

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Měření proudového pole na modelu palivové tyče za použití laserové anemometrie (metodou PIV)

Autor: **Antonín Firýt**  
Vedoucí práce: **Ing. David Lávička, Ph.D.**

Akademický rok 2015/2016

*Originál (kopie) zadání BP*

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

**V Plzni dne:** .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl velice poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Davidu Lávičkovi Ph.D. za ochotu, hodnotné rady a velkou iniciativu při řešení vzniklých komplikací spojených s experimentálním zařízením. V neposlední řadě děkuji rodině a přítelkyni za podporu při mých rozhodnutích a studiu.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Firýt	<b>Jméno</b> Antonín	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Lávička, Ph.D.	<b>Jméno</b> David	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b><del>DIPL</del>OMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Měření proudového pole na modelu palivové tyče za použití laserové anemometrie (metodou PIV)		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	37	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	36	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	1
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>V době, kdy se stále více ustupuje od elektráren na tuhá paliva, převaha energie vyrobené jadernými elektrárnami stoupá. V roce 2015 bylo téměř 20% celkově vyrobené elektrické energie ČR vyprodukováno právě v jaderných elektrárnách. Výkony elektráren se zvyšují, dostavují se nové bloky, zlepšuje se technologie zpracování paliva apod. Právě výkony elektráren ovlivňují různé faktory uvnitř elektrárny, jako např. přestupy tepla mezi palivovými tyčemi a chladicí kapalinou. Jelikož se v aktivní zóně musejí nezbytně vyskytovat distanční mřížky, které udržují palivové tyče v předepsané poloze, je důležité uvažovat o takovémto jevu a popsat jej. Bakalářská práce se zabývá tímto jevem a popisuje působení distančních mřížek v turbulentně proudící chladicí kapalině.</p>
<p><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Laserová anemometrie (PIV), distanční mřížka, palivová tyč, turbulentní proudění</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Fírýt	Name Antonín		
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Lávička, Ph.D.	Name David		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Measurement of the flow field on the model of fuel rod by using laser anemometry (method PIV)			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2016
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	37	<b>TEXT PART</b>	36	<b>GRAPHICAL PART</b>	1
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	In times of stepping back from solid fuel power plants, the amount of energy produced by nuclear power plants is rising. In 2015 almost 20% of the energy produced in nuclear plants. The outputs of the power plants are increasing, new blocks are being constructed, technologies of the fuel handling are improving etc. The outputs of the power plants are influenced by other factors inside the power plant, e.g. temperature exchange between fuel rods and cooling fluid. Space grids are vital part of the active zone holding the fuel rods in specified position and need to be considered. This thesis is observing these effects and describes the influence of space grids in turbulent flow of the cooling fluid.
<b>KEY WORDS</b>	Particle Image Velocimetry (PIV), spacer grid, fuel rod, turbulent flow

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>1</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>2</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ PRINCIPY PIV</b> .....	<b>3</b>
1.1 TECHNICKÉ VYBAVENÍ .....	3
1.1.1 Laser: .....	4
1.1.2 Laserová optika: .....	5
1.1.3 Zařízení pro pořízení záběru: .....	5
1.1.4 Značkovací částice: .....	5
1.1.5 Vyšetřovaná oblast: .....	6
1.2 ZPRACOVÁNÍ OBRAZU .....	7
1.3 OSTATNÍ PŘÍSLUŠENSTVÍ K PIV METODĚ: .....	8
<b>2 JADERNÉ REAKTORY TYPU VVER</b> .....	<b>9</b>
2.1 DISTANČNÍ MŘÍŽKY PROUTKOVÝCH PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ JADERNÉHO REAKTORU VVER: .....	12
2.1.1 Požadované vlastnosti distančních mřížek .....	13
2.1.2 Chování palivových tyčí a poškození nežádoucími jevy .....	13
2.2 PŘÍKLADY POUŽÍVANÝCH TYPŮ MŘÍŽEK .....	15
2.2.1 Varianta A: .....	15
2.2.2 Varianta B: .....	16
2.2.3 Varianta C: .....	17
<b>3 PRÁCE NA EXPERIMENTÁLNÍM ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>18</b>
3.1 DISTANČNÍ MŘÍŽKA POUŽITÁ NA EXPERIMENTÁLNÍM ZAŘÍZENÍ .....	18
3.1.1 Výroba distančních mřížek .....	19
3.2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ .....	21
3.3 MĚŘENÍ .....	25
3.4 VYHODNOCENÍ DAT .....	25
<b>4 VÝSLEDKY PRÁCE</b> .....	<b>28</b>
4.1 POROVNÁNÍ RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ VZHEDEM K VZDÁLENOSTI OD ÚPLAVU .....	30
4.2 POROVNÁNÍ RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ VAR 1 A VAR 2 .....	32
4.3 POROVNÁNÍ RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ VŠECH VARIANT V 2. ROVINĚ MĚŘENÍ V NEJVZDÁLENĚJŠÍ OBLASTI ZA ÚPLAVEM .....	34
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>35</b>
<b>6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>36</b>

Výrobní výkres

37

## Úvod

Cílem bakalářské práce je zkoumat vlivy distančních mřížek palivových tyčí reaktorů VVER (označovaný též jako PWR) a BWR na vzniklé proudové pole, které zásadně ovlivňuje přestup tepla mezi palivovou tyčí a chladicí kapalinou.

V práci bude použit navržený typ distanční mřížky, který bude podroben úpravám. Úpravy mají simulovat nežádoucí jevy změn průtoků, které mohou nastávat např. při vznikání plynových bublin na povrchu palivové tyče. Bubliny vznikají při zahřívání palivové tyče, nebo odparem chladicí kapaliny při zaplavování reaktoru, který byl vypuštěn (např. vlivem havarijní situace), kdy zaplavované tyče mají velmi vysokou teplotu. Na povrchu tyčí se tvoří drobné bublinky, které se chovají jako izolant, neboť snižují přestup tepla mezi chladicí kapalinou a palivovými tyčemi.

Chování proudového pole budeme porovnávat na třech variantách distanční mřížky, kde budeme také sledovat proudové pole v závislosti na vzdálenosti od vzniklého úplavu za mřížkou.

Distanční mřížka s palivovou tyčí bude umístěna do experimentálního zařízení, které se nachází v laboratořích Katedry energetických strojů a zařízení na Západočeské univerzitě v Plzni. Toto zařízení, určené jako model chlazení palivové tyče v jaderném reaktoru, nám bude simulovat obtékání tyče s překážkou. Pozorování vzniklého proudového pole za překážkou, kterou tvoří distanční mřížka, bude zrealizováno a vyhodnocováno metodou PIV (Particle Image Velocimetry), kterou se obecně zabývá první část práce. Dále budou v práci uvedeny a popsány funkce jaderného reaktoru, materiály distančních mřížek s jejich vlastnostmi, a další druhy patentovaných distančních mřížek.

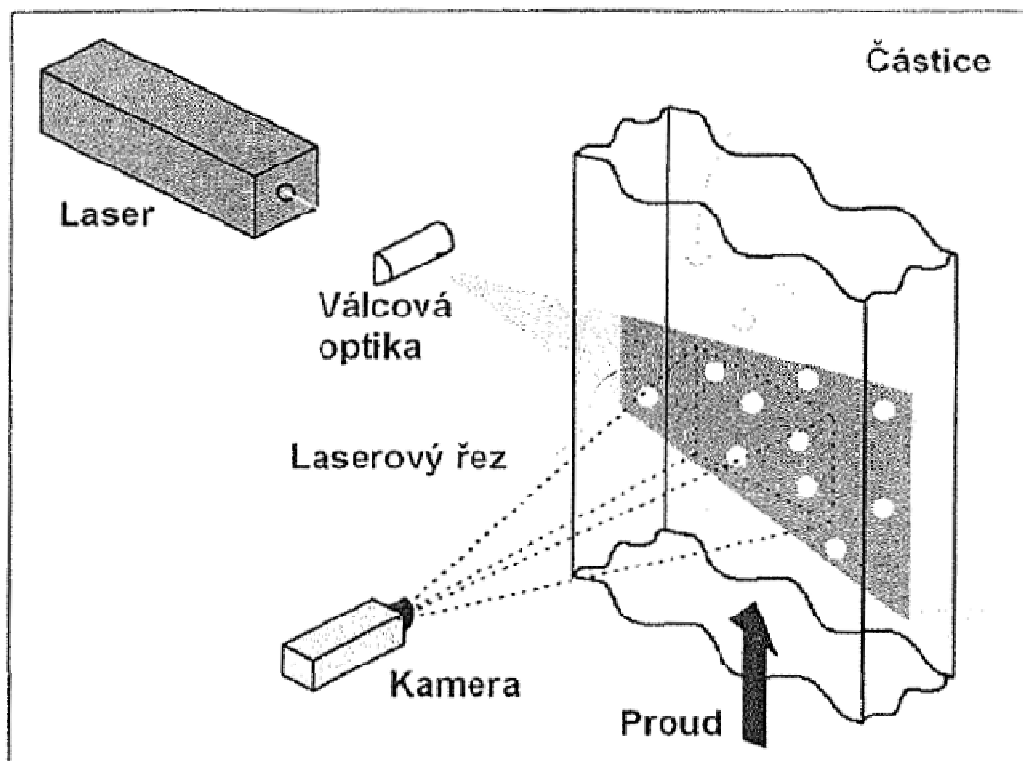


# 1 Základní principy PIV

Particle Image Velocimetry (v češtině laserová anemometrie) je moderní experimentální metoda v mechanice tekutin pro výzkum a diagnostiku proudění. Umožňuje vytvořit mapu vektorového pole díky své schopnosti změřit posunutí toku malých částí za známý časový úsek. Sledujeme dvoufázové proudění média s přidanými částicemi, které mají totožný unášivý pohyb a nemění dynamiku toku kapaliny. Na světelné rovině, vytvořené pulzním laserem, jdou přidané částice sledovat CCD kamerou, která zachytí dva krátce za sebou vytvořené obrazy. Takto zachycené obrazy se pomocí různých softwarů dále zpracovávají v počítačích a vyhodnocují např. metodou vzájemné korelace.

## 1.1 Technické vybavení

Pro záznam PIV obrazů potřebujeme příslušnou techniku. Zařízením pro měření je soubor: laseru, válcové optiky, kamery a měřené (vyšetřované) oblasti viz Obr. 1.



Obr. 1 Schéma uspořádání metody PIV [1] str. 124

### 1.1.1 Laser:

Pro měření PIV metodou je zapotřebí výkonného laseru, který je umístěn kolmo na vyhodnocovanou rovinu. Kritériem při výběru laseru je intenzita dopadajícího světla, která musí být natolik velká, aby dostatečně osvětlila unášené části v tekutině tak, aby je bylo možné sledovat kamerami. Laser nám rovinu osvětlí na krátký časový interval (trvání pulsu), kdy posuv částic během osvětlení zanedbáváme. Pro zapojení s CCD kamerami se využívají 15 Hz lasery a pro kamery CMOS se využívá laseru s vyšší frekvencí 50, 100 a 200 Hz. Jako vhodný laser nám může posloužit NewWave Research Model 25 300 Solo 200XT-15Hz na Obr. 2 od firmy Dantec, jehož čas mezi pulzy je  $15\mu\text{s}$ . Tyto lasery pracují s paprskem o vlnové délce 532 nm a výstupní energií 50 mJ, která zajišťuje dostatečně prosvícený řez proudového pole.



Obr. 2 Laser Solo 200XT-15Hz [7]

### **1.1.2 Laserová optika:**

Vhodně tvarovaná optika nám zajistí formování laserového paprsku dopadajícího na měřenou rovinu a zajišťuje nám dostatečné osvětlení oblasti média. V místě snímání kamer je tak možné sledovat světlorozptylující částičky. Jako optika může být použita např. válcová čočka.

### **1.1.3 Zařízení pro pořízení záběru:**

K online sledování obrazu nám mohou posloužit CCD nebo CMOS senzory kamer. Kamery by měly mít vysoké rozlišení, vysokou rychlost pořizování snímků, velkou měřicí oblast a měly by dobře eliminovat vznik šumu. Tento šum jsou velmi dobře schopny eliminovat CMOS kamery i při slabém osvětlení. Firma Dantec v současné době nabízí novou řadu kamer SpeedSense, které mohou s 4,3 megapixelovými senzory pořídít až 6000 snímků za sekundu. Tyto technologie usnadňují studium toků a turbulencí. Pro měření 3D PIV se používají dvě CMOS kamery nebo čtyři CCD kamery.

Objektivy kamer jsou speciálně uzpůsobeny, aby snímáný obraz měl vysokou kvalitu a šlo tedy studovat obrazy objektů i při několikanásobném zvětšení. Pro objektivy těchto kamer se vybírají úzkopásmové filtry, které zvyšují kvalitu obrazu.

Pro zajištění obrazu v měření byla použita CCD kamera s čipem FlowSense 4M od firmy Dantec, na kterou byl použit objektiv MELLES GRIOT MACRO INVARITAR 2x P/N 43280 s pevnou ohniskovou vzdáleností 120 mm. Objektiv nám byl propůjčen z ČVUT v Praze z FS, Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky od Ing. Jana Novotného, Ph.D., za což mu velice děkuji.

### **1.1.4 Značkovací částice:**

Analýza obrazů spočívá v nalezení průměrného posuvu značkovacích částic ve vyhodnocovaných oblastech. Podmínkou analýzy je, aby se ve vyhodnocované části nalézaly obrazy částic, které bychom mohli dále vyhodnocovat. Nároky na značkovací částice jsou vysoké. Musí být lehce vyrobiteľné (tedy levné), měly by dobře odrážet světlo a hlavně musí mít schopnost lehce se unášet proudem a následovat ho, aniž by změnily rychlost a směr proudění média. Na posledním faktoru závisí velikost značkovacích částic, které by měly být aspoň tak velké, aby je detekční kamera zachytila (doporučená velikost 3 – 5 pixelů), a zároveň tak lehké, aby neztrácely schopnost být nadnášeny ani při malém proudění. Kromě tvaru, velikosti a poměru hustoty částic k hustotě proudící kapaliny nás zajímá i množství částic v proudu. Podle koncentrace částic se hodnotí sycení proudu, které se dělí na:

- *Slabé sycení proudu*
- *Střední sycení proudu*
- *Silné sycení proudu*

Slabé sycení proudu je takové sycení, kdy je pravděpodobnost zachycení více jak jedné částice minimální. Pokud bychom použili metodu dvojnásobné expozice, tedy počátečního a koncového bodu na témže obrazu, můžeme velmi snadno zjistit posunutí  $\Delta x$  a  $\Delta y$ . To se nám povede až tehdy, vyskytne-li se opravdu ve vyhodnocované oblasti právě jeden pár obrazů částic (pár nechybí a ani se nevyskytuje párů více). I tak si však nemůžeme být jisti, zda se jedná o jednu a tatáž částici. Z tohoto důvodu používáme silnější sycení.

Pro střední sycení proudu je typická vysoká koncentrace sycení, kdy se ve všech vyhodnocovaných oblastech nachází obrazy částic. Pro vyhodnocení používáme algoritmy vhodné pro určení průměrného posunutí.

U silného sycení vzniká problém, při němž nám zařízení není schopno rozpoznat jednotlivé částice, které vytvářejí shluky.

V praxi je však důležité, aby byly částice od sebe dostatečně vzdáleny (jedná se o vzdálenost několika jejich průměrů), čímž zabráníme jejich vzájemné interakci. U slabého proudění nesmíme zapomínat na gravitační účinky.

Materiál a velikost částic volíme podle několika parametrů – podle rychlosti proudění, podle vlastností proudícího média a podle intenzity osvětlení. Pro proudění plynů se běžně využívá voda. Pro nás je však důležitější proudění kapalin, kde máme mnoho možností při výběru značkovacích částic, např. skleněné kuličky, které se často používají kvůli ceně navzdory velkému rozptylu.

Pro naši práci jsme si vybrali duté skleněné částice (HGS, Hollow Glass Spheres) od firmy Dantec o velikosti 10  $\mu\text{m}$ .

### 1.1.5 Vyšetřovaná oblast:

Vyhodnocovaná oblast proudového pole by měla být světelně odstíněna, aby pro světlé částice vzniklo dokonale tmavé pozadí a celé zařízení by mělo být chráněno proti okolnímu chvění. Vyšetřovaná oblast je pravoúhlá čtvercová rovina, jejíž zaznamenaný obraz od snímaného objektu je zvětšen o  $M = \text{obraz/objekt}$ . Průměrné posunutí částic se dá tedy vypočítat dle vztahů:

$$\Delta x = \frac{\Delta X}{M} \quad \text{a} \quad \Delta y = \frac{\Delta Y}{M'}$$

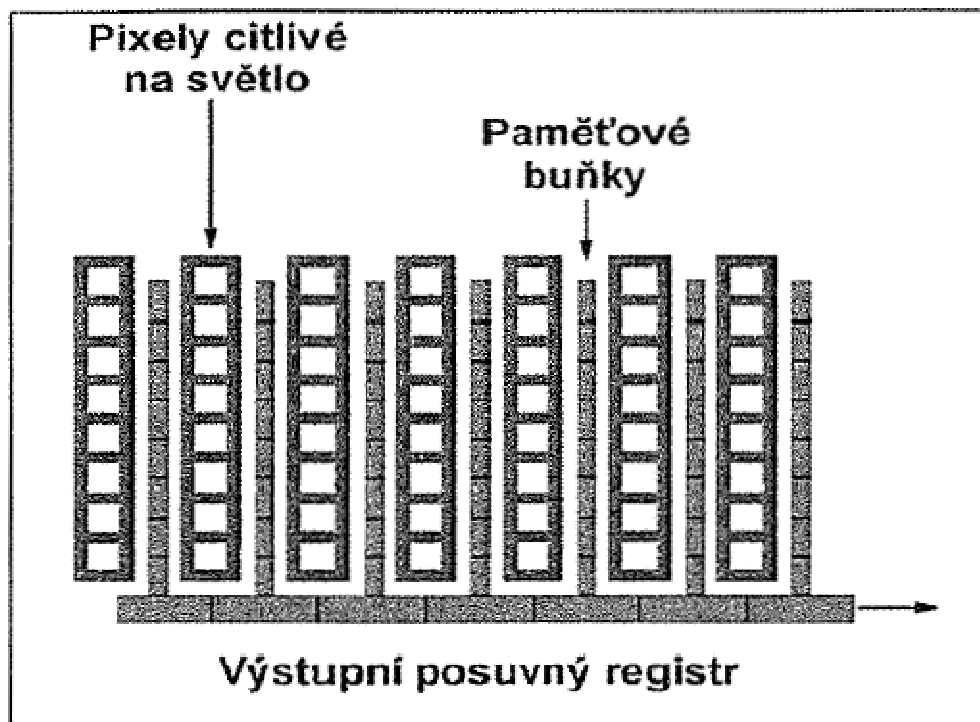
kde  $\Delta x$  a  $\Delta y$  je posunutí částic v objektové rovině a  $\Delta X$  a  $\Delta Y$  v obrazové. Z takto vypočítaných vztahů můžeme nyní zjistit rychlosti  $u_x$  a  $u_y$ :

$$u_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{a} \quad u_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}.$$

Vycházíme však z metody, při níž používáme jednu kameru, která vytváří dvourozměrné vektorové pole. Máme tedy vektory rychlostí v osách  $x$  a  $y$ . Pro trojrozměrné vyhodnocení posunutí částic se využívá dvojice kamer, které vůči sobě přes světelný řez svírají úhel nejlépe  $90^\circ$ . Pomocí třetí kamery získáme i třetí složku rychlosti, složku na ose  $z$ , neboli její normálu, která je kolmá k světelnému řezu. Využitím výsledků pořízených dvojicí kamer získáme třírozměrné posunutí. Pro naši práci použijeme jednu kameru a budeme měřit proudové pole v rovině.

## 1.2 Zpracování obrazu

Princip zpracování obrazu je založen na synchronizaci kamery s pulsním laserem, který ozáří proud toku částic dvěma krátkými pulsy, které snímá kamera. Kamera zaznamenává obrazy a následně je ukládá do počítače pro další zpracování. Proces zpracování obrazů je velice rychlý, trvá několik milisekund a v případě jednoduchých úloh lze počítačem pozorovat vytvořenou vektorovou mapu v reálném čase. Tuto rychlost zaznamenávání lze dosáhnout pomocí CCD senzorů s architekturou „progressive-scan-interline“, viz obr. 3.



Obr. 3 CCD senzorů s architekturou „progressive-scan-interline“ [1] str. 169

Senzory jsou vybaveny stejným počtem paměťových buněk a pixelů citlivých na světlo. Pixely citlivé na světlo zachycují obrazy. První laserem exponovaný a pixely zachycený obraz je ihned přesunut do paměťových buněk. Ten se s druhým pixely zachyceným snímkem odesílá přes výstupní posuvný registr až do počítače, kde se následně zpracovává.

Pořízené záběry se mohou zaznamenávat dvojnásobnou a jednotlivou expozicí. Rozdíl mezi těmito způsoby je následující: dvojnásobná expozice nám oba záznamy poloh částic promítne do jediného obrazu, kdežto u jednotlivé expozice jsou počáteční a koncové polohy částic zachycené každé na jiném obrazu.

Pro určení průměrného posunutí částic se používají korelační metody. Vzájemná pro metodu jednotlivých expozic a pro metodu dvojnásobné expozice je vhodná autokorelace. Nevýhoda autokorelací je nemožnost určení směru posunu a vyšší korelační šum. Vhodnější metoda a častěji používaná je metoda vzájemná korelace.

Data se budou zpracovávat v programu DynamicStudio v.3.40 (naměření dat proběhlo ve starší verzi DynamicStudio v.2.30.) od firmy Dantec, který je určen pro moderní vyšetřování snímaných experimentů. Je schopný vytvářet např. vektorové mapy rychlostí, vizualizaci teplotních polí, nebo vytvářet mapu zátěže materiálu.

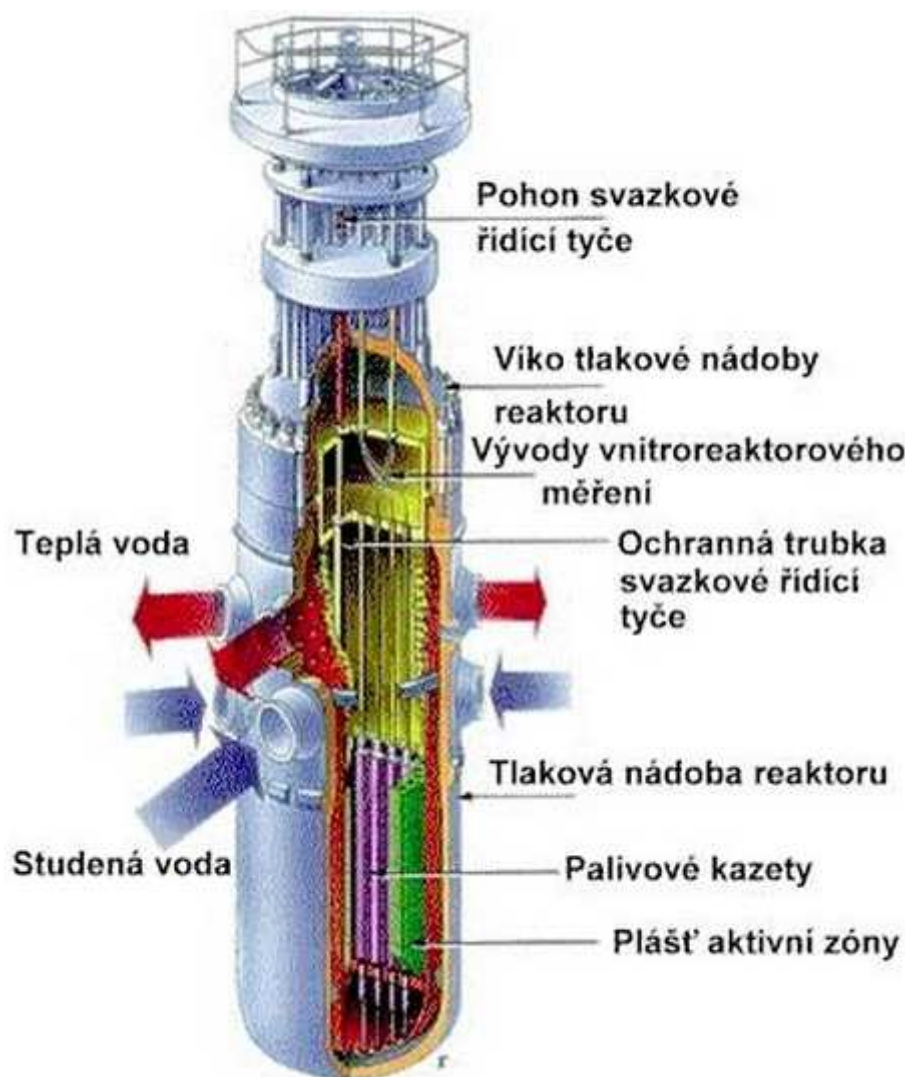
### **1.3 Ostatní příslušenství k PIV metodě:**

Další příslušenství, které je k měření a zpracování dat nezbytné, jsou ochranné brýle, které jsou nutností při práci s laserem, a počítačová pracovní stanice Dell Precision PWS 690 s platformou Windows XP Professional, která sbírá a zpracovává naměřená data.

## 2 Jaderné reaktory typu VVER

Pro lepší porozumění našemu experimentálnímu zařízení si musíme ujasnit, k čemu slouží a jak funguje. Naše experimentální zařízení je model obtékané palivové tyče, která se používá v tlakovodních reaktorech typu VVER.

Reaktory VVER/PWR (vodo-vodní energetický reaktor/Pressurized light - Water moderated and cooled Reactor) jsou reaktory vyvinuté v USA. Jsou to nejrozšířenější typy reaktorů na světě a tvoří přibližně 57% všech průmyslově využívaných reaktorů. Na obr. 4 vidíme schéma reaktoru VVER.



Obr. 4 Tlakovodní reaktor typu VVER [3]

Princip tvorby energie v jaderných elektrárnách s typem tlakovodních reaktorů VVER je následující. Uvnitř reaktoru probíhá řízené štěpení jader nuklidů, které částečně anihilují a touto přeměnou částic dochází k uvolňování jaderné energie. Důsledkem nárazů neutronů

do atomu nuklidu vznikají další neutrony, které jsou za potřebí pro další štěpení, a z jednoho atomového jádra 2 menší jinak stejná jádra. Vzniklé neutrony mohou dále vyvolávat štěpící reakce - jedná se tedy o řetězové štěpné reakce, které jsou při korigování základem jaderné energie. Teplo se získává srážkami, tj. ztrátou kinetické energie částic.

Z každého štěpení mohou vzniknout 2 nebo 3 nové neutrony a počet neutronů se tedy zvyšuje (i přesto, že se určitý počet neutronů zachytí v konstrukčních materiálech, nebo unikne z reaktoru), je zde nutný prostředek pro ovlivnění počtu neutronů. Pro regulaci reaktoru se používají regulační tyče, které zachytávají tepelné neutrony. Materiál, z něhož jsou tyče vyrobeny, může být např. kadmium, bór, hafnium.

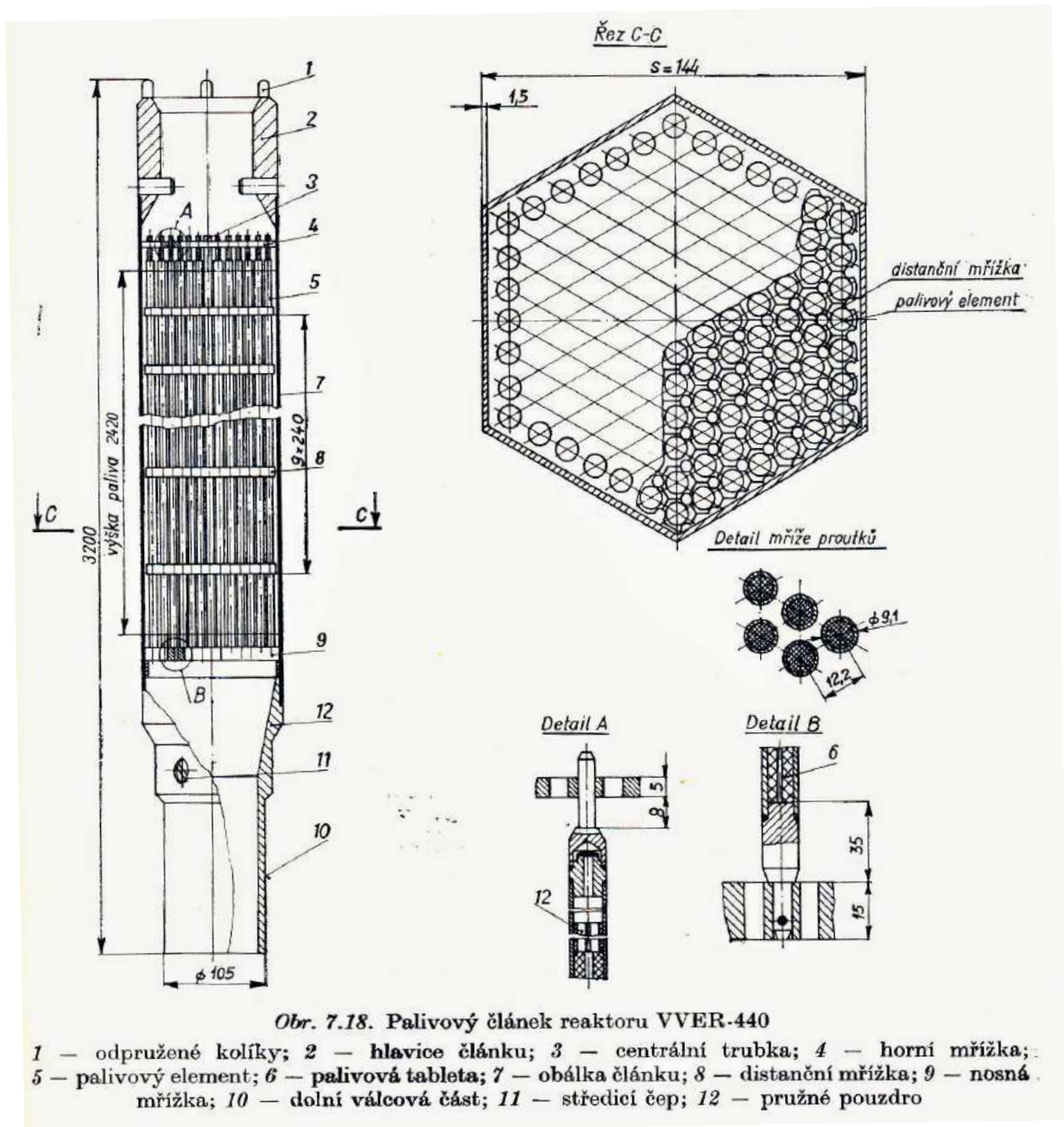
Kontrolované řetězové štěpné reakce probíhají v aktivní zóně. Pro jejich správný chod musí reaktor splňovat funkce, jako je řízení řetězové štěpné reakce, rozmístění paliva a odvod tepla z aktivní zóny. Naším cílem v aktivní zóně je, aby výstupní teplota byla co nejvyšší s ohledem na bezpečný provoz, tj. schopnost chlazení a teplotní odolnost materiálů. Teplota v aktivní zóně je tedy silně ovlivněna výměnou tepla mezi palivem a systémem chlazení. Výstupní teplota vychází z primárního okruhu chladivem, které obtéká palivové články, a tím odvádí tepelnou energii štěpení ven z reaktoru, z aktivní zóny. Primární chladivo obíhá v radioaktivní zóně a pomocí výměníku tepla - parogenerátoru, přechází teploty do sekundárního okruhu, kde obíhá neaktivní pára. Jako chladivo se používají kapaliny (voda, těžká voda), plyny ( $\text{CO}_2$ ) nebo tekuté kovy (Na) s ohledem na typ reaktoru. Mezi nejdůležitější vlastnosti chladiva patří dobrá tepelná vodivost, vysoký bod varu, tepelná stabilita, odolnost proti záření a nízká korozní agresivita. Důležitým faktorem při chlazení je tlak chladiva v palivových kanálech, který zvyšuje hodnotu bodu varu. Hodnota tlaku pro vodu se pohybuje kolem 21 MPa (v závislosti na konstrukci reaktoru).

Ke zpomalování neutronů se v reaktorech používají *moderátory*, které jsou charakteristické svým nízkým atomovým číslem, aby rychle odebraly neutronu při srážce velkou část jeho energie. Transformují neutrony vysokoenergetické na neutrony tepelné, s nízkou energií. Musí mít tedy i dostatečnou hustotu, být chemicky stabilní a neměly by výrazně pohlcovat neutrony. Mezi nejpoužívanější moderátory patří: lehká i těžká voda, grafit, beryllium atd.

Palivový element uložený v palivovém článku se skládá z jaderného paliva a obalu, který hermeticky odděluje štěpný proces a systém chlazení. Materiál obalu (např. zirkon) by měl co nejméně absorbovat neutrony, dobře vést teplo a mít vysokou chemickou stálost i za vysokých teplot. V palivovém článku se může nacházet jeden až stovky palivových elementů, které dohromady tvoří svazek. Svazky mohou být v obalové trubce (tvaru



kuhového, čtvercového nebo šestihranného), kterou proudí chladivo. V tomto svazku jsou palivové elementy uloženy do mříží o trojúhelníkovém, kruhovém nebo čtvercovém profilu a k jejich distancování používáme distanční mřížky. Pro každý typ reaktoru se liší palivové články, jejich uspořádání (s ohledem na geometrii aktivní zóny) a funkce i typ mřížek. Příklad mřížky tlakovodního reaktoru VVER-440 je uveden na Obr. 5 i s celým palivovým článkem.

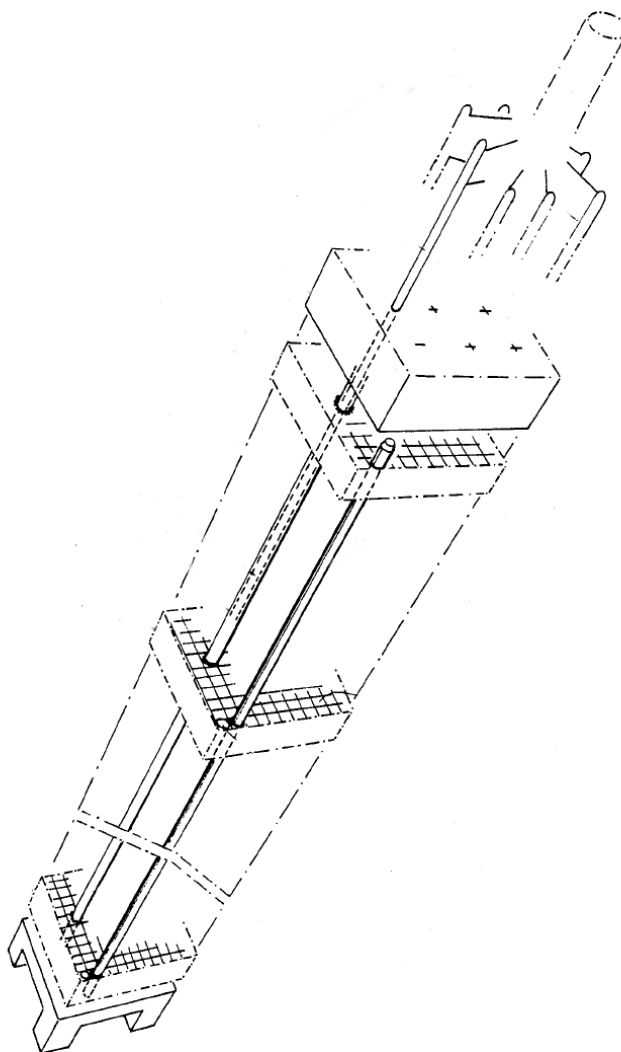


Obr. 5 Palivový článek reaktoru VVER 440 [2] str. 259

V tomto případě prochází distanční mřížkou palivový element, který je složený z šestice tablet obohacených  $UO_2$  umístěných v trubce ze slitiny Zr-1Nb. Materiál deseti distančních mřížek je austenitická ocel.

## 2.1 Distanční mřížky proutkových palivových článků jaderného reaktoru VVER:

Uvnitř palivového článku jaderného reaktoru se nachází palivový soubor, uvedený na Obr. 6, s palivovými proutky uspořádanými v mřížkách, regulačními tyčemi a jednou centrální měřicí trubicou, mezi kterými proudí chladicí médium. K distancování proutků se používá dvou až deseti distančních mřížek, které mají za úkol udržovat tyče v předepsané poloze, aby mohlo proudící médium správně splňovat své funkce chladicí kapaliny a moderátoru. Mřížky by měli zajišťovat udržení polohy proutků i při vibraci, nebo při nárazech vzniklých zemětřesením. Také brání v nežádoucím kmitání způsobeném turbulentními proudy chladicího média. Distanční kroužky mřížek jsou opatřeny pružinami, vykrojením a někdy lopatkami. Vykrojení je zde pro lepší přívod vody k palivovému proutku, pružiny udržují tyč v předepsané poloze přitlačením a lopatky zlepšují mísení chladicího média. Přítomností mřížek však vznikají nežádoucí turbulence, které se dají regulovat vhodným uspořádáním a tvarem mřížek.



Obr. 6 Palivový soubor jaderného reaktoru [4] str. 2

### 2.1.1 Požadované vlastnosti distančních mřížek

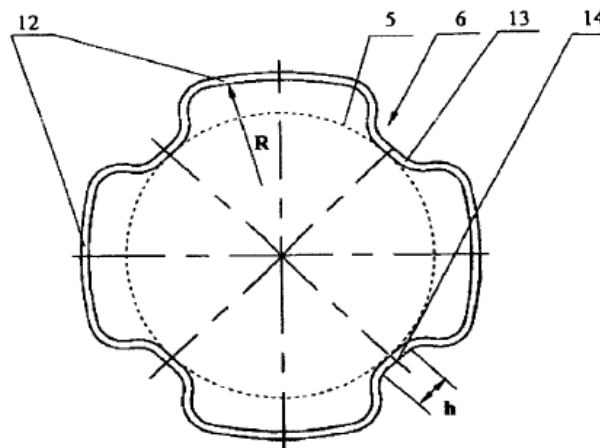
Distanční mřížky by neměly fyzikálně ovlivňovat probíhající jadernou reakci, ani průtok chladicího média (neměl by být velký průtokový odpor). Mřížka by měla mít také dobrou tepelnou vodivost. Jako materiál mřížek lze vybrat např. slitinu zirkonu, slitinu Inconel nebo antikorozi ocel. Inconel je slitina 3 prvků: Ni-Cr-Mo, jejíž výhodou je přítomnost chromu, který působí korozivzdorně. Na druhou stranu nikl pohlcuje množství neutronů. Nejrozšířenější je antikorozi ocel s 19 % chromu (korozivzdornost), která je sice cenově dostupná, ale má velkou tepelnou roztažnost, což je její největší nevýhodou, proto se používá s ohledem na toto omezení.

### 2.1.2 Chování palivových tyčí a poškození nežádoucími jevy

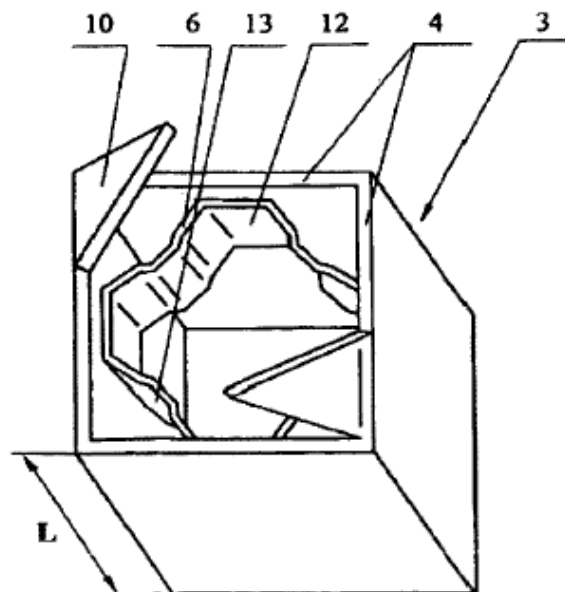
Síly se na proutcích přenášejí v radiálním směru, čímž se v místě dotyku mřížky s pláštěm palivové tyče tvoří nežádoucí napětí, která mohou způsobovat deformace a mechanicky poškozovat proutky (např. otěrem). Další poškození palivové tyče, způsobené turbulentním prouděním chladicí kapaliny, může být otěr o distanční mřížku při nedostatečné podpoře palivového proutku. Tento otěr může kompenzovat materiál a tvar distanční mřížky, konkrétně velikost a tvar styčné plochy, přítlačná síla pružin a jejich tvarová a objemová změna za provozu. Při provozu nesmí nastat velké tvarové změny, aby se distanční mřížky nenatočily či nevyklenuly, což by zapříčinilo nedostatečné zasunutí orgánů, které by mohlo vést k neúplné regulaci štěpné reakce. Může dojít také ke zkroucení či vyboulení, které zapříčiní lokální nárůst výkonu z důvodu lepší moderace, neboť se zvětší šířka vodní mezery. Dalším nežádoucím jevem je otěr nečistotami, který má jako druhý nejčastější jev u tlakovodních reaktorů za důsledek selhávání paliva. Nejvíce náchylná část je na vstupu chladiwa do soustavy.

V případě zachycení pevných částic do prostoru mezi palivovou tyčí a distančním kroužkem, dochází k lokálnímu snížení průtoku chladicí kapaliny a ke zvýšení turbulencí.

Uvádím zde příklad samotného distančního kroužku na Obr. 7 a tentýž distanční kroužek s rozmístovací mřížkovou buňkou na Obr. 8. Rozmístující mřížková buňka obsahuje deflektory ve tvaru lopatek za účelem promíchání proudícího média, které vede k lepšímu vyrovnání teplot. V každé buňce se nachází distanční kroužek obemykající palivovou tyč. Délka buněk je zde volena od 15 do 60 mm a velikost kroužků je od 5 do 20 mm.



Obr. 7 Distanční kroužek [5] str. 14



Obr. 8 Mřížková buňka s deflektory [5] str. 13

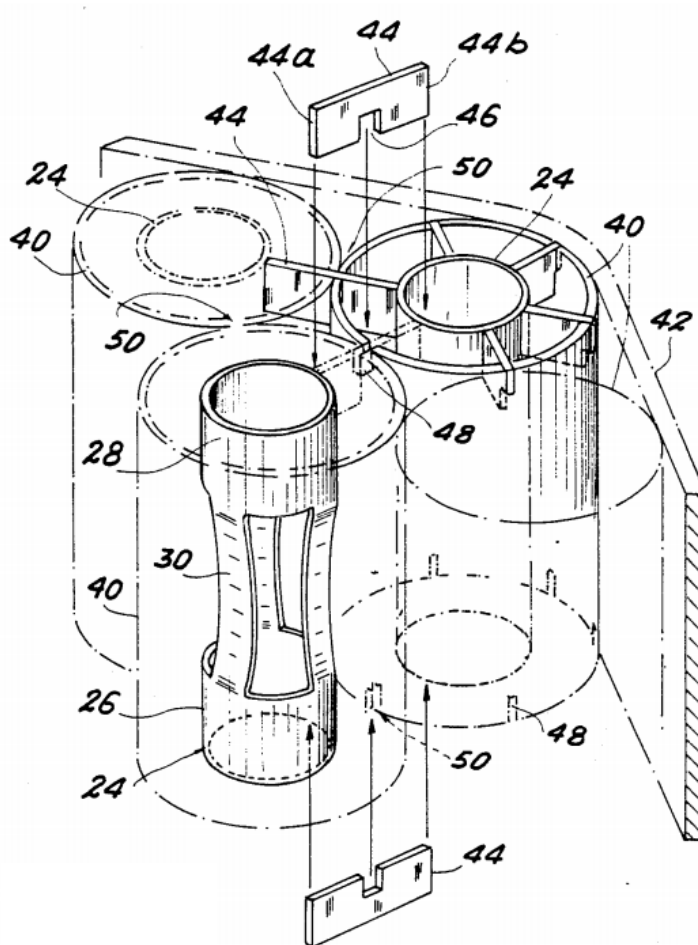
Distanční mřížka je vyrobitelná z trubkového předlisku a má uzavřený profil. Tvoří ji 8 plošek, z nichž jsou 4 zaoblené konkávně a 4 konvexně. Konvexní zaoblení je uzpůsobeno pro dotyk s buňkou (nebo dalším prvkem mřížky) a konkávní zaoblení, které slouží pro dotyk s palivovou tyčí. Na konkávních ploškách je rovná část zajišťující pružné vlastnosti, které kompenzují rozdíly při vychýlení tyčí z os. Tím snižují poškození povrchu, vznikající vlivem tření.

## 2.2 Příklady používaných typů mřížek

Následující 3 varianty mřížek jsou určeny pro udržení palivových tyčí v předepsané poloze, i přes vliv již zmíněných nežádoucích faktorů, jako je např. zemětřesení. Tyto mřížky se skládají z trubíc se dvěma charakteristickými prstenci, které jsou spojeny pružnými pásky, jejichž prohnutí je situováno k ose trubice. Prstence tyč fixují a centrují a pásky ji utahují, aby se nemohla pohybovat axiálně, a také tlumí případné vibrace. Prostředky k pravidelnému zafixování trubíc k mřížce mohou být obdélníkové plíšky, které jsou spojeny jednou stranou s prstenci a druhou s mřížkou.

### 2.2.1 Varianta A:

Podle první varianty uvedené na Obr. 9 se používá šestice plíšků 44, které jsou uprostřed vykrojené do tvaru písmene U. Tyto plíšky mají každou svoji stranu 44a a 44b přivařenou k jinému sousednímu prstenci 28 a jsou překlenuty přes taktéž vykrojené stěny distanční mřížky 40.

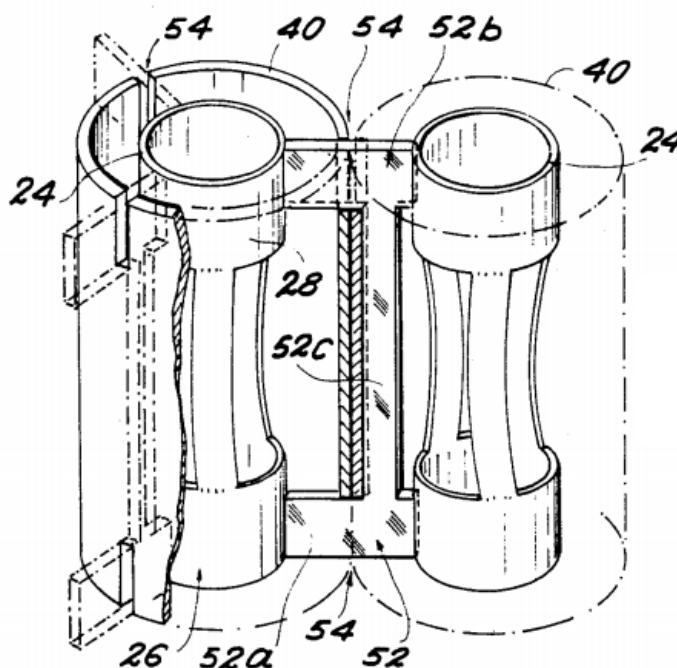


Obr. 9 Varianta A [4] str. 4

Mřížka se vyrábí poskládáním jednotlivých buněk 40 vedle sebe a následným přivařením destiček 44 ke spojovacím místům. Poté je zavedena trubice 24, která se prstenci 26 a 28 přivaří k plíškům.

### 2.2.2 Varianta B:

Podle druhé varianty uvedené na Obr. 10 je distancování zajištěno plíšky 52a a 52b, které jsou spolu spojené pomocným dílem 52c, přičemž plíšky zde vykrojené nejsou. Vykrojené jsou pouze stěny 40, jimiž plíšky procházejí.



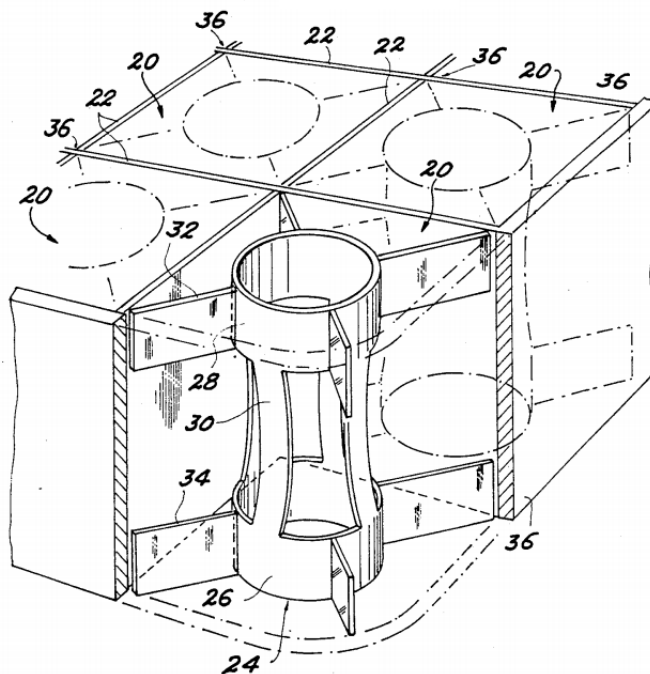
Obr. 10 Varianta B [4] str. 6

Montáž je podobná jako u předchozí varianty: k poskládané mřížce se přivaří součást 52 složená z plíšků 52a, 52b a mezidílu 52c. Následně se zavedou trubice 24, které jsou prstenci 26 a 28 přivařeny k plíškům.

U tohoto provedení je výhodné, že se zamezí odpojení plíšku vlivem velmi rychlého proudění kapaliny mezi tyčemi. To je zajištěno právě spojením dvou nad sebou poskládaných plíšků mezidílem.

### 2.2.3 Varianta C:

Předchozí dvě varianty distančních mřížek, měly kruhovou strukturu mezer. Na Obr. 11 jsou tyto mezery čtvercového profilu a jsou vytvořené překříženými destičkami.



Obr. 11 Varianta C [4] str. 3

Přítomnost plíšků 32 a 34 zvyšuje pevnost celé konstrukce mřížky, čímž dostáváme stejný odpor k rázově vyvolaným silám (např. zemětřesení), aniž bychom zvyšovali tloušťku plíšků. Také je možné snížit tloušťku destiček, čímž snížíme celkový hydraulický odpor.

Montáž se provádí přivařením plíšků 32 k prstencům 28 a plíšků 34 k prstencům 26. Následně se přivařené plíšky uloží do úhlopříček čtverců, kde jsou přivařené k deskám mřížky 22. Svařování lze provést laserem nebo elektronovým paprskem.

### 3 Práce na experimentálním zařízení

#### 3.1 Distanční mřížka použitá na experimentálním zařízení

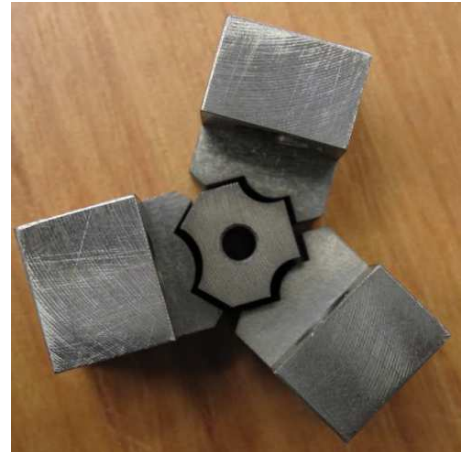
Distanční mřížka použitá pro měření, jejíž technický výkres je uveden v příloze, byla zhotovena na funkčním vzorku (Obr. 12). Vzorek je složen ze tří měkkých čelistí, na nichž jsou uloženy čelisti tvarové, a z vnitřního kolíku. Tvarové čelisti lze s vnitřním kolíkem zaměnit za jiné, pokud chceme vytvořit jiný profil. Čelisti jsou umístěné na sklíčidle soustruhu a pohybují se pomocí souosého pohybu sklíčidla za pomoci kličky.



Obr. 12 Funkční vzorek pro výrobu distančních mřížek [6]



V čelistech na Obr. 12 je upevněna mnou vybraná verze tvarových čelistí pro tvorbu distanční mřížky. V rozloženém a zvětšeném stavu je můžeme vidět na Obr. 13. (Profil střední části - klínku opisuje pro představu kružnici o průměru 14,5 mm)

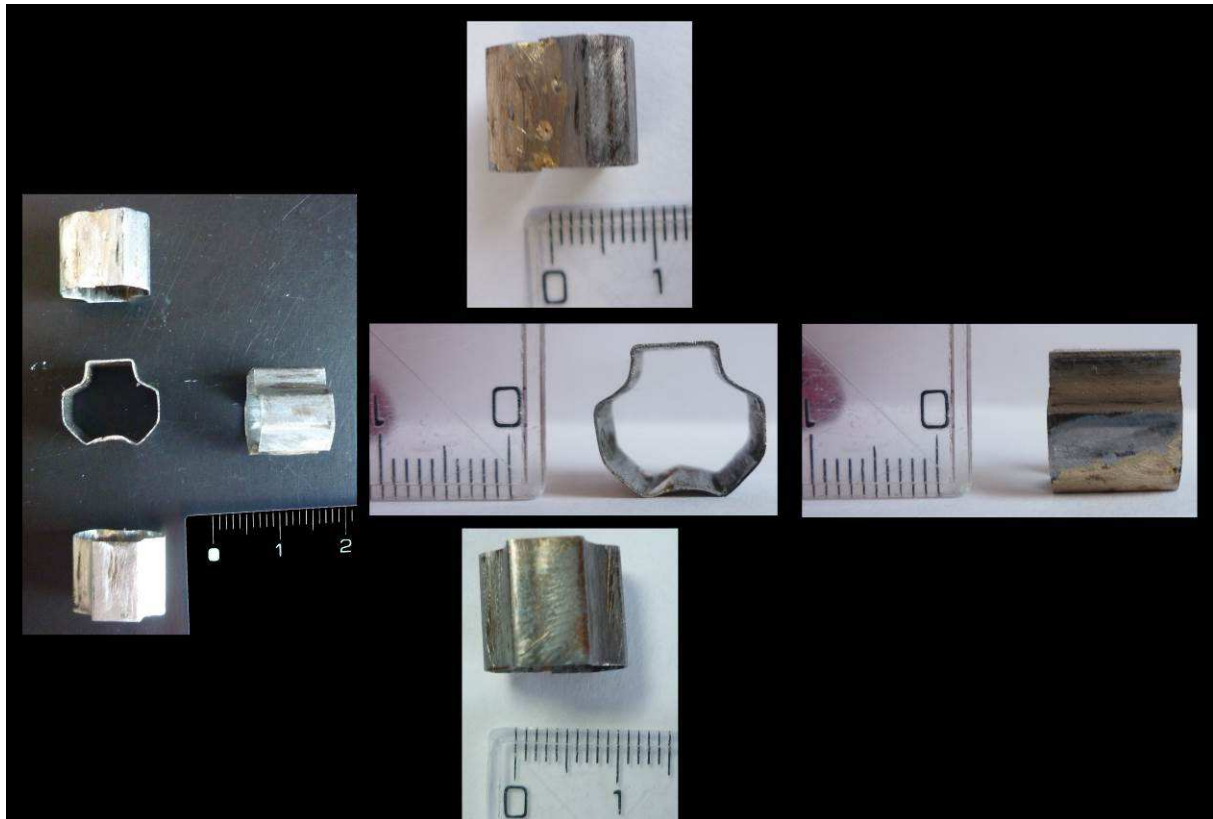


Obr. 13 Tvarové čelisti [6]

### 3.1.1 Výroba distančních mřížek

Požadovaný tvar a velikost distančních mřížek je předem znám z výkresové dokumentace. K výrobě je použit polotovár - nerezový plech o přibližných rozměrech 20 x 30 cm a tloušťce 0,3 mm. S jakou přesností mřížky vzniknou, závisí na manuální zručnosti a použitím příslušenství.

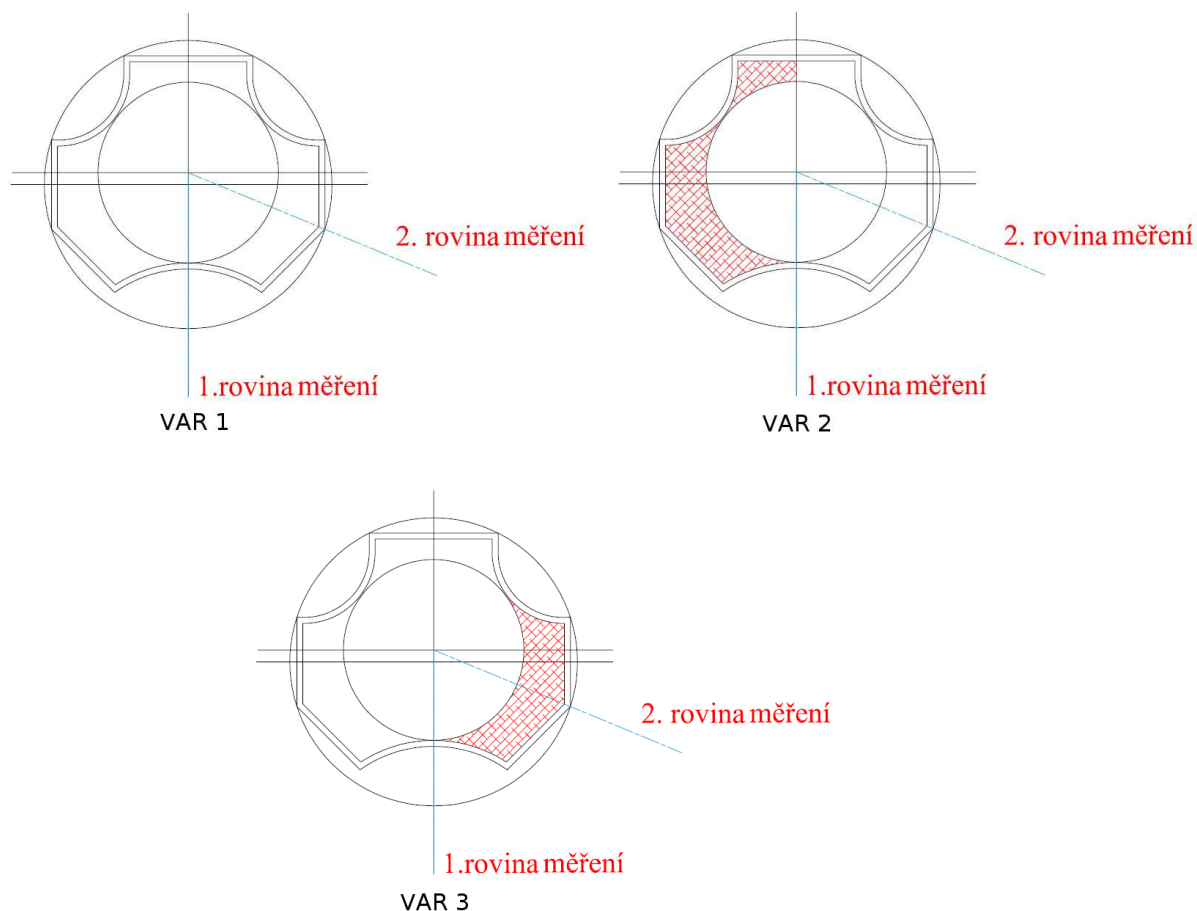
Plech byl ručně, pomocí nůžek na plech, nastříhán na malé proužky o rozměrech 13 x 54 mm, které byly následně na čepu zahýbány do tvaru kruhu, aby se lépe vkládaly do čelistí. Čelisti se s vloženým plechem silně utáhly sklíčidlem, aby plech kopíroval tvar klínku a čelistí. Tímto jsme vytvořili mřížku, která se dále musí na svých volných koncích zastříhnout a následně spojit přídatným materiálem. Zastříhávání provádíme, aby se materiál nepřekrýval a volné konce na sebe navazovali – musíme být však opatrní, abychom materiálu neubrali moc, jinak bychom mřížku znehodnotili. Přídatným materiálem jsme zvolili pájecí elektrody Castolin RX 6103 se 40 % stříbra, aby byl spoj kvalitní, a k pájení byla použita Bernzomatic TS8000 souprava MAP/UC. Následovala povrchová úprava broušením, za účelem odstranění nečistot a zarovnáním svaru. Takto upravenou mřížku můžeme vidět na sérii fotografií na Obr. 14.



Obr. 14 Fotografie zhotovené mřížky

Výroba mřížek byla manuálně náročná a vyrobené mřížky nebyly zcela identické. Mřížek tedy bylo, pro lepší výběr té nejvhodnější, zhotoveno 5. Z těchto 5 mřížek, se vybraly 3 nejpřesnější, které byly následně pájením upevněny na palivové tyče. Vznikly tak 3 vzorky pro měření.

První vzorek byla distanční mřížka přidělaná na tyč bez dalších úprav (Obr. 15 VAR 1). Druhý vzorek (Obr. 15 VAR 2) distanční mřížky podlehl následující úpravou: jeden z 2 identických otvorů, který neprochází rovinou měření, byl zapájen spolu s bližší půlkou 3. menšího otvoru napájeným přídavným materiálem. Úprava nám má představovat již dříve popsany jev vytváření plynových bublin na povrchu palivové tyče. Třetí vzorek (Obr. 15 VAR 3) byl podroben podobné úpravě, jako vzorek druhý. Jeden z 2 identických otvorů, tentokrát ten, který se nachází v rovině měření, byl zapájen za stejným účelem (Obr. 15 VAR 3).

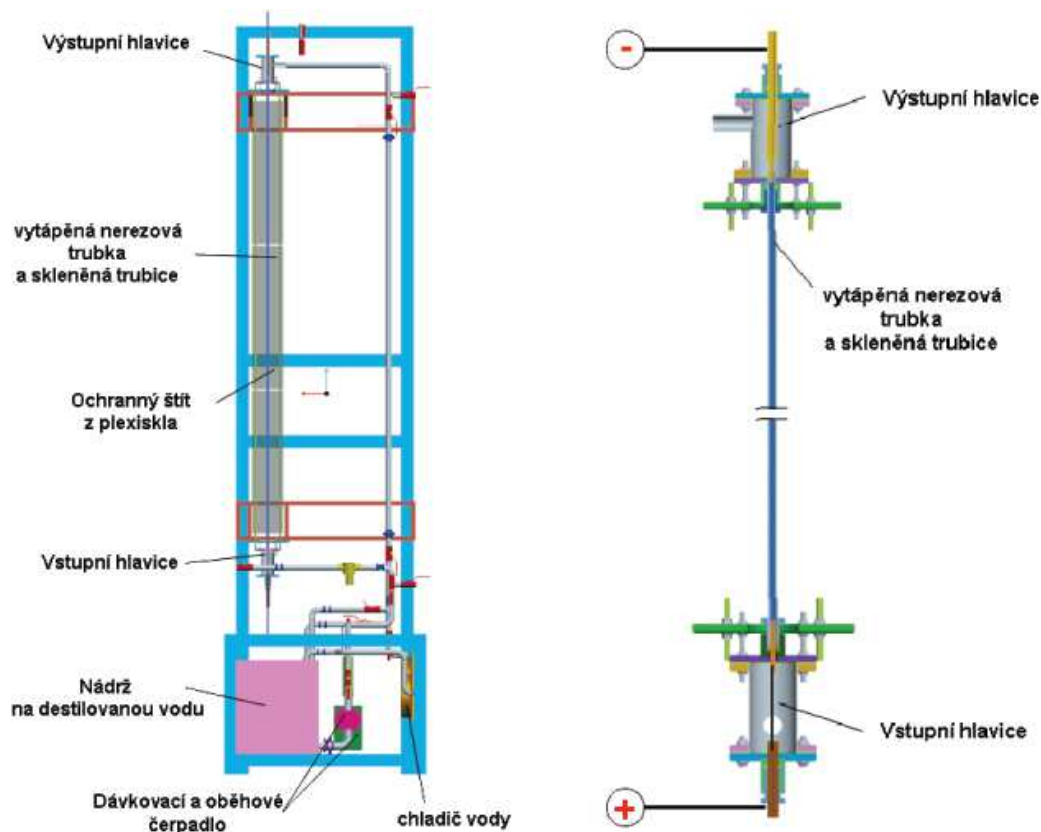


Obr. 15 Varianty mřížek: VAR 1, VAR2, VAR3

Na Obr. 15 Varianty mřížek: VAR 1, VAR2, VAR3, lze tedy vidět všechny varianty mřížek, přičemž šrafování označuje místa, která byla zaslepena pájením. Ucpání průtočné plochy v % je následující: u VAR 2 je ucpáno cca 27% průtočné plochy a u VAR 3 je ucpáno cca 21%.

### 3.2 Experimentální zařízení

Experimentální zařízení, jehož schéma vidíme na Obr. 16, muselo být před samotným měřením uvedeno do provozu. Jako první se musela celá konstrukce zařízení očistit a následně zkontrolovat funkčnost všech částí (čerpadla, těsnění, atd). Po napuštění nádrže vodou a zprovoznění čerpadla se musela věnovat pozornost průhledné trubici a hranolku, který trubicí rozděloval na 2 díly. Obě trubice musely být, pomocí silikonu, k hranolku vodotěsně upevněny tak, aby spoj odolal tlaku, který vytváří čerpadlo (později musel být spoj upraven, neboť povolil důsledkem tlaku a manipulace při sestavování).



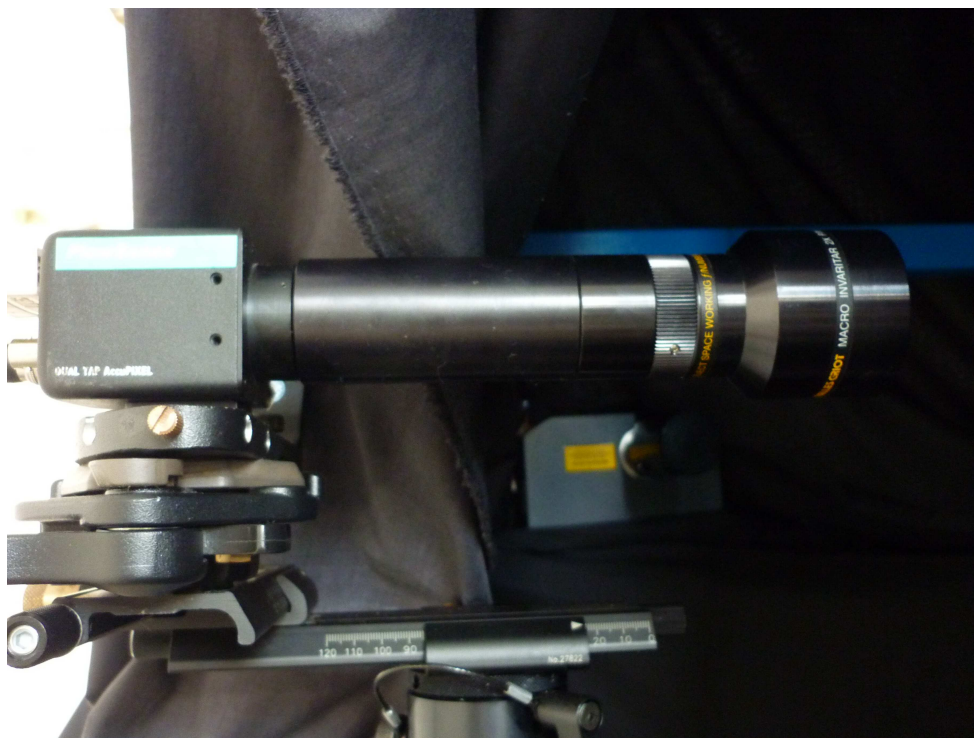
Obr. 16 Schéma experimentálního zařízení [8]

Dalším krokem bylo nařezání nerezových tyčí s průměrem 9,1 mm na požadovanou délku 1360 mm tak, aby mohla být upevněna na měděné elektrody umístěné u vstupu a výstupu vody do průhledného členu. Na modely palivových tyčí se následně pájely distanční mřížky do požadované výšky 710 mm. Nastavením elektrod bylo možné tyč vertikálně posouvat v rozmezí asi 50 mm na přesnou pozici. Takto se nastavila pozice distanční mřížky, která byla asi 40 mm pod měřenou oblastí – měřená oblast byla tedy v rozmezí od 750 – 770 mm.

Pájení bylo provedeno stejným příslušenstvím, jako u operace spojování distančních mřížek. Pájením byly také vytvořeny překážky mezi tyčí a mřížkou, simulující snížený průtok mezi palivovou tyčí a distančním kroužkem. Po této operaci následovala povrchová úprava za účelem odstranění nečistot a přípravy na nanesení černé barvy. Černá barva byla aplikována z důvodu snížení odlesků při měření.

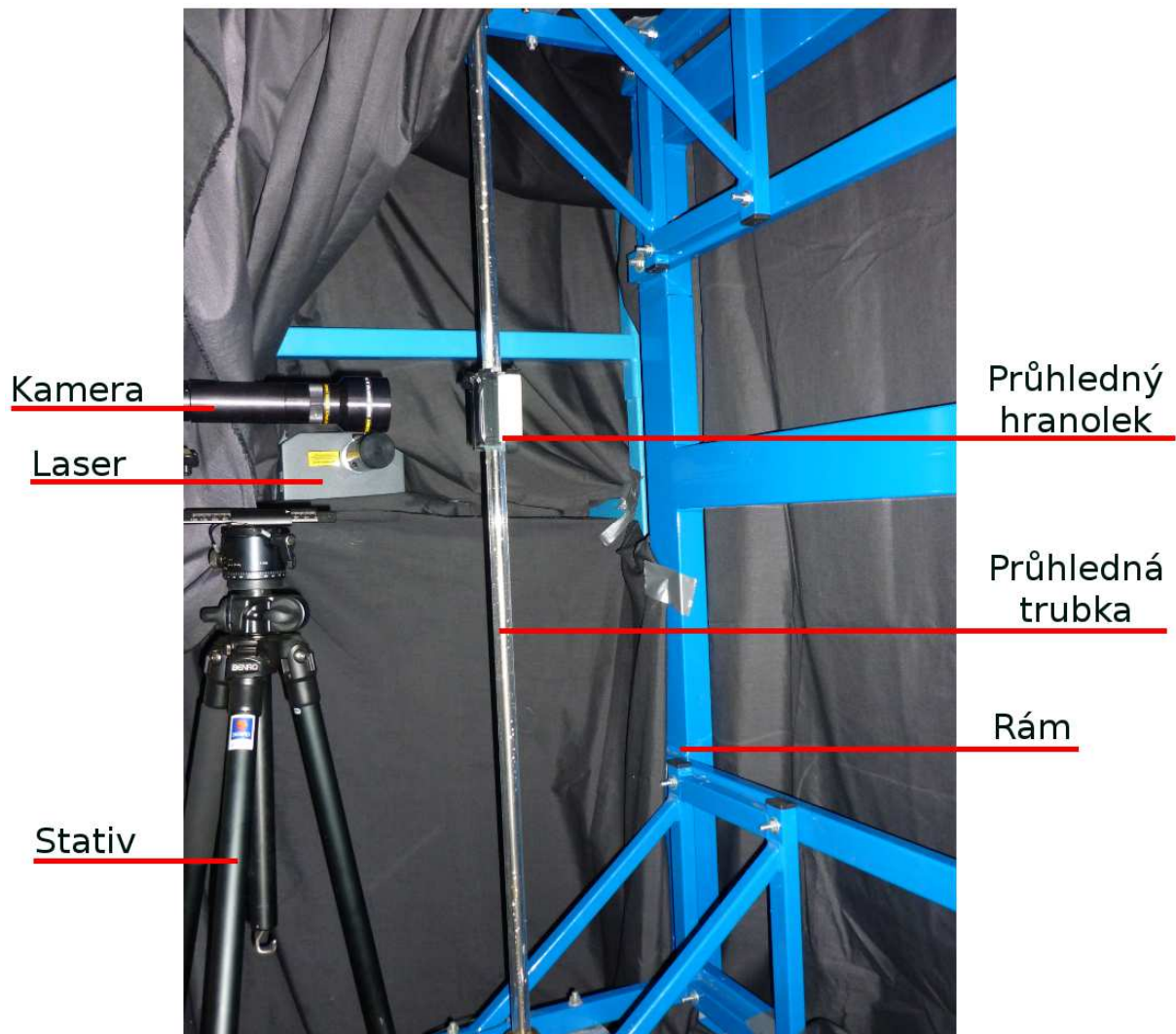
Pro měření se dále musela, vedle experimentálního zařízení, postavit stabilní konstrukce s vodorovnou deskou pro umístění laseru. Výška desky se upravila tak, aby laserový paprsek byl ve stejné výšce, jako průhledný hranolek, na kterém se snímalo proudění. Následovalo nastavení směru laseru do míst měření. Frekvence laseru byla při měření nastavena na 180 Hz.

Do stejné výšky, tentokrát rovnou na konstrukci experimentálního zařízení, byl upevněn stativ s kamerou. Se stativem byla manipulace značně složitější, neboť musela být kamera uložena jak vodorovně, tak v přesné vzdálenosti od snímaného prostoru a samozřejmě v dané výšce. Vzdálenost od měřeného prostoru bylo nutné dodržet z důvodu pevné ohniskové vzdálenosti objektivu kamery, která byla 120 mm. Práci nám značně usnadnil multifunkční stativ s vodorovným posuvem kamery do směrů  $x$  a  $y$  – vzdálenost jsme nejdříve odhadli a následně, po propojení kamery s výpočetní stanicí, byla pomocí programu Dantec DynamicStudio dále upravována dle zaostření. Na Obr. 17 lze vidět stativ s pojezdem do směrů  $x$  a  $y$ , na kterém je umístěna kamera s objektivem.



Obr. 17 Stativ s pojezdem do směrů  $x$  a  $y$

Kvůli eliminaci odlesků, které vytvářely značné komplikace při měření (značkovací částice se ztrácely v odlescích), se průhledný hranolek musel oblépit černou páskou v místech, kde neprocházela laserová paprsek a kde se nesnímal obraz. Především v místech, kde se snímal obraz a procházela laserová paprsek, musela být, před i po manipulaci s hranolkem, odstraněna lihem všechna nečistota a mastnota. Jako poslední bylo celé zařízení zastíněno černou látkou, za účelem zkvalitnění snímaných obrazů z kamery. Na Obr. 18 můžeme vidět rozložení objektů při měření.



Obr. 18 Rozložení příslušenství při měření

V dalším kroku přípravy byly důkladně vmíchány duté skleněné značkovací částice (HGS od firmy Dantec o velikosti  $10\ \mu\text{m}$ ) do vodou napuštěné nádoby a poté v celé soustavě promíchány pomocí čerpadla. Čerpadlo s příkonem  $31\ \text{W}$  dopravovalo vodu o teplotě  $31^\circ\text{C}$  do výšky  $3,1\ \text{m}$ . Otáčky byly nastaveny na  $2400\ \text{ot/min}$ .

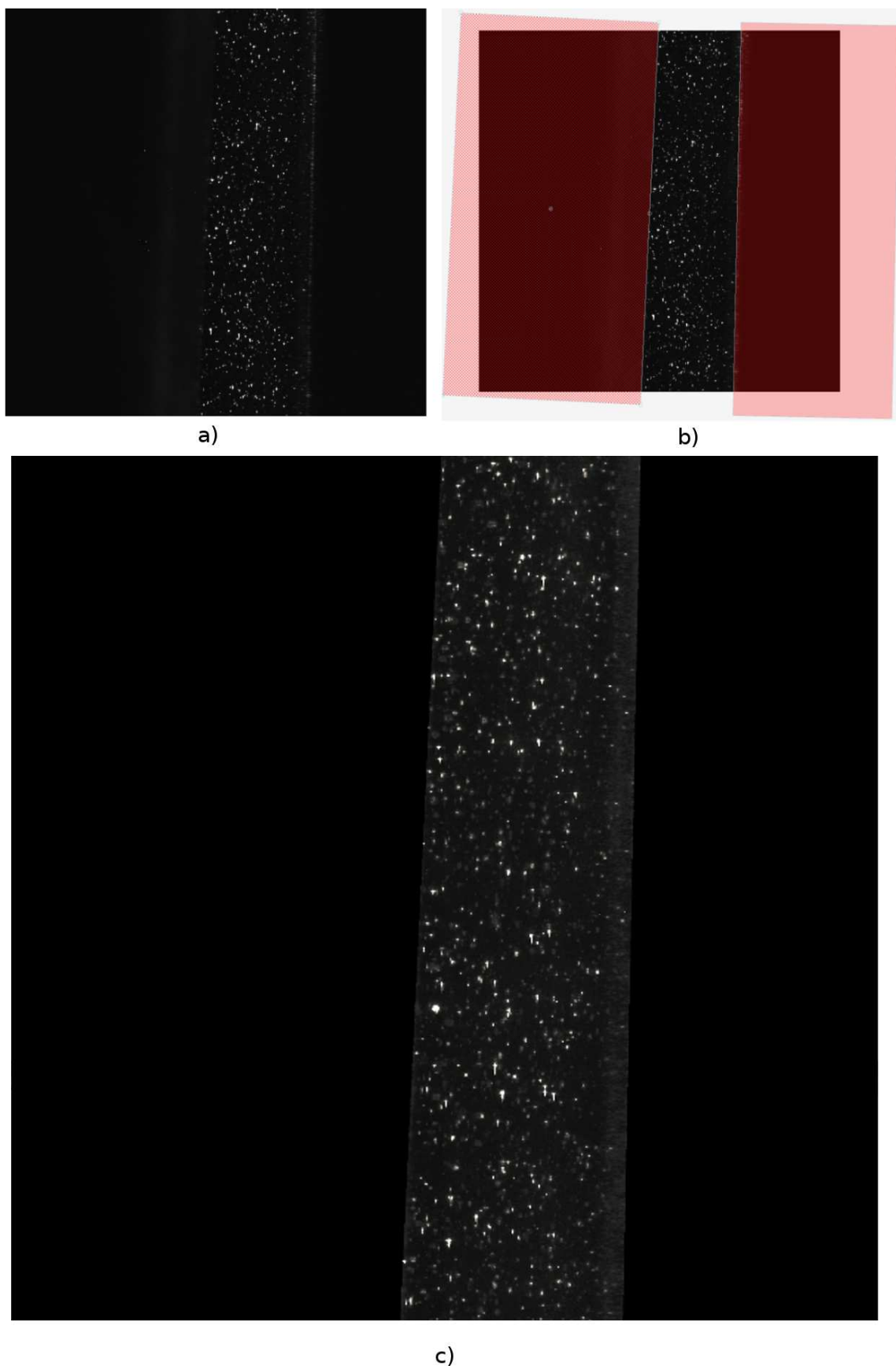
### 3.3 Měření

Po přípravě všech zařízení do provozu a propojení s výpočetní stanicí jsme začínali měřit. Po spuštění Dantec DynamicStudio jsme nejdříve kalibrovali zařízení na přesnou vzdálenost. K tomu nám posloužil milimetrový papír umístěný vedle hranolku v přibližné ohniskové vzdálenosti – na pořízené fotce milimetrového papíru jsme vyznačili 2 body a udali jsme počítači jejich přesnou vzdálenost. Následně jsme doostřovali obraz jemným posunem kamery. Po několika zkouškách jsme nechali proběhnout celé měření metodou jednotné expozice, což znamená, že je každý pořízený obraz uložen zvlášť. Vzniklo tak 200 snímků s časovým rozestupem 20  $\mu$ s.

Výměna měřených tyčí (vzorků) byla prováděna v místech výstupní hlavice. Tyče byly duté a z krátkého zbytku nařezané palivové tyče se udělal prodlužovací člen, který se pomocí čepu ze závitové tyče zasunoval do uložené palivové tyče, ke které byl jinak velmi špatný přístup. Po zasunutí se pouze jemně kladivem poklepalo na prodlužovací člen, který jsme následně vytáhli i s celou palivovou tyčí, která byla vertikálně umístěna v zařízení. Ušetřili jsme si tak práci s demontáží přes průhledné trubky citlivě spojené hranolkem. I přesto bylo měření velice časově náročné.

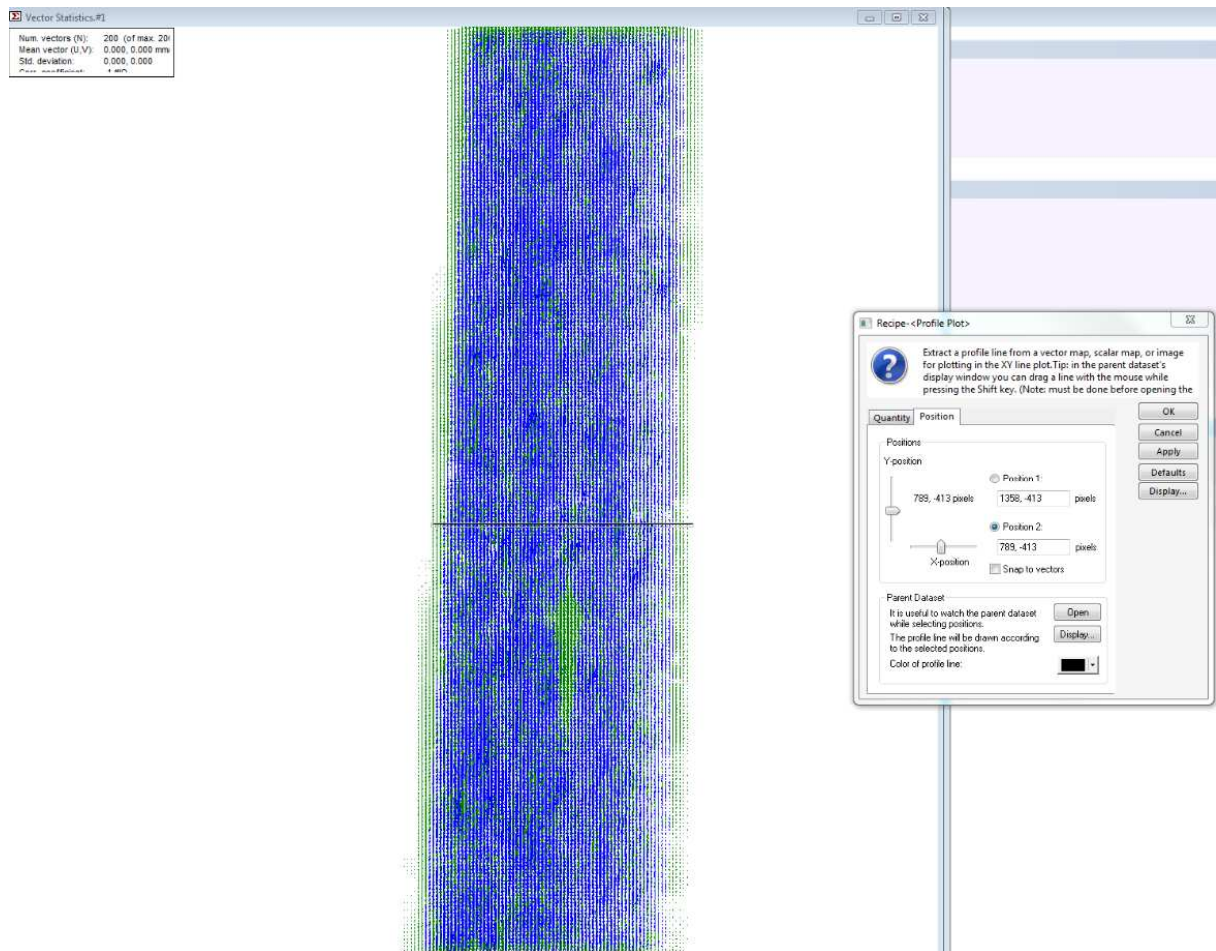
### 3.4 Vyhodnocení dat

Po měření následuje vyhodnocení všech naměřených dat na počítači. Na pořízeném snímku (Obr. 19 a)) se nejdříve funkcí „Define Mask“ vytvoří maska (Obr. 19 b)), která zneviditelní na obrazu všechny rušivé body, které jsou mimo měřenou oblast. Zůstane nám tedy pouze prostor, který skutečně odpovídá sledované oblasti (Obr. 19 c)). Maska se aplikovala na všechny ostatní snímky a následně proběhlo vyhodnocení pomocí funkce adaptivní korelace, tedy vzájemnou korelací. Následuje funkce „Vector Statistic“, které nám vytvoří mapu vektorového pole, kterou vidíme na Obr. 20. Díky ní lze vytvořit grafy, 3 pro každé měření - dole, uprostřed a nahoře měřené oblasti (pro pole uprostřed vidíme vytváření grafu pomocí souřadnic na Obr. 20). Pro vytváření grafů z každého měření se používá stejného předpisu: pole uprostřed je přesně uprostřed, pole dole a nahoře je od kraje obrázku vzdáleno 200 pixelů. Tyto grafy můžeme nakonec vzájemně porovnávat. Celý strom operací v „Dantec DynamicStudio“ si lze prohlédnout na Obr. 21.

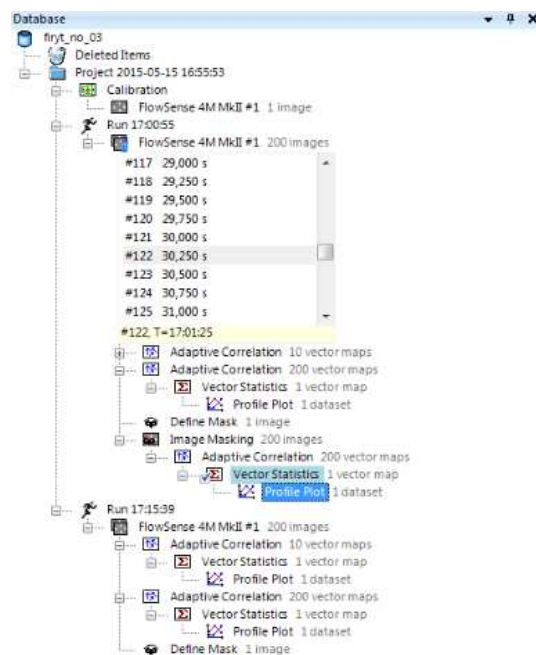


Obr. 19 Úprava snímků a) pořízený snímek, b) aplikování masky na pořízený snímek  
c) upravený snímek bez rušivých elementů





Obr. 20 Mapa vektorového pole



Obr. 21 Strom operací v Dantec DynamicStudio

## 4 Výsledky práce

Jak víme, pro měření byl použit jeden druh distanční mřížky, který byl upraven do tří variant (viz Obr. 15 Varianty mřížek):

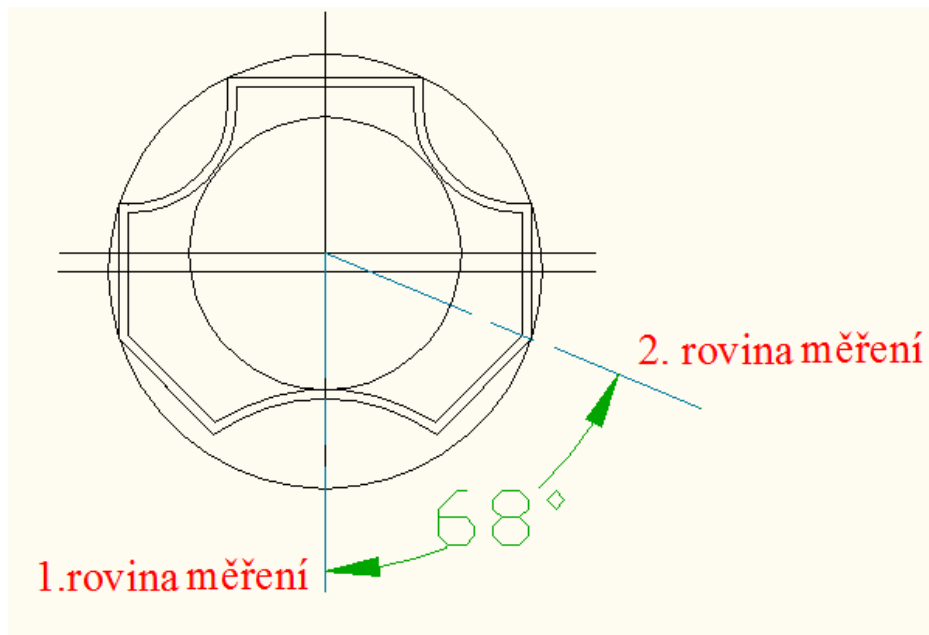
VAR 1 – základní distanční mřížka,

VAR 2 – distanční mřížka se zapájeným 1 velkým otvorem, který neleží v rovině měření, a s ucpanou bližší půlkou malého otvoru.

VAR 3 – distanční mřížka se zapájeným 1 velkým otvorem v rovině měření.

Na každé ze 3 variant se provádělo dvojí měření. Pro první měření se palivová tyč umístila do výchozí pozice. Pro druhé měření jsme vzorek pootočili o určitý úhel (přibližně  $68^\circ$ ) na druhé místo měření viz. Obr. 22 Znázornění rovin měření. Pro měření v rovině jedna by měla být mezera mezi distanční mřížkou na palivové tyči a trubicí větší než 2 mm a v rovině dvě přibližně 2 mm. Tato vzdálenost je teoretická.

Nepřesnost je zaviněna převážně z důvodů již dříve uvedených, jako je nepřesná výroba distančních kroužků, či jejich dodatečná změna tvaru při manipulaci (navlékání na model palivové tyče, povrchová úprava po pájení, která byla prováděna drobnými pilníky). Další důvod můžeme uvést také možnost vlivu nepřesného pootočení distančního kroužku z výchozí pozice o  $68^\circ$  do pozice pro měření v 2. rovině. Způsob pootočení byl takový, že se v místech měřících rovin udělaly pod distančním kroužkem vrypy, jeden pro 1. měřící rovinu a dva pro 2. měřící rovinu. Pro každou rovinu se tyto vrypy sledovaly skrz průhlednou trubicí a model palivové tyče byl vždy pootočen dle pozice vrypů. Takto mohla vzniknout nepřesnost, při které nebylo zcela přesně měřeno v požadované rovině. Ostatní důvody mohou být nedostatečné vycentrování palivové tyče, či vibrování tyče vlivem proudícího média, což je při rychlosti dopravované vody čerpadlem velice pravděpodobné.



Obr. 22 Znázornění rovin měření

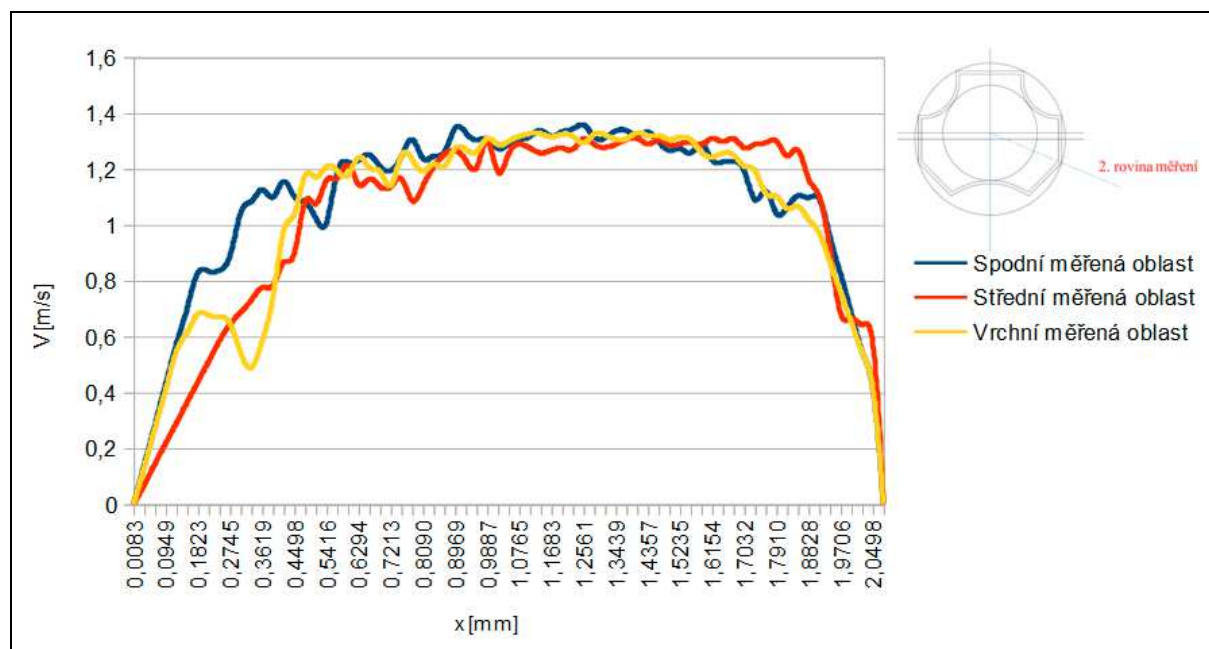
Jak lze vidět na obrázku, ve výchozí pozici v měřicí rovině 1 se distanční mřížka dotýká palivové tyče a v rovině 2 se mřížka dotýká plastové trubice.

## 4.1 Porovnání rychlostních profilů vzhledem k vzdálenosti od úplavu

Grafy níže uváděné popisují závislost mezi rychlostí (svislá osa) a vzdáleností. Rychlosti začínají na průsvitné trubici (levá hraniční oblast grafu) a končí u modelu palivové tyče vpravo.

V grafu 1 lze vidět rychlosti za úplavem distanční mřížky VAR 1 (tedy výchozí distanční mřížku), měřené v rovině 2. Měřená oblast má přibližnou délku 2 mm, což odpovídá našim předpokladům o šířce proudu mezi distanční mřížkou a palivovou tyčí. Z grafu lze vyčíst, že žlutá křivka popisující vrchní měřenou oblast nemá zpočátku ideální průběh, což může být zaviněno nepřesnostmi při měření již dříve popsanými.

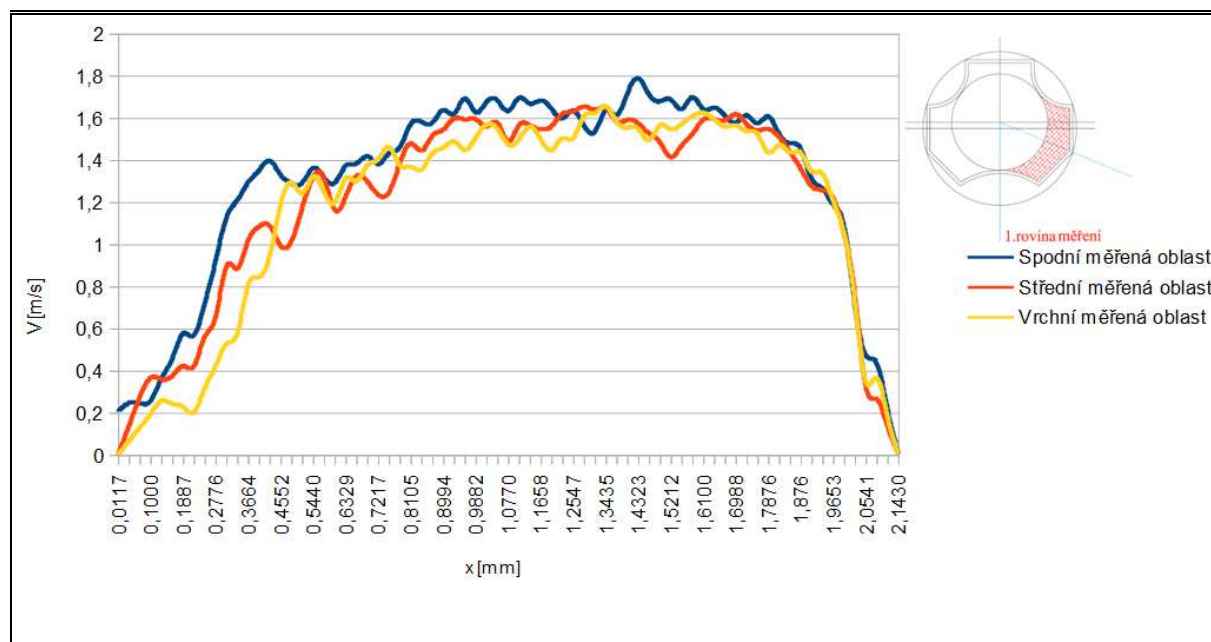
Přestože se jednotlivé průběhy téměř překrývají, je z grafu patrné, že nejrychlejší rychlostní profil jsme naměřili na spodní měřené oblasti a nejpomalejší ve vrchní měřené oblasti. Toto je způsobeno tím, že se zvětšující se vzdáleností od úplavu, se rychlosti vyrovnávají. Maximální rychlosti se zde pohybují v rozmezí od 1,36 - 1,38 m/s.



Graf 1 - Rychlostní profily VAR 1 v rovině 2

V grafu 2 jsou zakresleny rychlostní profily VAR 3 v měřicí rovině 1, jedná se tedy o variantu s ucpaným otvorem (jeden ze dvou identických otvorů mimo měřicí rovinu). V grafu vidíme vliv této varianty a to, že v měřené oblasti nejbližší úplavu, je profil nejrychlejší z důvodu zvýšení tlaku vlivem ucpání části průtočné plochy (průtočná část se v tomto případě snížila přibližně o 21%). Vzniklý nárůst tlaku s rychlostí, se vyrovnává se zvyšující se vzdáleností od mřížky. Lze také říci, že je vrchní měřená oblast pomalejší než střední měřená oblast.

Délka profilu zde také odpovídá předpokladu, že bude delší než v 2. měřené oblasti (viz Graf 1) a bude delší než 2 mm. Maximální rychlosti v tomto případě dosahují k hranici 1,8 m/s.

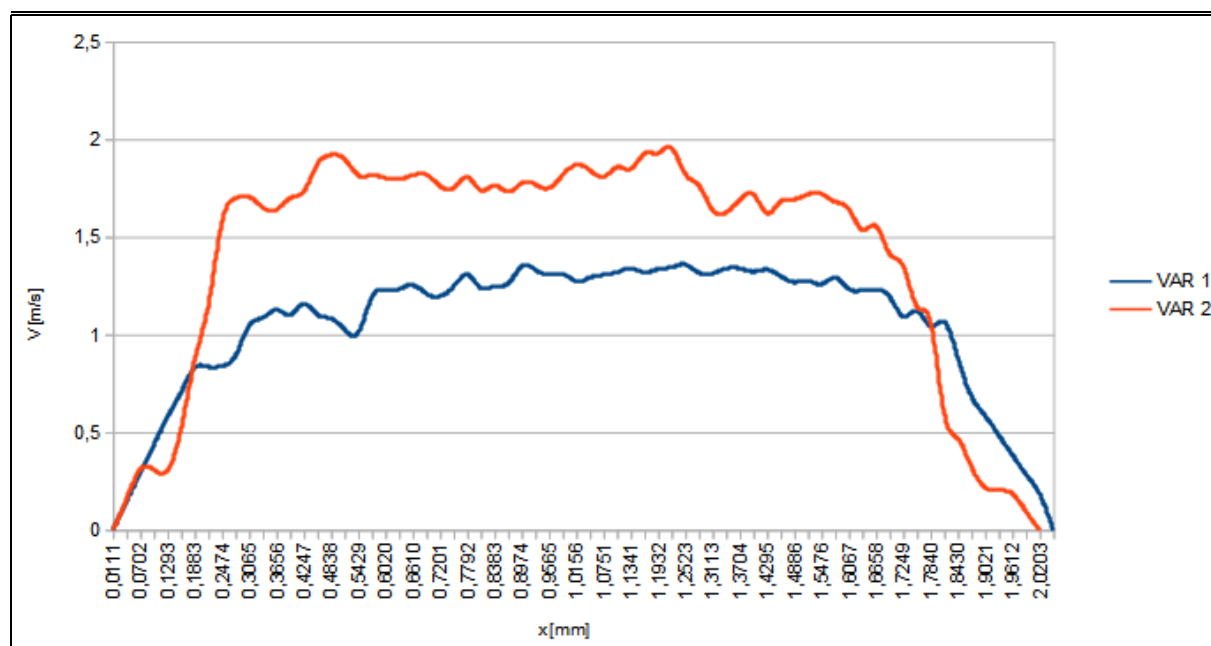


Graf 2 - Rychlostní profily VAR 3 v rovině 1

## 4.2 Porovnání rychlostních profilů VAR 1 a VAR 2

V Grafu 3 - Porovnání VAR1 a VAR2 v oblasti nejbližší úplavu, by měl být znát největší rozdíl rychlostí mezi naměřenými variantami, neboť porovnáváme výchozí distanční mřížku s upravenou mřížkou, která má o 27% sníženou průtočnou část. Data k porovnání bereme z měření v 2. rovině a porovnáváme oblast nejbližší úplavu, protože v této oblasti předpokládáme maximální hodnoty.

Snížením části průtočné plochy o 27%, se značně zvýšila rychlost v měřené ploše a rozdíly jsou následující: u varianty 1 šplhají rychlosti maximálně k hodnotě 1,35m/s (průměrně cca 1,3 m/s), na druhou stranu u varianty 2 dosahuje maximální rychlost přibližně 1,9 m/s a průměrná rychlost je zde 1,75 m/s.



Graf 3 - Porovnání VAR1 a VAR2 v oblasti nejbližší úplavu

Pro tyto případy bych chtěl uvést a porovnat Reynoldsova čísla. Reynoldsovo číslo ( $Re$ ) je poměr setrvačné ku třecí síle a pomocí tohoto čísla posuzujeme charakteristiku proudění. Jak je známo, proudění může být v trubicích buď laminární nebo turbulentní.

Mezní hodnoty se uvádí: laminární proudění do  $Re=2032$ , přechodová (intermitentní) oblast je v rozmezí od 2320 do  $10^5$ , přičemž je to oblast, kdy se laminární a turbulentní proudění střídá a nedá se konkrétně říci, o jaké proudění se jedná. Při  $Re > 10^5$  se uvádí,

že proudění je turbulentní. Tyto hodnoty jsou orientační, neboť vliv proudění ovlivňují faktory, jako jsou např. tlak, drsnost stěn, použití nejrůznějších sít, rychlost zvyšování rychlosti proudu či vznikání turbulencí v úplavu za tělesem.

Turbulence zanikají, když se do proudu nedodává další turbulentní energie. Zánik turbulence můžeme urychlit pomocí jemných sít, neboť síta nepustí skrz svá malá oka velké energetické víry, v nichž je soustředěna hlavní energie proudu. Na druhé straně síta s velkými oky turbulenci vytvářejí. Turbulence dále vzniká v místě s vysokým smykovým napětím, tedy v místech odtržení proudění či v úplavech za tělesem.

V našem případě však jistě víme, že se jedná o proudění turbulentní (a také laminární, neboť každá turbulentní vrstva má svou vazkou podvrstvu, ve které je proudění laminární), neboť turbulentní proudění je vyvoláno čerpadlem a prouděním přes distanční mřížku.

Reynoldsovo číslo můžeme vypočítat ze vzorce:  $Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$ , kde:

$\nu$  [m<sup>2</sup>/s] je součinitel kinematické vazkosti

$w$  [m/s] je průměrná rychlost v daném průřezu a

$l$  [m] je průměr potrubí.

Pro vodu o teplotě 31°C, která proudí v potrubí je  $\nu = 0,805 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. Průměr označený  $l = 0,0145$  m.

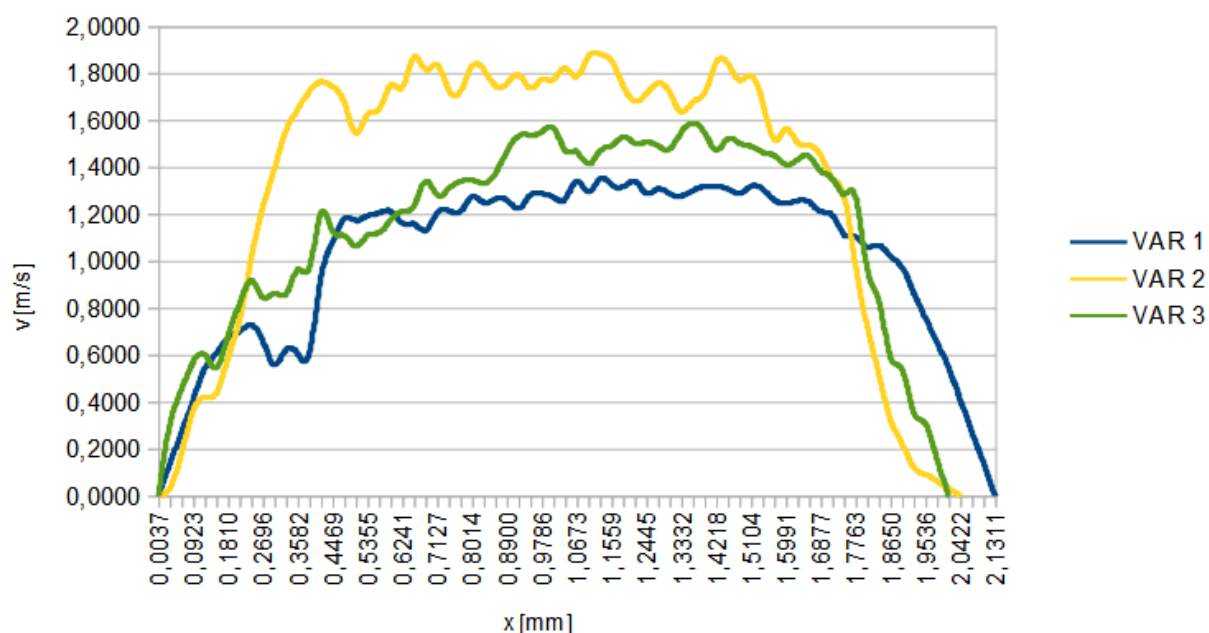
Výsledky vychází v následující podobě:  $Re_1 = \frac{1,3 * 0,0145 * 10^6}{0,805} = 23416$  a

$$Re_2 = \frac{1,75 * 0,0145 * 10^6}{0,805} = 31522$$

V porovnání tvoří Reynoldsovo číslo pro VAR 1 cca  $\frac{3}{4}$  Reynoldsova čísla pro VAR 2.

### 4.3 Porovnání rychlostních profilů všech variant v 2. rovině měření v nejvzdálenější oblasti za úplavem

Pokud porovnááme profily pro všechny varianty, bez ohledu na oblast, v níž se vytvářely (dole uprostřed či nahoře), měl by vždy být nejrychlejší rychlostní profil pro variantu číslo 2. Vyplývá to z geometrie ucpání otvorů – pro první variantu je proud omezen pouze tloušťkou plechu distančního kroužku, ale u varianty 3 je snižená průtočná plocha z důvodu ucpání díry, zde dokonce v měřené oblasti. U varianty 2 je zacpána největší průtočná plocha, tlak a rychlost vody musí tedy být v tomto případě automaticky nejvyšší.



Graf 4 - Porovnání rychlostních profilů v nejvzdálenější měřené rovině

V grafu 4 platí předpoklad, který jsme napsali výše (nejrychlejší profil je u VAR 2), druhý nejrychlejší je profil varianty 3 a nejpomalejší, tedy nejméně ovlivněný proud je u výchozí distanční mřížky.



## 5 Závěr

Prvotním cílem bakalářské práce bylo vypracování rešerše týkající se měřicí metody PIV, která je hojně využívaná v diagnostice proudění. Jedná se o velmi rychle rozvíjející se odvětví a z tohoto důvodu bylo nutno zmapovat nejnovější přístroje a technologické postupy měření, díky kterým lze získat velmi přesné výsledky. Jelikož se měření aplikuje na modelu palivové tyče jaderného reaktoru, bylo nezbytné prostudovat princip fungování jaderné elektrárny, převážně aktivní zóny. V neposlední řadě byla nutnost uvést použití materiálů distančních mřížek v závislosti na cenové dostupnosti, či druhu provedení aktivní zóny. Jevy probíhající v aktivní zóně, ať už žádoucí nebo nežádoucí, byly do práce také zahrnuty. Nežádoucí jevy byly popsány i s možnostmi, jak se jim vyvarovat, což má zabránit případné havárii vlivem použití nevhodného konstrukčního řešení.

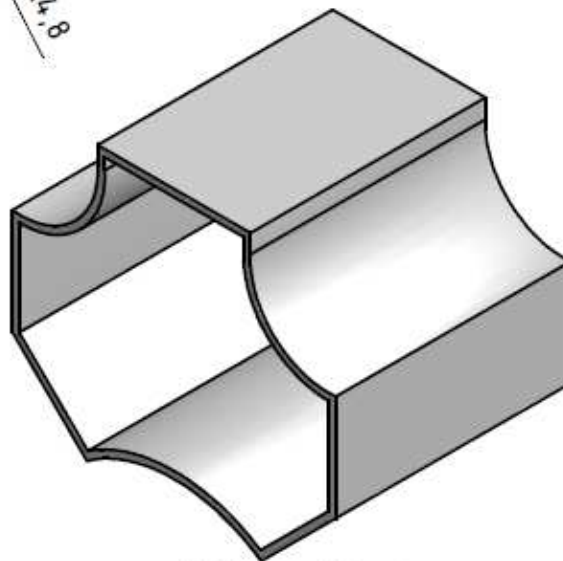
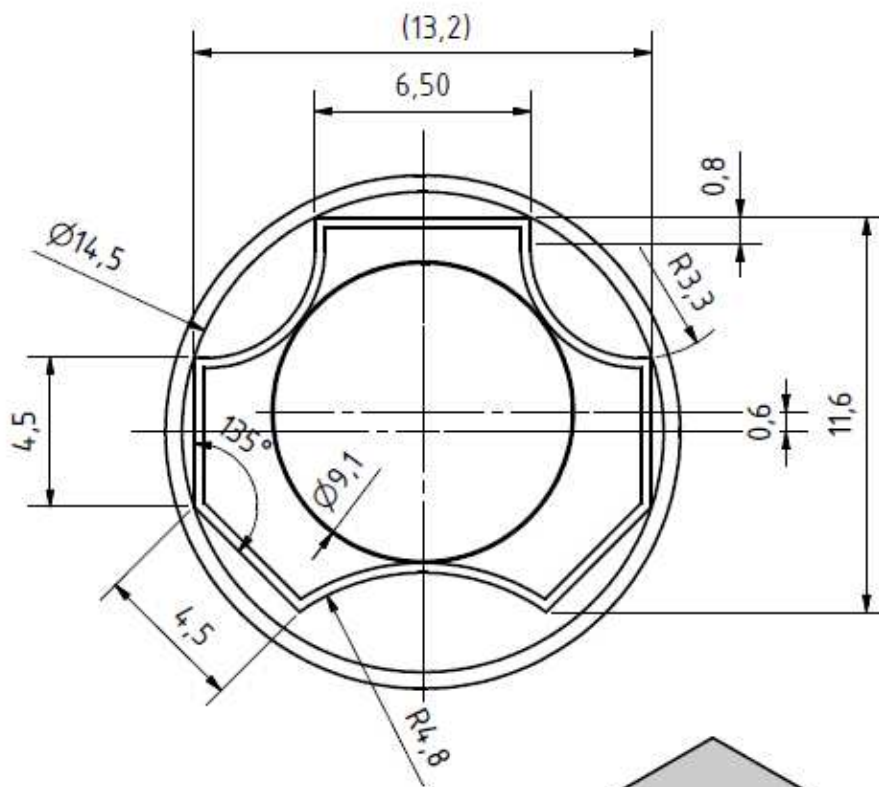
Před vybráním zkoumané distanční mřížky, bylo nejdříve popsáno několik používaných distančních mřížek v praxi, jejich vlastnosti a funkce částí, z nichž jsou složeny. Díky těmto znalostem mohla být navržena distanční mřížka pro experimentální zařízení. Pro tuto mřížku byly navrženy a následně zrealizovány různé úpravy, pomocí nichž byly sledovány vlivy nežádoucích faktorů, které mohou při skutečném provozu nastat. Upravené mřížky s výchozí mřížkou byly mezi sebou porovnávány pomocí dat získaných laserovou anemometrií, která popsala rychlosti proudového pole za mřížkou.

Úloha byla měřena metodou 2D PIV, což ovšem neznamená, že by výsledky nebyly oproti 3D PIV metodě průkazné, neboť byla, pro naše potřeby určení rychlostí za překážkou, dvoudimenzionální úloha proudění dostatečná. Získané výsledky bylo zajímavé porovnávat, obzvláště když potvrzovaly naše hypotézy o rychlostech jednotlivých variant.

Při sestavování experimentálního zařízení musel autor projevit technické a technologické znalosti s manuální zručností, jak pro vytvoření distančních mřížek a jejich upevňování na model palivové tyče, tak pro spoluúčast na jeho celkovém zprovoznění. Díky tomu autor poznal, jak je náročné se v tomto oboru pohybovat, neboť se musí klást velký důraz na různé maličkosti a nesmí se nic zanedbávat. Stále lze každou technologii vylepšovat, neboť je zde plno cest, kudy se s řešením problémů vydat.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] KOPECKÝ, Václav. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. Brno: Tribun EU, 2008. ISBN 8073993570
- [2] BEČVÁŘ, JOSEF, a kol: *Jaderné elektrárny*. Praha: SNTL, Nakladatelství technické literatury, 1978. ISBN 04-237-81
- [3] ČEZ, a.s., 2011. Majitel a provozovatel elektráren. Adresa: Praha 4, Duhová 2/1444, PSČ 140 53, Česká republika, <http://www.cez.cz>
- [4] COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE. Device for the spacing and holding in place of fuel rods in a fuel assembly. Vynálezci: Marcel MANSON, Lioka RAZAFINDRAZAKA. Francie. Patentový spis US4772447 (A) — 1988-09-20.
- [5] OPEN JOINT STOCK COMPANY TVEL, OTKRYTOE AKTSIONERNOE OBSHEST. Fuel assembly and insertable interelement spacer. Rusko. Patentový spis WO2008079042 (A1) — 2008-07-03.
- [6] Výzkum. *Katedra energetických strojů a zařízení*. [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: [http://www.kke.zcu.cz/old\\_web/\\_files/veda\\_a\\_vyzkum/funkcni\\_vzorky/vzorek\\_005.pdf](http://www.kke.zcu.cz/old_web/_files/veda_a_vyzkum/funkcni_vzorky/vzorek_005.pdf)
- [7] Solo PIV. *Direct Industry*. [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/new-wave-research/solo-piv/24449-73376.html>
- [8] LÁVIČKA, D. *Od jaderného reaktoru k experimentálnímu modelu chlazení palivového proutku*. Plzeň, 2010., ISBN: 978-80-02-022239-8



Textura povrchu 		Hrany ISO 13715 		Měřítko 2:1	Přesnost ISO 2768 - mK
				Hmotnost (kg) 0,002	Tolerování ISO 8015
				Pronítání 	
Materiál - Polotovár PLECH 13x54x0,4 X5CrNi18 10				Formát A4	
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil <b>Antonín Firýt</b>		Název <b>DISTANČNÍ MŘÍŽKA</b>		
	Datum <b>20.5.2016</b>		Číslo dokumentu <b>BP-001</b>		
	Schválil				
KKE KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ	Datum				
	Druh dokumentu <b>VÝROBNÍ VÝKRES</b>				
					LIST 1 LISTŮ 1

