

Univerzita Palackého v Olomouci

Fakulta tělesné kultury



Fakulta
tělesné kultury

VYUŽITÍ TACHOGRAFU A AKCELEROMETRU PRO ANALÝZU PLAVECKÉ TECHNIKY KRAUL

Disertační práce

Autor: Michaela Bátorová

Studijní program: Kinantropologie (Biomechanika)

Vedoucí práce: prof. RNDr. Miroslava Janura, Dr.

Olomouc 2023

Bibliografická identifikace

Jméno autora: Michaela Bátorová

Název práce: Využití tachografu a akcelerometru pro analýzu plavecké techniky kraul

Vedoucí práce: Prof. RNDr. Miroslav Janura, Dr.

Pracoviště: Katedra přírodních věd v kinantropologii

Rok obhajoby: 2023

Abstrakt:

V rámci této výzkumné práce bylo vyvinuto nové měřící zařízení SwIMU se synchronním videozáznamem a softwarem. Následně byla ověřena jeho reliabilita. Cílem bylo ověřit použitelnost Tachografu II a SwIMU pro analýzu plavecké techniky kraul a srovnat výsledky získané z obou zařízení. Výzkum zahrnoval měření šesti opakovaných 25metrových úseků plavaných maximální rychlostí kraulem u 34 plavců s použitím Tachografu II a 28 plavců s použitím SwIMU, přičemž 12 plavců bylo měřeno oběma zařízeními na 25metrovém úseku plavaném také maximální rychlostí kraulem. Byly použity statistické metody, jako je ICC, párový t-test, výpočet intervalu spolehlivosti, Spearmanovy korelace a regresní model závislosti. Výsledky prokázaly vysokou spolehlivost obou zařízení pro všechny měřené parametry plavání. SwIMU naměřil vyšší hodnoty průměrné rychlosti a účinnosti plavecké techniky a nižší hodnoty variačního koeficientu rychlosti než Tachograf II. Výsledky výzkumu ukázaly, že rychlost kraulové souhry má významnější vliv na průměrnou rychlost na celém měřeném úseku než výjezd. Byl také zjištěn silný vztah mezi frekvencí pohybu končetin, maximální a minimální rychlostí a průměrnou rychlostí plavání. Výsledky našeho výzkumu také prokázaly, že pouze účinnost plavecké techniky nezvyšuje průměrnou rychlost plavání. Přičemž účinnost spolu s maximální rychlostí pozitivně ovlivňuje průměrnou rychlost kraulové souhry, avšak významnější vliv má účinnost plavecké techniky, a to i na krátkých tratích.

Klíčová slova:

akcelerometr, tachograf, kraul, reliabilita, účinnost plavecké techniky, frekvence pohybu končetin, rychlost kraulu.

Souhlasím s půjčováním práce v rámci knihovních služeb.

Bibliographical identification

Author: Michaela Bátorová
Title: Utilization of Tachograph and Accelerometer for Freestyle Swimming Technique Analysis

Supervisor: Prof. RNDr. Miroslav Janura, Dr.
Department: Department of Natural Sciences in Kinanthropology
Year: 2022
Abstract:

In the context of this research, a new measurement device called SWIMU was developed, which includes synchronized video recording and software. Subsequently, its reliability was verified. The aim was to evaluate the usability of Tachograf II and SWIMU for analyzing freestyle swimming technique and to compare the results obtained from both devices. The study involved measuring six repeated 25-meter segments swum at maximum freestyle speed by 34 swimmers using Tachograf II and 28 swimmers using SWIMU, with 12 swimmers being measured by both devices on the same 25-meter segment at maximum freestyle speed as well. Statistical methods, such as Intraclass Correlation Coefficient (ICC), paired t-test, computation of confidence intervals, Spearman correlations, and regression models, were employed for data analysis. The results demonstrated high reliability of both devices for all measured swimming parameters. SWIMU recorded higher values for average speed and swimming efficiency, and lower values for speed variability coefficient compared to Tachograf II. The research results indicated that the speed of clean crawl swimming has a more significant impact on the average speed across the entire measured segment than the start (pull-out) phase. A strong relationship was also observed between limb movement frequency, maximum and minimum speeds, and average swimming speed. The results of our research have also shown that the efficiency of swimming technique alone does not increase average swimming speed. The efficiency, along with maximum speed, positively influences the average speed of the freestyle stroke, however, the efficiency of swimming technique has proven to have a greater effect on average speed, even on short freestyle distances.

Keywords:

accelerometer, tachograph, freestyle, front crawl, reliability, swimming technique efficiency, limb movement frequency, crawl speed.

I agree the thesis paper to be lent within the library service.

Prohlašuji, že jsem tuto práci zpracovala samostatně pod vedením prof. RNDr. Miroslava Janury, Dr., uvedla všechny použité literární a odborné zdroje a dodržovala zásady vědecké etiky.

V Olomouci dne 6. června 2023

.....

Děkuji vedoucímu práce, prof. RNDr. Miroslavu Janurovi, Dr., za odborné vedení, cenné rady a velkou trpělivost při zpracování této práce. Dále děkuji svým kolegům z VUT v Brně a FTK UPOL za spolupráci a podporu při vědecké práci. Mnoho díky patří drahým rodičům Frantovým i Bátorovým, sourozencům s rodinami a všem přátelům, kteří vedle mě stáli a povzbuzovali mě v celém období studia. Zejména děkuji mému milovanému manželovi Branislavovi Bátorovi a kamarádce Lence Jourové za jejich obětavost, trpělivost a podporu, kterou mi věnovali po celou dobu studia a tvorby této práce. A velká díky patří také mému Bohu Otci, který mi byl oporou a pomocí v tomto náročném životním období.

OBSAH

Obsah	7
Úvod	10
1 Přehled poznatků	11
1.1 Vznik propulze u plaveckého způsobu kraul.....	11
1.1.1 Propulzní práce horních končetin	12
1.1.2 Propulzní práce dolních končetin	15
1.2 Technika plaveckého způsobu kraul.....	15
1.2.1 Poloha těla.....	17
1.2.2 Pohyb horních končetin.....	17
1.2.3 Pohyb dolních končetin	25
1.2.4 Rotace těla.....	27
1.2.5 Dýchání.....	28
1.2.6 Kraulová souhra a typy kraulové techniky	29
1.3 Vybrané faktory plaveckého výkonu	32
1.3.1 Rychlost plavání a zrychlení.....	34
1.3.2 Účinnost plavecké techniky.....	34
1.3.3 Frekvence pohybu dolních a horních končetin	37
1.4 Technologie pro analýzu plavecké techniky a výkonosti.....	38
1.5 Hodnocení reliability a validity měřících metod	45
1.5.1 Reliabilita.....	46
1.5.2 Validita.....	48
2 Cíle.....	49
2.1 Hlavní cíl.....	49
2.2 Dílčí cíle.....	49
2.3 Výzkumné otázky, hypotézy	49
3 Metodika	51
3.1 Design výzkumu	51
3.2 Výzkumný soubor	53

3.2.1	Plavci zařazení do studií 2 a 4 – Ověření reliability Tachograf II a SWIMU a analýza plaveckého způsobu kraul	54
3.2.2	Plavci zařazení do studie 3 – Komparace dat z měřicího zařízení SwIMU a Tachografu II	54
3.3	Metody sběru dat	55
3.3.1	Měřicí zařízení.....	55
3.3.2	Realizace měření.....	56
3.3.3	Zpracování dat	63
3.4	Sledované parametry.....	68
3.5	Statistické zpracování dat	70
3.5.1	Statistické zpracování dat pro studii 2 – Ověření reliability SwIMU a Tachografu II	70
3.5.2	Statistické zpracování dat studii 3 – Komparace dat z měřicího zařízení SwIMU a Tachograf II	70
3.5.3	Statistické zpracování dat pro studii 4 – Analýza plaveckého způsobu kraul pomocí SwIMU.....	71
4	Výsledky.....	72
4.1	Výsledky studie 1 – Vývoj měřicí metody pro analýzu plavání	72
4.1.1	Hardwarové řešení SwIMU.....	72
4.1.2	Softwarové řešení SwIMU	76
4.1.3	Ukázka možností analýzy plavecké techniky kraul pomocí SwIMU.....	85
4.2	Výsledky studie 2 – Ověření reliability Tachografu II a SwIMU	94
4.2.1	Výzkumná otázka VO1	94
4.3	Výsledky studie 3 – Komparace dat získaných z měřicího zařízení Tachograf II a SwIMU	97
4.3.1	Výzkumná otázka VO2	97
4.3.2	Komparace měřících zařízení Tachografu II a SwIMU z pohledu uživatelské náročnosti a využitelnosti v trenérské a výzkumné praxi	98
4.4	Výsledky studie 4 – Analýza plaveckého způsobu kraul pomocí SwIMU.....	101
4.4.1	Výzkumná otázka VO3	102
4.4.2	Výzkumná otázka VO4	103

4.4.3	Výzkumná hypotéza 1	105
5	Diskuse	110
5.1	Studie 1 – Vývoj měřicí metody pro analýzu plavání.....	110
5.2	Diskuze studie 2 – Ověření reliability Tachografu II a SWIMU	112
5.2.1	Limitující faktory studie 2	115
5.3	Studie 3 – Komparace dat získaných z měřícího zařízení Tachograf II a SWIMU	115
5.3.1	Limitující faktory Studie 3.....	117
5.4	Diskuze studie 4 – Analýza plaveckého způsobu kraul.....	117
5.4.1	Limitující faktory výzkumu studie 4.....	119
6	Závěry	121
7	Souhrn	122
8	Summary	123
9	Referenční seznam	124
10	Přílohy.....	145
10.1	Objednávka výzkumných měření.....	145
10.2	Objednávka měření	146

ÚVOD

V elitním plavání je konkurence velmi vysoká a rozdíly mezi držiteli plaveckých rekordů se neustále zmenšují (Dadashi et al., 2012; Mooney et al., 2015; Morais et al., 2021). To vede plavce a trenéry k neustálému hledání metod a strategií, jak optimalizovat tréninkový proces (Dadashi et al., 2012; Mooney et al., 2015; Morouço & Pedro, 2020). V současné době je využívání moderních technologií pro analýzu plavecké techniky a výkonu považováno za jeden z klíčových nástrojů pro zvýšení konkurenceschopnosti plavců na vrcholové úrovni (Magalhaes et al., 2014).

3D kinematická analýza je nejčastěji využívanou a nejpresnější metodou pro hodnocení plavecké techniky v závodním plavání (Hamidi Rad et al., 2021a; Mooney et al., 2015; Morais et al., 2022b; Seifert et al., 2015; 2021; Thow et al., 2012). Avšak tento postup hodnocení plavecké techniky výrazně zasahuje do tréninkového procesu, je velmi časově i odborně náročný z pohledu měření i zpracování dat (Mooney et al., 2015) a má svá omezení pro použití ve vodním prostředí (Callaway et al., 2009; Gourgoulis et al., 2008).

V poslední době se proto větší pozornost věnuje novým metodám analýzy, které využívají inerciální měřicí jednotky (IMU) jako alternativu k 3D kinematické analýze (Bessone, 2019; Hamidi Rad, 2021a, b, 2022; Magalhaes et al., 2014; Marinho et al., 2019; Mooney et al., 2015). Senzory IMU se osvědčily jako účinné nástroje pro analýzu plavání a překonávají limity předchozích metod založených na 3D kinematické analýze nebo tachometrických zařízeních (Dadashi et al., 2012; 2015; Hamidi Rad et al., 2021a; Magalhaes et al., 2014; Morais et al., 2022b). Díky tomu, že senzory IMU mají relativně malé rozměry i hmotnost, přenášejí data bezdrátově, nevyžadují složitou kalibraci, lze je relativně snadno upevnit na plavce a také umožňují bezkontaktní a nepřetržité měření celé závodní tratě (Cortesi et al., 2019), jsou stále více využívané výzkumníky i trenéry pro analýzu plavecké techniky i výkonnosti plavců.

V České republice se pro analýzu techniky a výkonnosti plavců od roku 2009 využívalo tachometrické zařízení Tachograf II, které bylo vyvinuto na Centru sportovních aktivit Vysokého učení technického v Brně (Motyčka et al., 2009; 2014; Šťastný, 2016a). Tachograf II však umožňuje pouze analýzu pohybu v dopředném směru bez startovního skoku, výjezdů a obrátek. Z tohoto důvodu vznikla potřeba vyvinout novou bezkontaktní měřicí metodu se synchronním videozáznamem, která by umožnila měření celé závodní trati včetně jejích dílčích částí.

Očekáváme, že tato studie přispěje k hlubšímu pochopení vztahů mezi sledovanými parametry ovlivňujícími plavecký výkon a umožní efektivnější trénink plavců s cílem zvýšit jejich konkurenceschopnost na mezinárodní úrovni.

1 PŘEHLED POZNATKŮ

Plavání se skládá z mnoha specifických pohybových prvků cyklického (záběry dolních a horních končetin) i acyklického charakteru (startovní skok, obrátka), které vytvářejí komplexní sekvence pohybů (Mooney, 2015).

V současném vrcholovém závodním plavání je výkonnost plavců velmi vyrovnaná (Official FINA Webside: Swimming world records, 2023) a neustále dochází k překonávání světových i olympijských rekordů, což motivuje jak plavce, tak trenéry usilovně pracovat na zlepšení každé setiny vteřiny (James, et al., 2004; Mooney, 2015; Morais et al., 2021). Ve výzkumných studiích bylo prokázáno, že z pohledu celkové výkonnosti plavců je efektivnější více se zaměřit na zdokonalování plavecké techniky a její propulzní efektivity (viz kapitola 1.1), než na navýšení tréninkových objemů, a to zejména u dospívajících plavců (Morais et al., 2021). Dokonalé provedení plavecké techniky je tedy pro úspěch zcela zásadní, což zvyšuje nároky na technologie umožňující detailní analýzu, která poskytne plavcům zpětnou vazbu a možnost zlepšení výkonu.

1.1 Vznik propulze u plaveckého způsobu kraul

Plavání je komplexní pohybová aktivita vyžadující vysokou kvalitu zvládnutí plavecké techniky a "citu pro vodu", který lze vnímat jako dovednost efektivně vytvořit propulzní sílu (Benson & Conolly, 2012; Šťastný, 2016a).

Částice vody obklopující tělo plavce jsou při plavání nuceny měnit svůj klidový stav na základě prvního a druhého Newtonova zákona, kdy plavec při pohybu působí na částice, které se pohybují úměrně síle ve směru působené síly (Hofer et al., 2016; Maglischo, 2003). Vzhledem k tomu, že každá akce vyvolá opačnou a stejně velkou reakci, se tyto reakční síly projevují hydrodynamickými účinky na pohybující se části plavcova těla (Naemi et al., 2010). Díky lokomočním pohybům horních končetin (HK) a dolních končetin (DK) i trupu ve vodním prostředí vytváří plavec hydrodynamické síly, které využívá k vyvinutí propulzních sil pro dopředný pohyb. Současně však tyto hydrodynamické síly plavce významně brzdí. Tyto brzdící síly nazýváme také odporové, mezi něž patří např. čelní tj. vlnový, třecí, vířivý tj. tvarový a pasivní odpor aj. (Colwin, 2002; Hofer et al., 2016; Naemi et al., 2010).

Pohyb plavce také ovlivňují hydrodynamické síly, které vznikají prouděním vody, a jejich vzájemnou interakcí s plavcem, což se projevuje působením (Hofer et al., 2016):

1. v průběhu záběrové fáze na distální části HK a DK, které jsou zdrojem plavcovy propulze,
2. na části těla, které se aktivně nepodílejí na lokomoci (hlava, trup a části HK a DK), které během záběrové fáze nevytváří hnací sílu, jsou zdrojem odporu proti pohybu,

3. na polohu těla při plavání, což ovlivňuje jak působení odporu, tak hydrodynamického vztlaku na trup a na HK a DK.

V průběhu plaveckého pohybového cyklu se nachází fáze, při nichž dochází ke zvýšení hnací síly, ale také fáze, kdy se hnací síla významně sníží nebo se i rovná nule. Proto, dojde-li k poklesu hnací síly pod určitou hranici, sníží se rychlost plavce a začnou převládat síly odporu. Pokud plavec nevytvoří hnací sílu, pohybuje se pouze působením setrvačné síly a jeho pohyb je neustále brzděn až do úplného zastavení (Hofer et al, 2016). Rychlost plavce vzroste, pokud znovu dojde k nárůstu hnacích sil, avšak zrychlení je zpomaleno zvyšujícím se odporem (odpor plavce roste s druhou mocninou rychlosti) i setrvačnými silami (Čechovská & Miler, 2008; Kopřiva, 2011;). Plavecká lokomoce je příznačná přerušovaným působením propulzních sil HK a DK, přičemž velikost hnacích sil musí být dostačující k překonání odporu vodního prostředí. Díky střídavému propulznímu pohybu HK a DK rychlost plavce kolísá. Avšak plavecká technika je neefektivnější, je-li kolísání okamžité rychlosti co nejmenší (Kopřiva, 2011; Maglischo 2016; Motyčka et al., 2011a, b, c; Pendergast et al., 2006), proto se plavci snaží plavat co nejrovnoměrněji s maximální intenzitou.

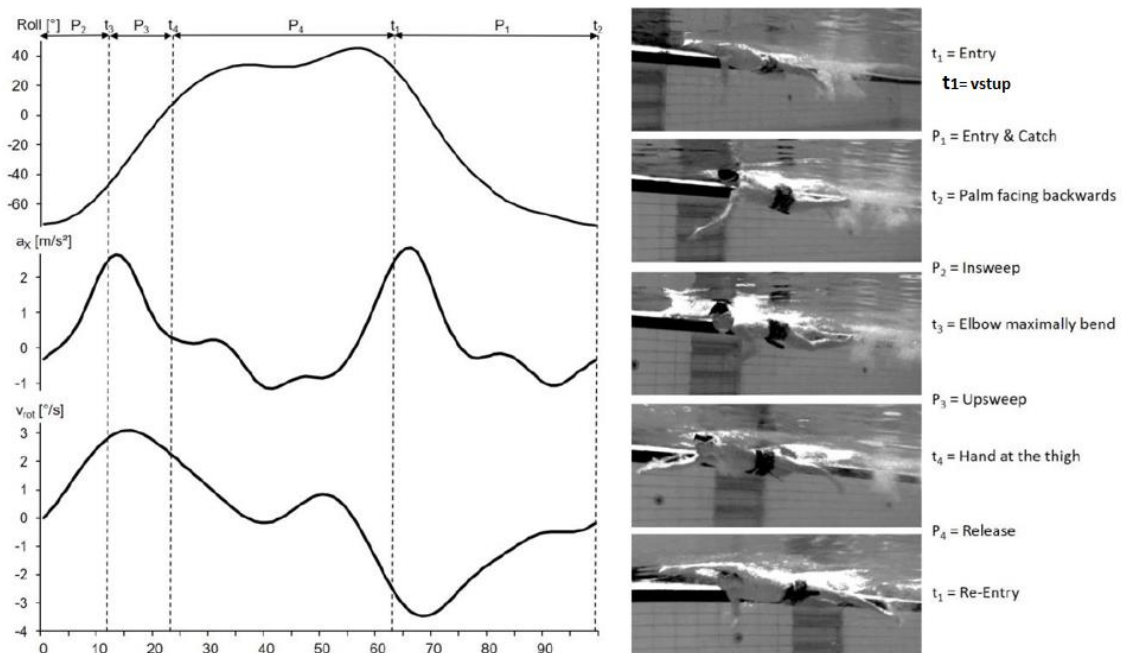
1.1.1 Propulzní práce horních končetin

Primární hnací sílu vytváří u kraulového způsobu HK, a to až 90 % (Čechovská & Miler, 2019; Keller, 2021), přičemž většinu propulzního působení vytváří ruka (94 %), zatímco předloktí a paže působí propulzně jen nepatrně (Takagi et al., 2021; Nakashima et al., 2012). Pohyb ruky ve vodě probíhá po esovité křivce směrem vzad, do stran, vzhůru a dolů. Propulzní síla je složka ve směru plavání výsledné hydrodynamické síly, která je dána vektorovým součtem odporu ruky a hydrodynamického vztlaku (Toussaint, 2011; Arellano & Terres, 2006). Síla, kterou vytváří plavcova ruka (dlaň), je obecně chápána jako reakční síla na "tlačení" vody vzad v souladu s třetím Newtonovým pohybovým zákonem. V tomto kontextu byla dlaň považována za tu stranu ruky, která přímo přijímá reakci působící síly, a hodnota tlaku byla tedy kladná (Koga et al., 2022a). Pokles hodnoty tlaku na hřbetě ruky je silně spojen s nárůstem síly kapaliny. Proto plavci zvyšováním rychlosti ruky zvyšují hydrodynamickou sílu, aby snížili tlak na hřbetní straně ruky. Zvýšení rychlosti ruky během podvodní fáze záběru je obecně spojeno se zvýšením frekvence záběru. Tento vztah se však ukazuje tehdy, když je frekvence zdvihu nižší než maximální. Když plavci překročili individuální maximální záběrovou frekvenci, ukázalo se, že úhel náběhu ruky se zmenšil a tlak na dlaň ruky se snížil (Koga et al., 2022a). Předpokládá se, že vyšší rychlost ruky vede k výraznějšímu snížení tlaku na hřbet (absolutní hodnota větší než tlak na dlaň), což zvýšilo propulzní sílu ruky a zlepšilo průměrnou rychlost plavání (Koga et al., 2022b).

V průběhu jednoho plaveckého cyklu dochází k poklesu rychlosti v závislosti na nádechové fázi, na poloze HK a DK i na zapojení svalové síly HK v průběhu záběrové a přípravné fáze (Maglischo, 2003). Díky moderním technologiím (IMU, KZ+ aj. viz kapitola 1.3) je možné provést analýzu propulzního působení plavce v rámci jednoho záběru HK a pohybového cyklu DK. Na Obrázku 1.1 můžeme vidět propulzní působení HK (měřeno IMU senzorem na zádech plavce), které vzniká ve fázi přitažení (P2 = Insweep) a odtlačení (P3 = Upsweep), fáze zanoření a uchopení vody (P1 = Entry & Catch) a uvolnění a zotavení (P4 = Release) je definována jako pohyb bez propulze (Tabulka 1.1 – 1/2 pohybového cyklu HK). U pohybu DK autoři popisují propulzní působení v okamžiku, kdy byla HK v nejvyšším bodě a následoval pohyb nohy směrem dolů (viz Tabulka 1.1 – Pohybový cyklus DK; Engel et al., 2022).

Obrázek 1.1

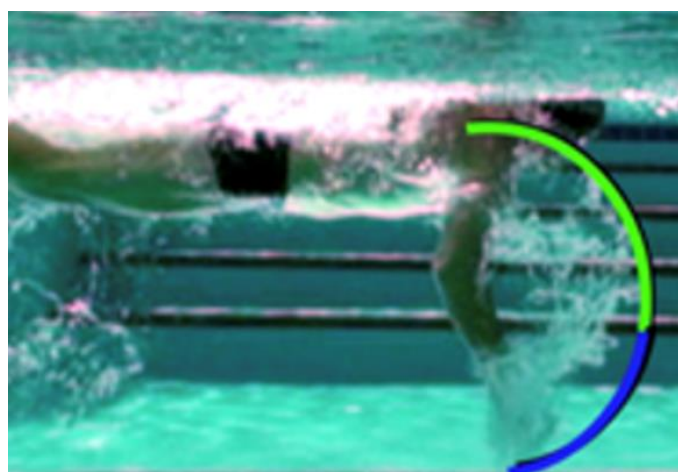
Analýza propulzního působení jednoho záběru HK (Engel, et al., 2022)



Tabulka 1.1*Propulzní působení v polovině pohybového cyklu u plaveckého způsobu kraul (Engel, et al., 2022)*

Část cyklu	Fáze	Klíčová pozice na začátku	Charakter
1/2 pohybového cyklu horních končetin	Zanoření a vyhmátnutí vody (Entry&Catch)	Vstup konečku prstů do vody	Pohyb bez propulze
	Záběrová fáze - přitažení (Insweep)	Předloktí kolmo k povrchu	Propulzní pohyb
	Záběrová fáze - odtlačení (Upsweep)	Loket maximálně pokrčený, ruka maximálně pod tělem	Propulzní pohyb
	Zotavení (Recovery)	Ruka u stehna	Pohyb bez propulze
Pohybový cyklus dolních končetin	Pohyb 1 končetiny dolů (Downbeat 1)	Pravá noha na nejvyšším bodě	Propulzní pohyb
	Pohyb 1 končetiny nahoru (Upbeat 1)	Pravá noha na nejnižším bodě	Pohyb bez propulze
	Pohyb 2 končetiny dolů (Downbeat 2)	Levá noha na nejvyšším bodě	Propulzní pohyb
	Pohyb 2 končetiny nahoru (Upbeat 2)	Levá noha na nejnižším bodě	Pohyb bez propulze

Také další studie zabývající se propulzním působením HK (měřeno přístrojem Pressure Meter s IMU senzorem) uvádí, že nejvyšší nárůst dopředného zrychlení spadá do druhé poloviny pohybu HK, tedy ve fázi, kdy je loket maximálně pokrčen a ruka je 1–1,5 stopy před plavcovým ramenem (Hall, 2020b; Lanotte, 2018). Maximální propulzní síla může vzniknout jak ve fázi přitažení, tak odtlačení (Obrázek 1. 2), a to podle toho, jaký typ kraulové techniky plavec využívá (viz kapitola 1.2.6), zda s využitím rotací vycházející z ramen, či z boků (Hall, 2020b).

Obrázek 1.2*Zobrazení pohybu HK bez propulze (zeleně) a zahájení propulzní fáze (modře; Hall, 2020b)*

1.1.2 Propulzní práce dolních končetin

Mechanika kopů DK a jejich propulzní efekt, spolu s koordinací HK, patří mezi nejméně prozkoumané a pochopené oblasti kraulové techniky (Maglischo, 2016). Výsledky studií zkoumající vliv práce kraulových DK na výkon plavce jsou rozporuplné a nedávají jednoznačnou odpověď (Takagi et al., 2021). U prsařského a motýlkového plaveckého způsobu je pohyb DK pro celkový výkon rozhodující, avšak u kraulu DK plní spíše funkci podpůrnou stabilizační a vyrovnávací (Čechovská & Miler, 2019; Engel et al., 2022; Maglischo, 2003; Sanders & McCabe, 2015); Tarpinian, 2005; Yanai, 2001a). Některé studie však uvádí, že pro rovnoměrnou rychlost kraulera je pohyb DK stěžejní, jelikož neplní jen propulzní funkci, ale také přispívá k eliminaci brzdících odporových sil zmenšením úhlu těla oproti vodní hladině (Gourgoulis et al., 2013; Motyčka et al., 2016). Bylo také prokázáno, že při zapojení DK vzroste maximální rychlost plavání kraulem o 10 % a průměrná o 13 % (Deschodt et al., 1999; Gourgoulis et al., 2013). Dále bylo zjištěno, že kraulový pohyb DK může vytvářet pohon až do rychlosti 2 m/s, avšak při zvýšení rychlosti z 1,27 m/s na 2 m/s se pohon kopáním snížil ze 42 N na 9 N. Tyto výsledky naznačují, že efektivnost práce DK závisí na rychlosti plavání, v jaké je prováděna (Gatta et al., 2012). U pohybu kraulových DK nejvýznamněji vytváří propulzní působení distální část nohy (Hofer et al., 2016).

Pro propulzní účinnost plavecké lokomoce a její vliv na výkon plavce je stěžejní úroveň plavecké techniky.

1.2 Technika plaveckého způsobu kraul

V závodním plavání jsou pravidly definovány čtyři plavecké způsoby (prsa, znak, motýlek, a volný způsob; Official FINA Website: Swimming rules, 2023). Disciplína volný způsob je plavána primárně kraulem, který je ze všech plaveckých způsobů nejrychlejší (Barbosa et al., 2011; Maglischo, 2003). Zároveň se jedná o nejvariabilnější plavecký způsob z hlediska počtu disciplín v bazénovém plavání na tratích 50–1500 m a v dlouhých tratích na otevřené vodě. Díky poměru rychlosti a energetické efektivitě se plavou dlouhé tratě výhradně kraulem (Riewald & Rodeo, 2015).

První záznamy o plavání podobající se kraulové technice našli historici již v době kamenné i starověku, avšak první zmínky o využití kraulu v soutěžním kontextu spadají do roku 1844 (Colwin, 2002; Motyčka, 2001). Název kraul (front crawl) se začal používat až koncem 19. stol., kdy australský plavec Dick Cavill popsal svoji plaveckou techniku (pozice těla na boku, prsové záběry HK s nůžkovitým střihem DK; Swim England, 2023). Následoval styl nazývaný „trudgeon“ (pohyb HK kraulově s nůžkovitým pohybem DK) podle Angličana Artura Trudgena, jímž plavala

většina plavců na prvních čtyřech olympijských hrách v disciplínách volného způsobu (Obrázek 1.3; Hofer, 2016).

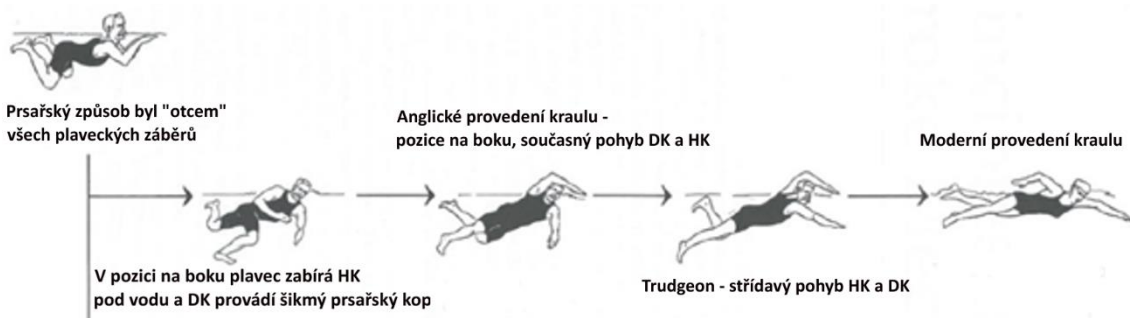
Počátkem dvacátého století se začíná plavat tzv. australským kraulem, při němž plavci prováděli střídavý pohyb HK nad vodní hladinou spolu a dvou-úderovým vertikálním kopem DK s flexí v kolenním kloubu (Colwin, 2002). Na techniku nádechu se v této době nekladl důraz a byla zcela individuální (McVicar, 1936). Současně s australským pojetím kraulové techniky se vyvíjel tzv. americký kraul, který se vyznačoval vyšší polohou ramen s jejich minimální rotací, relaxací HK během přenosu a čtyř a následně šestidobým kopem DK vycházejícím z kyčelního kloubu. Tuto techniku ještě zdokonalil americký plavec Johnny Weismuller, který dal základ novodobé techniky plavání a jako první na světě překonal hranici jedné minuty na 100 m volný způsob (Pelayo & Alberty, 2011). Weismuller plaval šesti-úderovou souhru paží a nohou s rytmickým nádechem do strany (výrazný záklon hlavy) a výdechem do vody. Důraz kladl na přenos HK s téměř svislou polohou předloktí (Colwin, 2002).

V třicátých letech dvacátého století se objevuje tzv. japonský kraul s výrazně vysokou polohou ramen, pohyb HK byl dobíhavý (paže se setkaly ve vzpažení) a pohyb DK probíhal s výraznou flexí v kolenním kloubu. V padesátých letech plavci snižují vysokou polohu ramen i hlavy a zauímají splývavější polohu (Colwin, 2002; Pelayo & Alberty, 2011). V devadesátých letech minulého století proběhla zejména ve sprinterské kraulové technice tzv. revoluce větrných mlýnů, kdy byla HK přenášena nad vodní hladinou natažená. Na přelomu dvacátého a dvacátého prvního století se ještě více zmenšuje záklon hlavy, kdy plavec temenem rozráží vodní hladinu a HK protíná vodní hladinu téměř natažena. V tomto období zejména australští trenéři prosazovali rotaci ramen rytmicky sladěnou se zátěží paží (Colwin, 2002).

Jak můžeme vidět na Obrázku 1.3, samotná kraulová technika procházela mnohaletým vývojem, který se nezastavil ani v současnosti a neustále se hledají efektivnější způsoby provedení jak ve sprinterském, tak ve vytrvalostním pojetí (McCabe et al., 2011; McCabe & Sanders, 2012).

Obr. 1.3

Vývoj kraulové techniky (Colwin, 1992)



1.2.1 Poloha těla

„Poloha těla má významný vliv na celkovou propulzi plavce. Snahou plavce by mělo být zaujímat takovou polohu na hladině, aby nevznikal velký odpor prostředí, a zároveň vytvářet dobré podmínky pro záběrové pohyby končetin.“ (Čechovská & Miler, 2019, str. 68). Plavec zaujímá mírně šikmou polohu těla na hladině, kdy jsou jeho ramena výše než boky (nejníže se nachází spodní část hrudníku), zatímco temenem hlavy rozráží vodní hladinu a při výdechu jeho pohled směřuje vpřed a dolů, avšak hlava je v prodloužení trupu (Maglischo, 2003). Úhel polohy (náběhu) mezi hladinou a podélnou osou těla se mění v závislosti na rychlosti plavání, přičemž se zvyšující se rychlostí úhel klesá (z 5°–10° při pomalém plavání) až k nulové hodnotě (Hofer et al., 2016). Pokud by plavec zvedal hlavu a ramena vysoko z vody, docházelo by ke zvýšení odporu a energie k pohybu by byla směřována šikmo vzhůru místo vpřed, což je u plavání kroulovou technikou nežádoucí (Counsilman, 1974). Poloha těla sprinterů je ve vodě vzpřímenější než u vytrvalců, avšak je důležité eliminovat jakékoliv vychýlení těla do strany v rovině mediální, aby nedocházelo k nárůstu odporu vzhledem k vodnímu prostředí (Sweetenham & Aktinson, 2006; Maglischo, 2003). Horní polovina trupu provádí rotaci kolem podélné (vertikální) osy těla, zároveň do první části záběrové fáze zapadá maximální vychýlení (větší na nádechové straně), při kterém svírá osa ramen s hladinou úhel 40°–50°. Takovéto vychýlení na stranu zabírající ruky umožňuje plavci zabírat ve výhodné poloze pro efektivní využití silových schopností (Hofer et al., 2016; Hofer & Ferglová, 2011). Aby nedocházelo ke zvýšení odporu těla plavce, je důležité provádět rotaci trupu kolem podélné osy se stejnou frekvencí, s níž se pohybují HK nahoru a dolů (při záběru a přenosu; Maglischo, 2003; 2016). Taktéž rotace trupu v podélné ose těla plavce může dopomoci zvýšení rychlosti plavání (Tarpinian, 2005).

1.2.2 Pohyb horních končetin

Záběr paží byl poprvé popsán Counsilman a Wilke (1980), kteří rozdělili pohyb jedné HK do tří odlišných fází: vstupní fáze, fáze záběru pod vodou a fáze obnovy (přenos nad vodou). Podrobnější popis jednotlivých fází pohybu HK představil Maglischo (1993), který zdůraznil natažení HK během vstupní fáze a pohyb HK pod vodní hladinou rozdělil na tři dílčí fáze („chycení vody“, přitažení a odtlačení) podle směru pohybu ruky. Chycení vody nebo záběru pochází z anglického slova „catch“. Tento výraz se nejčastěji překládá jako uchopení, chycení nebo vyhmátnutí. Celý pohyb jedné HK lze definovat do několika fází (Obrázek 1.4):

1. *přípravná* neboli *vstupní fáze* (downsweep) – vstup prstů a ruky do vody s natažením HK – bez propulze (pohonné složky pohybu),
2. *přechodná fáze* – pohyb HK dolů a tzv. „chycením vody“ – bez propulze,

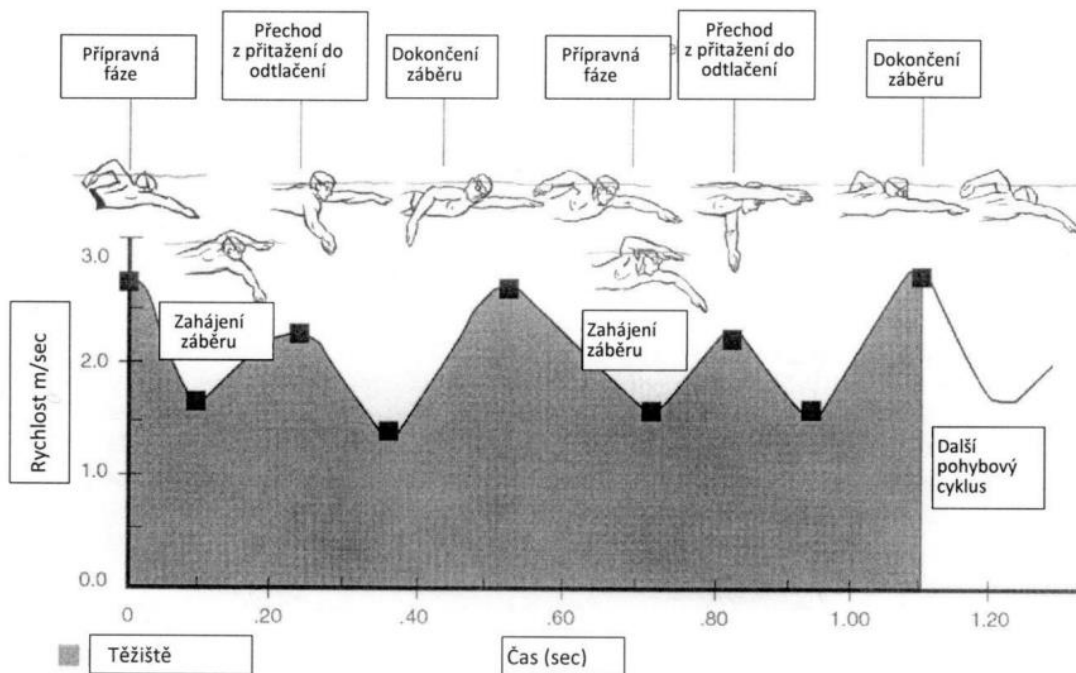
3. *záběrová fáze:*
 - a. fáze přitažení (insweep) – s propulzí,
 - b. fáze odtlačení (upsweep) – s propulzí,
4. *fáze vytažení* – bez propulze,
5. *fáze přenosu* – uvolnění a zotavení – bez propulze.

(Counsilman J. & Counsilman B, 1994; Hofer et al., 2016; Hofer & Felgrová, 2011; Chollet et al., 2000; Maglischo, 2016; Samson et al., 2015; Sanders a McCabe, 2015).

U pohybového cyklu HK definujeme začátek záběru (výchozí bod) okamžikem, kdy HK ukončila fázi přenosu (přípravnou fázi) a prsty ruky protínají vodní hladinu (Obrázek 1.4). Jakmile prsty vstoupí do vody a HK je natažená, začne její pohyb směrem dolů a vpřed. Poté přichází fáze přitažení, kdy se ruka a předloktí začínají pohybovat proti směru pohybu plavce, čímž je zahájena propulzní fáze záběru. Ve fázi, kdy je záběrová ruka v úrovni ramene, přechází HK z fáze přitažení do odtlačení (Obrázek 1.4). Následuje dokončení záběru a opět přípravná fáze (Colwin, 1999; Maglischo, 2016; Sanders a McCabe, 2015).

Obrázek 1.4

Grafické zobrazení průběhu rychlosti plavce v závislosti na jednotlivých fázích cyklu HK plaveckého způsobu kraul (Maglischo, 2003 in Jurák, 2018)



Přípravná fáze

Přípravná neboli vstupní fáze (downsweep) je nejvariabilnější fází pohybového cyklu HK a pomáhá optimalizovat hydrodynamickou polohu pro snížení odporu, aby bylo možné efektivně využít propulzní působení druhé HK. Přípravná fáze trvá 0,1–0,3 s, přičemž její trvání se prodlužuje s délkou závodní tratě (Maglischo, 2016; Sanders & McCabe, 2015). U sprinterů je přípravná i záběrová fáze prováděna rychleji než u plavců plavajících střední a dlouhé tratě, jelikož je jejich frekvence záběrů vyšší (Maglischo, 2016).

Přípravná fáze je pohyb HK, při němž do vody pronikají nejprve prsty s dlaní směřující ke dnu bazénu a následně se do vody zanořuje zápěstí, předloktí, loket a rameno (Hofer et al., 2016). Madsen et al. (2014) upřesňuje, že ve chvíli, kdy prsty vstupují do vody a HK je aktivně natažená pod vodou, je loket flektován.

Na obrázku 1.2 je možné vidět, že poté, co prsty protnou vodní hladinu, se HK postupně natahuje ve směru lokomoce, zatímco rychlost plavce se postupně snižuje až do bodu, kdy se HK začne pohybovat proti směru lokomoce plavce (Maglischo, 2003) z pohybu vpřed do pohybu dolů. Voda začne proudit přes prsty směrem ke hřbetu ruky a dojde k tzv. „chycení“ vody a je zahájena přechodná fáze. Fáze vstupu a následného protažení nemá propulzní efekt, ale spíše přispívá k udržení horizontální pozice těla plavce na hladině (Samson et al., 2015).

Přechodná fáze

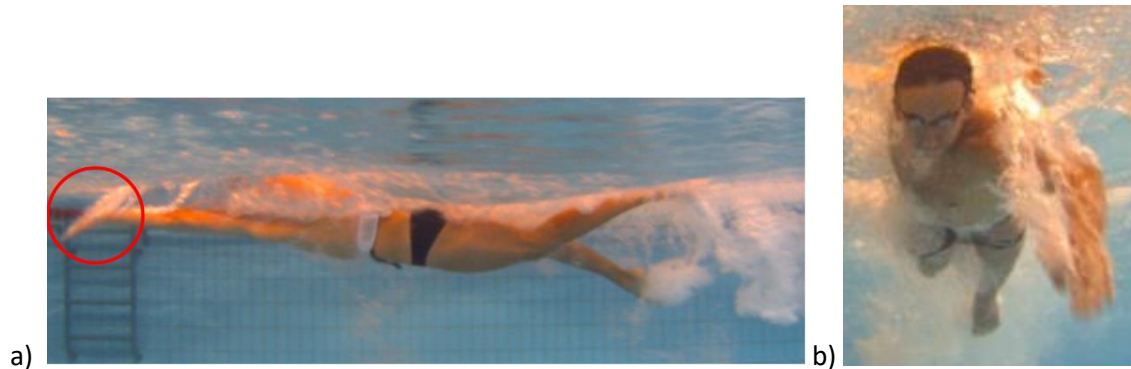
V této velmi krátké fázi trvající kolem 0,15 sekundy, přechází ruka v hloubce 50–70 cm z brzdící polohy do záběrové a rychlost plavání klesá o cca 1 m/s z 2,5 m/s na 1,5 m/s (Maglischo, 2016; Sanders & McCabe, 2015). Přechodná fáze je tedy okamžik, kdy se mění směr pohybu prstů a dlaně i jejich svalové napětí. Zároveň při změně úhlu náběhu ruky (úhel šípovitosti 90°–10°) dochází k tzv. „chycení“ proudící vody směřující od prstů přes hřbet ruky a částečně i malíkovou hranu. Úhel náběhu α je úhel, který svírá spojnice náběžné (část ruky, na níž nabíhá proudící voda) a odtokové (část ruky, z níž voda odtéká) hrany se směrem přítokové rychlosti. Úhel šípovitosti ψ udává základní geometrickou polohu ruky během jejího pohybu po trajektorii a současně určuje její náběžnou a odtokovou hranu (Hofer et al., 2016).

Přechodnou fázi je možné vymezit od ukončení přípravné fáze do zahájení záběrové fáze, kdy převládne pohyb HK směrem dozadu, proti směru lokomoce plavce (Sanders & McCabe, 2015). Plavci s vrcholovou úrovní kraulové techniky provedou při zahájení přechodné fáze palmární flexi zápěstí (Obrázek 1.5 a) a následně i flexi v loketním kloubu (Obrázek 1.5 b), zatímco plavci s nižší úrovní plavecké techniky zahájí fázi pohybem HK směrem dopředu a dolů. I když je důležité podotknout, že také velmi záleží na typu zvolené kraulové techniky a délce závodní tratě (Madsen et al., 2014). Při vytrvalostních tratích je kraulová technika více

„klouzavá“ (po vstupu ruky do vody následuje natažení HK a vytažení se za rukou ve směru lokomoce plavce), zatímco při sprinterských tratích je postavení ruky, předloktí a paže takové, aby mohl být proveden co nejrychlejší a nejsilnější záběr (Sanders & McCabe, 2015; podrobněji v kapitole 1.2.6 Kraulová souhra a typy kraulové techniky).

Obr. 1.5

Zahájení přechodné fáze: flexí zápěstí a), následná flexe v loketním kloubu v přechodné fázi záběru b)

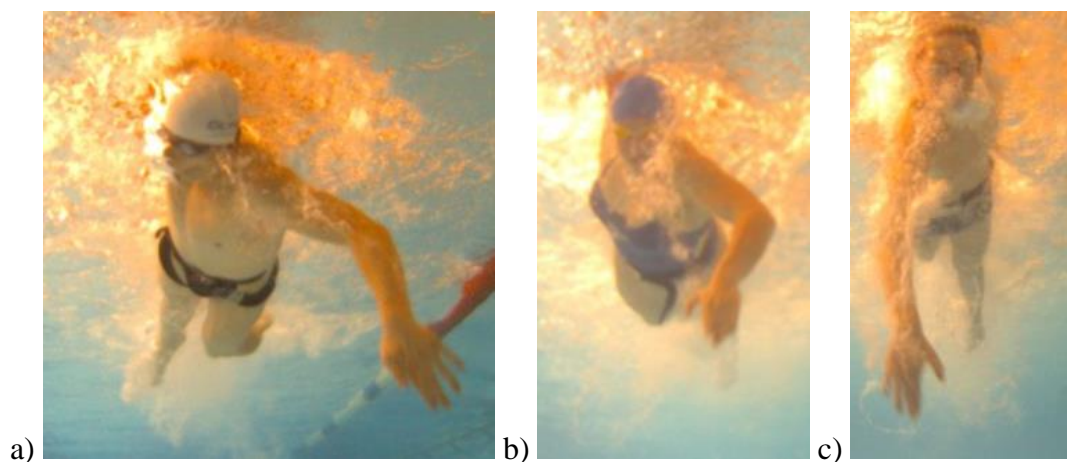


Maglischo (2003) ve své publikaci představuje tři styly přechodné fáze:

1. *první styl přechodné fáze* – ne příliš hluboký záběr HK výrazně vně podélné osy těla (Obrázek 1.6 a),
2. *druhý styl přechodné fáze* – hlubší záběr (oproti prvnímu stylu) HK blíže podélné osy těla (Obrázek 1.6 b),
3. *třetí styl přechodné fáze* – hluboký záběr s nataženou HK s rukou pod ramenem (Obrázek 1.6 c).

Obrázek 1.6

Tři styly přechodné fáze: a) Vně podélné osy těla, b) Hluběji a blíže k podélné ose těla, c) Hluboko s nataženou HK



Fáze záběrová

Záběrová fáze je nejstabilnější fází kraulového pohybového cyklu HK s délkou trvání 0,4–0,5 s dle délky plavané tratě a je možné ji rozdělit na fázi přitažení (tzv. insweep) a odtlačení (tzv. upsweep; Hofer et al., 2016). V první propulzní část záběru (přitažení) je pohyb ruky směrován zejména dolů až do dosažení nejhlubšího bodu (downsweep), přičemž HK je v této chvíli mírně vně podélné osy těla plavce (Maglischo, 2016; Hofer et al., 2016). Následně u HK dochází k flexi v loketním kloubu (40° – 60°) a k posunutím ruky a předloktí blíže k podélné ose těla pod hrudník, což vede k mírnému poklesu rychlosti (Maglischo, 2016). Ruka se v této fázi záběru pohybuje rychlostí od 1,5 m/s až do 3 m/s (Magalhaes, 2014). Po dosažení největší hloubky se HK začíná postupně ohýbat v loketním kloubu a ruka se začíná natáčet dovnitř směrem k podélné ose těla. Tento pohyb je doprovázen vnitřní rotací v ramenním kloubu a elevací lopatky. Loket se nachází ve vysoké poloze, takzvaně dlaň předbíhá loket (Hofer et al., 2016; Engel et al., 2022; Madsen et al., 2014). K největší flexi HK v loketním kloubu (90° – 120°) dochází ve chvíli, kdy se ruka nachází ve stejné ose jako rameno (Obrázek 1.7). Během fáze přitažení je palcová strana ruky náběžnou hranou, zatímco úhel šířkovitosti se postupně mění 90° – 0° (Hofer et al., 2016).

Obr. 1.7

Záběrová fáze přitažení ve chvíli kdy je loket nejvíce flektován

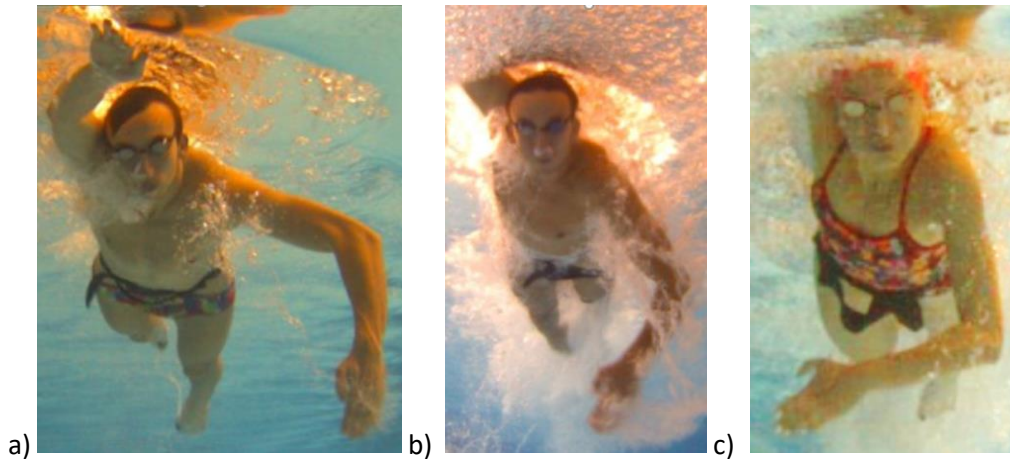


Maglischo (1993) rozeznává tři různé typy přitažení podle šířky záběru, kdy ruka během fáze přitažení:

- a) zůstává mimo linii plavce (Obrázek 1.8 a),
- b) nachází se mezi ramenem a středem trupu plavce (Obrázek 1.8 b),
- c) přesouvá se na druhou stranu těla plavce (Obrázek 1.8 c).

Obrázek 1.8

Tři typy fáze přitažení: a) Přitažení HK mimo linii plavce, b) Přitažení HK mezi ramenem a středem trupu plavce, c) Přitažení HK se přesouvá přes střed těla na druhou stranu těla plavce



Po dokončení fáze přitažení je paže kolmá k tělu a loket je pokrčen o 90° (Counsilman & Wilke, 1980; Maglischo, 2003). Pro vytvoření větších propulzních sil, zejména u sprinterů, je důležité ve fázi přitažení udržet menší úhel než 90° mezi nadloktím a předloktím. Avšak menší úhel než 90° je doporučován pouze sprinterům, protože při velkém nárůstu propulzních sil dochází k výraznějšímu přetěžování ramenního kloubu, rychleji nastupuje svalová únava spolu se zvýšenými nároky na energetické krytí daného pohybu (Prins et al., 2010).

Druhá část záběru (odtlačení = upsweep) ve které se mění směr pohybu HK, je fází záběru HK s největší propulzní účinností. Během fáze odtlačení se ruka otáčí směrem dozadu ke kyčli, zatímco loket zůstává mírně ve flexi (Obrázek 1.9), aby dlaň a předloktí směřovaly vzad co nejdéle (Evans, 2012). Ve fázi odtlačení dochází k otočení dlaně vně a pohybu HK vzad proti působení vody, zároveň dlaň a předloktí směřují šikmo vzad směrem nahoru k vodní hladině. V této fázi by měly prsty, pro maximální propulzní účinnost ruky, směřovat ke dnu bazénu. Na konci záběru by se plavec měl snažit udržet předloktí a dlaň co nejvíce kolmo na vodní hladinu. Jakmile se dlaň nachází za osou kyčelního kloubu, loket by se měl přiblížit k hladině (Maglischo, 2016). V průběhu záběru se plavec snaží práci ruky a předloktí usměrnit tak, aby výslednice hydrodynamických sil směřovala do směru plavání a byla co nejvyšší (Hofer et al. 2016; podrobněji v podkapitole 1.1.1 Propulzní práce HK). Účinnost kraulového záběru ovlivňuje úhel nastavení dlaně vůči vodě (Maglischo, 2016). Efektivní záběr je v případě, když se součet záběrových a náběhových úhlů dlaně rovná 90° (Bixler & Riewald, 2002).

Obrázek 1.9

Fáze odtlačení levé HK



Fáze odtlačení je ukončena ve chvíli, kdy plavec s mírně pokrčenou paží dokončí záběr a dojde ke změně napětí svalů předloktí (Maglischo, 2016).

Fáze vytažení

Po dokončení záběru, přesněji fáze odtlačení, nastává fáze vytažení trvající méně než 0,1 s (Hofer et al., 2016). Ruka v této fázi směřuje vpřed a zároveň nahoru, což má za následek vznik brzdících sil. Pro jejich eliminaci by se ve fázi vytažení měla ruka pohybovat s co nejmenším svalovým úsilím. Díky tomu, že jsou v této fázi pohybu svaly podílející se na záběrové fázi již relaxované, poloha ruky a předloktí je usměrňována zejména pohybem proudící vody (Hofer et al., 2016). Z vody vystupuje nejprve rameno, nadloktí, loket (Obrázek 1.10) a následuje předloktí a ruka s dlaní vytočenou dovnitř ke stehnu (pro minimalizaci odporu), s uvolněnými svaly předloktí a zápěstí (Maglischo, 2016).

Obrázek 1.10

Zahájení fáze vytažení levé HK



Fáze přenosu

Po fázi vytažení následuje fáze přenosu nazývaná také zotavením. Podle Maglisho (2016), ale i Sanderse a McCabe (2015) je fáze přenosu zahájena ihned po dokončení záběru, oproti tomu Hofer et al. (2016) před fázi přenosu vkládá ještě fázi vytažení HK z vody (viz výše). Fáze přenosu primárně slouží k přesunu uvolněných segmentů HK z připažení (dokončení záběru) přes osu ramenní do vzpažení (zahájení záběru). Při přenosu HK se loket zvedá ve směru lokomoce plavce, a to nahoru a vpřed po půlkruhové dráze, přičemž v nejzazším (nejvyšším) bodě se loket nalézá vně od boku trupu plavce (Maglischo, 2003).

Při přenosu je možné vést pohyb HK několika možnými způsoby, a to podle délky plavané tratě, rozsahu pohybu v ramenním kloubu a velikosti rotace trupu (Hall, 2020a, b; Bottom, 2012). Maglischo (2003; 2016) považuje za ideální přenos HK v pozici „vysokého lokte“, kdy jsou předloktí a ruka uvolněné a provádí kyvadlovitý pohyb vpřed, přibližně ve svislé rovině. Plavci, kteří „přenášejí“ paži nataženou poměrně nízko u vodní hladiny nemají dostatečný rozsah v ramenním kloubu. Naopak plavci s velkou pohyblivostí v ramenním kloubu se snaží vést loket po nejvyšší dráze (Hofer et al., 2016). Vysoký přenos natažené HK je charakteristický pro sprinterskou techniku (Hall, 2020a, c; Sanders & McCabe, 2015; Bottom, 2012.). U techniky záběru a přenosu HK u sprinterů je „odlišná především část ukončení záběru a první část fáze přenosu, kdy většina sprinterů vysouvá paži nataženou a až v průběhu přenosu se HK pokrčí v loketním kloubu“ Jurák (2018, 41–42 s.).

Vzhledem k tomu, že během přenosové fáze nevznikají propulzní síly, měl by být pohyb HK prováděn s co nejmenším narušením hydrodynamické polohy, s uvolněnými svaly HK a trupu (Maglischo, 2016). Fáze přenosu trvá 0,4–0,6 s, dle délky plavané tratě a končí ve chvíli, kdy se konečky prstů dotknou vodní hladiny (Hofer et al., 2016; Engel et al., 2022). Rychlost přenosu HK by měla odpovídat rychlosti HK při záběru (Štumbauer et al., 2013).

Načasování pohybu horních končetin

Při načasování kraulového pohybu HK je důležité zohlednit různou frekvencí záběrů, rychlost plavání i délku závodní tratě. U dálkových plavců vstup jedné HK do vody nastává ve chvíli, kdy druhá (protilehlá) HK dokončí fázi přitažení a zůstane v natažené pozici, dokud není zcela dokončena fáze odtlačení. U sprinterů protilehlá HK ve fázi natažení zůstává kratší dobu, než je tomu u dálkových plavců a vstup HK do vody je už během fáze přitažení protilehlé HK. Uchopení záběru následuje v průběhu fáze odtlačení protilehlé HK, aby bylo zabráněno zpomalení (Maglischo, 2003; Sanders & McCabe, 2015; Chollet et al., 2000). Sprinteři mají pohyb

HK sladěn tak, že se přechodná fáze jedné HK překrývá s odtlačením druhé HK (Čechovská & Miler, 2019). Tento typ kraulové techniky sice zvyšuje odporové síly i energetickou náročnost, ale výsledek se podle autorů kladně projeví v rychlosti plavání.

Sanders a McCabe (2015) zjistili, jaký je časový podíl jednotlivých fází pohybu HK. U dlouhých tratí autoři uvádí, že plavci zůstávají 40 % pohybového cyklu HK ve vstupní fázi, 17 % v první přitahové fázi záběru, 16 % v druhé fázi záběru – odtlačení a 27 % ve fázi přenosu neboli zotavení. Naproti tomu sprinteři stráví pouze 31 % ve vstupní fázi, 20 % v první přitahové fázi záběru, 19 % ve fázi odtlačení a 31 % ve fázi zotavení. Na základě vyvinutého Indexu koordinace (Index coordination – IdC) je možné rozlišit tři různé kraulové styly. V tzv. opozičním stylu jedna HK začíná první fázi záběru (přitažení) ve chvíli, kdy druhá HK končí fázi odtlačení, což odpovídá IdC 0 %. Ve druhém „dobíhavém“ stylu probíhá fáze přitažení jedné HK během fáze odtlačení druhé HK (IdC < 0 %). Třetí styl tz. „super-pozice“ nastává v okamžiku, když se obě propulzní záběrové fáze (přitažení a odtlačení) překrývají (IdC > 0 %). Autoři tvrdí, že negativní IdC lze nalézt u nízkého počtu záběrů u dlouhých tratí a pozitivní IdC koreluje s vysokým počtem záběrů na sprinterských tratích (Chollet et al., 2000).

1.2.3 Pohyb dolních končetin

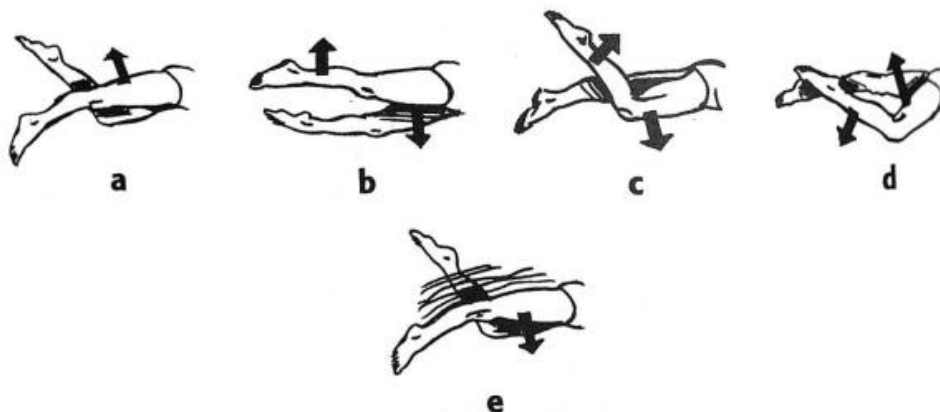
Práci DK se plavci snaží stabilizovat polohu těla, a s co největší úsporou energie kompenzovat kolísání rychlosti způsobené HK, čímž usilují docílit rovnoměrné rychlosti plavání (Maglischo, 2016; Motyčka et al., 2013; 2014). Kopání DK u kraulu zvyšuje odpor, avšak zároveň udržuje horizontální polohu těla, čímž v konečném důsledku přispívá ke snížení odporových sil. A proto se pro zlepšení výkonnosti musí plavci spíše zaměřit na snížení odporu, a pomocí kopu na udržení horizontální polohy těla, než na snahu získat propulzi (Narita et al., 2018). Přestože je kopání méně účinné než záběr HK, dosahují plavci vyšších rychlostí v průměru o 10 % při zapojení DK (Deschodt et al., 1999).

Činnost DK můžeme charakterizovat jako střídavý pohyb vlnivého charakteru s příznačným zvýšeným svalovým úsilím při pohybu DK směrem dolů a s maximálním rozsahem pohybu do 50 cm (Čechovská & Miler, 2019). Pohyb DK vycházející z kyčelního kloubu, který je postupně přenášen až na hlezenní kloub, zároveň cyklický pohyb bérce je vždy mírně opožděn za pohybem stehna (Hofer et al., 2016). Pro účinný kraulový kop je důležitá míra uvolnění hlezenního kloubu, při němž úhel extenze bérce dosahuje minimálně 70° (Colwin; 1999; Maglischo, 2016). „Efektivní kop se skládá z koordinace zapojení svalových skupin dolních končetin a trupu, z hloubky zanoření dolní končetiny pod hladinou a rovněž z úhlu natočení nártu a prstů během prováděného kopu“ Jurák (2018, s. 42). Mezní poloha nohy je začátkem

pohybového cyklu DK (viz Obr 1.5 a), kdy je DK natažená (s nártem vytočeným dovnitř) a v sagitální rovině mírně přesahuje podélnou osu těla. Následně se DK extenzí v kyčelním kloubu pohybuje směrem nahoru (upbeat) k vodní hladině. Impulz k zahájení extenčního pohybu v kyčelním kloubu směrem nahoru je reakcí na dokončení pohybu (kopu) DK směrem dolů (downbeat), kdy pohyb bérce je mírně opožděn za pohybem stehna (Hofer et al., 2016). Pohyb nahoru probíhá na rozdíl od pohybu směrem dolů s menším svalovým úsilím. Pohyb DK směrem dolů začíná flexí v kyčelním a následnou extenzí v kolenním kloubu (Maglischo, 2003). Pro efektivní práci kralových nohou je důležité provádět střídavý pohyb DK v úzkém postavení, s dostatečnou flexibilitou v hlezenním kloubu (Maglischo, 2016; Madsen et al., 2014). Fáze downbeat by měla být prováděna s pokrčeným a uvolněným kolenem a nohou směřující dolů a dovnitř (Engel et al., 2022; Madsen, 2014; Maglischo, 2016). Díky odporu vody je DK natažená, ale koleno a bérce by mělo zůstat bez napětí. Fáze pohybu nohy směrem dolů je zahájena ve chvíli kdy se chodidlo nachází v blízkosti vodní hladiny. Podle Maglischo (2016) při pohybu DK směrem nahoru dochází k působení brzdících sil, proto uvádí, že propulzní fáze kralového kopu je při pohybu DK směrem dolů. Ve chvíli, kdy je zahájen pohyb DK směrem dolů (propulzní fáze), je svalstvo ovládající bérce a nohu uvolněné a díky pokrčení DK v kolenním kloubu noha směřuje nahoru (Obrázek 1.11 c). Poté dochází k extenzi v kolenním kloubu (Obrázek 1.11 d) a dosud relaxovaný nárt se působením tlaku vody vytáčí dovnitř (inverze) a dokončuje kop, kdy je DK plně natažená (Obrázek 1.11 e; Hofer et al., 2016). Fyziologické dispozice každého plavce určí, k jak velkému rozsahu pohybu v hlezenním i kolenním kloubu dojde. Primární hnací síly (propulzi) vytváří plocha nártu a dolní část bérce. Následně se natažená DK začne pohybovat směrem nahoru a působením proudící vody se noha natáčí zpět do everzní polohy, při které klade menší odpor.

Obrázek 1.11

Pohyb DK u plaveckého způsobu kral (Hofer et al., 2016)



Práce DK při plavání v kraulové souhře se v současnosti dělí pouze na dvou-úderový kraul pro vytrvalostní pojetí a šesti-úderový pro sprintery spojený s vysokou frekvencí pohybu DK (Lauglin, 2013; více kapitola 1.1.6).

1.2.4 Rotace těla

Rotace těla v podélné ose usnadňuje provádění nádechové fáze a napomáhá zvýšení silového působení při záběru HK pod vodou (při přechodu z fáze přitažení do fáze odtlačení) i jejímu efektivnímu přenosu nad vodní hladinou (menší poloměr otáčení ramene; Counsilman & Counsilman, 1994; Maglischo, 2016; Sanders & McCabe, 2015). Rotace těla by měla být jak symetrická na obě strany, tak cyklicky rytmická a nezávislá na dýchání. Díky rotaci trupu ovlivňující polohu chodidel je kraulový záběr DK prováděn do strany, což kompenzuje opačnou rotací trupu a protilehlé pohyby HK (Sanders & McCabe, 2015). Díky rotaci trupu, která snižuje čelní průmět plavce, dochází ke snížení brzdivých sil působících na plavce (Seifert et al., 2004). Vztlková síla je hlavní složka silového působení pro rotaci trupu, přičemž elitní plavci ji k tomuto rotačnímu pohybu umějí efektivně využít (Yanai, 2001b). Rotace trupu nejen zvyšuje výkon plavců, ale zároveň pomáhá předcházet vzniku syndromu tzv. plaveckého (bolestivého) ramene (Motyčka, 2001, Sanders & Psycharakis, 2009 i Yanai, 2001b). V průběhu jednotlivých záběrů horní část těla rotuje kolem podélné osy těla, kdy ramenní osa svírá s hladinou úhel 35°–45° na nenádechové straně. Na vdechové straně je rozsah pohybu větší 50°–66° (Counsilman & Wilke, 1980; Maglischo, 2003; Payton a Sanders, 2011). Spolu s rotačním pohybem horní části trupu se natáčí také pánev, jejíž rozsah pohybu je však oproti ramenům menší (do 60°; Sanders & McCabe, 2015). Při nižší frekvenci záběrů HK dochází k pozdějšímu natočení pánve než při vysoké frekvenci záběrů. Přičemž rozdíly v rotaci pánve a ramen jsou nejvýraznější u plavců na delších (středních a dlouhých) tratích (Castro et al., 2003; McCabe a Sanders, 2012). K větší rotaci ramen dochází u vytrvalostních plavců oproti sprinterům, díky delšímu časovému intervalu mezi přípravnou fází a zahájením záběru (Castro et al., 2003). Časová křivka rotace (průběhu natočení) ramen během záběrového pohybu HK by u výkonnostních plavců měla připomínat sinusoidu s globálním maximem a minimem v rámci každého cyklu (Kudo et al., 2017), byť bude její amplituda narušována nádechovou fází (Sanders a McCabe, 2015). Tento princip byl prokázán i u pohybu boků plavců (Callaway, 2015; Davey et al., 2008; Rowlands et al., 2014; Stamm & Thiel, 2015). Natočení těla plavce na stranu usnadňuje pohyb HK ve fázi zotavení (Engel et al., 2022) a napomáhá k eliminaci pasivního odporu plavce (Maglischo, 2016). Rotace trupu také nemá zásadní vliv na plavcovu propulzi, jelikož rotační pohyb trupu ze strany na stranu pouze navazuje na krouživý pohyb HK, a to v pořadí ramena, pánev a DK. Laterální pohyb DK

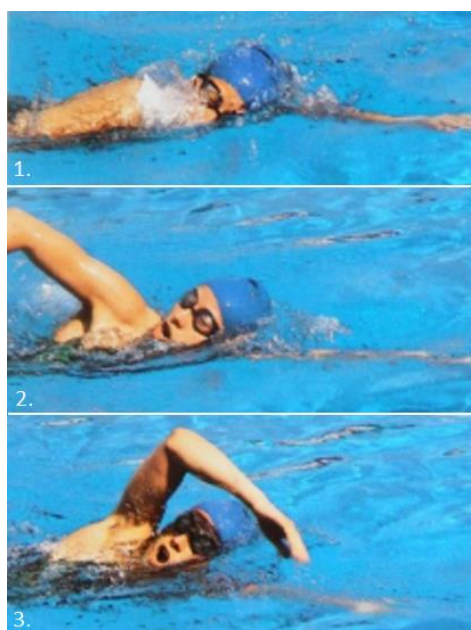
kompenzuje působení odstředivých sil, napomáhá plynulejšímu přechodu mezi záběrovými fázemi a udržuje dopředný směr plavání během rotace trupu (Maglischo, 2016). Začátek propulzní fáze HK (insweep) se shoduje s extrémní hodnotou natočení horní části těla plavce (Callawaye, 2015; Engel et al., 2022). Naopak ve chvíli, kdy se HK nachází v propulzní záběrové fázi (insweep), tělo se natáčí na opačnou stranu, aby podpořilo tento propulzní pohyb HK přecházející z fáze přitažení do odtlačení (Engel et al., 2022).

1.2.5 Dýchání

V základním plavání je u kraulu prováděn intenzivní nádech ústy a výdech nosem i ústy (Bělková, 1998) zatímco nádech i výdech je nepřetržitý a plynulý. V metodice Totálního plavání se zdůrazňuje okamžitý výdech nosem při zanoření obličeje do vody (bez zadržetí dechu), s nádechem ústy těsně nad hladinou (Laughlin, 2013). V závodním pojetí je nádech prováděn těsně u hladiny (na straně přenášené HK), a to díky sestupné části vlny, která se tvoří před hlavou plavce (Giehrl & Hahn, 2005). Čím plavec plave rychleji, tím je tato vlna větší (Hofer et al., 2016). Výdech je prováděn ústy a současně částečně i nosem (Čechovská & Miler, 2008; Hofer et al., 2016). Po intenzivním nádechu ústy s následným krátkým zatajením dechu probíhá výdech do vody až do chvíle, kdy má plavec reflexní potřebu se znovu nadechnout (Lukášek & Keberlová, 2011). Výdech nosem i ústy je realizován od začátku fáze přitažení do odtlačení, přičemž nádechová fáze probíhá vytočením hlavy směřující šikmo vzad s bradou nakloněnou k rameni (viz Obrázek 1.12; Giehrl & Hahn, 2005; Lukášek & Keberlová, 2011).

Obrázek 1.12

Provedení nádechové fáze u plaveckého způsobu kraul (Giehrl & Hahn, 2005)



Plavec vydechuje proti odporu vodního prostředí a v nádechové fázi překonává hydrostatický tlak vody, čímž dochází k posílení nádechových svalů a zlepšení funkce bránice (Bernacikova et al., 2010). Rytmus dýchání může být prováděn na jednu stranu po dvou i více záběrech HK nebo po třech či více záběrech HK střídavě na levou a pravou stranu (Čechovská & Miler, 2008). Podle Hofera et al. (2016) nejvíce plavců provádí nádech po třech záběrech HK (1,5 cyklu), avšak je nutné podotknout, že záleží na délce závodní tratě.

Správná kraulová technika dýchání vede ke zvýšení rychlosti a možnosti interpretace síly do dopředné rychlosti (Lerd & Cardeli, 2003). Avšak autoři některých studií shodně uvádí, že rychlejší čas dosáhnou plavci, pokud u kraulového způsobu sníží frekvenci nádechových fází (Couto et al., 2015; Pedersen & Kjendlie, 2006; Seifert et al., 2008). Dále bylo prokázáno, že u plaveckého způsobu kraul je dýchání parametr, který snižuje rychlost plavce o téměř 3 %, mění polohu těla plavce a zvyšuje odpor při pohybu hlavy do nádechové fáze (Mc Cabe et al., 2015). V případě krátkých 25metrových úseků nebyl prokázán statisticky významný rozdíl v průměrné rychlosti mezi úsekem, kde plavec provedl jeden nebo žádný nádech, avšak ke statisticky významnému snížení rychlosti došlo v případě, že plavci dýchali v každém plaveckém cyklu (oproti plavání bez nádechu; Pedersen & Kjendlie, 2006). Podle těchto autorů by plavci měli co nejméně dýchat ve sprintech na 50 m volný způsob, a ne více než každých šest záběrů v závodech na 100 m volný způsob. Tento trend omezení počtu nádechů na kratších tratích bylo možné vidět i na Olympijských hrách v Tokiu 2020, kdy plavci ve finále na trati 50 m volným způsobem nedýchali téměř vůbec. Naopak plavci na 100 m trati dýchali převážně na jeden plavecký cyklus na svoji dominantní HK a u 200 m tratě dýchali plavci jak na jeden, tak na jeden a půl cyklu HK (poslední metry před cílem se nenadechovali vůbec nebo jen v omezené míře).

1.2.6 Kraulová souhra a typy kraulové techniky

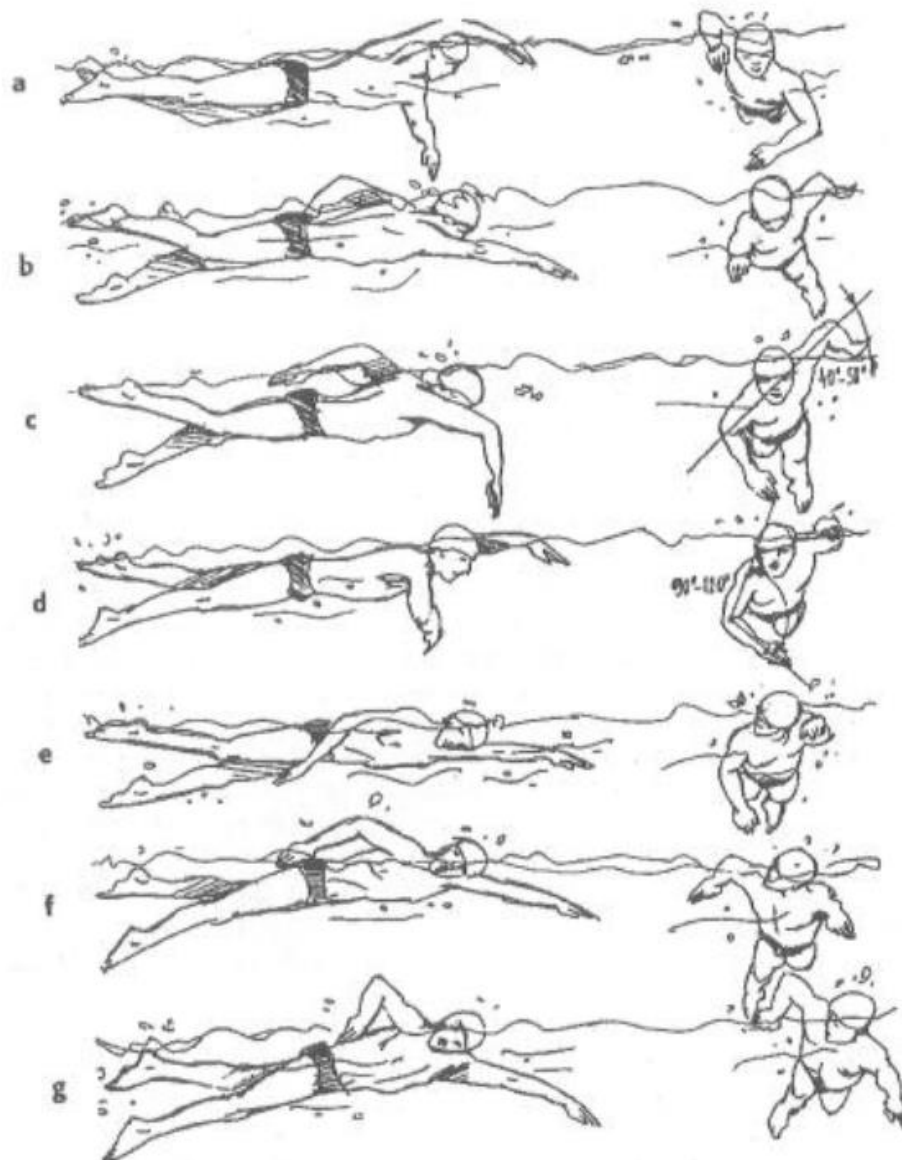
U kraulové souhry (pohyb HK a DK současně) se v současné době používá dvou, čtyř a zejména u sprinterů šesti úderový (kopy) kraul (Hannula & Thornton, 2012; Maglischo, 2016; Lauglin, 2013; Millet et al., 2002). Šesti úderový rytmus DK, který zahrnuje tři kopy na jeden záběr HK, tedy šest kopů za jeden cyklus, je pro většinu plavců nejpřirozenější, avšak pro plavání vytrvalostních tratí se využívá čtyř i dvou úderového kraul (Tarpinian, 2005).

Při kraulové souhře probíhá pohyb HK a DK tak, že nachází-li se pravá HK v přechodné fázi, pak se provádí kop pravou DK, ve fázi přitahování kop levou DK, ve fázi odtlačování je prováděn kop pravou DK a dále shodně na levou HK. V čase, kdy jedna HK prochází při záběru svislou rovinou proloženou ramenní osou (Obrázek 1.13 d), zasouvá se druhá HK do vody (Čechovská & Miler, 2019; Hofer et al., 2016; Maglischo, 2016). Záběr jedné HK je většinou ukončen v době

přípravné fáze druhé HK. Délka trvání přípravné fáze je individuální, avšak obecně je možné říci, že se prodlužuje s délkou plavané tratě. Avšak dříve, než začne zabírat druhá HK, rychlost plavání klesá díky tzv. „mezi-záběrové“ přestávce (Hofer et al., 2016). Ta vzniká ve chvíli, kdy jedna HK ukončuje záběr (fázi odtlačení), a druhá HK se nachází v přípravné fázi, jelikož plavec zde propulzně nepůsobí (podrobněji v podkapitole Načasování pohybu HK). Oproti ostatním plaveckým způsobům je mezi-záběrová přestávka u kraulu nejkratší (0,2 s). Díky krátké mezi-záběrové přestávce i relativně malému kolísání rychlosti v rozmezí 0,6–0,8 s je kraul považován za nejrovnoměrnější plavecký způsob, avšak i u něj je nutné překonávat jak hydrodynamické, tak velké setrvačné síly (Hofer et al., 2016; Maglischo, 2016).

Obrázek 1.13

Kinogram kraulové techniky (Hofer et al., 2016)



Rozdíly v technice provedení kraulové souhry závisí zejména na délce plavané tratě a frekvenci pohybů HK a DK, na délce plaveckého kroku (viz kapitola 1.2.2) nebo také zda pohyb vychází z ramen, boků nebo trupu (tzv. impulzu řízení pohybu; Maglischo, 2003). Můžeme tedy říci, že různé délky plaveckých disciplín vyžadují uzpůsobení plavecké techniky (optimalizací propulze a minimalizací odporů) pro maximalizaci výkonu plavce (Riewald & Rodeo, 2015). Za krátké sprinterské tratě považujeme disciplíny se vzdáleností 50 m a 100 m, za střední tratě 200 m a 400 m a závodní tratě nad 800 m už řadíme mezi dlouhé tratě (Huang et al., 2010; Maglischo, 2003; Riewald & Rodeo, 2015). Obecně je možné říci, že se technika provedení plavecké souhry u dálkových plavců a sprinterů liší zejména ve frekvenci záběrů HK a délce záběrů (vzdálenost uplavaná na záběrový cyklus). U sprinterského provedení kraulové souhry je frekvence pohybu HK i DK vyšší, délka záběru (plaveckého kroku) je nižší (Tabulka. 1.2) a energetická náročnost je oproti vytrvalostní technice vyšší (Čechovská & Miler, 2019; Riewald & Rodeo, 2015, Šťastný, 2016a).

Tabulka 1.2

Základní parametry lokomoce mužů v jednotlivých disciplínách volného způsobu (Čechovská & Miler, 2019)

Parametr	50 m	100 m	200 m	400 m	1500 m
Délka plaveckého kroku [m]	1,9	2,3	2,3	2,4	2,4
Frekvence pohybových cyklů [počet cyklů . min ⁻¹]	60	51	44	40	38
Čas pohybového cyklu [s]	1,0	1,18	1,36	1,5	1,58

Rozdíl v dráze pohybu ruky mezi vytrvalostní a sprinterskou technikou je minimální. Odlišnosti ve vytrvalostním a sprinterském pojetí kraulu je podle těchto autorů zejména v tom, že technika vytrvalostních plavců je ekonomičtější, splývavá, s využitím dvou i čtyř (výjimečně šesti) úderového cyklu DK, s větší rotací ramen a menší rotací v bocích, pro co největší možné zachování splývavé polohy (Riewald & Rodeo, 2015). Dále mají sprinteři kratší přípravnou fázi, zatímco ostatní fáze (záběrová a přenosu) mají delší a zároveň během záběrového cyklu zanořují ruku hlouběji než vytrvalci. V okamžiku vstupu ruky do vody je loket sprinterů více natažen než u dálkových plavců. Zároveň sprinteři plavou s vyšší frekvencí (na jeden záběrový cyklus 6 kopů)

i silou kopů, přičemž v ramenou a bocích rotují méně než vytrvalci (Hall, 2020b, c; Hannula & Thornton, 2012; Riewald a Rodeo, 2015).

Několik typů (stylů) kraulové techniky můžeme rozdělit podle toho, odkud je veden (řízen) plavcům pohyb u kraulu (Bottom, 2012; Hall 2020a, b, c, Yanai, 2001a):

1. *kraul vedený (řízený) pohybem z pánevní oblasti (Hip-Driven Freestyle)* – pohyb vychází z boků a následně dochází k rotacím trupu, přičemž záběrové pohyby HK navazují na tuto rotaci (využívá se na vzdálenosti tratě 200 m, dle některých publikací až 400 m a delší (Bottom, 2012),
2. *kraul vedený (řízený) pohybem z ramen (Shoulder-Driven Freestyle)* – dochází k rotaci převážně v horní části trupu a v pánevní oblasti dochází jen k mírnému pohybu (využívá se pro tratě 50–100 m (Bottom, 2012), ale i 200 m volný způsob muži a 50–1500 m volný způsob ženy (Hall, 2020d),
3. *kraul vedený pohybem těla (Body-Driven Freestyle)* – síla i rytmus by měly vycházet ze středu těla plavce a využívá se k dokončení závodu, (Bottom, 2012),
4. *hybridní kraulová technika (Hybrid technique)* – využívá se na tratích 100–1500 m, avšak nejčastěji je používána na vzdálenosti 200 m a 400 m. Tato technika je charakterizována silným kopem DK a dvěma různými způsoby přenosu paží (po nádechu je plavcova HK vedena rázněji a rychleji, než HK na ne-nádechové straně; Hall, 2020c).

Rozdíl mezi těmito technikami je v zotavovací a záběrové fázi i frekvenci záběrů HK. Kraulová technika, kdy je pohyb veden (vychází) z pánve, má nejnižší frekvenci záběrů HK (50–75 záběrů/min); naopak kraulová technika vedená z ramen má nejvyšší frekvenci záběrů HK (85–150 záběrů/min). Hybridní provedení kraulové techniky má míru frekvence HK mezi těmito dvěma technikami. Pro disciplínu 100 m volný způsob by měla být frekvence záběrů HK 120 záběrů/min a vyšší a u 200 m tratě a delší 86 záběrů/min a více (Hall, 2020d). V delších disciplínách 400 m a více se používají všechny tři kraulové techniky.

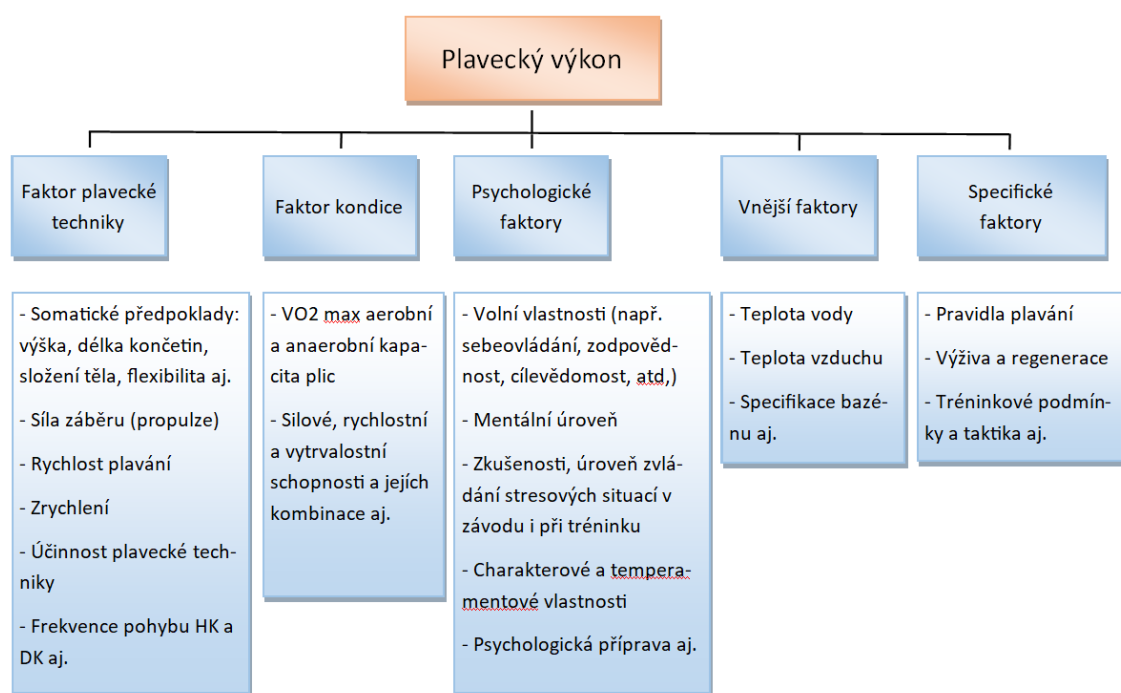
1.3 Vybrané faktory plaveckého výkonu

Plavecký výkon je ovlivněn kombinací různých faktorů, které je možné rozdělit do několika hlavních kategorií (Obrázek 1.14) jako jsou plavecká technika, psychické faktory, kondice a vnější i specifické faktory (Čechovská, 2001; Procházka & Macejková, 2003). Na důležitost dlouhodobého zkoumání vývoje a vzájemné interakce faktorů determinujících výkon zejména u mladých plavců upozorňuje několik studií (Staub et al., 2020a; Zacca et al., 2020). Mezi vysoce závislé faktory ovlivňující výkonnost mládeže patří zejména plavecká technika a tělesné rozměry

plavců (Abbott et al., 2021; Morais et al., 2021; Nevill et al., 2020). Dalšími zkoumanými faktory ovlivňujícími plaveckou výkonnost jsou kondice, svalová síla a její transfér do vodního prostředí (Amaro et al., 2017; Garrido et al., 2010b), biomechanické faktory (Abbes et al., 2021; Morais et al., 2012; Silva et al., 2012), výdej energie a plavecká účinnost (Denadai et al., 2000; Toubekis et al., 2006) a jejich vzájemná interakce (Barbosa et al., 2019; Morais et al., 2017;), a to zejména u dospívajících, ale i dospělých plavců. Dále je třeba zohlednit vztah s prostředím (na bazénu, rodinným aj.), neboť tento vztah je posuzován v rámci komplexního a dynamického systému (Phillips et al., 2010; Seifert et al., 2013). Někteří autoři zmiňují i další proměnné ovlivňující výkon plavce jako je výživa, regenerace, působení a osobnost trenéra, tréninkové podmínky aj., největší důraz kladou na somatické, psychologické, kondiční a vnější faktory včetně techniky a taktiky (Pokorná & Čechovská, 2009).

Obrázek 1.14

Faktory ovlivňující plavecký výkon



Z výše uvedených faktorů ovlivňující plavecký výkon se budeme dále zabývat pouze rychlostí plavání a zrychlením, účinností plavecké techniky a frekvencí pohybu HK a DK. Tyto faktory jsou zásadní pro analýzu plavecké techniky a výkonnosti plavce (Barbosa et al., 2011).

1.3.1 Rychlost plavání a zrychlení

Rychlost pohybu je významným faktorem výkonnosti, a díky technickým prostředkům také parametrem umožňujícím analýzu plavecké techniky.

Průměrná rychlost neudává informace o tom, jak rychle se těleso pohybuje v daném okamžiku, ale říká, jak velkou dráhu těleso urazí za jednotku času. Rychlost můžeme vypočítat ze vztahu:

$$v = \frac{s}{t} \quad (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}; \text{m}, \text{s}),$$

kde v je rychlost, s je dráha a t je čas.

Okamžitá rychlost je rychlost tělesa v daném časovém okamžiku (Reichl & Všetička, 2022).

Zrychlení je fyzikální veličina, která definuje, jak rychle se mění rychlost pohybu plavce. Pokud budeme blíže definovat zrychlení, můžeme říci, že se jedná o časovou změnu rychlosti mechanického pohybu, ať už kladné, což je zrychlení, nebo záporné, které se nazývá zpomalení. Okamžité zrychlení je zrychlení v daném nekonečně krátkém časovém okamžiku. Okamžité zrychlení můžeme vypočítat jako první derivaci rychlosti podle času, tedy:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (\text{m}\cdot\text{s}^{-2}; \text{m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{s}),$$

kde a je zrychlení, v je okamžitá rychlost a t je čas (Dohnal, 2012).

Zrychlení se měří akcelerometrem, který je součástí inerciální měřicí jednotky. Toto zrychlení je zaznamenáváno s definovanou frekvencí, což nám umožní získat časový průběh zrychlení. Okamžitou rychlost ze zrychlení lze vypočítat dle vztahu:

$$v = \int a \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} a(t) \cdot dt \quad (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}; \text{m}\cdot\text{s}^{-2}, \text{s})$$

Informace o zrychlení případně rychlosti plavce je významná pro hodnocení plavecké techniky z pohledu provedení jednotlivých záběrů a jejich optimalizování pro konkrétního plavce.

1.3.2 Účinnost plavecké techniky

Otázkou vztahu mezi rychlostí a účinností se zabývá více autorů, přičemž pojetí účinnosti plavecké techniky se mezi autory různí. Jeden z pohledů na účinnost plavecké techniky souvisí s prostorovými a časovými parametry, vytvořením propulzních sil (účinností) a velikostí odporu s důrazem na poměr mezi vydanou (kinetickou) energií nutnou k uplávání dané vzdálenosti za čas a celkovou energií, která je během pohybu dostupná z energetických systémů těla plavce (Toussaint et al., 1990; Toussaint & Beek, 1992).

Účinnost plavecké techniky z hlediska délky plaveckého kroku definuje, o jakou vzdálenost se plavec posune za jeden pohybový cyklus. Tedy, čím méně záběrů je třeba na uplávání dané

vzdálenosti v maximální intenzitě, tím je plavecká technika propulzně účinnější (Costil et al., 1985; Hofer et al., 2016; Letzler & Freitag, 1983; Maglischo, 2003; Pai et al., 1984; Pokorná; 2010; Procházka & Macejková, 2003). Plavci s účinnější plaveckou technikou zdolávají svoji trať delším plaveckým krokem s menším počtem záběrů (Hofer et al., 2016).

Dalším ze směrů hodnocení účinnosti plavecké techniky je analýza nárůstu efektivity plavání při zaměření se na frekvenci pohybu HK a DK (Abobott et al., 2021; Costil et al., 1985; Silveira et al., 2017). Mechanická účinnost plavání se sice liší v závislosti na záběru končetin, ale ve skutečnosti se na mechanickou práci přemění pouze ~6–18 % vyprodukované energie (Thompson, 2014). V komplexnějším pohledu autoři sledují nejen frekvenci záběrů HK a DK, ale sledují další parametry, jako je plavcův energetický výdej, délka plaveckého kroku, překonání aktivního měřeného odporu aj. (Ribeiro et al., 2016; Seifert et al., 2015; Zamparo et al., 2020).

Další možností pojetí účinnosti plavecké techniky je z pohledu vykonané práce (Bátorová et al., 2021; Kopřiva, 2011; Lukášek, 2001; Motyčka et al., 1998, 2001, 2009, 2010, 2011a, b, c, 2013, 2014; Nigg, 1983; Šťastný & Motyčka, 2012; 2013; Šťastný, 2016a; Šťastný et al., 2016), kdy s rostoucím kolísáním okamžité rychlosti klesá účinnost plavecké techniky (Kopřiva, 2011). Plavec vynaloží menší práci při konstantní rychlosti, kdy zvýšení rychlosti navyšuje množství vykonané práce, což snižuje účinnost plavání (Nigg, 1983; Truijens & Toussaint, 2005). Brooks (2011) v podobném významu používá pojem konstantní propulze (hybnost), která je podle něj pro plavecký výkon klíčová. Autor upozorňuje, že pro nejlepší plavecký výkon je třeba co možná nejvíce eliminovat „mezery“ mezi propulzními fázemi záběru, aby nedocházelo k výraznému zrychlení a zpomalení plavce, jelikož to stojí plavce energii i rychlost. Brooks doporučuje plavat konstantní rychlostí, tedy s co nejmenšími poklesy rychlosti, což dle našeho pojetí znamená, s co nejvyšší účinností plavecké techniky.

V našem výzkumu jsme vycházeli z pojetí účinnosti plavecké techniky právě z pohledu vykonané práce (Kopřiva, 2011), jehož podstatou bylo, že pokud by byl plavec schopen plavat stálou a rovnoměrnou (konstantní) rychlostí, byla by jeho účinnost plavecké techniky rovna jedné (vyjádřeno procenty 100 %) a je možné ji vypočítat jako podíl práce při rovnoměrné průměrné rychlosti a práce při kolísající rychlosti, která je vždy větší, a proto je účinnost vždy menší než jedna.

$$\eta = \frac{\text{práce při rovnoměrné rychlosti (menší)}}{\text{práce při skutečné rychlosti (větší)}}$$

Následující text práce byl zaměřen na odvození tohoto vztahu.

Vzhledem k tomu, že plavec vytváří dopřednou hnací sílu záběrem HK a DK, bude jeho okamžitá rychlost kolísat. Průměrná rychlost v vymezeného úseku (závodní tratě, výjezdu nebo jednoho tempa) je dána poměrem délky s vymezeného úseku a času t , za který plavec tento úsek zaplave:

$$v = \frac{s}{t} \quad (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}; \text{m}, \text{s})$$

Na rozdíl od průměrné rychlosti okamžitou rychlost uvažujeme ve velmi krátkém časovém úseku (dt), který se ideálně blíží k nule. Prakticky tato hodnota závisí na vzorkovací frekvenci měřicího systému. Okamžitou rychlost tedy můžeme vyjádřit vztahem:

$$v_i = \frac{ds}{dt} \quad (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}; \text{m}, \text{s})$$

Kde v_i je okamžitá rychlost daného elementárního úseku, ds je dráha, kterou plavec uplave touto rychlostí za velmi krátký časový úsek dt . Pro vybraný sledovaný úsek byla vypočtena průměrná rychlost pomocí vztahu:

$$v_s = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i \quad (\text{m}\cdot\text{s}^{-1}; \text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

Kde v_s je průměrná rychlost, v_i je i -tá okamžitá rychlost a n počet naměřených hodnot okamžitých rychlostí. Vztah lze použít pro výpočet průměrné rychlosti pro libovolný měřený úsek.

Jelikož účinnost plavecké techniky je v našem případě definována jako podíl práce při průměrné rychlosti na měřeném úseku a práce při skutečné (okamžité) rychlosti, je nutné tuto práci odvodit. Vycházíme z toho, že plavec vynaloží práci na překonání odporu vody, zatímco odpor vody, který musí plavec překonávat, je úměrný druhé mocnině okamžité rychlosti a lze ho vyjádřit vztahem:

$$F_i = k_1 \cdot v_i^2 \quad (\text{N}; \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}),$$

kde k je koeficient, který vychází z Newtonova zákona odporu a závisí na ploše těla plavce v dopředném směru a hustotě vody, která se mírně snižuje s rostoucí teplotou. Dále výkon nutný k překonání tohoto odporu lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$P_i = F_i \cdot v_i = k \cdot v_i^3 \quad (\text{W}; \text{N}, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}; \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

Z uvedeného vztahu lze vidět, že výkon roste s třetí mocninou rychlosti. Jak bylo uvedeno dříve, práci lze vyjádřit jako násobek výkonu a času, tudíž „okamžitou“ práci lze vyjádřit vztahem:

$$dW = P_i \cdot dt = k \cdot v_i^3 \cdot dt \quad (\text{W}\cdot\text{s}; \text{W}, \text{s}; \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{s})$$

Pak práci při měnící se rychlosti můžeme vyjádřit jako:

$$W = k \cdot dt \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \quad (\text{W}\cdot\text{s}; \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

a práci při průměrné rychlosti jako:

$$W_s = k \cdot t \cdot v_s^3 \quad (\text{W}\cdot\text{s}; \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}, \text{m}\cdot\text{s}^{-1})$$

Práce při průměrné rychlosti je vždy menší, než práce vypočtená z kolísavé skutečné rychlosti. Poměr těchto prací můžeme vyjádřit jako účinnost plavecké techniky pomocí vztahu:

$$\eta = \frac{\text{práce při rovnoměrné rychlosti (menší)}}{\text{práce při skutečné rychlosti (větší)}} = \frac{W_s}{W} = \frac{k \cdot v_s^3 \cdot t}{k \cdot dt \sum_{i=1}^n v_i^3} \quad (-)$$

Účinnost je bezrozměrné číslo, které je vždy menší než jedna. Ze vztahu je možné také odvodit, že menší kolísání rychlosti v_i vede k větší účinnosti. Lze tedy konstatovat, že čím je menší kolísání okamžité rychlosti plavce, tím je plavecká technika efektivnější a dokonalejší (Kopřiva, 2011; Motyčka et al., 2001; 2009; 2013; 2014; Pendergast et al., 2006; Šťastný & Motyčka, 2012; 2013; Šťastný et al., 2016).

1.3.3 Frekvence pohybu dolních a horních končetin

Důležitou informaci o efektivní plavecké technice podává frekvence pohybu HK a ve specializovaných případech i DK. Na jeden cyklus pohybu HK připadá více záběrových cyklů DK, přičemž u plaveckého způsobu kraul na jeden cyklus záběru HK zpravidla připadá šest kopů, ale je používán i dvou nebo čtyř-kopý kraul (Hannula & Thornton, 2012). Frekvence pohybu HK (f) je údaj, který u plavání udává, kolik záběrů udělá plavec za minutu ($\text{ckl} \cdot \text{min}^{-1}$), ale je možné jej definovat i jako čas potřebný k realizaci jednoho plaveckého cyklu (s) nebo v počtech záběrů za jednu sekundu (Hz) (Barbosa et al., 2011).

Plavci v závodě dosahují větší rychlosti zpravidla zvýšením frekvence záběrů HK. Avšak při vyšší frekvenci záběru HK mnohdy dochází ke snížení efektivnosti záběrů (překonání menší vzdálenosti na jeden „záběr“), zatímco vynaložená energie vzroste. Experimentální a simulační studie však ukázaly, že existuje maximální frekvence, po jejímž překročení plavci nemohou dále zvyšovat rychlost plavání v důsledku změny úhlu náběhu ruky, která snižuje její hnací sílu (Takagi et al., 2021). Nicméně výsledky výzkumných studií zabývajících se frekvencí a propulzním působením DK jsou rozporuplné (Takagi et al., 2021). Některé studie naznačují, že efektivnost kopání (pozitivně ovlivňující plavecký výkon) je odlišná ve vysokých a nízkých rychlostech plavání (Gatta et al., 2012).

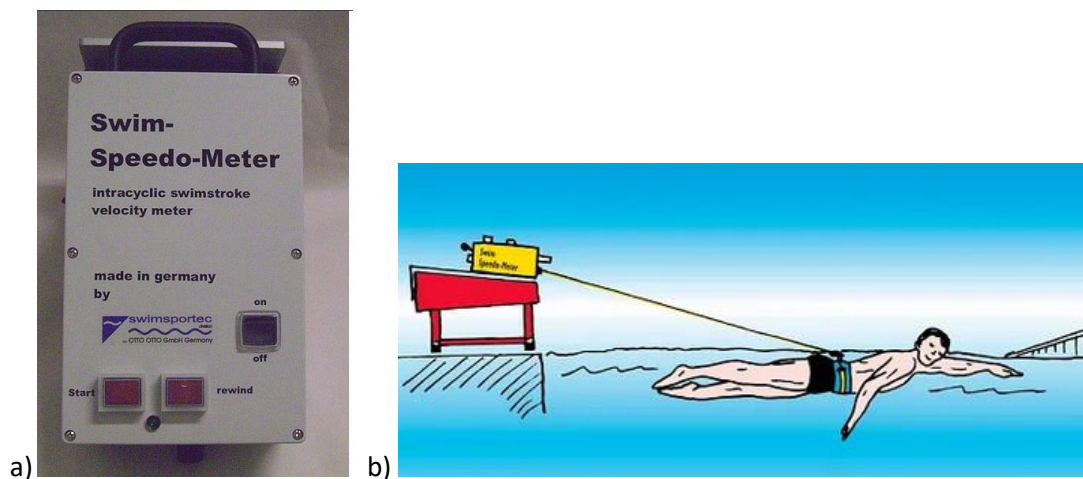
Proto je pro trenérskou praxi důležité sledovat parametr frekvence spolu s průměrnou rychlostí plavání. Pokud se při zvýšené frekvenci nezvýší i průměrná rychlost plavce, je efektivnější plavat s nižší frekvencí práce DK. Maglischo (2003) uvádí, že na padesátimetrové trati se frekvence pohybu HK pohybuje zpravidla mezi 56–67 $\text{ckl} \cdot \text{min}^{-1}$, na 100metrové trati je to 50–56 $\text{ckl} \cdot \text{min}^{-1}$, s rostoucí délkou závodní trati se frekvence dále snižuje.

1.4 Technologie pro analýzu plavecké techniky a výkonosti

V minulosti se pro analýzu pohybu v plavání nejčastěji používala zařízení pro měření rychlosti na principu tachometrů a dynamometrů. Jedním z těchto přístrojů je Speedometer (Swim Speedo-meter; Swimsportec, Hildesheim, Germany; Obrázek 1.15 a, b), jehož validitu ověřili portugalští výzkumníci v roce 2006 u plaveckého způsobu motýl (Morouço et al., 2006) a o 7 let později pro všechny ostatní plavecké způsoby (Feitosa et al. 2013a, b). V tomto roce bylo toto zařízení využito pro analýzu proměnných ovlivňujících výkon plavců (Morais et al., 2013). Pomocí Speedometru byl také proveden výzkum zaměřený na klasifikační systém kinematických, antropometrických a hydrodynamických vlivů na výkon plavce (Barbosa et al., 2013).

Obrázek 1.15

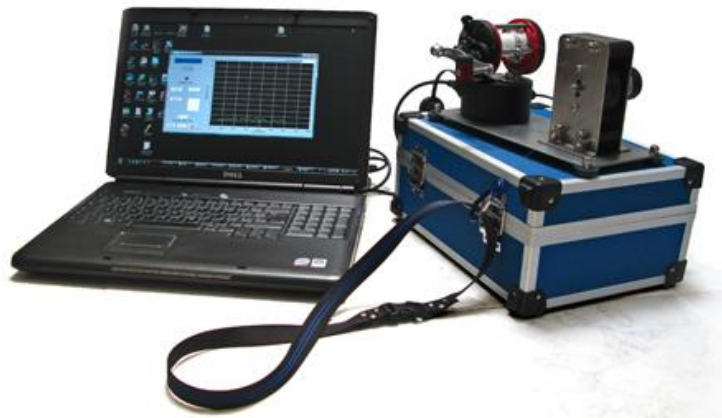
a) Speedometer (Speedometer-SwimSportec Katalog., 2022), b) Upevnění Speedometru na startovním bloku (Sport thieme, 2022)



Dalším principiálně podobným měřicím zařízením je Velocity meeter Speed Real Time s označením SpeedRT® od společnosti APLab se sídlem v Římě v Itálii (SpeedRT®, Velocity meter, APLab, Rome, Italy; Barbosa et al., 2021; Dadashi et al., 2012), který však stejně jako Speedometer měří dopřednou rychlost plavce (upnutého na lanku) pouze směrem od přístroje (Obrázek 1.16) nebo také Tachograf (Motyčka et al., 2009; 2013; Šťastný et al., 2016).

Obrázek 1.16

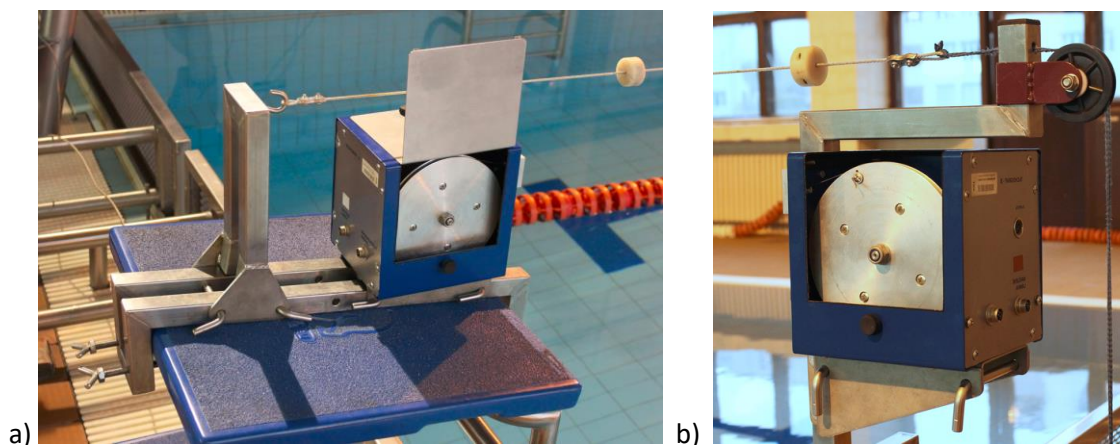
Velocity meeter Speed Real time měřící dopřednou rychlost plavce (APLab, 2022)



Nový prototyp tachometrického zařízení na měření rychlosti přímočarého pohybu plavce (Obrázek 1.17 a, b) se synchronním videozáznamem s názvem s názvem Tachograf II byl vyvinut na VUT v Brně v roce 2009 (Motyčka et al., 2009). Tento měřící systém s podvodními videokamerami se využívá až do současnosti pro analýzu plavecké techniky závodních plavců ČR (Bátorová et al., 2021; Motyčka et al., 2014; Šťastný et al., 2016). Více o Tachografu II bude popsáno v kapitole 3.4.

Obrázek 1.17

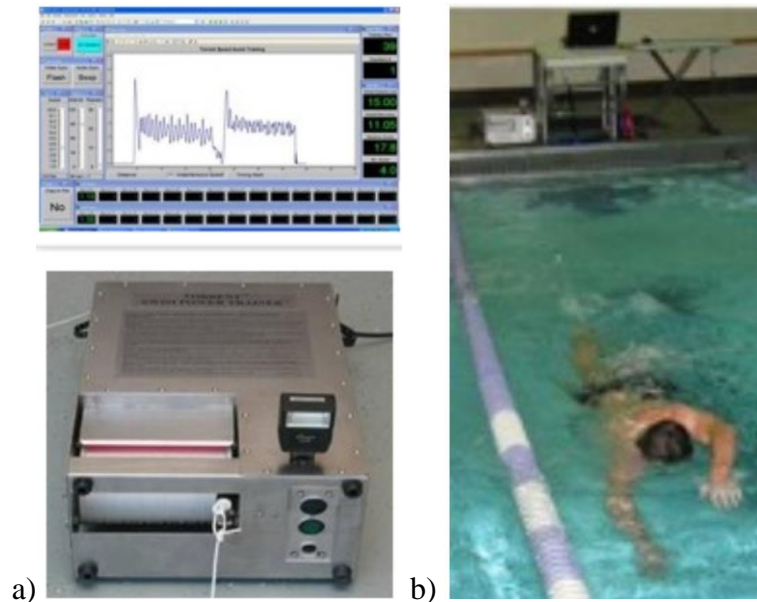
a) Tachograf A upevněný na startovním bloku na čelní straně bazénu, b) Tachograf B upevněný na speciální konstrukci na zadní straně bazénu



Mezi tyto typy přístrojů můžeme zařadit i tachodynamické zařízení Torrent E-Rack (The Torrent™ E-Rack™ Electronic Swim Power Trainer™, TriLabs, California, USA; Obrázek 1.17 a, b), které však měří silové působení plavce (Obrázek 1.18 a, b).

Obrázek 1.18

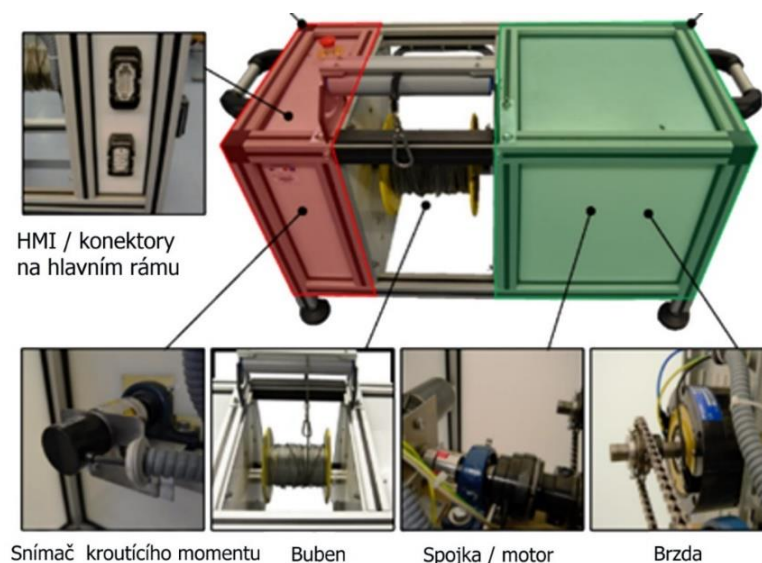
- a) Tachodynamické zařízení Torrent E-Rack s grafickým výstupem v software (vlevo nahoře),
b) Plavec upnutý k měřicímu zařízení Torrent E-Rack (Tropical Penguin, b.r.)

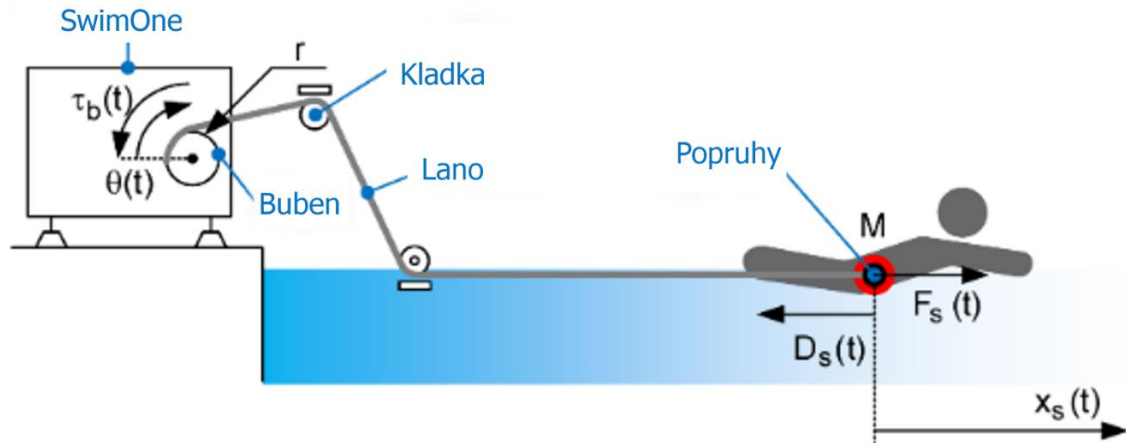


Elektromechanické zařízení SwimOne (Obrázek 1. 19 a, b) bylo zkonstruováno k měření hnací (okamžité) síly plavce na principu dynamometrie a stanovení okamžitého výkonu plavce (rychlost a zrychlení plavce). SwimOne byl vyvinut týmem výzkumníků z Toleda a Madridu a je také schopen vyvinout brzdívou sílu pro tréninkové účely plavců (Herмосilla et al., 2020).

Obrázek 1.19

- a) Hardware elektromechanického zařízení SwimOne (Herмосilla et al., 2020), b) Princip elektromechanického zařízení SwimOne (Herмосilla et al., 2020)





V současnosti nejvyžívanější metodou pro hodnocení plavecké techniky v závodním plavání je 3D kinematická analýza (Morais et al., 2022b; Seifert et al., 2021; Thow et al., 2012), která je považována za nepřesnější metodu (Hamidi Rad et al., 2021a; Mooney et al., 2015; Seifert et al., 2015). Avšak tento postup hodnocení plavecké techniky výrazně zasahuje do tréninkového procesu, je velmi časově i odborně náročný z pohledu měření i zpracování dat (Mooney et al., 2015) a má svá omezení pro použití ve vodním prostředí (Callaway et al., 2009). Z těchto důvodů se v posledních dvou desetiletích vývoj technologií pro analýzu plavání zaměřil spíše na inerciální měřicí jednotky (IMU) skládající se z akcelerometrů, gyroskopu, případně i magnetometru (Guignard et al., 2017; Fulton et al., 2009; Magalhaes et al., 2014; Ohgi et al., 2002b). Nejčastěji měřenými veličinami IMU senzorů je zrychlení a úhlová rychlost. Měření zrychlení ve třech navzájem kolmých osách umožňuje trojosý akcelerometr. Integrací zrychlení měřeného akcelerometrem v jednotlivých osách je možné stanovit rychlost. Součástí jednotky je také již zmiňovaný trojosý gyroskop, který umožňuje měření úhlových rychlostí. Postupnou integrací úhlové rychlosti lze určit úhel natočení těla plavce nebo jeho jednotlivých segmentů (Lee et al., 2021).

Díky neustálému vývoji technologií jsou inerciální senzory stále menší i kompaktnější, což vede ke snížení jejich hydrodynamického odporu i rozšíření možností upevnění senzorů na tělo plavce. Nejčastěji jsou senzory upevňovány na spodní část zad v oblasti těžiště nebo na jednotlivé segmenty těla s důrazem na to, aby bylo omezení pohybu minimální (Magalhaes et al., 2014; Morais et al., 2022b). Tyto senzory se také umísťují na horní část zad, zápěstí, v oblasti kotníků, na zadní stranu hlavy pod plaveckou čepici nebo na boční stranu plaveckých brýlí (Pansiot & Yang, 2010). Díky měření několika senzorů současně je možné zvýšit počet měřených veličin (Aroganam et al., 2019), avšak je třeba brát v potaz, že jakékoliv zařízení upevněné na plavci včetně IMU senzorů zvyšuje hydrodynamický odpor plavce vůči vodnímu prostředí

(Hamidi Rad et al., 2021a). Proto je důležité využívat jen nevyhnutelný počet senzorů (dle zaměření výzkumu) s odpovídající fixací, aby se zvýšení odporu co nejvíce zamezilo.

Pomocí IMU senzorů je možné měřit kinematické parametry jednotlivých úseků plavané tratě, jako jsou starty (Stamm et al., 2013a, b; Vantorre et al., 2014), plavání souhrou (Davey et al., 2008) nebo obrátky (Nicol et al., 2018; Slawson et al., 2012). Pro hodnocení plaveckého výkonu je možné z měření pomocí IMU odvozovat nebo extrahovat další proměnné (Hamidi Rad et al., 2021a; Morais et al., 2020, 2022b), mezi něž patří počet uplavaných bazénů i záběrů na jednotlivých délkách (Bächlin & Tröster, 2012; Le Sage, 2010). Dále rychlost záběru (Beanland et al., 2014; Siirtola et al., 2011), uplavanou vzdálenost na jeden záběr (Bächlin et al., 2008) nebo rychlost plavání a frekvence záběrů (Dadashi et al., 2015; Simbaña-Hellard & Seifert, 2020; Wright & Stager, 2013; Zhang et al., 2017). Pomocí IMU a specifických algoritmů je také možné detekovat prováděné záběry (Cortesi et al., 2019; Zhang et al., 2017) včetně zkoumání jejich symetrie, a to u HK (Pansiot et al., 2010; Stamm & Thiel, 2015;) spolu s jejich propulzním působením (Lanotte et al., 2018) nebo také rychlost pohybu DK (Fulton et al., 2009) spolu s koordinací těla (Osborough et al., 2010; Silva et al., 2012) i jeho rotace (Félix et al., 2019). Z naměřených parametrů z těchto senzorů lze také určit energetický výdej plavce (Demarie et al., 2019). Nejvíce zkoumanou plaveckou technikou prostřednictvím IMU senzorů je plavecký způsob kraul (Mooneyho et al., 2016).

Značnou výhodou využití IMU senzorů, oproti jiným měřicím zařízením, je i možnost měření a následné analýzy všech plaveckých fází včetně startů a obrátek, což je pro plavce i jejich trenéry nepostradatelné (Mooney et al., 2016). Rozšíření funkcionality analýzy naměřených dat pomocí IMU senzorů umístěných na zápěstí plavce nabízí využití algoritmů pro automatickou detekci (rozpoznání) jednotlivých fází plavání i plaveckých způsobů (Mooney et al., 2016; Topalovic et al., 2014). Díky IMU senzorům s gyroskopem a magnetometrem umístěných na spodní části zad spolu s využitím strojového učení je možné také provádět analýzu plavání z pohledu rotace těla v podélné (vertikální) ose a změny úhlu sklonu kolem frontální osy (Félix et al., 2019).

Vzhledem k tomu, že je o IMU senzory u koncových uživatelů (trenéři, plavci) stále větší zájem, bylo nutné určit přesnost měření těchto zařízení. Bylo prokázáno, že IMU senzory umožňují přesné měření rychlosti záběru i časů na daném měřeném úseku (Bächlin & Tröster, 2012; Daukantas et al., 2008; Davey et al., 2008; Le Sage et al., 2010, 2011; Stamm et al., 2013a, b). I u komerčně dostupného akcelerometrického zařízení využívaného pro analýzu plavecké výkonnosti, jakým je TritonWear (IMU–TritonWear, Toronto, TritonWear®), bylo nutné posoudit jeho validitu. Toto zařízení skládající se z akcelerometru, gyroskopu i magnetometru je možné vložit ze zadní strany hlavy (Obrázek 1.20) pod plaveckou čepici a umožňuje v reálném čase

zobrazovat i online ukládat data pro další analýzu (TritonWear, 2022). Výrobci uvádí, že přístroj je schopen analyzovat mezičasy, počet a délku záběrů i jejich rychlost, uplavanou vzdálenost pod vodou a čas, za který plavec provede obrátku.

Obrázek 1.20

Inerciální měřicí jednotka pro analýzu plavání TritonWear (TritonWear, 2022)



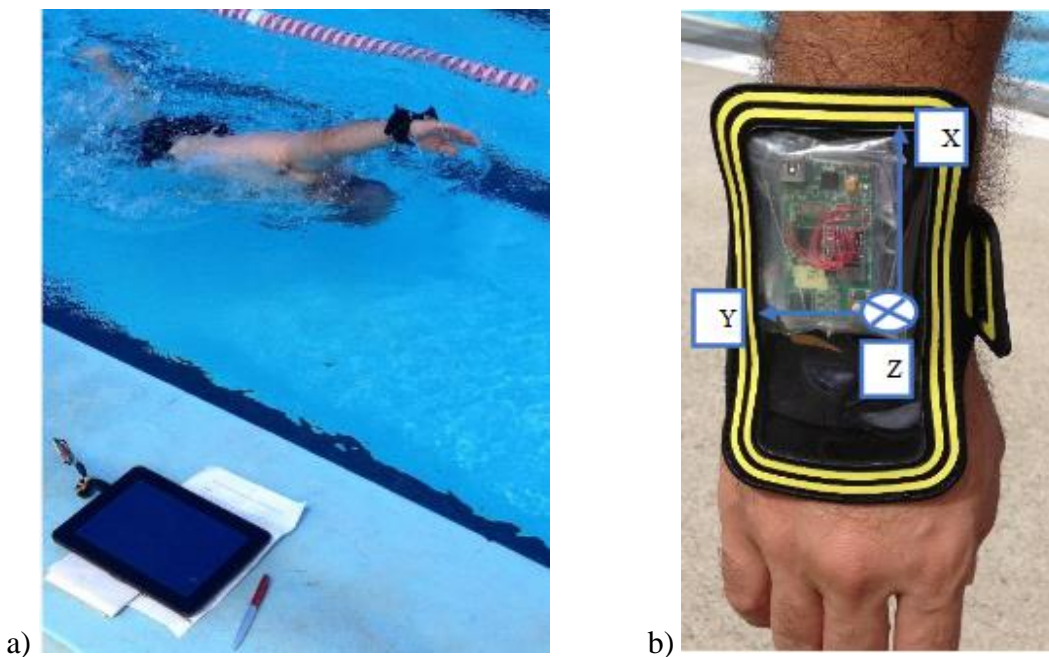
Butterfield et al. (2021) ověřovali validitu tohoto zařízení pomocí kamerového systému u kraulu a prsašského způsobu. Autoři uvádějí, že TritonWear lze použít pro měření mezičasů a rychlosti plavání, ale upozorňují na chybovost u složitějších měření jako je čas plavání pod vodou u výjezdu nebo u obrátky. Také Shell et al. (2021) došli k závěru, že toto zařízení měří vyšší uplavanou vzdálenost, počet záběrů a průměrnou rychlost oproti video analýze a zároveň není schopen správně vyhodnotit čas plavaný jednotlivými plaveckými způsoby ani správně rozpoznat jednotlivé typy záběrů. Dalším zařízením pro analýzu pohybu plavce je Ciren založený na NANO MEMSense inerciální měřicí jednotce, která se skládá z kombinovaného tříosého akcelerometru, magnetometru, gyroskopu a integrované řídicí jednotky, která zaznamenávala data s frekvencí 150 Hz. Pro ověření spolehlivosti tohoto systému použili autoři Speedometr a multi-kamerový systém (Puel et al., 2014).

Výzkumné studie poukazují na hlavní výhody měření plavání pomocí IMU, a to zejména na jednoduchou i rychlou přípravu měření včetně kalibrace, méně časově náročné zpracování naměřených dat s možností automatizace pomocí různých algoritmů s eventualitou podrobnějšího záznamu a na možnost analýzy pohybu ve třech osách. Na druhou stranu autoři upozornili na problémy související s bezdrátovou komunikací ve vodním prostředí komplikující analýzu dat v reálném čase (Dadashi et al., 2012; Marinho et al., 2019; Stamm et al., 2011, 2013a, b).

Pro komplexnější analýzu plavání je vhodné inerciální senzory kombinovat s dalšími měřicími zařízeními. Výzkumníci z Austrálie a Německa se zabývali problematikou feedbacku v reálném čase pro plavce a představili metodu s využitím inerciálního senzoru a optické komunikace pro zpětnou vazbu integrovanou do plavcových brýlí (Hagem et al., 2012). Následně započali vývoj zařízení umožňující zpětnou vazbu v reálném čase pro trenéry (Hagem et al., 2015). Senzor umístili na zápěstí ruky (Obrázek 1.21 a, b) a ve fázi kroulového přenosu HK nad vodní hladinou vysílal pomocí radiofrekvenčního signálu do tabletu trenéra data (rychlost záběru, délka záběru a rychlosti plavání). I tito autoři upozornili na limity této metody, jakými jsou útlum signálu, upevnění zařízení, zvýšený odpor vodního prostředí aj.

Obrázek 1.21

a) Bezdrátový přenos dat z inerciálního senzoru umístěného na zápěstí plavce do tabletu trenéra umístěného na břehu bazénu pro zpětnou vazbu v reálném čase, b) Upevnění senzoru na zápěstí plavce a jeho orientace (Hagem et al., 2015)



Mezi další multifukční akcelerometrické zařízení patří KZ+ (APLAB, Spot Engineering Lab, Italy), jímž bylo analyzováno propulzní působení plavce během plavání. Systém kombinuje inerciální senzor upevněný na spodní části zad a měření rozdílu tlaku mezi dlaní a hřbetem rukou pomocí speciálních plaveckých „pacek“ s tlakovými membránami. Tyto „packy“ jsou pak propojeny s diferenciálními tlakovými snímači v měřící jednotce na zádech plavce křemíkovými trubičkami (Obrázek 1.22). Diferenciální tlakové senzory poskytují informace o silách, které způsobují dopřednou propulzi, zatímco IMU měří účinky těchto sil vzhledem k plavcovu

zrychlení. Data jsou zpracována vyhodnocovací jednotkou umístěnou ve voděodolném pouzdře u pasu sportovce a následně ukládána na mikroSD kartu s možností přenosu do PC přes Bluetooth spojení (Lanotte et al., 2018).

Obrázek 1.22

System KZ+ Pressure Meter pro analýzu propulzního působení plavce (Lanotte et al., 2018)



1.5 Hodnocení reliability a validity měřících metod

V rámci našeho výzkumu bylo vyvinuto nové měřící zařízení SwIMU, u něhož bylo nutné ověřit spolehlivost měření a platnost dat. Tyto parametry se obvykle posuzují na základě tří kritérií, kterými jsou validita, reliabilita a objektivita (Hendl, 2004). Bez splnění těchto tří kritérií nelze výsledky výzkumu uznat jako platné a není zaručena důvěryhodnost vyvozených závěrů (Sigmund & Sigmundová, 2011). Zjednodušeně lze říci, že validita, reliabilita a objektivita definují hodnověrnost měřících metod, zařízení, testů, pozorování, nebo studií. Reliabilita je tedy vlastnost, která hodnotí, zda provedené měření vykazuje chyby, a to u opakování při stejných podmínkách. Oproti tomu validita je atribut, který hodnotí, zda měření vyhovuje v aspektu pravdivosti, tedy odpovídají-li výstupní hodnoty z měření skutečnému stavu (Hendl, 2012). Můžeme tedy říci, že reliabilita je podmínkou validity (podrobněji v kapitole 1.5.1 a 1.5.2). Pro kvalitu výzkumu je tedy nutné splnit podmínku reliability i validity.

Neméně důležité kritérium je objektivita. Objektivita dokazuje míru nezávislosti výsledků měření nebo testování na provádějící osobě, a to prostřednictvím úrovně shody výsledků měření stejného jevu stejnými měřícími metodami současně alespoň dvěma různými osobami. Cílem je

minimalizovat možnost subjektivní manipulace výsledků, proto je nutné s výsledky publikovat i přesný popis metody a postupu měření, pro možnost ověření a zopakování měření (Hendl, 2012; Weir & Vincent, 2012). Objektivita bývá někdy považována za aspekt reliability (Měkota & Blahuš, 1983).

1.5.1 Reliabilita

Reliabilita neboli spolehlivost je pro kvalitu výzkumu zásadní. V problematice testování a měření se reliabilita vyznačuje dalšími vlastnostmi, jako je vnitřní konzistence, ekvivalence a stabilita v čase (Hendl, 2004).

Vnitřní konzistence

Spolehlivost, definovaná jako konzistence měření, lze kvantifikovat pomocí vnitřitřídního korelačního koeficientu (Intraclass Correlation Coefficient – ICC), který má hodnotu od 0 do 1 (Liljequist et al., 2019). Tento parametr je možné uplatnit na dvě nebo více měření současně a je citlivý na změny v pořadí a velikosti (meze a rozdíly) opakovaných hodnot. Kromě toho může ukazovat schopnost experimentální metody odhalit a měřit systematické rozdíly mezi subjekty. Avšak tyto rozdíly mohou být více či méně „maskovány“ individuálními odchylkami náhodné povahy v rámci subjektů a chybami (nejistotami) náhodné povahy a zkresleními (systematickými chybami) v metodě měření. Aby byla metoda spolehlivá, musí být tyto nežádoucí odchylky dostatečně malé. ICC slouží jako kvantitativní odhad tohoto aspektu spolehlivosti. Vnitřitřídní je nazýván, protože je určen k analýze dat z opakovaných měření jedné proměnné (Liljequist et al., 2019; Weir & Vincent, 2012). Tento ukazatel se používá v mnoha oborech k posouzení kvality měřicích nástrojů a metod (Liljequist et al., 2019). V našem výzkumu jsme pro hodnocení reliability pomocí koeficientu ICC zvolili prahové hodnoty využívané pro výzkumníky a klinické pracovníky (Tabulka 1.3) dle Koo a Li (2016). A vzhledem k specifickému zaměření našeho výzkumu v oboru kinantropologie jsme jako doplňující prahové hodnoty zvolili takové, které se využívají v kinantropologii (Zaciorsky, 1981; Tabulka 1.3).

Tabulka 1.3

Prahové parametry ICC (Koo & Li, 2016)

Prahové hodnoty ICC	Vyjádření spolehlivosti (Koo & Li, 2016)	Prahové hodnoty ICC	Vyjádření spolehlivosti (Zaciorskij, 1981)
ICC $\geq 0,90$	Vynikající	0,99 – 0,95	Vysoká
0,75 – 0,90	Dobrá	0,94 – 0,90	Dobrá
0,50 – 0,75	Střední	0,89 – 0,80	Přijatelná
ICC $\leq 0,50$	Špatná	0,79 – 0,70	Velmi nízká

Stabilita

Další vlastností reliability je stabilita, které určuje míru shody dosažených výsledků při opakovaném testování za relativně stejných podmínek v uvedeném časovém odstupu. Stabilita představuje ukazatel shody naměřených výsledků při opakovaných měření, u nichž musí být dodrženy stejné podmínky. Při nedodržení konstantních podmínek, nebo provedení opakovaného měření s příliš velkým časovým odstupem mohou způsobit chyby, které výrazně ovlivňují stabilitu testu. Stabilitu lze ověřit pomocí statistických testů, jako například test–retest aj. (Hendl, 2004).

Ekvivalence

Pod vlastností reliability nazývanou ekvivalence si lze představit zjištění velikosti shody výsledků při testování dvěma a více metodami jednoho měřeného parametru (Sigmund, 2012). Když obě ekvivalentní formy (měřící metody) dosáhnou shodné výsledky, lze tvrdit, že metody jsou ekvivalentní.

Základním předpokladem pro vysokou spolehlivost je provádět měření za stejných podmínek a stejným způsobem, abychom eliminovali chyby. Hlavní faktory, které mohou ovlivnit reliability, jsou například nestálost vnějšího prostředí (teplota vzduchu, vody apod.), nestálost vlastností testovaných osob (motivace, psychický stav a zdravotní stav), dále porušení testových pokynů (např. v našem případě plavec plave jinak, než je požadováno), pak délka a obtížnost testu (mohou způsobit, že se plavec unaví a jeho výkon není konzistentní). Reliabilita měření je tedy do značné míry závislá na kvalitě provedení měření a přímo úměrně na množství

uskutečněných měření. Reliabilita je velmi důležitým ukazatelem spolehlivosti měřící metody. Čím nižší je reliabilita měření, tím jsou data méně věrohodná (Weir & Vincent, 2012). Pro ověření reliability se nejčastěji využívají (Weir & Vincent, 2012):

- metoda opakovaného měření (test–retest reliabilita) – spočívá z několika po sobě následujících měření (testů), stanovuje se závislost mezi výsledky pomocí korelačního koeficientu (tuto metodu využíváme i v našem výzkumu),
- reliabilita paralelních testů – spočívá v provedení dvou testů, které měří stejný parametr, přičemž na základě korelací mezi dvěma výslednými hodnotami se odhadne reliabilita,
- metoda půlení (split half reliabilita) – je založena na rozdělení testu na dvě poloviny a zkoumání korelace mezi celkovými výsledky v těchto dvou polovinách (následně je nutné upravit odhad dle skutečné délky testu pomocí tzv. Spearmanovy-Brownovy formule),
- Cronbachovo alfa – spočívá v měření závislosti mezi jednotlivými položkami, tudíž se jedná o míru vnitřní konzistence testu. Hodnotu rovnou jedné dostaneme, pokud jsou položky svázány lineárně (v takovém případě by ovšem stačila položka jediná). Malá hodnota naopak vypovídá o nízké vnitřní konzistenci položek, neboli o nízké spolehlivosti (Tavakol & Dennick, 2011).

1.5.2 Validita

Validita neboli platnost měřící metody je vlastnost, která nám definuje, jestli měřící metoda skutečně měří to, co bylo cílem změřit, nebo co předpokládáme, že metoda měří. Dosažení validity není možné bez reliability (Hendl, 2012). Validitu lze rozdělit na souběžnou, která zkoumá hodnoty současné a prediktivní, která zkoumá hodnoty v budoucnu. Hodnocení validity nejčastěji probíhá pomocí korelačních analýz a testů, například kdy ověřujeme korelace mezi proměnnými, kde dle teorie očekáváme závislost (Hendl, 2004; Liljequis et al., 2019; Weir & Vincent, 2012).

2 CÍLE

2.1 Hlavní cíl

Cílem práce bylo ověření využití Tachografu II a SwIMU pro analýzu plavecké techniky kraul.

2.2 Dílčí cíle

Pro dosažení hlavního cíle práce byly stanoveny tyto dílčí cíle:

- 1) Podílet se na vývoji měřicí metody s využitím akcelerometru pro možnost měření ve vodním prostředí.
- 2) Určit reliabilitu dat při použití Tachografu II a SwIMU.
- 3) Provést komparaci dat získaných s využitím měřících zařízení SwIMU a Tachografu II.
- 4) Provést analýzu plaveckého způsobu kraul s využitím dat získaných ze zařízení SwIMU.

2.3 Výzkumné otázky, hypotézy

VO1: Jaká je reliabilita dat získaných prostřednictvím zařízení SwIMU a Tachografu II?

VO2: Existuje rozdíl v hodnotách parametrů získaných s využitím zařízení SwIMU a Tachografu II?

VO3: Jaký je vztah mezi vybranými parametry (průměrná, maximální a minimální rychlost, účinnost, frekvence pohybu HK a DK) dílčích úseků (kraulový výjezd, plavání souhrou) a průměrnou rychlostí plavce na celém měřeném úseku?

VO4: Jaký je vztah mezi vybranými parametry (frekvence pohybu HK a DK, účinnost, maximální a minimální rychlost plavání) dílčích úseků (kraulový výjezd, plavání souhrou) a průměrnou rychlostí plavce v těchto úsecích?

H1: Menší kolísání rychlosti (vyšší účinnost) zvyšuje průměrnou rychlost plavání u kraulové souhry.

Závisle proměnná: rychlost plavání

Nezávisle proměnná: účinnost plavecké techniky

Odůvodnění: Účinnost plavecké techniky je posuzována z pohledu délky plaveckého kroku (Hofer et al., 2016; Pokorná, 2010) nebo frekvence pohybu HK (Costil et al., 1985). V našem výzkumu definujeme účinnost jako poměr

vykonané práce při rovnoměrné rychlosti a skutečné rychlosti plavání (Kopřiva, 2011; Šťastný & Motyčka, 2012; Šťastný et al., 2016). Vzhledem k tomu, že je při výzkumných měřeních závodním plavcům v ČR doporučováno plavat s co nejvyšší hodnotou účinnosti plavecké techniky, je důležité ověřit, zda účinnost plavecké techniky v tomto pojetí zvyšuje průměrnou rychlost plavání se zaměřením na kraulovou souhru.

3 METODIKA

3.1 Design výzkumu

Pro analýzu plavecké techniky bylo dlouhodobě využíváno zařízení Tachograf s původním software, doplněné kamerovým systémem. Při ověřování tohoto zařízení nebyla ověřena jeho reliabilita v reálných podmínkách měření závodních plavců. Proto bylo původní zaměření výzkumu směřováno na ověření reliability zařízení Tachograf II. Vzhledem k tomu, že toto tachometrické zařízení principiálně neumožňovalo měření startů, výjezdů pod vodou ani obrátek, bylo nutné získat nové zařízení. V době zahájení doktorského studia nebyly ještě na trhu běžně dostupné komerční zařízení pro bezdrátové měření pohybu plavce ve vodním prostředí. Proto po provedení rešeršní analýzy byl zahájen vývoj nového měřícího zařízení SWIMU (Swimming Inercial Measure Unit) – inerciální měřící jednotky s tříosým gyroskopem a synchronním videozáznamem včetně software umožňujícího detailní analýzu jednotlivých záběrů i komplexnější rozbor celé uplavané tratě.

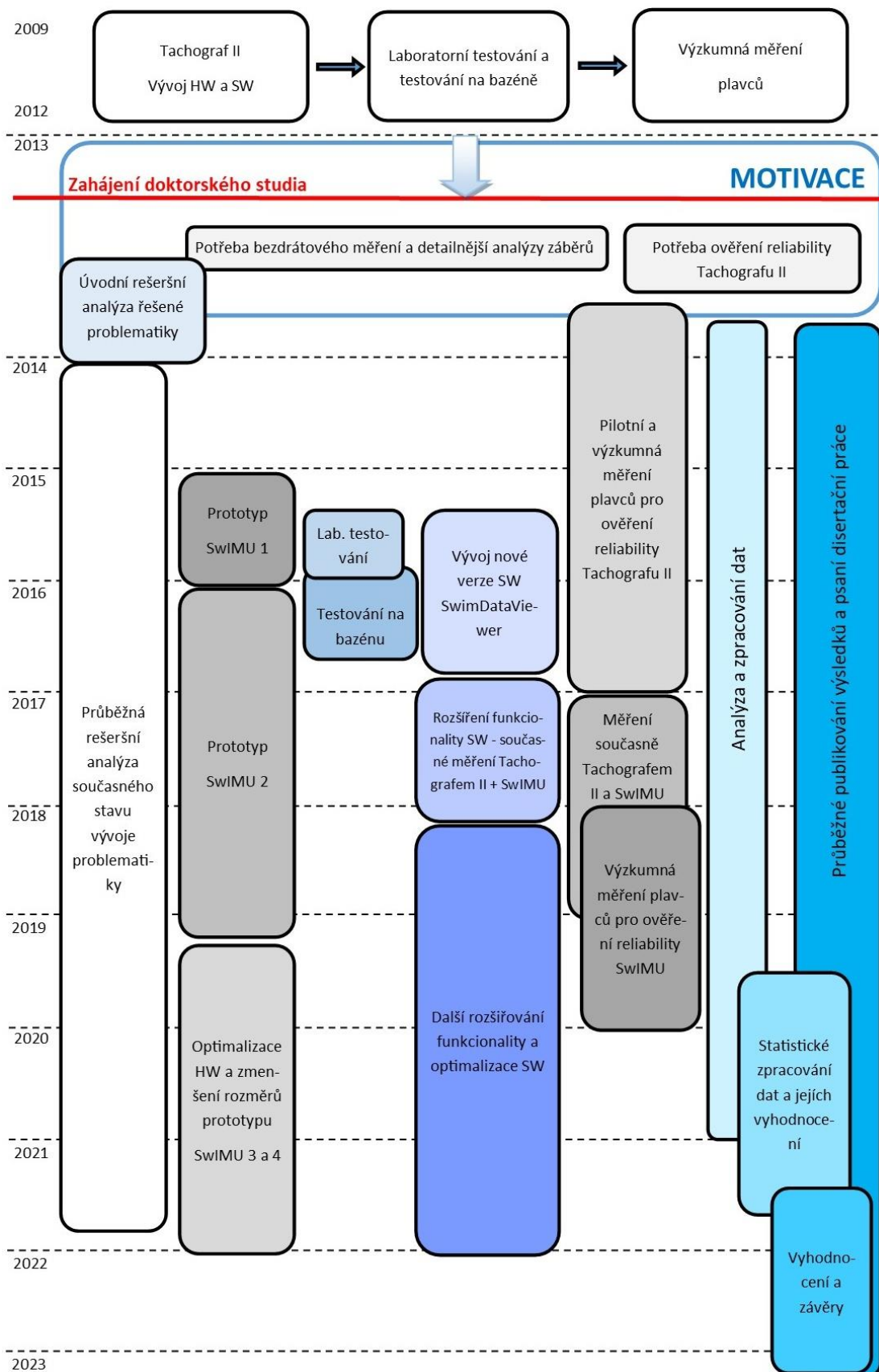
Realizaci výzkumu a jeho výstupy lze proto rozdělit do čtyř základních oblastí, zaměřených na:

1. Vývoj inerciální měřícího zařízení (Swimming Inercial Measure Unit – SwIMU) se synchronním kamerovým záznamem.
2. Ověření reliability měřících zařízení Tachograf II a SwIMU.
3. Komparace dat získaných při použití Tachografu II a SwIMU a kvalitativní srovnání obou měřících zařízení.
4. Analýzu plaveckého způsobu kraul pomocí měřícího zařízení SwIMU.

Grafické znázornění průběhu jednotlivých etap výzkumu je na Obrázku 3.1.

Obrázek 3.1

Design průběhu výzkumu



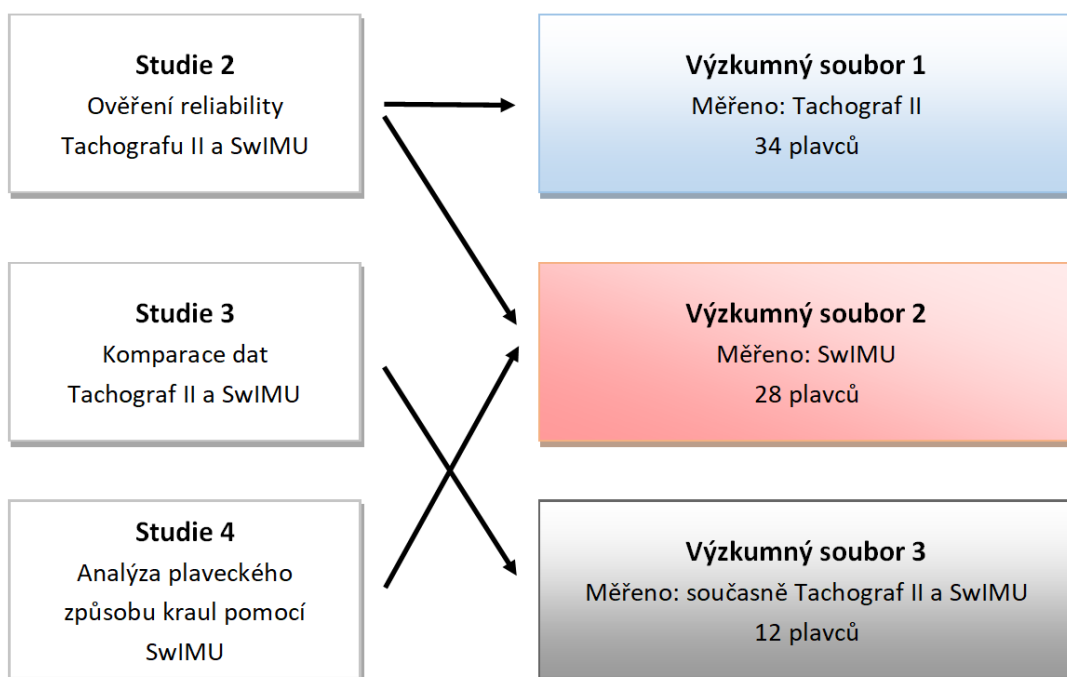
3.2 Výzkumný soubor

Pro potřeby výzkumu byly sestaveny výběrové soubory závodních plavců z řad plaveckých klubů, sportovních gymnázií i české reprezentace. Plavci nebyli vybíráni podle své plavecké specializace ani výkonnosti, avšak bylo podmínkou, aby v čase měření bylo plavcům více než 14 let, neměli žádné zdravotní omezení a aktivně závodně plavali za svůj plavecký klub.

Celkově bylo změřeno 84 plavců, u 10 z nich nebyl z časových důvodů doměřen některý z opakovaných úseků nebo došlo k neočekávaným technickým potížím, proto nebyli tito plavci do výzkumu zařazeni. Rozdělení plavců do výzkumných souborů v závislosti na typu řešené úlohy je uvedeno na obrázku 3.2.

Obrázek 3.2

Schématické zobrazení výzkumných souborů pro jednotlivé studie



Všichni účastníci výzkumu podepsali informovaný souhlas ke zpracování osobních údajů a naměřených dat (viz Příloha 2). U plavců mladších 18 let informovaný souhlas podepsali jejich zákonní zástupci. Výzkum byl schválen etickou komisí Centra sportovních aktivit Vysokého učení technického v Brně.

3.2.1 Plavci zařazení do studií 2 a 4 – Ověření reliability Tachografu II a SwIMU a analýza plaveckého způsobu kraul

Pro studii 2, v rámci které byla ověřována reliability Tachografu II, bylo změřeno 19 plavců a 15 plavkyň a pro ověření reliability SwIMU bylo změřeno 16 plavců a 12 plavkyň (Tab. 3.1). Výzkumný soubor 2 byl využit i pro studii 4, zaměřenou na analýzu plaveckého způsobu kraul pomocí SwIMU.

Antropometrické údaje plavců byly získány prostřednictvím vyplnění objednávkového formuláře (příhlášky k měření) zaslaného před měřením emailem (viz příloha 1). Na bazéně bylo provedeno kontrolní měření výšky a hmotnosti plavců svinovacím metrem a osobní digitální váhou Hyundai OVE 901.

Tab. 3.1

Základní antropometrické charakteristiky plavců měřených Tachografem II a SwIMU

Výzkumný soubor	1.		2.	
	Tachograf II		SwIMU	
Měřicí zařízení	Ženy n=15	Muži n=19	Ženy n=12	Muži n=16
Antropometrické parametry (M ± SD)				
Věk (roky)	16,3 ± 2,1	17,6 ± 3,2	18,3 ± 2,3	19,6 ± 3,9
Výška (cm)	172,8 ± 5,5	182,2 ± 8,6	170,1 ± 5,7	183,9 ± 10,5
Hmotnost (kg)	61,5 ± 6,4	71,4 ± 12,8	59,6 ± 4,7	77,5 ± 11,6

Poznámka. M = průměr; SD = směrodatná odchylka

3.2.2 Plavci zařazení do studie 3 – Komparace dat z měřicího zařízení SwIMU a Tachografu II

Pro tuto studii zaměřenou na komparaci dat z měřicího zařízení Tachografu II a SwIMU bylo oběma zařízeními současně změřeno 12 probandů (Tab. 3.2). Plavci byli z plaveckých klubů Kometa Brno a Zlín.

Tab. 3.2*Základní antropometrické charakteristiky plavců měřených SwIMU a Tachografem II současně*

Výzkumný soubor	3.	
Antropometrické parametry (M ± SD)	Ženy n=4	Muži n=8
Věk (roky)	16,3 ± 1,6	21,6 ± 3,1
Výška (cm)	166,0 ± 1,9	189,1 ± 7,3
Hmotnost (kg)	54,8 ± 1,5	83,6 ± 6,9

Poznámka. M = průměr; SD = směrodatná odchylka

3.3 Metody sběru dat

3.3.1 Měřicí zařízení

Použitá měřicí zařízení byla stejná pro všechny studie. Tachograf II (Funkční vzorek VUT v Brně, Zařízení pro měření rychlosti přímočarého pohybu objektu nebo osob se synchronním videozáznamem 2012/179) byl na VUT v Brně vyvinut k měření rychlosti lineárního pohybu plavce ve vodním prostředí. Tato zařízení převádějí přímočarý pohyb na pohyb rotační a ten je následně převeden na elektrický signál. Snímání rychlosti plavání se provádí optoelektronickými inkrementálními rotačními snímači, které s frekvencí 1000 Hz snímají rychlost odvíjení cívky tažného lanka. Měřicí zařízení se skládá ze dvou zařízení upevněných na přední a zadní straně bazénu. Od tachografu 1 k tachografu 2 vede nad bazénem nosné lano se stanoveným předpětím, po němž se pohybuje kladkový závěs. K tomuto závěsu jsou připojeny (z každé strany) konce tažných lanek tachografů. Plavec je ke kladkovému závěsu připevněn tenkým lankem upevněným k opasku. Plavec při plavání vpřed táhne jezdce za sebou a tím odvíjí lanko z tachografu 1, přičemž tachograf 2 na druhé straně bazénu lanko navíjí, aby nedošlo k průvěsu druhého (měřicího) lanka. Při plavání zpět se funkce tachografů vymění. Rychlost plavání měří vždy tachograf, ze kterého je odvíjeno lanko.

Naměřená data rychlosti z tachografů spolu se záznamem dvou statických podvodních videokamer a jedné pohyblivé snímající plavce z boku se zpracovávají a synchronizují v software SwimDataViewer (Verze 5.2.2, VUT v Brně, CESA, Bender Robotics, Brno, ČR), který byl vyvinutý pro tyto účely. Tento tachografický systém umožňuje měřit rychlost plavce na trati libovolné délky (v bazénech o délce 25 a 50 m) v předozadním směru v ose x, avšak neumožňuje měřit

starty, obrátky ani zcela jasně určit, ve kterém směru pohybu rychlost plavce narůstá, a to zejména u prsařského a motýlového plaveckého způsobu.

Proto byl na VUT v Brně zahájen vývoj měřícího zařízení využívajícího akcelerometr s gyroskopem s cílem měřit zrychlení a z něj získat průběh rychlosti, a to ve všech třech osách, spolu se synchronním video záznamem (viz studie 1). Následně byla provedena měření pro ověření reliability měřícího zařízení.

K realizaci studie 2 byl pro měření rychlosti plavců použit zařízení Tachograf II (Funkční vzorek VUT v Brně, Zařízení pro měření rychlosti přímočarého pohybu objektu nebo osob se synchronním videozáznamem 2012/179). Frekvence snímání byla 1000 Hz, což umožňovalo zobrazení časového průběhu rychlosti plavce. Data z tachografů a kamerového systému byla online zaznamenávána do osobního počítače a následně zobrazena a zpracována v programu SwimDataViewer (Verze 5.2.2, VUT v Brně, CESA, Bender Robotics, Brno, ČR).

Pro měření zrychlení plavců v rámci studie 3 byl použit měřící systém SwIMU (prototyp, VUT v Brně, CESA, FSI, Bender Robotics, ČR). Frekvence snímání byla 100 Hz (Clément et al., 2021; Stamm et al., 2012; Vanzozi et al., 2010). Data byla ukládána na interní flash paměť v měřícím zařízení a po skončení měření byly hodnoty staženy prostřednictvím bezdrátového datového rozhraní do počítače. Následně pomocí softwaru byla provedena synchronizace měřených dat a kamerového záznamu. Frekvence pohybu DK a HK byla pro měření Tachografem II i SwIMU odečtena ze synchronního video záznamu (chyba synchronizace $\pm 0,05$ s) ze tří podvodních kamer (viz kapitola 4.1).

3.3.2 Realizace měření

V pilotních testovacích měřeních pro ověření reliability Tachografu II bylo na reprezentačním soustředění v Nymburce v roce 2013 měřeno deset a následně osm opakovaných úseků kraulem maximální rychlostí. Při vyhodnocení dat se ukázal velký vliv únavy (velký rozdíl v rychlostech mezi první a druhou polovinou měření), a proto bylo stanoveno pro výzkumné měření pro ověření reliability pouze šest opakování. Samotné výzkumné měření Tachografem II se uskutečnilo na 25metrovém bazénu se třemi dráhami Ponávka v Brně v letech 2013–2016.

Pilotní testování měřícího zařízení SwIMU v laboratorních podmínkách VUT v Brně a Bender Robotics i na bazénech probíhalo v letech 2015–2017. V období 2016–2022 probíhal i další vývoj a úpravy software SwimDataViewer. Samotné výzkumné měření pro ověření reliability SwIMU se uskutečnilo v letech 2017–2019 v 25metrovém bazénu Ponávka v Brně.

Po vývoji prvních prototypů měřícího zařízení SwIMU bylo nutné zvolit místo upevnění na těle plavce, aby umístění IMU na vybraném segmentu těla nezvyšovalo odporovou sílu (Bächlin & Tröster, 2009; Callaway et al., 2009; Davey, 2004; James et al., 2006), neobtěžovalo plavce a neovlivňovalo jeho činnost (Davey, 2004; James et al., 2006) nebo neomezovalo volný pohyb plavce (Bächlin & Tröster, 2012). Pro analýzu pohybu plavce výzkumníci upevňovali senzory nejčastěji na zápěstí (Ohgi et al., 2002a, b), předloktí (Chakravorti et al., 2013), nohy (Chollet et al., 2000; Hamidi Rad et al., 2021a), hlavu (Butterfield et al., 2021; Hamidi Rad et al., 2021a), horní část zad (Bächlin et al., 2009a) a zejména na spodní část zad (Dadashi et al., 2012; Félix et al., 2019; Fulton et al., 2009; Hamidi Rad et al., 2021b; Maghalaes et al., 2014). Vzhledem k tomu, že v našem výzkumu jsme se nezabývali pohybem jednotlivých segmentů těla plavce, ale zaměřili jsme se na analýzu pohybu těžiště (dopředný pohyb celého těla), zvolili jsme umístění senzoru na spodní části zad v oblasti bederní páteře L3–L5 (Hamidi Rad et al., 2021b; Magalhaes et al., 2014; Mooney et al., 2016; Morais et al., 2022b). Toto upevnění minimálně ovlivňuje plavcovu techniku, i když vytváří zvýšený odpor vodnímu prostředí.

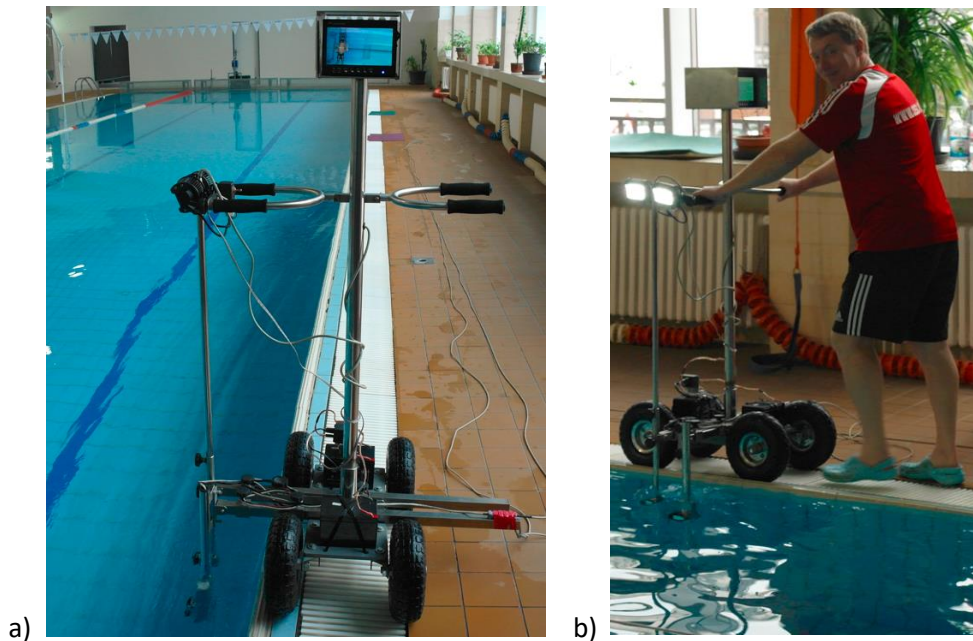
Měření zaměřené na porovnání dat ze současného měření pomocí SwIMU a Tachografu II proběhlo v letech 2017–2018 na 25metrovém třídráhovém bazénu Ponávka v Brně, přičemž v roce 2017–2022 se ještě rozšiřovala funkcionality software SwimDataViewer, aby bylo možné měřit a zobrazovat data z Tachografu II i SwIMU současně a následně data exportovat pro další statistické zpracování i publikování výsledků.

Pro studii 4 zaměřenou na analýzu plavání pomocí SwIMU probíhalo měření na 25metrovém třídráhovém bazénu Ponávka v Brně v období 2016–2019.

Před zahájením měření s Tachografem II i SwIMU byly nainstalovány podvodní kamery, u nichž byl softwarově nastaven jas kamer a vzorkovací frekvence 20 Hz. Aby nebyl videozáznam rušen dalším vířením vody, byl vždy v době měření v bazénu pouze měřený plavec. Měření Tachografem II i SwIMU vždy probíhalo v prostřední dráze bazénu se třemi dráhami, teplota vody se pohybovala v rozmezí 26,5–27 °C. V krajní pravé dráze souběžně s plavcem se pohybovala boční kamera upevněná na pohyblivém vozíku (Obrázek 3.3 a) manuálně řízeném jeho obsluhou (Obrázek 3.3 b). V měřící dráze na přední a zadní straně bazénu byly u dna upevněny statické kamery na speciální konstrukci (Obrázek 3.4 a, b) tak, aby snímaly plavce pod vodou při plavání směrem ke kameře, obrátku a odraz od stěny s výjezdem směrem od kamery.

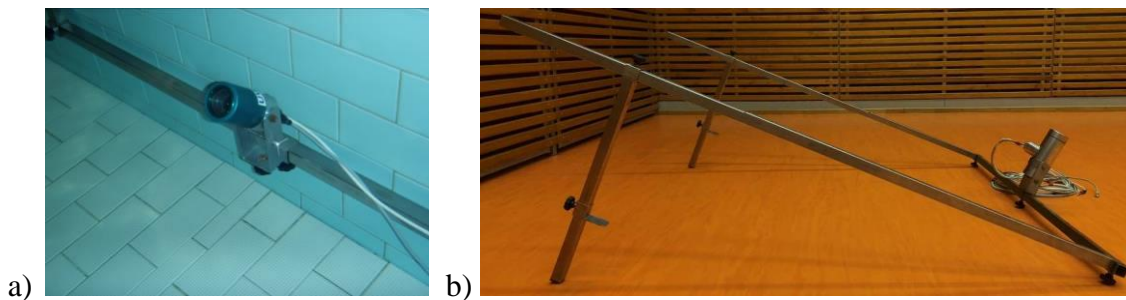
Obrázek 3.3

a) Boční pohyblivá kamera upevněná na manuálně řízeném vozíku, b) Obsluha vozíku



Obrázek 3.4

a) Přední kamera upevněná na konstrukci a umístění u dna bazénu, b) Konstrukce pro upevnění přední kamery (stejný typ konstrukce pro upevnění zadní kamery)

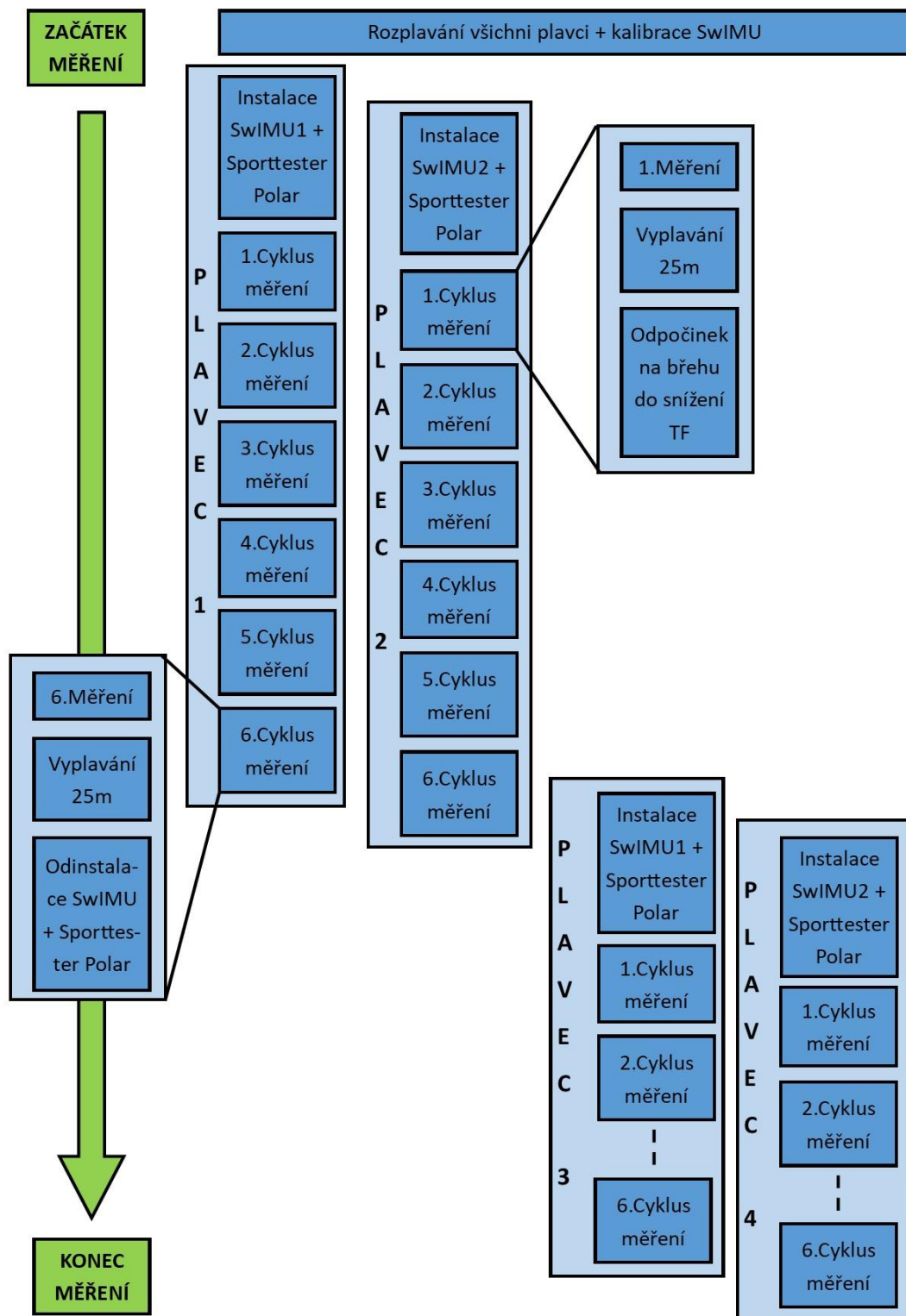


Každému plavci byla měřena tepová frekvence (TF) před prvním měřeným úsekem i v průběhu odpočinku mezi jednotlivými měřeními, a to pomocí sporttesteru s hrudním pásem Polar (RCX5, Polar, Finsko). Plavci se před měřením dle individuální potřeby rozplavali a provedli vlastní typ dynamického strečinku. Mezi jednotlivými plavanými úseky se plavci krátce vyplavali (25 m) a následně odpočívali na břehu bazénu. Všichni plavci startovali další opakovaný měřený 25metrový úsek až ve chvíli, kdy jim po doplávání klesla TF minimálně na úroveň startovací TF (± 5 tepů), kterou měli před prvním měřeným úsekem (Obrázek 3.5). Tímto přístupem jsme se snažili co nejvíce eliminovat vliv únavy mezi jednotlivými plavanými úseky. Po dokončení

výzkumného měření měli plavci možnost se vyplavat a provést závěrečný strečink, ale ne všichni tuto možnost využili.

Obrázek 3.5

Schématické zobrazení realizace opakovaných měření pomocí SwIMU

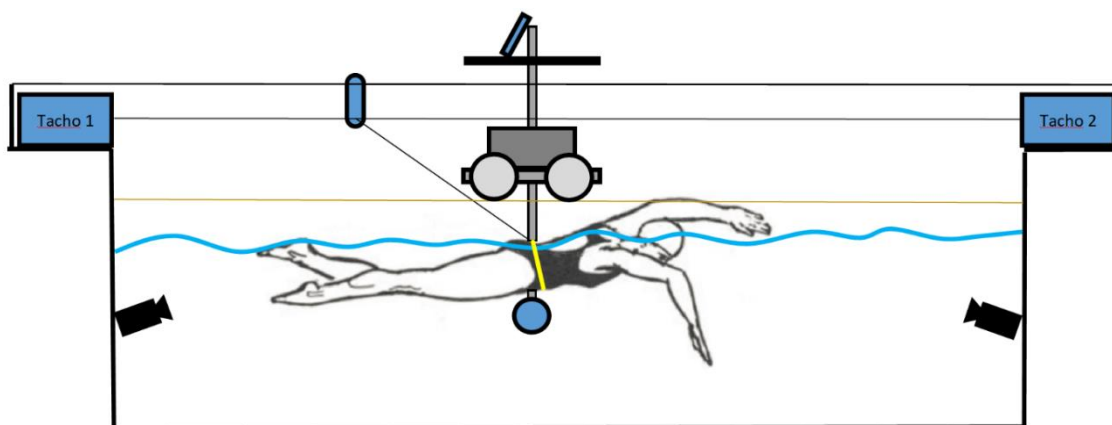


Realizace měření pro studii 2 a 4 – ověření reliability SwIMU a Tachografu II a analýza plaveckého způsobu kraul pomocí SwIMU

Při měření pomocí Tachografu II (Funkční vzorek VUT v Brně, Zařízení pro měření rychlosti přímočarého pohybu objektu nebo osob se synchronním videozáznamem 2012/179) byl plavec na spodní část zad (v úrovni L4–L5 bederního obratle) upevněn opasek s tažným lankem (Obrázek 3.6). Plavec na zvukový signál startoval z vody zády ke stěně zanořením se a odrazem od stěny bazénu s následným výjezdem. Přes software SwimDataViewer (Verze 5.2.2, VUT v Brně, CESA, Bender Robotics, Brno, ČR) bylo spuštěno měření. Měření plavci plavali 25 m maximální intenzitou kraulem a zpět se vyplavali.

Obrázek 3.6

Schéma měření s Tachografem II se statickou čelní a boční kamerou a pohyblivou boční kamerou upevněnou na vozíku (postava plavkyně převzata z Colwin, 2002)



Před samotným měřením se SwIMU byla provedena kalibrace akcelerometru z důvodu eliminace biasu snímače. Pokud je senzor v klidové poloze a nepůsobí na něj žádné síly, měla by být na jeho výstupu nulová hodnota. V praxi ale senzor nulovou hodnotu nevykazuje, protože je přítomen tzv. offset neboli posun od nuly označovaný jako bias. Proto je nutné senzor před použitím kalibrovat. Kalibrace pomocí měření tíhového vektoru spočívá v tom, že je akcelerometr umístěn do stabilní polohy na rovnou plochu tak, aby dvě jeho osy byly v horizontální rovině a třetí směřovala vertikálně. Výstup u této polohy by měl v horizontálních osách uvádět nulu a ve vertikální ose bude hodnota zrychlení rovná tíhovému zrychlení g ($9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Na základě rozdílů měřených hodnot senzoru a hodnot teoretických se stanoví kalibrační koeficient a zesílení senzoru. Hodnota biasu závisí na kvalitě senzoru, změně teploty okolí, případného vlivu dalšího elektronického zařízení, proto je při změně podmínek nutné provádět kalibraci opakovaně. Po upevnění SwIMU na záda plavce (Obrázek 3.7) bylo měřící zařízení rádiovým signálem aktivováno a spuštěno měření.

Obrázek 3.7

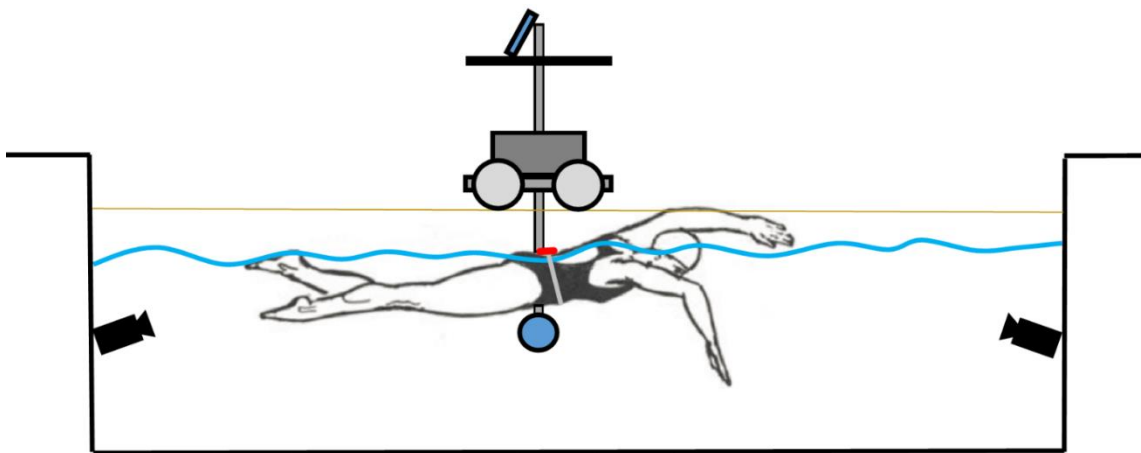
Upevnění SwIMU na zádech měřené plavkyně



Poté, co plavec zaujal startovní pozici ve vodě (stoj zády u stěny bazénu), na akustický signál byl spuštěn kamerový záznam a plavec se zanořil, s následným odrazem od stěny bazénu provedl výjezd, a pokračoval kraulovou souhrou (Obrázek 3.8).

Obrázek 3.8

Zařízení SwIMU umístěné na zádech plavce se statickou čelní a boční kamerou a pohyblivou boční kamerou upevněnou na vozíku (postava plavkyně z Colwin, 2002)



Každý měřený plavec startoval z vody proto, aby byla dodržena stejná metodika měření jak pro Tachograf II, tak pro SwIMU, jelikož Tachograf II neumožňuje provést startovní skok. Plavci plavali šest 25metrových úseků maximálním úsilím plaveckým způsobem kraul. Principiálně stejnou metodiku s tachometrickým přístrojem Speedometer použil Feitosa a kol. (2013a).

Plavci plavali individuálně dlouhý výjezd, avšak dle pravidel plavání byla stanovena maximální vzdálenost 15 m pod vodou. Po provedení dohmatu na protější straně bazénu se plavec volně vyplaval zpět. Z kamer a tachografů byla data ukládána online do PC a následně byla zpracována v software. U měření s použitím SwIMU byla data zrychlení ukládána na SD kartu a po skončení měření proběhlo stažení dat do PC a následné softwarové zpracování.

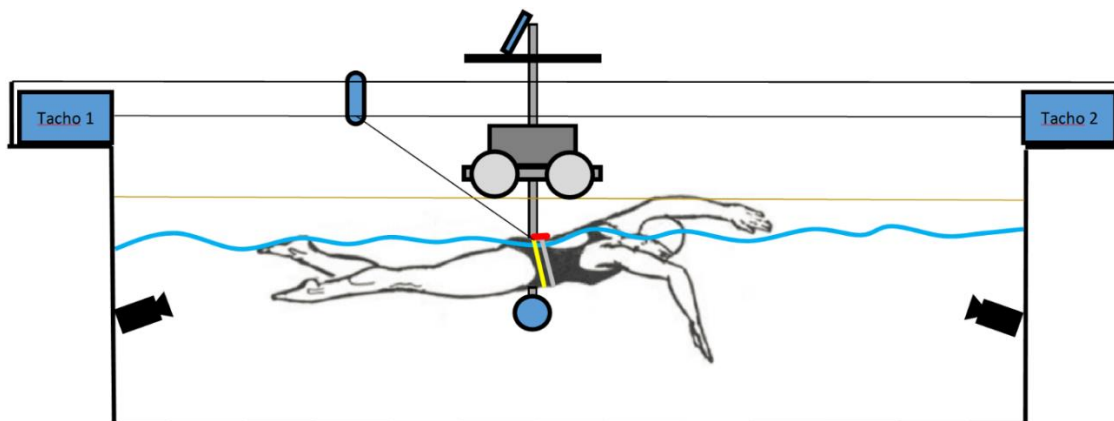
Realizace měření pro studii 3 – komparace dat z měřícího zařízení SwIMU a Tachograf II

Vzhledem k tomu, že v této studii byli plavci měřeni současně oběma zařízeními (Obrázek 3.9), bylo nutné na spodní část zad (v úrovni L1–L2 bederního obratle) upevnit opasek se zařízením SwIMU a pod něj zapnout pásek s tažným lankem od Tachografu II v úrovni L3–L4 bederního obratle (Obrázek 3.10).

Plavci plavali jedenkrát 25–100 metrů maximálním úsilím kraulem (dle požadavků plavcova trenéra), přičemž pro náš výzkum byl vyhodnocován pouze první 25metrový úsek. Po skončení měření byla data ze SwIMU, Tachografu II a podvodních kamer uložena do PC a následně zpracována.

Obrázek 3.9

Schéma měření s Tachografem i SwIMU současně se statickou čelní a boční kamerou a pohyblivou boční kamerou upevněnou na vozíku (postava plavkyně z Colwin, 2002)



Obrázek 3.10

Plavec s upevněným SwIMU i s níže upnutým žlutým pásem pro měření pomocí Tachografu II



3.3.3 Zpracování dat

Pro všechny studie byly obrázky z kamer ukládány ve formátu JPG s rozlišením 752 x 480. Následně se data rychlosti z Tachografu II i zrychlení ze SwIMU a obrazový záznam z kamer synchronizovaly pomocí software SwimDataViewer 5.2.2 s chybou synchronizace $\pm 0,05$ s. V softwaru byly jednotlivé záběry HK a DK manuálně odečteny z kamerového záznamu a z nich byla spočtena frekvence pohybu. Frekvence pohybu DK byla odečítána ve fázi dokončení motýlového (u výjezdu; Obrázek 3.11) nebo kroulového kopu (u kroulové souhry), kdy DK provedou extenzi v kolenním kloubu (Obrázek 3.12 – horní část obrázku pohled z boční kamery).

Obrázek 3.11

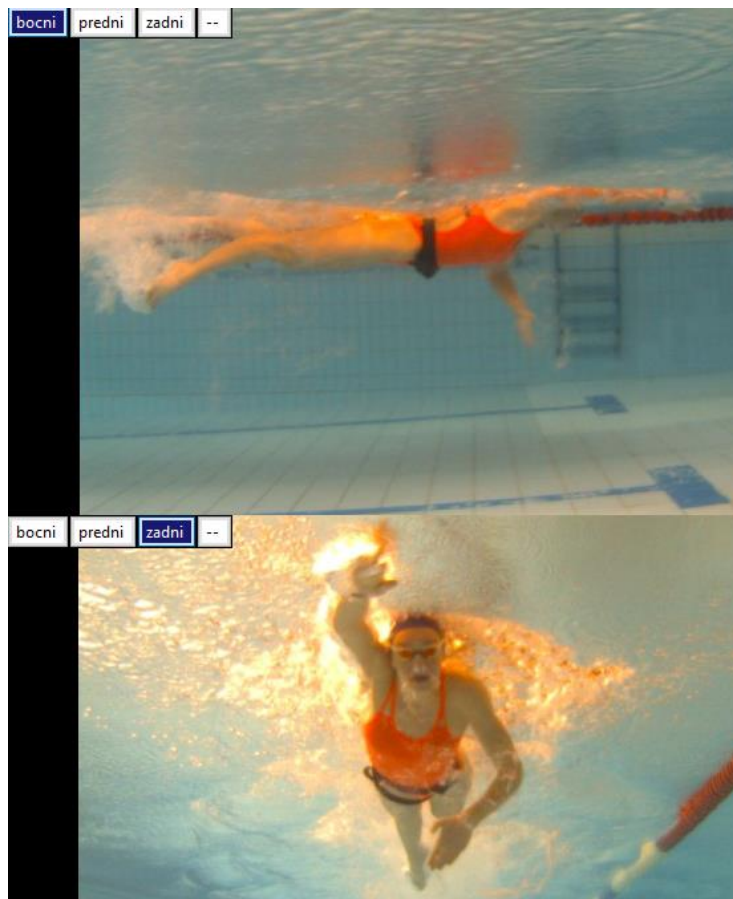
Dokončení motýlového záběru DK – motýlový kop



U HK byl pro výpočet frekvence pohybu v software manuálně zaznamenán čas, kdy se dlaň nacházela v úrovni ramenního kloubu (Šťastný, 2016a), přecházela z fáze přitažení do odtlačení a nacházela se pod ramenním kloubem (Obrázek 3.12).

Obrázek 3.12

Boční a čelní pohled na kraulovou souhru – zachycena fáze, ve které byla odečítána frekvence levé HK a pravé DK



Zpracování a vyhodnocování dat pro studii 2 – ověření reliability SwIMU a Tachografu II

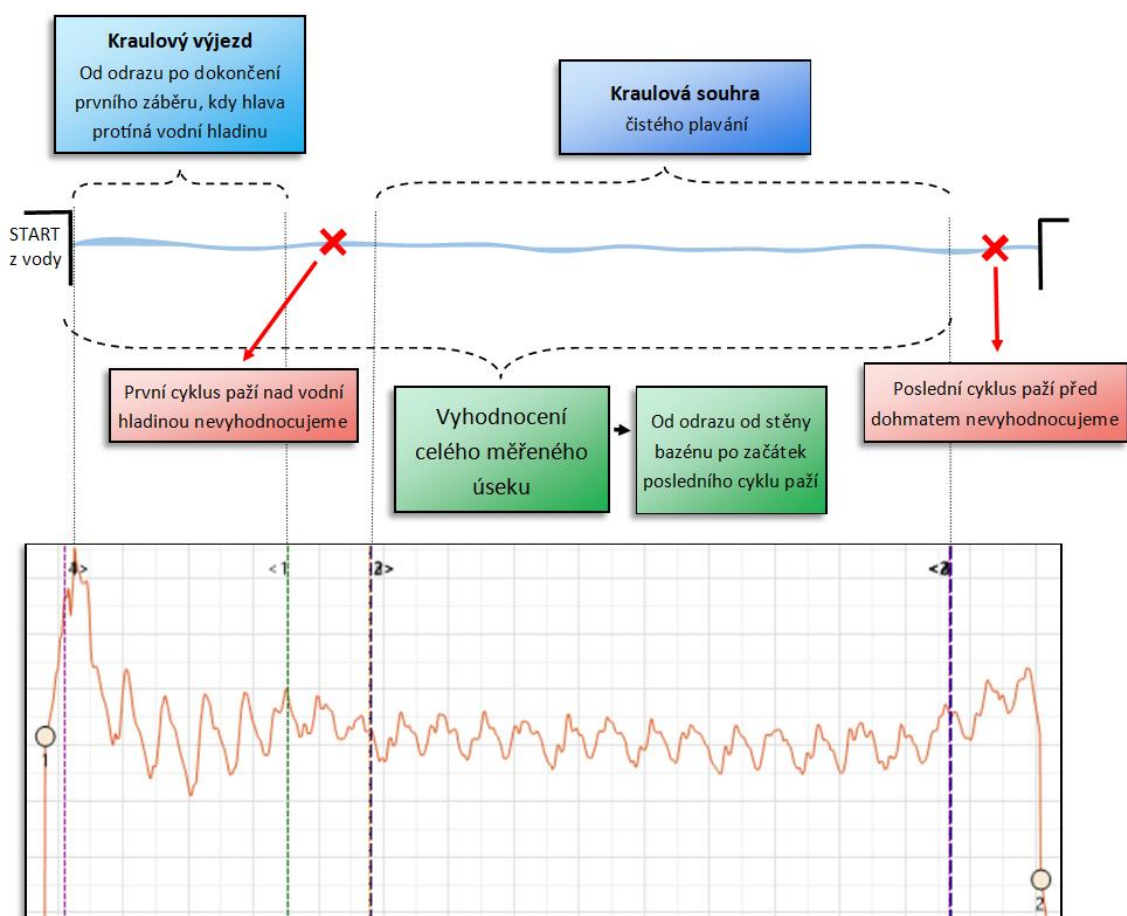
Pro ověření reliability Tachografu II bylo změřeno 204 a pro SwIMU 168 úseků plavaných kraulem maximálním úsilím.

Rozdělení na jednotlivé fáze jsme provedli podle Hamidi Rad et al. (2021b), který definoval ve svém výzkumu jednotlivé fáze měřeného úseku jako odraz od stěny, splývání, výjezd (příprava záběrů), plavání a obrátku. Pro potřeby našeho výzkumu byl každý naměřený a následně vyhodnocovaný úsek ze zařízení SwIMU rozdělen v software SwimDataViewer na jednotlivé intervaly, které byly odečteny z kamerového záznamu a křivky rychlosti (Obrázek 3.13):

1. kraulový výjezd (vlnění a kraulové nohy),
2. plavání kraulovou souhrou (nohy a paže současně),
3. celý úsek (výjezd i souhra).

Obrázek 3.13

Názorné zobrazení vyhodnocovaných intervalů (výjezd, souhra, celý měřený úsek) pro SwIMU



Kraulový výjezd byl v našem případě definován od odrazu od stěny bazénu (dotyk nohou stěny bazénu před přerušením kontaktu) po dokončení lokomočního pohybu jedné HK pod vodou (jeden záběr paže), kdy hlava protíná vodní hladinu (Pérez-Tejero et al, 2017; Veiga et al, 2014, 2016; Veiga & Roig, 2016). Nárůst rychlosti před odrazem od stěny bazénu (vrchol křivky v levé části Obrázku 3.13), je způsoben zahájením odrazu DK od stěny bazénu a následným dopředným pohybem SwIMU na zádech plavce.

U *kraulové souhry* („čisté plavání“ – Obrázek 3.13) byl začátek úseku stanoven od dokončení prvního plaveckého cyklu HK nad vodní hladinou (bez prvního záběru HK pod vodou a dvěma záběry HK nad vodou) bez posledního plaveckého cyklu (tzn. cca 2 m od konce bazénu; Gonjo et al., 2021; Šťastný et al, 2016). Tímto přístupem bylo dosaženo, že vyhodnocovaná plavecká technika kraulové souhry nebyla ovlivněna výjezdem ani dohmatem.

Celý úsek (výjezd + souhra včetně přechodového 1,5 plaveckého cyklu HK mezi výjezdem a kraulovou souhrou) byl určen od dotyku bazénu před odrazem od stěny bez posledních dvou záběrů paží. Poslední dva záběry nebyly vyhodnoceny z důvodu eliminace vlivu dohmatu.

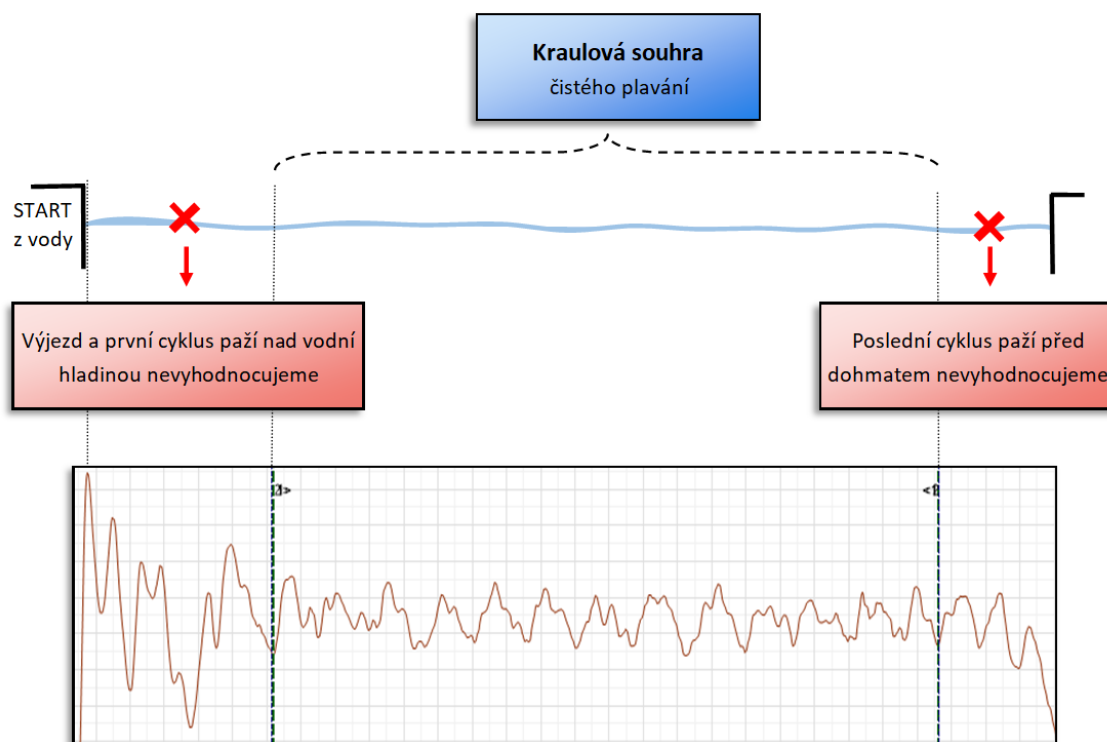
Pro ověření reliability byly u měření pomocí SwIMU vyhodnocovány všechny úseky (výjezd, souhra, celý měřený úsek) a u měření Tachografu II pouze kraulová souhra (viz Obrázek 3.14), jelikož Tachograf II měření výjezdu neumožňuje (Bátorová et al, 2021). U kraulové souhry měřené Tachografem II nebyl brán v potaz jak první záběr HK pod vodní hladinou spolu s prvním cyklem HK nad vodní hladinou, tak poslední cyklus HK, aby byl eliminován vliv dohmatu.

Výsledné hodnoty jednotlivých pokusů sledovaných parametrů (viz kapitola 3.8.1) byly statisticky vyhodnocovány v software SwimDataViewer 5.2.2 a následně exportovány pro další zpracování do MS Excel 2016 (Microsoft, Redmond, WA, USA). Ze šesti opakovaných měření byly vypočteny aritmetické průměry pro každého plavce.

Zařízení SwIMU měří zrychlení ve třech osách, přičemž rychlost plavce byla dopočítána pomocí numerické integrace softwarem SwimDataViewer. Pro ověření reliability zařízení Tachograf II i SwIMU byla využita pouze měřená data v dopředném směru v ose x.

Obrázek 3.14

Názorné schéma vyhodnocovaného intervalu kraulové souhry měřené Tachografem II



Zpracování a vyhodnocování dat pro studii 3 – komparace dat z měřícího zařízení SWIMU a Tachograf II

Pro komparaci dat jsme vyhodnotili vždy první 25metrový úsek plavaný kraulovou souhrou maximální rychlostí (výjezd nebyl vyhodnocován). Stejně jako ve studii 2 byl v programu SwimDataViewer nastaven vyhodnocovaný interval kraulové souhry (od konce prvního cyklu HK nad vodní hladinou a bez posledních dvou záběrů HK před dohmatem). Pro vyhodnocení měření bylo nutné v softwaru SwimDataViewer zpracovávat data z obou měřících zařízení a manuálně je dle křivky zrychlení a rychlosti synchronizovat spolu s kamerovým systémem (s chybou synchronizace 0,05 s).

Pro ověření reliability současného měření zařízeními Tachografem II a SWIMU byla využita pouze měřená data v ose x. Pomocí software SwimDataViewer 5.2.2 byly dopočteny základní statistické charakteristiky sledovaných parametrů (viz kapitola 3.8.2) a následně byla data exportována do MS Excelu 2016 (Microsoft, Redmond, WA, USA) pro další statistické zpracování.

Zpracování a vyhodnocování dat pro studii 4 – analýza plaveckého způsobu kraul pomocí SWIMU

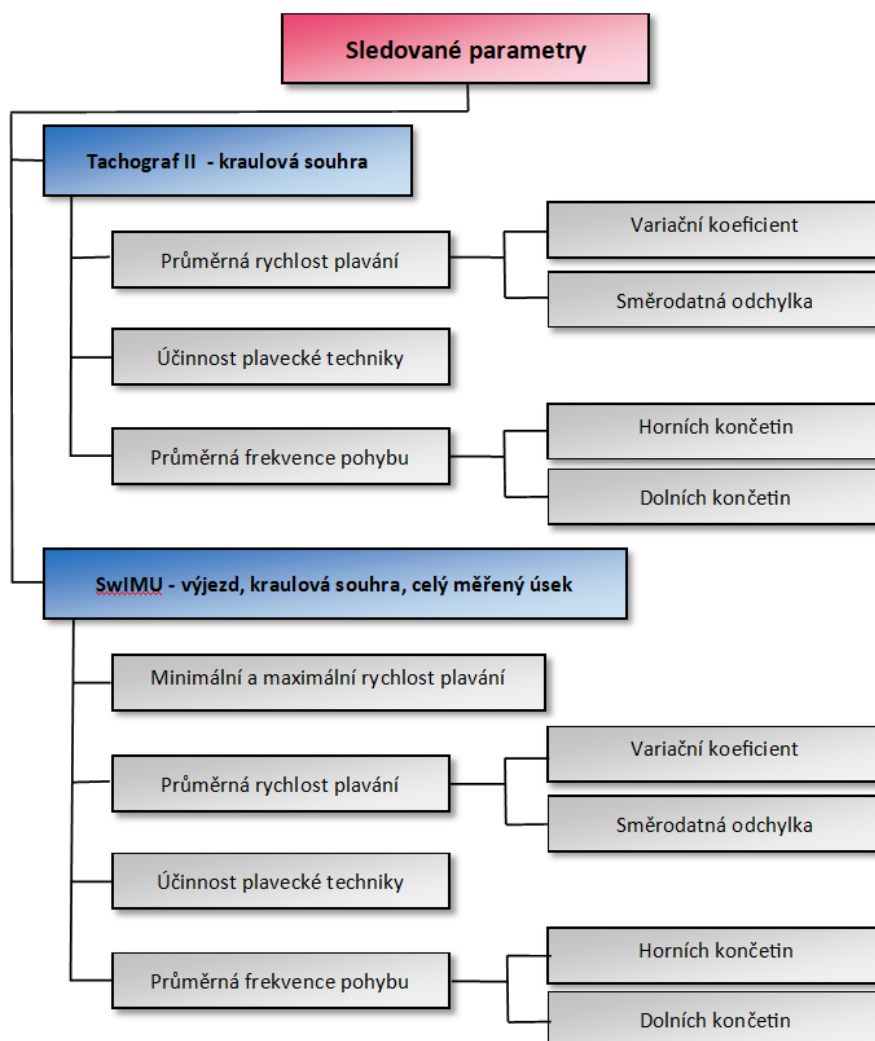
Ve studii 4 jsme pracovali jak s aritmetickými průměry ze šesti opakovaných měření, tak s jednotlivými měřeními každého plavce. Pro kvantitativní vyhodnocení byla využita pouze měřená data v ose x a pro kvalitativní vyhodnocení měření byla využita měřená data v osách x, y i z. Prostřednictvím software SwimDataViewer 5.2.2 byly dopočteny základní statistické charakteristiky sledovaných parametrů (viz kapitola 3.8.3) a následně byla data exportována do MS Excelu 2016 (Microsoft, Redmond, WA, USA) pro další statistické zpracování.

3.4 Sledované parametry

Parametry, které byly získávány z měřících zařízení Tachograf II a SwIMU v souladu se zaměřením jednotlivých studií, jsou znázorněny na Obrázku 3.15.

Obrázek 3.15

Názorné schéma sledovaných parametrů u měřících zařízení Tachograf II a SwIMU



Sledované parametry pro studii 2 – ověření reliability SwIMU a Tachografu II

Pro ověření reliability Tachografu II byly sledovány parametry pouze v ose x v dopředném směru, a to v úseku kraulové souhry. Z naměřených dat z časového průběhu rychlosti byla vypočtena průměrná rychlost plavání a její směrodatná odchylka i variační koeficient. Dále byla softwarově vypočítána účinnost plavecké techniky. Dalším sledovaným parametrem byla průměrná frekvence pohybu DK a HK.

Pro ověření reliability SwIMU byly vybrány parametry pouze v dopředném směru v ose x (výjezd, kraulová souhra, celý měřený úsek). Sledovanými parametry bylo zrychlení, z něhož byla vypočtena minimální a maximální rychlost plavání, průměrná rychlost plavce, její směrodatná odchylka a variační koeficient. Dále byla vypočítána účinnost plavecké techniky a z videozáznamu byla odečtena a následně softwarově zpracována průměrná frekvence pohybu HK a DK (Obrázek 3.15).

Sledované parametry pro studii 3 - komparace dat z měřicího zařízení SwIMU a Tachograf II

Pro komparaci dat získaných z měřicího zařízení Tachograf II a SwIMU byly sledovány parametry pouze v ose x, a to v úseku kraulové souhry. U Tachografu II byla z časového průběhu rychlosti vypočtena průměrná rychlost plavání. U SwIMU byla rychlost plavání vypočtena ze zrychlení. Dalším sledovaným parametrem u obou měřících zařízení byla směrodatná odchylka, variační koeficient rychlosti a účinnost plavecké techniky. U zařízení SwIMU byla navíc sledována maximální a minimální hodnota rychlosti (v době výzkumu software neuměl u Tachografu II tyto parametry vypočítávat; Obrázek 3.15).

Sledované parametry pro studii 4 – analýza plaveckého způsobu kraul

Ve studii 4 byly vyhodnocovány parametry zrychlení, průměrná rychlost, účinnost plavecké techniky, frekvence pohybu HK a DK, maximální a minimální naměřená rychlost ve stanoveném časovém intervalu, a to pro výjezd, kraulovou souhru i celý měřený úsek (Obrázek 3.15).

3.5 Statistické zpracování dat

3.5.1 Statistické zpracování dat pro studii 2 – Ověření reliability SwIMU a Tachografu

II

Pro základní statistické zpracování dat z Tachografu II i SwIMU byl použit software SwimDataViewer 5.2.2 v němž byly vypočteny základní statistické charakteristiky naměřených hodnot (průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient), účinnost a frekvence pohybu HK a DK. Tyto hodnoty byly vypočteny pro Tachograf II u kraulové souhry a pro SwIMU u výjezdu, kraulové souhry i u celého vyhodnocovaného úseku (výjezd i souhra bez posledních dvou záběrů). Následně byla data exportována do MS Excel 2016 pro další statistické zpracování.

Analýza dat pro ověření reliability (VO1) byla provedena pomocí softwaru STATISTICA (verze 12.0, StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA).

Pro stanovení stupně spolehlivosti měřicího zařízení Tachografu II byla test-retest reliabilita vyhodnocena pomocí Intraclass correlation coefficientu (ICC) měřených parametrů (Vincent, 1994). K posouzení spolehlivosti jsme použili prahové hodnoty podle Koo a Li (2016) a Zaciorskij (1981) uvedené v Tabulce 1.3.

3.5.2 Statistické zpracování dat studii 3 – Komparace dat z měřicího zařízení SwIMU a Tachograf II

Pro statistické zpracování dat z Tachografu II i SwIMU (VO2) byl použit software SwimDataViewer 5.2.2, v němž byly vypočteny základní statistické charakteristiky naměřených hodnot (průměr, maximum, minimum, směrodatná odchylka a variační koeficient) a účinnost plavecké techniky. Poté byla data exportována do MS Excel 2016 pro jejich další statistické zpracování.

Na základě zhodnocení histogramů a výsledků Shapiro-Wilkova testu bylo zjištěno normální rozložení dat, pro porovnání párových měření Tachografu II (označení ve výsledcích – Tacho) a SwIMU (označení ve výsledcích – Akcelerometr) byl tedy použit párový t-test. Kromě popisných statistik měření obou zařízení a p-hodnoty testu byl reportován také 95 % interval spolehlivosti pro střední hodnotu rozdílového výběru a velikost efektu dle Cohenova d ($d = 0,20$ malý efekt, $d = 0,50$ střední efekt, $d = 0,80$ velký efekt). Výsledky byly vypočteny pomocí programu TIBCO STATISTICA 13, hladina významnosti byla zvolena $\alpha = 0,05$.

3.5.3 Statistické zpracování dat pro studii 4 – Analýza plaveckého způsobu kraul pomocí SWIMU

Pro studii 4 zaměřenou na analýzu plaveckého způsobu kraul pomocí SWIMU byla využita naměřená data ze studie 2, přičemž bylo pracováno jak s aritmetickými průměry ze šesti opakovaných měření, tak s jednotlivými měřeními u jednotlivých plavců.

Pro hledání vzájemných vztahů mezi vybranými parametry dílčích úseků a průměrné rychlosti na celé měřené trati (VO3), byly použity průměry dat výjezdu, kraulové souhry i celého měřeného úseku ze šesti měření každého plavce. Následně byly vypočteny Spearmanovy korelace.

Pro zkoumání vztahů mezi vybranými parametry dílčích úseků vzhledem k rychlosti v daných úsecích (VO4) byly vypočteny průměry ze šesti opakovaných úseků každého plavce a byly provedeny testy na základě Spearmanovy korelace. Pro zkoumání podílu závislosti dílčích úseků na průměrné rychlosti na celé trati bylo pro názornou ilustraci použito porovnání spolehlivosti spojnice trendů pro průměrné rychlosti naměřené u výjezdu a kraulové souhry. Spojnice trendů je spolehlivější, pokud se její hodnota spolehlivosti (R) blíží 1. V našem případě byla využita lineární spojnice trendů, což je nejshodnější přímka, která aproximuje naměřenou množinu dat.

Pro ověření hypotézy 1 byly vypočítány průměrné hodnoty rychlosti a účinnosti ze šesti opakovaných měření každého plavce, a ty byly následně seřazeny a graficky zobrazeny podle průměrné rychlosti od nejnižší po nejvyšší. Poté byla pro účinnost spočítána lineární spojnice trendů, pro kterou byla stanovena její spolehlivost. Dále byl vypočten regresní model, který zkoumá závislost průměrné rychlosti na účinnosti plavecké techniky a na maximální hodnotě rychlosti. Statistická významnost tohoto modelu byla potvrzena na hladině 0,05. Pro tento model byla také vypočítána p-hodnota celkového F testu a dílčích T testů.

Pro další zpracování byla všechna data ze šesti opakovaných měření každého plavce vydělena průměrem ze všech šesti měřených úseků daného plavce. Pro posouzení normality dat byl zvolen Shapiro-Wilkův test normality, který prokázal, že naměřená data nevykazují normální rozložení (normalita dat byla zamítnuta při upravených hodnotách účinnosti 6,07-10-8). Dále byly použity Spearmanovy korelace (r) zprůměrovaných hodnot ze šesti úseků každého plavce. Pro zkoumání závislosti účinnosti na průměrné rychlosti plavání byla data proložena regresní přímkou.

Veškeré výpočty pro tuto studii byly provedeny v programech Statistica (verze 12.0, StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA) a R (verze 4.0.0 – The R Foundation for Statistical Computing, Vídeň, Rakousko).

4 VÝSLEDKY

4.1 Výsledky studie 1 – Vývoj měřící metody pro analýzu plavání

Na vývoji měřící metody pro analýzu plavání s využitím zařízení SWIMU se podílel tým výzkumníků Vysokého učení technického v Brně z Centra sportovních aktivit, Fakulty strojního inženýrství z Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechanik a firmy Bender Robotics. Přínos autorky práce lze rozdělit do tří oblastí. V oblasti řešení hardware se jednalo o spolupráci při hledání řešení a návrhů z pohledu biomechaniky plavání a trenérské praxe (zapouzdření zařízení s přihlédnutím k hydrodynamickému tvaru a velikostí SWIMU prototypů 1–3, způsob upevnění SWIMU na tělo plavce, řešení synchronizace měřených dat ze SWIMU a kamerového systému, příprava požadavků na kapacitu baterie pro měření s inerciální jednotkou SWIMU, návrhy a připomínkování manuálního ovládání prototypu SWIMU včetně přenosu dat a jejich využitelnosti pro výzkumná měření i trenérskou praxi apod.).

V rámci práce na softwaru SwimDataViewer pro zpracování dat z měřícího zařízení SWIMU se autorka podílela na návrzích pro rozšíření funkcionality pro variabilnější filtraci dat, na vytvoření postupu pro možnost měření a zobrazení dat z Tachografu II i SWIMU současně, návrzích grafického zobrazení naměřených parametrů i průběhu natočení SWIMU na těle plavce v jednotlivých osách apod.

Třetí oblast se týkala práce se zařízením SWIMU ve fázi testování a výzkumných měření, kdy se autorka spolupodílela na testování prototypů SWIMU na bazénu, na měřeních pro ověření reliability Tachografu II a SWIMU.

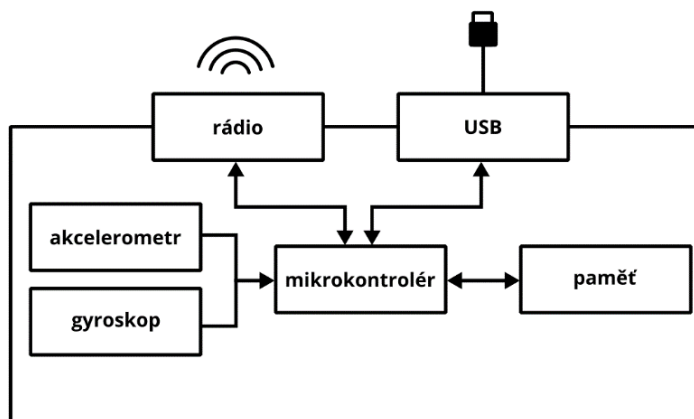
4.1.1 Hardwarové řešení SWIMU

Při vývoji hardwarového řešení inerciální měřící jednotky byl zvolen tříosý MEMS akcelerometr a gyroskop (MPU-6000, InvenSense Inc, USA.), mikrokontrolér (STM32L4, STMicroelectronics, Switzerland), vnitřní paměť a komunikační rozhraní. Jejich blokové uspořádání je znázorněno na obrázku 4.1.

Hlavní součástí měřícího zařízení je mikrokontrolér, který zpracovává naměřené hodnoty z akcelerometru a gyroskopu. Jelikož online sběr dat během měření komplikuje vodní prostředí a mohlo by dojít k diskontinuitě dat, naměřené hodnoty mikrokontrolérem ukládá během měření do flash paměti a po ukončení měření se hodnoty stáhnou do počítače. V počítači pak následně proběhne analýza da pomocí softwaru SwimDataViewer 5.2.2 (viz níže).

Obrázek 4.1

Blokové schéma komponentů měřicí jednotky (Kumpán, 2016)



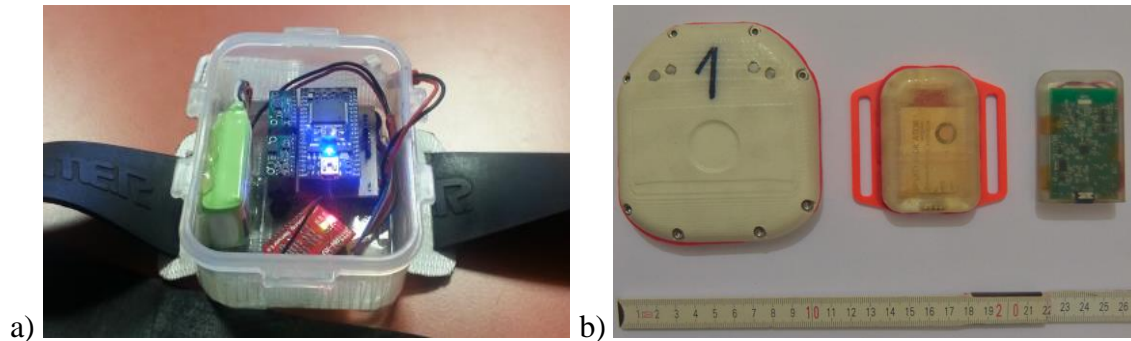
Dále bylo řešeno napájení IMU jednotky a s tím spojenou výdrž baterie, přičemž limitujícím faktorem byla výsledná velikost zařízení. V současné době baterie dokáže zařízení napájet přibližně 5 hodin. Ovládání zařízení bylo vyřešeno prostřednictvím rádiové komunikace standardizované frekvence 848 MHz.

V průběhu vývoje zařízení bylo vytvořeno několik testovacích verzí inerciálního měřicího zařízení (Obrázek 4.2 a), z nichž vzešly tři prototypy SwIMU (Obrázek 4.2 b), které se od sebe liší jak velikostí, tvarem, tak materiálem zapouzdření i způsobem ovládání. U prototyp SwIMU 1 je zapínání a vypínání měření ovládáno manuálně pomocí tlačítka uprostřed zařízení (Obrázek 4.2 b vlevo). Komunikace se stolním počítačem a přenos dat probíhá pomocí radiového signálu. Oproti tomu prototypy SwIMU 2 a 3 je možné zapínat jak přes radiový signál, tak přes připojení zařízení mikro USB kabelem. Díky větší průhlednosti materiálu u SwIMU 2 a 3 oproti prototypu 1 je možné lépe detekovat blikání LED diody pro následnou synchronizaci s naměřenými daty zrychlení.

Pouzdro měřicí jednotky je vyrobeno metodou 3D tisku z PET plastu a ošetřeno epoxidovou pryskyřicí pro dosažení vodotěsnosti. Postupný vývoj a optimalizování zařízení nám umožnilo zmenšování rozměrů zařízení, což vedlo ke snížení odporu prostředí (Obrázek 4.2 a, b) a zejména snížení pohybu měřicí jednotky na zádech plavce působením proudící vody, a to obzvláště při výjezdu.

Obrázek 4.2

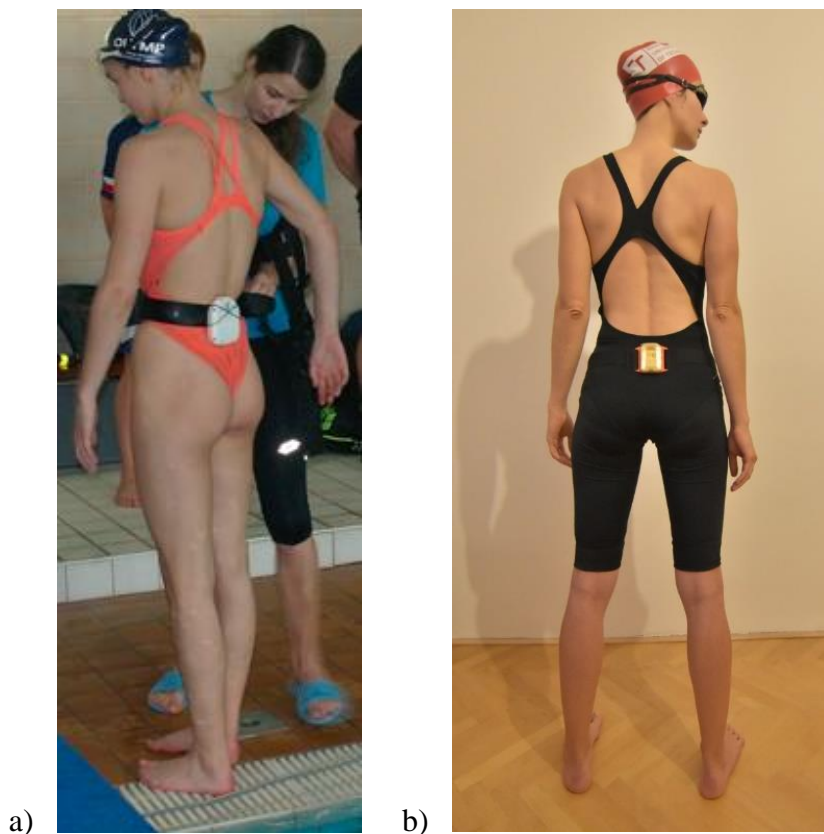
Prototypy měřicího zařízení SwIMU: a) První testovací prototyp SwIMU, b) První verze SwIMU 1 vlevo, SwIMU 2 uprostřed a SwIMU 3 vpravo



Upevnění na těle plavce bylo u prototypu SwIMU 1 (Obrázek 4.3 a) a SwIMU 2 (Obrázek 4.3 b) řešeno gumovým nepružným pásem. U prototypu SwIMU 2 díky způsobu upevnění pomocí bočních úchytů a menší velikosti zařízení nedochází k tak výrazným pohybům zařízení na těle plavce jako u SwIMU 1.

Obrázek 4.3

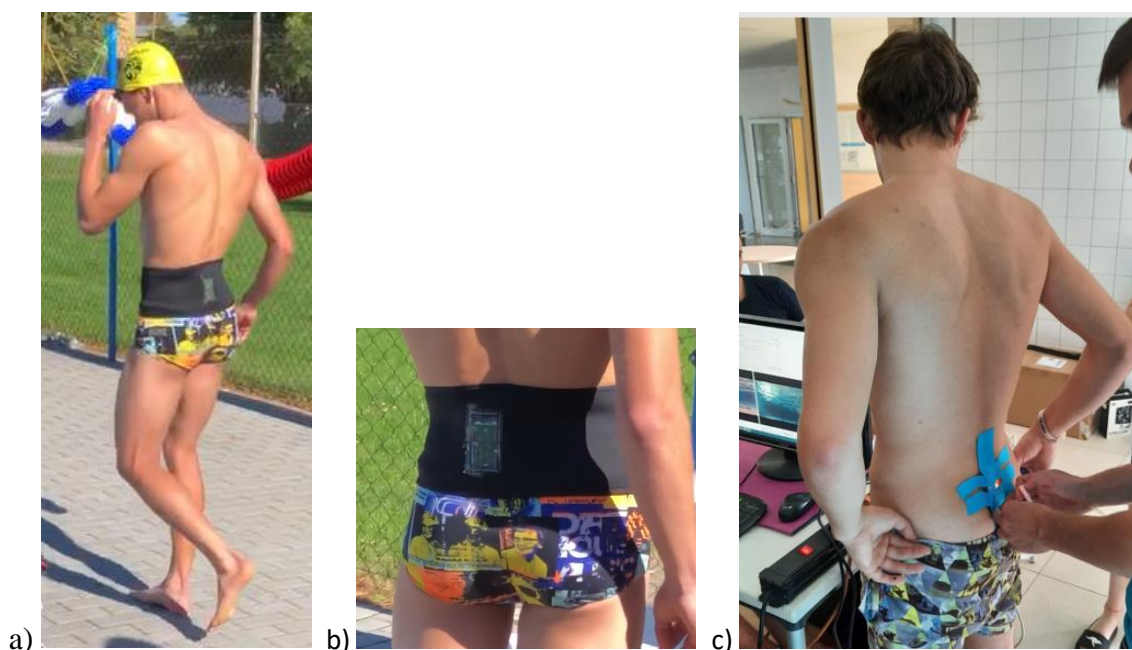
a) Způsob upevnění měřicího zařízení SwIMU 1, b) Způsob upevnění nové zmenšené verze SwIMU 2



U prototypu SWIMU 3 (Obrázek 4.2 b vpravo) byly pro upevnění zařízení ušity tři neoprenové pásy různých velikostí s průhlednou kapsou (Obrázek 4.4 a, b), aby bylo možné vidět synchronizační LED signál. Momentálně probíhá testování nejhodnějšího způsobu upevnění SWIMU 3 na tělo plavce, v rámci kterého bylo zařízení připevněno na záda plavce pomocí kineziologického tejpů (Obrázek 4.4 c).

Obrázek 4.4

a) Upevnění SWIMU 3 na zádech plavce v neoprenovém pásu s průhlednou kapsou, b) Detailní výřez upevnění SWIMU 3, c) Upevnění SWIMU 3 kineziologickým tejpem pro eliminaci pohybu senzoru na zádech plavce prouděním vody



Testování hardware zařízení

Zařízení bylo testováno v laboratořích Vysokého učení technického v Brně, Fakulty strojního inženýrství 12.1, 14.1 a 25.1 2016 a následně v témže roce bylo realizováno sedm testování na bazénu Ponávka v Brně. Laboratorní testovací zařízení bylo sestaveno ze stejnosměrného elektromotoru, který umožňoval nastavení stabilní úhlové rychlosti otáčení. Tím proběhlo ověření, že naměřené hodnoty zařízením SWIMU jsou v očekávaném rozsahu dle parametrů garantovaných výrobcem. Na bazénu bylo uskutečněno provozní testování vodotěsnosti, ovládání a práce se zařízením ve vodním prostředí. V této fázi testování byla provedena a ověřena kalibrace dat pro potřeby měření a vyhodnocování plavecké techniky. Následně byla uskutečněna testovací měření, díky nimž se měnil a vyvíjel jak hardware (kapacita baterie, přenos signálu, hledání nejhodnějších typů akcelerometru s gyroskopem, zmenšování

prototypu včetně řešení vodotěsnosti a hydrodynamiky pouzdra i jeho upevnění na těle plavce aj.), tak programování a řešení funkcionality software SwimDataViewer pro zpracování surových dat z měřicího zařízení SWIMU.

4.1.2 Softwarové řešení SWIMU

Vzhledem k tomu, že existoval funkční software pro měření se zařízením Tachograf II, nabízela se možnost využít stávající software i pro měření se SWIMU. Bylo však nezbytné tento software zcela zásadně upgradovat, rozšířit jeho funkce pro zpracování dat i jejich vizualizaci a následnou analýzu plavecké techniky. Proto, aby bylo možné se SWIMU měřit, zpracovávat a vyhodnocovat data, bylo třeba definovat souřadnicový systém os, použít filtry, provést korekce chyb akcelerometrů a vyvinout algoritmy pro vyhodnocení naměřených dat. Vzhledem k tomu, že požadavek na analýzu dat ze SWIMU pro vyhodnocení plavecké techniky byl založen na základě časového průběhu zrychlení a rychlosti v jednotlivých osách současně s využitím videozáznamu, bylo nutné vyřešit synchronizaci obrazu s měřenými daty ze SWIMU.

Zpracování dat

V rámci návrhu měřicího systému bylo třeba nejprve stanovit globální souřadnicový systém a lokální tělesový souřadnicový systém (Kumpán, 2016). U globálního souřadnicového systému bazénu (Obrázek 4.5 vlevo) byl počátek definován polohou plavce těsně před startem měření. Kladný směr osy $x(g)$ je totožný se směrem plavecké dráhy. Osa $z(g)$ směřuje dolů ve směru vektoru tíhové síly. Osa $y(g)$ je kolmá na $x(g)$ rovnoběžná s rovinou hladiny a orientována tak, aby systém byl pravotočivý. U lokálního tělesového souřadnicového systému (Obrázek 4.5 uprostřed) byl střed definován aktuální polohou měřicí jednotky. V tomto systému jsou vyjádřena měřená data. Osa $x(t)$ je téměř rovnoběžná s vertikální anatomickou osou a směřuje k hlavě plavce. Osa $z(t)$ je kolmá na záda plavce a přibližně rovnoběžná s předozadní osou těla (v sagitální rovině). Při splývání plavce na hladině obličejem dolů směřuje osa ke dnu bazénu. Osa $y(t)$ doplňuje $x(t)$ a $z(t)$ na pravotočivý systém a je rovnoběžná s mediolaterální osou těla (ve frontální rovině). Pro intuitivnější zobrazení výsledků byl zaveden hybridní souřadnicový systém (Obrázek 4.5 vpravo), u něhož je osa $z(h)$ totožná s osou $z(g)$, osy $x(h)$ a $y(h)$ jsou uvažovány jako průměty os $x(t)$ a $y(t)$ do horizontální roviny. Výhodou hybridního souřadnicového systému je to, že dopředná rychlost plavce je v každém směru měření kladná. Bez zavedení hybridního systému by po obrátce měla dopředná rychlost plavce zápornou hodnotu.

Obrázek 4.5

Popis souřadnicových systémů (g , t , h) (Kumpán, 2016)



Pro eliminaci chyb měření vlivem teploty prostředí byl vytvořen kalibrační postup, kdy před začátkem měření musí SwIMU jednotka setrvat v klidu pro správný odečet počátečního natočení v jednotlivých osách. Vzhledem k výraznému šumu měřeného signálu (vysoká citlivost senzorů, teplotní vlivy, aj.) je pro jeho potlačení velikost natočení počítána ze střední hodnoty několika následujících naměřených hodnot IMU. Hodnota natočení ($^\circ$) plavce je získávána postupnou integrací hodnot úhlového zrychlení měřených gyroskopem (Kumpán, 2016).

Při měření ve vodním prostředí SwIMU reagoval na velké množství nežádoucích vnějších vlivů (vlny, pohyb SwIMU na zádech plavce, aj.). Pro částečnou kompenzaci těchto vlivů a vyhlazení křivky zrychlení byl jako matematický nástroj pro fúzi dat použit unscenovaný Kálmánův filtr. Permanentní chyba měření akcelerometrů byla odstraněna pomocí speciálně vytvořeného algoritmu. Výstupem Kálmánova filtru je množina hodnot popisující natočení plavce v každém okamžiku vzorkování měřené veličiny. Na základě znalosti orientace senzoru v tíhovém poli byla pomocí algoritmu z měření akcelerometrů odstraněna statická složka tíhového zrychlení, z důvodu eliminace permanentní chyby, kterou jsou zatíženy IMU senzory (Kumpán, 2016). Z časového průběhu zrychlení byla numerickou integrací vypočítána rychlost plavce.

Detekce startovního odrazu a obrátek

Plavecké obrátky jsou významným faktorem ovlivňujícím výkon plavce a při měření jsou využívány pro korekci průběhu rychlosti. Okamžik odrazu plavce při obrátce je určen ze zrychlení v ose x . Signál je v tomto případě filtrován pomocí plovoucího průměru z n vzorků. Nejprve se

určí první bod, ve kterém hodnota zrychlení překročí definovaný práh. V průběhu dopředné rychlosti před tímto okamžikem je nalezeno minimum, které je označeno jako okamžik odrazu. Díky tomuto algoritmu je software schopen detekovat obrátku. Obrátky mohou být jak kotoulové, tak kyvadlové, a proto pro vyšší míru přesnosti je obrátka detekována ze zrychlení v ose x a natočení těla plavce v ose z u kyvadlové obrátky a v ose y u kotoulové obrátky.

Korekce chyb měření

Při měření zrychlení vstupuje do procesu mnoho chyb (odchylka měření senzoru způsobená driftem, chyba v měření zrychlení, vychýlení senzoru z umístění uvnitř zařízení, aproximace a zaokrouhlování měřených hodnot, přítomnost náhodného signálu apod.). Tyto chyby se integrací kumulují do výsledku a s postupujícím časem narůstají. Proto bylo ve vyvíjeném měřicím systému aplikováno několik korekcí.

První korekce modifikuje data tak, aby střední hodnota zrychlení byla na jedné plavecké délce nulová. Druhá korekce nastaví nulovou hodnotu rychlosti v čase odrazu a třetí koriguje data v závislosti vypočtené vzdálenosti a známé uplavané vzdálenosti, tedy délky bazénu.

Synchronizace se záznamem z podvodních kamer

Pro analýzu plavecké techniky je nutné, aby data získaná pomocí SwIMU byla synchronizována se záznamem z podvodních kamer. Kamery PixelINK PL-B762G-CS se snímačem CMOS s rozlišením 752x480 pixelů, připojené přes rozhraní Gigabit Ethernet (Pixelink® a Navitar Company, typ PL-B7626G, USA) s nastavenou frekvencí snímání 20 Hz byly vodotěsně zapouzdraeny. Dvě statické kamery byly upevněny na přední a zadní stranu bazénu. Boční pohybující se kamera byla umístěna v krajní dráze na speciálně zkonstruovaném manuálně řízeném vozíku.

Protože vodní prostředí způsobuje vysoký útlum rádiového signálu, nebylo možné ovládání měřicí jednotky realizovat v režimu on-line, a proto synchronizace obrazového záznamu s měřeným průběhem rychlosti probíhala off-line pomocí synchronizačního signálu. Pro tento účel bylo zařízení SwIMU vybaveno LED diodou, která bliká v přesně definovaném algoritmu, který je zaznamenán do paměti zařízení. Podvodní kamerový systém blikání LED zaznamenává a algoritmus následně provede synchronizaci, případně je možné synchronizaci korigovat pomocí posunu časové osy, jak u videozáznamu, tak u naměřených dat. Synchronizace obrazového záznamu se získaným průběhem zrychlení a rychlostí ze SwIMU probíhala až při následném softwarovém zpracování časových značek a pomocí synchronizačního LED signálu.

Softwarový nástroj SwimDataViewer

Pro zobrazení naměřených dat a efektivní analýzu plavecké techniky bylo nutné vyvinout softwarový nástroj. Jako základ pro nový software byl využit stejnojmenný původní software SwimDataViewer první generace, který se využíval pro měření se zařízením Tachograf II. Tento nový software SwimDataViewer 5.2.2 byl naprogramován v jazyce C#, na platformě NET Framework. V současné době již pracujeme s verzí software 5.4.0, která byla naprogramována pro zpracování dat z nových videokamer (statické podvodní – čelní a zadní, dynamická boční pod vodou a nad vodou). V software byly vytvořeny tři pracovní režimy – moduly (Databáze, Prohlížení dat, Měření).

Modul Databáze (Obrázek 4.6) obsahuje naměřená i vypočtená data všech uskutečněných měření, včetně uložených dat vyhodnocovaných intervalů a informací o plavci. V této databázi jsou data načítána (indexována) a je možné je i filtrovat (dle příjmení, plaveckého způsobu, data měření, použitého zařízení aj.).

Obrázek 4.6

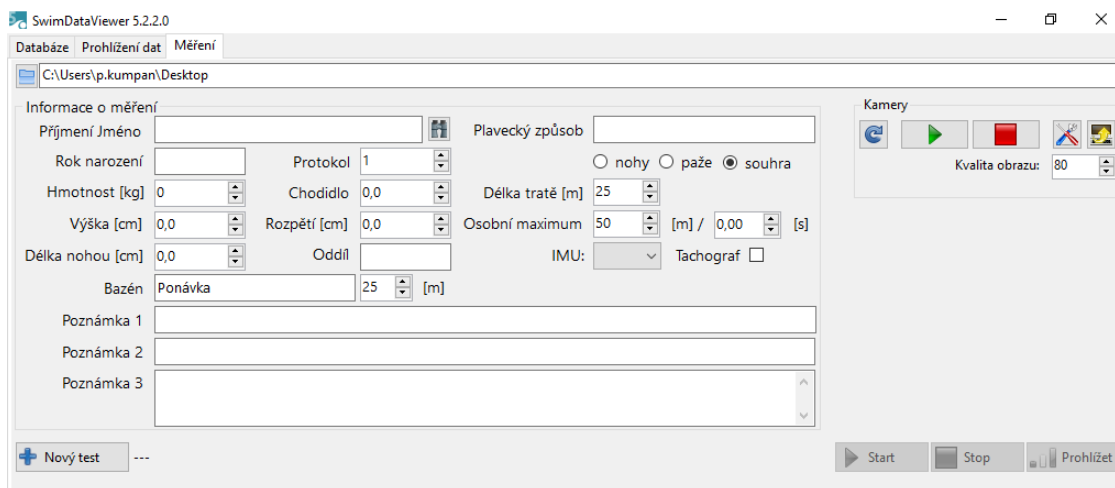
Software SwimDataViewer 5.2.2 v režimu Databáze

	Adresář	Příjmení a jméno	Rok naro	Datum měření	Bazén	Protokol	Plavecký oddíl	Způsob	Typ měření	Poznámka	Kamery	Akcelerometry	Tachograf
	H\m...		1999	26.09.2018 14:08:37	Ponávka	6	Kometa Brno	kraul	souhra	opakovaný úsek 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2002	26.09.2018 14:06:44	Ponávka	6	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2003	26.09.2018 14:05:18	Ponávka	6	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1999	26.09.2018 14:03:39	Ponávka	5	Kometa Brno	kraul	souhra	opakovaný úsek 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2002	26.09.2018 14:02:18	Ponávka	5	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2003	26.09.2018 14:00:04	Ponávka	5	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1999	26.09.2018 13:58:54	Ponávka	4	Kometa Brno	kraul	souhra	opakovaný úsek 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2002	26.09.2018 13:57:29	Ponávka	4	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2003	26.09.2018 13:56:00	Ponávka	4	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1999	26.09.2018 13:54:41	Ponávka	3	Kometa Brno	kraul	souhra	opakovaný úsek 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2002	26.09.2018 13:53:03	Ponávka	3	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2003	26.09.2018 13:51:17	Ponávka	3	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1999	26.09.2018 13:49:29	Ponávka	2	Kometa Brno	kraul	souhra	opakovaný úsek 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2002	26.09.2018 13:47:59	Ponávka	2	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2003	26.09.2018 13:46:08	Ponávka	2	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1999	26.09.2018 13:40:35	Ponávka	1	Kometa Brno	kraul	souhra	opakovaný úsek 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2003	26.09.2018 13:37:19	Ponávka	1	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2002	26.09.2018 13:33:58	Ponávka	1	SG Botanická	kraul	souhra	opakovaný úsek 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2002	26.09.2018 12:54:18	Ponávka	1	SG Botanická	kraul	paže		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2002	26.09.2018 12:45:32	Ponávka	1	SG Botanická	kraul	nohy		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2002	26.09.2018 12:36:15	Ponávka	1	SG Botanická	kraul	souhra		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2003	26.09.2018 12:24:20	Ponávka	1	SGSG Botanická	kraul	souhra		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1995	26.09.2018 12:07:07	Ponávka	1	Kometa Brno	kraul	souhra		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1997	26.09.2018 12:02:13	Ponávka	1	Kometa Brno	kraul	paže		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1997	26.09.2018 11:52:02	Ponávka	1	Kometa Brno	kraul	souhra		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1992	14.05.2018 16:05:03	Ponávka	1	VUT	kraul	souhra		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		2003	14.05.2018 16:03:09	Ponávka	1	Kometa Brno	kraul	souhra	startovní skok	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	H\m...		1996	14.05.2018 15:57:39	Ponávka	1	VUT	kraul	souhra		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	H\m...		1992	14.05.2018 15:54:19	Ponávka	1	VUT	kraul	souhra		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	H\m...		2003	14.05.2018 15:46:21	Ponávka	1	Kometa Brno	kraul	nohy		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	H\m...		2003	14.05.2018 15:44:59	Ponávka	1	Kometa Brno	kraul	nohy		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Dalším modulem je režim Měření (Obrázek 4.7) a záznam pro ukládání dat z více zdrojů (v době měření ze tří kamer umístěných pod vodou a data z inerciální jednotky SWIMU 1 v podobě průběhu okamžitého zrychlení, případně průběhu rychlosti získaných ze snímačů rychlosti – tachografů).

Obrázek 4.7

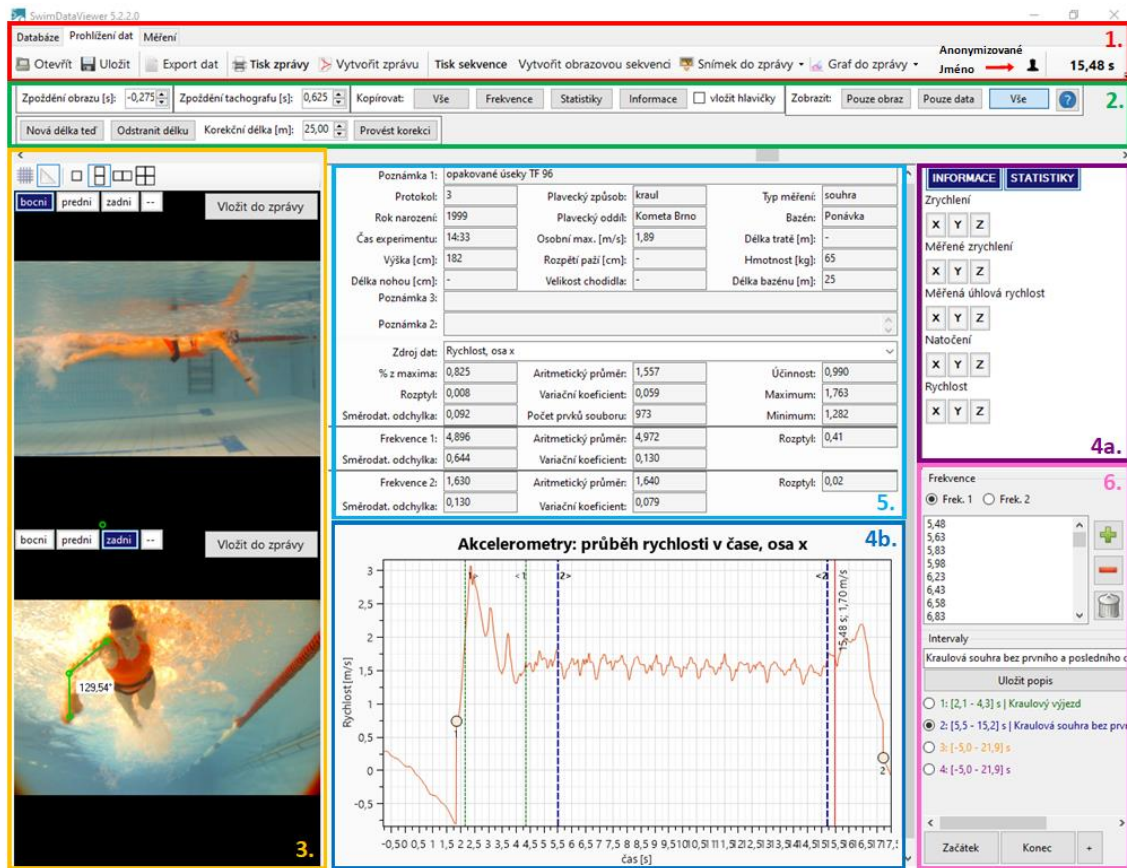
Software SwimDataViewer 5.2.2 v režimu Měření



Pro analýzu plavecké techniky byl naprogramován režim Prohlížení dat (Obrázek 4.8), který umožňuje jejich export do formátů xls, csv, htm nebo txt i vytvoření výstupní zprávy z měření (oblast 1. v Obrázku 4.8). Ukládání naměřených veličin do datového souboru bylo nastaveno s frekvencí 100 Hz. Důležitou funkcí software je nastavení korekčních bodů v závislosti na uplavané délce pro eliminaci permanentní chyby měření akcelerometru. Korekční body („kuličky“ označené 1 a 2) se ručně nastavují na začátku a na konci grafického zobrazení průběhu rychlosti (oblast 4b na Obrázku 4.8) spolu se zadáním korekční délky (m) (Oblast 2 v Obrázku 4.8).

Obrázek 4.8

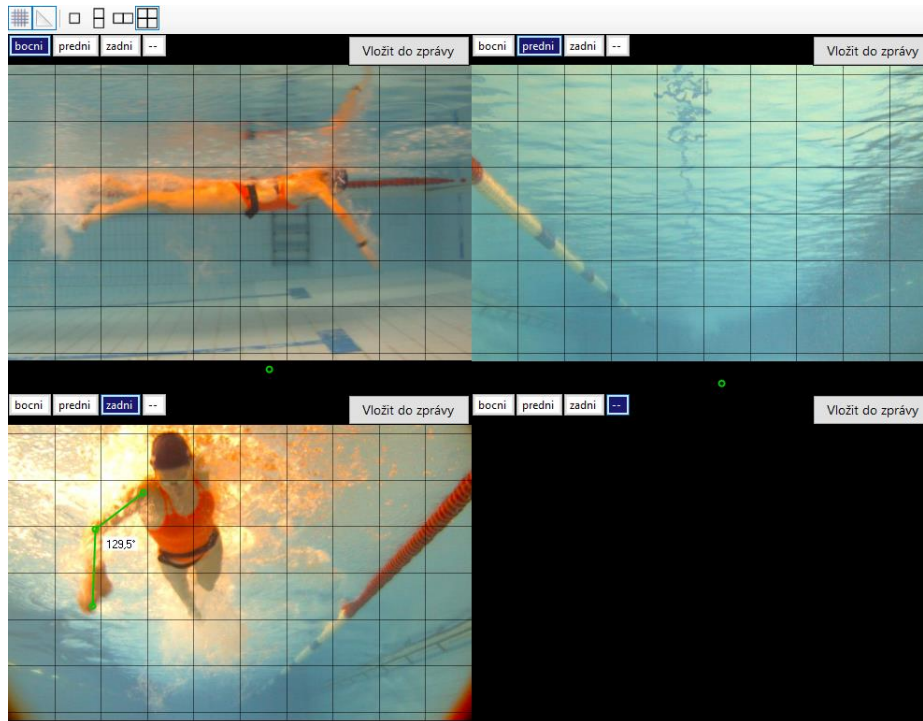
Software SwimDataViewer 5.2.2 v režimu Prohlížení dat – barevné a numerické označení jednotlivých oblastí



Dále byla naprogramována možnost zobrazení záznamu ze všech kamer současně nebo z jednotlivých kamer samostatně (oblast 3 v Obrázku 4.8). Na základě potřeby přesnější analýzy techniky z videozáznamu byla pro záznamy z jednotlivých kamer přidána funkce zobrazení rastru (mřížky) a softwarového měření úhlů (nabídka v horní liště oblasti 3 – spodní část v Obrázku 4.8 a detail v Obrázku 4.9 vlevo dole).

Obrázek 4.9

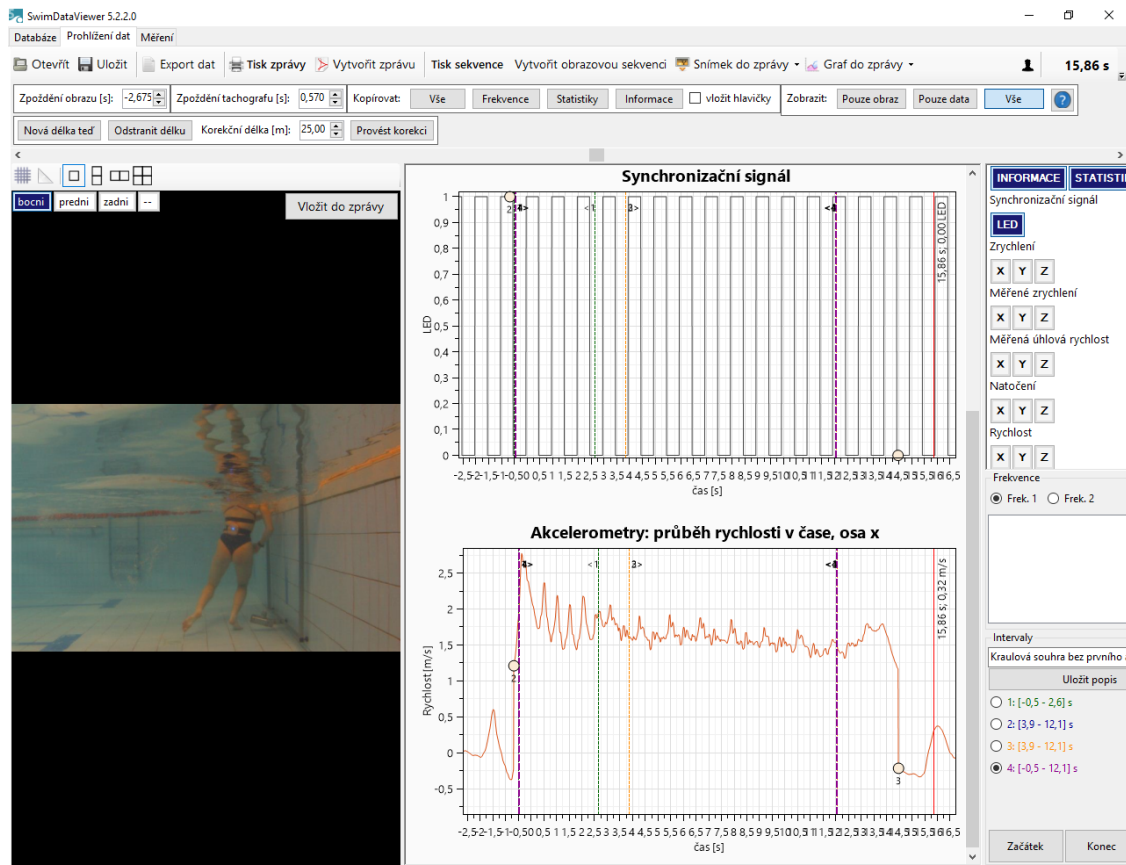
Softwarové zobrazení videozáznamu ze tří podvodních kamer (vpravo dole – příprava pro čtvrtou kameru) se zapnutou funkcí rastru a měření úhlu (vlevo dole)



Pro synchronizaci obrazu z videokamer a grafického zobrazení měřených dat rychlosti nebo zrychlení umožňuje software provést ruční nastavením zpoždění kamer (oblast 2 v Obrázku 4.8). V prvním kroku se manuálně synchronizoval kamerový záznam s grafickým zobrazením průběhu rychlosti v okamžiku odrazu DK od stěny bazénu (největší pík). Následně u plaveckého způsobu kraul upřesňujeme synchronizaci dle maximálních hodnot rychlosti motýlových kopů prováděných u výjezdu (oblast 4b v Obrázku 4.8). Pro dokončení synchronizace je využito zobrazení průběhu synchronizačního signálu z blikající LED diody v porovnání stavu LED diody (zapnuto/vypnuto) na video záznamu (Obrázek 4.10 – grafické zobrazení synchronizačního signálu LED diody). Díky těmto krokům by měla být přesnost synchronizace na 0,05 sekundy. Velikost chyby je způsobena nastavenou frekvencí snímání kamer na 20 Hz.

Obrázek 4.10

Software SwimDataViewer 5.2.2 – zobrazení grafického průběhu synchronizačního LED signálu a blikání SWIMU viditelné na boční kameře v levé části obrázku



Pro detailní analýzu plavání byla naprogramována možnost ručního nastavení jednotlivých intervalů (např. výjezdu, plavání souhrou, obrátky aj.), ve kterých probíhají výpočty základních statistických parametrů (např. průměrné rychlosti, směrodatné odchytky rychlosti, průměrné frekvence pohybu HK a DK, účinnosti plavecké techniky aj.). V grafickém zobrazení průběhu rychlosti (případně zrychlení, úhlové rychlosti natočení) v jednotlivých osách jsou tyto intervaly vyznačeny barevnými čarami (oblast 4b v Obrázku 4.8). Jednotlivé intervaly jsou definovány manuálně nastavenými časovými značkami vytvářenými pomocí posuvníku na časové ose grafu (červená čára zobrazující aktuální hodnoty zobrazeného parametru; oblast 4b v Obrázku 4.8) a tlačítky zaznamenávajícími začátek a konec intervalu (oblast 6 v Obrázku 4.8). Jednotlivé vyhodnocované intervaly jsou v grafech automaticky číslovány (oblast 4b v obrázku 4.8) a pro lepší přehlednost v následném exportu dat je možné intervaly pojmenovávat (Oblast 6 uprostřed Obrázku 4.8).

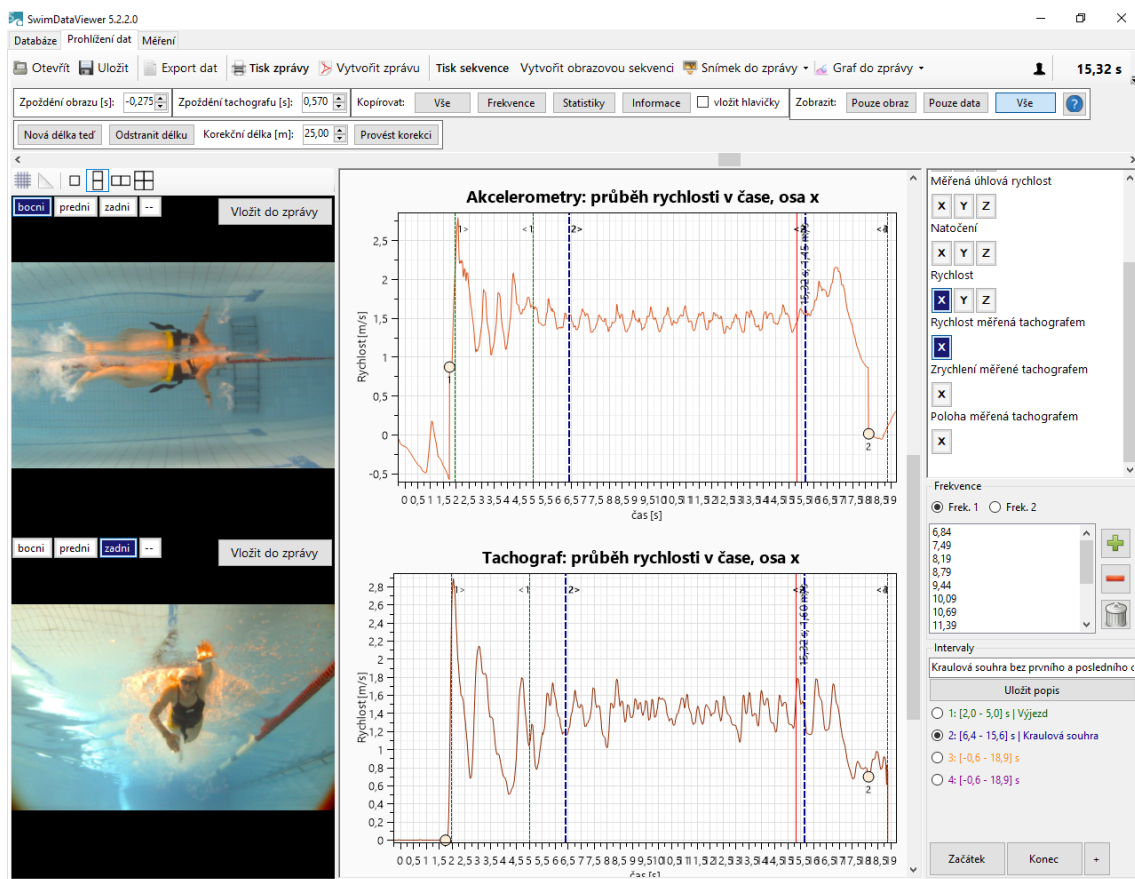
Další funkcionalitou pro analýzu plavání bylo naprogramování manuálního odečtu frekvence (časových značek) pohybu DK a HK (frekvence 1 a 2) z kamerového záznamu (oblast 6

v Obrázku 4.8). Záznam frekvence pohybů segmentů těla je možné zaznamenávat pro každý interval samostatně.

Z důvodu potřeby měřit s Tachografem II i SWIMU současně bylo nutné v software SwimDataViewer naprogramovat další funkce jak v režimu Měření, tak v Prohlížení dat. Nyní software umožňuje současné měření oběma zařízeními i následné grafické (Obrázek 4.11) a statistické (Obrázek 4.8 oblast 5) zobrazení naměřených dat v jednotlivých osách (Oblast 4 v Obrázku 4.8) a intervalech (oblast 6 v obrázku 4.8). Pokud je měřeno Tachografem II i SWIMU současně, je důležité provést manuální synchronizaci křivek průběhů rychlosti z obou zařízení spolu s videozáznamem z kamer. V softwaru SwimDataViewer 5.2.2 je proto naprogramována funkce nastavení zpoždění tachografu (s) oproti SWIMU. Nejprve je tedy provedena synchronizace křivky rychlosti ze SWIMU s videozáznamem pomocí grafického zobrazení synchronizačního LED signálu. Následně je provedena synchronizace grafického průběhu rychlosti z měření Tachografem II dle změn rychlosti (jednotlivých píků) v grafickém průběhu rychlosti z měření pomocí SWIMU.

Obrázek 4.11

Grafické zobrazení křivky okamžité rychlosti ze SWIMU a Tachografu II v Software SwimDataViewer 5.2.2



4.1.3 Ukázka možností analýzy plavecké techniky kraul pomocí SWIMU

Pomocí SWIMU je možné provádět jak rozbor plavecké výkonnosti (na základě statistických výpočtů sledovaných parametrů viz kapitola 3.8), tak plavecké techniky, a to na celé trati včetně obrátek nebo po jednotlivých záběrech případně fázích záběru (v kroku 50 ms). Tato individuální analýza plavecké techniky je prováděna na základě grafického zobrazení průběhů rychlostí, zrychlení úhlové rychlosti a průběhu natočení v jednotlivých osách synchronizovaných s videozáznamem.

Analýza kraulové souhry

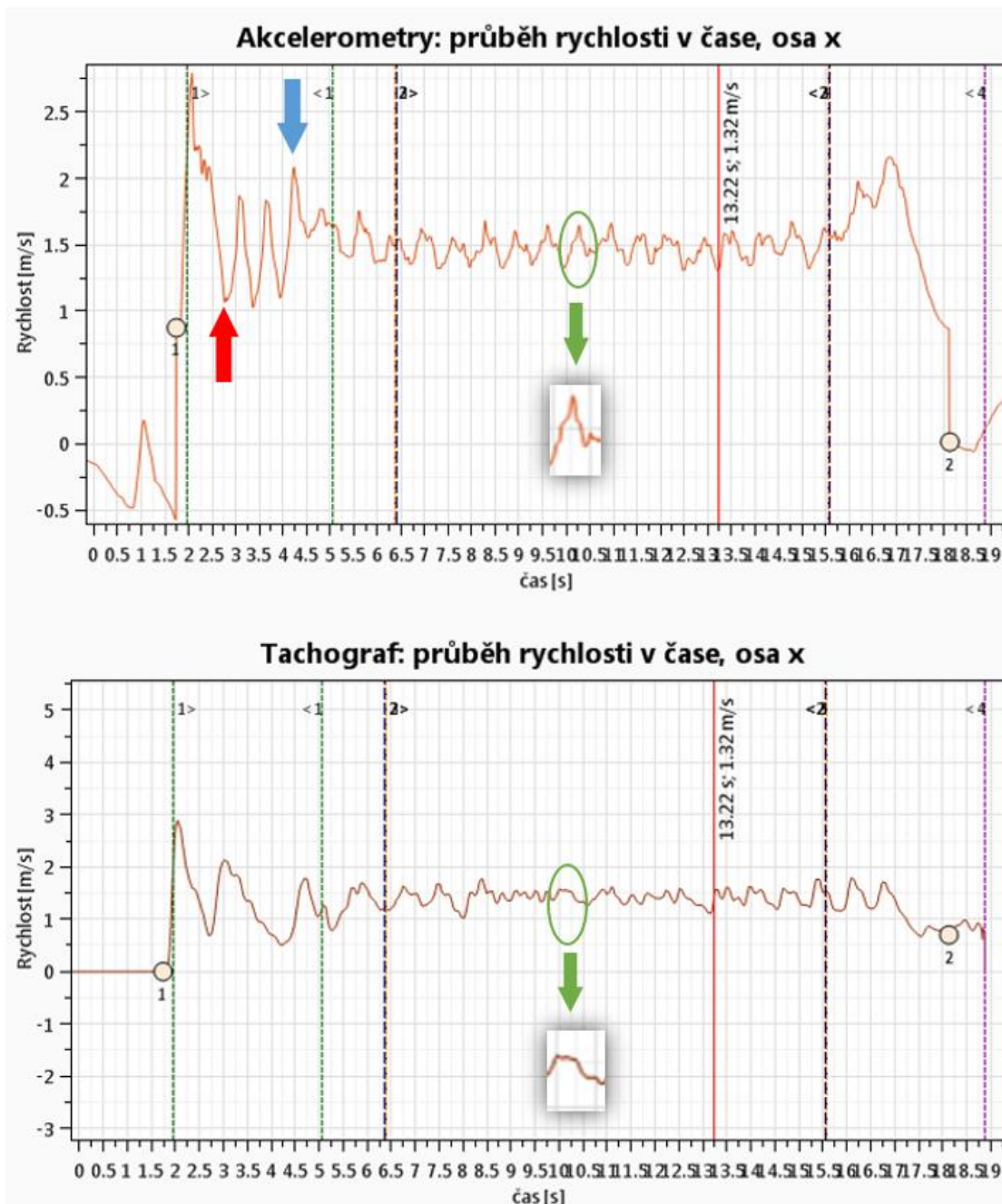
Na obrázku 4.12 je zobrazena křivka okamžité rychlosti 25m úseku ze SWIMU (horní graf) a z Tachografu II (dolní graf) v ose x u plaveckého způsobu kraul (měřeno bez startovního skoku – start z vody). V úseku označeném zelenými čarami (interval 1) je možné vidět průběh kraulového výjezdu (3 motýlové kopy pod vodou – úsek mezi červenou a modrou šipkou).

Z křivky okamžité rychlosti ze SWIMU je možné vidět, že plavec po odrazu od stěny setrval ve splývavé poloze příliš dlouho, protože jeho minimální rychlost výrazně klesla pod průměrnou rychlost souhry (Obrázek 4.12 – horní graf – červená šipka). Dále vidíme, že okamžitá rychlost plavce u třetího kopu byla vysoce nad rychlostí souhry (Obrázek 4.12 – horní graf – modrá šipka ukazující na třetí pík motýlových kopů), a proto bylo neefektivní přejít do kraulové souhry tak brzy. Z pohledu využití této okamžité rychlosti by bylo mnohem přínosnější provést více kopů, maximálně však do pravidly vymezených 15 m od začátku bazénu.

Tachograf II není schopen měřit výjezd, proto zobrazená data tohoto intervalu nejsou relevantní a při vyhodnocování techniky výjezdu nejsou brána v potaz. V intervalu 2 je zobrazen průběh rychlosti kraulové souhry měřené Tachografem II i SWIMU (Obrázek 4.12 horní i spodní graf). V tomto případě nebyly vyhodnocovány první tři záběry a poslední dva záběry HK, aby nedošlo ke zkreslení plavecké techniky přechodem z výjezdu do souhry nebo dohmatem. Porovnáme-li křivky rychlosti ze SWIMU a Tachografu II, vidíme, že SWIMU detailněji zaznamenává změny rychlosti v rámci jednoho plaveckého záběru. Na zeleně vyznačeném detailu jednoho záběru v obrázku 4.12 (u obou měřících zařízení) je možné vidět, že z grafické křivky rychlosti ze SWIMU (horní graf) lze rozlišit jednotlivé kopy a detailní poklesy a nárůsty rychlosti v průběhu jednoho záběru HK na rozdíl od grafického zobrazení rychlosti z Tachografu II (spodní graf), který tuto detailnější vnitrocyclickou analýzu jednoho záběru neumožňuje.

Obrázek 4.12

Křivky rychlosti ze SwIMU a Tachografu II v ose x (měřeno současně oběma zařízeními) u kraulové souhry

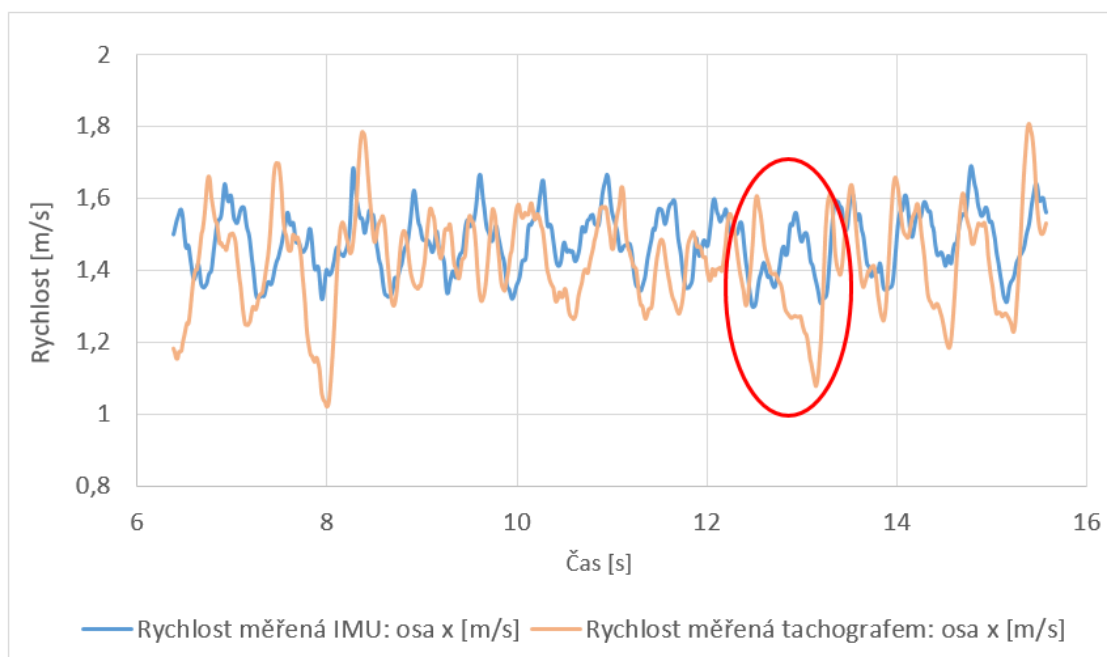


Vzhledem k tomu, že software je primárně určen k prohlížení naměřených dat, je pro detailnější srovnání průběhů rychlostí vhodné exportovat data do Excelu a tam provést další analýzu dat nebo porovnání grafického průběhu měřených hodnot. Na Obrázku 4.13 můžeme vidět, že u SwIMU i Tachografu II jsou hodnoty přibližně srovnatelné, i když důsledkem fyzikální rozdílnosti měření dochází k posunu křivek rychlosti. V nejnižším bodě grafu rychlosti u Tachografu II (nádechová fáze plavce – vyznačeno červenou elipsou) došlo k výraznému rozdílu

průběhu rychlosti mezi oběma systémy. Tachograf II vykresluje značné zpomalení, naopak SWIMU zobrazuje nárůst rychlosti. Tato odlišnost byla způsobena setrvačností odvíjení cívky s lanem, průvěsem nosného lana, nedostatečně rychlou reakcí navíjecího pohonu na změny rychlosti a také tím, že Tachograf II měří pouze výslednou rychlost v ose x, i když v tomto případě se projevila změna rychlosti i v osách z (nahoru a dolů) a y (doprava a doleva).

Obrázek 4.13

Porovnání křivek okamžité rychlosti ze současného měření SwIMU a Tachografem II u kraulové souhry v dopředné ose x v Excelu MS 2016



Analýza pohybu horních končetin u plaveckého způsobu kraul

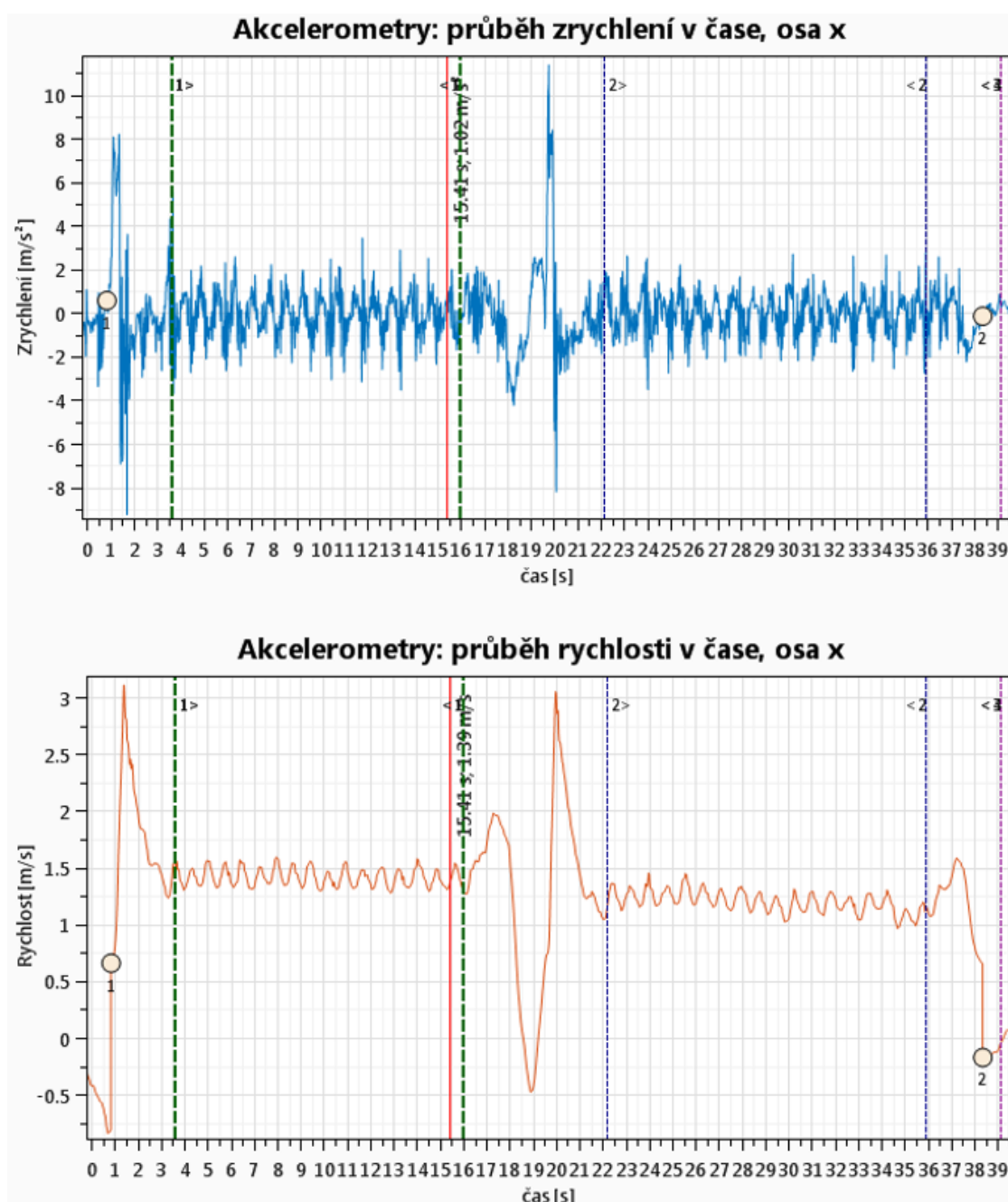
Na obrázku 4.14 jsou graficky zobrazeny křivky okamžitého zrychlení a rychlosti v dopředné ose x ze SwIMU při plavání kraulovými HK s kyvadlovou obrátkou. Křivka zrychlení je trenérům obtížněji srozumitelná, avšak pro detailnější vnitrocyclickou analýzu jednotlivých záběrů HK je toto zobrazení velmi přínosné, i když vyžaduje větší zkušenost se „čtením“ křivky zrychlení. Zejména při hledání chyb v plavecké technice je důležité využívat grafického zobrazení průběhu zrychlení i rychlosti, jelikož se chyba v technice projeví zpomalením (záporným zrychlením) výrazněji než u křivky rychlosti, kde se chyba projeví pouze snížením amplitudy.

Z grafického zobrazení průběhu rychlosti i zrychlení (Obrázek 4.14) je zřejmé, že 25metrový úsek plavala plavkyně rychleji, ve druhé úseku již výrazně zpomalila pravděpodobně vlivem únavy. Dále je možné se detailněji zaměřit na záběry HK, u nichž došlo k poklesům rychlosti (např. 6. a 10. záběr – označeny šipkou). Díky softwarové funkci přiblížení křivky

rychlosti (zoom), spolu se snímky z kamer, je možné provést rozbor jednotlivých fází záběrů a hledat příčiny poklesu rychlosti (např. chybné provedení nádechové fáze, špatně provedený začátek nebo konec záběru – přitažení lokte k tělu aj.) U některých plavců je na grafickém průběhu rychlosti možné vidět výrazné rozdíly mezi pravou a levou HK (nižší amplituda, tvar křivky), což plavce i trenéra může nasměrovat k další práci na plavecké technice.

Obrázek 4.14

Křivky rychlosti a zrychlení (v dopředné ose x) ze SwIMU u kraulových HK



Při individuální analýze plaveckého výkonu a techniky plavce je důležité sledovat jak statistické údaje sledovaných parametrů z vyhodnocovaných intervalů (Obrázek 4.15), tak křivky rychlosti, zrychlení, průběh velikosti natočení SwIMU na zádech plavce a jeho úhlovou rychlost pro získání komplexních informací. Na obrázku 4.15 je možné vidět, že plavec v druhém 25metrovém měřeném úseku (prvním intervalu) plaval o 0,06 (m.s-1) rychleji než v prvním intervalu. Jeho účinnost plavecké techniky byla v druhém intervalu o 4% vyšší než v prvním intervalu a zároveň v druhém intervalu snížil svoji průměrnou frekvenci záběrů HK o 0,116 Hz. Přičemž plavec v druhém úseku dosáhl vyšších hodnot maximálních i minimálních hodnot rychlosti měřeného úseku.

Obrázek 4.15

Statistické vyhodnocení sledovaných parametrů kraulových HK v prvním a druhém 25metrovém úseku padesátimetrové tratě zobrazené v Software SwimDataViewer 5.2.2

Zdroj dat:	Rychlost, osa x		
% z maxima:	0,718	Aritmetický průměr:	1,442
Rozptyl:	0,029	Variační koeficient:	0,119
Směrodat. odchylka:	0,171	Počet prvků souboru:	1 075
Účinnost:	0,960	Maximum:	1,758
Minimum:	1,042		
Frekvence 1:	1,415	Aritmetický průměr:	1,430
Rozptyl:	0,149	Variační koeficient:	0,104
Směrodat. odchylka:	0,149		
Zdroj dat:	Rychlost, osa x		
% z maxima:	0,748	Aritmetický průměr:	1,502
Rozptyl:	0,029	Variační koeficient:	0,113
Směrodat. odchylka:	0,170	Počet prvků souboru:	1 209
Účinnost:	0,964	Maximum:	1,792
Minimum:	1,091		
Frekvence 1:	1,294	Aritmetický průměr:	1,314
Rozptyl:	0,170	Variační koeficient:	0,130
Směrodat. odchylka:	0,170		

Poznámka. První vyhodnocovaný interval je horní tabulka, druhý interval je spodní tabulka

Podíváme-li se detailněji na grafické zobrazení průběhů rychlosti a zrychlení plavce v dopředné ose x (Obrázek 4.16), můžeme na červeném grafu rychlosti vidět rozdíly mezi tvarem křivek pravé a levé HK, což je způsobeno odlišnou technikou záběru pravé a levé HK (Obrázky 4.16 a 4.17 fotografie vlevo dole). Tvar jednotlivých záběrů (píků) levé HK je téměř vždy vyšší i širší než u strmějších a užších záběrů (píků) pravé HK (Obrázek 4.16 – detail jednoho záběru vlevo nahoře). Zaměříme-li se na křivku zrychlení, vidíme, že levou HK dokázal plavec provést záběr s mnohem vyšším zrychlením než pravou HK, což je patrné zejména v druhém 25metrovém úseku (Obrázek 4.16 – druhá polovina grafu vpravo). Vzhledem k tomu, že zrychlení je přímo úměrné síle, jakou plavec dokáže provést záběr, můžeme tvrdit, že pravou HK dokáže plavec vyvinout vyšší rychlost, tedy i propulzní sílu, což se kladně projeví na jeho dopředné rychlosti. Z tohoto důvodu bychom doporučili plavci změnit techniku záběru levou HK (Obrázek 4.17

fotografie vlevo dole) dle techniky záběru jeho pravé HK (Obrázek 4.17 fotografie vlevo dole), což by se mělo kladně projevit na jeho dopředné rychlosti.

Obrázek 4.16

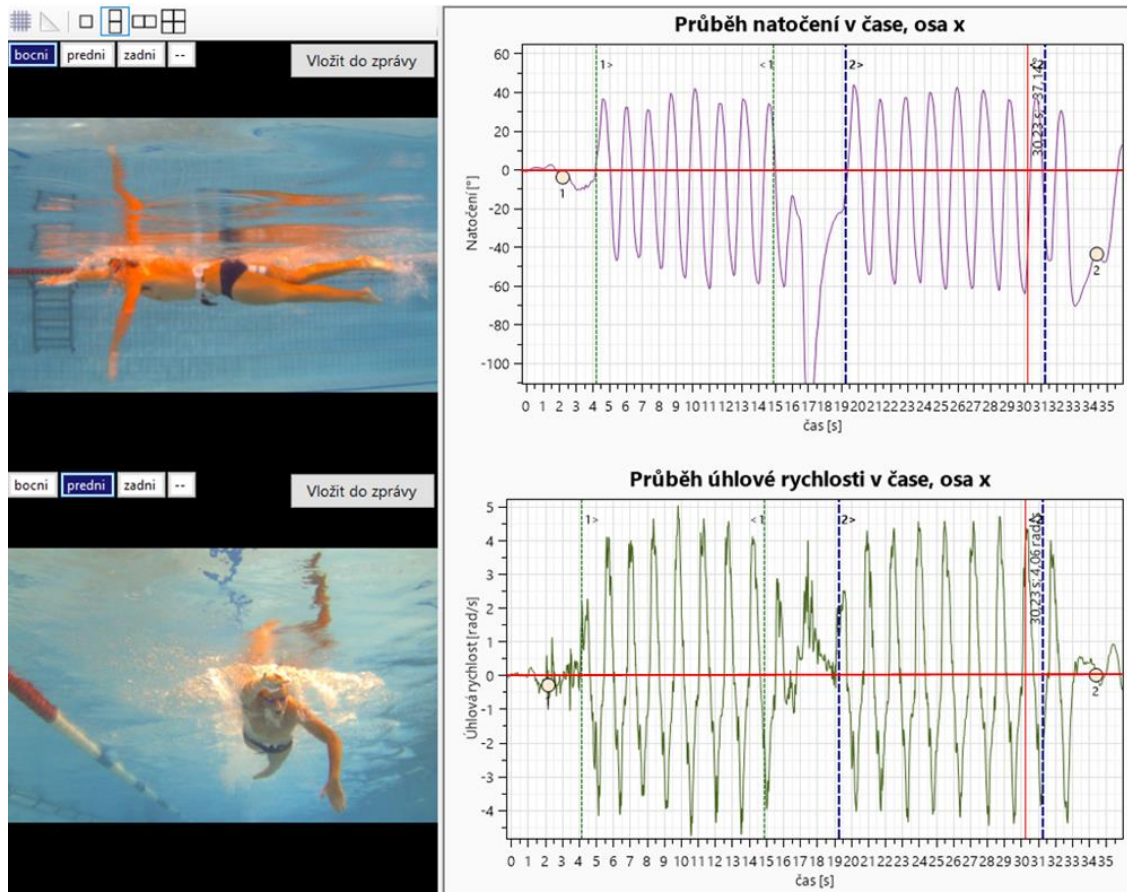
Grafické zobrazení průběhů rychlosti a zrychlení v ose x měřeného padesátimetrového úseku plavaného HK spolu s ukázkou techniky záběru měřeného plavce pravou HK v Software SwimDataViewer 5.2.2



Díky grafickému zobrazení průběhu natočení SWIMU (v ose x) umístěného na zádech plavce můžeme analyzovat velikost natočení plavce v podélné ose těla. Na obrázku 4.17 můžeme vidět, že se plavec natácel cca o 20° více na levou stranu než na pravou, což je s největší pravděpodobností způsobeno rozdílnou technikou provedení záběru pravé a levé HK (viz výše).

Obrázek 4.17

Grafické zobrazení průběhů natočení a úhlové rychlosti těla plavce v ose x padesátimetrového úseku plavaného HK spolu s ukázkou techniky záběru měřeného plavce levou HK zobrazené v Software SwimDataViewer 5.2.2



Analýza pohybu dolních končetin u plaveckého způsobu kraul

Při analýze výkonnosti a techniky DK se zaměříme na porovnání statistických údajů (Obrázek 4.18) mezi prvním a druhým 25metrovým úsekem (dále jen úsek), a to zejména na průměrnou rychlost plavání ($m \cdot s^{-1}$) a frekvenci pohybu DK (Hz). Měřený padesátimetrový úsek byl vyhodnocován po 25 m bez prvních a posledních deseti kroulových kopů DK, aby byl eliminován vliv výjezdu a dohmatu.

Jak můžeme vidět v Obrázku 4.18, ve druhém 25metrovém úseku byla plavcova průměrná rychlost o 0,016 nižší než v prvním úseku. Přičemž účinnost plavecké techniky zůstala i v druhém úseku stejná, což naznačuje, že primárním důvodem nebude zvýšená chybovost v plavecké technice, ale spíše vliv únavy. To potvrzuje i fakt, že plavec snížil frekvenci pohybu DK o 8,29 %. Plavci se ve druhém úseku podařilo udržet téměř totožnou maximální hodnotu rychlosti (o 0,005 nižší) a zároveň o 0,066 zvýšil svoji hodnotu minimální rychlosti. Z čehož vyplývá, že plavec

dokázal optimálnější technikou některých kopů DK eliminovat poklesy rychlosti (Obrázek 4.19 – vyznačená oblast spodní část obrázku), a tím jeho průměrná rychlost klesla jen nepatrně, i když jeho frekvence práce DK se snížila.

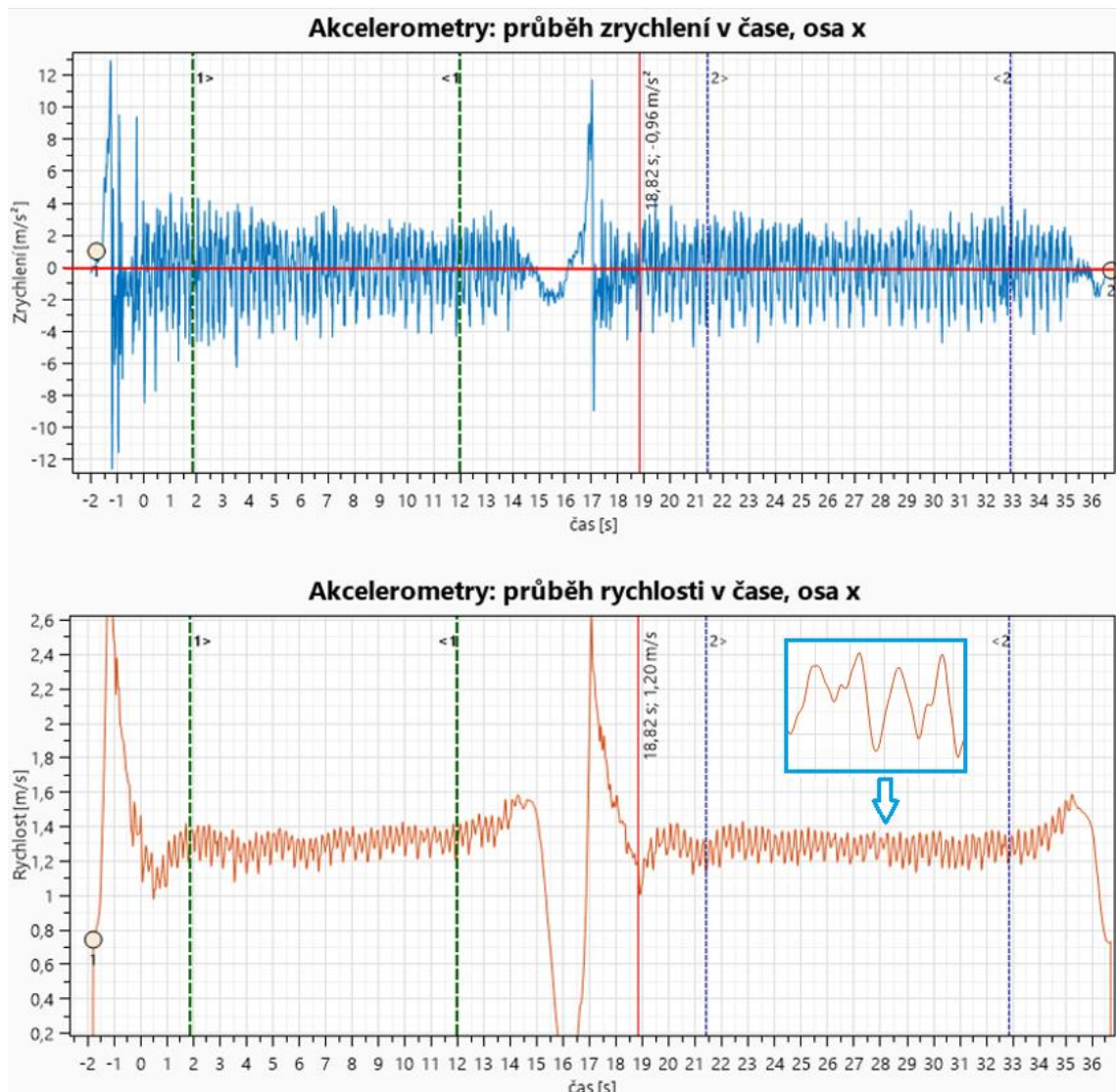
Obrázek 4.18

Statistické údaje sledovaných parametrů DK v prvním a druhém 25metrovém úseku (první vyhodnocovaný interval nahoře, druhý interval dole) padesátimetrového měřeného úseku zobrazené v Software SwimDataViewer 5.2.2

Zdroj dat: Rychlost, osa x					
% z maxima:	0,608	Aritmetický průměr:	1,302	Účinnost:	0,993
Rozptyl:	0,004	Variační koeficient:	0,050	Maximum:	1,436
Směrodat. odchylka:	0,065	Počet prvků souboru:	1 012	Minimum:	1,071
Frekvence 1:	4,365	Aritmetický průměr:	4,442	Rozptyl:	0,38
Směrodat. odchylka:	0,620	Variační koeficient:	0,140		
Zdroj dat: Rychlost, osa x					
% z maxima:	0,600	Aritmetický průměr:	1,286	Účinnost:	0,993
Rozptyl:	0,004	Variační koeficient:	0,049	Maximum:	1,431
Směrodat. odchylka:	0,063	Počet prvků souboru:	1 152	Minimum:	1,137
Frekvence 1:	4,036	Aritmetický průměr:	4,074	Rozptyl:	0,17
Směrodat. odchylka:	0,414	Variační koeficient:	0,102		

Obrázek 4.19

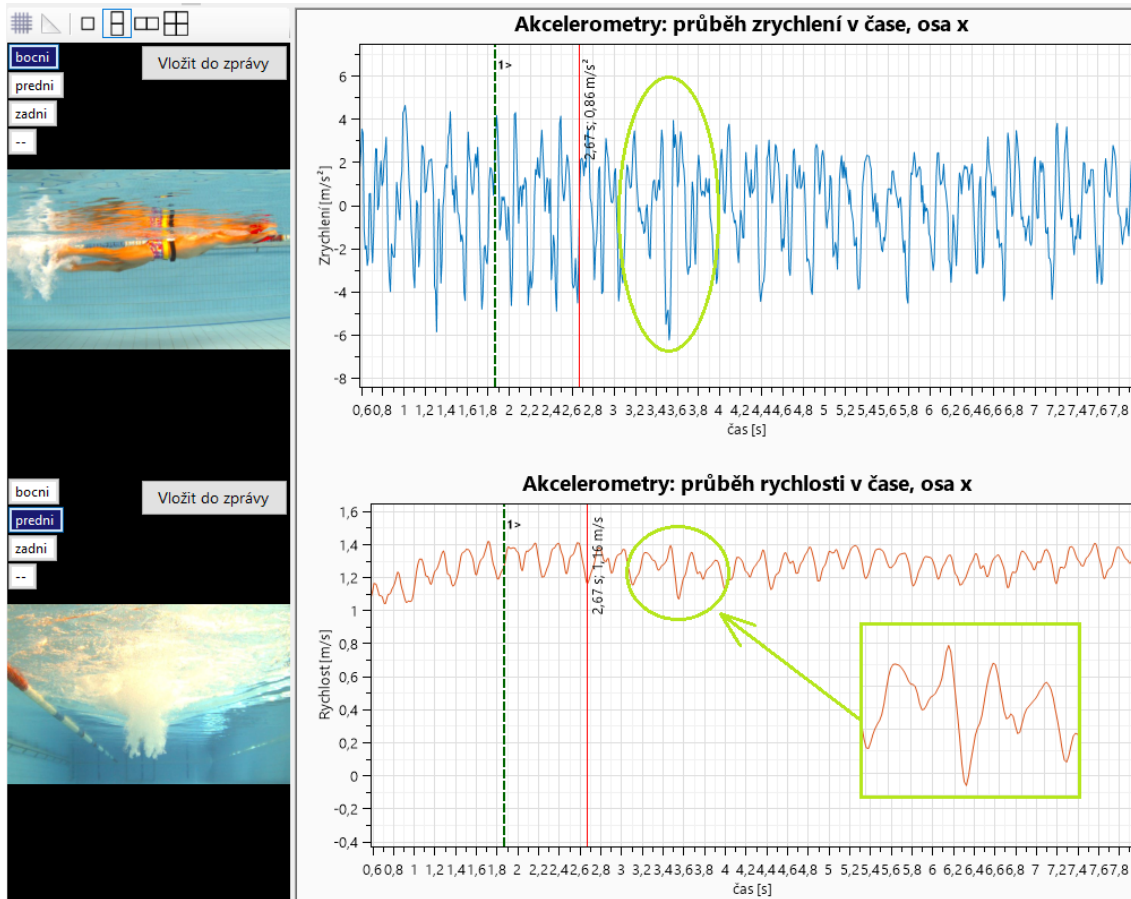
Software SwimDataViewer 5.2.2 – Grafické zobrazení průběhů rychlosti a zrychlení v dopředné ose x měřeného padesátimetrového úseku plavaného DK spolu s vyznačenými intervaly pomocí barevných čar pro vyhodnocení a výřezem dvou cyklů kopů DK



Ve zvětšeném výřezu grafického průběhu zrychlení a rychlosti (Obrázek 4.20 – zelené ovály) je možné rozpoznat nejvýraznější zpomalení v celém měřeném úseku plaveném DK. Došlo k tomu poté, co plavec provedl efektivní kop pravou DK a levá noha provedla až příliš velkou flexi v kolenním kloubu, což vedlo k zvýšení odporu i prodloužení mezizáběrové přestávky. To mělo za následek snížení rychlosti. Práci DK před a za vyhodnocovaným intervalem (označeným na obrázku 4.20 zelenými a modrými čarami) nebereme v potaz, jelikož je zde patrný drift akcelerometru.

Obrázek 4.20

Grafické zobrazení průběhů rychlosti a zrychlení v ose x spolu fotografií mezizáběrové přestávky s vyznačeným výřezem dvou cyklů kopů DK s nejvýznamnějším poklesem rychlosti v celém měřeném padesátimetrovém úseku plavaném DK v Software SwimDataViewer 5.2.2



4.2 Výsledky studie 2 – Ověření reliability Tachografu II a SwIMU

Cílem této studie bylo ověření reliability měřících zařízení Tachograf II a SwIMU prostřednictvím opakovaných měření šesti 25metrových úseků plavaných maximální rychlostí plaveckým způsobem kraulem. Pro tuto studii byla stanovena výzkumná otázka 1. U výzkumných měření pro ověření reliability byla vyhodnocována kroulová souhra u Tachografu II. U SwIMU byla kromě kroulové souhry analyzována také data z výjezdu a z celé měřené délky bazénu (bez posledních dvou záběrů).

4.2.1 Výzkumná otázka VO1

VO1: Jaká je reliability dat získaných prostřednictvím zařízení SwIMU a Tachografu II?

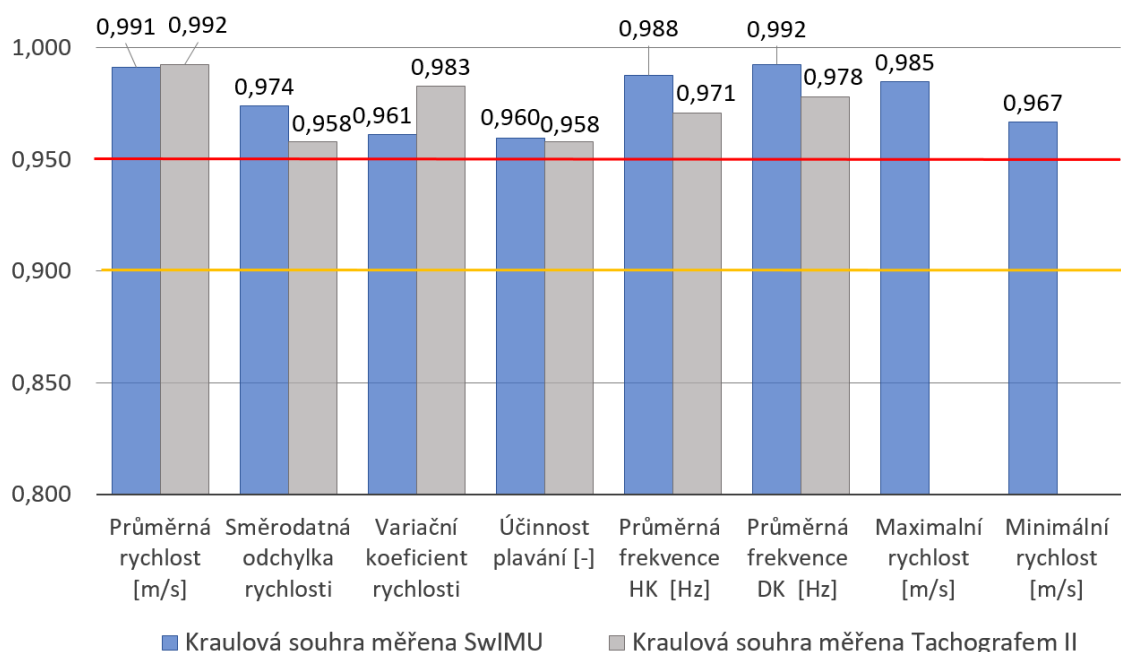
Reliabilita (spolehlivost) dat byla posuzována pomocí ICC. Velikost ICC byla u kraulové souhry měřené SwIMU a Tachografem II u všech sledovaných parametrů vyšší než 0,90 i 0,95 což odpovídá vynikající (Koo & Li, 2016) a vysoké (Zaciorský, 1981) míře reliability (v Obrázku 4.21 označeno oranžovou a červenou čarou). Na základě výsledků (Obrázek 4.21) můžeme říci, že pro měření kraulové souhry Tachograf II i SwIMU splňují požadavky na měření pro klinické a výzkumné účely, u kterých musí být ICC vyšší než 0,90 u všech sledovaných parametrů (Innes & Strake, 1999). U průměrné rychlosti plavání, která je pro nás klíčovým parametrem pro analýzu plavecké techniky, byla u obou zařízení hodnota ICC větší než 0,99.

Vzhledem k tomu, že Tachograf II v čase měření opakovaných úseků pro ověření reliability neumožňoval vyhodnocovat maximální a minimální hodnoty rychlosti plavání, jsou hodnoty ICC pro průměrné maximální (0,98) a minimální (0,97) rychlosti plavání v Obrázku 4.21 zobrazeny pouze pro měřící zařízení SwIMU.

Hodnoty frekvence pohybů HK a DK na rozdíl od ostatních sledovaných parametrů neudávají, s jakou mírou reliability je Tachograf II a SwIMU měří, ale uvádí, s jakou spolehlivostí je lze manuálně odečíst z kamerových záznamů a dále softwarově vypočítávat jejich průměrné hodnoty. I u frekvence pohybu HK (0,988 SwIMU; 0,971 Tachograf II) u DK (0,992 SwIMU; 0,978 Tachograf II) byly hodnoty ICC nad hranicí vynikající i vysoké spolehlivosti (Koo & Li, 2016; Zaciorskij, 1981), přičemž u SwIMU vyšly pro HK i DK vyšší oproti Tachografu II.

Obrázek 4.21

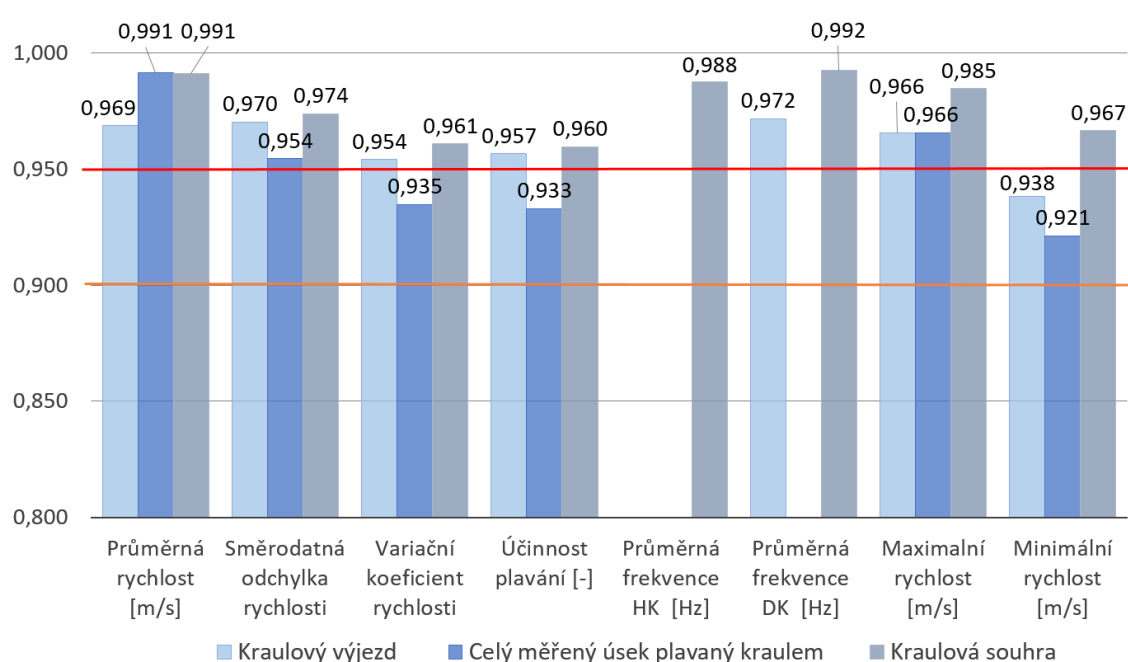
Grafické zobrazení hodnoty ICC koeficientu pro parametry kraulové souhry měřené SwIMU a Tachografem II



Tachograf II z principiálního hlediska neumožňuje měření výjezdů, proto jsou na obrázku 4.22 uvedeny hodnoty ICC pouze pro SwIMU, a to pro vyhodnocované úseky kroulového výjezdu, souhry a celého měřeného úseku. V obrázku 4.22 je oranžovou čarou definována hranice (ICC > 0,90) vynikající spolehlivosti (Koo & Li, 2016), která je požadována pro výzkumné a klinické použití (Innes & Strake, 1999) a červenou čarou je označena hranice ICC pro vysokou hodnotu reliability (ICC > 0,95), používanou v kinantropologickém výzkumu (Zaciorskij, 1981).

Obrázek 4.22

Grafické zobrazení hodnoty ICC koeficientu pro parametry vyhodnocovaných úseků měřené SwIMU



Velikost ICC průměrné rychlosti celého měřeného úseku i kroulové souhry byla 0,991. Hodnota ICC průměrné rychlosti výjezdu byla mírně nižší (0,969). Velikost ICC směrodatné odchylky rychlosti SwIMU byla nejvyšší u kroulové souhry (0,974), u kroulového výjezdu byla 0,970 a nejnižší byla u celého úseku (0,954). Hodnota ICC variačního koeficientu celého úseku (0,933) byla pod stanovenou hranicí pro zařízení vhodné pro výzkumné účely. Pro variační koeficient rychlosti kroulového výjezdu (0,954) a souhry (0,961) byla hodnota ICC nad touto hranicí.

V případě kroulové souhry byly hodnoty ICC účinnosti plavecké techniky 0,960, u výjezdu 0,957. Nejnižší hodnota tohoto koeficientu byla u celého úseku (0,933). Tato velikost nedosahuje hranice určující vhodnost zařízení pro výzkumné účely v kinantropologii.

ICC průměrné frekvence pohybu HK uvádíme (Obrázek 4.22) pouze u úseku kraulové souhry (0,988), protože u dalších úseků frekvence pohybu HK odečítány nebyly. ICC průměrné frekvence pohybu DK byly vypočteny u úseků kraulového výjezdu (0,972) a souhry (0,992), přičemž u celého měřeného úseku frekvence pohybu DK odečítány nebyly.

Velikost ICC maximálních hodnot rychlosti byla největší pro kraulovou souhru (0,985). Pro kraulový výjezd i celý měřený úsek (výjezd + souhra včetně prvních dvou záběrů HK nad vodní hladinou) byla hodnota ICC stejná (0,966). Hodnoty ICC minimálních hodnot rychlosti byly nejvyšší u kraulové souhry (0,967), u kraulového výjezdu byla velikost ICC 0,938, nejnižší hodnotu ICC jsme našli u celého měřeného úseku (0,921).

4.3 Výsledky studie 3 – Komparace dat získaných z měřícího zařízení

Tachograf II a SwIMU

Cílem této studie bylo provést komparaci dat sledovaných parametrů (průměrné, maximální a minimální hodnoty rychlosti, směrodatné odchylky a variačního koeficientu rychlosti a účinnosti plavecké techniky) ze současného měření pomocí zařízení SwIMU a Tachografu II u plavání 25 m kraulovou souhrou maximálním úsilím. Pro tuto studii byla stanovena výzkumná otázka 2.

4.3.1 Výzkumná otázka VO2

VO2: Existuje rozdíl v hodnotách parametrů získaných s využitím zařízení SwIMU a Tachografu II?

Základní statistické charakteristiky a porovnání dat získaných s využitím zařízení SwIMU a Tachografu II jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1*Porovnání hodnot proměnných získaných z Tachografu II a SwIMU u kraulové souhry*

Proměnná	Tachograf II		SwIMU		t	p	d
	$\bar{x} \pm sm.$ odch.	Rozsah	$\bar{x} \pm sm.$ odch.	Rozsah			
Průměrná rychlost [m/s]	1,55 ± 0,18	1,27–1,87	1,60 ± 0,23	1,20–1,91	-2,11	0,059	0,61
Sm. odchylka rychlosti [m/s]	0,17 ± 0,051	0,10–0,26	0,13 ± 0,04	0,08–0,19	2,10	0,059	0,61
Var. Koeficient rychlosti	0,11 ± 0,034	0,05–0,16	0,08 ± 0,02	0,06–0,11	2,65	0,023	0,77
Maximální rychlost [m/s]	1,95 ± 0,21	1,55–2,23	1,92 ± 0,32	1,38–2,33	0,59	0,565	0,17
Minimální rychlost [m/s]	1,08 ± 0,23	0,82–1,65	1,27 ± 0,16	0,99–1,52	-3,32	0,007	0,96
Účinnost techniky	0,96 ± 0,02	0,93–0,99	0,98 ± 0,01	0,97–0,99	-2,83	0,016	0,82

Poznámka. d – Cohenovo d (d = 0,20 malý efekt; d = 0,50 střední efekt; d = 0,80 velký efekt), $\alpha=0.05$

Rozdíl průměrné rychlosti naměřené systémy Tachograf II a SwIMU se pohyboval na hranici statistické významnosti ($p = 0,059$), se střední velikostí efektu. Stejný závěr platí také pro rozdíly ve směrodatné odchylce rychlosti. Rozdíl v minimálních hodnotách rychlosti byl mezi oběma systémy nevýznamný ($p = 0,07$), avšak s velkým efektem ($d = 0,96$). Pro maximální rychlost nebyl nalezený rozdíl významný ($p = 0,565$). U zbývajících proměnných existují mezi oběma systémy významné rozdíly v naměřených hodnotách. Pro variační koeficient rychlosti je tento rozdíl ($p = 0,023$) se středním efektem ($d = 0,77$), pro účinnost techniky ($p = 0,016$) je nalezený efekt velký ($d = 0,82$).

4.3.2 Komparace měřících zařízení Tachografu II a SwIMU z pohledu uživatelské náročnosti a využitelnosti v trenérské a výzkumné praxi

Zařízení Tachograf II a SwIMU mají vysokou hodnotu reliability, a proto je z pohledu přesnosti měření rychlosti plavce možné použít obě zařízení. Pokud trenéra nebo výzkumníka primárně zajímá průměrná rychlost plavání, je vhodnější volit Tachograf II, protože při měření

pomocí SWIMU je nutné kompenzovat drift, oscilace aj. chyby typické pro měření s akcelerometry. Naopak pro detailnější analýzu jednotlivých záběrů je lépe volit SWIMU, jelikož citlivost akcelerometrů s gyroskopem na změnu rychlosti je vyšší. Tato vyšší citlivost na kolísání rychlosti může mít negativní dopad na stanovení účinnosti plavecké techniky, kdy je vhodnější použití Tachografu II. Pro měření startů, výjezdů a obrátek je možné pouze využití zařízení SWIMU. Tachografem II lze měřit rychlost plavce pouze v ose x, pro analýzu rychlosti v dalších osách je proto třeba použít zařízení SWIMU.

Nevýhodou SWIMU je náročnější přenos dat z měřícího zařízení a jejich následné zpracování (nastavení korekční délky). Díky synchronizačnímu LED signálu je však možné provést manuální synchronizaci dat s obrazem s vyšší přesností oproti Tachografu II. Jeho výhodou je možnost online sledování grafického zobrazení průběhu plavcovy rychlosti se synchronním kamerovým záznamem. Výhodou SWIMU je jeho jednodušší přenositelnost a skladnost. Zapojení měřícího zařízení a jeho obsluha při měření je u Tachografu II výrazně složitější. Vzhledem k tomu, že pro obsluhu systému Tachograf II je nutná přítomnost nejméně čtyř osob oproti dvěma pro SWIMU, jsou provozní náklady na měření u Tachografu II vyšší. V Tabulce 4.2 jsou definovány hodnotící parametry pro kvalitativní srovnání měřících zařízení Tachografu II a SWIMU z pohledu instalace, obsluhy, funkcionality a zpracování dat.

Tabulka 4.2

Porovnání měřících zařízení Tachografu II a SWIMU

Hodnocené parametry	Tachograf II	SWIMU
Časová náročnost montáže měřícího zařízení včetně kamer (2 lidé)	45–60 min	30 min
Náročnost instalace a nastavení zařízení před měřením (konkrétní úkony)	vysoká náročnost upevnění zařízení na okraj bazénu, spojení zařízení kabely mezi sebou a PC, upevnění na plavce aj.	mírná až střední náročnost nabití, kalibrace, nastavení antény, upevnění na plavce aj.

Hodnocené parametry	Tachograf II	SwIMU
Nároky na odbornost a zaškolení obsluhy	střední náročnost	mírná až střední náročnost
Obsluha měřicího zařízení (minimální počet lidí)	4 lidé obsluha tachografu, PC, pojízdné kamery	2(3) lidé obsluha SwIMU i PC, pojízdné kamery
Upevnění zařízení na plavce	2 min	min
Kalibrace před měřením	ne	ano
Napájení měřicího zařízení	ze sítě	baterie (IMU), ze sítě (anténa, PC)
Kontinuální přenos dat	ano	ne
Příprava dat pro analýzu	mírná náročnost poloautomatická synchronizace záznamu měření a kamerového záznamu na základě časových značek – s následným manuálním zpřesněním synchronizace	střední náročnost poloautomatická synchronizace záznamu měření a kamerového záznamu na základě časových značek – s následným manuálním zpřesněním synchronizace dle LED signálu. nastavení korekčních délek
Náročnost transportu zařízení z pohledu dopravy	střední náročnost velký objem zařízení z pohledu prostoru i hmotnosti (3 transportní kufry a konstrukce kamerového systému včetně vozíku a kamer)	mírná až střední náročnost (kvůli kamerovému systému se náročnost přípravy zvyšuje) malý ruční kufřík a konstrukce kamerového systému včetně vozíku a kamer

Hodnocené parametry	Tachograf II	SwIMU
Přímo měřené veličiny	1 (rychlost v ose x)	9 (zrychlení, úhlové zrychlení, velikost natočení plavce ve 3 osách)
Dopočítané a odečtené veličiny včetně kamer	rychlost, zrychlení, účinnost, maximální, minimální a průměrná rychlost, procenta z osobního rekordu, statistické veličiny vypočtené z rychlosti a pro frekvenci paží a nohou (směrodatná odchylka, rozptyl, variační koeficient) vše pro osu x	zrychlení, rychlost, účinnost, maximální, minimální a průměrná rychlost, procenta z osobního rekordu, statistické veličiny vypočtené z rychlosti a pro frekvenci paží a nohou (směrodatná odchylka, rozptyl, variační koeficient) vše pro osu x, y, z
Možnost měření v osách	v ose x	v osách x, y, z
Počet a specifikace měřených úseků	1 (plaveckou souhra)	4 (start, výjezd, souhra, obrátka)
Přesnost měření z pohledu spolehlivosti (reliability) a limity	vysoká přesnost kmitání lana, při motýlku a prsou dochází k nárůstu rychlosti i v jiné ose než x	vysoká přesnost vliv driftu – aplikace filtrů a dalších kompenzací

Poznámka. Stupně hodnotící škály – vysoká, střední, mírná

4.4 Výsledky studie 4 – Analýza plaveckého způsobu kraul pomocí SwIMU

Cílem této studie bylo hledání vzájemných vztahů mezi sledovanými parametry jednotlivých měřených úseků, a to vzhledem k průměrné rychlosti plavání na dílčích úsecích nebo na celé měřené trati. Pro tuto studii byly stanoveny výzkumné otázky 3 a 4 i hypotéza 1.

4.4.1 Výzkumná otázka VO3

VO3: Jaký je vztah mezi vybranými parametry (průměrná rychlost, maximální a minimální hodnoty rychlosti, účinnost, frekvence pohybu horních a dolních končetin) dílčích úseků (kraulový výjezd, plavání souhrou) a průměrnou rychlostí plavce na celém měřeném úseku?

Byl zkoumán podíl průměrné rychlosti kraulového výjezdu a souhry na průměrnou rychlost celé měřené tratě. Grafické znázornění podílu rychlostí v jednotlivých úsecích na průměrné rychlosti měřené v celém úseku je na obrázku 4.23 (plavci jsou řazeni podle průměrné rychlosti, od nejpomalejšího k nejrychlejšímu).

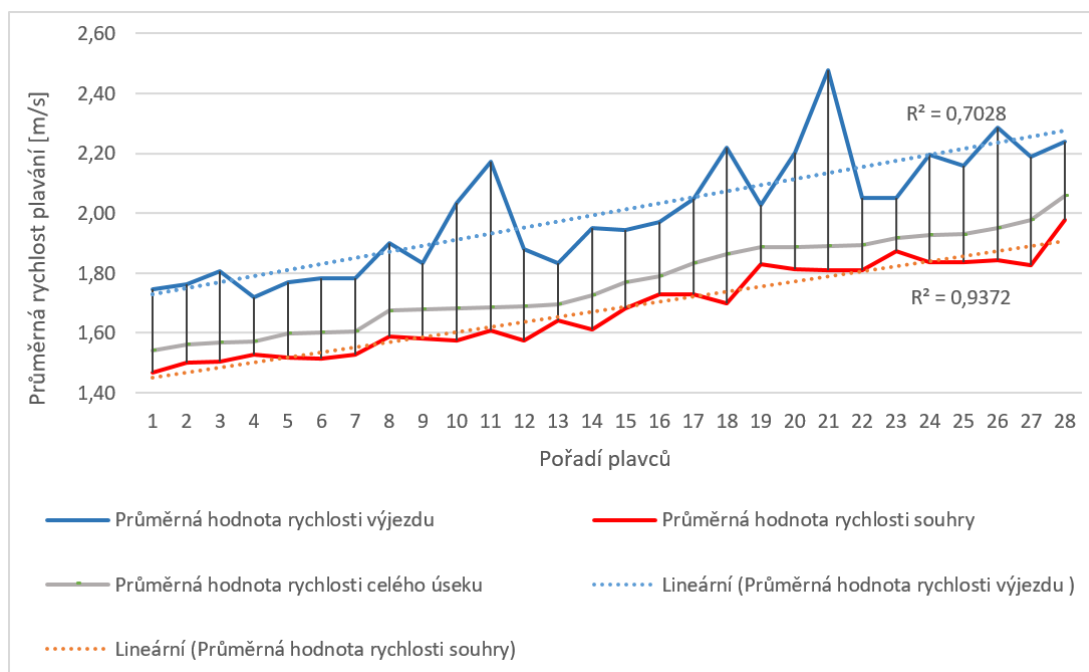
Z hodnot spolehlivosti spojnice trendů průměrné hodnoty rychlosti výjezdu ($R^2 = 0,703$) a průměrné hodnoty rychlosti souhry ($R^2 = 0,937$) vyplývá, že průměrnou rychlost na celém měřeném úseku pozitivně ovlivňuje jak výjezd, tak kraulová souhra.

Hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu pro určení závislosti průměrné rychlosti kraulové souhry a rychlosti na celém měřeném úseku ($r = 0,969$) a průměrné rychlosti kraulového výjezdu a rychlosti na celém úseku ($r = 0,883$) byly statisticky významné.

Z těchto výsledků vyplývá, že průměrnou rychlost na celém měřeném úseku více ovlivňuje kraulová souhra než kraulový výjezd.

Obrázek 4.23

Podíl průměrné rychlosti dílčích úseků na průměrné rychlosti celé kraulové tratě



Poznámka. Přerušovaná čára značí lineární spojnicí trendů

Průměrnou rychlost na celém měřeném 25metrovém úseku pozitivně ovlivňuje u kraulové souhry frekvence pohybu HK ($r = 0,614$) i DK ($r = 0,668$), velikost maximální ($r = 0,928$) a minimální ($r = 0,773$) rychlosti. Pro úsek výjezdu jsme našli významné závislosti pro maximální ($r = 0,816$) a minimální ($r = 0,496$) rychlosti daného úseku ve vztahu k průměrné rychlosti celého úseku. Hodnota korelačního koeficientu mezi účinností plavecké techniky a průměrnou rychlostí na celém úseku byla $r = -0,516$. Hodnota korelačního koeficientu mezi účinností plavecké techniky a průměrnou rychlostí na celém úseku byla $r = -0,516$. Účinnost se detailněji zabýváme ve VO4 a H1.

4.4.2 Výzkumná otázka VO4

VO4: Jaký je vztah mezi vybranými parametry (frekvence pohybu horních a dolních končetin, účinnost, maximální a minimální rychlost plavání) v dílčích úsecích (kraulový výjezd, plavání souhrou) a průměrnou rychlostí plavce v těchto úsecích?

Pro sportovní výkon je důležité zkoumat, jaké parametry ovlivňují plavcovu rychlost. Proto jsme hledali vztahy mezi vybranými parametry u kraulového výjezdu a kraulové souhry a průměrnou rychlostí v těchto úsecích.

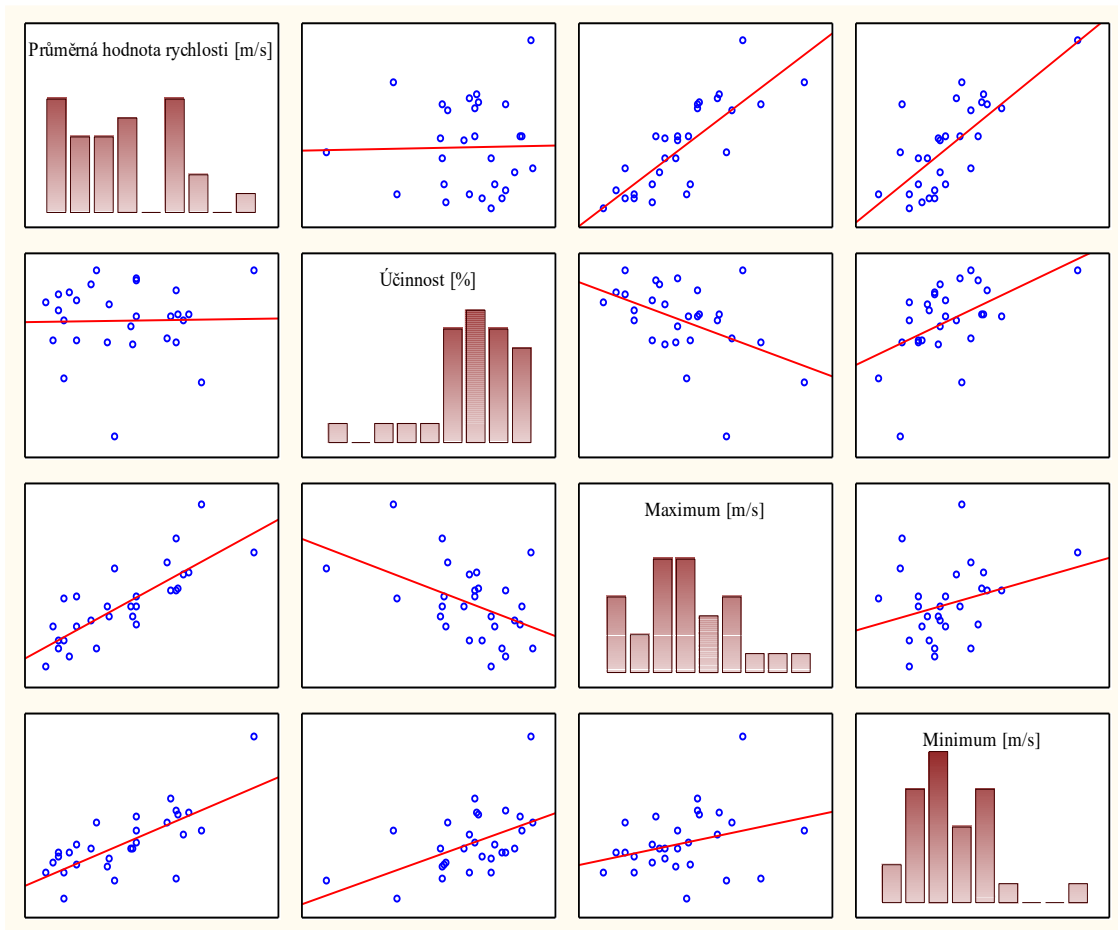
Kraulový výjezd

U kraulového výjezdu jsme zkoumali korelační závislosti u parametrů účinnosti plavecké techniky, frekvence pohybu DK, maximálních a minimálních hodnot rychlosti vzhledem k průměrné rychlosti plavání na hladině významnosti 0,05. Na obrázku 4.24 jsou graficky zobrazeny závislosti těchto parametrů a histogramy (sloupcové grafy četnosti dat), kde na vodorovné ose se nachází intervaly, do kterých jsou data rozčleněna, a na svislé ose je výškou sloupce názorně zobrazen počet dat vyskytujících se v daném intervalu, což vždy platí pro zobrazené závislosti pod a nad histogramem. Názvy sloupcových grafů definují svislé a vodorovné osy korelačních závislostí jako je tomu např. u grafického zobrazení korelační závislosti průměrné rychlosti a účinnosti plavecké techniky (druhý obrázek zleva v prvním řádku). Na svislé ose je průměrná rychlost a na vodorovné ose účinnost plavecké techniky. Rozložení dat účinnosti názorně ukazuje histogram (druhý graf v druhém řádku; Obrázek 4.24).

Pro úsek výjezdu jsme našli významné korelace mezi maximální ($r = 0,832$) i minimální ($r = 0,690$) hodnotou rychlosti a průměrnou frekvencí pohybu DK ($r = 0,398$) vzhledem k průměrné rychlosti plavání výjezdu. Mezi účinností plavecké techniky a rychlostí plavání u kraulového výjezdu statisticky významná korelace nevyšla.

Obrázek 4.24

Zobrazení závislostí dle Spearmanova korelačního koeficientu u kraulového výjezdu a histogramy jednotlivých parametrů vyjádřené sloupcovými grafy

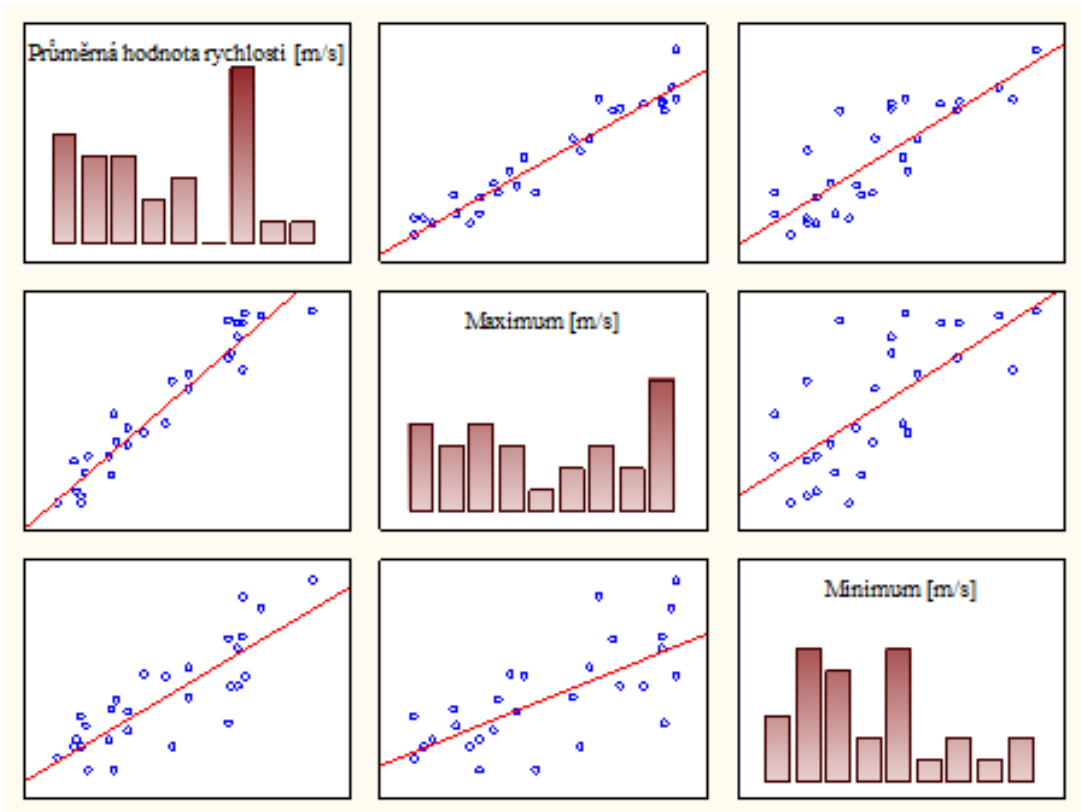


Kraulová souhra

Pro úsek kraulové souhry jsme statisticky významné korelace našli pro maximální ($r = 0,953$) a minimální ($r = 0,830$) hodnoty rychlosti, průměrnou frekvenci pohybu HK ($r = 0,600$) a DK ($r = 0,652$) vzhledem k průměrné rychlosti plavání v tomto úseku (Obrázek 4.25).

Obrázek 4.25

Zobrazení závislostí dle Spearmanova korelačního koeficientu u kraulové souhry a histogramy jednotlivých parametrů vyjádřené sloupcovými grafy



4.4.3 Výzkumná hypotéza 1

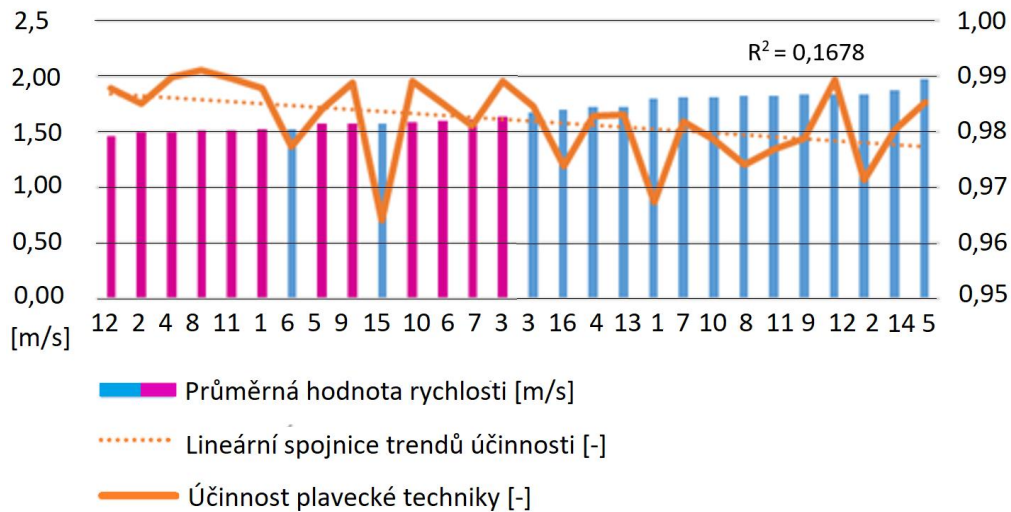
H1: Menší kolísání rychlosti (vyšší účinnost) zvyšuje průměrnou rychlost plavání u kraulové souhry

Srovnání výkonů plavců v rámci měřené skupiny

Na obrázku 4.26 je grafické znázornění průměrné rychlosti plavání a účinnosti plavecké techniky ze šesti 25metrových opakovaných měření jednotlivých plavců (muži modří, ženy růžové) u kraulové souhry plavané maximálním úsilím. Z lineární spojnice trendů (oranžová tečkovaná čára) je zřejmé, že korelace mezi účinností plavecké techniky a průměrnou rychlostí souhry je záporná.

Obrázek 4.26

Graf zobrazující závislost průměrné rychlosti na účinnosti plavecké techniky z průměrných hodnot ze šesti opakovaných úseků kraulové souhry

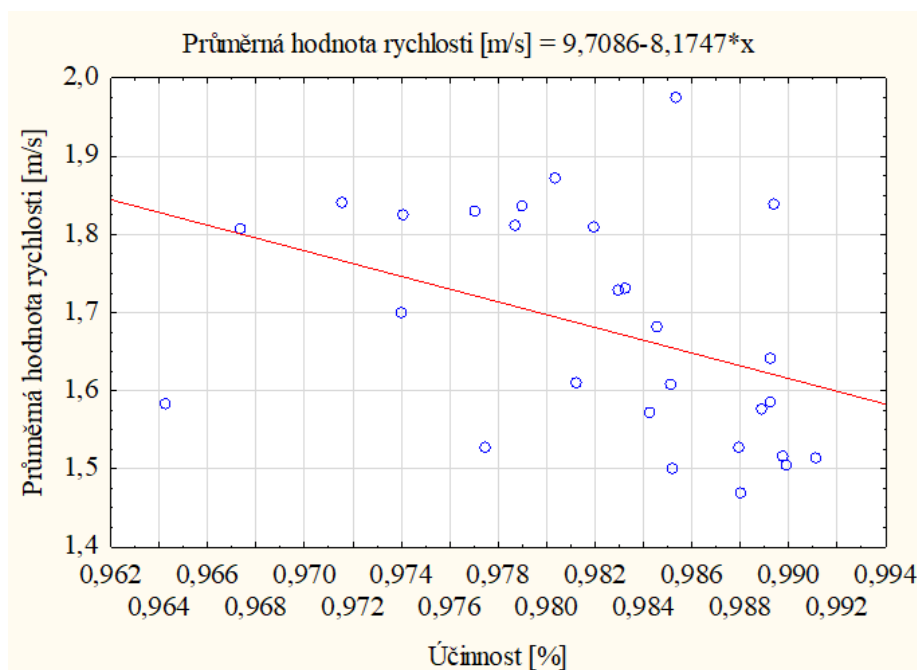


Poznámka. Muži – modré sloupce, ženy – růžové sloupce, čísla pod sloupci označují pořadové číslo plavců, kteří jsou seřazení od nejpomalejší po nejrychlejší (zleva doprava)

Také při použití Spearmanova korelačního koeficientu jsme našli statisticky významnou negativní závislost mezi účinností a průměrnou rychlostí u kraulové souhry ($r = -0,484$; Obrázek 4.27).

Obrázek 4.27

Závislost průměrných hodnot rychlosti na účinnosti plavecké techniky



Pro dosažení kvalitního výkonu je důležité, aby plavci nejen plavali s vysokou účinností techniky (menším kolísáním rychlosti), ale zároveň aby byla jejich maximální rychlost co nejvyšší. Z regresního modelu závislosti průměrné rychlosti na účinnosti plavecké techniky a maximální hodnotě rychlosti, která je dána rovnicí:

$$z = -5,066 + 5,324 \cdot x + 0,751 \cdot y$$

vyplývá, že tato závislost je statisticky významná, a to na hladině významnosti 0,05, přičemž p hodnoty celkového F testu a dílčích T testů vyšly menší než 0,0001. V rovnici z značí průměrnou hodnotu rychlosti, x účinnost plavecké techniky a y maximální hodnoty rychlosti.

Individuální srovnání výkonu jednotlivých plavců v rámci šesti opakovaných úseků

Pro určení vztahu mezi hodnotou účinnosti a průměrnou rychlostí plavání u každého plavce individuálně vzhledem k jeho šesti měřeným úsekům byly vypočítány Spearmanovy korelační koeficienty, doplněné o velikost efektu (vzdálenost korelačního koeficientu od nuly). Pro 15 plavců byla zjištěna střední či silná pozitivní korelace, pro 5 plavců střední či silná negativní korelace a pro 8 plavců byla hodnota korelace slabá nebo zanedbatelná (Tabulka 4.3). Pokud se zaměříme na počet kladných a počet záporných korelací, tak kladných (včetně slabých) bylo 20 a záporných 8. Plavců, pro které se potvrdila přímá závislost mezi rychlostí a účinností, je výrazně více než plavců, pro které byla zjištěna nepřímá závislost.

Tabulka 4.3*Dílčí korelace pro jednotlivé plavce v rámci šesti opakovaných měření*

Plavec č.	Korelace	Směr závislosti	Síla závislosti
1	-0,01	0	zanedbatelná
2	0,14	0	slabá
3	0,63	+	silná
4	0,52	+	silná
5	0,60	+	silná
6	0,45	+	střední
7	0,41	+	střední
8	0,52	+	silná
9	-0,56	-	silná
10	0,09	0	zanedbatelná
11	-0,72	-	silná
12	-0,58	-	silná
13	0,06	0	zanedbatelná
14	-0,75	-	silná
15	-0,07	0	zanedbatelná
16	0,64	+	silná
17	0,30	+	střední
18	0,47	+	střední
19	0,31	+	střední
20	-0,66	-	silná
21	0,69	+	silná
22	0,30	+	střední
23	0,62	+	silná
24	0,06	0	zanedbatelná
25	-0,01	0	zanedbatelná
26	0,25	0	slabá
27	0,37	+	střední
28	0,45	+	střední

Poznámka. Slabá závislost 0,1–0,3, středně silná závislost 0,3–0,5, silná závislost 0,5–1

Dále byl vypočten smíšený lineární model s účinností jako pevným efektem a identifikací plavce jako náhodným efektem, který bere v úvahu jak variabilitu provedení v rámci jednoho plavce, tak variabilitu mezi plavci. Pro výpočet tohoto modelu bylo použito 6 měření u 28 plavců, tedy celkem 168 měření rychlosti a účinnosti. Na základě modelu byla odhadnuta hodnota parametru pro závislost rychlosti na účinnosti jako 1,052 při standardní chybě odhadu 0,794. Tato závislost nebyla statisticky významná na zvolené hladině významnosti 0,05 ($p = 0,187$).

Hypotézu H1, že menší kolísání rychlosti (vyšší účinnost plavecké techniky) zvyšuje průměrnou rychlost plavání, zamítáme.

5 DISKUSE

5.1 Studie 1 – Vývoj měřící metody pro analýzu plavání

V posledních letech se senzory IMU ukázaly jako užitečný nástroj pro analýzu plavecké techniky i výkonnosti (Dadashi et al., 2015; Magalhaes et al., 2014; Morais et al., 2022b). Jejich relativně nízké výrobní náklady, ne příliš složitá kalibrace, bezdrátový přenos dat a zejména malé rozměry i hmotnost spolu s možností nepřetržitého měření celé závodní tratě či tréninku aj. (Cortesi et al., 2019) nás vedly k vývoji vlastní inerciální měřící jednotky SwIMU doplněné o synchronní systém podvodních videokamer a software SwimDataViewer (Bátorová et al., 2016; 2020).

V nedávném období představili inerciální měřící jednotky pro analýzu plavání upevněné na dolní části zad také výzkumníci z portugalských univerzit v Leirii a Lisabonu (Morouço et al., 2020), z francouzské univerzity v Reimu (Puel et al., 2014), z australské Griffith University v Brisbane (Davey et al., 2008; Stamm et al., 2011; 2013a), a také vědci v rámci mezinárodní spolupráce z několika univerzit a výzkumných ústavů (Félix et al., 2019; Morouco et al., 2020; Stamm et al., 2020). Výsledky studií ukazují, že jeden senzor IMU upevněný na spodní části zad je dostačující pro poskytnutí široké škály proměnných souvisejících s výkonem při plavání (Hamidi Rad et al., 2021b), jako je okamžitá rychlost, průměrná rychlost, počty záběrů HK a DK i nádechů, uplavaná vzdálenost nebo maximální a minimální hodnoty zrychlení či rychlosti, úhlové rychlosti a velikosti natočení těla plavce (Bächlin & Tröster, 2012; Dadashi et al., 2012; Davey et al., 2008; Hanidi Rad et al., 2021b; Mooney et al. 2015).

V poslední době probíhá vývoj zařízení umožňujících analýzu pohybu ve vodním prostředí i u firem poskytujících komerčně dostupná inerciální zařízení jako jsou IMU senzory GaitUp (GaitUp, Švýcarsko, Physilog® IV; Dadashi et al., 2012; 2013a; Hamidi Rad et al., 2021a, b), TritonWear (IMU–TritonWear, Toronto, TritonWear®; Butterfield et al., 2021), senzor MiniX s možností měření povrchové elektromyografie (MiniX, Itálie, Cometa system; Puce et al., 2021) aj. V počátcích vývoje našeho měřícího systému však tyto komerční vodotěsné senzory IMU se softwaru pro analýzu plavání nebyly ještě dostupné, proto jsme zahájili vývoj hardwaru včetně vodotěsného zapouzdření. Komerční inerciální měřící zařízení navíc neumožňují výzkumníkům upravovat či rozšiřovat funkcionalitu hardwaru ani softwaru dle potřeb výzkumu (Jeng, 2021). To nás přivedlo k vytvoření vlastního otevřeného softwarového nástroje SwimDataViewer nové generace umožňujícího zpracování a zobrazení dat z Tachografu II i SwIMU pro detailní analýzu plavecké techniky i výkonnosti plavců (Bátorová et al., 2021). Grafické zobrazení zrychlení a rychlosti pro Tachograf II v ose x a pro SwIMU i velikosti úhlu natočení těla plavce včetně

úhlové rychlosti ve všech třech osách spolu se statistickými údaji o výkonnosti plavce a frekvenci pohybů HK i DK umožňuje nalézt nedostatky v plavecké technice způsobující ztrátu rychlosti plavce. Poklesy rychlosti a sledování změn kinematických parametrů jsou široce používané metody pro sledování únavy při plavání (Dadashi et al., 2015; Figueiredo et al., 2013; Ikuta et al., 2012; Puce et al., 2018; Stirn et al., 2011). Také výzkumníci z francouzské univerzity v Reimu (Puel et al., 2014) představili vlastní softwarový nástroj se základní funkcionalitou pro zpracování a zobrazení dat z jimi vyvinutého senzoru IMU a z podvodní videokamery. Mnozí výzkumníci z oblasti plavání zpracovávají data ze senzorů IMU pomocí programovacích prostředí jako je Matlab (Clément et al., 2021; Stamm et al., 2020), Python (Costa et al., 2021) nebo platformy Arduino (Jeng, 2021), což vyžaduje odbornou znalost programování i náročnější proces interpretace výsledků do plavecké a trenérské praxe.

Mezi hlavní povinnosti trenéra patří neustálé sledování plavců, vyhodnocování jejich techniky i výkonu a poskytování zpětné vazby pro jejich zlepšení (Bompa & Buzzichelli, 2018; Marinho et al., 2020), a to jak u dílčích úseků startů, výjezdů i obrátek, tak u plavání souhrou (Hamidi Rad et al., 2021a; Mooney et al., 2015; Morais et al., 2017; Pérez-Tejero et al., 2017; Veiga & Roig, 2016; Veiga et al., 2014, 2016; Slawson et al., 2012). Vzhledem k tomu, že z principiálního hlediska tachometrické zařízení, včetně Tachografu II, neumožňují měření startů ani obrátek, není zpětná vazba pro trenéry kompletní. Navíc některé studie tvrdí, že pokud jsou plavci upnuti na tachometrické a tachodynamometrické měřicí zařízení, dochází ke změně jejich plavecké techniky (Dadashi et al., 2012, 2013a, b; Clément et al., 2021; Samson et al., 2018). I přes to, že u Tachografu II plavci překonávají jen minimální přednastavený odpor motorku, musí uzpůsobit svoji plaveckou techniku i provedení obrátek tak, aby nedošlo ke kolizi s tažným lankem. Také upnutí na Tachograf II plavci hodnotili spíše negativně, a to z důvodu diskomfortu způsobeného opaskem a trhavými pohyby jezdce, který plavci táhnou nad sebou. Oproti tomu IMU senzory včetně našeho SwIMU nenutí plavce modifikovat jejich plaveckou techniku, jelikož je lze upevnit na tělo plavce jen s minimálním zvýšením odporu (Hamidi Rad et al., 2021a, b). Je však důležité dbát na vhodné upevnění senzoru, aby nedocházelo k jeho oscilaci působením proudění vody, které způsobuje nežádoucí chyby měření (Camomilla et al., 2017). Kladem senzorů IMU je také to, že umožňují měřit delší úseky jednotlivých tréninkových jednotek (Clément et al., 2021), případně více plavců současně v jedné plavecké dráze, což s Tachografem II není možné.

Nespornou výhodou Tachografu II je online zpětná vazba, kdy trenéři za počítačem mohou sledovat plavcovu techniku na videokamerách zároveň s grafickým zobrazením průběhu rychlosti. Při vývoji inerciálního senzoru SwIMU jsme se pokoušeli o online přenos dat nejprve pomocí Wifi a následně radiofrekvenčního signálu, ale kvůli velkému útlumu signálu vodním

prostředím nebyl přenos dat spolehlivý, proto jsme zvolili ukládání dat na SD kartu. O online přenos dat pomocí Wifi se pokusili také výzkumníci z portugalských univerzit, kteří ale následně také přešli na ukládání dat na interní paměťové zařízení (Morouço et al., 2020). Negativem tachografického systému je časová náročnost na instalaci a obsluhu zařízení, díky čemuž se zvyšují náklady na výzkumná měření. Naopak jeho kladem je to, že jím měřená data nejsou ovlivněna driftem, který je nutný kompenzovat u akcelerometrů (Bátorová et al., 2021; Clément et al., 2021; Kumpán, 2016).

V porovnání s výše uvedenými systémy zařízení SwIMU se softwarem SwimDataViewer a se synchronními podvodními kamerami nabízí rozsáhlejší funkcionalitu pro detailnější analýzu plavecké techniky a výkonnosti. Oproti komerčním inerciálním jednotkám jsou však fyzické rozměry senzoru SwIMU mírně vyšší (Obrázek 4.2 b) stejně jako u jiných výzkumných prototypů senzorů IMU (Mooney et al., 2016; Stamm et al., 2011). V budoucnosti bychom měřící systém SwIMU chtěli rozšířit o další videokamery a senzory IMU umožňující analýzu pohybu jednotlivých segmentů těla včetně měření povrchové EMG (Dadashi et al., 2013a; Mooney et al., 2016; Ohgi et al., 2014; Puce et al., 2021).

5.2 Diskuze studie 2 – Ověření reliability Tachografu II a SwIMU

Cílem této studie bylo ověření reliability dat získaných prostřednictvím námi vyvinutého měřícího zařízení SwIMU a Tachografu II, který je v České republice již mnoho let používán pro analýzu plavecké techniky a výkonnosti závodních plavců, ale dosud nebyla ověřena jeho reliability. Ověřením reliability a validity inerciálních senzorů (Clément et al., 2021; Dadashi et al., 2012; Hamidi Rad et al., 20220; Mooney et al., 2015, 2016; Shell et al., 2021; Stamm et al., 2013a) i tachometrických zařízení (Feitosa et al, 2013a, b, Morouço et al, 2006) se zabývalo několik výzkumných studií. V našem výzkumu byla měřená trať rozdělena na dílčí úseky, což je pro analýzu plavání standardem a s mírnými odlišnostmi jej používá mnoho výzkumníků (Gonjo & Olstad, 2021; Hamidi Rad et al., 2021a, b; Mooney et al., 2016, Šťastný, 2016b). V rámci 25metrového úseku jsme vždy sledovali úseky: výjezdu, kraulové souhry a celé měřené tratě. U všech sledovaných úseků u obou zařízení vyšly hodnoty reliability všech sledovaných parametrů nad hranicí vynikající spolehlivosti ($ICC \geq 0,90$; Koo & Li, 2016).

Na základě našich výsledků ($ICC = 0,992$) můžeme říci, že zařízení Tachograf II je vysoce reliabilní pro měření průměrné rychlosti kraulové souhry. Což je v souladu s výzkumnými studiemi, které prokázaly, že tachometrické zařízení jsou reliabilní a validní pro měření dopředné okamžité a průměrné rychlosti plavání (Feitosa et al. 2013a. b, Morouço et al. 2006). Tachometrická zařízení SpeedRT® (Dadashi et al., 2012) a SP5000 (Speed Probe 5000 – SP5000;

Stamm et al., 2013b) byla použita i jako referenční zařízení pro ověření spolehlivosti měření vyvinutých inerciálních jednotek. Výsledky studie prokázaly, že také zařízení SWIMU je vysoce reliabilní jak pro měření průměrné rychlosti kraulové souhry (0,991) a celého měřeného úseku (0,991), tak kraulového výjezdu (0,969). Nižší hodnota ICC průměrné rychlosti plavání může být způsobena individuální technikou provedení kraulového výjezdu. Někteří plavci při výjezdu plavali jen motýlové kopy a někteří plavali kombinaci motýlových i kraulových kopů a v průběhu svých opakovaných úseků nedodrželi stejnou techniku provedení. Tento předpoklad potvrzují výsledky studií, které uvádí, že různé techniky plavání mohou mít významný vliv na hodnoty ICC (Mooney et al., 2017; Shell et al., 2021). Naše výsledky potvrdila studie kanadských výzkumníků, která prokázala vynikající hodnotu reliability měření okamžité rychlosti plaveckého způsobu kraul (ICC 0,941) pomocí senzoru IMU upevněného na spodní části zad oproti video metodě (Clément et al., 2021). Také u komerčního inerciálního zařízení TritonWeear výsledky ICC sledovaných parametrů (uplavaná vzdálenost, průměrná rychlost, počet záběrů, celkový čas) u všech čtyř plaveckých způsobů potvrdily vynikající hodnotu reliability (Shell et al., 2021). Z výsledků další studie však vyplývá, že tento komerční senzor lze spolehlivě použít pouze pro měření rychlosti plavce a jeho časů na jednotlivých intervalech (Butterfield et al., 2021). U dalších komerčních inerciálních zařízení prokázal Mooney et al. (2017) špatné (Garmin Swim™; 0,258) a střední (Swimsense®; 0,613) hodnoty reliability měření průměrné rychlosti u plaveckého způsobu kraul oproti video metodě. Nízkou reliability autoři přisuzují vysoké variabilitě plaveckého výkonu a technického provedení vlivem únavy u měřených rekreačních plavců (Mooney et al., 2017). Na základě našich výsledků můžeme potvrdit, že zařízení Tachograf II i SWIMU jsou reliabilní pro měření průměrné rychlosti plavání kraulem, a to pro výzkumné i klinické účely (Innes & Strake, 1999).

Pro manuální odečet frekvence kraulových záběrů HK a DK z grafického zobrazení křivky okamžité rychlosti a videozáznamu byly hodnoty ICC u všech dílčích úseků pro Tachograf II i SWIMU v rozmezí 0,971–0,992, proto můžeme konstatovat, že tento způsob odečtu frekvence pohybu je vysoce reliabilní. Hodnoty ICC průměrné frekvence pohybu DK u SWIMU vyšly nejnižší u výjezdu (0,972), což bylo opět s největší pravděpodobností způsobeno tím, že plavci v rámci plavání výjezdu měli odlišnou techniku provedení (rozdílný počet motýlových a kraulových kopů), což negativně ovlivňuje hodnoty ICC (Mooney et al., 2017; Shell et al., 2021). Na základě porovnání ICC manuálního odečtu frekvence pohybů DK a HK u kraulové souhry u obou zařízení je možné vidět, že metoda SWIMU oproti Tachografu II nabízí přesnější odečet frekvence pohybu HK i DK. Vyšší přesnost odečtu frekvence pohybů u SWIMU je nejspíše z důvodu větší citlivosti senzorů IMU na změnu dopředné rychlosti vyvolané záběrem HK a DK končetin, což se projeví větší amplitudou křivky rychlosti, z níž je následně možné jednoznačněji stanovit frekvence

záběrů končetin. Naopak u Tachografu II je tato změna tlumená tažným lankem a na křivce rychlosti se záběry končetin projeví méně výrazně, což ztěžuje odečet frekvence záběrů a může dojít ke vzniku chyby. Tyto odchylky mezi zařízeními mohou být způsobeny také již zmiňovanými individuálními rozdíly v plavecké technice (Mooney et al., 2017; Shell et al., 2021). Využitelnost senzoru IMU umístěného na dolní části zad pro získání počtu, frekvence a rychlosti záběrů HK i DK potvrzuje mnoho studií (Bächlin & Tröster, 2012; Beanlad et al., 2014; Clément et al., 2021; Dadashi et al., 2015; Davey et al., 2008; Engel et al., 2022; Fulton et al., 2009; Chakravorti et al., 2013; James et al., 2012; Le Sage et al., 2010, 2011, 2012; Stamm & Thiel, 2015). Vzhledem k tomu, že jsme prokázali vysokou hodnotu reliability pro manuální odečet frekvence pohybu HK i DK z grafického zobrazení průběhu rychlosti a video záznamu, chtěli bychom v rámci dalšího vývoje měřící metody SwIMU přejít k automatickému odečtu počtu a frekvence záběrů z křivky rychlosti, který ve své studii popisuje Clément et al. (2018).

SwIMU také umožňuje měřit maximální (ICC = 0,985) i minimální (ICC = 0,967) hodnoty rychlosti kroulové souhry s vysokou mírou reliability. Hodnoty ICC maximální rychlosti byly u výjezdu (ICC = 0,966) i u celého měřeného úseku (ICC = 0,966) nižší, pravděpodobně z důvodu variability plavecké techniky (Mooney et al., 2017), která se výrazněji projevuje právě u výjezdu a celého měřeného úseku, než u čistého plavání kroulovou souhrou. Nejnižší hodnoty ICC minimálních hodnot rychlosti byly nalezeny u celého měřeného úseku (0,921). Z tohoto důvodu, chceme-li pro vědecké účely analyzovat hodnoty rychlosti měřené trati včetně jejich minimálních hodnot, je vhodnější si měřený úsek rozdělit na dílčí úseky výjezdu a kroulové souhry (Hamidi Rad et al. 2021 a, b; Mooney et al., 2016; Stamm et al., 2013a, b). Nižší hodnoty ICC pro měření minimální rychlosti mohou být způsobeny použitím kompenzačních filtrů pro odstranění šumu a driftu akcelerometru i individuálními odlišnostmi v plavecké technice (Mooney et al., 2017).

Přesnost měření se senzory IMU závisí zejména na upevnění měřícího zařízení a jeho rozměrech ovlivňujících velikost odporu vůči vodnímu prostředí (Camomilla et al., 2017; Dadashi et al., 2012; Marinho et al., 2019; Stamm et al., 2013 a, b, 2011). Inerciální senzory představují spolehlivý měřící nástroj umožňující hodnocení výkonnosti plavce ve vodním prostředí a zároveň zvyšují množství dostupných informací důležitých pro trenéry i vědce zabývající se analýzou plavecké techniky (Bátorová et al., 2021; Dadashi et al., 2012; Hamidi Rad et al., 2021a, b; Magalhaes et al., 2014, Mooney et al., 2015, 2016).

5.2.1 Limitující faktory studie 2

I přes vysokou míru spolehlivosti obou metod je důležité pracovat s faktory a limity výzkumu ovlivňujícími přesnost měření. U akcelerometrů dochází k driftům (Stamm et al., 2013a; Dadashi et al., 2012), které snižují přesnost měření, a je nutné je kompenzovat. Větší vliv na přesnost měření může mít způsob upevnění akcelerometru na tělo plavce a větší rozměry IMU z důvodu většího hydrodynamického odporu (Marinho et al., 2019). Proto je důležité dbát na pevné upevnění SwIMU na tělo plavce, aby nedocházelo k nežádoucím pohybům zařízení vlivem proudící vody mezi tělem plavce a SwIMU.

Mezi mechanické faktory ovlivňující přesnost měření Tachografu II můžeme uvést výkyv nosného lana tachografů. Tachograf II je principiálně schopen měřit rychlost pouze v dopředné ose x, tudíž není možné zcela jednoznačně vyhodnotit, ve které ose dochází k nárůstu rychlosti. Dále Tachograf II neumožňuje měřit startovní skoky, výjezdy ani obrátky, což je pro trenérskou praxi důležité. Tachometrické zařízení, jako je Speedometer, měří výjezdy i plaveckou souhru, avšak také bez startovního skoku a obrátek (Barbosa et al., 2013).

Mezi limitující faktory můžeme zařadit také to, že při opakovaných měřeních nelze zcela eliminovat vliv únavy plavců (Mooney et al., 2017). Byla provedena pilotní měření, kdy plavci plavali deset 25metrových úseků. V tomto případě se však výrazně projevoval vliv únavy (velké rozdíly v rychlosti mezi první a druhou polovinou měření), proto byl počet opakování snížen na osm a následně na šest. V neposlední řadě je možné mezi limity výzkumu zařadit i to, že plavci dostali pokyn, že musí plavat šest 25metrových úseků maximální rychlostí, ale nelze zcela zajistit, aby plavci tyto pokyny dodrželi. Tato chyba byla minimalizována zprůměrováním hodnot z šesti pokusů u každého plavce.

5.3 Studie 3 – Komparace dat získaných z měřicího zařízení Tachograf II a SwIMU

Cílem této studie bylo zjistit, zda existují rozdíly v hodnotách parametrů získaných ze současného měření zařízením SwIMU a Tachografem II.

Prvním zkoumaným parametrem byla průměrná rychlost kraulové souhry, kdy rozdíl mezi zařízeními byl na hranici statistické významnosti ($p = 0,059$) se střední velikostí efektu, s vyšší hodnotou u zařízení SwIMU. Naše výsledky potvrzuje studie, v níž autoři uvádí, že senzor IMU (62 Nanotrak®, Catapult Sport, Melbourne, Australia) měří vyšší hodnoty průměrné rychlosti u kraulové souhry o 0,03 m/s oproti tachometrickému zařízení 1080 Sprint (1080 Motion, Lidingö, Sweden), i když mezi zařízeními nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl (Clément et al.,

2021). Ani Dadashi et al. (2012) nezjistil statisticky významný rozdíl mezi měřením průměrné rychlosti pomocí jimi vyvíjeného IMU senzoru Physilog upevněného na dolní části zad oproti referenčnímu tachometrickému zařízení Velocity Meeter (SpeedRT[®], ApLab, Řím, Itálie), avšak uvádí, že zkoumané IMU měří vyšší hodnoty průměrné rychlosti plavání kraulem o $0,006 \pm 0,054$ m/s. I další studie uvádí, že senzory IMU měří vyšší hodnoty rychlosti oproti tachometrickému zařízení (Speedometer), avšak díky filtrům pro korekci šumů a driftu se to významně nepromítá do průměrné rychlosti plavání (Puel et al., 2014).

Statisticky významné rozdíly hodnot měřených parametrů získaných z Tachografu II a SwIMU byly prokázány také u variačního koeficientu rychlosti ($p = 0,023$, $d = 0,77$) a na hranici statistické významnosti u směrodatné odchylky rychlosti ($p = 0,059$, $d = 0,61$), kdy SwIMU měří nižší hodnoty těchto parametrů. To je s velkou pravděpodobností způsobeno aplikací filtrů pro korekci šumů a driftu akcelerometru (Dadashi et al., 2012; 2013b; Hamidi Rad et al., 2021a, b; Puel et al., 2014).

U minimálních hodnot rychlosti byl nalezen statisticky významný rozdíl ($p = 0,007$, $d = 0,96$), kdy SwIMU měří vyšší hodnoty minimální rychlosti kraulové souhry ($1,27 \pm 0,16$ m/s) oproti Tachografu II ($1,08 \pm 0,23$ m/s). Z výsledků prezentujících hodnoty maximálních a minimálních rychlostí souhry z obou zařízení můžeme usuzovat, že amplituda průběhu okamžité rychlosti bude u Tachografu II vyšší. Toto je s největší pravděpodobností způsobeno aplikací filtrů a kompenzacemi driftu akcelerometru i principem měření Tachografu II. To také potvrzuje studie autorů Puel et al. (2014), která uvádí, že křivka rychlosti inerciálního senzoru má menší amplitudu než je tomu u tachometrického zařízení Speedometer. Autoři tento jev přisuzují konstrukci tachometrického zařízení, vyšší citlivosti senzorů IMU a již zmiňovaným aplikacím filtrů pro kompenzaci šumů a driftu akcelerometru (Puel et al., 2014).

Tyto výsledky zdůvodňují také to, že pro SwIMU vychází statisticky významně vyšší hodnoty účinnosti plavecké techniky ($p = 0,016$, $d = 0,82$), kdy účinnost plavecké techniky je v našem pojetí brána jako parametr „kolísání rychlosti“ a je vypočítávána z průměrné a okamžité rychlosti plavání (Bátorová et al., 2021; Motyčka et al., 2001; 2009; 2013; 2014; Šťastný & Motyčka, 2012; 2013; Šťastný et al., 2016;).

Vzhledem k tomu, že Feitosa et al. (2013a) prokázal, že Speedometer je validní pro měření maximální a minimální rychlosti plavání kraulem oproti referenční video metodě, používají i další studie tachometrické zařízení jako referenční zařízení pro ověření validity senzoru IMU (Clément et al., 2021; Dadashi et al., 2012; Puel et al., 2014). Pro měření průměrné rychlosti plavání a účinnosti kraulové souhry můžeme zvolit obě zařízení, jelikož jsme v předchozí studii prokázali reliabilitu měření těchto parametrů u obou zařízení (Bátorová et al., 2021). Avšak je důležité si uvědomit, že SwIMU stejně jako ostatní inerciální zařízení měří vyšší hodnoty průměrné

i okamžité rychlosti a tedy účinnosti plavecké techniky (Clément et al., 2021; Dadashi et al., 2012; Mooney et al., 2015, 2016; Puel et al., 2014). Tachograf II neumožňuje měření obrátek, proto pro měření parametrů u dílčích úseků startů, obrátek a výjezdů je nutné volit SWIMU. Dále senzory IMU včetně našeho SWIMU díky svým relativně malým rozměrům příliš nenavýšují odpor plavce a oproti tachometrickým zařízením umožňují jednodušší přepravu, přípravu i nastavení zařízení a poskytují měření relativně dlouhých časových úseků bez nutnosti upravovat plaveckou techniku (Hamidi Rad et al., 2021a; Mooney et al., 2015, 2016; Morais et al., 2021).

5.3.1 Limitující faktory Studie 3

Rozdíly měření z Tachografu II a SWIMU byly u průměrné rychlosti a směrodatné odchylky rychlosti na hranici statistické významnosti. U minimálních hodnot rychlosti a účinnosti byly rozdíly mezi zařízeními statisticky významné. K limitům této studie můžeme zařadit relativně malý počet měřených plavců. Mezi další limity studie patří velikost a způsob upevnění zařízení SWIMU. Výzkumná měření byla realizována s prototypem SWIMU 1, které mělo větší rozměry i odlišný způsob upevnění než současný prototyp 3 a 4, což zvyšovalo odpor i oscilace zařízení na zádech plavce (Camomilla et al., 2017; Hamidi Rad et al., 2021a). Obě tyto skutečnosti mohly mít vliv na rozdílnost měření sledovaných parametrů mezi oběma zařízeními. Proto jsou již naplánována další výzkumná měření s novým prototypem zařízení a na větším počtu plavců. V době realizace měření pro tuto studii nebylo možné provést výzkum na větším množství plavců z důvodu zdržení ve vývoji zařízení SWIMU a covidové situace omezující výzkumná měření na veřejných bazénech.

5.4 Diskuze studie 4 – Analýza plaveckého způsobu kraul

Pro optimalizaci tréninkového procesu sledují trenéři výkony plavců jak na celé závodní trati, tak na jejich dílčích úsecích jako je start, výjezd, souhra a obrátka (Hamidi Rad et al., 2021b). Prvním cílem této studie bylo odpovědět na výzkumnou otázku 3 zabývající se vztahem mezi vybranými parametry (průměrná rychlost, maximální a minimální hodnoty rychlosti, účinnost plavecké techniky, frekvence pohybu HK a DK) dílčích úseků (kraulového výjezdu a souhry) a průměrnou rychlostí plavce na celém 25metrovém měřeném úseku.

Z výsledků vyplývá, že pozitivní vliv na průměrnou rychlost plavání celé měřené tratě mají velikosti maximálních a minimálních hodnot rychlostí jak kraulové souhry, tak výjezdu. Také Barbosa et al. (2021) uvádí, že maximální a minimální hodnoty rychlosti nejvíce ovlivňují průměrnou rychlost na sprinterských tratích. Dále z našich výsledků můžeme usuzovat, že průměrnou rychlost na celém měřeném úseku více ovlivňuje průměrná rychlost kraulové souhry

než kraulového výjezdu. Naše výsledky také potvrzují rešeršní studie, ve které autoři uvádí, že pro neefektivnější zlepšení výkonu na 100metrové trati je nutné se primárně zaměřit na fázi čistého plavání neboli kraulovou souhrou (Sanders et al., 2021). Dalším parametrem kladně ovlivňujícím průměrnou rychlost celé měřené tratě je frekvence pohybu HK i DK kraulové souhry. Pozitivní efekt frekvence pohybu HK potvrzují i výsledky dalších studií (Maglischo, 2003; Silveira et al., 2017; Takagi et al., 2021), avšak existuje maximální frekvence, po jejímž překročení plavci nemohou dále zvyšovat rychlost plavání, jelikož dojde k poklesu rychlosti vinou zkrácení délky plaveckého kroku a změny úhlu náběhu ruky, která snižuje její hnací sílu (Maglischo, 2003; Takagi et al., 2021). Také pozitivní efekt práce DK na dopřednou rychlost plavce klesá se zvyšující se rychlostí plavce (Gatta et al., 2012). Proto pro dosažení vyšší rychlosti plavání je nutná kombinace vysokých frekvencí pohybu DK a malých amplitud kopů Hochstein et al. (2018). Frekvence kopů musí být tedy spíše optimální než maximální (Shimojo et al., 2019), protože se ukázalo, že při vysoké frekvenci dochází ke zpomalení (Shimojo et al., 2014; Yamakawa et al., 2017). Pokud se plavci podaří najít optimální frekvenci kopů, lze očekávat 1–2% zvýšení rychlosti plavání (Shimojo et al., 2019).

Dalším cílem této studie bylo odpovědět na výzkumnou otázku 4, zkoumající vztah mezi vybranými parametry (frekvence pohybu HK a DK, maximální a minimální rychlost plavání) dílčích úseků (kraulový výjezd, plavání souhrou) a průměrnou rychlostí plavce v těchto úsecích. Z našich výsledků vyplývá, že průměrnou rychlost plavání u kraulového výjezdu i u souhry pozitivně ovlivňují jak maximálními a minimální hodnoty rychlosti plavání, tak průměrná frekvence pohybu končetin. Naše výsledky statisticky významného pozitivního efektu maximálních a minimálních rychlostí na průměrnou rychlost plavání potvrzuje také Barbosa et al., (2021), který publikoval, že rychlejší plavci dosahovali vyšších maximální rychlostí a setrvali v nich déle. Ve výzkumu Šťastného (2016a) byl na padesátimetrové trati prokázán statisticky významný pozitivní vztah mezi frekvencí HK a průměrnou rychlostí plavání u kraulové souhry pouze u žen, což autor zdůvodňuje odlišnou plaveckou technikou mužů a žen. Další studie uvádí, že rychlost plavání u kraulu je pozitivně ovlivněna frekvencí pohybů HK spolu s délkou plaveckého kroku (Morais et al., 2022a, 2023; Silveira et al., 2017; Simbaña-Escobar et al., 2020).

Dílčím cílem této studie bylo potvrdit či vyvrátit hypotézu 1, že menší kolísání rychlosti (vyšší účinnost) zvyšuje průměrnou rychlost plavání kraulové souhry. Dle našich výsledků, kde srovnáváme výkony plavců v rámci měřené skupiny, nebylo potvrzeno, že by kolísání rychlosti (variační koeficient rychlosti) nebo účinnost plavecké techniky zvyšovala průměrnou rychlost kraulové souhry na 25metrové trati. Naopak byla nalezena statisticky významná negativní korelace mezi průměrnou rychlostí plavání a účinností plavecké techniky pro smíšenou skupinu mužů a žen, což bylo s největší pravděpodobností způsobeno tím, že ženy v našem výzkumu

plavaly s vysokými hodnotami účinnosti, ale nízkou průměrnou rychlostí (Obr. 4.11). Šťastný (2016) prokázal statisticky významný vztah účinnosti plavecké techniky a průměrnou rychlost plavání pouze u skupiny žen a nikoli mužů. Proto se domnívá, že v mužské kategorii na krátké padesátimetrové trati, hrají roli především silové předpoklady, zatímco u žen je stěžejní zvládnutí techniky plavání zaměřená na nízké kolísání rychlosti. Motyčka et al. (2011b, c) tvrdí, že bez vysokých hodnot účinnosti nelze dosahovat špičkových výkonů a že jen nejlepší plavci jsou schopni plavat nejvyšší účinností (stálou rovnoměrnou rychlostí) při nejvyšší průměrné rychlosti. To ve své práci zmiňuje i Šťastný (2016a), který udává, že elitní plavci s nejvyšší naměřenou střední rychlostí dosahují účinnosti vyšší než 0,97 v prvním úseku trati a 0,96 v druhém úseku trati, což potvrzují i naše výsledky, kdy všichni měření plavci plavali s hodnotou účinnosti nad 0,96. Tuto hranici Šťastný (2016a) doporučuje jako minimální cíl, na který se plavci mají při svém tréninku zaměřit. Avšak pozitivní efekt účinnosti plavecké techniky na rychlost plavání může být spíše na delších tratích, kde musí plavci efektivněji nakládat s energií. Tento předpoklad potvrzují i výsledky Huang et al. (2010) kteří zjistili, že mezi propulzní účinností a rychlostí plavání na krátkých tratích (50 m a 100 m) není signifikantní závislost. Ta byla zjištěna až u 200metrových a 400metrových tratí, přičemž s rostoucí vzdáleností plavané tratě byl tento vztah silnější. Na základě těchto výsledků autoři uvádí, že účinnost je významnějším faktorem určujícím plavecký výkon pro střední a dlouhé tratě než pro krátké vzdálenosti.

Na základě našich výsledků regresního modelu závislosti průměrné rychlosti na účinnosti plavecké techniky a maximální hodnotě rychlosti můžeme konstatovat, že pokud plavec dosáhne vysokých hodnot maximální rychlosti a účinnosti plavecké techniky, bude to mít pozitivní vliv na jeho průměrnou rychlost kraulové souhry. Toto však neplatí pro samostatně sledovaný parametr účinnosti plavecké techniky. Barbosa et al. (2021) uvádějí, že výkonnost na padesátimetrové kraulové trati souvisí zejména s průměrnou a maximální rychlostí a doporučují, aby plavci hledali techniky, jak udržet svou rychlost co nejdéle na co nejvyšších hodnotách. Avšak vliv účinnosti plavecké techniky na průměrnou rychlost kraulu je podle našich výsledků tak velký (sedmkrát vyšší než u maximálních hodnot rychlosti), že pro zlepšení výkonu bude efektivnější, pokud se plavec více zaměří na zlepšení účinnosti plavecké techniky než na zvýšení maximálních hodnot rychlosti. Toto platí jak pro delší (Huang et al., 2010; Šťastý, 2016), tak pro krátké kraulové tratě.

5.4.1 Limitující faktory výzkumu studie 4

Limitující faktory pro tuto studii jsou stejné jako ve studii 2. Vzhledem k tomu, že v této studii se zaměřujeme na účinnost plavecké techniky z pohledu kolísání rychlosti a vykonané

práce, se kterým se v zahraničních publikacích neseťkáváme, můžeme i absenci možnosti dalšího porovnání výsledků považovat za limitující faktor této studie.

6 ZÁVĚRY

Nově vyvinuté akcelerometrické zařízení SWIMU se synchronním videozáznamem (týmem z VUT v Brně z Centra sportovních aktivit a Fakulty strojního inženýrství a z firmy Bender Robotics) překonává omezení systému Tachograf II a umožňuje podrobnou analýzu plavecké techniky a výkonnosti. Toto zařízení umožňuje komplexní měření a hodnocení plaveckého výkonu ve třech osách u všech dílčích částí závodní tratě, s možností upravitelného softwaru podle potřeb výzkumu.

Data získaná z obou zařízení, Tachografu II i SWIMU, prokázala vysoký stupeň reliability pro všechny měřené parametry kraulové souhry. U SWIMU byla spolehlivost potvrzena jak pro výjezd, tak pro celý měřený úsek, což potvrzuje využitelnost obou zařízení pro výzkumné účely.

Zařízení SWIMU měří signifikantně vyšší hodnoty průměrné rychlosti a účinnosti plavecké techniky a nižší hodnoty variačního koeficientu rychlosti v porovnání se zařízením Tachograf II. Tuto skutečnost je důležité brát v úvahu při vyhodnocování a prezentaci výsledků. Zohledněním specifik obou zařízení s ohledem na rozdílné parametry měření zajistíme správnou interpretaci výsledků do trenérské i výzkumné praxe.

Z výsledků vyplývá, že průměrná rychlost na celém měřeném úseku je více ovlivněna kraulovou souhrou než kraulovým výjezdem, avšak oba dílčí úseky pozitivně ovlivňují rychlost na celém měřeném úseku, proto je třeba se zaměřit na trénink techniky i výkonnostních parametrů obou úseků s větším důrazem na kraulovou souhru.

Bylo zjištěno, že frekvence pohybu HK a DK a hodnoty maximální a minimální rychlosti mají pozitivní vliv na průměrnou rychlost plavání na celé trati i jejich dílčích částech. Trenéři by měli zaměřit svůj trénink na dosažení optimální frekvence pohybu končetin pro každého plavce a pracovat na zlepšení maximálních a minimálních rychlostí. Tím by mohli dosáhnout zvýšení celkového výkonu plavců.

Dále bylo prokázáno, že pouze vyšší účinnost plavecké techniky nezvyšuje průměrnou rychlost plavání, avšak pokud plavec dosáhne vysokých hodnot účinnosti i maximální rychlosti, bude to mít pozitivní vliv na jeho průměrnou rychlost kraulové souhry. Přičemž účinnost plavecké techniky má větší vliv na průměrnou rychlost plavání než maximální hodnoty rychlosti. Proto by měli trenéři směřovat své úsilí jak k rozvoji maximálních rychlostí plavců, tak zejména k zlepšování jejich účinnosti plavecké techniky, a to i u krátkých tratí. Tímto způsobem lze přispět k optimalizaci tréninkového procesu i zlepšení výkonu v kraulařských disciplínách.

7 SOUHRN

V rámci této výzkumné práce bylo vyvinuto nové měřicí zařízení SwIMU (Swimming Inercial Measure Unit), které kombinuje akcelerometrické měření se synchronním videozáznamem a poskytuje podrobnou analýzu plavecké techniky a výkonnosti, překonávajíc omezení dosud v ČR nejpoužívanějšího systému Tachograf II.

Hlavním cílem práce bylo ověřit použitelnost obou zařízení pro analýzu plavecké techniky kraul. Dílčí cíle zahrnovaly vývoj měřicí metody pomocí akcelerometru pro měření ve vodním prostředí, určení reliability dat z obou zařízení, srovnání dat z obou zařízení a analýza plaveckého způsobu kraul s využitím dat získaných ze systému SwIMU.

Bylo změřeno 34 plavců Tachografem II a 28 pomocí SwIMU. Oběma zařízeními současně bylo změřeno 12 plavců a jejich 25metrový úsek plavaný maximální rychlostí kraulem. Pro zpracování dat byly použity statistické metody, jako je Intraclass correlation coefficient (ICC) pro vyhodnocení test-retest reliability Tachografu II, párový t-test pro porovnání párových měření Tachografu II a SwIMU, a výpočet 95% intervalu spolehlivosti pro střední hodnotu rozdílového výběru a velikost efektu dle Cohena d. Statistické zpracování dat zahrnovalo Spearmanovy korelace a regresní model pro další zpracování dat. Hladina významnosti byla zvolena $\alpha = 0,05$.

Data získaná z obou systémů prokázala vysoký stupeň reliability pro všechny měřené parametry kraulové souhry. Bylo také zjištěno, že SwIMU měří signifikantně vyšší hodnoty průměrné rychlosti a účinnosti plavecké techniky a nižší hodnoty variačního koeficientu rychlosti než Tachograf II.

Výsledky výzkumu ukázaly, že rychlost kraulové souhry má významnější vliv na průměrnou rychlost na celém měřeném úseku než výjezd. Existuje silný vztah mezi frekvencí pohybu končetin, maximální a minimální rychlostí a průměrnou rychlostí plavání na celé měřené trati i jejich dílčích částech.

Výsledky našeho výzkumu také prokázaly, že pouze vyšší účinnost plavecké techniky nezvyšuje průměrnou rychlost plavání. Dále na základě výsledků můžeme říci, že účinnost spolu s maximální rychlostí pozitivně ovlivňuje průměrnou rychlost kraulové souhry. Přičemž účinnost plavecké techniky má na průměrnou rychlost kraulové souhry významnější vliv než maximální rychlost, a to i na krátkých kraulařských tratích.

8 SUMMARY

In the context of this research study, a novel measurement device called the Swimming Inertial Measurement Unit (SwIMU) was developed and its reliability was validated. SwIMU combines accelerometer-based measurements with synchronized video recordings to provide a detailed analysis of swimming technique and performance, surpassing the limitations of the commonly used Tachograf II system in the Czech Republic.

The main objective of this study was to assess the usability of both devices for analyzing freestyle swimming technique. Specific goals included the development of a measurement method using accelerometers in an aquatic environment, determining the data reliability of both devices, comparing data from both devices, and analyzing freestyle swimming technique using data obtained from the SwIMU system.

A total of 34 swimmers were measured using the Tachograf II system, while 28 swimmers were measured using the SwIMU device. Twelve swimmers completed a 25-meter segment of freestyle swimming at maximum speed using both devices simultaneously. Statistical methods such as the Intraclass Correlation Coefficient (ICC) for test-retest reliability of the Tachograf II system, paired t-test for comparing paired measurements of Tachograf II and SwIMU, and calculation of a 95% confidence interval for the mean difference and effect size using Cohen's d were employed for data processing. The statistical analysis also included Spearman correlations and a regression model for further data processing. The significance level was set at $\alpha = 0.05$.

The data obtained from both systems demonstrated a high level of reliability for all measured parameters of freestyle swimming technique. It was also found that SwIMU measured significantly higher values of average speed and swimming efficiency, as well as lower values of speed variability coefficient compared to Tachograf II.

The research results indicated that the speed of clean freestyle swimming has a more significant impact on the average speed throughout the measured segment than the start (pull-out). A strong relationship was observed between limb movement frequency, maximum and minimum speeds, and average swimming speed for both the entire measured course and its individual parts.

The results of our research have also shown that the efficiency of swimming technique alone does not increase average swimming speed. The efficiency, along with maximum speed, positively influences the average speed of the freestyle stroke, however, the efficiency of swimming technique has proven to have a greater effect on average speed, even on short freestyle distances.

9 REFERENČNÍ SEZNAM

- Abbes, Z., Haddad, M., Bibi, K. W., Mujika, I., Martin, C., Chamari, K., & Fernandes, R. J. (2021). Effect of Tethered Swimming as Postactivation Potentiation on Swimming Performance and Technical, Hemophysiological, and Psychophysiological Variables in Adolescent Swimmers: A Systematic Narrative Review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(2), 311-315. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0669>
- Abbott, S., Yamauchi, G., Halaki, M., Castiglioni, M. T., Salter, J., & Cobley, S. (2021). Longitudinal Relationships Between Maturation, Technical Efficiency, and Performance in Age-Group Swimmers: Improving Swimmer Evaluation. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(8), 1082-1088. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0377>
- Amaro, N. M., Marinho, D. A., Marques, M. C., Batalha, N. P., Morouço, P. G., & Cobley, S. (2017). Effects of Dry-Land Strength and Conditioning Programs in Age Group Swimmers: Improving Swimmer Evaluation. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(9), 2447-2454. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001709>
- Arellano, R. & Terres, N.. (2006). Fundamental hydrodynamics of swimming propulsion. In Vilas-Boas, J.P., Alves, F., & Marques, A. (Eds.). *Biomechanics and Medicine in Swimming X* (s. 15-20). Portuguese journal of sport sciences https://www.iat.uni-leipzig.de/datenbanken/iks/open_archive/bms/10_15-20_Arellano.pdf
- Arogamam, G., Manivannan, N., Harrison, D., Alberty, M., Chollet, D., Toussaint, H. M., & Fernandes, R. J. (2019). Review on Wearable Technology Sensors Used in Consumer Sport Applications: effect of performance level. *Sensors*, 19(9), 55-64. <https://doi.org/10.3390/s19091983>
- Barbosa, A. C., Barroso, R., Gonjo, T., Rossi, M. M., Paolucci, L. A., Olstad, B. H., & Andrade, A. G. P. (2021). 50 m freestyle in 21, 22 and 23 s: What differentiates the speed curve of world-class and elite male swimmers?. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 21(6), 1055-1065. <https://doi.org/10.1080/24748668.2021.1971509>
- Barbosa, T. M., Bartolomeu, R., Morais, J. E., Costa, M. J., Vilas-Boas, J. P., Fernandes, R. J., & Barbosa, T. M. (2019). Skillful Swimming in Age-Groups Is Determined by Anthropometrics, Biomechanics and Energetics: Improving Swimmer Evaluation. *Frontiers in Physiology*, 10(2), 117-123. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00073>

- Barbosa, T. M., Marinho, D. A., Costa, M. J., & Silva, A. J. (2011). Biomechanics of Competitive Swimming Strokes. *Biomechanics in Applications*. <https://doi.org/10.5772/19553>
- Barbosa, T., Morouço, P. G., Jesus, S., Feitosa, W., Costa, M., Marinho, D., Silva, A., & Garrido, N. (2013). The Interaction Between Intra-Cyclic Variation of the Velocity and Mean Swimming Velocity in Young Competitive Swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 34(02), 123-130. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1312582>
- Bátorová, M., Šťastný, J., Elfmark, M., & Janura, M. (2021). Verification of reliability of measurement systems for swimming analysis. *Journal of Human Sport and Exercise - 2021 - Autumn Conferences of Sports Science*, -. <https://doi.org/10.14198/jhse.2021.16.Proc2.52>
- Bachlin, M., Forster, K., Schumm, J., Breu, D., Germann, J., & Troster, G. (2008). An automatic parameter extraction method for the 7×50m Stroke Efficiency Test. In *2008 Third International Conference on Pervasive Computing and Applications* (pp. 442-447). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPCA.2008.4783628>
- Bächlin, M., Förster, K., Tröster, G., & Fantozzi, S. (2009a). SwimMaster: a systematic review. *Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing*, 33(7), 215-224. <https://doi.org/10.1145/1620545.1620578>
- Beanland, M., & Tröster, G. (2012). Swimming performance and technique evaluation with wearable acceleration sensors. *Pervasive and Mobile Computing*, 8(1), 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2011.05.003>
- Beanland, E., Main, L. C., Aisbett, B., Gastin, P., & Netto, K. (2014). Validation of GPS and accelerometer technology in swimming. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 17(2), 234-238. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.04.007>
- Benson, R., & Connolly, D. (2012). *Trénink podle srdeční frekvence: jak zvýšit kondici, vytrvalost, laktátový práh, výkon*. Grada.
- Bernacikova, M., Kapounová, K., & Novotný, J. (2010). *Fyziologie sportovních disciplín: Plavání*. Masarykova Univerzita. <https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/fsps/ps10/fyziol/web/sport/plavani.html>
- Bělková, T. (1998). *Plavání*. Svoboda.
- Bixler, B., & Riewald, S. (2002). Analysis of a swimmer's hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics. *Journal of Biomechanics*, 35(5), 713-717. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(01\)00246-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(01)00246-9)
- Bompa, T. O., & Buzzichelli, C. A. (2018). *Periodization: Theory and Methodology of Training*. 6th ed. Stanningley: Human Kinetics.

- Bottom, M., (2012), Trends and Techniques in Freestyle. *The Swimming Coaching Bible Volume II*. 148-157.
- Brooks, M. (2011). *Developing Swimmers*. Human Kinetics.
- Butterfield, J., Tallent, J., Patterson, S. D., Jeffries, O., Howe, L., & Waldron, M. (2021). The validity of a head-worn inertial sensor for measurements of swimming performance. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*, (114), 3-8. <https://doi.org/10.1051/sm/2019027>
- Callaway, A. J., Cobb, J. E., & Jones, I. (2009). A Comparison of Video and Accelerometer Based Approaches Applied to Performance Monitoring in Swimming, *4*(1), 139-153. <https://doi.org/10.1260/1747-9541.4.1.139>
- Callaway, A. J. (2015). Measuring kinematic variables in front crawl swimming using accelerometers: a validation study. *Sensors*, 15(5), 11363-11386. <https://doi.org/10.3390/s150511363>
- Camomilla, V., Dumas, R., & Cappozzo, A. (2017). Human movement analysis: The soft tissue artefact issue. *Journal of Biomechanics*, 62, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.09.001>
- Castro, F., Minghelli, F., Floss, J., & Guimaraes, A. (2003). Body Roll Angles in Front Crawl Swimming at Different Velocities. In Chatard, J.-C. (Ed.). *Biomechanics and Medicine in Swimming IX*, (s111-114). University of Saint-Etienne.
- Clément, J., Charbonneau, M., & Thompson, M. (2021). Instantaneous velocity estimation for the four swimming strokes using a 3-axis accelerometer: Validation on paralympic athletes. *Journal of Biomechanics*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110261>
- Colwin, C. M. (1999). *Swimming Dynamics (Winning, Techniques and strategies)*. Mosters press.
- Colwin, C. M. (2002). *Breakthrough Swimming*. Human Kinetics.
- Costa, J., Silva, C., Santos, M., Fernandes, T., & Faria, S. (2021). Framework for Intelligent Swimming Analytics with Wearable Sensors for Stroke Classification. *Sensors*, 21(15). <https://doi.org/10.3390/s21155162>
- Costill, D., Kowaleski, J., Porter, D., Kirwan, J., Fielding, R., & King, D. (1985). Energy Expenditure During Front Crawl Swimming: Predicting Success in Middle-Distance Events. *International Journal of Sports Medicine*, 06(05), 266-270. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025849>
- Cortesi, M., Giovanardi, A., Gatta, G., Mangia, A. L., Bartolomei, S., & Fantozzi, S. (2019). Inertial Sensors in Swimming: Detection of Stroke Phases through 3D Wrist Trajectory. *Journal of sports science & medicine*, 18(3), 438–447.
- Counsilman, J. E. (1974). *Závodní plavání* (1. vyd.). Olympia.

- Counsilman, J.E., & Wilke, K. (1980). Handbuch des Sportschwimmens für Trainer, Lehrer und Athleten: zur schwimmsportlichen Trainings- u. Bewegungslehre. *Schwimmsport-Verlag Fahnenmann*, 177-192.
- Counsilman, J., & Cousilman, B. (1994). *The new science of swimming*. (1. vyd.). Prentice-Hall.
- Couto, J. G. M. do, Franken, M., & Castro, F. A. de S. (2015). Influência de diferentes padrões respiratórios na cinemática do nado crawl. *Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano*, 17(1), 82-90. <https://doi.org/10.5007/1980-0037.2015v17n1p82>
- Čechovská, I. (2001). Plavecký výkon. *Aquasport a triatlon*, 4(1), 31.
- Čechovská, I., & Miler, T. (2019). *Didaktika plavání: vybrané kapitoly*. Karolinum.
- Čechovská, I., & Miler, T. (2008). *Plavání* (2. vyd.). Grada.
- Dadashi, F., Crettenand, F., Millet, G. P., & Aminian, K. (2012). Front-Crawl Instantaneous Velocity Estimation Using a Wearable Inertial Measurement Unit. *Sensors*, 12(10), 12927-12939. <https://doi.org/10.3390/s121012927>
- Dadashi, F., Millet, G. P., & Aminian, K. (2013a). Inertial measurement unit and biomechanical analysis of swimming: an update. *Sport & Exercise Medicine Switzerland*, 61(3), 28-33. https://sems-journal.ch/wp-content/uploads/2020/02/SPOMED_3_2013_Artikel4.pdf
- Dadashi, F., Crettenand, F., Millet, G. P., Seifert, L., Komar, J., & Aminian, K. (2013b). Automatic front-crawl temporal phase detection using adaptive filtering of inertial signals. *Journal of Sports Sciences*, 31(11), 1251-1260. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.778420>
- Dadashi, F., Millet, G. P., & Aminian, K. (2015). A Bayesian approach for pervasive estimation of breaststroke velocity using a wearable IMU. *Pervasive and Mobile Computing*, 19, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.03.001>
- Daukantas, S., Marozas, V., & Lukosevicius, A. (2008). Inertial sensor for objective evaluation of swimmer performance. *2008 11th International Biennial Baltic Electronics Conference*, 321-324. <https://doi.org/10.1109/BEC.2008.4657545>
- Davey, N., Anderson, M., & James, D. A. (2008). Validation trial of an accelerometer-based sensor platform for swimming. *Sports Technology*, 1(4-5), 202-207. <https://doi.org/10.1002/jst.59>
- Demarie, S., Chirico, E., Gianfelici, A., & Vannozzi, G. (2019). Anaerobic capacity assessment in elite swimmers through inertial sensors. *Physiological Measurement*, 40(6). <https://doi.org/10.1088/1361-6579/ab205d>
- Denadai, B. S., Greco, C. C., Teixeira, M., Seifert, L., Vilas-Boas, J. P., Fernandes, R. J., & Barbosa, T. M. (2000). Blood lactate response and critical speed in swimmers aged 10–12 years of different standards: Improving Swimmer Evaluation. *Journal of Sports Sciences*, 18(10), 779-784. <https://doi.org/10.1080/026404100419838>

- Deschodt, V. J., Arsac, L. M., Rouard, A. H., Homoto, K., Nakazono, Y., Takagi, H., Homma, M., & Takagi, H. (1999). Relative contribution of arms and legs in humans to propulsion in 25-m sprint front-crawl swimming: Swimming 'Chariots of Fire'. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 80(3), 192-199. <https://doi.org/10.1007/s004210050581>
- Dohnal, L. (2012). *Desatero pro porovnání výsledků dvou metod*. <https://www.yumpu.com/xx/document/read/4549096/desatero-pro-porovnavani-vysledku-dvou-metod>
- Engel, A., Schaffert, N., Ploigt, R., & Mattes, K. (2022). Intra-cyclic analysis of the front crawl swimming technique with an inertial measurement unit. *Journal of Human Sport and Exercise*, 17(3). <https://doi.org/10.14198/jhse.2022.173.17>
- Evans, M. (2012). *The Principles of Freestyle Swimming Technique*. Active. Získáno 21.ledna 2022, z <https://www.active.com/triathlon/articles/the-principles-of-freestyle-swimming-technique-883275?page=3>
- Feitosa, W. G., Costa, M. J., Morais, J. E., Garrido, N. D., Silva, A. J., Lima, A. B., & Barbosa, T. M. (2013a). A mechanical speedo-meter to assess swimmer's horizontal intra-cyclic velocity: validation at front-crawl and backstroke. In *XXIV Congress of the international society of biomechanics* (s. 1-2). ISB.
- Feitosa, W. G., Costa, M. J., Morais, J. E., Garrido, N. D., Silva, A. J., Lima, A. B., & Barbosa, T. M. (2013b). A mechanical speedo-meter to assess swimmer's horizontal intra-cyclic velocity: validation for breaststroke and butterfly stroke. In T. Y. Shiang, W. H. Ho, P. C. Huang, & C. L. Tsai. (Eds.). *Taipei International Society of Biomechanics in Sports 2013* (s. 1-4). ISBS - Conference Proceedings Archive
- Félix, E. R., da Silva, H. P., Olstad, B. H., Cabri, J., & Correia, P. L. (2019). SwimBIT: A Novel Approach to Stroke Analysis During Swim Training Based on Attitude and Heading Reference System (AHRS). *Sports*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/sports7110238>
- Figueiredo, P., Rouard, A., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2013). Upper- and lower-limb muscular fatigue during the 200-m front crawl. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 38(7), 716-724. <https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0263>
- Fulton, S. K., Pyne, D. B., & Burkett, B. (2009). Validity and reliability of kick count and rate in freestyle using inertial sensor technology. *Journal of Sports Sciences*, 27(10), 1051-1058. <https://doi.org/10.1080/02640410902998247>
- Garrido, N., Marinho, D. A., Reis, V. M., van den Tillaar, R., Costa, A. M., Silva, A. J., et al. (2010b). Does combined dry land strength and aerobic training inhibit performance of young

- competitive swimmers? *Journal of sports science & medicine*. 9, 300–310.
<https://www.jssm.org/jssm-09-300.xml%3EFulltext>
- Gatta, G., Cortesi, M., & Di Michele, R. (2012). Power production of the lower limbs in flutter-kick swimming. *Sports Biomechanics*, 11(4), 480-491.
<https://doi.org/10.1080/14763141.2012.670663>
- Giehrl, J., & Hahn, M. (2005). *Plavání*. Kopp nakladatelství.
- Gonjo, T., & Olstad, B. H. (2021). Race Analysis in Competitive Swimming: A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(1).
<https://doi.org/10.3390/ijerph18010069>
- Gourgoulis, V., Boli, A., Aggeloussis, N., Toubekis, A., Antoniou, P., Kasimatis, P., Vezos, N., Michalopoulou, M., Kambas, A., & Mavromatis, G. (2013). The effect of leg kick on sprint front crawl swimming. *Journal of Sports Sciences*, 32(3), 278-289.
<https://doi.org/10.1080/02640414.2013.823224>
- Guignard, B., Rouard, A., Chollet, D., & Seifert, L. (2017). Behavioral Dynamics in Swimming: The Appropriate Use of Inertial Measurement Units. *Frontiers in Psychology*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00383>
- Hagem, R. M., Thiel, D. V., O'Keefe, S. G., Dahm, N., Stamm, A., & Fickenscher, T. (2012). Smart optical wireless sensor for real time swimmers feedback. *2012 IEEE Sensors*, 1-4.
<https://doi.org/10.1109/ICSENS.2012.6411208>
- Hagem, R. M., Sabti, H. A., & Thiel, D. V. (2015). Coach-Swimmer Communications Based on Wrist Mounted 2.4GHz Accelerometer Sensor. *Procedia Engineering*, 112, 512-516.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.234>
- Hall, G. (2020a). *Three Styles Of Freestyle – Hip Driven Freestyle Technique*. SwimSwam. Získáno 3. dubna 2022, z <https://swimswam.com/three-styles-of-freestyle-hip-driven-freestyle-technique/>
- Hall, G. (2020b). *Freestyle Pulling Cycle: The Propulsion Phase*. SwimSwam. Získáno 22. října 2022, z <https://swimswam.com/six-phases-of-the-freestyle-pulling-cyclethe-propulsion-phase/>
- Hall, G. (2020c). *Hybrid Freestyle Technique: Who Should Use It And When?*. SwimSwam. Získáno 22. srpna 2022, z <https://swimswam.com/hybrid-freestyle-technique-who-should-use-it-and-when/>
- Hall, G. (2020d). *Shoulder Driven Freestyle Technique*. SwimSwam. Získáno 22. srpna 2022, z https://theraceclub.com/aqua_note/shoulder-driven-freestyle-technique/
- Hamidi Rad, M., Gremeaux, V., Dadashi, F., & Aminian, K. (2021a). A Novel Macro-Micro Approach for Swimming Analysis in Main Swimming Techniques Using IMU Sensors.

- Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.597738>
- Hamidi Rad, M., Aminian, K., Gremeaux, V., Massé, F., & Dadashi, F. (2021b). Swimming Phase-Based Performance Evaluation Using a Single IMU in Main Swimming Techniques. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.793302>
- Hamidi Rad, M., Gremeaux, V., Massé, F., Dadashi, F., & Aminian, K. (2022). Monitoring weekly progress of front crawl swimmers using IMU-based performance evaluation goal metrics. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.910798>
- Hannula, D., & Thornton, N. (2012). *The swim coaching bible II*. Human Kinetics.
- Hendl, J. (2004). *Přehled statistických metod zpracování dat*. Portál.
- Hendl, J. (2012). *Kvalitativní výzkum: základní teorie, metody a aplikace* (3. vyd). Portál.
- Hermosilla, F., Corral-Gómez, L., González-Ravé, J. M., Juárez Santos-García, D., Rodríguez-Rosa, D., Juárez-Pérez, S., & Castillo-García, F. J. (2020). SwimOne. New Device for Determining Instantaneous Power and Propulsive Forces in Swimming. *Sensors*, 20(24).
<https://doi.org/10.3390/s20247169>
- Hofer, Z., Felgrová, I., Jasan, L., & Smolík, P. (2016) *Technika plaveckých způsobů* (4. vyd.). Karolinum.
- Hofer, Z., & Felgrová, I. (2011). *Technika plaveckých způsobů* (3. vyd.). Karolinum.
- Hochstein, S., Meyer, A., & Blickhan, R. (2018). Effect of kick frequency variation on swimming speed and kinematics in human underwater undulatory swimming. *XIII th International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming Proceedings*, 71-78.
- Huang, Z., Kurobe, K., Nishiwaki, M., Ozawa, G., Tanaka, T., Taguchi, N. & Ogita, E. (2010). Relationship between Propelling Efficiency and Swimming Performance in Elite Swimmers. *Biomechanics and Medicine in Swimming*, 11, 201-203.
- Chakravorti, N., Le Sage, T., Slawson, S. E., Conway, P. P., & West, A. A. (2013). Design and Implementation of an Integrated Performance Monitoring Tool for Swimming to Extract Stroke Information at Real Time. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 43(2), 199-213. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2012.2235428>
- Chollet, D., Chaliés, S., & Chatard, J. C. (2000). A new index of coordination for the crawl: description and usefulness. *International journal of sports medicine*, 21(01), 54-59.
<https://doi.org/10.1055/s2000-8855>

- Ikuta, Y., Matsuda, Y., Yamada, Y., Kida, N., Oda, S., & Moritani, T. (2012). Relationship between decreased swimming velocity and muscle activity during 200-m front crawl. *European Journal of Applied Physiology*, *112*(9), 3417-3429. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2321-0>
- Innes, E., & Straker, L. (1999). Reliability of work-related assessments. *Work (Reading, Mass.)*, *13*(2), 107–124.
- James, D. A., Davey, N., & Rice, T. (2004). An accelerometer based sensor platform for insitu elite athlete performance analysis. *Proceedings of IEEE Sensors, 2004*, 1373-1376. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2004.1426439>
- James, D. A., Leadbetter, R. I., Neeli, M. R., Burkett, B. J., Thiel, D. V., & Lee, J. B. (2012). An integrated swimming monitoring system for the biomechanical analysis of swimming strokes. *Sports Technology*, *4*(3-4), 141-150. <https://doi.org/10.1080/19346182.2012.725410>
- Jeng, C. -C. (2021). Hierarchical Linear Model Approach to Explore Interaction Effects of Swimmers' Characteristics and Breathing Patterns on Swimming Performance in Butterfly Stroke with Self-Developed Inertial Measurement Unit. *Journal of Computers (Taiwan)*, *32*(3), 99-118. <https://doi.org/10.3966/199115992021063203008>
- Jurák, D. (2018). *Transfer silových předpokladů do provedení záběrových pohybů plaveckého způsobu kraul* [Disertační práce]. Univerzita Karlova.
- Keller, C. (2021). *Front Crawl/Freestyle Swimming Technique: Arm Movement*. Enjoy Swimming. Získáno 18. října 2022, z <https://www.enjoy-swimming.com/how-to-swim-freestyle.html>
- Koga, D., Gonjo, T., Kawai, E., Tsunokawa, T., Sakai, S., Sengoku, Y., Homma, M., & Takagi, H. (2022 a). Effects of exceeding stroke frequency of maximal effort on hand kinematics and hand propulsive force in front crawl. *Sports Biomechanics*, *4*(2), 1-13. <https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1814852>
- Koga, D., Tsunokawa, T., Sengoku, Y., Homoto, K., Nakazono, Y., & Takagi, H. (2022 b). Relationship Between Hand Kinematics, Hand Hydrodynamic Pressure Distribution and Hand Propulsive Force in Sprint Front Crawl Swimming. *Frontiers in Sports and Active Living*, *4*(2), 102-117. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.786459>
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, *15*(2), 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Kopřiva, J. (2011). *Sport, matematika, počítač*. Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií.

- Kudo, S., Sakurai, Y., Miwa, T., & Matsuda, Y. (2017). Relationship between shoulder roll and hand propulsion in the front crawl stroke. *Journal of Sports Sciences*, 35(10), 945-952. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1206208>
- Kumpán, P. (2016). *Jednotka pro analýzu pohybu závodních plavců* [Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky]. <http://hdl.handle.net/11012/60892>
- Lanotte, N., Annino, G., Bifaretti, S., Gatta, G., Romagnoli, C., Salvucci, A., & Bonaiuto, V. (2018). A New Device for Propulsion Analysis in Swimming. *The 12th Conference of the International Sports Engineering Association*, 285-290. <https://doi.org/10.3390/proceedings2060285>
- Laughlin, T. (2013). *Plavání: Total Immersion*. Mladá fronta.
- Le Sage, T., Bindel, A., Conway, P., Justham, L., Slawson, S., West, A., & Fernandes, R. J. (2010). Development of a real time system for monitoring of swimming performance: Introducing a Symmetry Score. *Procedia Engineering*, 2(2), 2707-2712. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.04.055>
- Le Sage, T., Bindel, A., Conway, P. P., Justham, L. M., Slawson, S. E., & West, A. A. (2011). Embedded programming and real-time signal processing of swimming strokes. *Sports Engineering*, 14(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12283-011-0070-7>
- Le Sage, T., Bindel, A., Conway, P., Justham, L., Slawson, S., Webster, J., & West, A. (2012). A Multi-sensor System for Monitoring the Performance of Elite Swimmers. *E-Business and Telecommunications*, 350-362. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25206-8_23
- Lee, R., James, C., Edwards, S., Skinner, G., Young, J. L., & Snodgrass, S. J. (2021). Evidence for the Effectiveness of Feedback from Wearable Inertial Sensors during Work-Related Activities: A Scoping Review. *Sensors*, 21(19). <https://doi.org/10.3390/s21196377>
- Lerda, R., & Cardelli, C. (2003). Breathing and Propelling in Crawl as a Function of Skill and Swim Velocity. *International Journal of Sports Medicine*, 24(1), 75-80. <https://doi.org/10.1055/s-2003-37195>
- Letzler, H., & Freitag, W. (1983). Stroke length and stroke frequency variations in men's and woman's 100m Freestyle swimming. In Hollander, A.P., Huijing, P.A. & de Grot, G. (Eds.). *Biomechanic and Medicine in Swimming* (s. 315-322). Human Kinetics.
- Liljequist, D., Elfving, B., Skavberg Roaldsen, K., & Chiacchio, F. (2019). Intraclass correlation – A discussion and demonstration of basic features. *PLOS ONE*, 14(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219854>

- Lukášek, M. (2001). Rychlost a účinnost, dvě protichůdné charakteristiky plaveckého cyklu? In *Nové poznatky v kinantrpologickém výzkumu*. (s. 91). Masarykova univerzita.
- Lukášek, M., & Keberlová, M. (2011). *Zdravotní aspekt plavání - bezpečnost - záchrana tonoucího*. Masarykova univerzita.
- Madsen, Ö., Reischle, K. & Rudolph, K. (2014). *Wege zum Topschwimmer*, (1-3. vyd.). Verlag Hofmann
- Magalhaes, F. A. de, Vannozzi, G., Gatta, G., & Fantozzi, S. (2014). Wearable inertial sensors in swimming motion analysis: a systematic review. *Journal of Sports Sciences*, 33(7), 732-745. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.962574>
- Maglischo, E. W. (1993). *Swimming Even Faster*. Mayfield Publishing Co.
- Maglischo, E. W. (2003). *Swimming Faster*. Human Kinetics.
- Maglischo, E. W. (2016). *A Primer for Swimming Coaches Volume 2: Biomechanical Foundations*. Nova Science Publishers.
- Marinho, D. A., Neiva, H. P., & Morais, J. E. (2019). The Use of Wearable Sensors in Human Movement Analysis in Non-Swimming Aquatic Activities: A Systematic Review. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/ijerph16245067>
- Marinho, D. A., Barbosa, T. M., Lopes, V. P., Forte, P., Toubekis, A. G., & Morais, J. E. (2020). The Influence of the Coaches' Demographics on Young Swimmers' Performance and Technical Determinants. *Frontiers in Psychology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01968>
- McCabe, C. B., Psycharakis, S., & Sanders, R. (2011). Kinematic differences between front crawl sprint and distance swimmers at sprint pace. *Journal of Sports Sciences*, 29(2), 115-123. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.523090>
- McCabe, C. B., & Sanders, R. H. (2012). Kinematic differences between front crawl sprint and distance swimmers at a distance pace. *Journal of Sports Sciences*, 30(6), 601-608. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.660186>
- McCabe, C. B., Sanders, R. H., & Psycharakis, S. G. (2015). Upper limb kinematic differences between breathing and non-breathing conditions in front crawl sprint swimming. *Journal of Biomechanics*, 48(15), 3995-4001. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.09.012>
- McVicar, J. W. (1936). A Brief History of the Development of Swimming. *Research Quarterly. American Physical Education Association*, 7(1), 56-67. <https://doi.org/10.1080/23267402.1936.10761757>
- Měkota, K., & Blahuš, P. (1983). *Motorické testy v tělesné výchově*. Státní pedagogické nakladatelství.

- Millet, G., Chollet, D., Chalies, S., & Chatard, J. C. (2002). Comparison of coordination in front crawl between elite swimmers and triathletes. *International Journal of Sports Medicine*, 23, 99–104.
- Mooney, R., Corley, G., Godfrey, A., Osborough, C., Quinlan, L. R., & ÓLaighin, G. (2015). Application of Video-Based Methods for Competitive Swimming Analysis: A Systematic Review. *Sports and Exercise Medicine - Open Journal*, 1(5), 133-150. <https://doi.org/10.17140/SEMOJ-1-121>
- Mooney, R., Corley, G., Godfrey, A., Quinlan, L., ÓLaighin, G., West, A., & Fernandes, R. J. (2016). Inertial Sensor Technology for Elite Swimming Performance Analysis: A Systematic Review. *Sensors*, 16(1), 2707-2712. <https://doi.org/10.3390/s16010018>
- Mooney, R., Quinlan, L. R., Corley, G., Godfrey, A., Osborough, C., ÓLaighin, G., & Barbosa, T. M. (2017). Evaluation of the Finis Swimsense® and the Garmin Swim™ activity monitors for swimming performance and stroke kinematics analysis. *PLOS ONE*, 12(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170902>
- Morais, J. E., Jesus, S., Lopes, V., Garrido, N., Silva, A., Marinho, D., & Barbosa, T. M. (2012). Linking Selected Kinematic, Anthropometric and Hydrodynamic Variables to Young Swimmer Performance: Improving Swimmer Evaluation. *Pediatric Exercise Science*, 24(4), 649-664. <https://doi.org/10.1123/pes.24.4.649>
- Morais, J. E., Saavedra, J. M., Costa, M. J., Silva, A. J., Marinho, D. A., & Barbosa, T. M. (2013). Tracking young talented swimmers: follow-up of performance and its biomechanical determinant factors. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 15(3), 129-139. <https://doi.org/10.5277/abb130316>
- Morais, J. E., Marinho, D. A., Arellano, R., & Barbosa, T. M. (2017). Start and turn performances of elite sprinters at the 2016 European Championships in swimming. *Sports Biomechanics*, 18(1), 100-114. <https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1435713>
- Morais, J. E., Forte, P., Nevill, A. M., Barbosa, T. M., Marinho, D. A., Toussaint, H. M., & Fernandes, R. J. (2020). Upper-limb kinematics and kinetics imbalances in the determinants of front-crawl swimming at maximal speed in young international level swimmers: Introducing a Symmetry Score. *Scientific Reports*, 10(1), 38-43. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68581-3>
- Morais, J. E., Barbosa, T. M., Forte, P., Silva, A. J., Marinho, D. A., Chamari, K., & Fernandes, R. J. (2021). Young Swimmers' Anthropometrics, Biomechanics, Energetics, and Efficiency as Underlying Performance Factors: A Systematic Narrative Review. *Frontiers in Physiology*, 12(2), 311-315. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.691919>

- Morais, J. E., Barbosa, T. M., Nevill, A. M., Cobley, S., & Marinho, D. A. (2022a). Understanding the Role of Propulsion in the Prediction of Front-Crawl Swimming Velocity and in the Relationship Between Stroke Frequency and Stroke Length. *Frontiers in Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.876838>
- Morais, J. E., Oliveira, J. P., Sampaio, T., & Barbosa, T. M. (2022b). Wearables in Swimming for Real-Time Feedback: A Systematic Review. *Sensors*, 22(10). <https://doi.org/10.3390/s22103677>
- Morais, J. E., Barbosa, T. M., Bragada, J. A., Nevill, A. M., & Marinho, D. A. (2023). Race Analysis and Determination of Stroke Frequency – Stroke Length Combinations during the 50-M Freestyle Event. *Journal of Sports Science and Medicine*, 156-165. <https://doi.org/10.52082/jssm.2023.156>
- Morouço, P., Lima, A., Semblano, P., Fernandes, D., Gonçalves, P., Sousa, F., Fernandes, R., Barbosa, T., Correia, M. V., & Vilas-Boas, J. P. (2006). Validation of cable speedometer for butterfly evaluation. In J. P. Vilas-Boas, F. Alves, & A. Marques (Eds.), *Biomechanics and Medicine in Swimming X* (s. 236-239). Revista Portuguesa de Ciências do Desporto.
- Morouço, P., Pinto, J., Félix, E., Correia, P. L., & da Silva, H. P. (2020). Development of a Low-Cost IMU for Swimmers' Evaluation. In Robinson, M., Lake, M., Baltzopoulos, B., & Vanrenterghem, J. (Eds.). *ISBS Proceedings Archive: Vol. 38: Iss. 1, Article. 240*, (s. 1-4). The International Society of Biomechanics in Sports – ISBS <https://commons.nmu.edu/isbs/vol38/iss1/240>
- Motyčka, J. (1998). Kinetické a dynamické hodnocení plavecké techniky. In *Teor. a didak.problémy plávania a plaveckých športov* (s. 98-99). Univerzita Komenského.
- Motyčka, J. et al. (2001). *Teorie plaveckých sportů*. Masarykova univerzita.
- Motyčka, J., Vlk, M., Krejsa, J.; Ondroušek, V., Černý, F., & Životský, Z. (2009). Analýza výsledků měření rychlosti plavání se synchronním videozáznamem pod vodou. In *Sport a kvalita života 2009*. Brno: Masarykova Univerzita.
- Motyčka, J., Šťastný, J., Lepková, H., & Pašek, M. (2010). Dynamická a kinetická analýza techniky plavání reprezentace ČR 2009/2010, In *Optimální působení tělesné zátěže* (s. 84-90). Univerzita Hradec Králové
- Motyčka, J., Lepková, H., Šťastný, J., & Pašek, M. (2011a). A brief survey of evaluation of the results measuring the swimming techniques of the junior representation of the Czech republic. In *Book of abstracts* (s. 29-29). Brno: Masarykova univerzita.
- Motyčka, J., Lepková, H., Šťastný, J., & Pašek, M. (2011b). Některé poznámky a doporučené opravy techniky plavání, In *Optimální působení tělesné zátěže* (s. 62-66). Univerzita Hradec Králové

- Motyčka, J., Lepková, H., Šťastný, J., & Pašek, M. (2011c). Porovnání výsledků měřené techniky plavání juniorské a seniorské reprezentace. In Pokorná, J., & Peslová, E. (Eds.). *Plavecká lokomoce a zatěžování ve vodě* (s. 57-61). Univerzita Karlova
- Motyčka, J., Šťastný, J., Lepková, H., Bátorová, M., & Pašek, M. (2013). Kinematic and dynamic analyses of swimming. In Zvonař, M., & Sajdlová, Z. (Eds.). *Sport and Quality of Life 2013* (s. 14-24). Masarykova univerzita.
- Motyčka, J., Šťastný, J., Lepková, H., Pašek, M., & Bátorová, M. (2014) Komparace výsledků měření a vyhodnocování rychlosti plavání seniorské a juniorské reprezentace ČR v letech 2011 a 2012. In Flemr, L., Němec, J., & Kudláčková, K. (Eds.). *Pohybové aktivity ve vědě a praxi (Konferenční sborník)*. (s. 255-263). Karolinum.
- Naemi, R., Easson, W. J., & Sanders, R. H. (2010). Hydrodynamic glide efficiency in swimming. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(4), 444-451. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.04.009>
- Nakashima, M., Maeda, S., Miwa, T., & Ichikawa, H. (2012). Optimizing Simulation of the Arm Stroke in Crawl Swimming Considering Muscle Strength Characteristics of Athlete Swimmers. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 7(2), 102-117. <https://doi.org/10.1299/jbse.7.102>
- Narita, K., Nakashima, M., & Takagi, H. (2018). Effect of leg kick on active drag in front-crawl swimming: Comparison of whole stroke and arms-only stroke during front-crawl and the streamlined position. *Journal of Biomechanics*, 76, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.05.027>
- Neuls, F., & Viktorjenik, D. (2017). *Technická příprava v plavání: cvičení pro rozvoj a zdokonalení techniky plaveckých způsobů*. Český svaz plaveckých sportů.
- Nevill, A. M., Negra, Y., Myers, T. D., Sammoud, S., Chaabene, H., & Cobley, S. (2020). Key somatic variables associated with, and differences between the 4 swimming strokes: Improving Swimmer Evaluation. *Journal of Sports Sciences*, 38(7), 787-794. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1734311>
- Nicol, E., Ball, K., & Tor, E. (2018). The characteristic of an elite swimming turn. In Wilson, B., Hume, P., Alderson, J., Kwon, Y. & Smith, N. (Eds.). *ISBS Proceedings Archive: Vol. 36: Iss. 1, Article 210*. The International Society of Biomechanics in Sports – ISBS <https://commons.nmu.edu/isbs/vol36/iss1/210>
- Nigg, B. (1983). Selected methodology in biomechanics with respect to swimming. *Biomechanics and medicine in swimming*, 72-80.
- Official FINA Webside (2023, 10. ledna). *Swimming rules*. FINA. <https://www.fina.org/swimming/rules>

- Official FINA Webside (2022, 24. října). *Swimming world records*. FINA. <https://www.fina.org/swimming/records?recordCode=WR&eventTypeld=ion=&countryId=&gender=M&pool=LCM>
- Ohgi, Y., Anderson, M., & James, D. A. (2002a). Microcomputer-based acceleration sensor device for sports biomechanics -stroke evaluation by using swimmer's wrist acceleration. *Proceedings of IEEE Sensors*, 1(4-5), 699-704. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2002.1037188>
- Ohgi, Y., Ichikawa, H., & Miyaji, C. (2002b). Microcomputer-based Acceleration Sensor Device for Swimming Stroke Monitoring. *JSME International Journal Series C*, 45(4), 960-966. <https://doi.org/10.1299/jsmec.45.960>
- Ohgi, Y., Kaneda, K., & Takakura, A. (2014). Sensor Data Mining on the Kinematical Characteristics of the Competitive Swimming. *Procedia Engineering*, 72, 829-834. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.036>
- Osborough, C. D., Payton, C. J., & Daly, D. J. (2010). Influence of swimming speed on inter-arm coordination in competitive unilateral arm amputee front crawl swimmers. *Human Movement Science*, 29(6), 921-931. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.009>
- Pai, Y. C., Hay, J. G., & Wilson, B. D. (1984). Stroking techniques of elite swimmers. *Journal Sports Science*, 2, 225-239.
- Pansiot, J., Lo, B., & Yang, G. -Z. (2010). Swimming Stroke Kinematic Analysis with BSN. *2010 International Conference on Body Sensor Networks*, 153-158. <https://doi.org/10.1109/BSN.2010.11>
- Payton, C. J., & Sanders, R. H. (2011). Bodyroll in Front Crawl Swimming. In Seifert, L., Chollet, D., & Mujika, I. (Eds.). *World Book of Swimming: From Science to Performance* (s. 173-189). Nova Science Publisher.
- Pedersen, T., & Kjendlie, P. L. (2006). The effect of breathing action on velocity in front crawl swimming, *Biomechanics and Medicine in Swimming*, 10(6), 75-77.
- Pelayo, P., & Alberty, M. (2011). The history of swimming research. In Seifert, L., Chollet, D. & Mujika I. (Eds.). *World Book of Swimming: From Science to Performance* (s. 19-26). Nova Science Publishers.
- Pendergast, D. R., Capelli, C., Craig, A. B., Di Prampero, P. E., Minetti, A. E., Mollendorf, J., Termin, I.I. & Zamparo, P. (2006). Biophysics in swimming. *Portuguese Journal of Sport Sciences*, 6, 185-189
- Pérez-Tejero, J., Veiga, S., Almena, A., Navandar, A., & Navarro, E. (2017). Effect of functional classification on the swimming race segments during the 2012 London Paralympic Games. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 17(4), 406-417. <https://doi.org/10.1080/24748668.2017.1348059>

- Phillips, E., Davids, K., Renshaw, I., Portus, M., Marinho, D. A., Fernandes, R. J., & Barbosa, T. M. (2010). Expert Performance in Sport and the Dynamics of Talent Development: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 40(4), 271-283. <https://doi.org/10.2165/11319430-000000000-00000>
- Pokorná, J., & Čechovská, I. (2009). Struktura sportovních výkonů založených na plavecké lokomoci. In Čechovská I. & Tůma M. (Eds.). *Pohybové aktivity v biosociálním kontextu* (s. 203-210). Karolinum.
- Pokorná, J. (2010). *Zjišťování plaveckého kroku a jeho využití v trenérské praxi*. Katedra plaveckých sportů, UK FTVS PRAHA. https://ftvs.cuni.cz/FTVS-1318-version1-5_zjistovani_plaveckeho_kroku_a_jeho_vyuziti_v_trenerske_praxi.pdf
- Prins, J. H., Murata, N. M & Allen, J. S., III. (2010). Preliminary results of a “Multi-2D” Kinematic Analysis of “Straight-Arm vs. Bent Arm” Freestyle Swimming using High-speed Videography. In Kjendli, P. L., Stallman R. K. & Cabri, J. (Eds.), *Biomechanics and Medicine in Swimming XI* (s. 154-155). Norwegian School of Sports Science Press
- Procházka, K., & Macejková, Y. (2003). Štruktura športového výkonu v šprintérských disciplínách. In Čechovská, I. (Ed.). *Problematika plavání a plaveckých sportů III* (s. 88-92). UK FTVS.
- Puce, L., Marinelli, L., Pierantozzi, E., Mori, L., Pallecchi, I., Bonifazi, M., Bove, M., Franchini, E., & Trompetto, C. (2018). Training methods and analysis of races of a top level Paralympic swimming athlete. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 14(4), 612-620. <https://doi.org/10.12965/jer.1836254.127>
- Puce, L., Pallecchi, I., Marinelli, L., Mori, L., Bove, M., Diotti, D., Ruggeri, P., Faelli, E., Cotellessa, F., & Trompetto, C. (2021). Surface Electromyography Spectral Parameters for the Study of Muscle Fatigue in Swimming: A Novel Stroke-by-Stroke Approach Using Wearable Inertial Sensors. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3(4). <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.644765>
- Puel, F., Seifert, L., & Hellard, P. (2014). Validation of an inertial measurement unit for the determination of the longitudinal speed of a swimmer. In Mason, B. (Ed.). *Biomechanics and Medicine in Swimming XII*. (s. 484-489). Canberra Australian Institute of Sport 2014.
- Reichl, J., & Všetíčka, M. (2022, 22. října). *Rychlost hmotného bodu*. Encyklopedie fyziky. <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/6-rychlost-hmotneho-bodu>
- Ribeiro, J., Figueiredo, P., Morais, S., Alves, F., Toussaint, H., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2016). Biomechanics, energetics and coordination during extreme swimming intensity: effect of performance level. *Journal of Sports Sciences*, 1-8. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1227079>
- Riewald, S., & Rodeo, S. (2015). *Science of swimming faster*. Human Kinetics.

- Rowlands, D. D., James, D. A., & Lee, J. B. (2014). Visualization of wearable sensor data during swimming for performance analysis. *Sports Technology*, 6(3), 130-136. <https://doi.org/10.1080/19346182.2013.867965>
- Samson, M., Monnet, T., Bernard, A., Lacouture, P., & David, L. (2015). The role of the entry-and-stretch phase at the different paces of race in front crawl swimming. *Journal of Sports Sciences*, 33(15), 1535-1543. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.1003584>
- Samson, M., Monnet, T., Bernard, A., Lacouture, P., & David, L. (2018). Comparative study between fully tethered and free swimming at different paces of swimming in front crawl. *Sports Biomechanics*, 18(6), 571-586. <https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1443492>
- Sanders, R. H., & Psycharakis, S. G. (2009). Rolling rhythms in front crawl swimming with six-beat kick. *Journal of Biomechanics*, 42(3), 273-279.
- Sanders, R. H. & McCabe, C. B. (2015). Freestyle Technique. In Riewald, S. & Rodeo, S. (Eds.) *Science of swimming faster*. (s. 23-50). Human Kinetics.
- Sanders, R. H., Takagi, H., & Vilas-Boas, J. P. (2021). How Technique Modifications in Elite 100m Swimmers Might Improve Front Crawl Performances to Podium Levels: Swimming ‘Chariots of Fire’. *Sports Biomechanics*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1998590>
- Seifert, L., Chollet, D., & Bardy, B. G. (2004). Effect of swimming velocity on arm coordination in the front crawl: a dynamic analysis. *Journal of Sports Sciences*, 22(7), 651-660. <https://doi.org/10.1080/02640410310001655787>
- Seifert, L., Chehense, A., Tourny-Chollet, C., Lemaitre, F., & Chollet, D. (2008). Effect of Breathing Pattern on Arm Coordination Symmetry in Front Crawl. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(5), 1670-1676. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318182029d>
- Seifert, L., Button, C., Davids, K., Portus, M., Marinho, D. A., Fernandes, R. J., & Barbosa, T. M. (2013). Key Properties of Expert Movement Systems in Sport: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 43(3), 167-178. <https://doi.org/10.1007/s40279-012-0011-z>
- Seifert, L., Schnitzler, C., Bideault, G., Alberty, M., Chollet, D., & Toussaint, H. M. (2015). Relationships between coordination, active drag and propelling efficiency in crawl. *Human Movement Science*, 39, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2014.10.009>
- Seifert, L., Conceição, A., Gonjo, T., Stastny, J., & Olstad, B. H. (2021). Arm – Leg coordination profiling during the dolphin kick and the arm pull-out in elite breaststrokes. *Journal of Sports Sciences*, 39(23), 2665-2673. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1950446>
- Shell, S. J., Clark, B., Broatch, J. R., Slattery, K., Halson, S. L., & Coutts, A. J. (2021). Is a Head-Worn Inertial Sensor a Valid Tool to Monitor Swimming?. *International Journal of Sports*

- Physiology and Performance*, 16(12), 1901-1904. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0887>
- Shimojo, H., Sengoku, Y., Miyoshi, T., Tsubakimoto, S., & Takagi, H. (2014). Effect of imposing changes in kick frequency on kinematics during undulatory underwater swimming at maximal effort in male swimmers. *Human Movement Science*, 38, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2014.09.001>
- Shimojo, H., Gonjo, T., Sakakibara, J., Sengoku, Y., Sanders, R., & Takagi, H. (2019). A quasi three-dimensional visualization of unsteady wake flow in human undulatory swimming. *Journal of Biomechanics*, 93, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.06.013>
- Sigmund, E., & Sigmundová, D. (2011). *Pohybová aktivita pro podporu zdraví dětí a mládeže*. Univerzita Palackého.
- Sigmund, E. (2012). *Vybrané metodologické aspekty etiky výzkumu*. Univerzita Palackého.
- Siirtola, P., Laurinen, P., Roning, J., & Kinnunen, H. (2011). Efficient accelerometer-based swimming exercise tracking. *2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM)*, 156-161. <https://doi.org/10.1109/CIDM.2011.5949430>
- Silva, A., Figueiredo, P., Soares, S., Seifert, L., Vilas-Boas, J. P., Fernandes, R. J., & Barbosa, T. M. (2012). Front Crawl Technical Characterization of 11- to 13-Year-Old Swimmers: Improving Swimmer Evaluation. *Pediatric Exercise Science*, 24(3), 409-419. <https://doi.org/10.1123/pes.24.3.409>
- Silveira, R. P., de Souza Castro, F. A., Figueiredo, P., Vilas-Boas, J. P., & Zamparo, P. (2017). The Effects of Leg Kick on Swimming Speed and Arm-Stroke Efficiency in the Front Crawl. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(6), 728-735. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0232>
- Simbaña-Escobar, D., Hellard, P., & Seifert, L. (2020). Influence of stroke rate on coordination and sprint performance in elite male and female swimmers. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 30(11), 2078-2091. <https://doi.org/10.1111/sms.13786>
- Slawson, S. E., Justham, L. M., Conway, P. P., Le-Sage, T., & West, A. A. (2012). Characterizing the swimming tumble turn using acceleration data. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 226(1), 3-15. <https://doi.org/10.1177/1754337111428395>
- APLab (2022, 24. října). *Speed RT Velocity meter*. APLab: The Hi-tech artisans. <https://www.aplab.it/en/projects/speed-rt-velocity-meter.html>
- Sport thieme (2022, 24. října). *Speedometer Swimming Measuring System*. Sport-thieme. https://www.sport-thieme.com/Swimming/Training_Equipment/Swimming_Benches/art=2236041

- Stamm, A., Thiel, D. V., Burkett, B., & James, D. A. (2011). Towards determining absolute velocity of freestyle swimming using 3-axis accelerometers. *Procedia Engineering*, *13*, 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.05.061>
- Stamm, A., James, D. A., Thiel, D. V., Alberty, M., Chollet, D., Toussaint, H. M., & Fernandes, R. J. (2013a). Velocity profiling using inertial sensors for freestyle swimming: effect of performance level. *Sports Engineering*, *16*(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12283-012-0107-6>
- Stamm, A., James, D. A., Burkett, B. B., Hagem, R. M., & Thiel, D. V. (2013b). Determining Maximum Push-off Velocity in Swimming Using Accelerometers. *Procedia Engineering*, *60*, 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.07.067>
- Stamm, A., & Thiel, D. V. (2015). Investigating Forward Velocity and Symmetry in Freestyle Swimming Using Inertial Sensors. *Procedia Engineering*, *112*, 522-527. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.236>
- Stamm, A., Shlyonsky, I., Thiel, D. V., Alberty, M., Chollet, D., Toussaint, H. M., & Fernandes, R. J. (2020). Freestyle Swimming Analysis of Symmetry and Velocities using a MEMS based IMU: Introducing a Symmetry Score. *Proceedings of the 8th International Conference on Sport Sciences Research and Technology Support*, *16*(1), 38-43. <https://doi.org/10.5220/0010134700380043>
- Staub, I., Zinner, C., Bieder, A., & Vogt, T. (2020). Within-sport specialisation and entry age as predictors of success among age group swimmers. *European Journal of Sport Science*, *20*(9), 1160-1167. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1702107>
- Stirn, I., Jarm, T., Kapus, V., & Strojnik, V. (2011). Evaluation of muscle fatigue during 100-m front crawl. *European Journal of Applied Physiology*, *111*(1), 101-113. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1624-2>
- Sweetenham, B., & Atkinson, J. (2006). *Trénink plaveckých šampionů*. Olympia.
- Swimspotec.(2022) Retrieved October 21, 2022, from http://swimspotec.de/download/swimspotec_en.pdf
- Štumbauer, J., Maleček, J., & Šimberová, D. (2013). *Odborná terminologie vybraných sportovních disciplín* (1. vyd.). MUNI Press. <https://www.fsps.muni.cz/emuni/data/reader/book-22/Impresum.html>
- Šťastný, J., & Motyčka, J. (2012). Úvod do vyhodnocení rychlosti a účinnosti plavecké kraulové techniky, In *Kondičný trénink v roku 2012* (s. 210-217). Banská Bystrica: Slovenská asociácia kondičných trenérov, Univerzita Mateje Bela, KTVŠ FHV.

- Šťastný, J., & Motyčka, J. (2013). Srovnání rychlosti a účinnosti plavání kraulové techniky vybraných plavců různých úrovní, In *Kondičný trénink v roku 2013* (s. 253-259). Banská Bystrica: Slovenská asociácia kondičných trenérov, Univerzita Mateje Bela, KTVŠ FHV.
- Šťastný, J. (2016a) *Analýza plaveckého způsobu kraul měřícím systémem Tachograf*. [Disertační práce]. Masarykova Univerzita.
- Šťastný, J. (2016b). Porovnání závodní rychlosti plaveckého způsobu kraul a rychlosti dosažené během intervalů bez vlivu startu a obrátek. *Studia sportiva*, 10(1), 110-116. <https://doi.org/10.5817/StS2016-1-11>
- Šťastný, J., Motyčka, J., Bátorová, M., & Pašek, M. (2016). Changes in speed and efficiency in the front crawl swimming technique at 100m track. *Journal Of Human Sport And Exercise*, 11(1), 168-175.
- Takagi, H., Nakashima, M., Sengoku, Y., Tsunokawa, T., Koga, D., Narita, K., Kudo, S., Sanders, R., & Gonjo, T. (2021). How do swimmers control their front crawl swimming velocity? Current knowledge and gaps from hydrodynamic perspectives. *Sports Biomechanics*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1959946>
- Tarpinian, S. (2005). *The Triathlete's Guide to Swim Training*. Boulder. VeloPress.
- Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, 2, 53-55. <https://doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd>
- Swim England* (2023, 18. února). *The history of front crawl swimming*. Swimming.org. <https://www.swimming.org/sport/history-of-front-crawl/>
- Thompson, K. (2014). *Pacing: Individual Strategies for Optimal Performance*. Human Kinetics.
- Thow, J. L., Naemi, R., & Sanders, R. H. (2012). Comparison of modes of feedback on glide performance in swimming. *Journal of Sports Sciences*, 30(1), 43-52. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.624537>
- Topalovic, M., Evers, S., Exadaktylos, V., Olbrecht, J., Berckmans, D., & Aerts, J. -M. (2014). Online Monitoring of Swimmer Training Using a 3D Accelerometer - Identifying Swimming and Swimming Style. In *Proceedings of the 2nd International Congress on Sports Sciences Research and Technology Support* (pp. 111-115). SCITEPRESS - Science and Technology Publications. <https://doi.org/10.5220/0005134501110115>
- Tropical Penguin (b.r.). *Torrent Swim Trainer*. https://www.tropicalpenguin.com/Torrent_Swim_Trainer.html
- Toubekis, A. G., Tsami, A. P., Tokmakidis, S. P., Seifert, L., Vilas-Boas, J. P., Fernandes, R. J., & Barbosa, T. M. (2006). Critical Velocity and Lactate Threshold in Young Swimmers: Improving Swimmer Evaluation. *International Journal of Sports Medicine*, 27(2), 117-123. <https://doi.org/10.1055/s-2005-837487>

- Toussaint, H. M., de Looze, M., Van Rossem, B., Leijdekkers, M., & Dignum, H. (1990). The Effect of Growth on Drag in Young Swimmers. *International Journal of Sport Biomechanics*, 6(1), 18-28. <https://doi.org/10.1123/ijsb.6.1.18>
- Toussaint, H. M., & Beek, P. J. (1992). Biomechanics of Competitive Front Crawl Swimming. *Sports Medicine*, 13(1), 8-24. <https://doi.org/10.2165/00007256-199213010-00002>
- Toussaint, H. M. (2011). Biomechanics of drag and propulsion in front crawl swimming. In L. Seifert, & D. Chollet (Eds.), *World Book of Swimming: From Science to Performance* (s. 3-20). Nova Science Publishers, Inc.
- TritonWear. (2022, 24. října). *TritonWear*. <https://www.tritonwear.com/>
- Truijens, M., & Toussaint, H. (2005). Biomechanical aspects of peak performance in human swimming. *Animal Biology*, 55(1), 17-40. <https://doi.org/10.1163/1570756053276907>
- Vannozzi, G., Donati, M., Gatta, G., & Cappozzo, A. (2010). Analysis of swim turning, underwater gliding and stroke resumption phases in top division swimmers using a wearable inertial sensor device. *Biomechanics and Medicine in Swimming*, 11, 178-180.
- Vantorre, J., Chollet, D., & Seifert, L. (2014). Biomechanical analysis of the swim-start: a review. *Journal of sports science & medicine*, 13(2), 223–231.
- Veiga, S., Cala, A., G. Frutos, P., & Navarro, E. (2014). Comparison of starts and turns of national and regional level swimmers by individualized-distance measurements. *Sports Biomechanics*, 13(3), 285-295. <https://doi.org/10.1080/14763141.2014.910265>
- Veiga, S., Roig, A., & Gómez-Ruano, M. A. (2016). Do faster swimmers spend longer underwater than slower swimmers at World Championships?. *European Journal of Sport Science*, 16(8), 919-926. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1153727>
- Veiga, S., & Roig, A. (2016). Effect of the starting and turning performances on the subsequent swimming parameters of elite swimmers. *Sports Biomechanics*, 16(1), 34-44. <https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1179782>
- Vincent, W. J. (1994). *Statistics in kinesiology*. Human Kinetics Publishers.
- Wright, B. V., & Stager, J. M. (2013). Quantifying competitive swim training using accelerometer-based activity monitors. *Sports Engineering*, 16(3), 155-164. <https://doi.org/10.1007/s12283-013-0123-1>
- Yamakawa, K. K., Shimojo, H., Takagi, H., Tsubakimoto, S., & Sengoku, Y. (2017). Effect of increased kick frequency on propelling efficiency and muscular co-activation during underwater dolphin kick. *Human Movement Science*, 54, 276-286. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.06.002>

- Yanai, T. (2001a). Rotational effect of buoyancy in frontcrawl: does it really cause the legs to sink?. *Journal of Biomechanics*, 34(2), 235-243. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00186-X)
- Yanai, T. (2001b). What Causes the Body to Roll in Front-Crawl Swimming?. *Journal of Applied Biomechanics*, 17(1), 28-42. <https://doi.org/10.1123/jab.17.1.28>
- Zacca, R., Azevedo, R., Chainok, P., Vilas-Boas, J. P., Castro, F. A. de S., Pyne, D. B., & Fernandes, R. J. (2020). Monitoring Age-Group Swimmers Over a Training Macrocycle: Energetics, Technique, and Anthropometrics. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(3), 818-827. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002762>
- Zaciorskij, V. M. (1981). *Základy teorie testování a hodnocení v tělesné výchově a sportu*. Univerzita Karlova.
- Zamparo, P., Cortesi, M. & Gatta, G. The energy cost of swimming and its determinants. *European Journal of Applied Physiology*, 120(1), 41–66. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04270-y>
- Zhang, Z., Xu, D., Zhou, Z., Mai, J., He, Z., & Wang, Q. (2017). IMU-based underwater sensing system for swimming stroke classification and motion analysis. *2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS)*, 268-272. <https://doi.org/10.1109/CBS.2017.8266113>

10 PŘÍLOHY

10.1 Objednávka výzkumných měření

Vysoké učení technické v Brně, Centrum sportovních aktivit
Technická 2896/2, 616 69 Brno

OBJEDNÁVKA MĚŘENÍ - 2019

Objednáváme u Vás (vyznačte křížkem):

- měření rychlosti plavání se synchronním videozáznamem za pomoci Akcelerometerů
- analýzu naměřených výsledků, úpravy plavecké techniky - textová zpráva
- ústní konzultace s doporučenými opravami techniky plavání
- poskytnutí záznamů měření

Pro plavce:

Termín měření (vyznačte křížkem):

	Jméno	Příjmení	Datum narození	Výška	Hmotnost	Hlavní trať	
1.							16.01.2019 <input type="checkbox"/>
2.							
3.							11:00-12:30 <input type="checkbox"/>
4.							
5.							12:30 - 14:00 <input type="checkbox"/>
6.							
7.							30.01.2019 <input type="checkbox"/>
8.							
9.							11:00-12:30 <input type="checkbox"/>
10.							
11.							12:30 - 14:00 <input type="checkbox"/>
12.							

Fakturační adresa:

Vyplnit pouze v případě placeného měření

Název:

Ulice, č.p.:

PSČ, město:

IČ:

DIČ:

Datum:

Za objednatele:

(podpis a případně razítko)

Jméno a příjmení:

Funkce:

10.2 Objednávka měření



Informovaný souhlas

Název studie (projektu):

Jméno:

Datum narození:

Účastník byl do studie zařazen pod číslem:

1. Já, níže podepsaný (á) souhlasím s mou účastí ve studii, se zpracováním osobních údajů a fotografováním. Je mi 18 let (v jiném případě podepisuje zákonný zástupce účastníka studie).
2. Byl (a) jsem podrobně informován (a) o cíli studie, o jejích postupech, a o tom, co se ode mě očekává. Beru na vědomí, že prováděná studie je výzkumnou činností. Pokud je studie randomizovaná, beru na vědomí pravděpodobnost náhodného zařazení do jednotlivých skupin lišících se léčbou.
3. Porozuměl (a) jsem tomu, že svou účast ve studii mohu kdykoliv přerušit či odstoupit. Moje účast ve studii je dobrovolná.
4. Při zařazení do studie budou moje osobní data uchována s plnou ochranou důvěrnosti dle platných právních předpisů. Souhlasím s poskytnutím svých osobních údajů v rozsahu..... Při vlastním provádění studie mohou být osobní údaje poskytnuty dalším subjektům pouze bez identifikačních údajů, tzn. anonymní data pod číselným kódem. Rovněž pro výzkumné a vědecké účely, zejména pro jinou studii, mohou být moje osobní údaje poskytnuty pouze bez identifikačních údajů (anonymní data) nebo s mým výslovným souhlasem.
5. Byl jsem informován, že
 - mám právo požadovat přístup k osobním údajům týkajících se mé osoby, jejich opravu nebo výmaz, popřípadě omezení zpracování,
 - mám právo vznést námitku proti zpracování osobních údajů týkajících se mé osoby,
 - mám právo podat stížnost dozorovému orgánu (Úřad na ochranu osobních údajů) v případě, že se domnívám, že zpracování mých osobních údajů probíhá v rozporu s právními předpisy;
 - mám právo tento souhlas se zpracováním osobních údajů kdykoliv odvolat, aniž by mi za to hrozila jakákoliv sankce či znevýhodnění, a to oznámením na elektronickou adresu, případně jinou formou na kontaktní údaje pro zpracování osobních údajů;
6. Porozuměl jsem tomu, že mé jméno se nebude nikdy vyskytovat v referátech o této studii. Já naopak nebudu proti použití výsledků z této studie.

Podpis účastníka:

Podpis osoby pověřené touto studií/projektem:

Datum:

Datum: