



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**MODIFIKACE EXPERIMENTÁLNÍHO STENDU PRO  
TESTOVÁNÍ KAVITAČNÍ EROZE**

MODIFICATION OF THE EXPERIMENTAL STAND FOR CAVITATION EROSION TESTING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Šimon Spielmann**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**

**BRNO 2021**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Šimon Spielmann**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Modifikace experimentálního stendu pro testování kavitační eroze**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Hydraulické stroje (turbíny, čerpadla), ale také např. vstřikovací trysky spalovacích motorů jsou vystaveny erozivnímu působení kavitace. V současné době se intenzivně zkoumají materiály a žárové nástřiky odolné proti kavitaci. Míru odolnosti materiálů je nutné testovat. Na odboru fluidního inženýrství byl postaven stend na bázi kavitujiící vysokotlaké trysky.

### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem bakalářské práce je zpracovat rešerši týkající se kavitační eroze, testování kavitační eroze a především provést úpravy stávajícího experimentálního stendu tak, aby umožnily intenzivní měření a sledování jednotlivých fází kavitačního opotřebení různých typů žárových nástřiků.

### **Seznam doporučené literatury:**

ASTM G134-17 Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by Cavitating Liquid Jet. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

SOYAMA, Hitoshi. Cavitating jet: a review. Applied Sciences. Basel: MDPI, 2020, 10(20), 1-27.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku kavitační eroze a modifikaci experimentálního stendu pro testování kavitační eroze. Práce je rozdělena na dvě hlavní části, a to rešeršní část a část návrhovou. V rešeršní části je proveden rozbor kavitačního jevu, vznik, růst a následný zánik kavitační bubliny. Dále rešeršní část popisuje negativní účinky kavitace na materiál a způsoby testování kavitační eroze. Návrhová část se zabývá novým návrhem stávajícího testovacího zařízení. Je zde popsáno staré testovací zařízení společně s popisem provádění kavitační zkoušky a je proveden nový návrh testovacího zařízení. Nové testovací zařízení bude sloužit k testování materiálové odolnosti vůči kavitačnímu působení či ke studování samostatného kavitačního jevu.

### **Klíčová slova**

Kavitace, kavitační eroze, mechanismy kavitační eroze, zkouška kavitační eroze, návrh testovacího zařízení

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis is focused on cavitation erosion and modification of experimental stand used for cavitation testing. The thesis is divided into two main parts, theoretical and proposal part. In theoretical part, cavitation effect, occurrence of cavitation, growth and collapse of cavitation bubble is analysed. The theoretical part also focused on negative effects of cavitation impact on material's surface and types of cavitation erosion testing are discussed. The proposal part is focused on the new proposal of cavitation testing apparatus. The old apparatus and the new proposal of apparatus is described together with description of the cavitation test. The new cavitation apparatus will be used for testing cavitation erosion resistance of material or next research of cavitation phenomenon.

### **Key words**

Cavitation, cavitation erosion, mechanisms of cavitation erosion, cavitation testing, design of testing apparatus



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SPIELMANN, Šimon. *Modifikace experimentálního stendu pro testování kavitační eroze* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132703>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Modifikace experimentálního stendu pro testování kavitační eroze** vypracoval samostatně pod vedením mého vedoucího práce, doc. Ing. Pavla Rudolfa, Ph.D. a s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Jméno a příjmení



## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. ochotu a cenné rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych také rád poděkoval mé rodině, která mě podporovala během celého studia. Velice bych také poděkoval mé mamince, která mi je vždy oporou.



## OBSAH

---

OBSAH.....	13
ÚVOD.....	15
1. Kavitační jev .....	17
1.1 Historie kavitace .....	17
1.2 Typy kavitace.....	18
1.3 Využití kavitace .....	18
1.4 Růst a statická rovnováha kulové kavitační bubliny.....	19
2. Hydrodynamická kavitace .....	23
2.1 Typy hydraulické kavitace .....	23
2.2 Dynamika kavitační bubliny .....	24
2.3 Kavitační číslo .....	25
2.4 Vliv fyzikálních vlastností na dynamiku bubliny .....	26
2.4.1 Vliv povrchového napětí .....	26
2.4.2 Vliv viskozity .....	26
2.4.3 Vliv obsahu plynu (vzduchu) v kapalině .....	27
2.4.4 Vliv teploty.....	27
3. Zánik kavitační bubliny .....	29
3.1 Zánik osamocené bubliny .....	29
3.1.1 Microjet .....	30
3.2 Vírová kavitace .....	31
3.3 Kavitační mrak.....	32
3.4 Kavitační proud a kavitační tryska .....	33
3.4.1 Struktura kavitačního proudu.....	33
3.4.2 Klíčové parametry .....	35
4. Kavitační dopad na materiál .....	37
4.1 Kavitační poškození materiálu.....	37
4.2 Kavitační odolnost materiálu .....	39
4.2.1 Zkouška kavitačních důlků (cavitation pitting test) .....	39
4.2.2 Zkouška kavitační eroze.....	39
4.3 Metody zkoušek kavitační eroze.....	41
4.3.1 Metoda kavitačního proudu kapaliny (ASTM G134-17).....	41
4.3.2 Metoda kmitající aparatury (ASTM G32-16) .....	44
5. Návrh nového testovacího zařízení.....	47
5.1 Úvod.....	47
5.2 Důležité body návrhu .....	47
5.3 Původní testovací zařízení .....	47
5.4 Návrh nového testovacího zařízení .....	50
5.5 Nový návrh vyjímatelného rámu.....	56
5.6 Konstrukce .....	59

ZÁVĚR .....	61
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	63
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	65
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	67
SEZNAM TABULEK.....	69
SEZNAM PŘÍLOH.....	71
Příloha A: Výkres sestavy .....	72
Příloha B: Obrázky 3D návrhu .....	72
Příloha C: Fotografie testovacího zařízení .....	75

## ÚVOD

---

Cílem této bakalářské práce je porozumění kavitačního jevu, jeho účinků na materiál a návrh nového testovacího zařízení pro zkoušky kavitační eroze. Kavitace je děj, který se vyskytne v proudící kapalině, sníží-li se lokální tlak na hodnotu tlaku nasycených par. Po dosažení této podmínky začne růst kavitační bubliny. Po dosažení své maximální velikosti začne bublina velice rychle a chaoticky kolabovat a emitovat silné tlakové vlny. Dojde-li ke kolapsu u povrchu obtékaného tělesa, může tlaková vlna poškodit povrch tělesa. Právě tento negativní účinek vede k mnoha poruchám či zničení hydraulických strojů [1].

S kavitací se inženýři zabývají již od konce 19. století, kdy kavitace způsobila problémy při výstavbě nových, rychlejších plavidel Daring a Turbinia [1]. Od té doby se zájem o studium kavitace rozšířil, jelikož se stala nedílným problémem při konstrukci hydraulických strojů, jako jsou čerpadla a turbíny. I když je kavitace známá již dlouhou dobu, tak stále není tento úkaz zcela prozkoumán a vysvětlen. Čím více se lidstvo o kavitaci dozvídá, tím více vzniká otázek.

Primárním úkolem nového testovacího zařízení bude testování odolnosti proti kavitační erozi nejrůznějších materiálů nebo dokonce nejrůznějších nástřiků, které by chránily povrch materiálu. Nicméně s využitím vysokorychlostní kamery je možné zdokumentovat kavitační průběh a dále tak zkoumat a porozumět tomuto fenoménu.



## 1. Kavitační jev

Pojmem kavitace je popisován jev vzniku, vývoje a zániku dutin v proudící kapalině. Název tohoto fenoménu vychází z latinského slova „*cavitas*“, jež se překládá jako dutina [2]. Kavitací v kapalině se rozumí narušení její spojitosti, které je dosaženo snížením tlaku v daném místě kapaliny. Poklesne-li lokální tlak na tlak vzniku nasycených par tzv. kavitačního tlaku, odpovídající teplotě kapaliny, dojde k porušení soudržnosti kapaliny. Při splnění tohoto stavu se kapalina odpaří do velmi malých bublin, a tak vzniknou malé pozorovatelné kavitační bubliny, které dalším snižováním tlaku rostou [2]. Dostanou-li se kavitační bubliny do míst s vyšším tlakem, například unášením proudící kapalinou, začne pára v bublinách kondenzovat a vzniknou kavitační dutiny, které rychle kolabují. Do kolabujících dutin vniká kapalina velikou rychlostí až do téměř úplného zaplnění. Po zaplnění dutiny následuje silný ráz, který uvolní značné množství energie [1]. Pokud se zánik kavitační dutiny uskuteční v blízkosti obtékaného tělesa, může energie z rázů po určité době poškodit povrch jeho stěny. Toto poškození povrchu je označováno jako kavitační eroze [2].

### 1.1 Historie kavitace

Pojem kavitace je znám dlouhou dobu. První zmínky pocházejí již z roku 1784 od Leonarda Eulera v jeho teorii o vodních turbínách. Větší pozornosti se dostalo kavitaci při rozvoji a zdokonalování hydraulických strojů a součástí, a to v roce 1894 při zkouškách britského torpédoborce Daring s lodními šrouby a torpédoborce Turbinia s turbínovým pohonem. Cílem bylo zkonstruovat plavidla rychlejší než dosavadní lodě, nicméně dosažené výsledky zkoušek byly velice překvapivé a neuspokojivé, poněvadž plavidla nedosahovala předpokládané rychlosti. Důvodem byla kavitace, která se vyskytla u šroubů obou lodí. Dále Ch. A. Parsons při stejných zkouškách poukázal na komplikace spojené s torpédoborcem Turbinia, neboť lodní šroub musel být několikrát vyměněn kvůli značnému poškození povrchu lopatek. Později se kavitace projevila i u vodních turbín, z důvodu zvýšení jejich rychloběžnosti [1].

Nastal tedy zcela nový problém, který bylo nutné řešit a podrobně studovat. První výzkum kavitace byl zaměřen na podmínky vzniku tohoto jevu. Výsledky teoretických a experimentálních prací ukázaly, že ke vzniku kavitace je potřeba dostatečně nízký tlak, respektive je nutné snížit tlak kapaliny na hodnotu tlaku nasycených par, odpovídající teplotě kapaliny. O pár let později se výzkum zaměřil na kavitační odolnost materiálů, kdy byla odolnost jednotlivých materiálů zjišťována experimentálně v několika hydrocentrálách. Experimenty byly založeny na upevnění několika vzorků různého materiálu do míst, kde byl průběh kavitace nejintenzivnější, tedy na sací stranu lopatek oběžných kol. Nicméně tyto experimenty nebyly velmi efektivní, jelikož si vyžádaly až několik let provozu k dosažení výsledků. Od experimentů odolnosti materiálů byla následně věnována pozornost výzkumu zvyšování materiálové odolnosti. S postupem času se pozornost soustředila na výzkum jednotlivých kavitačních jevů, od výskytu prvních kavitačních bublin až po jejich zánik a následné porušení povrchu materiálů [1].

Ačkoliv se lidstvo zabývá otázkou kavitace již několik desetiletí, stále nejsou dořešeny všechny podrobnosti. Čím hlouběji a podrobněji se lidé zabývají otázkou kavitace, tím náročnější přístroje jsou vyžadovány [1].

## 1.2 Typy kavitace

---

Kavitace je složitý jev a může vzniknout za různých podmínek. Je tedy vhodné ji dělit dle jejího mechanismu a příčiny vzniku na *hydrodynamickou kavitaci*, *akustickou kavitaci* [2] a na *kavitaci vyvolanou pulzním laserem* [3].

V proudící kapalině nastane kavitace při obtékání různých těles nebo v místech zúžení profilu potrubí. Kavitace je zapříčiněna prudkým poklesem tlaku na hodnotu nasycených par. Tato kavitace je označena jako hydrodynamická kavitace a nejčastěji se vyskytuje v hydraulických strojích [2].

Kavitace nemusí být vždy způsobena proudící kapalinou, ale může vzniknout v klidné neproudící kapalině. Může být vyvolána vysokofrekvenčními tlakovými vlnami o velké amplitudě od pevného tělesa kmitajícího v kapalině. Těleso rozkmitá kapalinu a vybudí tlakové akustické vlny. Jako důsledek změn lokálního tlaku kolem rychle kmitajícího tělesa začnou vznikat a zanikat kavitační bubliny. Takto vyvolaná kavitace se označuje jako akustická kavitace a najde uplatnění ve zdravotnictví nebo třeba ve šperkařství [2].

Další možností vyvolání kavitace je užití pulzního laseru. Princip je založen na rozštěpení molekul kapaliny energií laseru, a to zaměřením pulzu laseru na jedno místo v kapalině. V místě rozštěpení molekul následně vznikne horká ionizovaná plazma dosahující vysokých teplot, až 15 000 K. Horká plazma v řádech nanosekund ohřívá kapalinu a vytváří parní bublinu, která následně velice rychle expanduje [3].

## 1.3 Využití kavitace

---

V mnoha případech je kavitace nežádoucí jev v hydraulických strojích a je snaha předejít nebo alespoň snížit kavitační dopady na materiál. Avšak v určitých případech lze tento fenomén využít ve prospěch člověka [4].

Dopad, který má kavitační působení na povrch materiálu, lze uplatnit při povrchové úpravě materiálu, obdobně jako u balotínování<sup>1</sup> materiálu. Taková povrchová úprava kavitací se nazývá kavitační otryskávání a na rozdíl od kuličkování tato úprava nevyužívá k otryskávání částice, ale využívá pouze dopad hydraulického rázu, vyvolaný kolabující bublinou. Kavitační otryskávání probíhá působením vysokorychlostního vodního paprsku ponořeného ve vodě na materiál. Za těchto okolností je povrch materiálu, upravený kavitačním otryskáváním, daleko hladší v porovnání s balotínováním [4].

Další využití kavitace je v oblasti dentální hygieny, kde malý vysokorychlostní vodní paprsek využívá kavitačních účinků k čištění zubů nebo také k čištění zubních protéz, které probíhá v komerčních akustických čističích [5].

---

<sup>1</sup> Balotínování = dokončovací povrchová úprava materiálu, využívající granulát (zrněné prášky či částice) k otryskávání povrchu materiálu [6].

## 1.4 Růst a statická rovnováha kulové kavitační bubliny

Kavitace se vyvíjí z kavitačních jader, což jsou velmi malé bublinky naplněné plynem. Při snižování tlaku kavitační jádro o počátečním poloměru  $R_0$  pomalu roste, dokud nepřekročí kritický poloměr  $R_{kr}$ . Po překročení kritického poloměru bublina ztratí svoji stabilitu a začne nekontrolovatelně růst [1]. Důvodem ztráty soudržnosti je překročení kohezních sil molekul kapaliny, jejichž projevem je tahová pevnost kapaliny, kavitační bublinou [2].

K růstu kavitačních zárodků může dojít dvojím mechanismem, a to buď pomalou difúzí rozpuštěného plynu z okolní kapaliny do kavitační bubliny nebo náhlým zvětšením objemu kavitační bubliny. První případ kavitace vzniklé difúzí se nazývá *plynová* nebo *vzduchová kavitace* a druhý případ, tedy kavitace vzniklá náhlým zvětšením kavitační bubliny, je označována jako *parní kavitace* [1].

Mechanismus parní kavitace lze ukázat na modelu kulové bubliny při vyšetřování podmínek jejich statické rovnováhy. V kapalině o tlaku  $p_K$  se nachází model kulové bubliny, vyplněné plynem o tlaku  $p_p$  a párou o tlaku  $p_n$  při dané teplotě kapaliny nezanedbávající povrchového napětí. Zavedou se předpoklady, kterými se model bubliny bude řídit. Předpokládá se tlak páry  $p_n$  za konstantní a rovný tlaku nasycených par. Dále se předpokládá dobrá výměna tepla mezi plynným obsahem bubliny a obklopující kapalinou, takže teplota plynné směsi je konstantní. Vliv difúze plynu z kapaliny do bubliny, a naopak bude zanedbán, takže obsah plynu v bublině bude neměnný. K dodržení statické rovnováhy mezi bublinou a kapalinou musí platit rovnost [7]:

$$p_B = p_n + p_p = p_K + \frac{2\sigma}{R}, \quad (1.1)$$

neboli celkový tlak plynu a páry v bublině musí být roven tlaku okolní kapaliny navýšenému o kapilární tlak<sup>2</sup>. Podle platnosti Daltonova zákona je celkový tlak plynné směsi uvnitř bubliny roven součtu parciálních tlaků plynu a páry neboli  $p_p + p_n$ . Teplota zůstává po celou dobu konstantní, proto se stav plynu při změnách objemu bubliny mění izotermicky [7]:

$$p_p V = p_p^0 V_0, \text{ neboli } p_p = p_p^0 \frac{V_0}{V} = p_p^0 \frac{R_0^3}{R^3}, \quad (1.2)$$

kde  $p_p$  je parciální tlak plynu v bublině o poloměru  $R$  a  $p_p^0$  je parciální tlak plynu bubliny o poloměru  $R_0$ . Podmínku statické rovnováhy pro bubliny lze nyní zapsat následovně [7]:

$$p_n + p_p^0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 = p_K + \frac{2\sigma}{R}. \quad (1.3)$$

Pro bublinu o poloměru  $R = R_0$  vypadá rovnice následovně [7]:

$$p_n + p_p^0 = p_{K_0} + \frac{2\sigma}{R_0}. \quad (1.4)$$

<sup>2</sup> Kapilární tlak ukazuje skokovou změnu tlaku při průchodu zakřiveným rozhraním mezi plynem a kapalinou, který je pro rozhraní kulového tvaru dán vztahem  $2\sigma/R$ , kde  $R$  je poloměr křivosti  $\sigma$  je povrchové napětí (napětí mezi dvěma prostředními) [7].

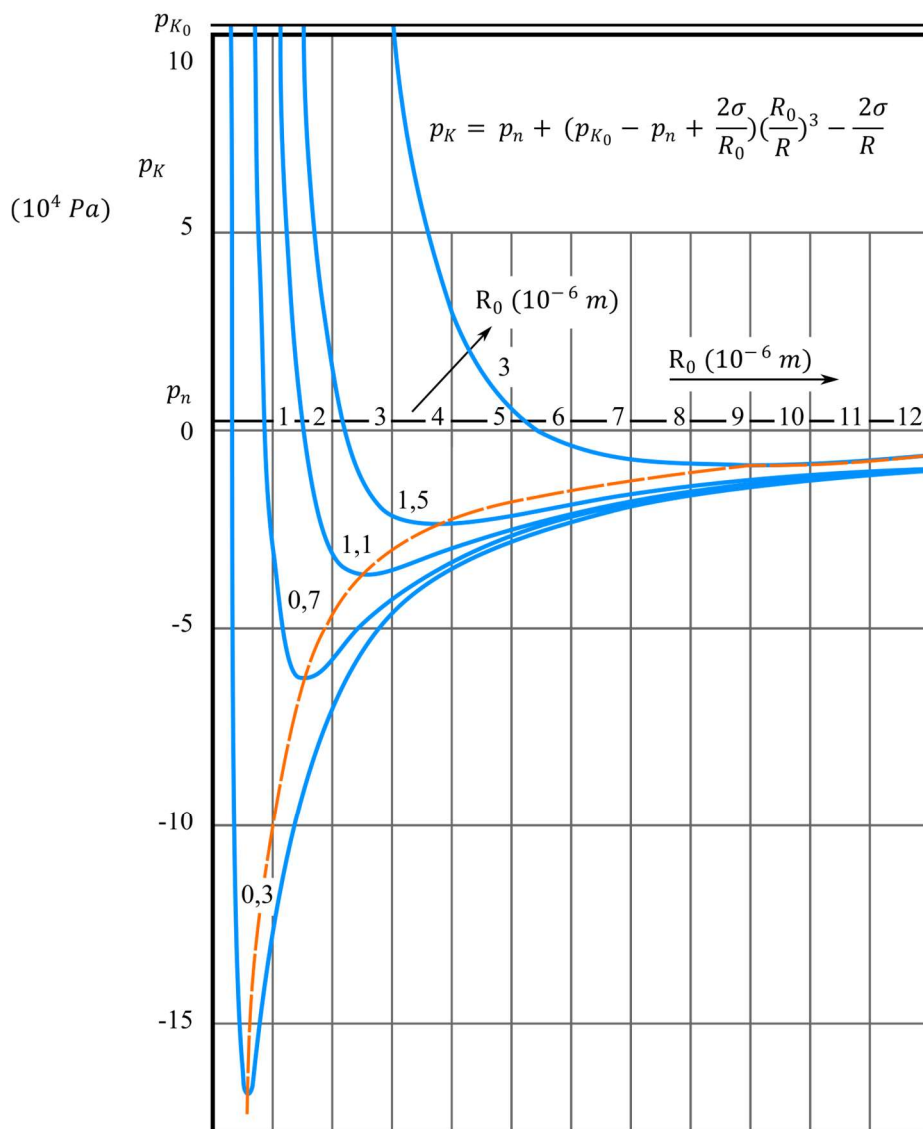
Vyjádří-li se člen  $p_p^0$  z rovnice (1.4) a dosadí se do rovnice (1.3), po úpravě vztahu se dosáhne výrazu [7]:

$$p_K = p_n + \left( p_{K_0} - p_n + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R}, \quad (1.5)$$

který ukazuje statickou rovnováhu bubliny v kapalině pro rovnovážný tlak  $p_K$  [7].

Porušením statické rovnováhy bude taková bublina měnit svoji velikost, pokud celkový tlak v bublině bude větší nebo menší, nežli je tlak kapaliny navýšené o kapilární tlak [1]:

$$p_n + p_p \geq p_K + \frac{2\sigma}{R}. \quad (1.6)$$



$$p_{K_0} = 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa}, p_n = 2337 \text{ Pa}, T = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma = 72,78 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

Obrázek 1.1 Závislost rovnovážného tlaku kapaliny  $p_K$  na poloměru bubliny  $R$  [7]

Obrázek 1.1 ukazuje závislost rovnovážného tlaku kapaliny  $p_K$  na poloměru bubliny, dané rovnicí (1.5). Parametrem je zde počáteční poloměr bubliny  $R_0$ , za tlak  $p_{K_0}$  je zvolena hodnota atmosférického tlaku, tj.  $p_{K_0} = 1,01325 \times 10^5$  Pa a voda má při teplotě 20 °C hodnotu povrchového napětí  $\sigma = 72,78 \times 10^{-3}$  N $\times$ m $^{-1}$  a hodnotu tlaku páry  $p_n = 2337$  Pa [7].

Statická rovnováha bubliny může být stabilní nebo nestabilní. Stabilní rovnováhou bubliny se rozumí, jestliže nastane porucha poloměru bubliny, která byla v rovnováze, a tato porucha se s časem zmenšuje. Podmínka stabilní rovnováhy má tvar [7]:

$$\frac{\partial p_K}{\partial R} < 0. \quad (1.7)$$

V opačném případě se jedná o rovnováhu nestabilní, jejíž podmínka vypadá takto [7]:

$$\frac{\partial p_K}{\partial R} \geq 0. \quad (1.8)$$

Kritický poloměr  $R_{kr}$  je dán podmínkou [7]:

$$\left( \frac{\partial p_K}{\partial R} \right)_{R=R_0} = 0. \quad (1.9)$$

Z obrázku 1.1 lze vyvodit, kdy se bublina nachází ve stabilní či nestabilní rovnováze. Pokud je tlak kapaliny větší než tlak nasycených par, tj.  $p_K > p_n$ , pak má bublina jen jednu hodnotu statické rovnováhy a tato rovnováha je stabilní [7].

Platí-li však  $p_K < p_n$ , tedy že tlak kapaliny je nižší než tlak nasycených par, pak se bublina nachází ve stabilní rovnováze, pokud  $R < R_{kr}$  a v nestabilní rovnováze, pokud  $R > R_{kr}$ . To znamená, že pro  $p_K < p_n$  přísluší tlaku  $p_K$  buď jedna hodnota rovnovážného poloměru, označující kritický poloměr  $R_{kr}$ , nebo dvě hodnoty rovnovážného poloměru. Nižší hodnota označuje stabilní rovnováhu bubliny a větší hodnota rovnováhu nestabilní. Přerušovaná spojnice rozděluje oblast stabilní a nestabilní rovnováhy. Je-li tlak  $p_K$  nižší než kritický tlak, bublina nedosáhne rovnováhy, ztrácí svoji stabilitu a začne její nekontrolovatelný růst [7].

Nachází-li se bublina ve stabilní rovnováze ( $R < R_{kr}$ ), je poloměr bubliny  $R$  blízký k počátečnímu poloměru  $R_0$ , takže tlak plynu v bublině  $p_p$  je mnohonásobně větší než tlak nasycených par  $p_n$ . Dojde-li k náhodnému zvětšení bubliny – poruše rovnovážného stavu – tak kapilární tlak bude silnější nežli tlak plynu  $p_p$  a vrátí bublinu do rovnovážného stavu. Z rovnice (1.5) lze vidět, že tlak plynu se s rostoucím poloměrem nepřímo úměrně zmenšuje se třetí odmocninou a kapilární tlak se zmenšuje pouze s první odmocninou, tudíž bude silnější [7].

Nachází-li se bublina v nestabilní rovnováze ( $R > R_{kr}$ ), je objem bubliny mnohonásobně větší, a tudíž tlak plynu v bublině je se srovnáním s tlakem páry  $p_n$  velice malý. Celkový tlak směsi v bublině bude tedy roven přibližně tlaku páry  $p_n$  a během zvětšování bubliny zůstane skoro neměnný. Dojde-li k náhodnému zvětšení bubliny – poruše rovnovážného stavu – bublina se bude neomezeně zvětšovat, jelikož celkový tlak plynné směsi bude silnější než neustále se zmenšující kapilární tlak [7].

Bublina si zachová rovnovážný stav, pokud se při elementární změně o  $dR$  v klidu změní i tlak kapaliny  $dp_K$  o hodnotu [7]:

$$dp_K = \frac{\delta K}{\delta R} dR. \quad (1.10)$$

Jinými slovy, bublina zachová statickou rovnováhu, jestliže se zvětší její velikost při  $R < R_{kr}$  ( $R > R_{kr}$ ) a zároveň se rovnovážný tlak zmenší (zvětší) o hodnotu podle rovnice (1.10). Na-

stane-li náhodné zvětšení bubliny ve stabilní oblasti ( $R < R_{kr}$ ), bublina se vrátí do statické rovnováhy, nicméně nastane-li náhodné zvětšení bubliny v nestabilní oblasti ( $R > R_{kr}$ ), bublina ztrácí svoji rovnováhu a začne její nekontrolovaný růst [7].

Nalezení vztahu kritického poloměru se dosáhne dosazením podmínky (1.7) do rovnice (1.4) [7]:

$$R_{kr} = \left[ \frac{3R_0^3}{2\sigma} \left( p_{K_0} - p_n + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \right]^{1/2} = R_0 \left( \frac{3R_0 \times p_p^0}{2\sigma} \right)^{1/2}. \quad (1.3.11)$$

Záměnou takhle vyjádřeného  $R_{kr}$  za poloměr  $R$  do rovnice (1.4) se dostane vztah pro kritický tlak  $p_{kr}$  [7]:

$$p_{kr} = p_n - \frac{2}{3} \frac{2\sigma}{R_0} \left( \frac{2\sigma}{3R_0 \times p_p^0} \right)^{1/2} = p_n - \frac{2}{3} \frac{2\sigma}{R_{kr}}. \quad (1.12)$$

Z rovnice (1.9) tedy lze vztah pro kritický poloměr  $R_{kr}$  napsat následovně [7]:

$$R_{kr} = \frac{4\sigma}{3(p_n - p_{kr})}. \quad (1.13)$$

U plynové kavitace, na rozdíl od kavitace parní, je ztráta stability bubliny zapříčiněna difúzí. Je to jev velmi složitý a zdoluhavý, proto se během parní kavitace zanedbává, jelikož v porovnání s velice rychlým růstem bublin parní kavitací difúze významně neovlivní průběh kavitace. Přeruší-li se difúzní rovnováha zvětšením poloměru bubliny  $R$ , tak k opětovnému nastolení rovnováhy začne z okolní kapaliny difundovat plyn do bubliny. Bublina se již nevrátí do původního rovnovážného stavu, ale zaujme nový rovnovážný stav s větším poloměrem  $R$ , protože se nyní v bublině vyskytuje větší množství plynu [7].

Lze pozorovat i další odlišnosti obou kavitačních mechanismů, například podmínky pro počátek jednotlivého typu kavitace. U plyné kavitace je její kavitační tlak  $p_{kav}$  – tlak počátku kavitace – závislý na nasycení kapaliny rozpuštěným vzduchem. Naopak u parní kavitace se předpokládá, že tlak počátku kavitace  $p_{kav}$  je roven tlaku nasycených par dané kapaliny. I když podmínky pro počátek jednotlivých typů kavitací jsou zcela rozdílné, je třeba nahlížet na celkový kavitační jev jako na vzájemné působení jak plyné, tak parní kavitace. Pomalou difúzí plynu v kapalině se z velice malých plyných jader stanou kavitační bubliny, které následně začnou zvětšovat svůj objem parní kavitací [1].

## 2. Hydrodynamická kavítace

---

Během průtoku kapaliny zúženým profilem potrubí se zvýší rychlost proudění, k dodržení zákona zachování hmotnosti (rovnice kontinuity) musí nastat dynamický pokles tlaku. V důsledku snížení tlaku pod tlak nasycených par se začnou v kapalině vyskytovat a následně růst bubliny s obsahem páry a plynu. S následným zvýšením tlaku unášené bubliny ztrácejí svoji stabilitu a kolabují. Vznik, růst a zhroucení bubliny zapříčiněné dynamickým snížením tlaku na hodnotu nasycených par při teplotě kapaliny se nazývá hydrodynamická kavítace [8].

### 2.1 Typy hydraulické kavítace

---

Kavítace není děj pouze jedné individuální kavitační bubliny, ale je to převážně proces velkého množství bublin tvořících shluk označovaný jako kavitační oblast, nebo také kavitační mrak či zóna. Kavitační oblasti lze dělit podle různých kritérií, ať už je to podle stupně vyvinutí, tvaru, chování, nebo mechanismu vzniku [2].

Podle stupně, do kterého se vyvinula, se kavítace dělí na *plně vyvinutou kavítaci* a *částečně vyvinutou kavítaci*. Pokud je kavitační oblast schopna ovlivnit energetické parametry hydraulických strojů, jako je průtok, účinnost atd., označuje se za plně vyvinutou kavítaci. Částečně vyvinutá kavítace je stupeň kavítace mezi počátkem kavítace a plně vyvinutou kavítací [2].

Dále lze kavitační oblasti dělit podle charakteristického tvaru nebo místa výskytu na *oblast kapsovitou*, *plošnou*, *vláknovou* a *spárovou*. Oblast kapsovitá má charakteristický tvar kapsy a vyskytuje se za obtékaným tělesem, plošná lpí na povrch tělesa, oblast vláknová je charakteristická sérií kavitačních bublin ve tvaru vlákna připomínající lano a poslední oblast spárová se vyskytuje na výstupech spár hydraulických strojů [2].

Další způsob dělení je dle chování kavitační oblasti. Zde se oblasti rozlišují na *oblast přemísťující*, *oblast nepřemísťující* a *superkavítaci*. Přemísťující se oblast je chápána jako oblast pohybující se kvazistacionárně<sup>3</sup> ve směru proudu. Většinou jde jen o malý počet kavitačních bublin, které na své dráze vznikají a zanikají. Nepřemísťující se oblast, nebo také oblast připojená, je označení oblasti vznikající u obtékaného tělesa. Uvnitř oblasti nastává cyklický proces, skládající se z růstu oblasti, jejího zpětného naplňování kapalinou a následného odtržení a odplavení oblasti. Pokud kavitační oblast u obtékaného tělesa nabude velikosti, že její uzavření probíhá až za obtékaným tělesem, označuje se tato oblast za superkavítaci [2].

V neposlední řadě lze dělit kavítaci dle mechanismu na *parní kavítaci* a *plynnou kavítaci*, které byly probrány v předchozí kapitole. Zvláštním případem je *pseudokavítace*, která nastává, pokud je kapalina přesycená plynem. Bubliny s velkým obsahem vzduchu se při postupném snižování tlaku plynule zvětšují, aniž by došlo k vypařování kapaliny do bubliny. Tento ojedinělý jev může ovlivnit parametry hydraulických strojů a zkreslit výsledky kavitačních zkoušek. Na druhou stranu plyn zpomaluje implozi bubliny, takže prakticky nepoškodí materiál [2].

---

<sup>3</sup> Kvazistacionární = zdánlivě nehybný, zdánlivě neměnný s časem

## 2.2 Dynamika kavitační bubliny

V předchozí kapitole byl ukázán vznik a počáteční růst kavitační bubliny. Mechanismus růstu vycházel ze statické rovnováhy, proto je platný jen pro velice pomalý, kvazistacionární kavitační jev. Nicméně růst a zánik kavitační bubliny je ve skutečnosti velmi rychlý a náhlý, proto je nutné přihlížet i k setrvačným účinkům kapaliny [1].

K porozumění chování růstu a kolapsu kavitační bubliny slouží Rayleigh-Plessetova rovnice, která popisuje dynamické chování jedné osamocené bubliny kulového tvaru o poloměru  $R(t)$  a teplotě  $T_B$ , naplněné plynem a párou okolní kapaliny, v nekonečně rozlehlé nestlačitelné kapalině, působící na bublinu tlakem  $p_\infty(t)$  a teplotou  $T_\infty$  v nekonečnu [5]. Rovnice vychází z Navier-Stokesovy rovnice [5], při zanedbání objemových sil [7], za předpokladu konstantní hustoty kapaliny  $\rho$ , konstantní kinematické viskozity  $\nu_L$  a při uvážení nevířivého proudění [5]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho R} + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{p_B(t) - p_\infty(t)}{\rho}, \quad (2.1)$$

kde  $\rho$  je hustota kapaliny,  $\nu_L$  je kinematická viskozita,  $\sigma$  je povrchové napětí a  $p_B$  je tlak směsi plynu a páry uvnitř bubliny.

Zabýváním se plynnou směsí bubliny, lze její celkový tlak, za předpokladu konstantního množství plynu a nevýznamné difúze plynu, zapsat ve tvaru [5]:

$$p_B(t) = p_n(T_B) + p_p = p_n(T_B) + p_{p0} \left( \frac{T_B}{T_\infty} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3, \quad (2.2)$$

kde  $p_{p0}$  je tlak plynu v bublině při poloměru  $R_0$ . Dosazením vztahu (2.2) do (2.1) lze Rayleigh-Plessetovu rovnici zapsat ve tvaru [5]:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho R} + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{p_n(T_\infty) - p_\infty(t)}{\rho} + \frac{p_n(T_B) - p_\infty(T_\infty)}{\rho} + \frac{p_{p0}}{\rho} \left( \frac{T_B}{T_\infty} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3. \quad (2.3)$$

Teplota bubliny  $T_B$  je odlišná od teploty kapaliny  $T_\infty$ , avšak v mnoha případech je teplotní rozdíl  $T_B(t) - T_\infty$  zanedbatelný a nemá významný vliv na dynamiku bubliny. Tato dynamika bubliny je tzv. „setrvačně“ kontrolována a druhý člen zprava v rovnici (2.3) nemá významný vliv na dynamiku bubliny [5]. Bude-li se předpokládat polytropní chování plynu, nevýznamná difúze plynu mezi bublinou a okolní kapalinou, platí vztah [5]:

$$p_p = p_{p0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3n}, \quad (2.4)$$

kde  $n$  je polytropní exponent. Rovnice (2.2) nyní vypadá následovně [5]:

$$p_B(t) = p_n(T_B) + p_p = p_n(T_B) + p_{p0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^3. \quad (2.5)$$

Z výše uvedených předpokladů má Rayleigh-Plessetova rovnice – vložení (2.5) do (2.1) – pro tzv. „setrvačně“ kontrolovanou bublinu tvar [5]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho R} + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{p_n(T_\infty) - p_\infty(t)}{\rho} + \frac{p_{p0}}{\rho} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3n}. \quad (2.6)$$

Bublina je unášena proudem a kmitá kolem své rovnovážné polohy. Několikrát se zvětší a opět zase zmenší, dokud nedosáhne své maximální velikosti o poloměru  $R_{max}$ . Jestliže jej bublina dosáhne, začne velice rychle kolabovat [7].

## 2.3 Kavitační číslo

K nejčastějšímu výskytu kavitace dochází obtékáním povrchu tělesa proudící kapalinou. Dojde-li k takovému obtékání, tlak kapaliny se proměnně rozloží podél povrchu obtékaného tělesa [2]. Ke zjištění rozdílu referenčního tlaku kapaliny  $p_\infty$  a tlaku v určitém místě obtékaného povrchu tělesa  $p(x_i)$  slouží tlakový součinitel  $C_p$  [5]:

$$C_p(x_i) = \frac{p(x_i) - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2}, \quad (2.7)$$

kde  $\rho$  je hustota kapaliny a  $v_\infty$  je referenční rychlost kapaliny. Tento vztah vychází z Bernoulliho rovnice pro proudění neviskózní kapaliny [2]. Je dobré poznamenat, že referenční tlak kapaliny  $p_\infty$  a rychlost kapaliny  $v_\infty$  jsou hodnoty v místě neovlivněné profilem [2]. V určitých místech povrchu se může tlak snížit na své minimum, pro tato místa se tlakový součinitel označuje  $C_{pmin}$  a je dán geometrií obtékaného tělesa [2].

K posouzení, zda ke kavitaci dojde slouží kavitační číslo  $\sigma_K$  (kavitační parametr) [5]. Jeho kvantitativní hodnota určuje [2], co nastane v průtoku, jestliže se v určitém místě obtékaného tělesa získá hodnota tlaku nasycených par dosažená snížením celkového tlaku, nebo zvýšením rychlosti průtoku [5]. Každé proudění má hodnotu kavitačního čísla, ať už kavitace nastane či nenastane. Hodnota kavitačního čísla pro počátek kavitace, tedy při vzniku první kavitační bubliny, se označuje  $\sigma_{Kpoč}$  a je dána vztahem [5]:

$$\sigma_{Kpoč} = -C_{pmin}, \quad (2.8)$$

ovšem je nutno poznamenat, že jisté faktory mohou způsobit odchylky hodnoty  $\sigma_{Kpoč}$  [5].

Můžou nastat tři situace: Při  $\sigma_K > \sigma_{Kpoč}$  ke kavitaci nedojde, protože tlak se nesníží na hodnotu  $p_n$ . Při  $\sigma_K = \sigma_{Kpoč}$  se na nepatrný okamžik tlak sníží na hodnotu  $p_n$  a první kavitační bublinky se objeví. Pokud ale nastane  $\sigma_K < \sigma_{Kpoč}$ , tak ke kavitaci dojde. S dalším snižováním hodnoty  $\sigma_K$  dojde ke zvýšení počtu a rozsahu kavitačních bublin [5].

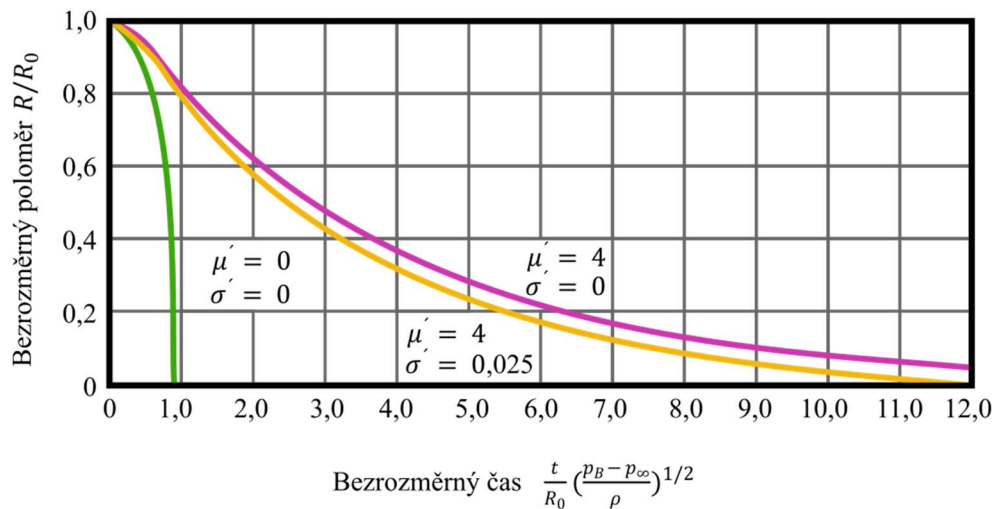
## 2.4 Vliv fyzikálních vlastností na dynamiku bubliny

### 2.4.1 Vliv povrchového napětí

Povrchové napětí má vliv na kavitační bubliny převážně během počátku a na konci života bubliny. Zpomaluje růst bubliny a urychluje její zánik. Jeho vliv lze pozorovat na obrázku 2.1 a obrázku 2.2 zobrazujících grafy rychlosti růstu a kontrakce kavitační bubliny v nestlačitelné kapalině [2]. Povrchové napětí je v grafu znázorněno bezrozměrným povrchovým napětím  $\sigma'$  [7]:

$$\sigma' = \frac{\sigma}{R_0(p_\infty - p_B)}. \quad (2.9)$$

K růstu kavitační bubliny musí být tlak plynné směsi vyšší než tlak kapaliny na povrchu bubliny. Čím vyšší povrchové napětí, tím více energie bublina potřebuje ke svému růstu [2].



Obrázek 2.1 Vliv vazkosti a povrchového napětí na růst kavitační bubliny v nestlačitelné kapalině [7]

### 2.4.2 Vliv viskozity

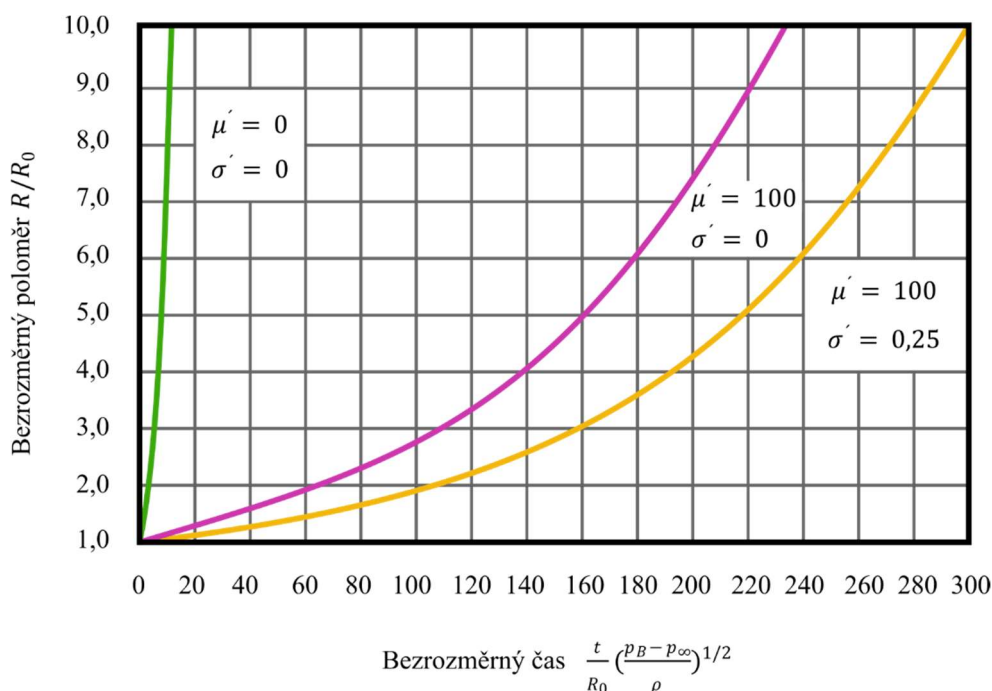
Viskozita se v kapalině projevuje disipací mechanické energie způsobené vnitřním třením částic kapaliny [7]. V Rayleigh-Plessetově rovnici je viskozita vyjádřena členem [5]:

$$\frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt}, \text{ nebo } \frac{4\mu_L}{\rho R} \frac{dR}{dt}, \quad (2.10)$$

kde  $\nu_L$  je kinematická viskozita,  $\mu_L$  je dynamická viskozita a  $R$  je poloměr bubliny. Z Rayleigh-Plessetovy rovnice je patrné, že viskozita má veliký vliv na rychlost bubliny, přesněji na rychlost růstu, a především na rychlost kontrakce bubliny [7]. Ke zřetelnějšímu zobrazení vlivu viskozity na dynamiku bubliny slouží obrázek 2.1 a obrázek 2.2 zobrazující grafy rychlosti růstu a kontrakce kavitační bubliny v nestlačitelné kapalině. Viskozita je zde znázorněna parametrem bezrozměrnou vazkostí  $\mu'$  [7]:

$$\mu' = \frac{4\mu}{R_0[\rho(p_\infty - p_B)]^{1/2}}. \quad (2.11)$$

Z průběhu křivek je patrný vliv viskozity, který významně zpomaluje rychlost růstu a kolapsu bubliny [7].



Obrázek 2.2 Vliv vazkosti a povrchového napětí na kontrakci kavitační bubliny v nestlačitelné kapalině [7]

### 2.4.3 Vliv obsahu plynu (vzduchu) v kapalině

Při větším obsahu plynu v kapalině se při určitém snížení tlaku stává kapalina přesycená plynem. Vzhledem k většímu množství plynu dosahuje kavitační bublina nové, větší rovnovážné velikosti. Zvětšuje se také i kavitační tlak, takže kavitace nastane při vyšších hodnotách tlaku kapaliny, než je hodnota tlaku nasycených par. Z tohoto důvodu se objeví kavitace dříve, než by bylo předpokládáno, a tím může ovlivnit a zkreslit výsledky kavitačních zkoušek [2].

### 2.4.4 Vliv teploty

V kapitole 2.2 platila Rayleigh-Plessetova rovnice (2.6) pouze při zanedbání teplotních účinků a za okolností nevýznamné difúze plynu mezi bublinou a okolní kapalinou. Teplota uvnitř kavitační bubliny  $T_B$  je však jiná než teplota kapaliny  $T_\infty$  a rozdíl teplot  $(T_B(t) - T_\infty)$  bude mít vliv na dynamiku, ať už významný, či zcela zanedbatelný. Rayleigh-Plessetova rovnice má tvar [5]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho R} + \frac{4v_L}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{p_n(T_\infty) - p_\infty(t)}{\rho} + \frac{p_n(T_B) - p_\infty(T_\infty)}{\rho} + \frac{p_{p0}}{\rho} \left( \frac{T_B}{T_\infty} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^3, \quad (2.12)$$

kde  $\frac{p_n(T_B) - p_n(T_\infty)}{\rho}$  reprezentuje teplotní člen v Rayleigh-Plessetově rovnici. I při velice malých zanedbatelných počátečních hodnotách teplotní člen s postupem času nabude hodnot srovnatelných s hodnotami ostatních členů Rayleigh-Plessetovy rovnice a začne významně ovlivňovat růst kavitační bubliny. Doba, za kterou teplotní člen nabude srovnatelných hodnot, je označována jako první kritický čas  $t_{c1}$  [5].

Je-li rozdíl teplot  $(T_B(t) - T_\infty)$  velice malý, bublina nabude první kritický čas  $t_{c1}$  za delší dobu, než je doba samostatného růstu bubliny. Z tohoto důvodu jsou teplotní účinky považo-

vány za zanedbatelné a Rayleigh-Plessetovu rovnici lze zapsat do tvaru dle (2.6). Avšak s rostoucím rozdílem teplot ( $T_B(t) - T_\infty$ ) se první kritický čas  $t_{c1}$  zkracuje a tepelné účinky významně ovlivní dynamiku kavitační bubliny, resp. urychlí růst bubliny [5].

Dynamiku bubliny lze tedy dělit na dva typy. Je-li teplotní rozdíl zanedbatelný, dynamika bubliny není řízena tepelnými účinky, je dynamika označována jako „setrvačně“ kontrolovaná. Ve druhém případě je dynamika označována jako „tepelně“ kontrolovaná. Významný rozdíl teplot silně ovlivní dynamiku bubliny a kavitace začne při vyšších hodnotách tlaku, než je tlak nasycených par [5].

### 3. Zánik kavitační bubliny

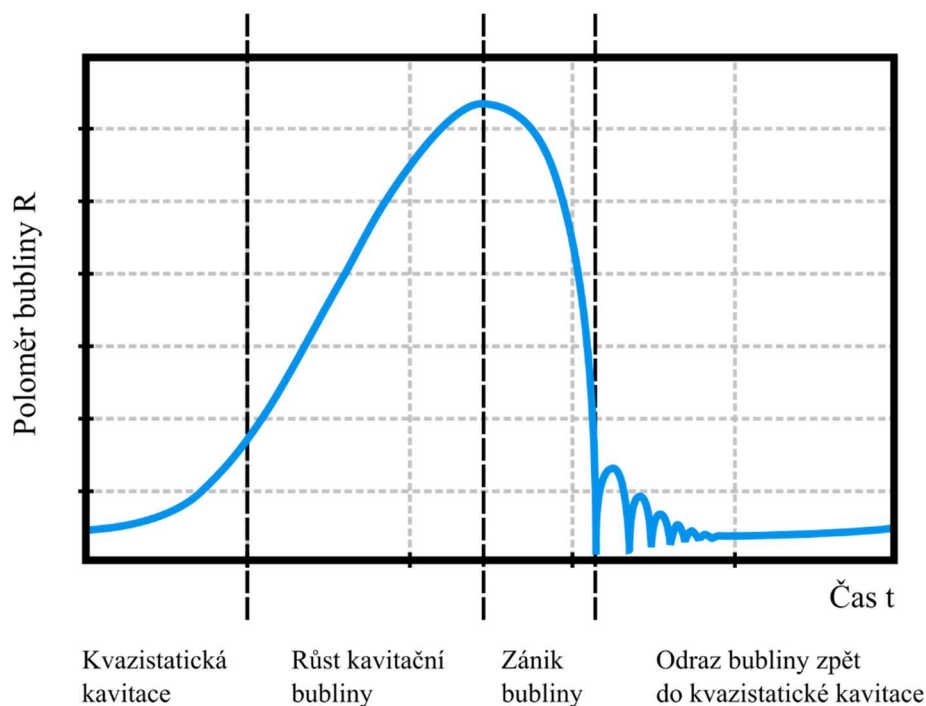
Růst kavitační bubliny je jev plynulý, zatímco zánik je děj chaotický doprovázený katastrofálními účinky. Studium kolabující bubliny je velice důležité, jelikož kavitační dopad má negativní vliv na povrch materiálu, který vede ke zkrácení životnosti hydrodynamických součástí. Dále je kavitace doprovázena ohromným hlukem a luminiscencí. Všechny tyto dopady jsou způsobeny vysokými teplotami, rychlostmi, tlaky a uvolněním velkého množství energie [5].

#### 3.1 Zánik osamocené bubliny

Kavitační bublina začne kolabovat, jakmile dosáhne svého největšího poloměru  $R_{max}$ , jenž je typicky 100krát větší než počáteční poloměr bubliny  $R_0$ , při nejnižším tlaku plynu bubliny [5]. Na počátku zániku bubliny je rychlost komprese velmi pomalá, nicméně její rychlost velice rychle vzrůstá, takže konec kolapsu bubliny probíhá velice rychle [7].

Okolní kapalina stlačuje bublinu. V poslední fázi kolapsu je plynný obsah bubliny velice rychle a agresivně stlačován okolní kapalinou. Chování takto stlačeného plynného obsahu se přirovnává k chování pružiny, jelikož stlačený plyn odráží povrchové rozhraní bubliny a vytváří tak novou, tzv. „odrazovou“ kavitační bublinu (z angl. *rebound bubbles*). Část energie kolabující bubliny se projeví tlakovou vlnou a část se předá odrazové bublině. Odrazová bublina následně roste do své nové maximální velikosti, která je samozřejmě menší z důvodu menší mechanické energie, a opět kolabuje [9]. Proces kolapsu a následného odrazu se několikrát opakuje, než se bublina utlumí, jak je vidět na obrázku 3.1 [5].

Předpokládalo by se, že nově vzniklá bublina by mohla způsobit menší poškození na materiálu z důvodu menší mechanické energie. Nicméně vlastnosti této nové bubliny vzniklé po odrazu se liší od vlastností původní kolabující bubliny a následný kolaps nové bubliny může mít stejný nebo dokonce i horší dopad na materiál než původní bublina [9].



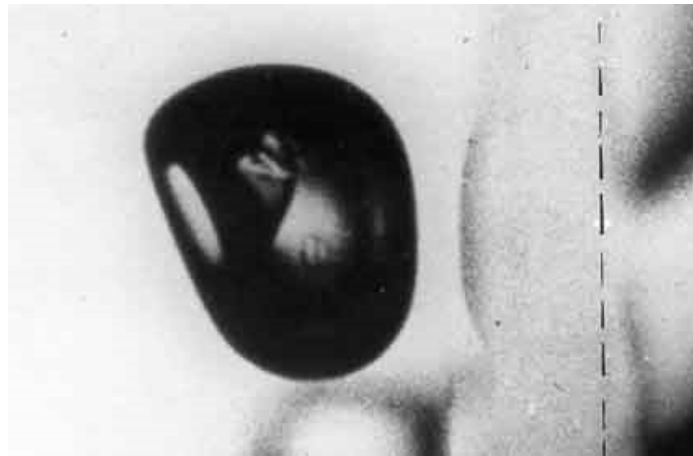
Obrázek 3.1 Kolaps a následný odraz kavitační bubliny [10]

Často po kolapsu a následném odrazu bubliny nevznikne jen jedna nová odrazová bublina, ale velké množství malých bublin tvořících mrak, vzniklé roztrháním původní bubliny.

Stane se tak v důsledku silné nestability kulového tvaru bubliny, která doprovází celý průběh kolapsu bubliny. Toto roztržení je často připisováno vlivu tzv. *microjetu* [5].

### 3.1.1 Microjet

Nachází-li se kolabující bublina v blízkosti pevné stěny, může přítomná pevná stěna způsobit deformaci jedné stěny bubliny daleko rychleji v porovnání s protější stěnou, v důsledku toho vniká paprsek kapaliny do bubliny vysokou rychlostí. Tento pozorovaný jev se nazývá *microjet* a je to dominantní prvek při zániku kavitační bubliny v přítomnosti pevné stěny. První pozorování *microjetu* byla při experimentech Naudeho a Ellise v roce 1961 a Benjamina a Ellise v roce 1966. Obrázek 3.2 ukazuje počáteční fázi *microjetu*, kde stěna je vyobrazena čárkovanou čárou [5].



Obrázek 3.2 *Microjet kolabující bubliny v blízkosti stěny [5]*

Z obrázku 3.2 lze také pozorovat, že *microjet* směřuje k pevné stěně. Právě tento paprsek směřující k materiálu může způsobit veliké poškození jeho povrchu, jelikož vnikající paprsek kapaliny naráží přímo na jeho povrch vysokou rychlostí. Směr *microjetu* nemusí vždy směřovat k jinému rozhraní. Například *microjet* kolabující bubliny, nacházející se u volné hladiny, směřuje směrem od volné hladiny. Důvodem je povrchová pružnost prostředí, která má vliv na směr *microjetu*. Přítomnost pevné stěny způsobí, že *microjet* kolabující bubliny směřuje k této pevné stěně. Musí tedy existovat kritická hodnota povrchové pružnosti určující směr *microjetu* k jinému rozhraní. Tohoto poznatku lze využít při použití speciálních nástřiků na povrchu materiálu k vyvarování se kavitačnímu poškození [5].

### 3.2 Vírová kavitace

V turbulentních proudech se vyskytuje nespočet vírů, jejichž jádro má daleko nižší tlak než okolní kapalina. Jádra některých vírů, například víry za vodními šrouby či turbín, mohou často dosáhnout tlaků nasycených par. Právě v těchto vírech se vyskytuje kavitace označovaná jako *vírová kavitace*. Prvně se ve vírech vyskytuje jen několik kavitačních bublin, avšak se snižováním tlaku se koncentrace bublin zvýší, až se nakonec jádro víru celé vyplní párou [5].

Častým místem výskytu kavitačních vírů jsou turbíny a lopatky vodních šroubů. Obrázek 3.3 ukazuje kavitační víry vyskytující se za špičkami jednotlivých lopatek a za jádrem vodního šroubu. Kavitační vír za špičkami lopatek je velice častý úkaz. Prvně je kavitace tzv. nespojená ke špičce lopatky, vyskytuje se za špičkou. Se zesilujícím vírem – snižováním kavitačního čísla – se kavitační vír pomalu přibližuje ke špičce lopatky, až se nakonec vír ke špičce přichytí [11]. Takle přichycená struktura víru je velmi stabilní [5]. Ve středu vodního šroubu zakončeném konvergujícím kuželem se kavitace vyskytuje ve víru vzniklém proléváním jednotlivých vírů kořenů lopatek. Kavitace je v tomto vzniklém víru velice stabilní, připomínající pletenec lan s prameny odpovídajícími počtu lopatek [11].



Obrázek 3.3 Vírová kavitace za lopatkami a jádrem vodního šroubu [12]

Při obtékání lopatky se může v důsledku prolínání kavitačních vírů od kaverny<sup>4</sup>, vyskytující se na povrchu lopatky, odtrhnout kavitace tvaru prstence nazývaná *prstencovitá vírová kavitace*. Po odtrhnutí od kaverny je prstenec samostatně unášen proudem a v kapalině přetrvává jistou dobu, než zanikne. Tuto kavitaci lze také najít převážně u ponořené kavitační trysky, kde vzniká proléváním kavitačních vírů a kvůli velikým tlakovým rozdílům [5].

V některých případech se při těchto tlakových výkyvech u hrdla ponořené trysky může místo prstencovité vírové kavitace vyskytnout dutina ve tvaru toroidu<sup>5</sup>. Tato dutina ve tvaru toroidu je vyplněná čistě plynem a párou a vznikne, pokud se tlak ve středu prstencovité vírové kavitace sníží pod hodnotu tlaku nasycených par dané kapaliny. V práci [13] od Chen Ji, Fang-Ye Lin a Jun Zou je popisován vznik a chování tohoto toroidu, kdy se objeví na hrdle ponořené

<sup>4</sup> Kaverna = kavitační zóna značných rozměrů (na povrchu tělesa) obklopující část profilu. [7]

<sup>5</sup> Toroid = těleso v prostoru získané rotací uzavřené rovinné křivky (např. kružnice) okolo osy ležící v rovině křivky a neprotínající křivku.

trubky, ve které je vyvolána kavitace. Toroid je prvně ovlivňován kavitací v trubici, nicméně postupem kapalinou kmitá o stabilní amplitudě. Když se toroid přiblíží k pevné stěně, tak začne nepravidelně kmitat. V těsné blízkosti stěny se toroid zvětší do své maximální velikosti až se nakonec rozštěpí na mnoho samostatných kavitačních bublin [13].

### 3.3 Kavitační mrak

Kavitační mrak je fenomén velké koncentrace kavitačních bublin v jednom místě, které se vznikají prolínáním kavitačních vírů například u kavitační trysky nebo jako odezva periodických poruch v proudu. Představující velké nebezpečí pro hydraulické stroje a jejich součásti, jelikož bubliny se souvisle formují, rostou a kolabují, což má za následek daleko větší poškození materiálu a hluk v porovnání s osamocenou kavitační bublinou [14].

Důležitým parametrem k porozumění chování kavitačního mraku slouží parametr interakce mraku  $\beta$  udávající, jakou hodnotou budou bubliny v mraku mezi sebou vzájemně působit. Podle [14] má tento parametr tvar:

$$\beta = \frac{\alpha_0 A_0^2}{R_0^2}, \quad (3.1)$$

kde  $\alpha_0$  je zlomek počáteční rovnovážné prázdnoty,  $A_0$  je počáteční poloměr kavitačního mraku a  $R_0$  je rovnovážný poloměr bubliny. Hodnota tohoto parametru také udává průběh kolapsu kavitačního mraku [14].

Při hodnotě  $\beta$  v řádech desítek a větších zanikají bubliny prvně na povrchu mraku a vytváří tlakovou vlnu postupující směrem do středu mraku. Jelikož tlaková vlna postupuje směrem do středu (koncentruje se tedy do jediného bodu), tak při postupu mrakem postupně zesiluje. Tyto tlakové vlny běžně dosahují hodnot až 10 barů (1 MPa), což by vysvětlovalo větší hluk a zvýšené poškození povrchu materiálu během zániku kavitačního mraku. Pokud je ale hodnota  $\beta$  pouze v řádech jednotek a menší, kolaps mraku začne v jeho středu. Jelikož rázová vlna postupuje směrem ze středu, už se nekonzcentruje do jediného bodu. Vlna tedy nezesiluje, což vede k velice slabé dynamice vlny, takže bude mít jen neškodný dopad na materiál [14].

### 3.4 Kavitační proud a kavitační tryska

Kavitační tryska je zařízení využívající kavitační dopad na materiál k vrtání, řezání, povrchové úpravě otryskáváním nebo k testování kavitační odolnosti materiálu. Kavitace se tvoří vně i v trysce ponořené pod vodou, vstříkující vodní paprsek vysokou rychlostí, při dosažení dostatečného tlakového rozdílu napříč tryskou [4].

Normálně je kavitační proud vstříkován z ponořené trysky do vodní nádrže, nicméně existuje i kavitační proud, který nemusí být pod vodou, ale může být i ve „vzduchu“. Tohoto kavitačního proudu je dosaženo pomocí speciální trysky. Do pomalu tekoucího vodního sloupce je vstříkován vysokorychlostní vodní paprsek. Takový kavitační proud byl vyvinut profesorem Hitoshi Soyamou a lze ho využít na komponenty, které nelze vložit do vodní nádrže [4].

#### 3.4.1 Struktura kavitačního proudu

Pozorování kavitačního proudu pouhým okem by mohlo vést k domněnce, že se jedná o nepřetržitý proud kavitace kuželovitého tvaru dopadající na povrch materiálu. To je ale nesprávná domněnka! Ve skutečnosti se jedná o periodický děj, i když je proudění vody z trysky nepřerušované. Z výpustě trysky proudí kapalina vysokou rychlostí z důvodu přítomného tlakového poklese vznikne vírová kavitace. Dál od trysky se po proudu víry kavitace prolínají a vznikne větší kavitační mrak, který pokračuje po proudu a naráží na povrch materiálu. Po dopadu kavitačního mraku vznikne z jeho části prstencová vírová kavitace, která se poté šíří dál podél povrchu materiálu. Obrázku 3.4 zobrazuje sérii snímků z vysokorychlostního fotoaparátu zachycujících periodický průběh vzniku, vývoje a zániku kavitace dopadající na materiál. V čase  $t = 0$  ms vzniká prolínáním kavitačních vírů kavitační mrak postupující směrem k materiálu a dopadá na jeho povrch v čase  $t = 1,50$  ms. V čase  $t = 1,75$  ms se z části kavitačního mraku vytváří kavitační prsteneček, který se šíří po povrchu materiálu a následně zaniká. V čase  $t = 4,25$  ms vzniká nový kavitační mrak a celý cyklus se opakuje [4].

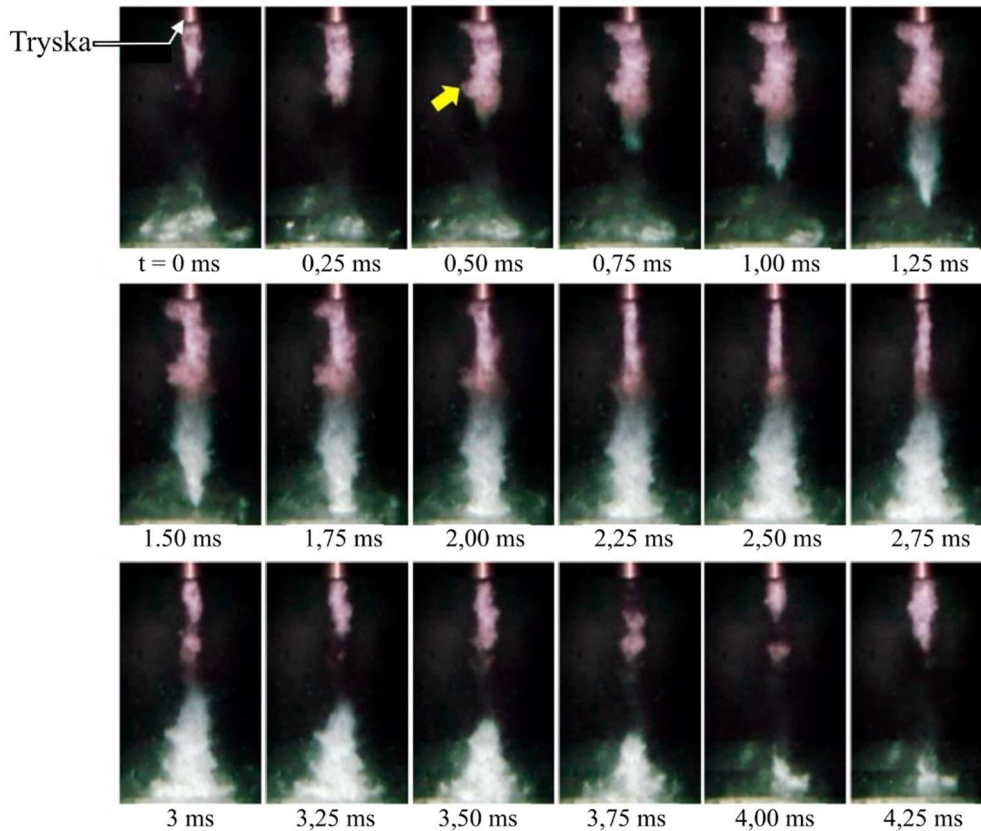
V obrázku 3.4 lze také zpozorovat žlutou šipku ukazující na kavitační mrak, který zůstává na stejném místě. Tato skutečnost, tedy stálost kavitačního mraku na jednom místě, ukazuje na dlouhou životnost mraku. Životnost kavitačního mraku je jeden z klíčových faktorů kavitačního proudění, protože určuje jeho agresivitu. Obecně platí, že s rostoucí délkou životnosti kavitačního mraku se zvyšuje agresivita proudu [4].

Jak již bylo řečeno, víry kavitace se prolínají a vznikne kavitační mrak, který následně dopadá na povrch materiálu. Po dopadu kavitačního mraku vznikne z jeho části prstencová vírová kavitace, která způsobí poškození materiálu prstencovitého tvaru v určité vzdálenosti od dopadajícího paprsku kapaliny. Důvodem, proč poškození nastává až v určité vzdálenosti od místa působícího proudu, je náhlý pokles a následné zvýšení tlaku. Při dopadu kavitačního mraku na povrch materiálu se ve středu paprsku tlak náhle zvýší a poté se ve vírové kavitaci prstencovitého tvaru tlak opět sníží. Během následného šíření prstencovité vírové kavitace se tlak opět zvýší a dojde k zániku kavitačních bublin [4].

Obrázek 3.5 zobrazuje dopad stálého kavitačního proudu na povrch materiálu<sup>6</sup>. V odhalené prstencové oblasti lze pozorovat plasticky deformované důlky zapříčiněné zánikem kavitačních bublin prstencovité vírové kavitace. Lze ale také zpozorovat bílou oblast, na kterou dopadalo jádro proudu trysky. Tato oblast nebyla poškozena kavitací, ale jádrem vodního pa-

<sup>6</sup> Materiál je čistý hliník, průměr trysky  $d = 2$  mm, tlak na ústí trysky  $p_1 = 30$  MPa, tlak na povrchu materiálu  $p_2 = 0,1$  MPa, standoff distance  $s_{opt} = 262$  mm, čas vystavení  $t = 1$  min [4]

prsku. Existují tedy dva dopady na povrch materiálu s různými mechanismy. V případě převážného výskytu prstencovité oblasti má hlavní dopad na materiál kavitace, ve druhém případě, tedy výskytu bílé oblasti v centru působení vodního sloupce, má dopad na materiál náraz od vodního sloupce. Oba tyto mechanismy se ale vyskytují současně během užívání kavitačního otryskávání, nebo otryskávání vodním paprskem. Pouze nastavením správných podmínek lze rozlišit, resp. zvýšit nebo snížit dopad jednotlivých mechanismů na materiál [4].



Obrázek 3.4 Série snímků kavitačního proud pořízené vysokorychlostní kamerou [15]



Obrázek 3.5 Oblast ošetřená kavitačním proudem [4]

### 3.4.2 Klíčové parametry

Agresivita kavitačního proudění záleží na mnoha klíčových faktorech, mezi které patří standoff distance (vzdálenost od ústí trysky po povrch materiálu), kavitační číslo, tlak na výpusti nebo také kvalita vody a rychlost šíření zvuku ve vodě. K dosažení nejlepších kavitačních účinků kavitační trysky je potřeba správná kombinace výše uvedených faktorů [4].

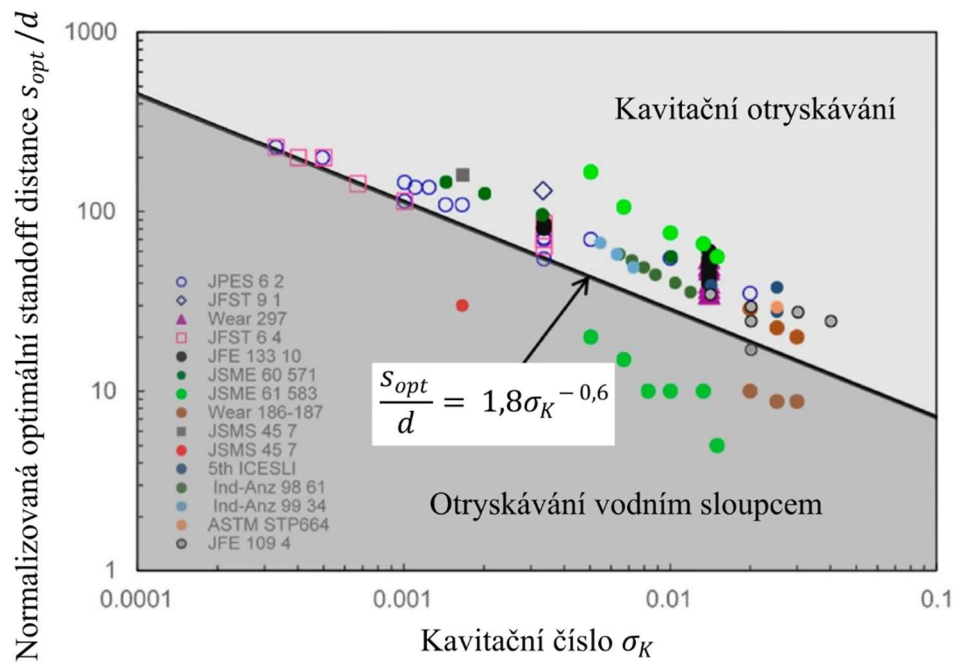
Jelikož se kavitace vyvíjí a zaniká v určité vzdálenosti od trysky, tak je vyžadována určitá vzdálenost od výpusti trysky po povrch materiálu, aby byl kavitační dopad na materiál nejsilnější. Tato vzdálenost od výpusti trysky po povrchu materiálu se nazývá *standoff distance*. Pokud by byla *standoff distance* nedostatečná, měl by hlavní dopad na materiál náraz vodního paprsku. K jednoznačnému určení hlavního vlivu na povrch materiálu navrhl profesor Soyama klasifikační mapu (obrázek 3.6), kde přímka určená rovnicí (3.2) rozděluje oblast kavitačního otryskávání – dopad na materiál má kavitace – a oblast otryskávání vodním sloupcem – kde hlavní dopad na materiál má náraz vodního sloupce. Rovnice (3.2) má tvar [4]:

$$\frac{s_{opt}}{d} = 1,8\sigma_K^{-0,6}, \quad (3.2)$$

kde  $s_{opt}$  je *standoff distance*,  $\sigma_K$  je kavitační číslo a  $d$  je průměr hrdla trysky. Ve spodní oblasti má hlavní dopad na materiál vodní sloupec a ve vrchní oblasti má hlavní dopad na materiál kavitace [4]. Jak již bylo zmíněno, během užívání kavitačního proudu se zde objevují oba mechanismy, tedy kavitační dopad a dopad vodního paprsku. Až při správném nastavení požadovaných parametrů, tedy *standoff distance* a kavitačního čísla, lze docílit maximálního účinku kavitace během úpravy povrchu materiálu [4].

Dalším klíčovým faktorem je tlak vstřikujícího vodního sloupce z trysky. Se zvyšujícím se tlakem se zvyšují účinky otryskávání jen do určité maximální hodnoty. Překročení této maximální hodnoty, tedy příliš vysoký tlak vstřikujícího vodního sloupce z trysky, ale naopak sníží účinky kavitačního otryskávání [4].

Geometrie trysky má také velký vliv na intenzitu agresivity kavitačního proudu. Správnou modifikací trysky se dokázalo dosáhnout až 60krát vyšší intenzity agresivity kavitace než u standardní trysky [4].



Obrázek 3.6 Klasifikační mapa kavitačního otryskávání a otryskávání vodním paprskem [16]

## 4. Kavitační dopad na materiál

### 4.1 Kavitační poškození materiálu

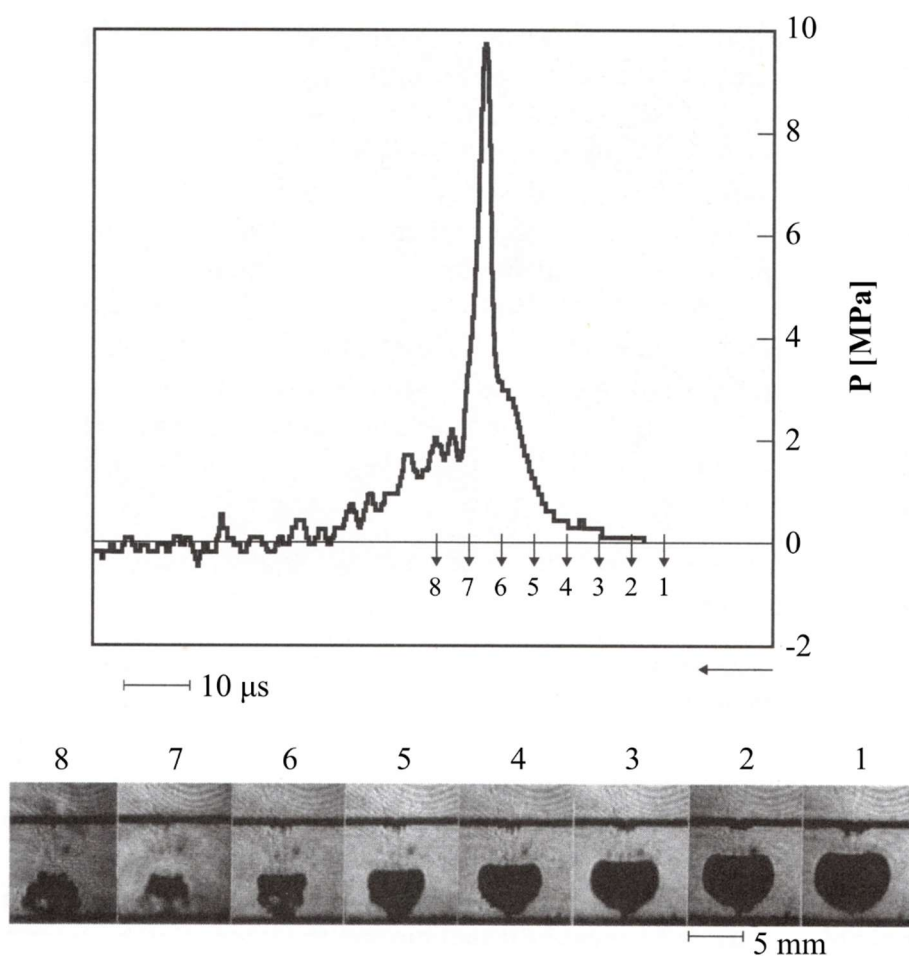
Při konstrukcích hydraulických strojů je snaha co nejvíce zamezit výskytu kavitace. Dlouhodobé vystavení materiálu kavitaci vede k poškození a následnému vydrolení povrchu materiálu (obrázek 4.1). Tento negativní složitý proces, vedoucí k rozrušení povrchu materiálu, je označován jako kavitační eroze [7] a je připisován společnému působení mechanických, chemických a elektrických faktorů. Za základní faktor materiálového poškození je (podle Plesseta a Ellise) považováno mechanické působení – kulové tlakové vlně a microjetem – od kolabující bubliny [7].



Obrázek 4.1 Poškozený povrch lopatky kavitací [17]

Problém poškození materiálu čistě mechanickým působením kolabující bublinou je ale daleko složitější kvůli několika faktorům. Prvním faktorem je vliv komplikovaného nestálého proudu kapaliny a dalším faktorem je různá odezva jednotlivých materiálů na kavitační působení. Také během kavitace neprobíhá jen kolaps jedné osamocené bubliny, ale velkého množství bublin najednou. Není tedy zcela jasné, které mechanické působení kapaliny přesně způsobuje tak fatální poškození povrchu materiálu. Zda má hlavní podíl na poškození povrchu materiálu vliv tlakové vlny od kolabující bubliny, vliv microjetu nebo působení obou vlivů je otázka diskutována již dlouhá léta. [5]

V 1983 se v Japonsku Shima a další se zabývali vlivem odrazových bublin, vzniklé kolapsem původní bubliny, na materiál. Své pozorování zaznamenali vysokorychlostním fotoaparátom spolu s odpovídající tlakovou stopou zobrazené na obrázku 4.2. Snímky pořízené vysokorychlostním fotoaparátom zachycují kolaps bubliny v blízkosti pevné stěny. Konečná fáze bubliny neboli minimální objem bubliny je mezi snímky 6 a 7, kdy dochází k odrazu bubliny a vyvolání tlakové vlny. Tlakové maximum je také mezi snímky 6 a 7. Z těchto pozorování vychází hypotéza, že hlavní roli v deformaci materiálu hraje tlaková vlna a microjet má jen doplňující vliv. Ve stejném čase Fujikawa a Akamatsu v roce 1980 studovali stejnou otázku a dospěli ke stejnému závěru jako Shima. Jiné studie naopak ukazují zcela jiné výsledky. Experimenty Kimota v roce 1987 zaznamenaly významné tlakové pulzy od obou vlivů, tlakové vlny a microjetu. I další studie ukázaly zcela odlišné výsledky tohoto problému, který není doposud zcela objasněn [5].



Obrázek 4.2 Snímky kolabující bubliny v blízkosti pevné stěny spolu s tlakovou stopou [5]

I přes stále neobjasněnou otázku, který mechanický účinek má hlavní podíl na poškození materiálu, jsou oba mechanické účinky charakteristické svojí silnou lokalizovatelností dynamického namáhání. Kulová tlaková vlna a microjet dokážou totiž účinně zasáhnout a zatížit jen minimální plochu vrstvy materiálu, která je srovnatelná s velikostí zrn materiálu [7]. První rozrušení proto začne v nejslabším místě, například v hraničních vrstvách mezi jednotlivými zrny nebo strukturními složkami. Samostatný hydraulický ráz kulové tlakové vlny či microjetu neporuší materiál, destruktivnost spočívá v opakovatelnosti nárazů. Při opakovaném vystavení materiálu hydraulickým nárazům je povrchová vrstva materiálu neustále plasticky deformována. Tato únava materiálu vede po určité době k odpoutání zpevněné, deformované vrstvy od základního materiálu. Odpoutání nastane z důvodu odlišných mechanických vlastností jednotlivých vrstev materiálu. V materiálu vzniknou malé trhlinky, jejichž růst a postupné spojování vede k rozrušování povrchu materiálu a následnému vydrolování kousků materiálu [7].

## 4.2 Kavitační odolnost materiálů

Vystaví-li se různé druhy materiálu kavitačnímu působení, bude po určité době povrch jednotlivého materiálu odlišně poškozen, respektive jednotlivý materiál bude odlišně odolávat kavitačnímu působení. Tato schopnost materiálu se nazývá kavitační odolnost a záleží na dvou faktorech – druhu a stavu materiálu – určujících mechanické, chemické, elektrochemické a další vlastnosti materiálu. Druhem materiálu se rozumí jeho chemické složení, stavem se naopak rozumí mechanické a tepelné zpracování materiálu, úprava a celková kvalita jeho povrchu [2].

Pro určení kavitační odolnosti materiálu se vykonávají dva typy zkoušek, a sice zkouška kavitačních důlků a zkouška eroze materiálu. Obě zkoušky jsou založené na stejném principu, a to vystavení materiálu působení kavitace, avšak každá za jiným účelem. Při zkoušce eroze materiálu je materiál vystaven přímému kavitačnímu působení na dlouhou dobu a soustředí se na sledování úbytku materiálu [18]. Naměřená data se proloží křivkou, určující celkový úbytek materiálu za čas. Výsledný graf je hlavním záznamem zkoušky – graf celkového úbytku materiálu za jednotku času (obrázek 4.3 b) – klasifikující a porovnávající odolnost jednotlivých materiálů [19]. Naopak u zkoušky kavitačních důlků je materiál vystaven kavitačnímu působení jen na krátkou dobu (jen pár sekund) a následně jsou zkoumány jednotlivé důlky vytvořené kolapsem osamocené bubliny [18]. Účelem zkoušky je odhad agresivity kavitačního proudu, který může sloužit k predikci úbytku materiálu jako funkci času působení kavitace [20].

### 4.2.1 Zkouška kavitačních důlků (cavitation pitting test)

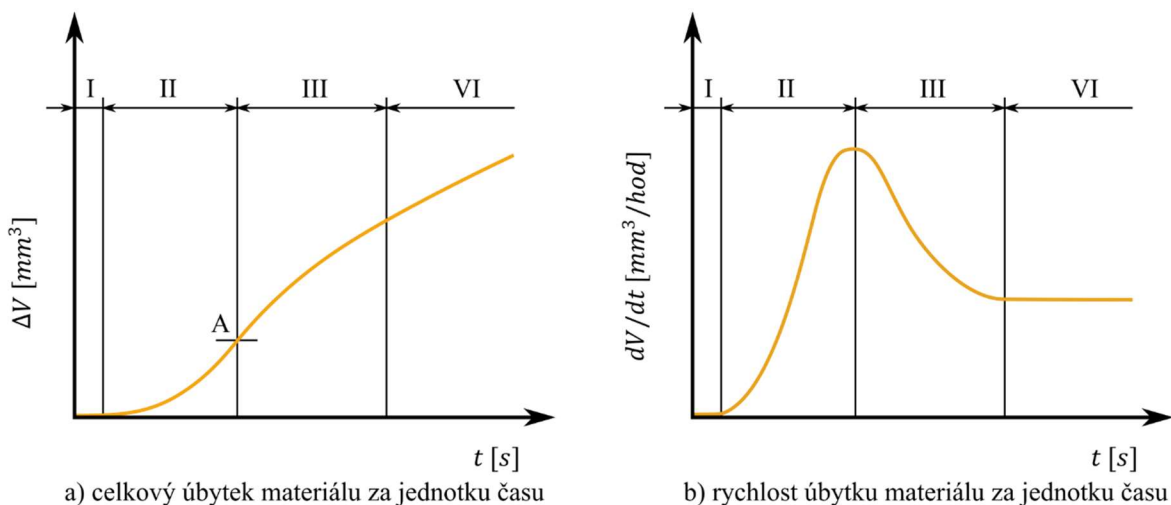
K vyhodnocování síly kavitačního působení se u tohoto typu zkoušek využívá jako senzor samotný testovací vzorek. Zkoušky slouží k měření, charakteristice, k odhadu agresivity kavitačního proudu a následně predikci materiálového poškození kavitací. Vzorek je vystaven kavitačnímu působení jen během inkubační doby, materiál je tedy deformován jen plasticky a nedochází k žádnému úbytku materiálu. Plastická deformace na povrchu materiálu je reprezentována důlky, jejichž počet udává agresivitu kavitačního proudu. Existuje mnoho technik sčítání důlků a měření kavitačního poškození, mezi něž patří 3D měření měřičem tvrdosti nebo 3D laserovým profilometrem. Výstupem poslední zmíněné metody jsou dva parametry, a sice míra počtu důlků  $N_d$ , popisující počet důlků na jednotku plochy za jednotku času, a míra úbytku materiálu  $V_d$ , popisující objemový úbytek materiálu za jednotku času [21].

### 4.2.2 Zkouška kavitační eroze

Jedním z hlavních parametrů měřených při zkouškách kavitační eroze je objemový úbytek materiálu za jednotku času [2]. Neexistuje hodnota objemového úbytku, která by dokázala charakterizovat kavitační odolnost materiálu. Objemový úbytek není totiž po celou dobu konstantní, avšak s časem prochází určitými stadii charakterizujícími materiálovou odolnost vůči kavitačnímu působení [19].

Jednotlivá stadia jsou určena z grafu rychlosti objemového úbytku materiálu za jednotku času (obrázek 4.3). Během inkubační doby (I) nedochází k úbytku materiálu, nebo dojde jen k úbytku v tak malém množství, že je považován za zanedbatelný. Kavítace vyvolá plastické deformace povrchu materiálu, projevující se zpevněním a změnou struktury, vyvoláním vnitřních pnutí a oxidací povrchové vrstvy. Délka inkubační doby udává kavitační odolnost materiálu pro nastavené podmínky kavitační zkoušky. Čím déle materiál setrvává v inkubační době, tím je odolnější proti kavitačnímu působení, přesto není inkubační doba dobrým měřítkem kavitační odolnosti. Následně rychlost úbytku přechází do stadia akcelerace (II). V tomto stadiu rychlost úbytku velice rychle roste až do dosažení reflexního bodu  $A$ , označujícího největší rychlost úbytku materiálu. Po dosažení reflexního bodu  $A$  nastává stadium snižování rych-

losti (III), v němž rychlost úbytku pomalu klesá. V některých případech rychlost úbytku materiálu přestane klesat a dostává se do poslední fáze, stadia ustáleného bodu (IV), kde se rychlost úbytku ustálí na konstantní hodnotě [2].



Vysvětlivka:

I – inkubační doba; II – stadium akcelerace; III – stadium zpomalování; IV – stadium ustáleného bodu;  
A – reflexní bod

Obrázek 4.3 Úbytek materiálu za jednotku čas [2]

Jak již bylo zmíněno, neexistuje jediná hodnota úbytku charakterizující kavitační odolnost materiálu. Hrubá data objemového úbytku, získaná postupným měřením zkušebních vzorků, dají vzniknout křivce celkového úbytku materiálu za čas. Tato křivka celkového úbytku, zobrazená na obrázku 4.3 b), je hlavním výsledným dokumentem zkoušky kavitační eroze udávající celkový úbytek materiálu za celkový čas. Neexistuje žádná absolutní definice „erozní odolnosti“, proto se výsledky jednotlivých zkušebních vzorků navzájem mezi sebou porovnávají. Pro porovnávání výsledků odlišných typů zkoušek kavitační eroze se získané výsledky jednotlivých materiálů přepočítají na normalizovanou erozní odolnost<sup>7</sup> vzhledem k alespoň jednomu standardnímu referenčnímu materiálu, testovanému za stejných podmínek při prováděné zkoušce [19].

<sup>7</sup> Normalizovaná erozní odolnost  $N_e$  = „rozměr erozní odolnosti materiálu relativní s specifickým referenčním materiálem, vypočtený vydělením míry objemového úbytku referenčního materiálu testovacím materiálem, pokud oba jsou rovněž testovány a rovněž analyzovány“ [19]

### 4.3 Metody zkoušek kavitační eroze

Kavitační dopad na materiál způsobuje jeho poškození, proto je snaha testovat a najít nejvhodnější materiál nebo speciální nástřík chránící materiál. Kavitační eroze je ale zdoluhavý proces a její následky se mohou projevit až za dobu několika let. Testování materiálů nemůže trvat tak dlouhou dobu, z tohoto důvodu byly vyvinuty metody, které otestují materiálovou odolnost vůči kavitační erozi za relativně krátkou dobu.

#### 4.3.1 Metoda kavitačního proudu kapaliny (ASTM G134-17)

Metoda je založena na principu kavitačního proudu, který byl popsán v kapitole 3.4. Do testovací komory s kapalinou je vložen a upevněn testovací vzorek, na který přímo dopadá kavitační proud. Zánik kavitačních bublin proběhne na povrchu vzorku a způsobí tak jeho poškození. Testovací podmínky jsou nastaveny pro nejintenzivnější dopad kavitačního proudu na povrchu testovaného materiálu. K regulaci proudu kapaliny se užívá škrcení trysky. Pro účely této zkoušky je proto kavitační číslo<sup>8</sup> zredukováno na vztah (4.3) [19]:

$$\sigma_K = \frac{p_d - p_n}{p_u - p_d}, \quad (4.3)$$

kde  $p_n$  je tlak nasycených par,  $p_d$  je statický tlak v testovací komoře a  $p_u$  je vstupní tlak proudu kapaliny. Při platnosti podmínky  $p_u \gg p_d \gg p_n$ , je pro mnoho kapalin vztah (4.3) zjednodušen na tvar [19]:

$$\sigma_K = \frac{p_d}{p_u}. \quad (4.4)$$

Zařízení zkušební komory je zobrazeno na obrázek 4.4 Pomocí čerpadla je kapalina o tlaku  $p_u$  přiváděna ponořenou tryskou do komory naplněné kapalinou o konstantním tlaku  $p_d$ . Ústí trysky je nastaveno kolmo na povrch materiálu. Při nastavování testovacích podmínek – tlaku kavitačního proudu, standoff distance – může dojít k poškození testovacího materiálu a tím znehodnotit kavitační zkoušku. K ochraně materiálu slouží pohyblivý deflektor, který se vloží do cesty kavitačního proudu k zamezení poškození povrchu materiálu. Během celého trvání zkoušky se musí monitorovat testovací podmínky, a to vstupní tlak proudu kapaliny  $p_u$ ,

---

<sup>8</sup> Kavitační číslo [19]:

$$\sigma_K = \frac{(p_d - p_n)}{\frac{1}{2} \rho v^2}, \quad (4.1)$$

kde  $p_n$  je tlak sytých par,  $p_d$  je statický tlak testovací komory a  $\rho$  je hustota kapaliny a  $v$  je rychlost kapaliny. Pro proudění skrz otvor platí [19]:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = p_u - p_d, \quad (4.2)$$

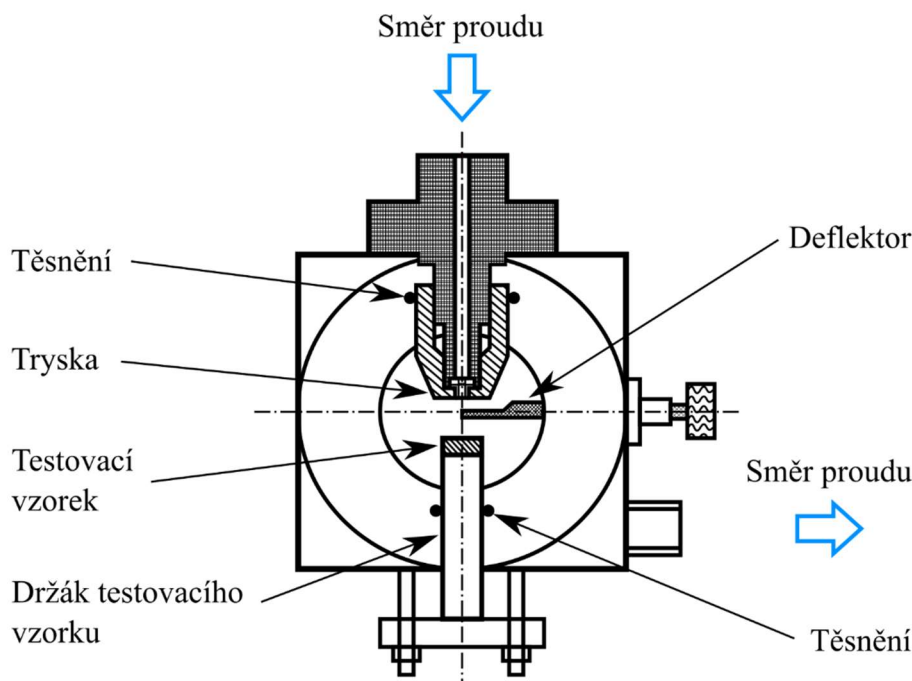
kde  $p_u$  je vstupní tlak proudu kapaliny.

Z důvodu škrcení trysky je tlak v testovací komoře  $p_d$  roven tlaku sytých par  $p_n$ . Vztah pro kavitační číslo (4.1), s užitím vztahu (4.2), je zredukováno na vztah [19]:

$$\sigma_K = \frac{p_d - p_n}{p_u - p_d}. \quad (4.3)$$

objemový průtok  $Q_V$  a teplota v testovací komoře. Je tedy nutné odvod vybavit potřebnými měřidly. Jestliže zkušební komora není schopna vydržet maximální provozní tlaky, je nutné okruh vybavit přetlakovým ventilem jako ochranným prvkem. Pokud by zkušební komora nebyla schopna vydržet provozní tlaky, ventil se otevře a sníží tak tlak v okruhu. Vzorek je v testovací komoře upevněn v kleštinách mezi dvěma čelistmi. Je nutné, aby vzorek byl umístěn vždy na stejné místo. K tomu účelu je na držáku vyznačena rýska, označující původní polohu upnutí vzorku. Povrch vzorku musí být správně opracován, tzn. musí být plochý, bez škrábanců a důlků a vybroušený na maximální drsnost  $0,4 \mu\text{m}$  [19].

Pro testy se nejčastěji využívá voda, nicméně pro specifické podmínky se užívají i jiné kapaliny, například různé oleje. Zkouška využívá dva testovací okruhy, a to otevřený a recirkulační. Testy s vodou využívají otevřený okruh, kde je voda přivedena například z vodovodu a následně odvedena pryč z okruhu. Avšak pro testy některých kapalin, jako například olejů, je vyžadován okruh recirkulační. Kapalina se čerpá ze sběrné nádrže do okruhu a vrací se zpět do sběrné nádrže. Obrázek 4.5 zobrazuje možné zapojení okruhu [19].

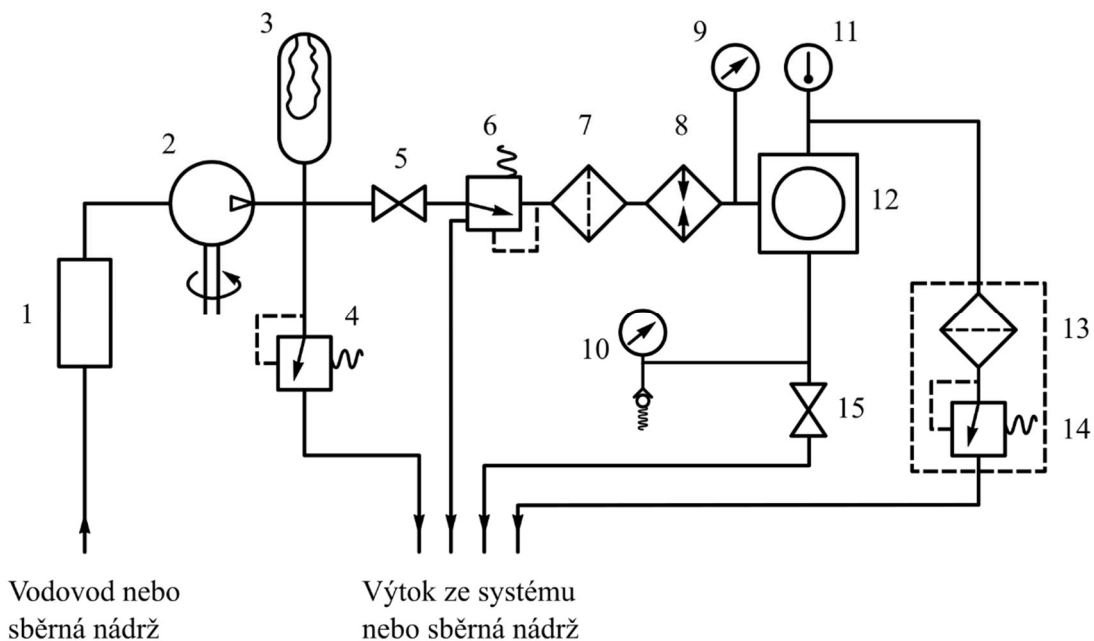


Obrázek 4.4 Sestava komory pro zkoušku kavitační eroze [19]

Před začátkem testu se testovací vzorek očistí a zváží s přesností minimálně  $0,1 \text{ mg}$ . Nastaví se vstupní tlak trysky  $p_u$  a odpovídající standoff distance – vzdálenost trysky od materiálu – pro nejintenzivnější účinek kavitačního proudu. Během hlavního testu zůstává kavitační číslo konstantní z důvodu zachování stejných kavitačních podmínek v průběhu celého trvání zkoušky. Očištěný vzorek se vloží do komory, do které se následně nalije voda, systém se ovzdušní a zkouška začne. Po jisté periodě se zkouška zastaví, vzorek se odejme z komory, usuší se a zjistí se jeho nová hmotnost. Po zvážení se vzorek vloží zpět do komory a zkouška pokračuje. Tento proces se několikrát opakuje alespoň do doby, dokud průměrná hodnota rychlosti úbytku materiálu nedosáhne alespoň svého maxima a nezačne klesat [19].

Získaná data hmotnostního úbytku se zaznamenají do grafu a proloží se jimi křivka celkové eroze materiálu za jednotku času. Výsledný graf je hlavním záznamem erozní zkoušky a ukazuje celkový úbytek materiálu za celkový čas. Výsledné grafy celkového úbytku jednotlivých

materiálů se navzájem mezi sebou porovnávají. K možnému porovnávání úbytku různých materiálů se data hmotnostních ztrát převedou na ztráty objemové. s [19].



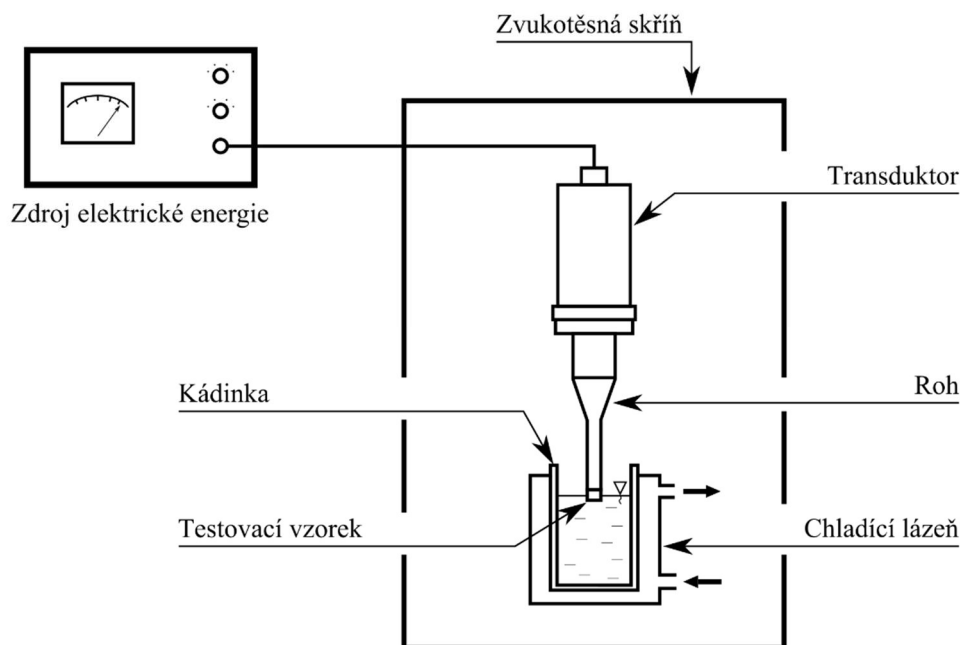
(1) tlumič pulzací, (2) čerpadlo, (3) tlumič pulzací hydraulického akumulátoru, (4) přetlakový ventil, (5) uzavírací ventil, (6) regulační ventil tlaku nebo obtokový škrťací ventil, (7) filtr, (8) ohřívač, (9) tlakoměr, (10) tlakoměr se zpětným ventilem, (11) teploměr, (12) testovací komora, (13) filtr, (14) regulátor tlaku, (15) odvodňovací ventil

Obrázek 4.5 Schéma zapojení testovacího okruhu [19]

#### 4.3.2 Metoda kmitající aparatury (ASTM G32-16)

Další metodou pro testování a odhad materiálové odolnosti proti kavitace erozi je metoda ASTM G32. Na rozdíl od metody ASTM G134 je kavitace vyvolána kmitajícím pohybem testovacího vzorku, ponořeného do kapaliny. Vibrační pohyb materiálu je realizován 20 kHz ultrazvukovým transduktorem [22].

Schéma testovacího aparátu je zobrazeno na obrázek 4.6. energii sestavě dodává dostatečně silný zdroj elektrické energie. Vzorek je připevněn přes speciální zúžený válcovitý prvek, tzv. „roh“ (z angličtiny *horn*), k ultrazvukovému transduktoru. Cílem „rohu“ je dosažení vyšších vibračních amplitud testovacího vzorku, než jaké dokáže vyvolat transduktor. Pro standardní testy se užívá destilovaná voda, nicméně pro speciální případy lze použít i jiné kapaliny. Testovací kapaliny si musí během celého testu zachovat stálou teplotu. Je proto nezbytné přesně monitorovat a ovládat teplotu kapaliny během zkoušky. Tohoto lze dosáhnout chlazením kádinky vodní lázní nebo chladicí smyčkou s termostatickou regulací, omotanou kolem testovací kádinky. Dále je také nutné přesně monitorovat a ovládat frekvenci a amplitudu [22].



Obrázek 4.6 Sestava aparatury kavitace zkoušky [22]

Dalším důležitým faktorem je povrchová úprava testovacího vzorku, jelikož výsledky kavitace zkoušky závisí právě na povrchové úpravě vzorku. Nekvalitní povrchová úprava může vést ke zkreslení a znehodnocení výsledků kavitace zkoušky. Proto musí být povrch vzorku upraven na maximální drsnost  $0,8 \mu\text{m}$  a bez jakých viditelných vad, jako jsou škrábance či důlky [22].

Před začátkem testu se vzorek pečlivě očistí a zváží k obdržení jeho počáteční hmotnosti. Po zvážení se vzorek našroubuje na „roh“, ponoří se do určité hloubky kapaliny a zkouška začne. Po uplynutí určité periody se zkouška zastaví a vzorek se odejme z „rohu“. Vzorek se pečlivě usuší, očistí a zvážením se zjistí jeho nová hmotnost. Jakmile se vzorek zváží, našroubuje se zpátky na „roh“, vloží se zpět do kádinky a zkouška pokračuje. Zkouška vzorku probíhá do doby, dokud průměrná hodnota rychlosti úbytku materiálu nedosáhne alespoň svého maxima a nezačne [22].

Stejně jako u metody ASTM G-134 se po ukončení zkoušky naměřená data materiálového úbytku zaznamenají do grafu celkového úbytku materiálu za celkový čas a proloží křivkou celkové eroze materiálu. Výsledný graf je hlavním záznamem zkoušky kavitační eroze. Tyto výsledné grafy jednotlivých materiálů se navzájem porovnávají k nalezení materiálu s nejvyšší kavitační odolností. Pro porovnávání výsledků odlišných typů zkoušek kavitační eroze se získané výsledky zkoušky úbytku materiálu přepočítají na normalizovanou erozní odolnost jednotlivých materiálů, testovaných za stejných podmínek při provádění zkoušky [22].



## 5. Návrh nového testovacího zařízení

---

### 5.1 Úvod

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zhotovit návrh stávajícího experimentálního stendu pro měření odolnosti materiálu proti kavitační erozi. Výsledný návrh komory pro testovací kavitační eroze vychází z normalizované metody ASTM G-134, která byla popsána v kapitole 4.3.1. Kavitace je vyvolána vysokorychlostním paprskem kapaliny z trysky ponořené pod hladinou. Kavitační proud dopadá na materiál a neustálým „bombardováním“ jeho povrchu dochází po určitém čase k jeho vylamování – ke kavitační erozi.

Výsledné testovací zařízení bude sloužit k testování odolnosti proti kavitační erozi jednotlivých materiálů, jako jsou nejrůznější kovy a jejich slitin, plastů či k testování nejrůznějších typů žárových nástřiků, které by byly nanесeny na materiál a chránily by tak jeho povrch proti kavitačnímu opotřebení.

### 5.2 Důležité body návrhu

Testovací zařízení by mělo zajišťovat mobilitu, celkovou kompaktnost a převážně by mělo obsahovat řešení jednoduchého a přesného nastavování testovacích podmínek. Zařízení by mělo umožňovat přesné nastavování standoff distance mezi ústím trysky a vzorkem s rozsahem do 100 mm. Dále by zařízení mělo vyřešit problematiku nastavování ponoru vzorku, a to vše tak, aby byla zajištěna neměnnost podmínek během celého trvání zkoušky.

Dalším důležitým bodem je upnutí vzorku a jeho jednoduchá manipulativnost. Jak již bylo popsáno v kapitole 4.3.1, pro sledování a měření úbytku materiálu je nutné pozastavit zkoušku a vzorek vyjmout z testovací komory. Následně je zvážením zjištěna nová hmotnost vzorku, vzorek je navrácen zpět do testovací komory a zkouška pokračuje. Testovací vzorek bude několikrát vyjímán z testovací komory kvůli měření hmotnostního úbytku. Je tedy nezbytné, aby návrh zajišťoval stálou polohu vzorku v testovací komoře během celého trvání zkoušky.

### 5.3 Původní testovací zařízení

Původní testovací komora vychází z normalizované metody ASTM G-134 – testování kavitační odolnosti materiálu kavitační tryskou. Okruh testovacího zařízení byl tzn. otevřený, což znamená okruh, ve kterém je voda přivedena ze zdroje – například z vodovodu či nádrže s kapalinou – a po průchodu testovacím okruhem je odvedena ze soustavy pryč do odtoku.[19]

Testovací zařízení nemělo vlastní komoru, ale byla používána testovací komora (obrázek 5.1) jiného testovacího zařízení, přesněji zařízení k testování kavitační odolnosti ve Venturiho trubici. Komora obsahovala přepad, který sloužil k udržení konstantní výšky hladiny. K úplnému vypuštění kapaliny byla komora vybavena vypouštěcím ventilem.

K čerpání kapaliny – užitkové vody – z rezervoáru bylo použito vysokotlaké čerpadlo Interpump Evolution 2 E2B2014 (Tabulka 1) s třífázovým asynchronním motorem Mazzoni MEC 112 (Tabulka 2). Čerpadlo společně s motorem a rozvaděčem bylo umístěno v malém kovové rámu (obrázek 5.2) o rozměrech 460×700×570 mm (v×š×h), obsahující otočnou kolečku umožňujícími jeho mobilitu. Čerpadlo bylo dále vybaveno automatickým spínačem, který byl schopen čerpadlo po uplynutí nastaveného času vypnout a během zkoušky tak nebyla nutná přítomnost obsluhy u testovacího zařízení.

Tabulka 1: Technické parametry čerpadla Interpump Evolution 2 E2B2014

Průtok [l/min]	Maximální výstupní tlak [bar]	RPM [ot/min]	Výkon [kW]
230-400	20	1450	5,37

Tabulka 2: Technické parametry třífázového asynchronního motoru Mazzoni MEC 112

Elektrické napětí [V]	Frekvence [Hz]	Proud [A]	RPM [ot/min]	Výkon [kW]
230-400	50	21-12	1450	5,5



Obrázek 5.1 Původní testovací komora společně s testovacím okruhem [zdroj: autor]



Obrázek 5.2 Rám s čerpadlem a s motorem [zdroj: autor]

V původním provedení testovacího zařízení nebyly testovaný vzorek ani tryska pevně spjaty s testovací komorou. Vzorek i tryska byly upevněny k samostatnému kovovému rámu (obrázek 5.3), který byl ponořen pod hladinu testovací komory. Tento rám společně s testovacím vzorkem a tryskou (obrázek 5.4) byl za trysku zavěšen nad testovací komoru. Rám bylo možné plně vyjmout z testovací komory za účelem snadné manipulace s testovacím vzorkem a tryskou mimo testovací komoru. Tato skutečnost představovala obrovskou výhodou rámu, jelikož nebylo nutné při každé kontrole, měření hmotnosti či výměně testovacího vzorku vypustit celou testovací komoru a poté ji znovu napustit. Rám se vzorkem byl jednoduše vyjmut z testovací komory a veškerá manipulace se vzorkem či s tryskou probíhala mimo testovací komoru. Po dokončení veškerých úkonů se rám společně se vzorkem opět vložil zpět pod hladinu testovací komory.

Materiál byl vložen do čtvercového držáku ve spodní části rámu a byl upnut pomocí čtyř šroubů, z každé strany jedním šroubem. Standoff distance byla nastavována posuvem trysky vůči rámu. Ve vrchní části rámu se uvolnily aretační šrouby a trysku bylo možné nastavit do požadované standoff distance. K nastavování požadované vzdálenosti byly používány přesné válečkové měřky. Po nastavení byla tryska opět za-aretována dvěma šrouby.

Původní verze měla několik nedostatků, mezi něž patří například nemobilita a velikost testovací komory. Ta je se svými rozměry 930×1600×1550 mm (v×š×h) přímo enormní. Ko-

mora nebyla přímo určena pro zkoušku kavitačním paprskem, ale byla součástí jiného testovacího zařízení, které nevyžadovalo mobilitu a kompaktnost komory. Mezi další nedostatek patří upínání materiálu. Šrouby, sloužící k upnutí vzorku k rámu, byly špatně přípustné. Z tohoto důvodu bylo upínání materiálu poněkud nepraktické.

Jsou zde ovšem i kladné prvky původního řešení. Velkou výhodou původního řešení je koncept vyjímatelného rámu, jeho jednoduchost a samotná velikost, která s rozměry 180×150×40 mm (v×š×h) činila rám velice kompaktní.



*Obrázek 5.3 Rám [zdroj: autor]*

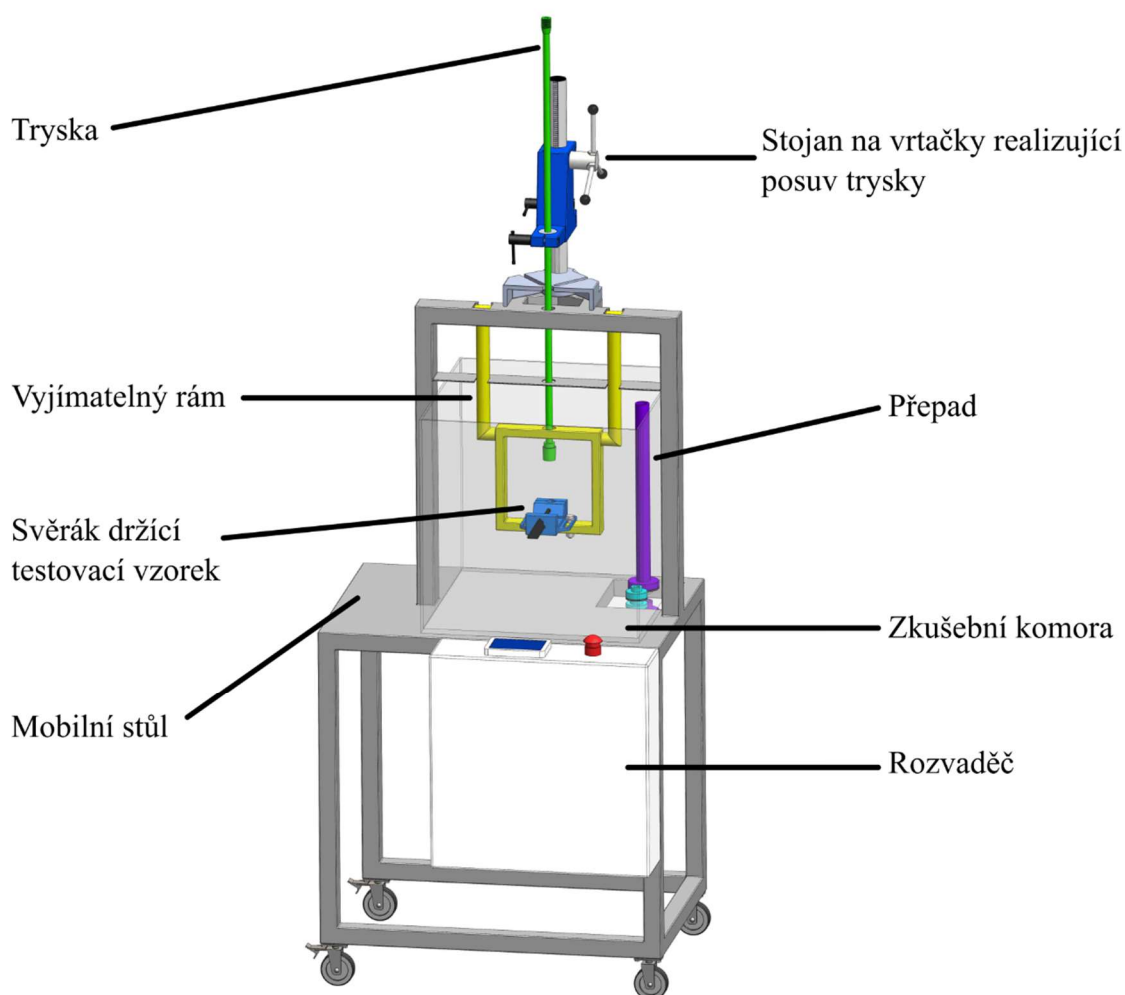


*Obrázek 5.4 Rám s tryskou [zdroj: autor]*

## 5.4 Návrh nového testovacího zařízení

Návrh nového testovacího zařízení vychází z normalizované metody ASTM G-134 – testování kavitační odolnosti kavitační tryskou. V novém návrhu je využit koncept vyjímatelného rámu, který byl užíván v původním testovacím zařízení. Koncept je zachován, jelikož rám umožňuje pohodlnou manipulaci se vzorkem mimo testovací komoru. Není tedy nutnost vypouštět a znovu opět napouštět celou testovací komoru pro vyjmutí vzorku.

Testovací zařízení má být mobilní a kompaktní, aby mohla kavitační zkouška být provedena kdekoliv. Návrh nového testovacího zařízení je zobrazeno na obrázek 5.5. Základem je mobilní stůl vybavený kolečky připevněnými k nohám stolu. Kostra stolu je vyrobena z posvařovaných profilů. Testovací komora o rozměrech 500×500×500 mm (v×š×h) je umístěna na vrchu mobilního stolu. K snadnému pozorování kavitační zkoušky a samostatného kavitačního jevu je testovací komora vyrobená celá ze skla. Stálost výšky hladiny zaručuje přepad, umístěný v testovací komoře. Během zkoušky přebytečná kapalina přeteče přes přepad a větví je vyvedena z testovací komory.



Obrázek 5.5 První návrh testovacího zařízení [zdroj: autor]

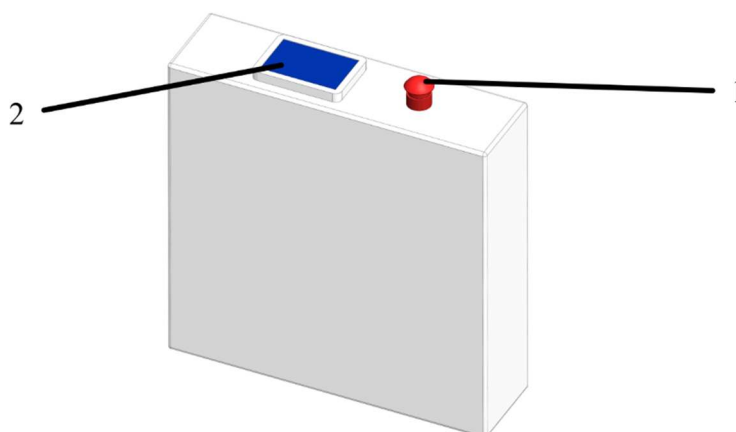
Ze zdroje testovací kapaliny – rezervoáru naplněné užitkovou vodou – je čerpána kapalina pomocí stejného čerpadla, které bylo užito v původním testovacím zařízení (Tabulka 1 a Tabulka 2). Čerpadlo není součástí testovacího zařízení, jelikož při provozu by čerpadlo mohlo rozechvět celé testovací zařízení. Aby se zamezilo těmto nežádoucím vibracím, je čerpadlo společně s motorem ponecháno v mobilním rámu (obrázek 5.2) a je vloženo pod testovací zařízení.

Tabulka 3: Magneticko-indukční průtokoměr MQI 99 – SN značky ELA

Max. průtok [l/s]	Standartní tlak [MPa]	Teplota prostředí [°C]	Princip zařízení
0,5	4	-20 ÷ +60	Pulsní stejnosměrné

Tabulka 4: Tlakový snímač DMK 331 P značky BD SENSORS

Jmenovitý tlak rel. / abs. [bar]	Přetížení [bar]	Destrukční tlak ≥ [bar]	Přesnost [%]
100	200	250	±0,5

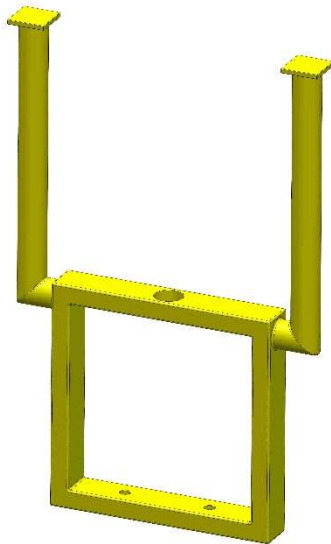


Obrázek 5.6 Rozvaděč s LCD displejem a bezpečnostním tlačítkem [zdroj: autor]

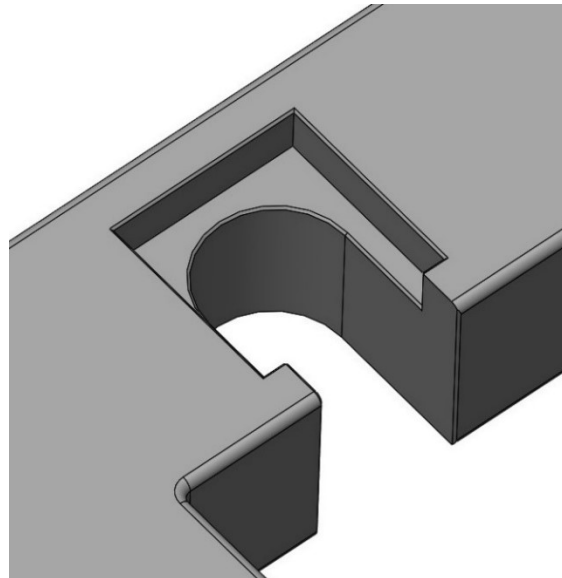
Ke stolu je připevněn rozvaděč zobrazený na obrázku 5.6. Na rozvaděči je umístěn vypínač (1) pro okamžité zastavení zkoušky a jednodeskový počítač se sedmi palcovým dotykovým LCD displejem Nextion Basic 7“ NX8048T070 HMI (2). Displej slouží k obsluze testovacího zařízení, to znamená k nastavování doby trvání zkoušky, spuštění a zastavování zkoušky a zobrazování testovacích podmínek – teploty, průtoku a tlaku na ústí trysky. K čerpadlu je připojen automatický spínač, ovládaný LCD displejem. Tento prvek slouží k automatickému vypnutí čerpadla po uplynutí nastaveného času. Během zkoušky tak u testovacího zařízení není nutný dohled obsluhy. Na začátku zkoušky se pouze nastaví doba trvání zkoušky a zkouška pak může probíhat bez přítomnosti obsluhy. Alternativou displeje Nextion Basic 7“ může být jednodeskový počítač se sedmi palcovým dotykovým displejem Raspberry Pi, HDMI 7" 1024x600 TFT. Oba displeje jsou připojeny k malému jednodeskovému počítači, který je napojen na měřiče a čerpadlo. Jediný rozdíl mezi těmito displeji a jejich počítači je v programovací platformě. Displej Nextion Basic 7“ užívá platformu Arduino a Raspberry Pi, HDMI 7" užívá platformu

Raspberry Pi. Vypínač slouží jako ochranný prvek k rychlému vypnutí čerpadla v případě nebezpečí během trvání zkoušky nebo ohrožení testovacího zařízení.

Koncept vyjímatelného rámu je zachován. Rám je vyroben z nerezové oceli a je zavěšen na nosné konstrukci, která je součástí mobilního stolu. Konstrukce rámu je zobrazena na obrázku 5.8. Rám je uložen do žlábků (obrázek 5.9) čtvercového tvaru ve vrchní části nosné konstrukce stolu. Ke zvýšení stability uložení rámu je přidána podpěra, která je součástí nosné konstrukce mobilního stolu. Vnitřní rozměry rámu jsou  $200 \times 200 \times 40$  mm (v $\times$ š $\times$ h). Rám má tyto vnitřní parametry, aby bylo dosaženo požadavku standoff distance v rozmezí do 100 mm.



Obrázek 5.7 Vyjímatelný rám [zdroj: autor]



Obrázek 5.8 Detail žlábků [zdroj: autor]

Ponor rámu společně se vzorkem je fixní. Vstupní tlak proudu kapaliny  $p_u$  z trysky je několikanásobně větší nežli tlak kapaliny testovací komory  $p_d$  ( $p_u \gg p_d$ ), a proto je hloubka ponoru vzorku zcela nepodstatná.

Pohyb trysky – nastavování standoff distance – je zajištěn stojanem na vrtačku WOLFCRAFT EXCLUSIVE (obrázek 5.9 a obrázek 5.11). Pohyb posuvu stojanu je realizován mechanismem hřeben – pastorek, se základními rozměry  $550 \times 203 \times 307$  mm (v $\times$ š $\times$ h), maximální zdvih činí 340 mm, polohu posuvu stojanu lze zaaretovat až třemi šrouby. Posuv také obsahuje kroužek se stupnicí, který je podle dodavatele s milimetrovou přesností. Pro nastavování standoff distance s přesností na milimetry by měl být tento kroužek se stupnicí dostatečný. Pokud by byl kladen důraz na větší přesnost nastavení, např. s desetinnou či se setinovou přesností, musí být rám a tryska vybaveny měřidlem pro měření vzdálenosti, a to lineárním potenciometrem. Základna stojanu je připevněná k nosné konstrukci stolu šroubovým spojem, nacházející se nad testovací komorou.

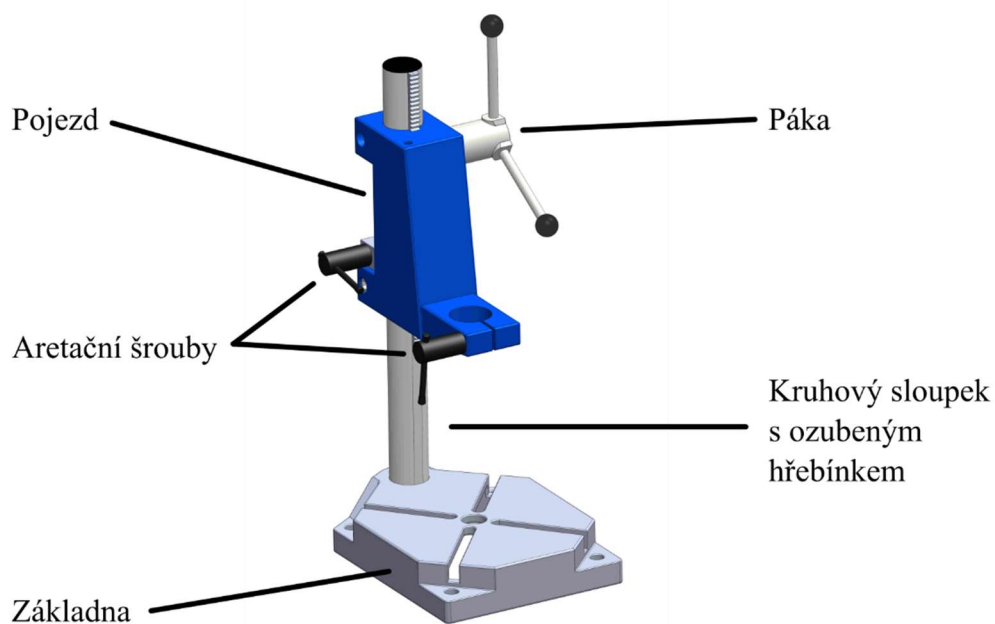


Obrázek 5.9 Stojan na vrtačky  
WOLFCRAFT EXCLUSIVE [23]

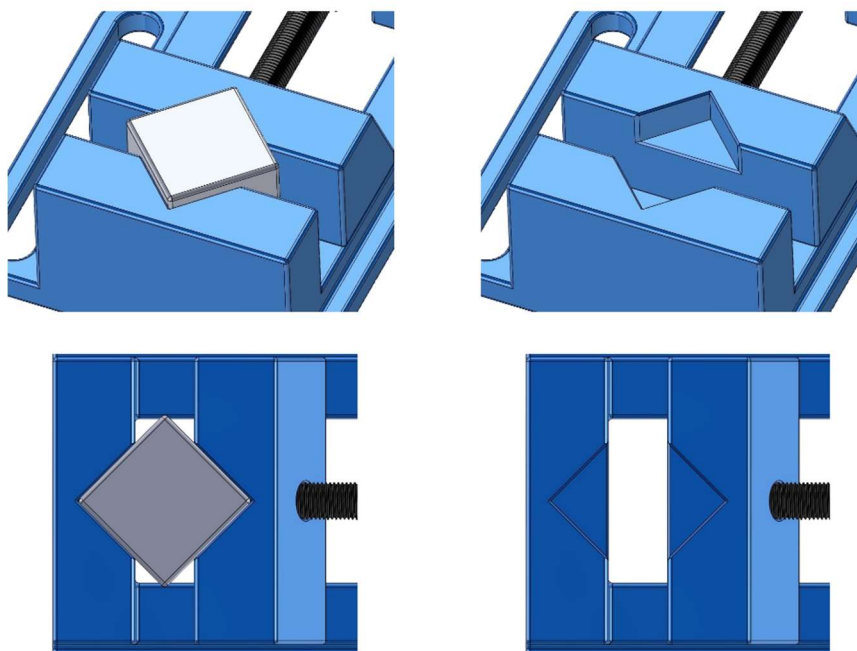


Obrázek 5.10 Svěrák WOLFCRAFT SIM-  
PLEX 60 [24]

K upnutí testovacího vzorku bylo potřeba vybrat svěrák z nekorozivzdorného materiálu, jelikož vzorek je po celou dobu zkoušky pod kapalinou (vodou). Byl zvolen svěrák WOLFCRAFT SIMPLEX 60 (obrázek 5.10), vyrobený z tlakově litého hliníku. Základní rozměry svěráku jsou 115×45×140 mm (v×š×h), upínací rozsah činí 65 mm a šířka čelistí činí 68 mm. Čelisti svěráku jsou upraveny, jsou do nich vyfrézovány výřezy k co nejlépe možnému upnutí vzorku – viz. obrázek 5.12. Testovací vzorek čtvercového půdorysu se rohy upne do upravených čelistí. Tento tvar čelistí by měl zajistit pevné a stabilní upnutí vzorku různých velikostí z jeho každé strany. Svěrák je šroubovými spoji připevněn k rámu a pomocí jeho držátek lze svěrák polohovat vůči rámu (trysce) pro zajištění přímého dopadu kavitačního proudu na povrch vzorku.



Obrázek 5.11 Popis stojanu na vrtačky [zdroj: autor]



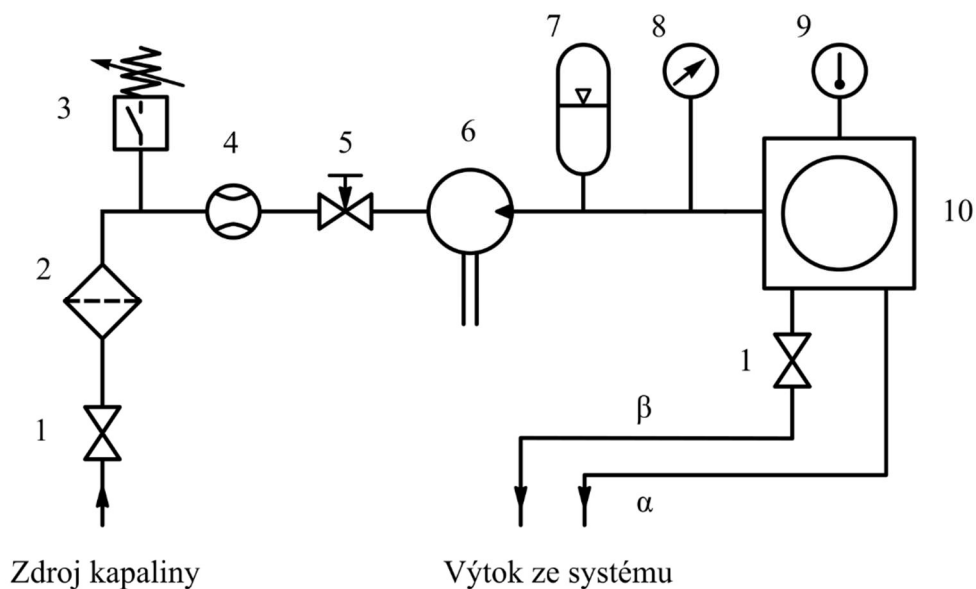
Obrázek 5.12 Ukázka upravených čelistí [zdroj: autor]

Pro zařízení je zvolen okruh otevřený, jelikož pro otevřený okruh je kapalina čerpána ze zdroje, kde teplota kapaliny zůstává konstantní. Odpadá tím problém regulace teploty kapaliny v okruhu. Testovací okruh je zobrazen na obrázek 5.13. Z rezervoáru je kapalina – užitková či pitná voda – čerpána čerpadlem (6) do testovací komory (10), odkud je kapalina vedena pryč z okruhu dvěma větvemi. První větev ( $\alpha$ ) je napojená na přepad v testovací komoře, zajišťující stálost výšky hladiny. Druhá větev ( $\beta$ ) slouží k vypuštění testovací komory a je proto vybavena uzavíracím ventilem (1). Okruh je na svém počátku vybaven regulačním ventilem k možné regulaci průtoku (5). Dále je na počátku vybaven filtrem (2) a tlakovým spínačem (3) chránící čerpadlo. Pokud by v počátku okruhu nebyl dostatečný tlak, čerpadlo by mohlo být poškozeno. Okruh je dále vybaven magneticko-indukčním průtokoměrem (Tabulka 3) (4), tlakovým snímačem (Tabulka 4) (8) a teploměrem (9), měřící podmínky kavitační zkoušky. Průtokoměr společně s filtrem budou umístěny do mobilního rámu (obrázek 5.2) a společně s čerpadlem budou jeho součástí. Aby nebyl tlakoměr poškozen hydraulickými rázy vyvolané čerpadlem, je okruh vybaven hydraulickým akumulátorem (7) umístěným za čerpadlem (6).

Před začátkem zkoušky je vzorek umístěn do svěráku, vymezí se poloha svěráku vůči rámu a rám se vzorkem se umístí do žlábků nosné konstrukce stolu. Posuvem vrtačky se skrz rám posune tryska k materiálu a nastaví se požadovaná standoff distance a tryska se za-aretuje. Po nastavení podmínek začne zkouška. Po uplynutí jisté periody je zkouška pozastavena a je provedeno měření nové hmotnosti vzorku. Tryska se uvolní a odsune se mimo rám, rám se vytáhne z testovací komory a vzorek se vyjme ze svěráku. Po změření nové hmotnosti se vzorek znovu upne do svěráku, rám se vloží zpět do komory, tryska se přiblíží ke vzorku, poté se za-aretuje a zkouška pokračuje.

Tento návrh vyjímatelného rámu má jisté nedostatky a problémy. Prvním nedostatkem je nepřetržitě nastavování standoff distance během trvání zkoušky při každém vyjmutí a navrácení rámu. Aby bylo možné rám vyjmout, je prvně potřeba vysunout trysku z rámu a po navrácení rámu trysku přisunout zpět k materiálu. Dalším, daleko větším, problémem spojeným s tryskou je, že tryska není součástí vyjímatelného rámu, ale obě části jsou samostatné. V uložení rámu do nosné konstrukce je vymezená vůle, aby bylo možné rám vyjmout. Po navrácení

rámu není zaručena kolmost kavitačního paprsku vůči povrchu vzorku. Kavitační paprsek by tak nemusel přímo dopadat na stejné místo povrchu vzorku. Tato skutečnost představuje problém, jelikož nezajištění kolmého dopadu kavitačního proudu na stejné místo by mohlo způsobit chybu měření a byly by tak znehodnoceny výsledky kavitační zkoušky. I samostatné vyjmutí rámu má své nedostatky, jelikož rám nelze za-aretovat a je zapotřebí velké komory zajišťující dostatečný prostor k manipulaci rámu pro jeho vyjmutí. Z výše uvedených důvodů bylo nutné návrh vyjímatelného rámu pozměnit tak, aby byly nedostatky a problémy eliminovány.



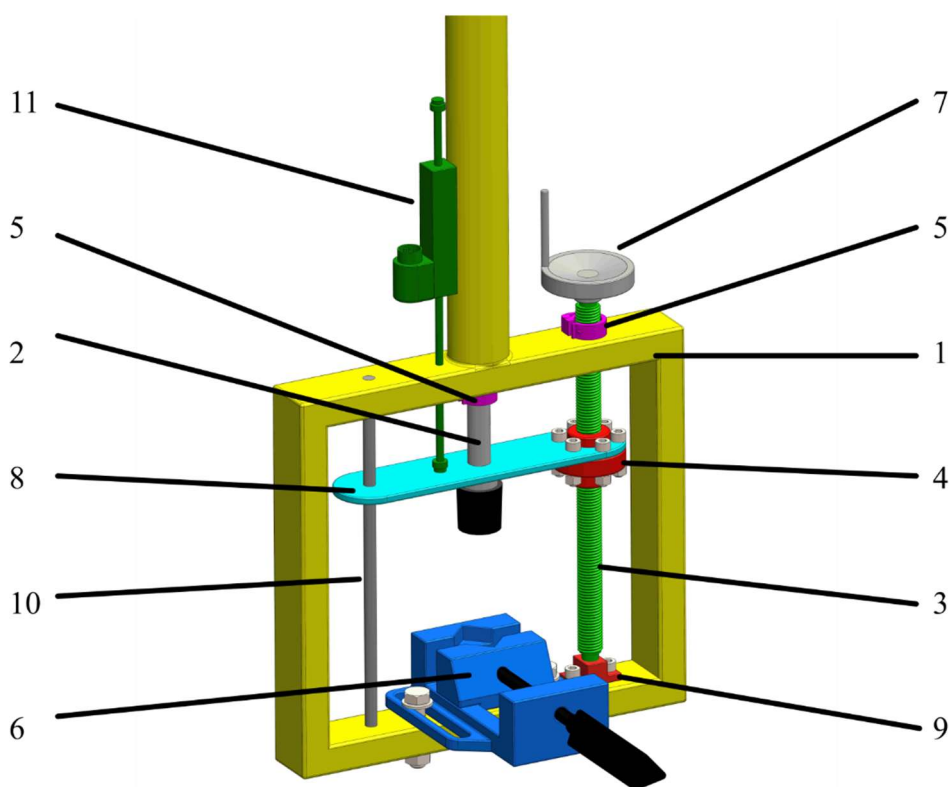
- (1) uzavírací ventil, (2) filtr, (3) tlakový spínač, (4) průtokoměr, (5) regulační ventil, (6) čerpadlo, (7) hydraulický akumulátor, (8) tlakoměr, (9) teploměr a (10) testovací komoru

Obrázek 5.13 Schéma testovacího okruhu [zdroj: autor]

## 5.5 Nový návrh vyjímatelného rámu

V nové variantě návrhu rámu je tryska součástí vyjímatelného rámu, aby byla zachována kolmost dopadu kavitace paprsku na vzorek a předešlo se tak nepřesnostem měření. Rám se vzorkem již není zcela vyjímatelný, ale během celého trvání zkoušky je součástí testovacího zařízení. Pro potřebu manipulace se vzorkem během měření je rám vnořen z testovací komory. Vysunutí rámu je realizováno stojanem na vrtačky WOLFCRAFT EXCLUSIVE, připevněném k nosné konstrukci mobilního stolu. Posun trysky je možný uskutečnit dvěma možnostmi, pomocí posuvného šroubu a přírubové matice (varianta A), nebo pomocí druhého stojanu na vrtačky (varianta B).

První možností (varianta A) posunu trysky je pomocí posuvného šroubu a přírubové matice. Oba komponenty – posuvný šroub a přírubová matice – jsou vyrobeny z nerezové oceli, která dobře odolává kapalnému prostředí kavitace zkoušky. Konstrukce rámu je zobrazena na obrázek 5.14. Tryska (2) prochází trubkou rámu (1) a přes podpěru (8) je uchycena k přírubové matici (4). Ke zvýšení stability posuvu trysky je přidána vodící tyč (10). Posuvný šroub (3) je jedním koncem uchycen k přírubě s ložiskem (9) umístěném ve spodní části rámu. Ke druhému konci šroubu je přichyceno ruční kolo (7) umožňující nastavení standoff distance. Na rámu se nachází dvě rychloupínací objímky (5), jedna u trysky a druhá u posuvného šroubu. Objímky umožňují rychlou aretaci trysky a posuvného šroubu. Pro přesné nastavení standoff distance slouží lineární potenciometr (11) umístěný na boku trysky. Na spodní části rámu je umístěn svěrák WOLFCRAFT SIMPLEX 60 (6), sloužící k upnutí materiálu.



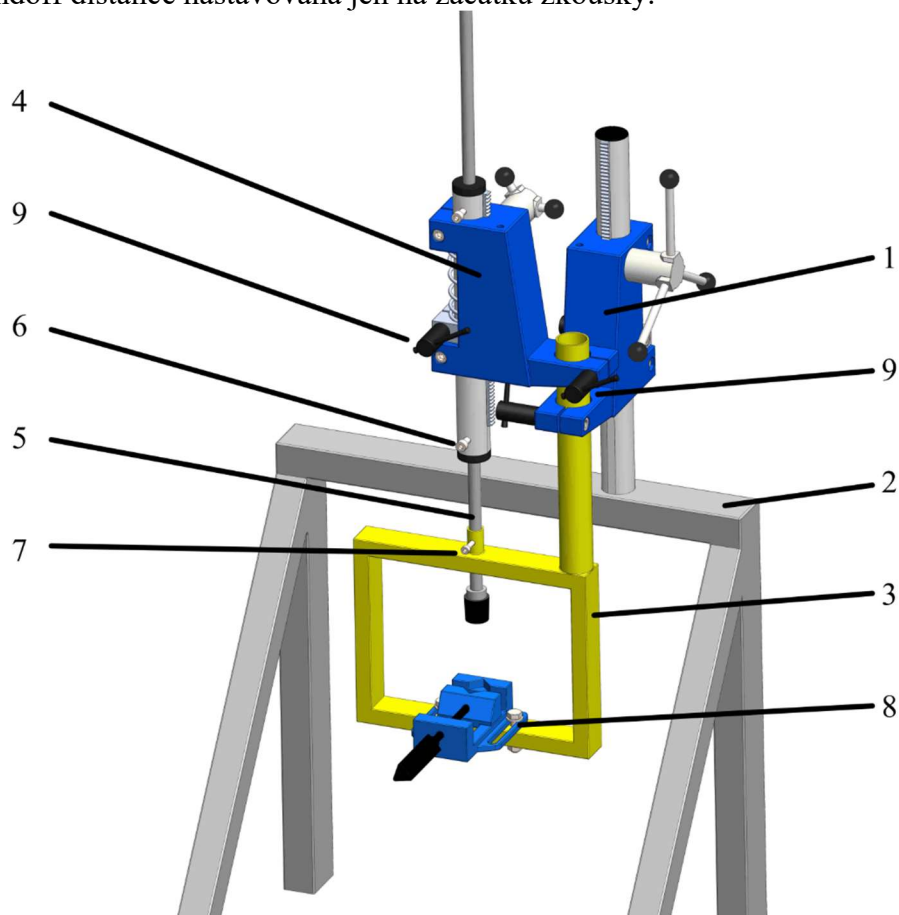
Obrázek 5.14 Popis rámu – varianta A [zdroj: autor]

Na začátku zkoušky se rám pomocí stojanu na vrtačky WOLFCRAFT EXCLUSIVE vysune z testovací komory. Do svěráku je upnut testovací vzorek a nastaví se poloha svěráku. Ruční klikou se nastaví požadovaná standoff distance jen na začátku zkoušky. Během trvání

zkoušky tak standoff distance zůstává neměnná. Následně se objímkami za-aretuje tryska a trapézový šroub. Rám se vzorkem se ponoří pod hladinu testovací komory, stojan na vrtačky se za-aretuje a zkouška začne. Pro měření úbytku se rám přes stojan na vrtačky vyjme, vzorek se odejme a zvážením se zjistí jeho nová hmotnost. Následně se vzorek zpět upne do svěráku, rám se ponoří pod hladinu, stojan na vrtačky se za-aretuje a zkouška pokračuje.

Druhá možnost (varianta B) realizuje pohyb trysky pomocí druhého stojanu na vrtačky WOLFCRAFT EXCLUSIVE. Stojany na vrtačky jsou vyrobeny z litiny, která podléhá erozi. Oba posuvy stojanů tak musí zůstat po celou dobu nad hladinou. Konstrukce je zobrazena na obrázku 5.15. První stojan (1) je uchycen šroubovým spojem v nosné konstrukci mobilního stolu (2), v jeho posuvu je uchycen vyjímatelný rám (3) a realizuje ponor rámu se vzorkem. Druhý stojan (4) je uchycen stejným způsobem k rámu a realizuje posun trysky (5), vedené skrze upravený kruhový sloupek stojanu (6). Stojany je možné samostatně za-aretovat aretačními šrouby (9) k zamezení pohybu. Tryska je vedena skrz kruhový sloupek druhého stojanu a je k němu přichycena šrouby. Ke zvýšení tuhosti je také šroubem (7) za-aretována tryska v rámu. Na spodní části rámu je opět umístěn svěrák WOLFCRAFT SIMPLEX 60 (8) sloužící k upnutí materiálu.

Průběh zkoušky je obdobný jako u varianty rámu s trapézovým šroubem. Jediný rozdíl je v nastavování standoff distance druhým stojanem WOLFCRAFT EXCLUSIVE. I v této variantě je standoff distance nastavována jen na začátku zkoušky.

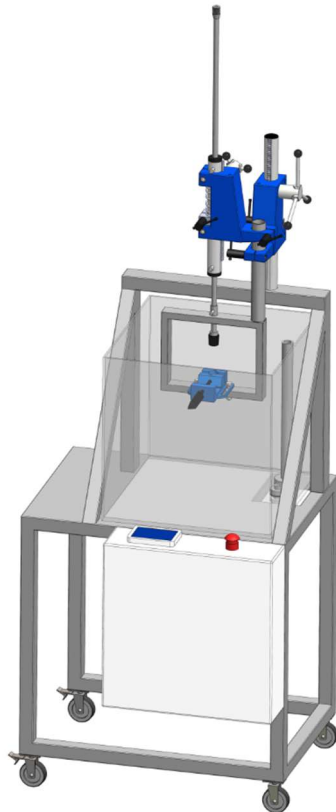


Obrázek 5.15 Popis rámu – varianta B [zdroj: autor]

Z výše uvedených možností byla vybrána varianta B obsahující dva stojany na vrtačku. Důvodem výběru právě této varianty byl způsob, kterým je uskutečněn pohyb trysky. Následujícím důvodem je celková jednoduchost konstrukce vyjímatelného rámu varianty B. Ve variantě B je v rámu uchycen pouze svěrák a neobsahuje žádné pojezdy či vodící šrouby. Dalším

důvodem byl kroužek se stupnicí, kterým jsou vybaveny posuvy stojanů. Pro měření s milimetrovou přesností tak třeba přidělovat lineární potenciometr pro měření standoff distance. Pokud by však bylo nutné měřit standoff distance s vyšší přesností, bylo by nutné posuv vybavit lineárním potenciometrem.

Je vybrána varianta B vyjímatelného rámu. Aby bylo dosaženo požadavku standoff distance v rozmezí do 100 mm společně s požadavky na rozestupy posuvů stojanů, jsou vnitřní rozměry rámu 200×300×40 mm (v×š×h). Konečný návrh je zobrazený na obrázku 5.16. V příloze umístěny 3D modely testovacího zařízení společně s výkresem sestavy zařízení (Příloha A). Další obrázky testovacího zařízení jsou v příloze (Příloha B).



*Obrázek 5.16 Konečný návrh testovacího zařízení [zdroj: autor]*

## 5.6 Konstrukce

V této kapitole je popsána konstrukce testovacího zařízení. První etapou byla konstrukce systému zajišťující ponor a pohyb trysky, tedy konstrukce stojanů na vrtačky. První stojan, realizující ponor, byl uchycen do své zkrácené základny. Posléze byly oba stojany k sobě přichyceny posuvy, jak je znázorněno na obrázku 5.17. Následně byly do kruhového sloupku s ozubeným hřebenem vyvrtány díry pro aretační šrouby.



Obrázek 5.17 Posuvy stojanů [zdroj: autor]



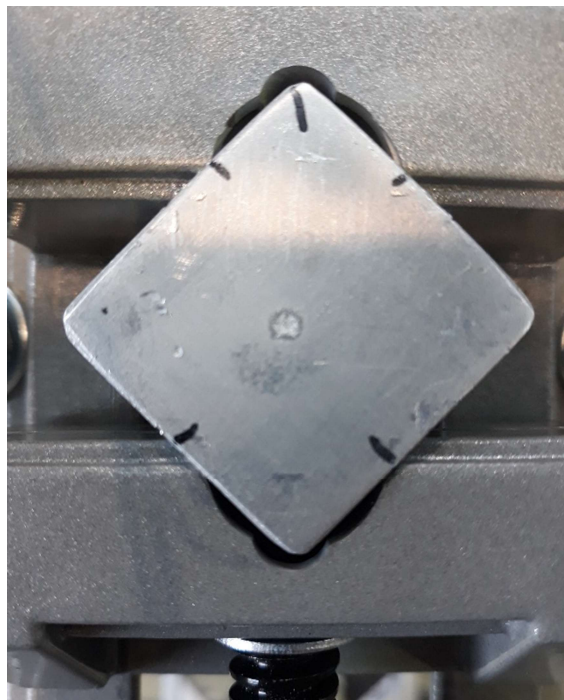
Obrázek 5.18 Stojany s rámem [zdroj: autor]

Dalším krokem bylo zkonstruovat vyjímatelný rám. V konečném návrhu obsahuje vyjímatelný rám na svém boku trubku, přes kterou je rám připevněn k posuvům stojanů. V konečném návrhu má rám nadbytečně velké rozměry a byl proto zmenšen na velikost jsou 240×290×40 (v×š×h). Zmenšený rám je společně se stojany zobrazen na obrázku 5.18. Jakmile se uchytí vyjímatelný rám do obou posuvů stojanů, rámem a kruhovitým sloupkem druhého stojanu na vrtačky byla protažena tryska, která byla ve sloupku za-aretována.

Výřezy čelistí svěráku byly pozměněny, jelikož materiál svěráku, tlakově litý hliník, se řadí mezi problematické materiály pro obrábění a navržené výřezy by se špatně vyráběly. Místo výřezů trojúhelníkového půdorysu byly do čelistí vyvrtány díry. První větší díra byla provrtána ve středu obou čelistí. Následně byly frézou díry z jedné strany prodlouženy, aby bylo možné upnout i větší vzorky. Nakonec byly sraženy hrany na úhel 45°. Vložený vzorek není držen bočními plochami, ale je držen sražených hran. Nové výřezy v čelistích svěráku jsou zobrazené na obrázku 5.19 a obrázku 5.20. Poslední úpravou svěráku bylo snížení vůle uložení pohybující se čelisti. Pohybující se čelist nebyla přesně uložena v pojezdové drážce, ale tzv. „lítala“. K pojezdovým plochám čelistí byly proto přidělané plíšky, které snížily vůli mezi čelistí a pojezdovou drážkou. Po celkové úpravě byl svěrák šroubovým spojem připevněn k vyjímatelnému rámu.



Obrázek 5.19 Upravené čelisti svěráku  
[zdroj: autor]



Obrázek 5.20 Upnutí vzorku [zdroj: autor]

Mobilní nosný stůl společně s nosnou konstrukcí byl vyroben z eloxovaných<sup>9</sup> hliníkových profilů stavebnicového systému MB 9 od společnosti item Industrietechnik GmbH. Profily jsou vybaveny drážkami sloužící k upevnění spojovacích prvků. K profilům mohou být připevněny i jiné prvky, například držák fotoaparátu, nebo rozvaděč. Výhodou tohoto stavebnicového systému je velká variabilnost se zajištěním velké pevnosti a tuhosti. Pokud by bylo například nutné změnit výšku nosného rámu či změnit rozměry stolu, je možné stůl rozmontovat a postavit ho dle nových kritérií. Změny jsou však limitovány délkou profilů, jelikož nařezané profily již nelze prodloužit.

Po zkonstruování mobilního stolu byla sestava stojanů na vrtačku a vyjímatelného rámu připevněna na nosnou konstrukci stolu. Sestava byla přichycena ke zkrácené základně jednoho stojanu, a poté byla základna společně se stojany a rámem připevněna k nosnému rámu šroubovými spoji. Jakmile byla sestavena konstrukce mobilního stolu společně se stojany a vyjímatelným rámem, byla následně umístěna testovací komora a začalo zapojování testovacího okruhu. K čerpadlu byl zapojen tlakový snímač DMK 331 P (Tabulka 4), nový filtr a průtokoměr MQI 99 – SN (Tabulka 3). Následně byl do testovací komory nainstalován přepad a výtok společně s vypouštěcím ventilem.

Poslední etapou je přidělení nového rozvaděče společně s bezpečnostním tlačítkem a displejem k obsluze testovacího zařízení (nastavování doby trvání zkoušky, sledování podmínek). Hotové testovací zařízení je spolu s dalšími fotografiemi zobrazeno v příloze (Příloha C).

<sup>9</sup> Eloxování = povrchová úprava hliníku, spočívající ve vytvoření ochranné vrstvy hliníku, která dále neoxiduje a tím chrání povrch hliníku [25]

## ZÁVĚR

---

Na první pohled se kavitace jeví docela neškodně, nicméně její dopad na materiál je destruktivní. Ačkoliv je znám výsledek kavitačního dopadu na materiál, jak přesně k porušení dochází, není zcela známo. Existuje mnoho hypotéz, nicméně není zatím ucelená teorie. Inženýři tento zajímavý jev intenzivně studují od 19. století a s vývojem nových technologií bylo o kavitaci objeveno mnoho poznatků. I přesto zůstává kavitace stále neprozkoumaná, jelikož další studie tohoto fenoménu si vyžadují stále modernější technologii.

V rešeršní části bakalářské práce byla probrána problematika kavitačního děje, od růstu malé kavitační bubliny po kavitační erozi materiálu, způsobené zánikem kavitačních bublin. V návrhové části byl vytvořen návrh nového testovacího zařízení a byla zdokumentována jeho konstrukce. Představený návrh prezentuje řešení upnutí vzorku, ponoru vzorku, nastavování standoff distance a zapojení testovacího okruhu. Dále je v práci popsán průběh kavitační zkoušky a její výsledky.

Konstrukce zařízení ukázala nedokonalosti návrhu. Svěrák je vyroben z hliníku a tvrdé testovací vzorky by tak mohly časem otlačit hrany upínacích děr. Nemusela by tak být zajištěna neměnnost polohy vzorku během celého trvání zkoušky a musel by tak být koupen nový svěrák. Dále i stojan má své nedokonalosti, chod pojezdu je v určitých úsecích kostrbatý kvůli výskytu šroubového spoje. Na druhou stranu pojezd zaručuje stabilitu a nepohyblivost rámu se vzorkem během celého trvání zkoušky. Kolečko se s milimetrovou stupnicí by nemuselo být přesné, jelikož je vyrobeno pro vrtačky a nikoli pro testovací zařízení vyžadující přesné nastavování vzdálenosti. Tento problém by však mohl být vyřešen užitím lineárního potenciometru, který slouží k přesnému měření vzdáleností.

Dalším nevyřešeným problémem spojeným se zařízením je hluk, který vzniká během kavitace. Zařízení není vybaveno zvukotěsnou komorou ani není nikterak odhlučněno. Zařízení je ovšem vybaveno automatickým spínačem, a proto není vyžádána přítomnost obsluhy během zkoušky. Z uvedeného vyplývá, že testovací zařízení tak může být umístěno například do prázdné místnosti a hluk již nebude nikoho obtěžovat.

S novým testovacím zařízením bude možné provádět intenzivní měření materiálové odolnosti vůči kavitačnímu působení a sledování průběhu jednotlivých stadií. V budoucnu by testovací zařízení také mohlo testovat ochranné nástřiky. Pouze malá vrstva nástřiku nanesená na materiál by tak mohla účinně chránit jeho povrch a ukončit tak problém koroze materiálu.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír. Kavítace. Praha: Academia, 1969, 278 s. : il. Začátek formuláře
- [2] NOSKIEVIČ, Jaromír. Kavítace v hydraulických strojích a zařízeních. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 333 s. : il., tabulky. ISBN 80-03-00206-0.
- [3] PULSED-LASER-INDUCED CAVITATION: Ultrafast bubbles enable novel nano/microfluidic systems. LaserFocusWorld [online]. Nashua (New Hampshire): Endeavor Business Media, © 2020, 1. 11. 2010 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/test-measurement/research/article/16552005/pulsed-laserinduced-cavitation-ultrafast-bubbles-enable-novel-nanomicrofluidic-systems>
- [4] SOYAMA, Hitoshi. Cavitating Jet: A Review. Applied sciences [online]. MDPI, 2020, 10(7280), 7280 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: doi:10.3390/app10207280
- [5] BRENNEN, Christopher E. (Christopher Earls). Cavitation and bubble dynamics. New York: Cambridge University Press, 2014, xvii, 249 s. : čb. fot., tabulky, grafy. ISBN 978-1-107-64476-2.
- [6] BALOTINOVÁNÍ. VÚB a.s. [online]. Ústí nad Orlicí [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.vubas.cz/ew/c32ff76c-dc4f-4903-893a-b3634f8349b5-cs>
- [7] BRDIČKA, Miroslav, Oldřich TARABA a Ladislav SAMEK. Kavítace: diagnostika a technické využití. Praha: SNTL, 1981, 332 s. : obr.
- [8] SUN, Xun, Songying CHEN, Jingting LIU, Shan ZHAO a Joon Yong YOON. Hydrodynamic Cavitation: A Promising Technology for Industrial-Scale Synthesis of Nanomaterials. Frontiers in Chemistry [online]. Frontiers Media S.A, 2020, 8 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: doi:10.3389/fchem.2020.00259
- [9] SUPPONEN, O., D. OBRESCHKOW a M. FARHAT. Rebounds of deformed cavitation bubbles. Physical Review Fluids [online]. American Physical Society, 2018, 3(10) [cit. 2020-11-25]. ISSN 2469990X. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevFluids.3.103604
- [10] GONZALEZ-GARCÍA, Jose, Verónica SAEZ, Ignacio TUDELA, María DÍEZ-GARCÍA, María ESCLAPEZ a Olivier LOUISNARD. Sonochemical Treatment of Water Polluted by Chlorinated Organocompounds. A Review. Water [online]. Basel: MDPI, 2010, 2(1), 28-74 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: doi:10.3390/w2010028
- [11] JOHN, Carlton. Cavitation. Marine Propellers and Propulsion. 3rd Edition. Elsevier, 2012, s. 1-2. ISBN 9780080971230. [cit. 2020-11-24] Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/rcid:kpMPPE0011/id:kt00B8E41F/marine-propellers-propulsion/cavitation?kpromoter=Summon>
- [12] PROPELLER CAVITATION EXPLAINED. In: The Shipyard [online]. 2020 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.theshipyardblog.com/propeller-cavitation-explained/>
- [13] JI, Chen, Fang-ye LIN a Jun ZOU. Experimental investigation of vortex-ring cavitation. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A [online]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2017, 18(7), 545-552 [cit. 2021-02-19]. ISSN 1673-565X. Dostupné z: doi:10.1631/jzus.A1600537
- [14] BRENNEN, Christopher E. (Christopher Earls). Cloud Cavitation: The Good, The Bad and the Bubbly. (2008). [cit. 2020-12-12] Dostupné také z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Cloud-Cavitation%3A-The-Good%2C-The-Bad-and-the-Bubbly-Brennen/6ba67aba3bd5a60cc3feeaf65656d1ec478a9ba5#extracted>
- [15] SOYAMA, Hitoshi. Cavitating Jet: A Review. Applied Sciences [online]. MDPI, 2020, 10(20) [cit. 2021-5-21]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10207280
- [16] SOYAMA, Hitoshi. Surface mechanics design of metallic materials on mechanical surface treatments. Mechanical Engineering Reviews [online]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2014, 2(1) [cit. 2021-5-21]. ISSN 2187-9753. Dostupné z: doi:10.1299/mer.14-00192

- [17] Pump Cavitation What Happens and What Causes It? Fluid Handling Pro [online]. Nizozemsko, 21. srpna 2019 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://fluidhandling-pro.com/pump-cavitation-what-happens-and-what-causes-it/>
- [18] ROY, Samir Chandra, Jean-pierre FRANC, Nicolas RANC a Marc FIVEL. Determination of cavitation load spectra—Part 2: Dynamic finite element approach. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2015, 344-345(C), 120-129 [cit. 2021-02-19]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2015.09.005
- [19] G02.10 WEAR AND EROSION (SPONSORING COMMITTEE). Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by a Cavitating Liquid Jet [online]. 2010 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: doi:10.1520/G0134-95R10E01
- [20] CARNELLI, Davide, Ayat KARIMI a Jean-pierre FRANC. Application of spherical nanoindentation to determine the pressure of cavitation impacts from pitting tests. *Journal of Materials Research* [online]. Warrendale: Cambridge University Press, 2012, 27(1), 91-99 [cit. 2021-02-19]. ISSN 08842914. Dostupné z: doi:10.1557/jmr.2011.259
- [21] PATELLA, Regiane Fortes, Jean-luc REBOUD a Antoine ARCHER. Cavitation damage measurement by 3D laser profilometry. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2000, 246(1), 59-67 [cit. 2021-02-19]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1648(00)00446-4
- [22] G02.10 WEAR AND EROSION (SPONSORING COMMITTEE). Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus [online]. 2010 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: doi:10.1520/G0032-10
- [23] Stojan na vrtačku Wolfcraft Exclusive. Datart [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.datart.cz/stojan-na-vrtacku-wolfcraft-exclusive.html>
- [24] Wolfcraft 3412099 svěrák Šířka čelistí: 68 mm Rozpětí (max.): 65 mm. Conrad Electronic [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/wolfcraft-3412099-sverak-sirka-celisti-68-mm-rozpeti-max-65-mm-1856579?&vat=true>
- [25] Eloxování hliníku. Kovodružstvo v.d. Plzeň [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.kovodruzstvo-plzen.cz/produkty-a-sluzby/eloxovani-hliniku/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Jednotka	Název veličiny
$A_0$	$m$	počáteční poloměr kavitačního mraku
$C_p$	–	tlakový součinitel
$C_{pmin}$	–	minimální tlakový součinitel
$d$	$m$	průměr
$n$	–	polytropní exponent
$N_d$	$\frac{\text{počet d\text{u}lk\text{u}}}{mm^2 \times s}$	míra počtu d\text{u}lk\text{u}
$N_e$	–	normalizovaná erozní odolnost
$p_B$	$Pa$	tlak plynné směsi uvnitř bubliny
$p_d$	$Pa$	statický tlak v testovací komoře
$p_K$	$Pa$	tlak kapaliny
$p_{K_0}$	$Pa$	tlak kapaliny/rovnovážný tlak v kapalině pro počáteční poloměr bubliny $R_0$
$p_{kr}$	$Pa$	kritický tlak
$p_p$	$Pa$	tlak plynu
$p_n$	$Pa$	tlak nasycených par
$p_{kav}$	$Pa$	kavitační tlak
$p_u$	$Pa$	vstupní tlak na ústí trysky
$p_\infty$	$Pa$	tlak kapaliny v nekonečnu
$\Delta p$	$Pa$	tlakový rozdíl
$Q_V$	$m^3 \times s^{-1}$	objemový průtok
$R$	$m$	poloměr
$R_0$	$m$	počáteční poloměr bubliny
$R_{kr}$	$m$	kritický poloměr bubliny
$R_{max}$	$m$	maximální poloměr bubliny
$R_{min}$	$m$	minimální poloměr bubliny
$S_{opt}$	$m$	standoff distance
$t$	$s$	čas
$t_{cl}$	$s$	první kritický čas
$T_B$	$^\circ C$	teplota uvnitř bubliny
$T_\infty$	$^\circ C$	teplota kapaliny v nekonečnu
$\Delta T$	$^\circ C$	teplotní rozdíl

---

$v_{\infty}$	$m \times s^{-1}$	referenční rychlost kapaliny
$V$	$m^3$	objem
$V_0$	$m^3$	objem o poloměru $R_0$
$V_d$	$\mu m^3 \times mm^{-2} \times s^{-1}$	míra úbytku materiálu
$\alpha_0$	–	zlomek počáteční rovnovážné prázdnoty
$\beta$	–	parametr interakce mraku
$\mu_L$	$Pa \times s$	dynamická viskozita
$\mu'$	–	Bezrozměrná vazkost
$\nu_L$	$m^2 \times s^{-1}$	kinematická viskozita
$\rho$	$kg \times m^{-3}$	hustota kapaliny
$\sigma$	$N \times m^{-1}$	povrchové napětí
$\sigma'$	–	bezrozměrné povrchové napětí
$\sigma_K$	–	kavitační číslo
$\sigma_{K_{poč}}$	–	kavitační číslo určující počátek kavitace

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Závislost rovnovážného tlaku kapaliny $p_K$ na poloměru bubliny $R$ [7].....	20
Obrázek 2.1 Vliv vazkosti a povrchového napětí na růst kavitační bubliny v nestlačitelné kapalině [7].....	26
Obrázek 2.2 Vliv vazkosti a povrchového napětí na kontrakci kavitační bubliny v nestlačitelné kapalině [7].....	27
Obrázek 3.1 Kolaps a následný odraz kavitační bubliny [10].....	29
Obrázek 3.2 Microjet kolabující bubliny v blízkosti stěny [5].....	30
Obrázek 3.3 Vírová kavitace za lopatkami a jádrem vodního šroubu [12].....	31
Obrázek 3.4 Série snímků kavitačního proud pořízené vysokorychlostní kamerou [15].....	34
Obrázek 3.5 Oblast ošetřená kavitačním proudem [4].....	35
Obrázek 3.6 Klasifikační mapa kavitačního otryskávání a otryskávání vodním paprskem [16].....	36
Obrázek 4.1 Poškozený povrch lopatky kavitací [17].....	37
Obrázek 4.2 Snímky kolabující bubliny v blízkosti pevné stěny spolu s tlakovou stopou [5].	38
Obrázek 4.3 Úbytek materiálu za jednotku čas [2].....	40
Obrázek 4.4 Sestava komory pro zkoušku kavitační eroze [19].....	42
Obrázek 4.5 Schéma zapojení testovacího okruhu [19].....	43
Obrázek 4.6 Sestava aparatury kavitační zkoušky [22].....	44
Obrázek 5.1 Původní testovací komora společně s testovacím okruhem [zdroj: autor].....	48
Obrázek 5.2 Rám s čerpadlem a s motorem [zdroj: autor].....	48
Obrázek 5.3 Rám [zdroj: autor].....	49
Obrázek 5.4 Rám s tryskou [zdroj: autor].....	49
Obrázek 5.5 První návrh testovacího zařízení [zdroj: autor].....	50
Obrázek 5.6 Rozvaděč s LCD displejem a bezpečnostním tlačítkem [zdroj: autor].....	51
Obrázek 5.7 Vyjímatelný rám [zdroj: autor].....	52
Obrázek 5.8 Detail žlábků.....	52
Obrázek 5.9 Stojan na vrtačky WOLFCRAFT EXCLUSIVE [23].....	53
Obrázek 5.10 Svěrák WOLFCRAFT SIMPLEX 60 [24].....	53
Obrázek 5.11 Popis stojanu na vrtačky [zdroj: autor].....	53
Obrázek 5.12 Ukázka upravených čelistí [zdroj: autor].....	54
Obrázek 5.13 Schéma testovacího okruhu [zdroj: autor].....	55
Obrázek 5.14 Popis rámu – varianta A [zdroj: autor].....	56
Obrázek 5.15 Popis rámu – varianta B [zdroj: autor].....	57
Obrázek 5.16 Konečný návrh testovacího zařízení [zdroj: autor].....	58
Obrázek 5.17 Posuvy stojanů [zdroj: autor].....	59
Obrázek 5.18 Stojany s rámem [zdroj: autor].....	59
Obrázek 5.19 Upravené čelisti svěráku [zdroj: autor].....	60
Obrázek 5.20 Upnutí vzorku [zdroj: autor].....	60
Obrázek B.1 3D model zařízení (1) [zdroj: autor].....	72
Obrázek B.2 3D model zařízení (2) [zdroj: autor].....	72
Obrázek B.3 3D model zařízení (3) [zdroj: autor].....	73
Obrázek B.4 3D model zařízení (4) [zdroj: autor].....	74
Obrázek C.1 Umístění svěráku do vyjímatelného rámu [zdroj: autor].....	75
Obrázek C.2 Testovací zařízení (1) [zdroj: autor].....	76
Obrázek C.3 Testovací zařízení (2) [zdroj: autor].....	77
Obrázek C.4 Testovací zařízení (3) [zdroj: autor].....	78
Obrázek C.5 Testovací zařízení (4) [zdroj: autor].....	79
Obrázek C.6 Testovací zařízení (5) [zdroj: autor].....	80

Obrázek C.7 Testovací zařízení (6) [zdroj: autor] .....81

## SEZNAM TABULEK

---

Tabulka 1: Technické parametry čerpadla Interpump Evolution 2 E2B2014.....	48
Tabulka 2: Technické parametry třífázového asynchronního motoru Mazzoni MEC	112
.....	48
Tabulka 3: Magneticko-indukční průtokoměr MQI 99 – SN značky ELA .....	51
Tabulka 4: Tlakový snímač DMK 331 P značky BD SENSORS .....	51



## SEZNAM PŘÍLOH

---

Příloha A: výkres sestavy .....	72
Výkres sestavy 2-1A/2-00-01 .....	72
Příloha B: Obrázky 3d návrhu .....	72
Obrázek B.1 3D model zařízení (1) [zdroj: autor] .....	72
Obrázek B.2 3D model zařízení (2) [zdroj: autor] .....	72
Obrázek B.3 3D model zařízení (3) [zdroj: autor] .....	73
Obrázek B.4 3D model zařízení (4) [zdroj: autor] .....	74
Příloha C: Fotografie testovacího zařízení .....	75
Obrázek C.1 Umístění svěráku do vyjímatelného rámu [zdroj: autor] .....	75
Obrázek C.2 Testovací zařízení (1) [zdroj: autor] .....	76
Obrázek C.3 Testovací zařízení (2) [zdroj: autor] .....	77
Obrázek C.4 Testovací zařízení (3) [zdroj: autor] .....	78
Obrázek C.5 Testovací zařízení (4) [zdroj: autor] .....	79
Obrázek C.6 Testovací zařízení (5) [zdroj: autor] .....	80
Obrázek C.7 Testovací zařízení (6) [zdroj: autor] .....	81

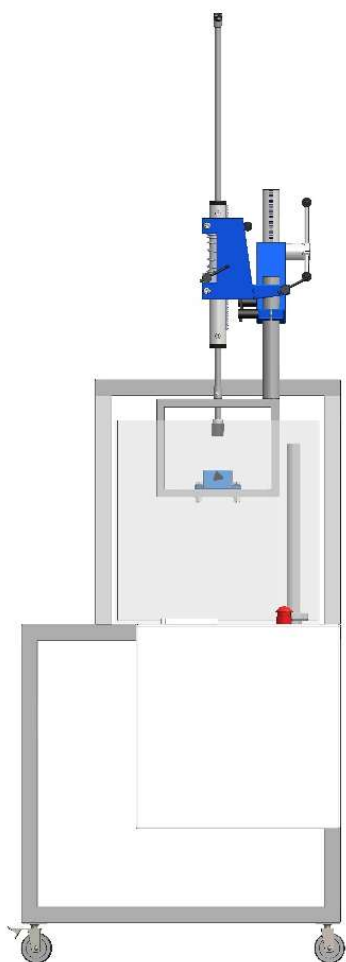
## Příloha A: Výkres sestavy

---

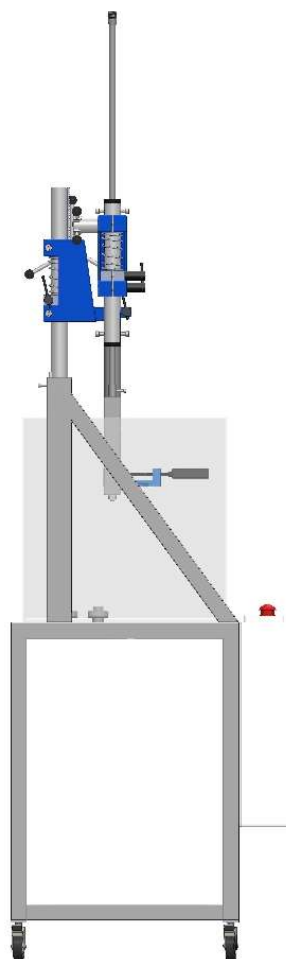
Výkres sestavy 2-1A/2-00-01

## Příloha B: Obrázky 3D návrhu

---



Obrázek B.1 3D model zařízení (1) [zdroj: autor]



Obrázek B.2 3D model zařízení (2) [zdroj: autor]



*Obrázek B.3 3D model zařízení (3) [zdroj: autor]*



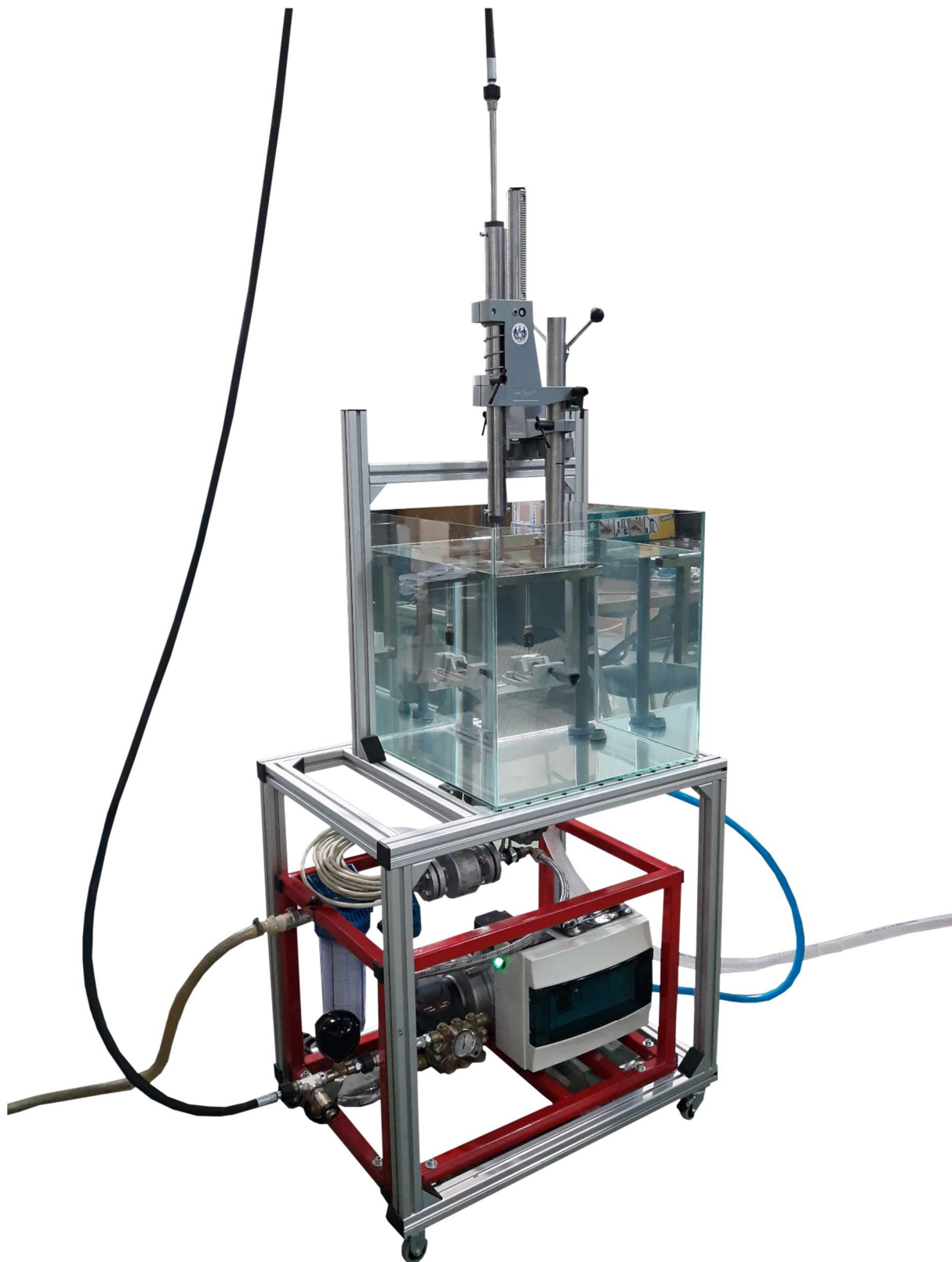
*Obrázek B.4 3D model zařízení (4) [zdroj: autor]*

## Příloha C: Fotografie testovacího zařízení

---



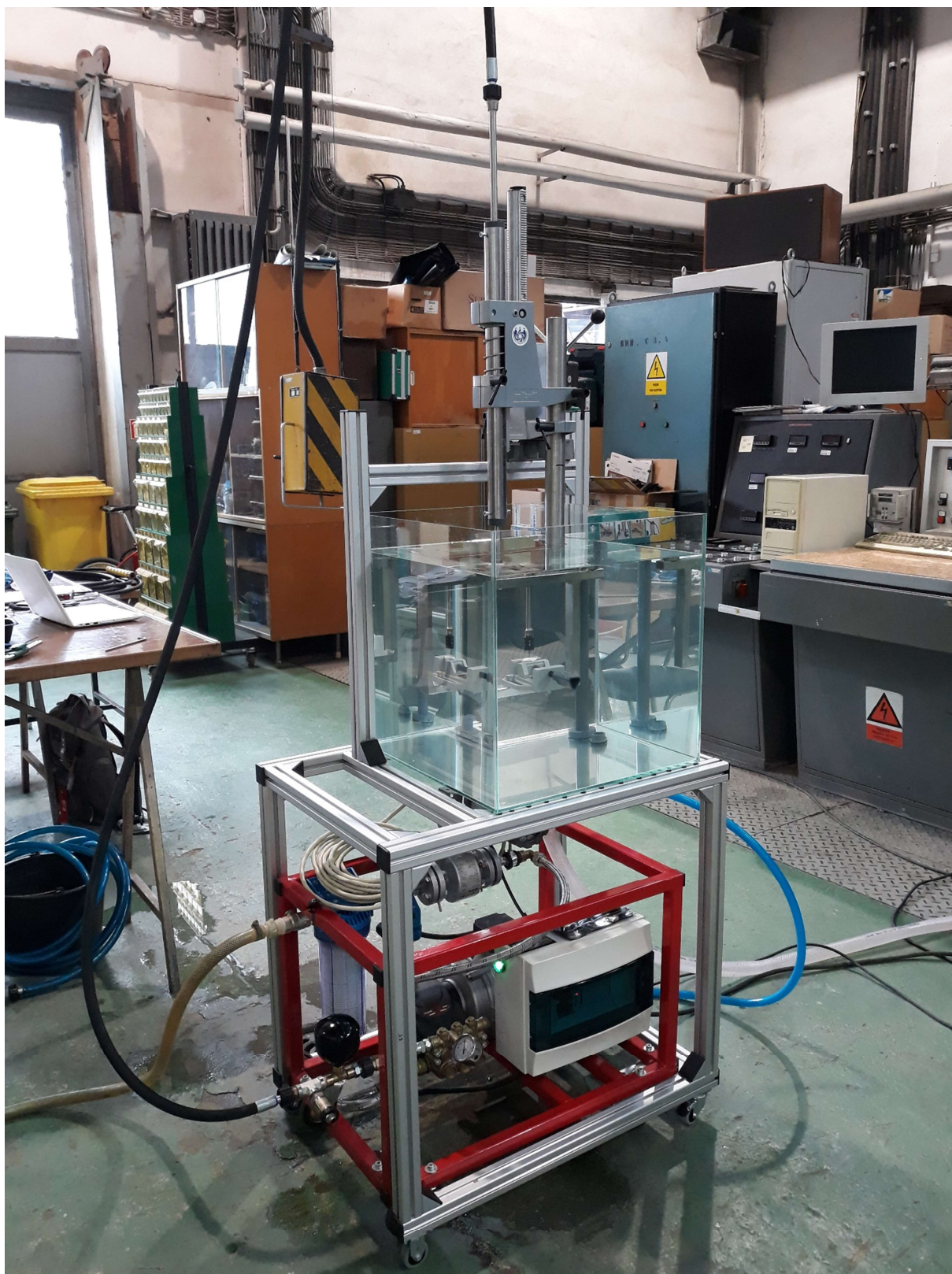
*Obrázek C.1 Umístění svěráku do vyjímatelného rámu [zdroj: autor]*



Obrázek C.2 Testovací zařízení (1) [zdroj: autor]



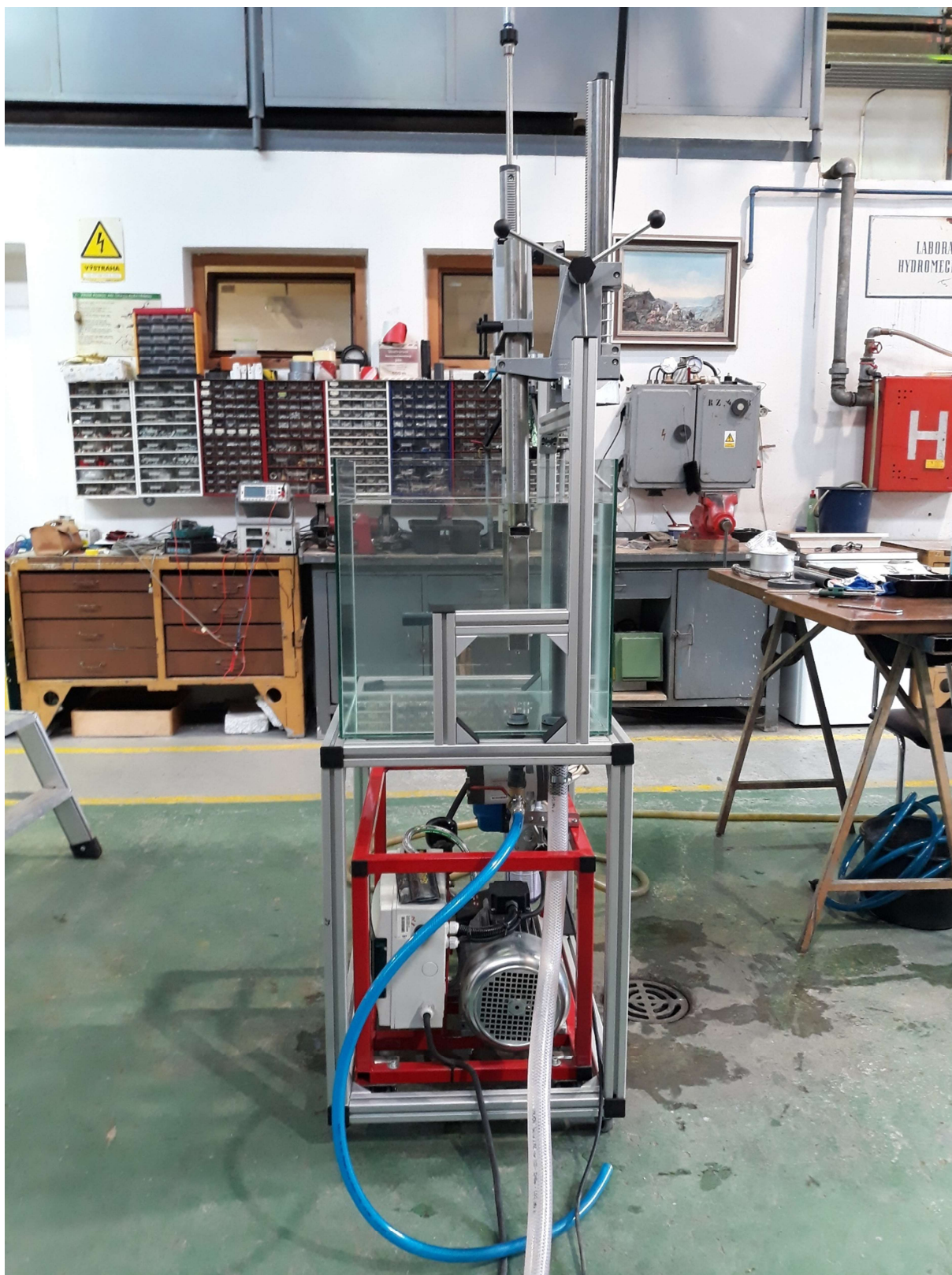
*Obrázek C.3 Testovací zařízení (2) [zdroj: autor]*



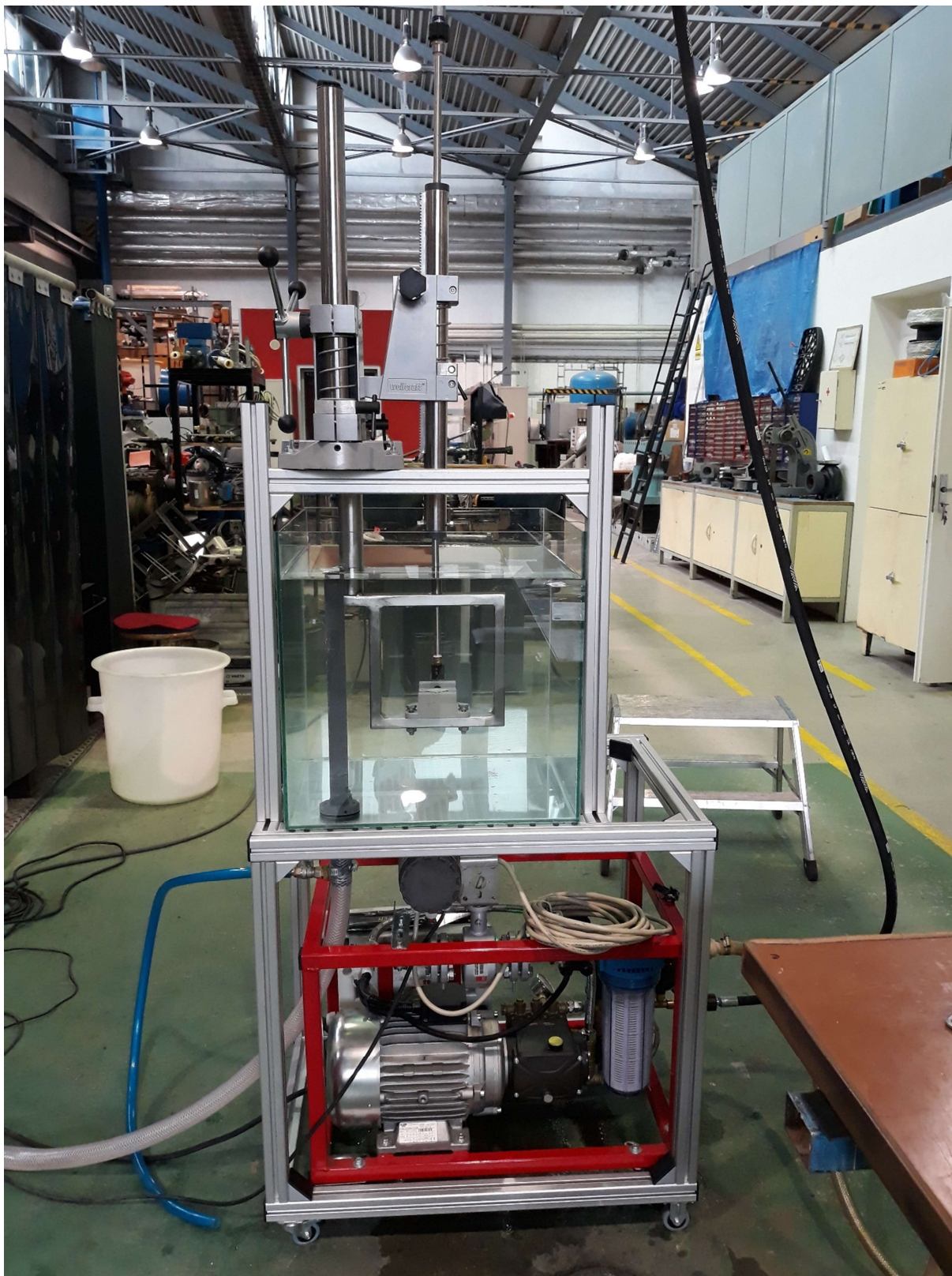
*Obrázek C.4 Testovací zařízení (3) [zdroj: autor]*



*Obrázek C.5 Testovací zařízení (4) [zdroj: autor]*



*Obrázek C.6 Testovací zařízení (5) [zdroj: autor]*



*Obrázek C.7 Testovací zařízení (6) [zdroj: autor]*