle-tendon structure and dimensions in adults and children. *Journal of Anatomy*, *216*(5), 631–642. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2010.01218.x>
- Oliver, J. L., & Smith, P. M. (2010). Neural control of leg stiffness during hopping in boys and men. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *20*(5), 973–979. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2010.03.011>
- Olsen, O.-E., Myklebust, G., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2004). Injury mechanisms for anterior cruciate ligament injuries in team handball: A systematic video analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, *32*(4), 1002–1012. <https://doi.org/10.1177/0363546503261724>
- Oosthuyse, T., & Bosch, A. N. (2010). The effect of the menstrual cycle on exercise metabolism: Implications for exercise performance in eumenorrhoeic women. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *40*(3), 207–227. <https://doi.org/10.2165/11317090-000000000-00000>

- Ostenberg, A., & Roos, H. (2000). Injury risk factors in female European football. A prospective study of 123 players during one season. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *10*(5), 279–285. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2000.010005279.x>
- Ovalie, W. K. (1987). The human muscle-tendon junction. *Anatomy and Embryology*, *176*(3), 281–294. <https://doi.org/10.1007/BF00310184>
- Pacey, V., Nicholson, L. L., Adams, R. D., Munn, J., & Munns, C. F. (2010). Generalized joint hypermobility and risk of lower limb joint injury during sport: A systematic review with meta-analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, *38*(7), 1487–1497. <https://doi.org/10.1177/0363546510364838>
- Padua, D. A., Arnold, B. L., Carcia, C. R., & Granata, K. P. (2005). Gender Differences in Leg Stiffness and Stiffness Recruitment Strategy During Two-Legged Hopping. *Journal of motor behavior*, *37*(2), 111–125.
- Padua, D. A., Arnold, B. L., Perrin, D. H., Gansneder, B. M., Carcia, C. R., & Granata, K. P. (2006a). Fatigue, Vertical Leg Stiffness, and Stiffness Control Strategies in Males and Females. *Journal of Athletic Training*, *41*(3), 294–304.
- Padua, D. A., Arnold, B. L., Perrin, D. H., Gansneder, B. M., Carcia, C. R., & Granata, K. P. (2006b). Fatigue, Vertical Leg Stiffness, and Stiffness Control Strategies in Males and Females. *Journal of Athletic Training*, *41*(3), 294–304.
- Peat, G., Bergknut, C., Frobell, R., Jöud, A., & Englund, M. (2014). Population-wide incidence estimates for soft tissue knee injuries presenting to healthcare in southern Sweden: Data from the Skåne Healthcare Register. *Arthritis Research & Therapy*, *16*(4). <https://doi.org/10.1186/ar4678>
- Pfeiffer, J. (2007). *Neurologie v rehabilitaci: Pro studium a praxi* (1. vyd). Grada.
- Pfiffmann, D., Herbst, M., Ingelfinger, P., Simon, P., & Tug, S. (2016). Analysis of Injury Incidences in Male Professional Adult and Elite Youth Soccer Players: A Systematic Review. *Journal of Athletic Training*, *51*(5), 410–424. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-51.6.03>
- Pitt, B., Dotan, R., Millar, J., Long, D., Tokuno, C., O'Brien, T., & Falk, B. (2015). The electromyographic threshold in boys and men. *European Journal of Applied Physiology*, *115*(6), 1273–1281. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3100-5>



- Poulsen, E., Goncalves, G. H., Bricca, A., Roos, E. M., Thorlund, J. B., & Juhl, C. B. (2019). Knee osteoarthritis risk is increased 4-6 fold after knee injury—A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, *53*(23), 1454–1463. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-100022>
- Powell, J. W., & Barber-Foss, K. D. (2000). Sex-related injury patterns among selected high school sports. *The American Journal of Sports Medicine*, *28*(3), 385–391. <https://doi.org/10.1177/03635465000280031801>
- Powers, C. M. (2003). The influence of altered lower-extremity kinematics on patellofemoral joint dysfunction: A theoretical perspective. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, *33*(11), 639–646. <https://doi.org/10.2519/jospt.2003.33.11.639>
- Quatman, C. E., Ford, K. R., Myer, G. D., & Hewett, T. E. (2006). Maturation leads to gender differences in landing force and vertical jump performance: A longitudinal study. *The American Journal of Sports Medicine*, *34*(5), 806–813. <https://doi.org/10.1177/0363546505281916>
- Quatman, C. E., Ford, K. R., Myer, G. D., Paterno, M. V., & Hewett, T. E. (2008). The effects of gender and pubertal status on generalized joint laxity in young athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *11*(3), 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.05.005>
- Quatman-Yates, C. C., Quatman, C. E., Meszaros, A. J., Paterno, M. V., & Hewett, T. E. (2012). A systematic review of sensorimotor function during adolescence: A developmental stage of increased motor awkwardness? *British Journal of Sports Medicine*, *46*(9), 649–655. <https://doi.org/10.1136/bjism.2010.079616>
- Radnor, J. M., Oliver, J. L., Waugh, C. M., Myer, G. D., Moore, I. S., & Lloyd, R. S. (2018). The Influence of Growth and Maturation on Stretch-Shortening Cycle Function in Youth. *Sports Medicine*, *48*(1), 57–71. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0785-0>
- Rahr-Wagner, L., Thillemann, T. M., Mehnert, F., Pedersen, A. B., & Lind, M. (2014). Is the use of oral contraceptives associated with operatively treated anterior cruciate ligament injury? A case-control study from the Danish Knee Ligament Reconstruction Registry. *The American Journal of Sports Medicine*, *42*(12), 2897–2905. <https://doi.org/10.1177/0363546514557240>

- Ramesh, R., Von Arx, O., Azzopardi, T., & Schranz, P. J. (2005). The risk of anterior cruciate ligament rupture with generalised joint laxity. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 87(6), 800–803. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.87B6.15833>
- Ramirez-Campillo, R., Alvarez, C., García-Pinillos, F., Sanchez-Sanchez, J., Yanci, J., Castillo, D., Loturco, I., Chaabene, H., Moran, J., & Izquierdo, M. (2018). Optimal Reactive Strength Index: Is It an Accurate Variable to Optimize Plyometric Training Effects on Measures of Physical Fitness in Young Soccer Players? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(4), 885–893. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002467>
- Raschner, C., Platzer, H.-P., Patterson, C., Werner, I., Huber, R., & Hildebrandt, C. (2012). The relationship between ACL injuries and physical fitness in young competitive ski racers: A 10-year longitudinal study. *British Journal of Sports Medicine*, 46(15), 1065–1071. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091050>
- Ratel, S., & Martin, V. (2015). Is There a Progressive Withdrawal of Physiological Protections against High-Intensity Exercise-Induced Fatigue during Puberty? *Sports*, 3(4), 346–357. <https://doi.org/10.3390/sports3040346>
- Riemann, B. L., & Lephart, S. M. (2002). The Sensorimotor System, Part I: The Physiologic Basis of Functional Joint Stability. *Journal of Athletic Training*, 37(1), 71–79.
- Rozzi, S. L., Lephart, S. M., Gear, W. S., & Fu, F. H. (1999). Knee Joint Laxity and Neuromuscular Characteristics of Male and Female Soccer and Basketball Players. *The American Journal of Sports Medicine*, 27(3), 312–319. <https://doi.org/10.1177/03635465990270030801>
- Rubio-Peiroten, A., García-Pinillos, F., Jaén-Carrillo, D., Cartón-Llorente, A., & Roche-Seruendo, L. E. (2021). Is There a Relationship between the Morphology of Connective Tissue and Reactivity during a Drop Jump? Influence of Sex and Athletic Performance Level. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph18041969>
- Rumpf, M. C., & Cronin, J. (2012). Injury Incidence, Body Site, and Severity in Soccer Players Aged 6–18 Years: Implications for Injury Prevention. *ECU Publications 2012*. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e31821a9833>
- Sale, D. G. (1987). Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 15, 95–151.

- Sarwar, R., Niclos, B. B., & Rutherford, O. M. (1996). Changes in muscle strength, relaxation rate and fatiguability during the human menstrual cycle. *The Journal of Physiology*, *493* ( Pt 1), 267–272. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1996.sp021381>
- Scarborough, D. M., Linderman, S. E., Cohen, V. A., Berkson, E. M., Eckert, M. M., & Oh, L. S. (2019). Neuromuscular Control of Vertical Jumps in Female Adolescents. *Sports Health*, *11*(4), 343–349. <https://doi.org/10.1177/1941738119846513>
- Secomb, J. L., Nimphius, S., Farley, O. R. L., Lundgren, L. E., Tran, T. T., & Sheppard, J. M. (2015). Relationships Between Lower-Body Muscle Structure and, Lower-Body Strength, Explosiveness and Eccentric Leg Stiffness in Adolescent Athletes. *Journal of Sports Science & Medicine*, *14*(4), 691–697.
- Shambaugh, J. P., Klein, A., & Herbert, J. H. (1991). Structural measures as predictors of injury basketball players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *23*(5), 522–527.
- Sheehan, D. P., & Lienhard, K. (2019). Gross Motor Competence and Peak Height Velocity in 10- to 14-Year-Old Canadian Youth: A Longitudinal Study. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, *23*(1), 89–98. <https://doi.org/10.1080/1091367X.2018.1525385>
- Shelbourne, K. D., Davis, T. J., & Klootwyk, T. E. (1998). The relationship between intercondylar notch width of the femur and the incidence of anterior cruciate ligament tears. A prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, *26*(3), 402–408. <https://doi.org/10.1177/03635465980260031001>
- Sipilä, S., Finni, T., & Kovanen, V. (2015). Estrogen Influences on Neuromuscular Function in Postmenopausal Women. *Calcified Tissue International*, *96*(3), 222–233. <https://doi.org/10.1007/s00223-014-9924-x>
- Small, K., McNaughton, L., Greig, M., & Lovell, R. (2010). The effects of multidirectional soccer-specific fatigue on markers of hamstring injury risk. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *13*(1), 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2008.08.005>
- Söderman, K., Alfredson, H., Pietilä, T., & Werner, S. (2001). Risk factors for leg injuries in female soccer players: A prospective investigation during one out-door season. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, *9*(5), 313–321. <https://doi.org/10.1007/s001670100228>

- Sole, C. J., Suchomel, T. J., & Stone, M. H. (2018). Preliminary Scale of Reference Values for Evaluating Reactive Strength Index-Modified in Male and Female NCAA Division I Athletes. *Sports*, 6(4), 133. <https://doi.org/10.3390/sports6040133>
- Souryal, T. O., & Freeman, T. R. (1993). Intercondylar notch size and anterior cruciate ligament injuries in athletes. A prospective study. *The American Journal of Sports Medicine*, 21(4), 535–539. <https://doi.org/10.1177/036354659302100410>
- Stackhouse, S. K., Binder-Macleod, S. A., & Lee, S. C. K. (2005). Voluntary muscle activation, contractile properties, and fatigability in children with and without cerebral palsy. *Muscle & Nerve*, 31(5), 594–601. <https://doi.org/10.1002/mus.20302>
- Strniště, M., Hůlka, K., Lehnert, M., Maixnerová, E., Vařeková, R., & Lazecká, Š. (2019). Neuromuscular control of the knee joint during basketball season in male youth players. *Acta Gymnica*, 49(3), 125–131. <https://doi.org/10.5507/ag.2019.011>
- Suchomel, T. J., Bailey, C. A., Sole, C. J., Grazer, J. L., & Beckham, G. K. (2015). Using reactive strength index-modified as an explosive performance measurement tool in Division I athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(4), 899–904. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000743>
- Suchomel, T. J., Nimphius, S., & Stone, M. H. (2016). The Importance of Muscular Strength in Athletic Performance. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 46(10), 1419–1449. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0486-0>
- Swain, M., Kamper, S. J., Maher, C. G., Broderick, C., McKay, D., & Henschke, N. (2018). Relationship between growth, maturation and musculoskeletal conditions in adolescents: A systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 52(19), 1246–1252. Scopus. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098418>
- Švestková, O., Angerová, Y., Druga, R., Pfeiffer, J., & Votava, J. (2017). *Rehabilitace motoriky člověka: Fyziologie a léčebné postupy* (1. vydání). Grada Publishing.
- Tarka, M. C., Davey, A., Lonza, G. C., O'Brien, C. M., Delaney, J. P., & Endres, N. K. (2019). Alpine Ski Racing Injuries. *Sports Health*, 11(3), 265–271. <https://doi.org/10.1177/1941738119825842>
- Tillin, N. A., Pain, M. T. G., & Folland, J. (2013). Explosive force production during isometric squats correlates with athletic performance in rugby union players. *Journal of Sports Sciences*, 31(1), 66–76. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.720704>

- Tonson, A., Ratel, S., Le Fur, Y., Cozzone, P., & Bendahan, D. (2008). Effect of maturation on the relationship between muscle size and force production. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(5), 918–925. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181641bed>
- Towlson, C., Cobley, S., Parkin, G., & Lovell, R. (2018). When does the influence of maturation on anthropometric and physical fitness characteristics increase and subside? *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 28(8), 1946–1955. Scopus. <https://doi.org/10.1111/sms.13198>
- Turner, A. N., & Jeffreys, I. (2010). The Stretch-Shortening Cycle: Proposed Mechanisms and Methods for Enhancement. *Strength & Conditioning Journal*, 32(4), 87–99. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181e928f9>
- Ueno, R., Nagai, T., Bates, N. A., Hewett, T. E., & Schilaty, N. D. (2020). Sex differences in passive and active stiffness of the knee flexor muscles during dynamic perturbation test: Principal component analysis. *Somatosensory & Motor Research*, 37(4), 293–299. <https://doi.org/10.1080/08990220.2020.1824905>
- Uhorchak, J. M., Scoville, C. R., Williams, G. N., Arciero, R. A., St Pierre, P., & Taylor, D. C. (2003). Risk factors associated with noncontact injury of the anterior cruciate ligament: A prospective four-year evaluation of 859 West Point cadets. *The American Journal of Sports Medicine*, 31(6), 831–842. <https://doi.org/10.1177/03635465030310061801>
- Van Der Sluis, A., Elferink-Gemser, M. T., Coelho-E-Silva, M. J., Nijboer, J. A., Brink, M. S., & Visscher, C. (2014). Sport injuries aligned to Peak Height Velocity in talented pubertal soccer players. *International Journal of Sports Medicine*, 35(4), 351–355. Scopus. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1349874>
- Véle, F. (2006). *Kineziologie: Přehled klinické kineziologie a patokineziologie pro diagnostiku a terapie poruch pohybové soustavy* (2., rozš. a přeprac. vyd). Triton.
- Verheul, J., Nedergaard, N. J., Vanrenterghem, J., & Robinson, M. A. (2020). Measuring biomechanical loads in team sports—from lab to field. *Science and Medicine in Football*, 4(3), 246–252. Scopus. <https://doi.org/10.1080/24733938.2019.1709654>
- Wakeling, J. M., Blake, O. M., Wong, I., Rana, M., & Lee, S. S. M. (2011). Movement mechanics as a determinate of muscle structure, recruitment and coordination. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 366(1570), 1554–1564. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0294>

- Wang, D., De Vito, G., Ditroilo, M., & Delahunt, E. (2017). Effect of sex and fatigue on muscle stiffness and musculoarticular stiffness of the knee joint in a young active population. *Journal of Sports Sciences*, 35(16), 1582–1591. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1225973>
- Wang, D., De Vito, G., Ditroilo, M., Fong, D. T. P., & Delahunt, E. (2015). A comparison of muscle stiffness and musculoarticular stiffness of the knee joint in young athletic males and females. *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*, 25(3), 495–500. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2015.03.003>
- Wang, L., Lin, D. C., & Huang, C. (2004). Age Effect on Jumping Techniques and Lower Limb Stiffness During Vertical Jump. *Research in Sports Medicine*, 12(3), 209–219. <https://doi.org/10.1080/15438620490497549>
- Ward, R. E., Fong Yan, A., Orishimo, K. F., Kremenic, I. J., Hagins, M., Liederbach, M., Hiller, C. E., & Pappas, E. (2019). Comparison of lower limb stiffness between male and female dancers and athletes during drop jump landings. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29(1), 71–81. <https://doi.org/10.1111/sms.13309>
- Watsford, M. L., Murphy, A. J., McLachlan, K. A., Bryant, A. L., Cameron, M. L., Crossley, K. M., & Makdissi, M. (2010). A Prospective Study of the Relationship between Lower Body Stiffness and Hamstring Injury in Professional Australian Rules Footballers. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(10), 2058–2064. <https://doi.org/10.1177/0363546510370197>
- Waugh, C. M., Blazeovich, A. J., Fath, F., & Korff, T. (2012). Age-related changes in mechanical properties of the Achilles tendon. *Journal of Anatomy*, 220(2), 144–155. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2011.01461.x>
- Wendsche, P., & Veselý, R. (2015). *Traumatologie*. Galén.
- Wikstrom, E. A., Arrigenna, M. A., Tillman, M. D., & Borsa, P. A. (2006). Dynamic Postural Stability in Subjects With Braced, Functionally Unstable Ankles. *Journal of Athletic Training*, 41(3), 245–250.
- Wilson, G. J., Wood, G. A., & Elliott, B. C. (1991). Optimal stiffness of series elastic component in a stretch-shorten cycle activity. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 70(2), 825–833. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.70.2.825>

- Wojtys, E. M., Huston, L. J., Schock, H. J., Boylan, J. P., & Ashton-Miller, J. A. (2003). Gender differences in muscular protection of the knee in torsion in size-matched athletes. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, *85*(5), 782–789. <https://doi.org/10.2106/00004623-200305000-00002>
- Wrigley, R., Drust, B., Stratton, G., Scott, M., & Gregson, W. (2012). Quantification of the typical weekly in-season training load in elite junior soccer players. *Journal of Sports Sciences*, *30*(15), 1573–1580. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.709265>
- Yang, J., Marshall, S. W., Bowling, J. M., Runyan, C. W., Mueller, F. O., & Lewis, M. A. (2005). Use of Discretionary Protective Equipment and Rate of Lower Extremity Injury in High School Athletes. *American Journal of Epidemiology*, *161*(6), 511–519. <https://doi.org/10.1093/aje/kwi077>
- Yawn, B. P., Amadio, P., Harmsen, W. S., Hill, J., Ilstrup, D., & Gabriel, S. (2000). Isolated acute knee injuries in the general population. *The Journal of Trauma*, *48*(4), 716–723. <https://doi.org/10.1097/00005373-200004000-00021>
- Yu, B., & Garrett, W. E. (2007). Mechanisms of non-contact ACL injuries. *British Journal of Sports Medicine*, *41 Suppl 1*, i47-51. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.037192>
- Zazulak, B. T., Hewett, T. E., Reeves, N. P., Goldberg, B., & Cholewicki, J. (2007). Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk: A prospective biomechanical-epidemiologic study. *The American Journal of Sports Medicine*, *35*(7), 1123–1130. <https://doi.org/10.1177/0363546507301585>
- Zazulak, B. T., Ponce, P. L., Straub, S. J., Medvecky, M. J., Avedisian, L., & Hewett, T. E. (2005). Gender comparison of hip muscle activity during single-leg landing. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, *35*(5), 292–299. <https://doi.org/10.2519/jospt.2005.35.5.292>
- Zeng, C., Gao, S., Wei, J., Yang, T., Cheng, L., Luo, W., Tu, M., Xie, Q., Hu, Z., Liu, P., Li, H., Yang, T., Zhou, B., & Lei, G. (2013). The influence of the intercondylar notch dimensions on injury of the anterior cruciate ligament: A meta-analysis. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy: Official Journal of the ESSKA*, *21*(4), 804–815. <https://doi.org/10.1007/s00167-012-2166-4>

## 12 PŘÍLOHY

### Příloha 1. Vyjádření etické komise FTK UP



Fakulta tělesné kultury  
Univerzity Palackého  
tř. Míru 115  
OLOMOUC

#### Vyjádření Etické komise FTK UP

**Složení komise:** doc. PhDr. Dana Štěrbová, Ph.D. – předsedkyně  
Mgr. Ondřej Ješina, Ph.D.  
doc. MUDr. Pavel Maňák, CSc.  
Mgr. Filip Neuls, Ph.D.  
Mgr. Michal Kudláček, Ph.D.  
doc. Mgr. Erik Sigmund, Ph. D.  
Mgr. Zdeněk Svoboda, Ph. D.

Na základě žádosti ze dne 13. 3. 2015 byl projekt základního výzkumu (výzkumného sledování)

Autoři: **doc. PaedDr. Michal Lehnert, Dr., Prof. Mark De Ste Croix, Ph.D., Prof. RNDr Miroslav Janura, Dr., PhDr. Petr Šťastný, Ph.D., Mgr. Zdeněk Svoboda, Ph.D., Mgr. Amr Zaatar, Ph.D., PhDr. Michal Botek, Ph.D., Mgr. Karel Hůlka, Ph.D., RNDr. Milan Elfmark**

s názvem **Kumulativní efekt únavy na neuromuskulární řízení kolene a riziko zranění u mladých sportovců během růstu a zrání**

schválen Etickou komisí FTK UP pod jednacím číslem: 14 / 2015  
dne: 19. 3. 2015.

Etická komise FTK UP zhodnotila předložený projekt a **neshledala žádné rozpory** s platnými zásadami, předpisy a mezinárodními směrnicemi pro výzkum zahrnující lidské účastníky.

**Řešitelé projektu splnili podmínky nutné k získání souhlasu etické komise.**

za EK FTK UP  
doc. PhDr. Dana Štěrbová, Ph.D.  
předsedkyně

razítko fakulty



## Příloha 2. Informovaný souhlas pro nezletilé účastníky studie



Fakulta  
tělesné kultury

### UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUČ, FAKULTA TĚLESNÉ KULTURY

#### *Informovaný souhlas pro nezletilé účastníky studie*

#### **Kumulativní efekt únavy na neuromuskulární řízení kolene a riziko zranění u mladých sportovců během růstu a zrání**

Jméno:

Datum narození:

Účastník byl do studie zařazen pod číslem:

1. Já, níže podepsaný (á) souhlasím s účastí mého syna/dcery ve studii.
2. Byl (a) jsem podrobně informován (a) o cíli studie, o jejích postupech, a o tom, co se od mého syna/dcery mě očekává. Beru na vědomí, že prováděná studie je výzkumnou činností. Porozuměl (a) jsem tomu, můj syn/dcera může kdykoliv svou účast přerušit či odstoupit a že účast ve studii je dobrovolná.
3. Při zařazení do studie budou data mého syna/dcery uchována s plnou ochranou důvěrnosti dle platných zákonů ČR. Je zaručena ochrana důvěrnosti osobních dat. Pro výzkumné a vědecké účely mohou být údaje mého syna/dcery poskytnuty pouze bez identifikačních údajů (anonymní data) nebo s mým výslovným souhlasem.
4. S účastí mého syna/dcery ve studii není spojeno poskytnutí žádné odměny.
5. Porozuměl jsem tomu, že jméno mého syna/dcery se nebude nikdy vyskytovat v referátech o této studii. Já naopak nebudu proti použití výsledků z této studie.

Podpis zákonného zástupce:

Datum:

Podpis řešitele pověřeného touto studii:

Datum: