

# Vizualizace proudových polí při obtékání aerodynamického profilu

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Strojní inženýrství

*Autor práce:*

**Sára Jirková**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.  
Katedra energetických zařízení





## Zadání bakalářské práce

# Vizualizace proudových polí při obtékání aerodynamického profilu

*Jméno a příjmení:* **Sára Jirková**  
*Osobní číslo:* S16000077  
*Studijní program:* B2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojní inženýrství  
*Zadávající katedra:* Katedra energetických zařízení  
*Akademický rok:* 2019/2020

### Zásady pro vypracování:

1. Provedení rešerše stávajícího stavu experimentů v tažné nádrži, včetně měřicích metod.
2. Příprava a realizace experimentů (vizualizace) obtékání leteckého profilu metodou cínových iontů.
3. Vyhodnocení experimentálních dat.
4. Shrnutí a doporučení pro další práci.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

cca 40  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

1. Noskievič, J. a kol., 1987. Mechanika tekutin. SNTL, Praha.
2. Honji, H., Taneda, S., Tatasuno, M., 1980. Some practical details of the precipitation method of flow visualization. Rep. Res. Inst. Appl. Mech 28, p. 83.
3. BROŽ, Václav. Aerodynamika nízkých rychlostí. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02347-8.
4. DANĚK, Vladimír. Mechanika letu. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-7204-659-1.
5. SCHLICHTING, Hermann a K. GERSTEN. Boundary-layer theory. 8th rev. and enl. ed. New York: Springer, c2000. ISBN 3540662707.
6. ANDERSON, John D. Fundamentals of aerodynamics. Sixth edition. New York, NY: McGraw Hill Education, [2017]. ISBN 1259129918.
7. Uruba, Václav, 2009. Turbulence. Vydavatelství ČVUT.

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.  
Katedra energetických zařízení

*Datum zadání práce:*

1. listopadu 2019

*Předpokládaný termín odevzdání:*

30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

L.S.

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

27. června 2020

Sára Jirková

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá experimentálním výzkumem úplavu za aerodynamickým profilem. V úvodu jsou popsány děje z hlediska obecného obtékání těles v tekutinách. Je vysvětlen pojem úplav, typy proudění, Reynoldsovo a Strouhalovo číslo, odtržení mezní vrstvy a je popsána základní teorie leteckého profilu. Dále se tato práce věnuje teorii tažných nádrží a vizualizačních metod. Následující kapitola obsahuje informace o samotném experimentu. Je zde popsána příprava experimentu včetně použitých zařízení. Na to v další kapitole navazuje série experimentálních měření a diskuze výsledků tohoto měření. V závěru bylo provedeno vyhodnocení a doporučení pro další práci.

**Klíčová slova:** úplav, proudění, tažná nádrž, metoda cínových iontů, vizualizace, profil křídla

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with experimental research of wake behind an aerodynamic profile. The introduction describes actions in terms of general flow around bodies in fluids. The concept of wake, types of flow, Reynolds and Strouhal number, boundary layer separation and basic theory of airfoil are depicted. Furthermore, this thesis focuses on theory of towing tanks and visualization methods. The next chapter handles the experiment itself. The preparation of the experiment is described, including the equipment used. The following chapter informs about the series of experimental measurements and discussion of the results of this measurement. At the end, an evaluation and recommendation for further work have been made.

**Key words:** wake, flow, towing tank, tin ions method, visualization, airfoil

## **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucí práce doc. Ing. Petře Dančové Ph.D. a konzultantovi Ing. Janu Novosádovi za cenné rady a připomínky při vykonávání této práce. Dále bych pak chtěla poděkovat Ing. Jaroslavu Pulcovi za pomoc a rady při realizaci experimentu v laboratoři.

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu č. SGS-2019-5073.

Také bych ráda poděkovala své rodině, příteli a přátelům za jejich trpělivost, podporu a pochopení.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
Úvod.....	10
1 Proudění a obtékání těles .....	11
1.1 Úvod.....	11
1.2 Newtonův viskózní zákon .....	11
1.3 Mezní vrstva.....	12
1.4 Reynoldsovo číslo .....	13
1.5 Typy proudění .....	13
1.5.1 Laminární proudění.....	13
1.5.2 Turbulentní proudění.....	14
1.6 Održení mezní vrstvy .....	14
1.7 Úplav .....	16
1.8 Kármánova vírová stezka .....	16
1.9 Strouhalovo číslo.....	17
1.10 Letecký profil.....	17
1.10.1 Historie.....	17
1.10.2 Geometrie.....	18
1.10.3 Silové působení .....	19
1.10.4 Polára.....	20
1.10.5 Vztlaková křivka .....	21
2 Tažná nádrž.....	22
2.1 Malá tažná nádrž .....	22
2.2 Velká tažná nádrž.....	22
3 Experimentální metody zkoumání úplavu .....	23
3.1 Vizualizace.....	23
3.1.1 Pomocí elektrolýzy .....	23
3.1.2 Pomocí barviva .....	23
3.1.3 Mísení různobarevných kapalin.....	24
3.2 Měření rychlostních polí .....	24
3.2.1 Metoda PIV.....	24
3.2.2 Metoda LDA .....	25
4 Experimentální část.....	26
4.1 Návrh experimentu.....	26
4.1.1 Výběr řezu.....	26
4.1.2 Výroba modelu.....	26
4.1.3 Přepočítání charakteristiky proudění.....	27
4.2 Tažná nádrž KEZ .....	29
4.2.1 Pojezdový mechanismus .....	29
4.2.2 Pohon .....	29
4.2.3 Laser.....	29
4.2.4 Snímací zařízení.....	29
4.2.5 Upevnění na rám .....	30

4.3	Metoda cínových iontů.....	32
4.4	Definice experimentu .....	33
4.5	Testovací měření .....	34
4.6	Výsledky měření .....	35
4.7	Diskuze výsledků .....	42
5	Závěr .....	43
	Seznam literatury .....	44
	Seznam příloh .....	45



## Seznam použitých zkratek a symbolů

### Symbole

Symbol	Jednotka	Význam
$\alpha$	(°)	úhel náběhu
$c_x$	(1)	součinitel odporu
$c_y$	(1)	součinitel tlaku
$c_R$	(1)	součinitel aerodynamické síly
$d$	(m)	charakteristický rozměr
$\delta$	(m)	tloušťka mezní vrstvy
$f_s$	(Hz)	frekvence uvolňování víru
$F_x$	(N)	vztlačková síla
$F_y$	(N)	odporová síla
$F$	(N)	výsledná aerodynamická síla
$I$	(A)	proud
$\nu$	( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	kinematická viskozita
$\eta$	(Pa · s)	dynamická viskozita
$S$	( $\text{m}^2$ )	průřez vystavený proudění
$St$	(1)	Strouhalovo číslo
$\tau$	(Pa)	tečné napětí
$Re$	(1)	Reynoldsovo číslo
$\rho$	( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	hustota
$U$	(V)	napětí
$v$	( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	rychlost

### Zkratky

KEZ	Katedra energetických zařízení
NASA	Národní úřad pro letectví a vesmír (z anglického National Aeronautics and Space Administration)
2D	dvojměrný
3D	trojměrný
PIV	laserová anemometrie (z anglického Particle Image Velocimetry)
LDA	laserová dopplerovská anemometrie (z anglického Laser Doppler Anemometry)

## Úvod

Při vzájemném pohybu tělesa a tekutiny vzniká za tělesem ovlivněná oblast proudění neboli úplav. Tvar této ovlivněné oblasti za tělesem závisí na mnoha faktorech, jako je geometrie, rychlost proudění nebo vlastnosti tekutiny. Zařízení využívající se pro vizualizaci proudění se nazývají tažné nádrže.

K zobrazení proudění se používají různé experimentální metody, jednou z nich je metoda cínových iontů, která bude použita v této práci. Jedná se o metodu, kdy se s pomocí elektrolýzy vytvoří v nádrži elektrochemický kouř, který se v kýženém řezu prosvítí laserem za účelem většího kontrastu. V této práci se bude experimentálně vizualizovat model aerodynamického profilu vycházející z reálného letadla.

# 1 Proudění a obtékání těles

## 1.1 Úvod

Na konci 19. století se obor mechaniky tekutin rozdělil na dvě odvětví. Prvním byla teoretická hydrodynamika vycházející z Eulerovy pohybové rovnice, která byla vypracována k vysoké přesnosti. Přesto ale měla v praxi malou důležitost, protože výsledky výpočtů nesouhlasily s experimenty. Proto se inženýři obrátili k druhé empirické vědě, hydraulice.

Byl tedy velký úspěch, když Ludwig Prandtl dal základy korelace mezi těmito dvěma směry. Vědělo se, že nepřesnost mezi teorií a praxí byla způsobena zanedbáváním viskozity. Tento problém řeší Navier-Stokesovy rovnice, které jsou již známé, ale jejich plné a obecné řešení zatím nikdo nebyl schopen poskytnout. Řadí se totiž k sedmi nevyřešeným Problémům tisíciletí v matematice.

U technicky důležitých tekutin, jako je voda a vzduch, je viskozita velmi nízká a výsledné viskózní síly jsou tedy malé ve srovnání se zbývajícími silami (gravitační, tlaková). Z tohoto důvodu trvalo dlouho zjistit, proč by viskózní síly ignorované v klasické teorii měly mít významný vliv na pohyb toku. To bylo osvětleno Ludwigem Prandtlem, když zveřejnil teorii mezní vrstvy [1]. Tato teorie říká, že viskozita je důležitá jen v tenké oblasti kolem tělesa.

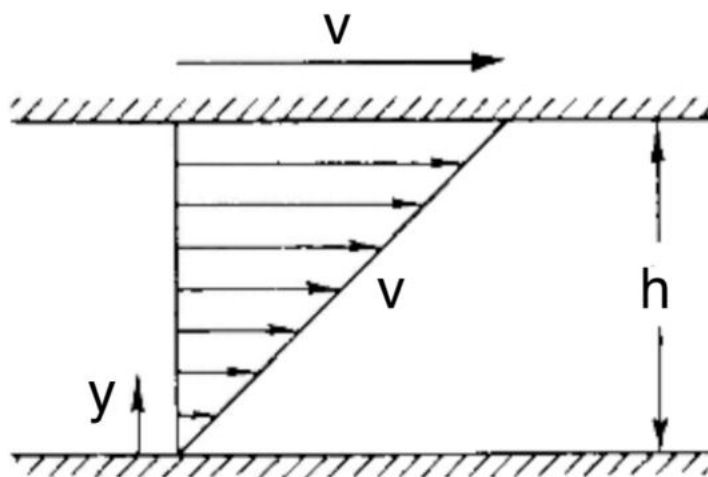
## 1.2 Newtonův viskózní zákon

Newtonův zákon o viskozitě je definován vztahem mezi napětím a rychlostí kapaliny vystavené mechanickému namáhání. Poměr napětí k rychlosti je konstantní pro danou teplotu a tlak a je definován viskozitou. Tvar tohoto zákona je dán vzorcem:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

kde  $\tau$  (Pa) je tečné napětí,  $\eta$  (Pa · s) je dynamická viskozita a  $\frac{dv}{dy}$  je gradient rychlosti (viz obr 1.1).

Tekutina chovající se podle zákonitostí Newtonova viskózního zákona se nazývá newtonská [1].

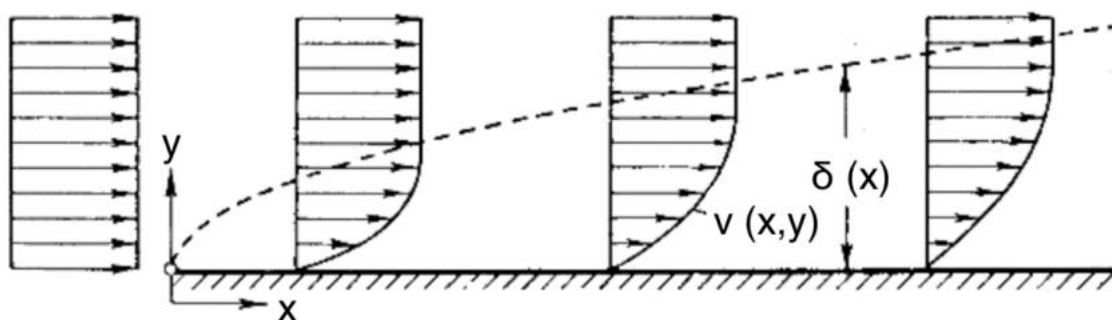


Obr. 1.1 Distribuce rychlosti viskózní tekutiny mezi dvěma paralelními deskami [1].

### 1.3 Mezní vrstva

Každá reálná tekutina je vazká. Vazkost neboli viskozita je vlastnost tekutiny, při které mezi jejími molekulami vzniká třecí síla. Při styku dvou proudů s různými rychlostmi částice proudů pomalejšího molekuly druhého proudů zpomalují a naopak. Díky tomuto jevu vzniká v blízkosti tělesa mezní vrstva. Ta vzniká tak, že částice ulpívají na povrchu obtékané stěny. S rostoucí vzdáleností od profilu (směr  $Y$ ) rychlost roste (obr 1.2). Klesá rychlost v blízkosti stěny s narůstající podélnou souřadnicí  $X$ . Tento jev ztrácí působení v určité vzdálenosti od profilu a tato vrstva se pak nazývá mezní a její tloušťka se značí  $\delta$ . Celá tato teorie byla na konci 19. století popsána jedním z nejvýznamnějších teoretiků v oblasti mechaniky tekutin Ludvigem Prandtem [1].

Jev mezní vrstvy se nejlépe popisuje při obtékání desky, která je umístěna rovnoběžně s proudící tekutinou a je vyobrazen na obr 1.2.



Obr. 1.2 Rychlostní profil při obtékání desky [2].

Vazkostí je tedy způsobeno to, že každý profil má odpor, který nazýváme třecím. Další odpor, který se při proudění reálných tekutin vyskytuje se nazývá tlakový. Tento odpor vzniká nesymetrickým rozložením tlaků obtékaného tělesa (dále v kapitole 1.6).

## 1.4 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo popisuje vliv třecích a setrvačných sil. Je definováno vztahem:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (2)$$

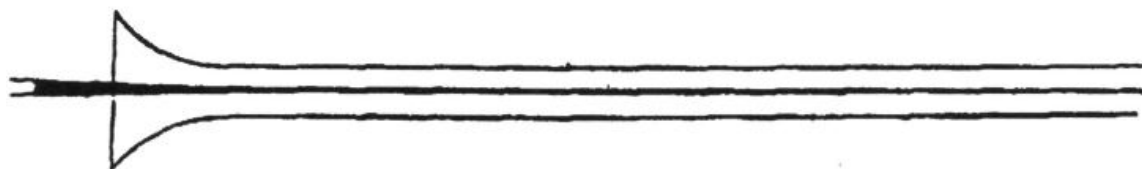
kde  $v$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je rychlost proudění,  $d$  (m) je charakteristický rozměr a  $\nu$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) je kinematická viskozita. Reynoldsovo číslo je bezrozměrné a slouží pro určení charakteristiky proudění čili k určení meze přechodu laminárního proudění do turbulentního. Přechod není jednoznačný, a proto je označován jako přechodová oblast. Experimentálně bylo zjištěno, že hranice přechodu pro hladkou trubku kruhového průřezu je  $\text{Re} = 2300$  [3]. Pokud je hodnota Reynoldsova čísla menší než kritické  $\text{Re}$ , jedná se o proudění laminární. V opačném případě vznikají poruchy, které se časem zesilují a proudění tak přechází do turbulentního. Obecně se hodnota kritického Reynoldsova čísla určuje experimentálně.

## 1.5 Typy proudění

Proudnice je pohybová křivka jednotlivých molekul při proudění tekutiny.

### 1.5.1 Laminární proudění

Laminární proudění vzniká při menších rychlostech. Definuje se tím, že jednotlivé proudnice tekutiny se nemísí a jsou rovnoběžné. Představu tohoto proudění lze demonstrovat na průhledném potrubí, ve kterém se obarví jedna proudnice. Pro pozorovatele se to promítne jako barevná přímka (obr. 1.3).



Obr. 1.3 Laminární proudění [3].

## 1.5.2 Turbulentní proudění

Jednotlivé proudy turbulentního proudění se mezi sebou mísí. Turbulentní proudění vzniká při vyšších rychlostech a je chaotické. Při obarvení jedné proudnice se ve stejném potrubí jako na obr. 1.3 v určité vzdálenosti od počátku kanálu barva rozmísí (obr. 1.4).

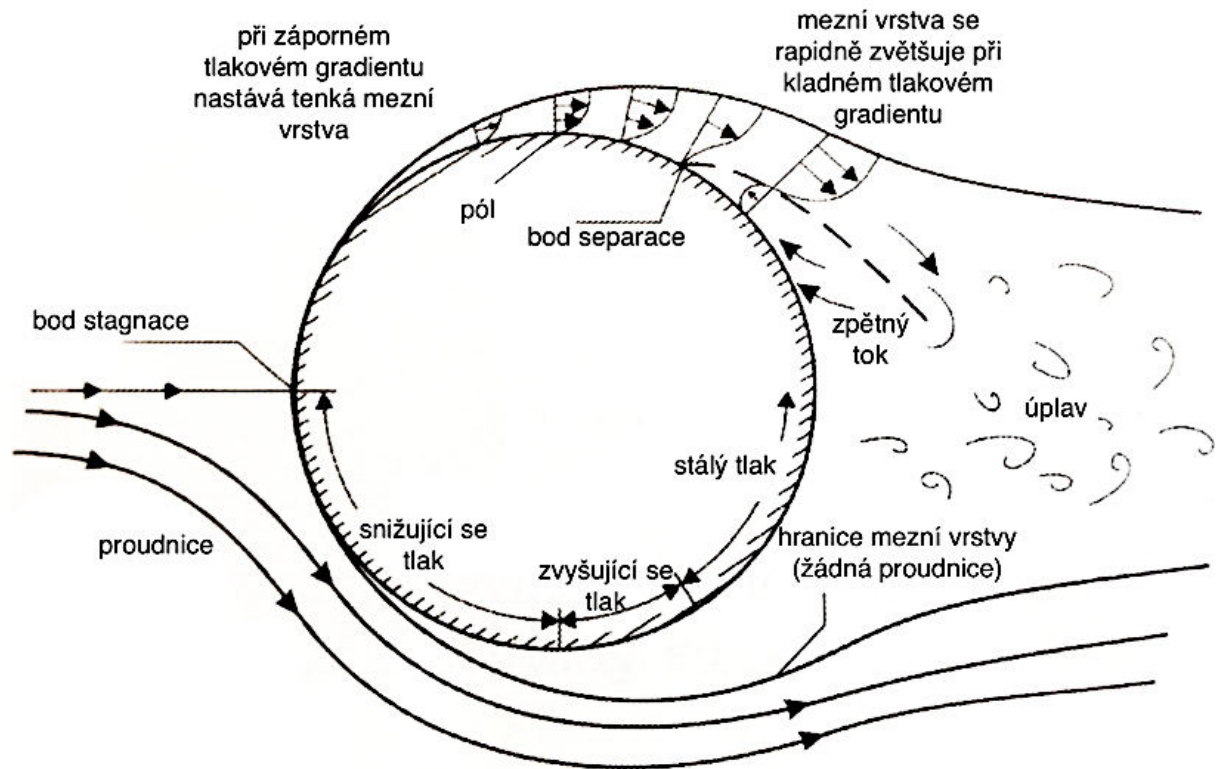


Obr. 1.4 Turbulentní proudění [3].

## 1.6 Odtržení mezní vrstvy

Odtržení mezní vrstvy je fenomén, při kterém se mezní vrstva odtrhne od tuhého tělesa v důsledku změny tlakového gradientu. Odtržení nastává v zadní části obtékaných těles.

Příčinu odtržení lze vysvětlit na případu obtékaného válce (obr. 1.5). Molekuly proudící tekutiny se na čele profilu zastaví. Tento bod je nazýván bodem stagnačním a je bodem maximálního tlaku (to je důsledek Bernoulliho rovnice, který říká, že při zmenšující se rychlosti proudu dynamický tlak roste a naopak). Dále po proudu zaoblení válce způsobí to, že proudnice proudu kopírují jeho povrch, tudíž se zaoblí. Aby se vyrovnaly dostředivé síly, proud se zrychlí a tlak poklesne. Proto oblast zvyšování rychlosti a snižování tlaku nastává mezi bodem stagnace a pólovým bodem. V této oblasti je tedy záporný tlakový gradient. Jakmile proud projde póly, je zaoblení válce méně účinné při nasměrování toku zakřivenými proudnicemi (díky veškerému otevřenému prostoru za válcem). Proto se zakřivení proudu mezní vrstvy snižuje a tok se zpomaluje, čímž se dříve výhodný tlakový gradient mění na nepříznivý tlakový gradient stoupajícího tlaku [4].



Obr. 1.5 Održení mezní vrstvy [4].

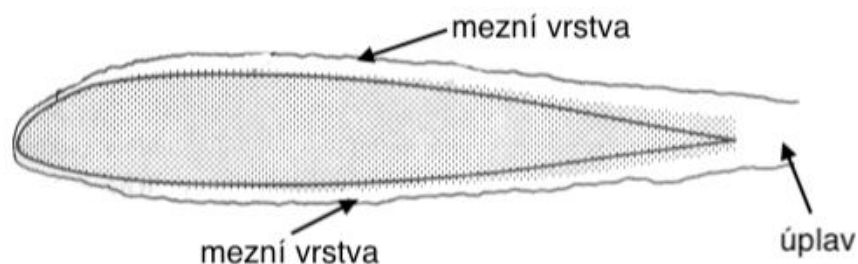
K porozumění odtržení mezní vrstvy je třeba vysvětlit, jak tyto tlakové gradienty ovlivňují tvar této vrstvy. Blíže u povrchu u válce je rychlost v mezní vrstvě menší. Klesající tlakový gradient napomáhá proudu naléhat na válec, a to částečně překoná účinky viskozity tekutiny. Výsledkem v čelní polovině válce je tedy to, že tekutina v blízkosti tělesa tolik nezpomalí a mezní vrstva se zvětšuje pomaleji.

Analogicky opačný účinek nastává v oblasti rostoucího tlakového gradientu, tj. v zadní části válce. Tlakové síly v mezní vrstvě posílí viskózní třecí síly v blízkosti povrchu. Výsledkem je, že rozdíl mezi střední rychlostí proudu v mezní vrstvě a rychlostí v blízkosti válce je zřetelnější a velikost mezní vrstvy se zvětšuje mnohem rychleji. Pokud tento nepříznivý tlakový gradient působí dostatečně dlouhou vzdálenost, bude zpomalení toku dostatečné pro obrácení směru toku v mezní vrstvě. Tím se vytvoří bod separace, za kterým se tvoří víry. Održení mezní vrstvy může nastat jak při proudění laminárním, tak při turbulentním [4].

Pro letecký profil může mít odtržení mezní vrstvy velké důsledky počínající zvýšením tlaku, které mohou vést až ke ztrátě zdvihu.

## 1.7 Úplav

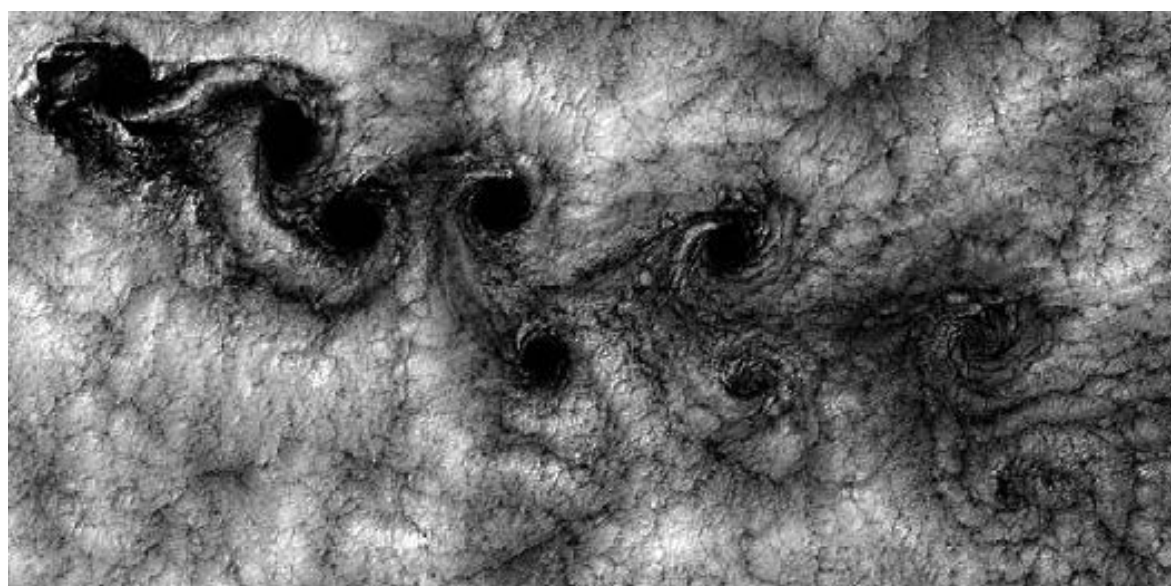
Úplav vzniká za obtékaným tělesem při obou typech proudění (laminární, turbulentní). Při obtékání bez odtržení mezní vrstvy je úplav tvořen z molekul mezní vrstvy. V určité vzdálenosti za tělesem se rychlostní profil vyrovná a úplav přestane být patrný. Při odtržení mezní vrstvy se za tělesem v úplavu vytvoří víry.



Obr. 1.6 Proudění u aerodynamického profilu [4].

## 1.8 Kármánova vírová stezka

Jak bylo již řečeno, při odtržení mezní vrstvy vznikají za tělesem víry. Když je proud charakterizován určitými Reynoldsovými čísly tvoří se z vírů tzv. Kármánova vírová stezka (obr. 1.7). Pro tělesa válcového tvaru se jedná o hodnoty  $Re$  v rozmezí 40–500 [5]. Tento jev je potřeba zohlednit zejména při konstrukci. Je nutnost se vyvarovat stejné vlastní frekvenci tělesa a frekvenci odtrhávání vírů z důvodu rezonance.



Obr. 1.7 Kármánova vírová stezka za ostrovy Juana Fernandéze [5].



## 1.9 Strouhalovo číslo

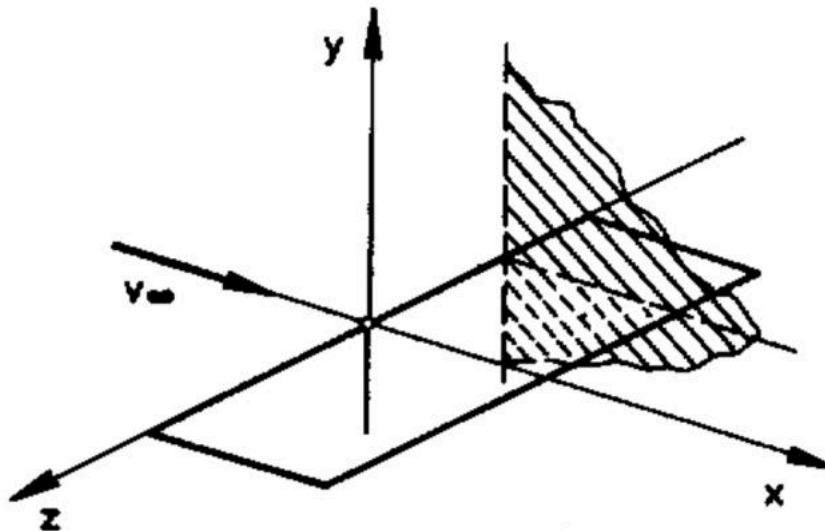
Strouhalovo číslo je bezrozměrná veličina, která popisuje frekvenci uvolňování vírů. Při měnících se rychlostech se totiž nemění velikost vírů, ale právě jejich frekvence. Strouhalovo číslo pro obdélníkový tvar závisí na poměru stran a náběhovém úhlu proudu. Také je ovlivňováno proudícími podmínkami (Reynoldsovo číslo) a intenzitou turbulence v hlavním proudu. Strouhalovo číslo je definováno vztahem:

$$St = \frac{f_s \cdot v}{d} \quad (3)$$

kde  $f_s$  (Hz) je frekvence odtrhávání vírů,  $v$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je rychlost proudění a  $d$  (m) je charakteristický rozměr tělesa.

## 1.10 Letecký profil

Profil křídla je uzavřená rovinná křivka, která vznikne řezem roviny  $xy$ , která je kolmá k ose křídla (obr 1.8) [6].

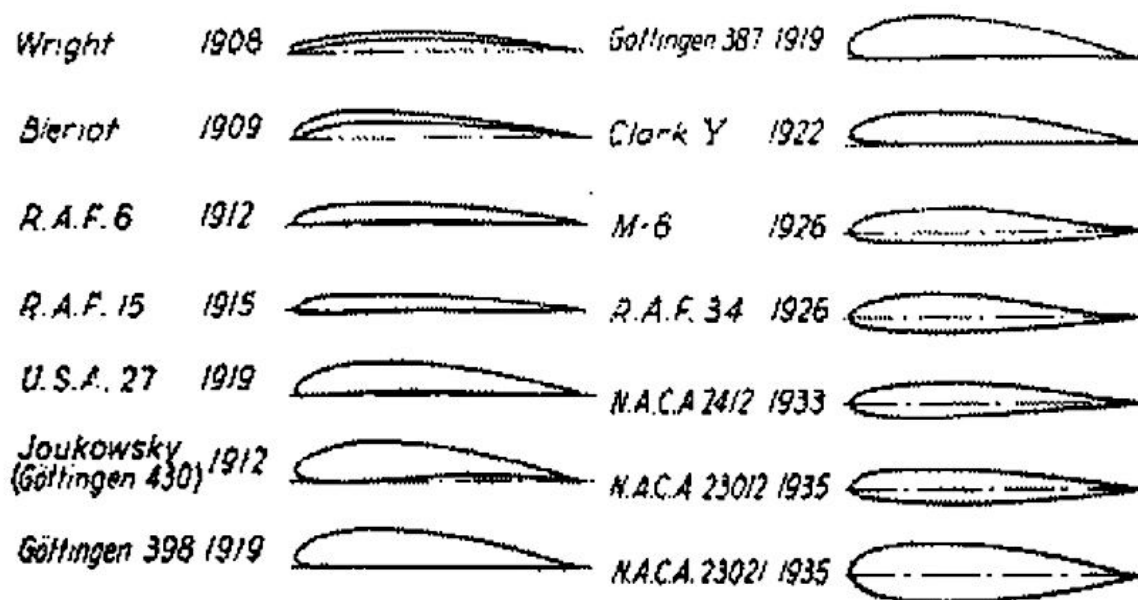


Obr. 1.8 Vznik profilu řezem roviny  $xy$  [6].

### 1.10.1 Historie

První tvar leteckého profilu byl patentován v roce 1884 Horatiem Phillipsem [7]. Phillips prováděl první testy s leteckými profily v aerodynamickém tunelu. V roce 1902 bratři Wrightové vykonali jejich vlastní test v tunelu, při kterém vyvinuli účinný letecký profil. Ten napomohl jejich prvnímu úspěšnému letu, který se zapsal do historie dne 17. prosince 1903. Na počátku letectví byly tvary

leteckých profilů personalizovány. Proto ve 30. letech 20. století, NACA (U.S. National Advisory Committee for Aeronautics, což je předchůdce dnešní NASA), systematicky a racionálně vyvinula a pojmenovala sérii leteckých profilů. Obecný přehled profilů je vyobrazen na obr. 1.9. Velká část těchto profilů je dodnes používána a jejich terminologie je stále dobře známá [2].

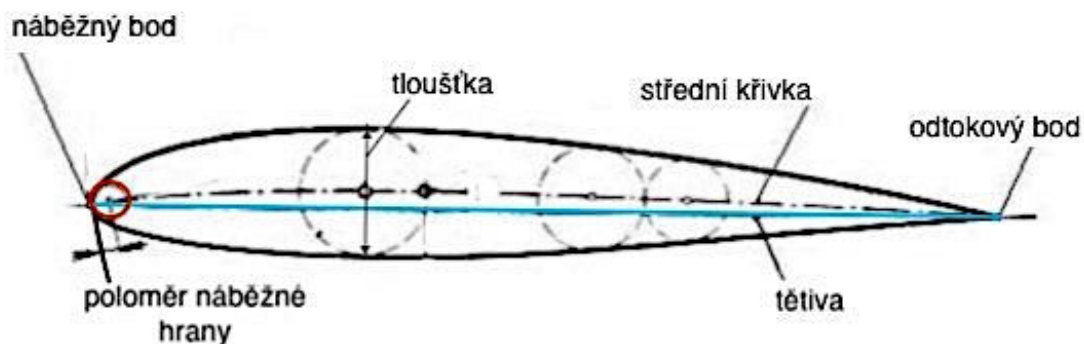


Obr. 1.9 Vývoj aerodynamického profilu ze začátku 20. století [8].

### 1.10.2 Geometrie

Geometrie leteckého profilu je popsána několika základními parametry (viz obr. 1.10):

- střední křivka – křivka procházející středy kružnic vepsaných do profilu, udává prohnutí profilu,
- tětiva – přímá čára spojující náběžný a odtokový bod,
- tloušťka – kolmá vzdálenost mezi horní a dolní stěnou profilu,
- poloměr náběžné hrany – poloměr kružnice vepsané do náběžné hrany, určuje křivost,
- úhel odtokové hrany – ovlivňuje oddělení mezní vrstvy a vznik vírů za křídlem,
- úhel náběhu – úhel, který svírá proud tekutiny s tětivou profilu.



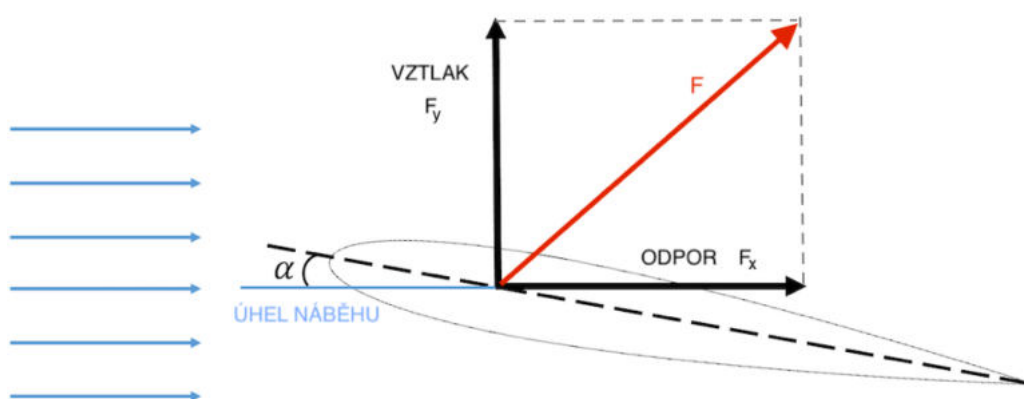
Obr. 1.10 Geometrie leteckého profilu [6].

### 1.10.3 Silové působení

Obr. 1.11 schematicky znázorňuje aerodynamické síly působící na profil [2]. Tyto síly (vztlak a odpor) vznikají obtékáním vzduchu a závisí na tvaru profilu a jeho velikosti, úhlu náběhu, rychlosti letu a také hladkosti povrchu. Jejich působíště je ve čtvrtině vzdálenosti křídla od náběžného bodu na tětivě.

Aby letadlo letělo konstantní rychlostí přímočarým pohybem v konstantní výšce, musejí být síly v rovnováze. Vztlaková síla se musí rovnat síle tíhové a odporová síla musí být stejná jako síla od tahu motoru.

Kritický úhel náběhu má hodnotu kolem 18 stupňů [7] (závisí na geometrii profilu). Při této hodnotě se na vrchní straně křídla začnou otrhávat mezní vrstvy a letadlo prudce ztratí vztlak.



Obr. 1.11 Silové působení [9].

Odporová síla ve směru osy x je dána vztahem: 
$$F_x = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (4)$$

Vztlaková síla ve směru osy y je dána vztahem: 
$$F_y = \frac{1}{2} \cdot c_y \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (5)$$

Výsledná aerodynamická síla se spočítá vztahem: 
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (6)$$

Součinitelé  $c_x$  a  $c_y$  se v praxi obtížně měří, takže se v realitě počítá výsledná aerodynamická síla ze vztahu:

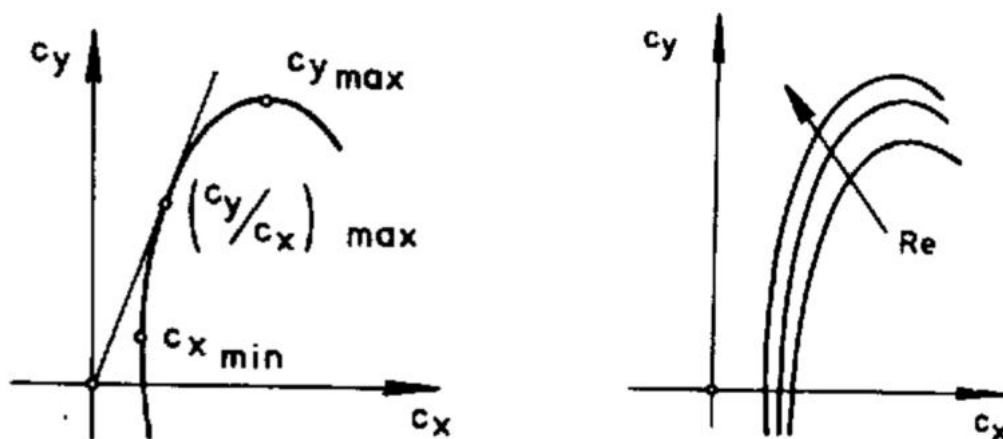
$$F = \frac{1}{2} \cdot c_R \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (7)$$

kde  $F_x$  (N) představuje vztakovou sílu,  $F_y$  (N) sílu odporovou,  $F$  (N) výslednou aerodynamickou sílu,  $c_x$  (1) součinitele odporu,  $c_y$  (1) součinitele tlaku,  $c_R$  (1) součinitele aerodynamické síly,  $\rho$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) hustotu tekutiny,  $v$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) rychlost a  $S$  ( $\text{m}^2$ ) průřez vystavený proudění pro rovnice (4) – (7).

„Vhodného průběhu sil, tj. například malého odporu nebo velkého vztlaku, dosáhneme u obtékacích těles volbou vhodného tvaru.“ [2]

#### 1.10.4 Polára

Polára je křivka, která znázorňuje závislost součinitele odporu  $c_x$  na součiniteli tlaku  $c_y$  (obr 1.12).



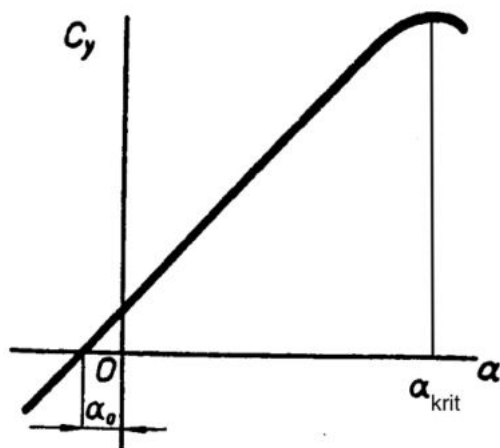
Obr. 1.12 Polára profilu [6].

Grafy ilustrují důležité parametry:

- maximální aerodynamická účinnost neboli největší klouzavost – tečna ke křivce, která vede ze středu souřadného systému, ukazuje maximální poměr součinitelů,
- minimální  $c_x$  – nejmenší odpor křídla, maximální rychlost,
- maximální  $c_y$  – největší vztlak křídla.

### 1.10.5 Vztlaková křivka

Vztlaková křivka vyobrazená na obr. 1.13 demonstruje závislost úhlu náběhu na součiniteli vztlaku. Spodní část této křivky je lineární, což bylo experimentálně potvrzeno. To znamená, že při zvětšujícím se úhlu náběhu se zvyšuje vztlak. Kritický úhel náběhu  $\alpha_{krit}$  nastane při odtržení mezní vrstvy a vztlak prudce poklesne [2].



Obr. 1.13 Vztlaková křivka [6].

## 2 Tažná nádrž

Tažná nádrž je zařízení sloužící k experimentálnímu výzkumu obtékání různých těles. To se provádí v nádržích naplněných vodou. Obtékané těleso je upevněné na pojezdový mechanismus [10].

### 2.1 Malá tažná nádrž

Slouží ke zkoumání hydrodynamiky při obtékání malých těles. Jejich velikost se pohybuje v řádech jednotkách metrů.

### 2.2 Velká tažná nádrž

Velké tažné nádrže jsou určeny k experimentálnímu zkoumání proudění kolem velkých objektů. Největší tažná nádrž na světě se nachází ve Španělsku a má rozměry  $(320 \times 12,5 \times 6,5) \text{ m}^3$ . Další z velkých nádrží s rozměry  $(252 \times 10,5 \times 5,5) \text{ m}^3$  se nalézá v Nizozemí (obr. 2.1). Tyto nádrže slouží především k testování lodí a lodních šroubů [10, 11].



Obr. 2.1 Tažná nádrž ve výzkumném institutu v Nizozemí [11].

### 3 Experimentální metody zkoumání úplavu

Experimentální zkoumání úplavu je realizováno dvěma přístupy. Prvním přístupem je vizualizace úplavu pomocí kontrastní látky, druhým je měření rychlostních polí.

Výstupem měření vizualizací jsou snímky bez přesných hodnot. Při zkoumání úplavu pomocí rychlostních polí jsou výsledkem měření hodnoty rychlosti v různých místech.

#### 3.1 Vizualizace

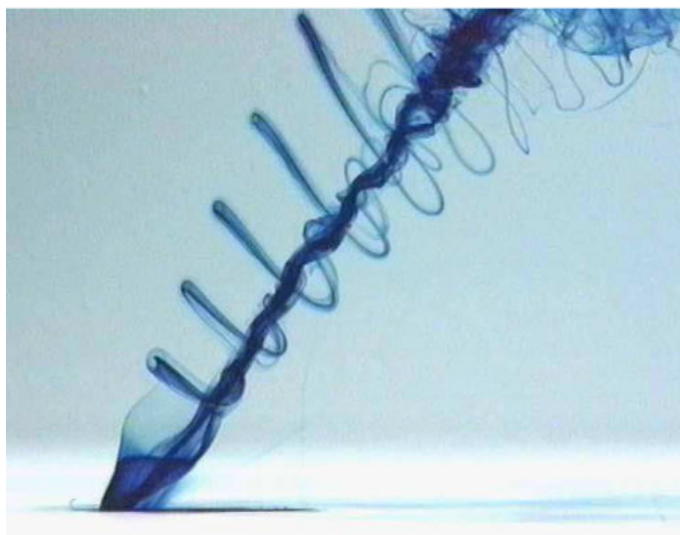
Vizualizace úplavu je zpravidla realizována přidáním kontrastní látky do proudu. Tím dojde ke zviditelnění proudnic.

##### 3.1.1 Pomocí elektrolýzy

Princip elektrolýzy je založen na uvolňování bublinek či kouře při průchodu proudu anodou. Anoda je většinou umístěna před testovací předmět či přímo na něj.

##### 3.1.2 Pomocí barviva

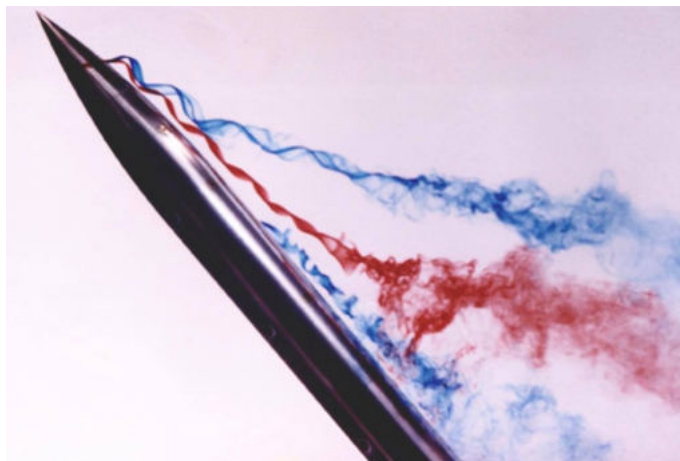
Do proudu kapaliny se tryskou zavádí barvivo. Příklad takové vizualizace je ukázán na obr. 3.1. Jako barviva se používají například indigo, tuš či inkoust.



Obr. 3.1 Metoda zkoumání úplavu pomocí barviva [12].

### 3.1.3 Mísení různobarevných kapalin

Slouží k vizualizaci směšování dvou různých kapalin či při mísení dvou proudů. Příklad je uveden na obr 3.2.



Obr. 3.2 Mísení různobarevných kapalin [12].

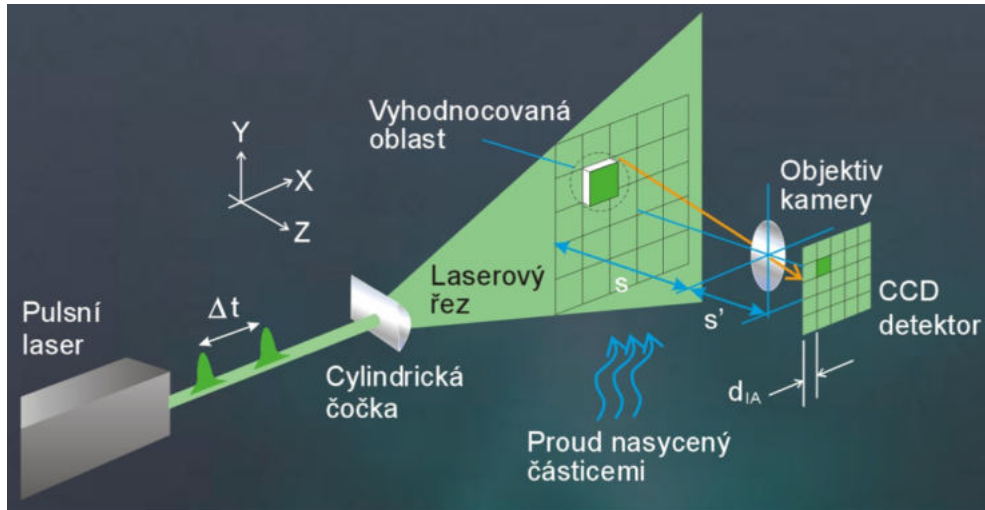
## 3.2 Měření rychlostních polí

Při zkoumání úplavu je výsledkem konkrétní hodnota rychlosti v daném bodě, případně kompletní vektorové pole.

### 3.2.1 Metoda PIV

Laserová anemometrie neboli PIV (z anglického Particle Image Velocimetry) je optická metoda, která poskytuje okamžité měření 2D nebo 3D rychlostního pole v reálném čase. Princip metody je ten, že v čiré tekutině jsou rovnoměrně rozptýleny stopovací částice. Tyto částice při proudění dokonale kopírují proudění tekutiny a s pomocí snímkování je měřena jejich překonaná vzdálenost za daný časový úsek pevně definovaný pulsem pulsního laseru. Systém PIV obsahuje zdroj laserového svazku, soustavu čoček vytvářející světelný řetěz (2D) nebo světelný objem (3D), kameru s objektivem, počítač a vyhodnocovací program. Uspořádání zařízení v systému je znázorněno na obr. 3.3. Tok proudu je nasvícen pulsy laseru, kamera v každém tomto pulsu zachytí obrázek nasvícených částic. Z toho, jak se mezi jednotlivými pulsy jednotlivé částice posunou je spočítána jejich rychlost a je tedy vykreslováno rychlostní pole. Aby výstupem bylo 3D rychlostní pole, je zapotřebí tři a více kamer [12].

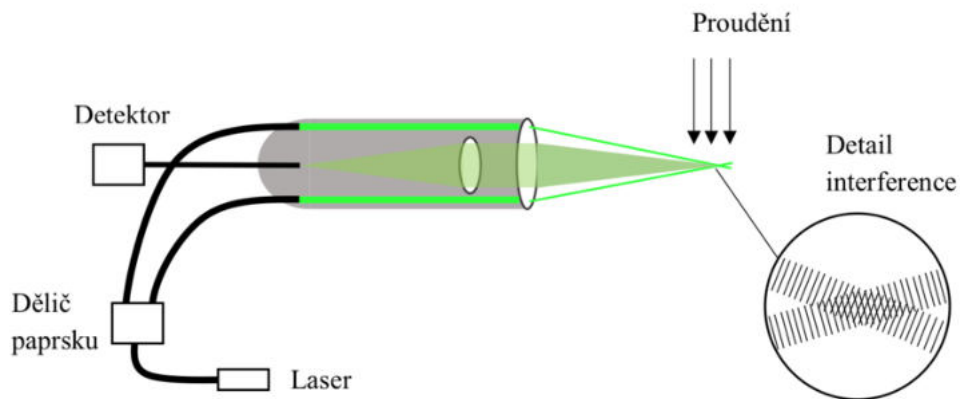




Obr. 3.3 Metoda PIV [12].

### 3.2.2 Metoda LDA

Laserová dopplerovská anemometrie neboli LDA (z anglického Laser Doppler Anemometry) je měřící metoda založená na Dopplerově jevu. Dvěma lasery je nasvíceno do jednoho místa, kde vznikne interferenční obrazec. Částice procházející tímto obrazcem způsobí rozptýlení světla a změní se jejich frekvence (obr. 3.4) [13].



Obr. 3.4 Metoda LDA [13].

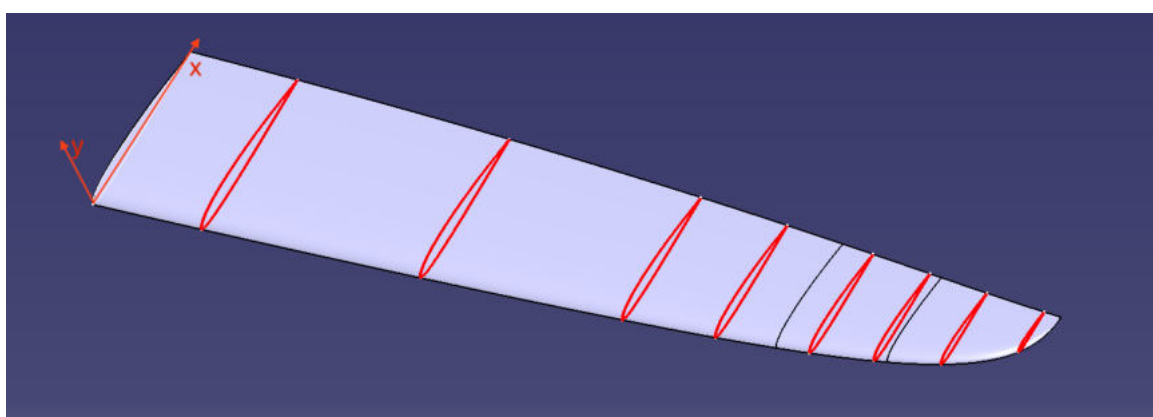
## 4 Experimentální část

### 4.1 Návrh experimentu

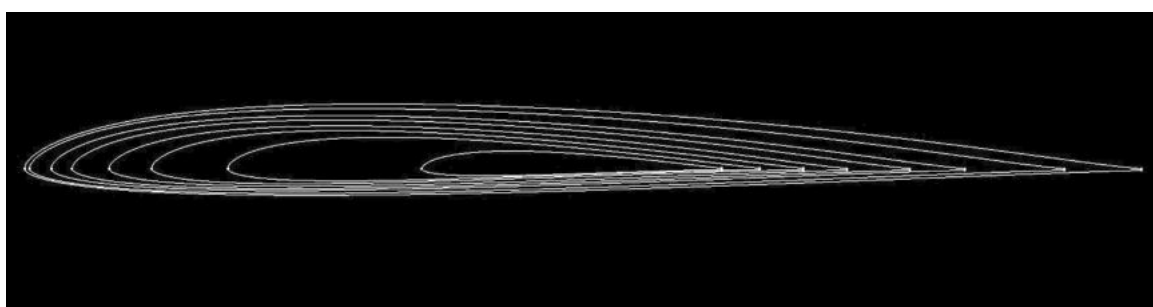
#### 4.1.1 Výběr řezu

Geometrický model křídla byl použit z reálného modelářského letadla třídy F3B. Tento model byl v 3D programu zmenšen v poměru 1 : 6.

Pro výběr vizualizačního řezu bylo nutné nejdřív určit typ geometrie profilu na křídle. To se provedlo v konstrukčním programu v počítači. Bylo vybráno 8 řezů, které jsou červeně vyznačeny na obr. 4.1. Následovně byly tyto řezy promítnuty na boční rovinu xy (obr. 4.2). Z obrázku je zřejmé, že typ geometrie křídla se v průběhu řezu nemění, mění se pouze její velikost.



Obr. 4.1 Řezy pro vizualizaci typu geometrie křídla.



Obr. 4.2 Řezy promítnuté na boční rovině.

#### 4.1.2 Výroba modelu

Na základě CAD modelu byl vyroben model pro experimenty. Výroba byla realizována 3D tiskem. Vzhledem k tomu, že geometrie křídla je složitá, bylo vyzkoušeno použití více základních rovin stolu pro tisk. Byly vytisknuty 3 produkty (obr. 4.3) a z těchto produktů byl pro experiment vybrán model s nejlepší kvalitou povrchu.



Obr. 4.3 Modely vytisknuté na 3D tiskárně.

### 4.1.3 Přepočít charakteristiky proudění

Jak již bylo řečeno, experiment vychází z reálného modelu letadla. Pro toto testování, které probíhá v jiném médiu, se musí přepočít charakteristiky proudění.

#### Reálné křídlo ve vzduchu

Pro výpočet Reynoldsova čísla použijeme vzorec (kapitola 1.4):

$$Re_{\text{vzduch}} = \frac{v_{\text{vzduch}} \cdot d_{\text{real}}}{\nu_{\text{vzduch}}} = 547\,830$$

kde  $d_{\text{real}}$  (m) je charakteristický rozměr reálného křídla, což je délka tělvy v polovině křídla,

$v_{\text{vzduch}}$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je rychlost, která se v případě tohoto modelářského letadla pohybuje v rozmezí ( $50 \div 400$ )  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , tj. přibližně ( $14 \div 111$ )  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

$\nu_{\text{vzduch}}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) je tabulková kinematická viskozita vzduchu při teplotě  $20\text{ }^\circ\text{C}$  [14].

Tab. 1 Tabulka vypočtených hodnot pro reálné křídlo

$d_{\text{real}}$ (mm)	198,7
$v_{\text{vzduch}}$ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	150
$\nu_{\text{vzduch}}$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$15,11 \cdot 10^{-6}$

### Model křídla ve vodě

Aby se splnil předpoklad stejné charakteristiky proudění, musí se v obou médiích shodovat Reynoldsovo číslo.

$$Re_{\text{vzduch}} = Re_{\text{voda}}$$

Pro výpočet rychlostí proudění vody použijeme vzorec:

$$v_{\text{voda}} = \frac{Re_{\text{voda}} \cdot \nu_{\text{voda}}}{d_{\text{model}}} = 15,84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde  $d_{\text{model}}$  (m) je charakteristický rozměr modelu křídla, což je délka tělivity v polovině křídla,

$\nu_{\text{voda}}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) je tabulková kinematická viskozita vody v nádrži při teplotě 22 °C [14], která byla v laboratoři při provádění pokusu naměřena.

Tab. 2 Tabulka vypočtených hodnot pro model křídla

$d_{\text{model}}$ (mm)	33,1
$Re_{\text{voda}}$ (1)	547 830
$\nu_{\text{voda}}$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$9,57 \cdot 10^{-7}$

K ideálnímu nasimulování reálných podmínek v tažné nádrži by tedy bylo potřeba vyvinout rychlost až v řádech desítek metrů za sekundu, popřípadě zvětšit charakteristický rozměr modelu křídla na 1,5 m. To bohužel není konstrukčně možné (viz kapitola 4.2.2) a vizualizace tedy bude probíhat při menších rychlostech.

## **4.2 Tažná nádrž KEZ**

Nádrž v laboratoři KEZ byla vybudovaná v roce 2008 v rámci diplomové práce [15]. S rozměry  $(5,5 \times 1 \times 1) \text{ m}^3$  se řadí mezi malé nádrže. Je složená z vany, rámu a lineárního vedení s pojezdem.

### **4.2.1 Pojezdový mechanismus**

Na obou stranách nádrže je umístěno lineární vedení, které je tvořeno ozubenými řemeny a řemenicemi. Ty jsou kvůli synchronizaci na koncích nádrže spojeny hřídelem. Na řemenech jsou umístěny pojezdové vozíky s konstrukcí pro upevnění zkoumaného tělesa.

### **4.2.2 Pohon**

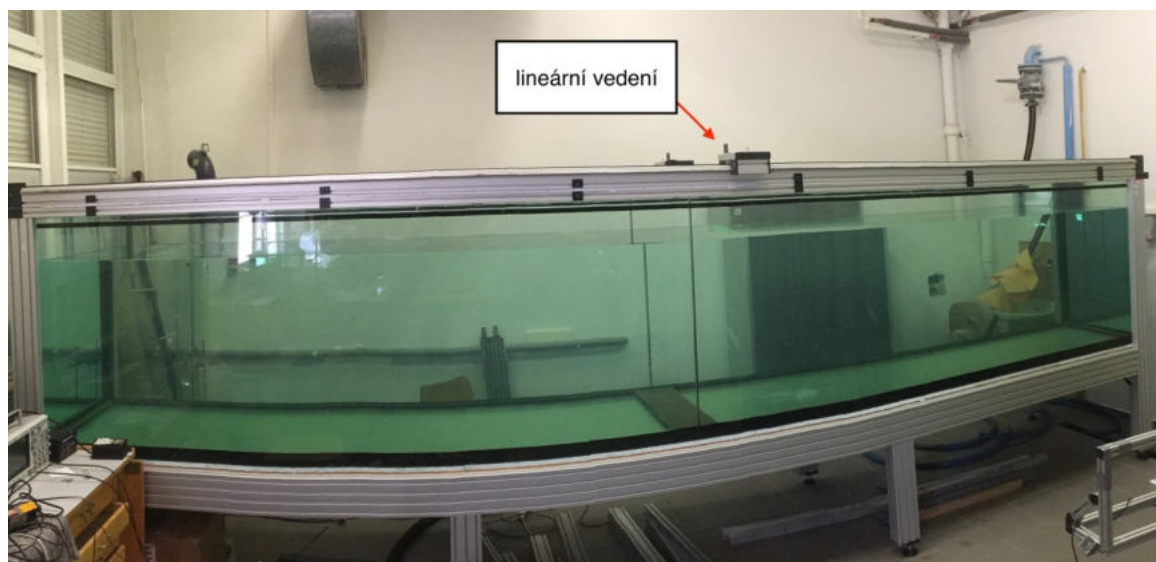
Pohyb řemenic je zajišťován krokovým elektromotorem RE35, který je vybaven ovládací jednotkou Epos 70/10 a z počítače je řízen pomocí ovládacího softwaru Epos Studio. Elektromotor je schopen zajistit rychlost tažení až  $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  a má výkon 90 W.

### **4.2.3 Laser**

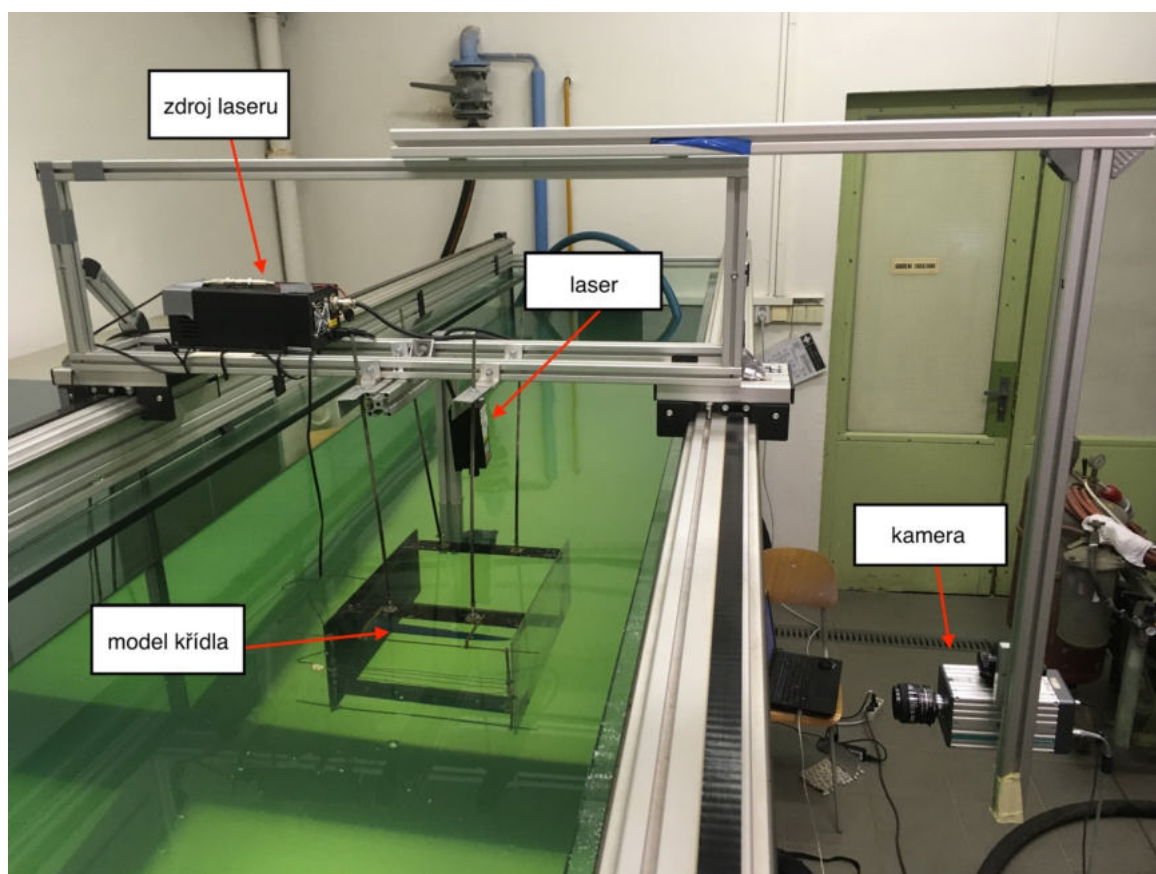
Jak již bylo řečeno, metodou cínových iontů vznikne v tažné nádrži kouř. Ten je však pro měřený řez špatně rozlišitelný, proto se vytváří řez laserový. Ten jasně definuje kouř, který se nachází v místě měření. Laserový řez je vytvářen kontinuálním laserem X1000 H53 s výkonem 1000 mW a vlnovou délkou 532 nm se vsazenou válcovou čočkou pro vytvoření světelného řezu. Laserový svazek byl namířen požadovaným směrem pomocí malého zrcadla. Celá tato soustava byla upevněna na pohybující se rám.

### **4.2.4 Snímací zařízení**

K pořizování záznamu byla použita vysokorychlostní kamera NanoSense MKIII, která dokáže zaznamenávat až 1040 snímků za sekundu s rozlišením 1280 x 1024 pixelů. Kamera byla přes USB port propojena s počítačem a ovládána pomocí softwaru MotionPRO. Pro experiment byla kamera nastavena na snímání 30 snímků za sekundu a celková délka snímání byla 5 sekund. Clona objektivu byla nastavena na  $f2,8$ .



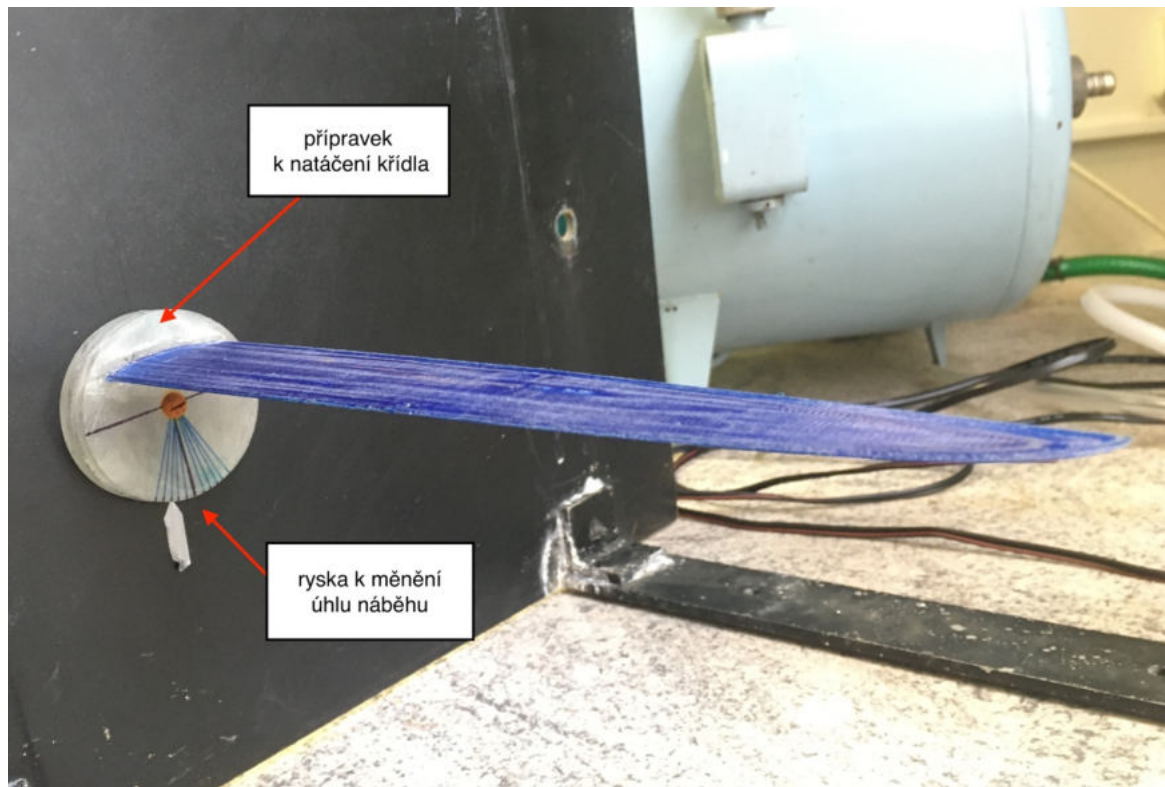
Obr. 4.4 Tažná nádrž v laboratoři KEZ.



Obr. 4.5 Nosný rám na tažné nádrži.

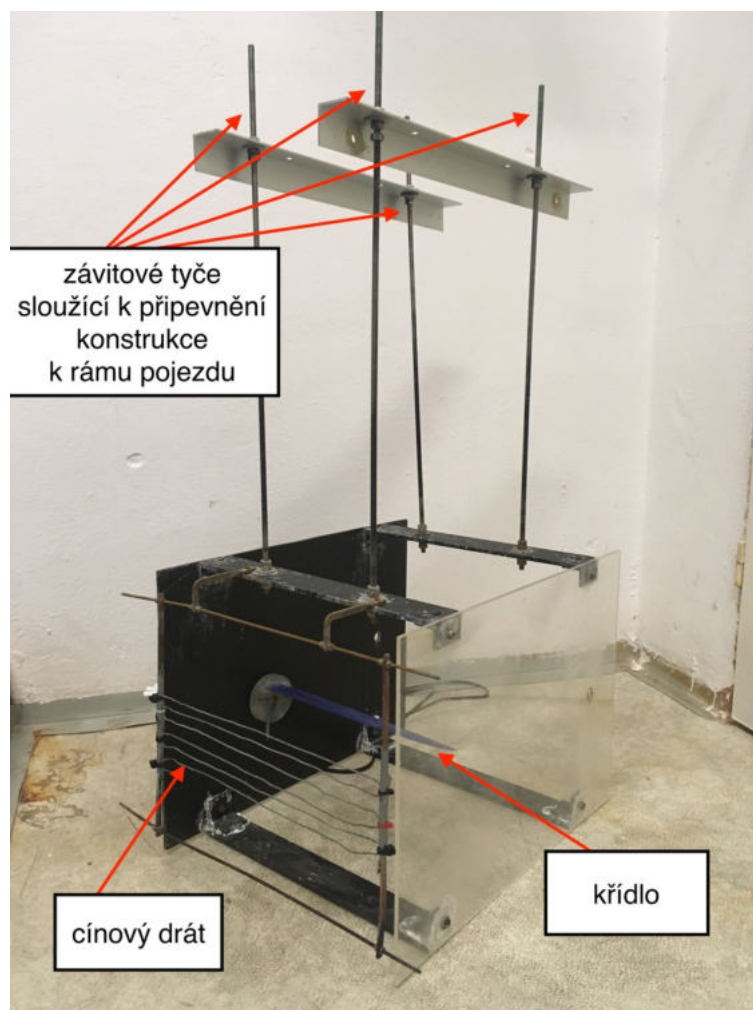
#### 4.2.5 Upevnění k rámu

Model křídla byl s pomocí závitové tyče a vteřinového lepidla připevněn na přípravek kruhového tvaru (označen na obr. 4.6). Na tomto přípravku byly vyznačeny rysky pro jednoduché nastavení úhlu náběhu.



Obr. 4.6 Připevnění k testovací konstrukci.

Model byl pomocí šroubu připevněn k černému plexisklu. Celý rám byl pomocí závitových tyčí připevněn na pojezdový mechanismus (obr. 4.7).



Obr. 4.7 Testovací konstrukce.

### 4.3 Metoda cínových iontů

Elektrolyt je roztok zásad, kyselin nebo solí, který je schopen vést elektrický proud. K tomu dochází díky disociaci kapaliny na kationty a anionty. Elektrolytem v tomto experimentu je voda s rozpuštěnou kuchyňskou solí v hmotnostním poměru 1 kg soli na 1 m<sup>3</sup> vody. Sůl přidáváme pro zajištění vyšší elektrické vodivosti. Disociace je popsána následovně:

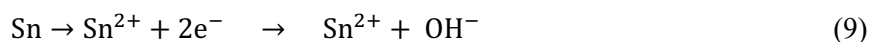


Vodivé součástky umístěné v elektrolytu se nazývají kladná a záporná elektroda.

Záporná elektroda se nazývá katoda a je v našem případě tvořena měděným plíškem. Musí být v relativní blízkosti anody, ale zároveň nesmí překážet v oblasti proudu elektrolytu kolem zkoumaného tělesa. Při průchodu jednosměrného proudu se katoda redukuje a přitahuje k sobě aniont  $\text{OH}^-$ , který reakcí na katodě způsobí jemné bublinky. Katoda byla při experimentu umístěna na zadní část černého plexiskla.



Anoda neboli kladná elektroda je v případě tohoto experimentu tvořena cínovým pájecím drátem. Při průchodu jednosměrného proudu anoda oxiduje a uvolňuje ionty cínu, které reagují se zápornými ionty v elektrolytu. Touto reakcí vzniká potřebný elektrochemický kouř, který se dá chemickou rovnicí vyjádřit takto:



Právě tento elektrochemický kouř je kontrastní látka pro vizualizaci proudění.

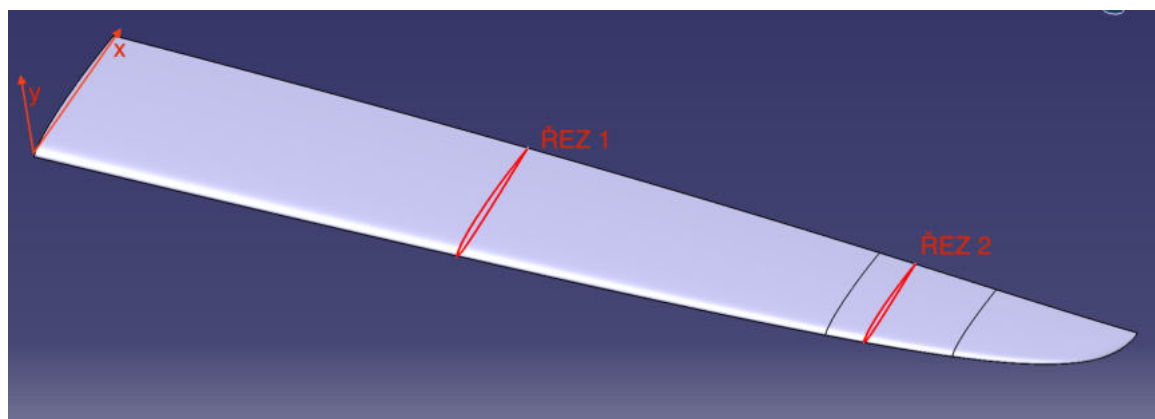
Při experimentu byl zdroj nastaven k dodávání stejnosměrného proudu s hodnotou 1,5 A a s napětím 36,8 V.

#### 4.4 Definice experimentu

Pro měření byly vybrány 2 řezy (obr 4.8). Od boku křídla (rovina xy) je první řez ve vzdálenosti 11,5 cm a druhý řez je ve vzdálenosti 19,5 cm. Pro každý z těchto řezů bylo provedeno měření při třech různých úhlech náběhu. Pro každý tento úhel náběhu se proudění vizualizovalo pro dvě různá Reynoldsova čísla.

Hodnoty úhlů náběhu byly zvoleny 0°, 10° a 20°. Třetí hodnota úhlu náběhu 20° byla záměrně vybrána za hranici kritického úhlu náběhu.

Hodnoty Reynoldsova čísla byly zvoleny s ohledem na možnost maximální dosažitelné rychlosti lineárního vedení na tažné nádrži jako  $\text{Re} = 700$  a  $1400$ .

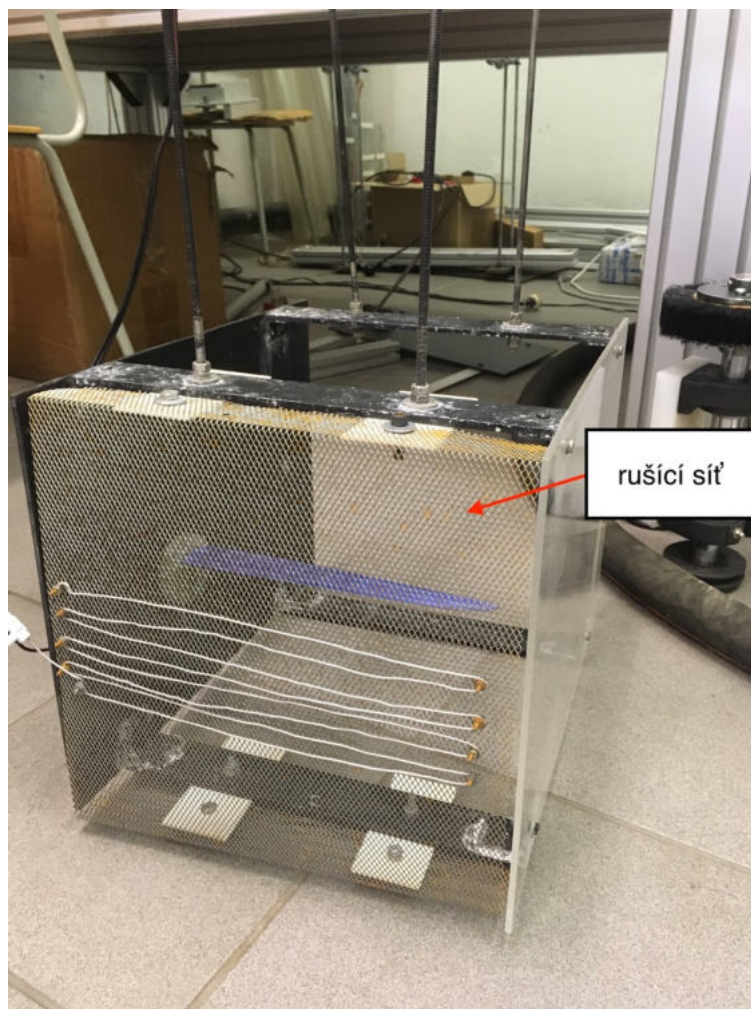


Obr. 4.8 Znárodnění použitých řezů na křídle.

V této práci se dále budou porovnávat hodnoty z obou řezů se stejným úhlem náběhu a zároveň se stejným Reynoldsovým číslem.

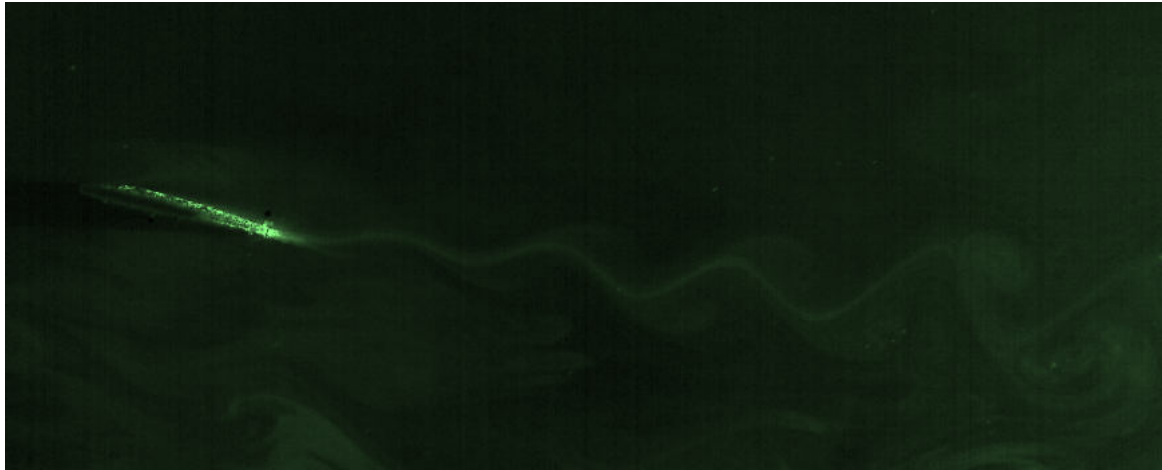
## 4.5 Testovací měření

Při návrhu experimentu byla uvažována skutečnost, že v reálném světě vzduch nikdy v absolutním klidu není. Dochází totiž k mísení jednotlivých vrstev ve vzduchu z důvodu rozdílných tlaků v atmosféře nebo je pohyb vzduchu také ovlivněn například startujícím letadlem. Z tohoto důvodu byla u prvního zkušebního měření před model vložena ocelová síť (viditelná na obr. 4.9), do které byl vpletený cínový drát kvůli elektrolýze. Celá tato přídatná konstrukce byla naistalována kvůli narušení laminárního proudu.



Obr. 4.9 První zkušební konstrukce.

Po pár testovacích měřeních se však voda začala zabarvovat do hněda a úplav přestal být zřetelně viditelný (viz obr. 4.10). Zabarvení bylo způsobeno korozí sítě urychlenou průchodem elektrického proudu.



Obr. 4.10 Výsledek vizualizace při zakalení nádrže.

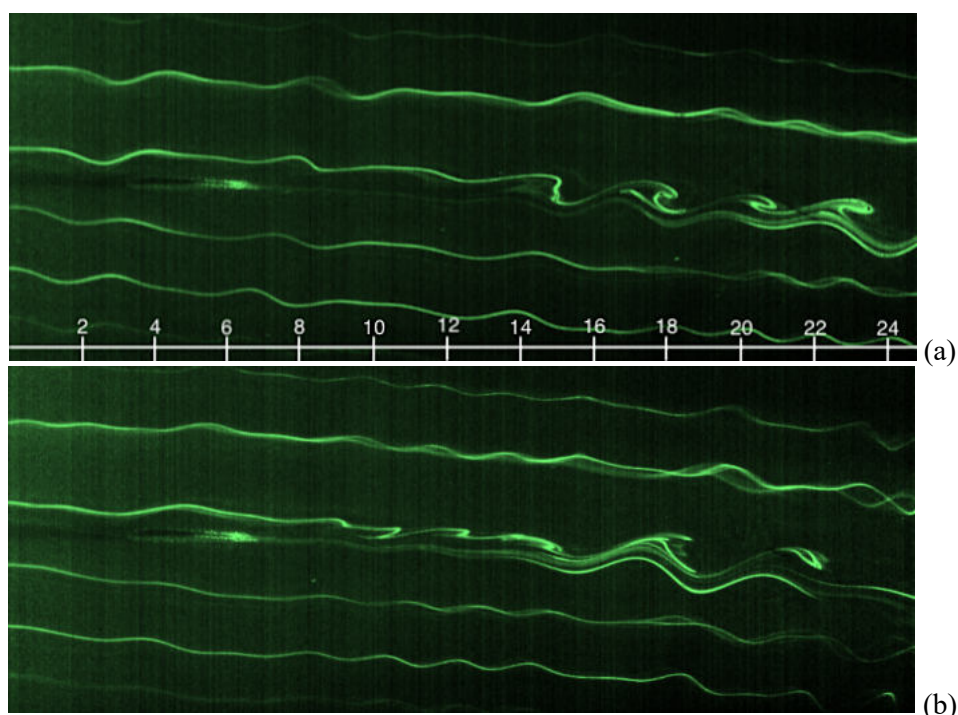
V následující testovací konstrukci byla síť odstraněna a rušení proudu bylo zajištěno pouze cínovým drátem. Ten byl vpleten do jiné ocelové konstrukce (viz kapitola 4.2.3) a byl od ní odizolován. Toto uspořádání již přineslo uspokojivé výsledky a bylo tedy použito k dalším experimentům.

#### **4.6 Výsledky měření**

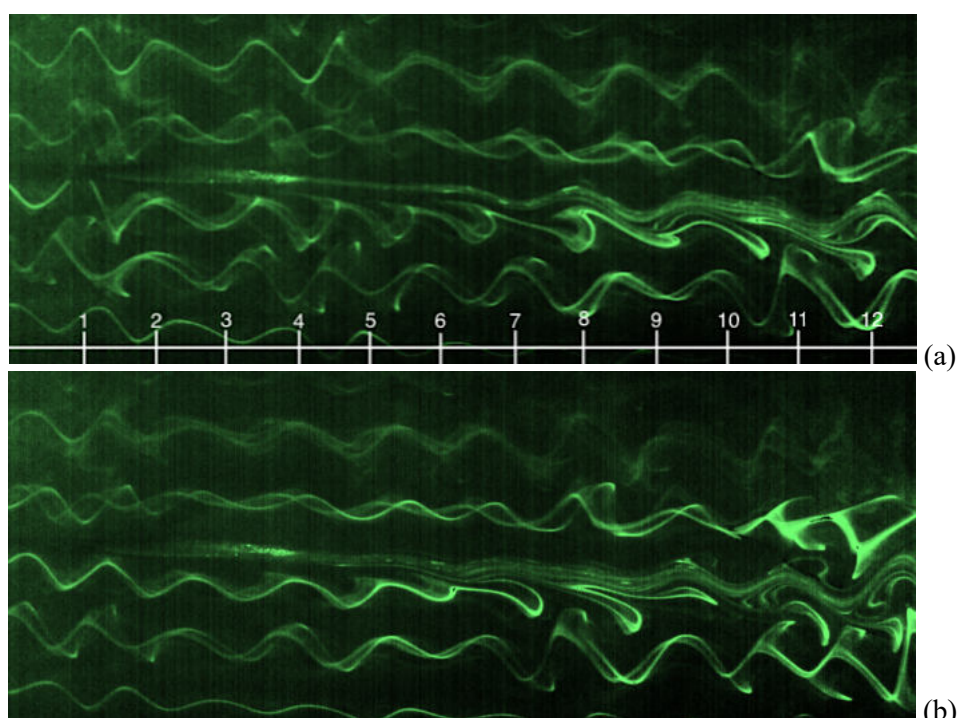
Dále budou pro každé měření se stejným režimem proudění zobrazeny dva snímky ze záznamového pětisekundového videa. Tyto dvě fotografie budou označeny písmeny (a) a (b).

Ke každému jednotlivému měření je na snímku (a) vždy vyobrazeno měřítko. Toto měřítko je vždy společné pro oba snímky z daného měření, tj. pro fotografii (a) i (b). Hodnoty na měřítku jsou vždy v centimetrech.

Úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 700$



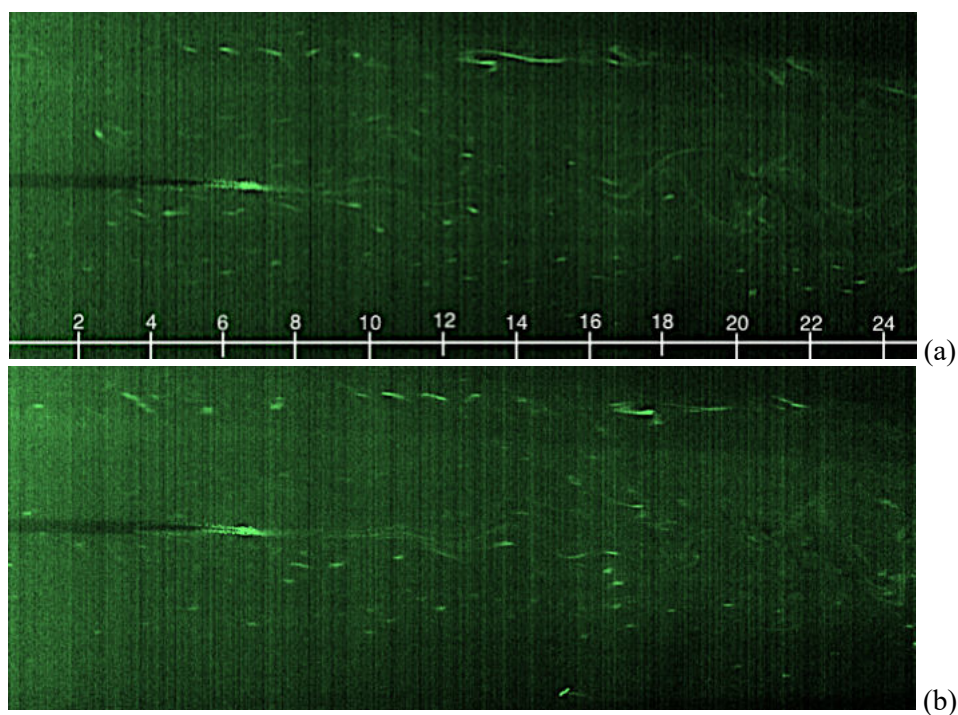
Obr. 4.11 Řez 1, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 700$ .



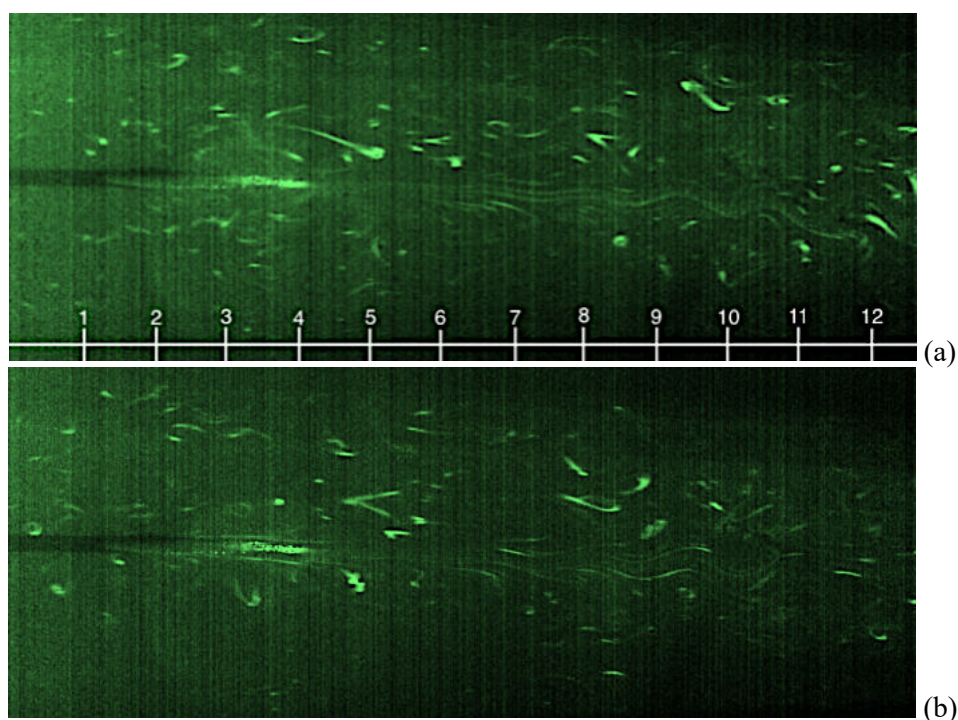
Obr. 4.12 Řez 2, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 700$ .

Na obou řezech lze pozorovat lehké zvlnění proudnic, ještě se však nejedná o úplné zalomení, které je viditelné při Kármánově vírové stezce. Na obrázcích z prvního řezu (obr. 4.11) lze nejlépe pozorovat ovlivnění proudu pouze za profilem, ostatní proudnice si zachovávají neovlivněný tvar. Nelze pozorovat žádný zásadní rozdíl mezi jednotlivými řezy. Na snímcích z obou řezů je možné pozorovat lehké klesání proudnic, což je zapříčiněno přirozenou tendencí kouře klesat.

Úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 1400$



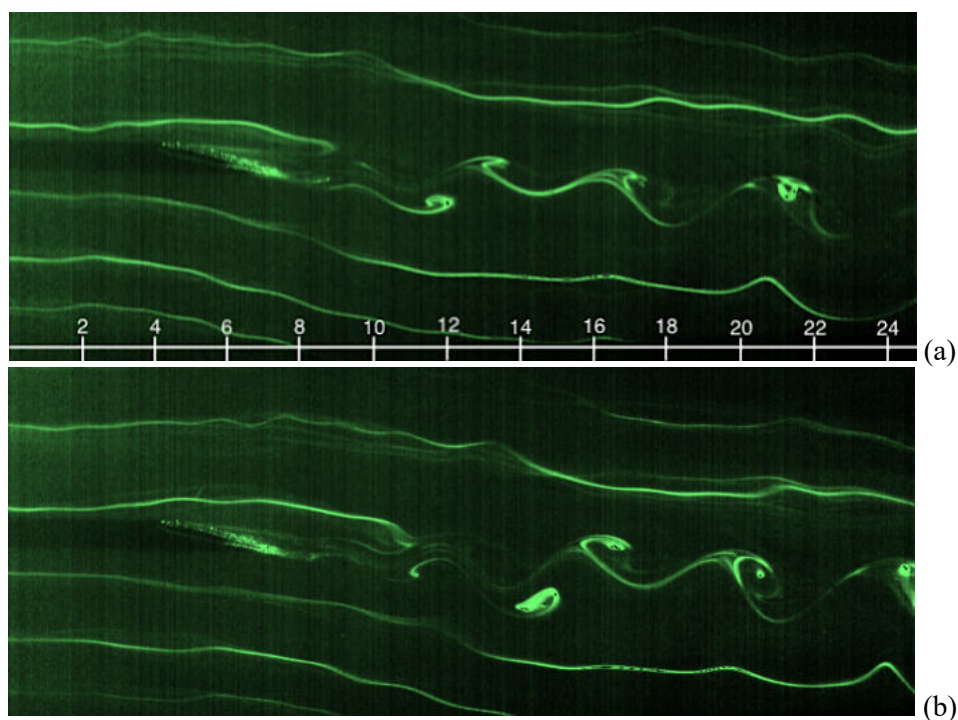
Obr. 4.13 Řez 1, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 1400$ .



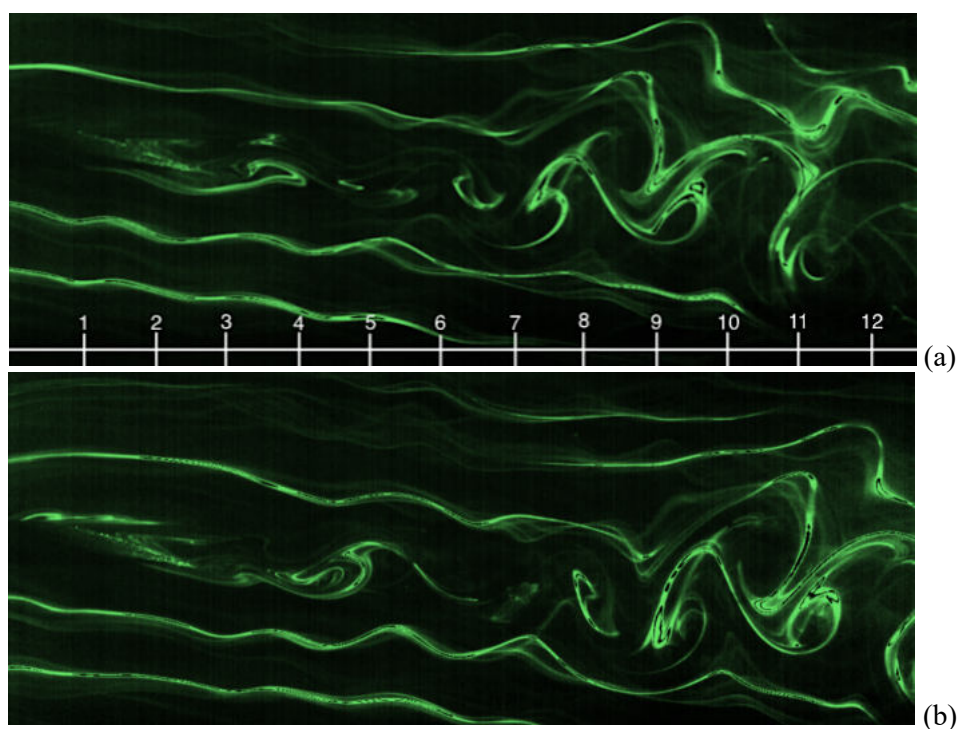
Obr. 4.14 Řez 2, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 1400$ .

Při vyšší hodnotě  $Re = 1400$  už nejsou proudnice tolik zřetelné, protože elektrolýza nestíhá produkovat dostatek kouře. Chování úplavu lze nejlépe pozorovat v druhém řezu (obr. 4.14). Dochází již k většímu zakřivování proudnic než u předchozího měření. Lze pozorovat velmi malé ovlivnění proudu, a to v obou řezech bez rozdílu.

### Úhel náběhu $10^\circ$ , $Re = 700$



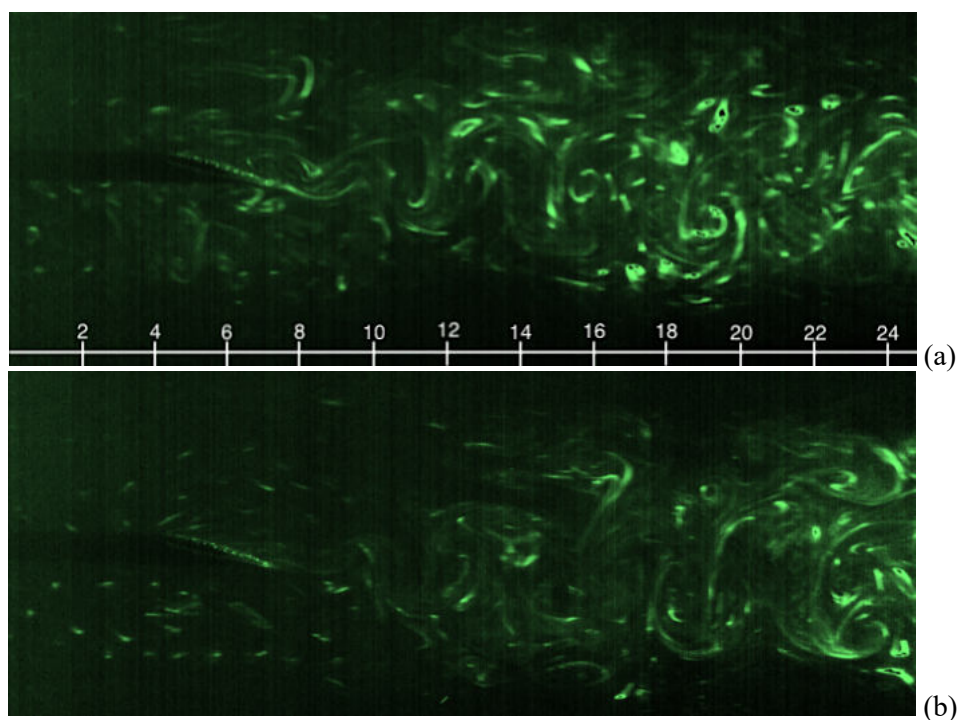
Obr. 4.15 Řez 1, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 700$ .



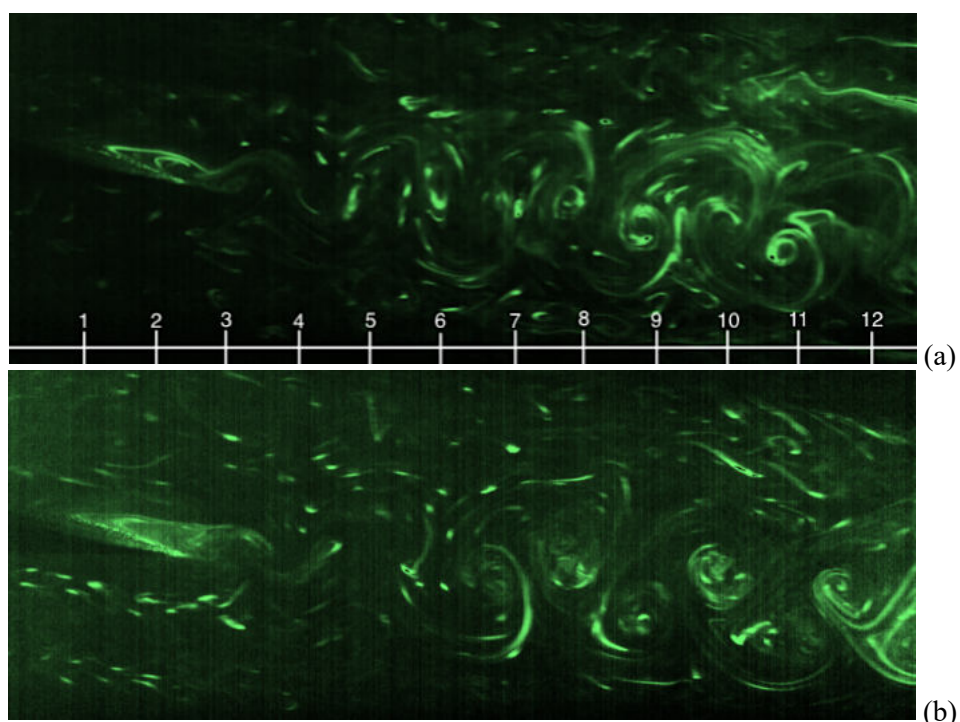
Obr. 4.16 Řez 2, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 700$ .

Při tomto měření lze pozorovat rozvinutou vírovou stezku, u které dochází k plnému zalamování proudnic. Je vidět, že oblast ovlivněná za profilem je širší v porovnání s měřením se stejným  $Re$  a nulovým úhlem náběhu. Na snímcích z řezu 1 lze pozorovat nižší frekvenci odtrhávání vírů než na snímcích z měření v řezu 2.

Úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 1400$



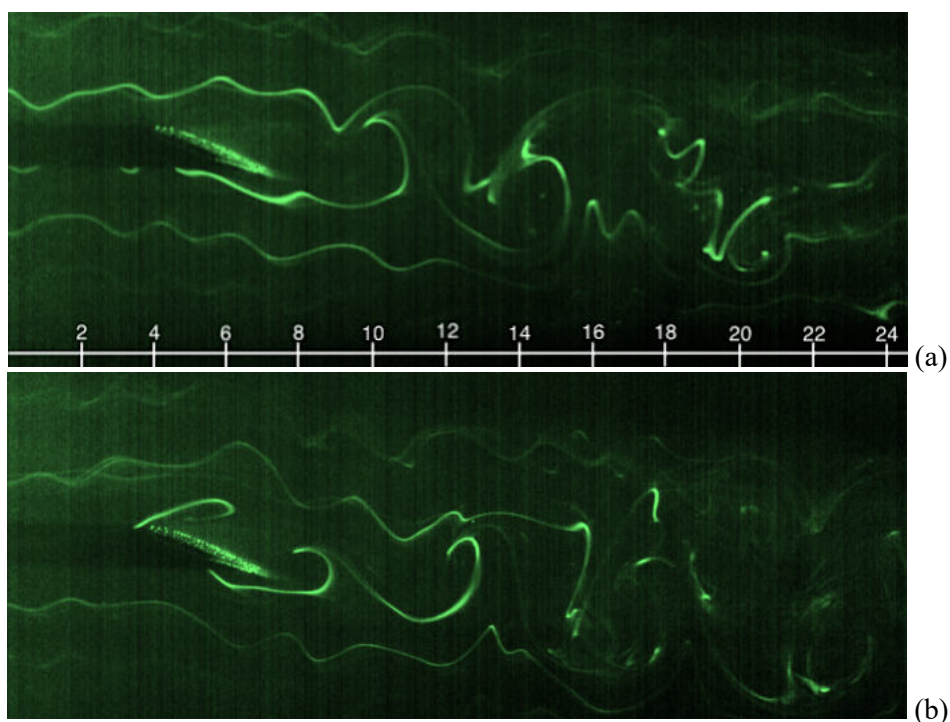
Obr. 4.17 Řez 1, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 1400$ .



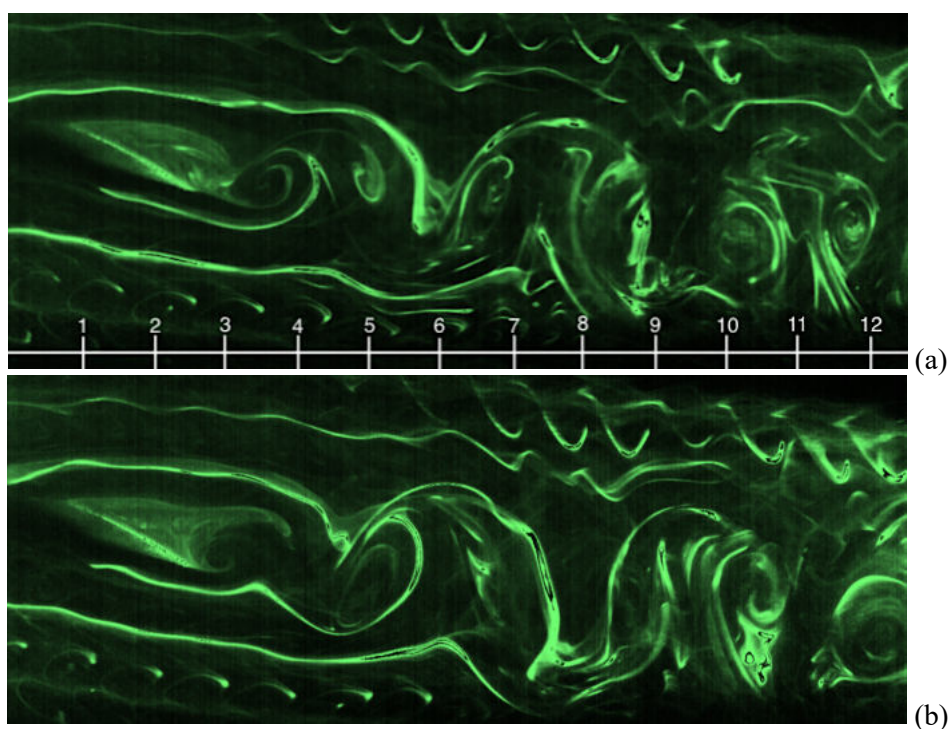
Obr. 4.18 Řez 2, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 1400$ .

Při  $Re = 1400$  je již stezka za tělesem oproti předchozímu měření (stejný úhel náběhu,  $Re = 700$ ) více rozvířená. Stále je však vidět tendence tvoření Kármánovy vírové stezky. Na obou řezech lze pozorovat podobnou rozteč mezi odtrhávanými víry.

### Úhel náběhu $20^\circ$ , $Re = 700$



Obr. 4.19 Řez 1, úhel náběhu  $20^\circ$ ,  $Re = 700$ .

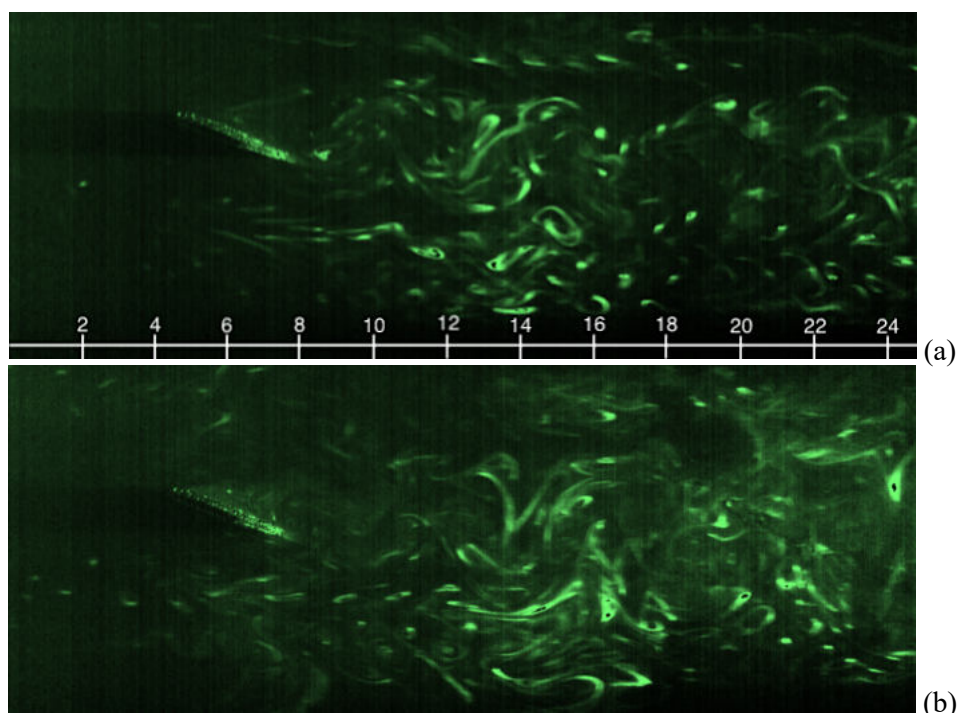


Obr. 4.20 Řez 2, úhel náběhu  $20^\circ$ ,  $Re = 700$ .

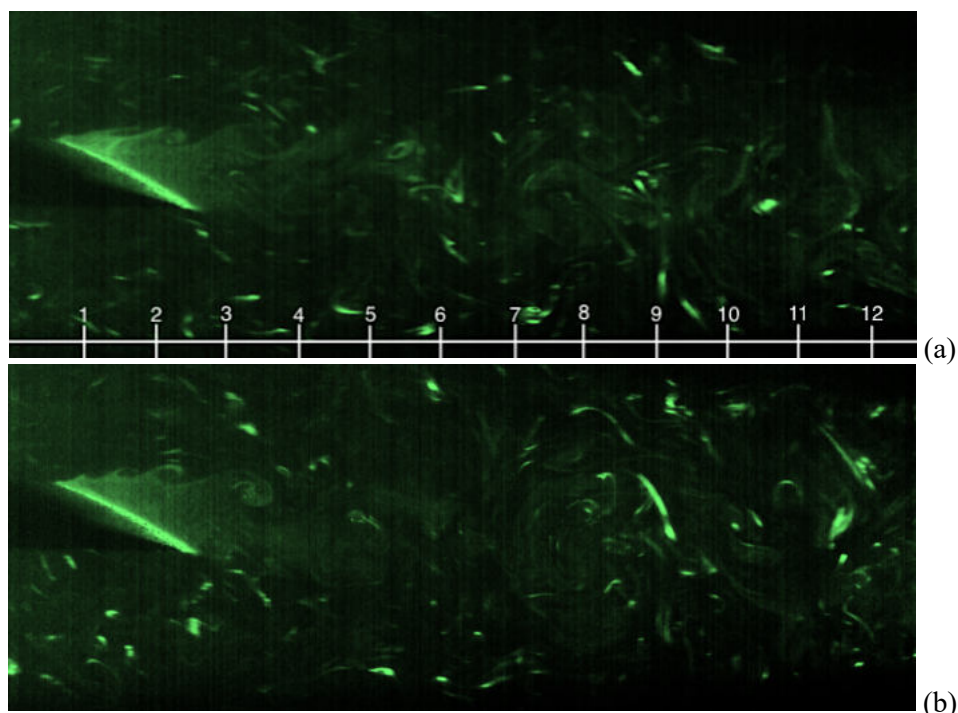
Hodnota  $\alpha = 20^\circ$  je za hranicí kritického úhlu náběhu. Z výsledku experimentu lze pozorovat očekávané odtržení mezní vrstvy již za náběžnou hranou, a to pro oba řezy. Při této hodnotě úhlu náběhu letadlo ztrácí vztlak a aerodynamika letu přestane fungovat. Ovlivněná oblast za profilem je u obou řezů podobná, avšak frekvence odtrhávání vírů je v prvním řezu nižší.



### Úhel náběhu $20^\circ$ , $Re = 1400$



Obr. 4.21 Řez 1, úhel náběhu  $20^\circ$ ,  $Re = 1400$ .



Obr. 4.22 Řez 2, úhel náběhu  $20^\circ$ ,  $Re = 1400$ .

Při hodnotě  $Re = 1400$  lze za aerodynamickým profilem pozorovat chaotický úplav. Ten je také ovlivněn úhlem náběhu, který je za kritickou hodnotou. Již od náběžné hrany lze u obou řezů pozorovat odtržení mezní vrstvy (nejlépe viditelné na obr. 4.22 (b)). Úplav není tolik zřetelný, protože elektrolyza není schopná produkovat dostatek elektrochemického kouře.

## 4.7 Diskuze výsledků

Při měření úplavu za aerodynamickým profilem s nulovým úhlem náběhu byl podle očekávání zaznamenán úplav s nejhladším průběhem. Kolem geometrie profilu bylo možné pozorovat očekávané přilnutí proudu. Při měření s úhlem náběhu  $10^\circ$  bylo možné pozorovat větší ovlivnění proudu za profilem a také odtržení proudu nedaleko odtokové hrany, tedy na konci profilu. Experiment s náběhovým úhlem  $20^\circ$  byl navržen k pozorování chování úplavu při hodnotách  $\alpha$  za kritickou hodnotou. Ze zachycených snímků lze pozorovat odtržení mezní vrstvy nedaleko za náběhovou hranou. Takto velmi brzké odtržení mezní vrstvy je nežádoucí efekt při létání a mohlo by být příčinou katastrofy.

Při  $Re = 1400$  lze proti měření s  $Re = 700$  pozorovat rychleji rotující víry. Tento trend se opakoval pro všechny testované úhly náběhu.

Při stejné charakteristice proudění pro různé řezy se nedá pozorovat velký rozdíl ve výsledcích. To se dalo předpokládat z důvodu rozdílu jednotlivých charakteristických rozměrů v řádech několika milimetrů.

V roce 2014 byl proveden obdobný experiment studentem navazujícího studia Sarweshem Parbatem z Pittsburské univerzity v Pensylvánii. Jeho experiment byl prováděn také ve vodě, avšak za použití vizualizační metody pomocí barviva.



Obr. 4.23 Stezka při obtékání aerodynamického profilu s nulovým úhlem náběhu [16].

Měření z Pittsburské univerzity lze porovnávat s prvním a druhým měření v této práci ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $Re = 700$  a  $Re = 1400$ ), při kterém se proudnice v úplavu začínají zalamovat. Při postupném zvyšování Reynoldsova čísla lze očekávat naměření stejných výsledků (obr. 4.23), které naměřil Parbat.

## 5 Závěr

Cílem práce bylo seznámit se s jevy, které nastávají za tělesy při jejich pohybu v tekutinách. V experimentální části bylo cílem vizualizovat úplav za aerodynamickým profilem pomocí metody cínových iontů. Dále byla úkolem příprava, vyhodnocení a diskuze výsledků tohoto experimentu.

Díky tomu, že zařízení a konstrukce nutná k provedení tohoto experimentu již byla v minulosti použita, bylo nutné provést jen pár změn k uzpůsobení stávající konstrukce k potřebám tohoto měření. Jednalo se o rám na připevnění laseru a malého zrcadla, které sloužilo k přesnému namíření laserového řezu. Tento řez sloužil k osvětlení kýžené vizualizační roviny. Možnost sledovat úplav byla díky metodě cínových iontů. Tato metoda na základě elektrolýzy vytváří elektrochemický kouř z cínového drátu umístěného před model. Z hlediska konstrukce bylo nutné přidělat rameno na upevnění vysokorychlostní kamery. Samotná konstrukce sloužící k připevnění modelu k rámu vyžadovala výrobu přípravku na upevnění plastového modelu a také vpletení cínového drátu. Také bylo zapotřebí v 3D konstrukčním programu upravit model křídla a vyrobit ho na 3D tiskárně.

Původně byla do konstrukce k upevnění modelu na rám navržena síť za účelem rušení proudu před profilem. Síť se však po sérii zkušebních experimentů musela sundat, protože její koroze zabarvila tažnou nádrž a znemožnila vizualizaci. Aby se síť při experimentu dala použít, musela by se absolutně odizolovat od cínového drátu, což je prakticky nemožné. Návrh pro budoucí měření by byl použit síť z nevodivého materiálu, například plastu. V tomto experimentu byl k rušení proudu použit pouze cínový drát, který byl rovněž zdrojem elektrochemického kouře.

Použití rychloběžné kamery s ovládáním softwarem z počítače se jevilo jako vyhovující řešení. Bylo totiž zamezeno zasahování do konstrukce a přenášení vibrací při mačkání spouště za předpokladu použití klasického zrcadlového fotoaparátu.

V samostatném experimentu byla provedena série 12 měření. Pro každý z dvou řezů byla provedena vizualizace pro dvě Reynoldsova čísla (700, 1400) a pro tři úhly náběhu ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ). Při hodnotě úhlu náběhu za kritickou hodnotou  $18^\circ$  se dalo pozorovat očekávané odtržení mezní vrstvy pro měření s  $Re = 700$  i  $Re = 1400$ . Nejméně ovlivněná oblast za profilem byla při měření s  $\alpha = 0^\circ$ . Rozdíl mezi jednotlivými řezy se stejnou charakteristikou proudění (stejně  $Re$  a  $\alpha$ ) se dal pozorovat na rozdílné frekvenci odtrhávání vírů, avšak jen nepatrně. Tento výsledek se očekával z důvodu malého rozdílu charakteristických rozměrů profilů v jednotlivých řezech.

V závěru této práce bylo provedeno podrobnější vyhodnocení měření. Výsledky se shodují s dříve publikovanými výsledky jiných autorů.

Další experiment s aerodynamickým profilem by bylo vhodné provést ve vzduchu v aerodynamickém tunelu, což je zamýšleno provést v diplomové práci.

## Seznam literatury

- [1] SCHLICHTING, Hermann. *Boundary-Layer Theory*. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1979. ISBN 0-07-055334-3.
- [2] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-7204-659-1.
- [3] Simscale [online]. [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-laminar-flow/>
- [4] Aerospace Engineering [online]. [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://aerospaceengineeringblog.com>
- [5] URUBA, Václav. *Turbulence*. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05600-4.
- [6] BROŽ, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02347-8.
- [7] EPPLER, Richard. *Airfoil Design and Data*. Springer-Verlag, 1990.
- [8] ANDERSON, J. D. *Fundamentals of Aerodynamics*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [9] Dušan Slavětínský: O letadlech [online]. [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/Konstrukcekridla.aspx>
- [10] ICTS-CEHIPAR [online]. [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.inta.es/ICTS-CEHIPAR/en>
- [11] Marin [online]. [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.marin.nl>
- [12] VAVRLA, Zdenek. *Vizualizace proudění*, Vysoké učení technické v Brně, 2011.
- [13] Ústav termomechaniky AV ČR [online]. [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/modelovani/cesky/metody/lda.htm>.
- [14] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*. Vydání šesté. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-272-3.
- [15] LIŠOVÁ, HANA. *Návrh a konstrukce tažné nádrže*, Technická univerzita v Liberci, 2008.
- [16] Sarwesh Parbat In: Youtube [online]. 06.06.2014 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=k9FPxuhFITo>. Kanál uživatele Sarwesh Narayan Parbat.

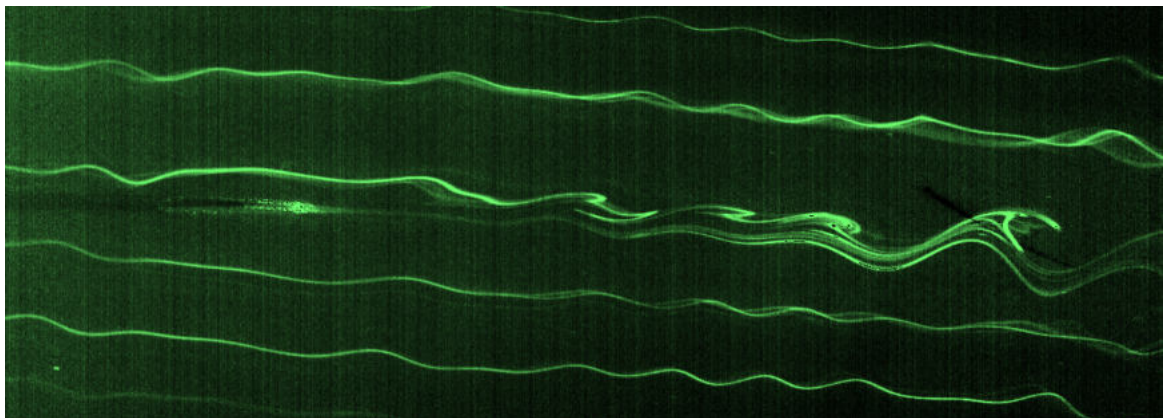
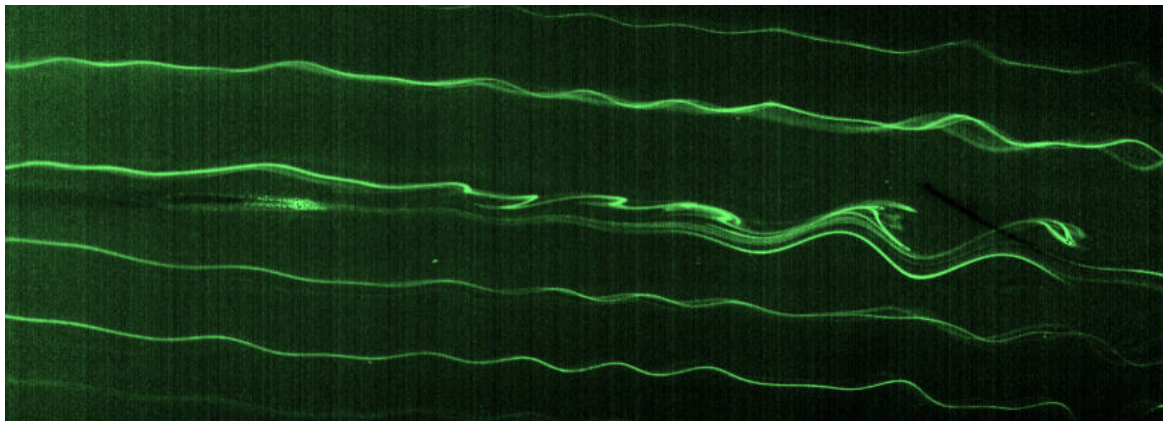
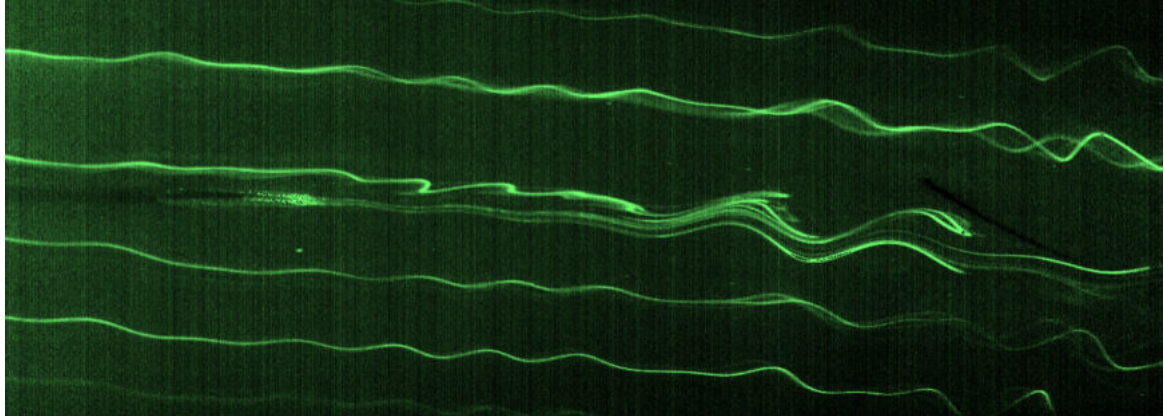
## **Seznam příloh**

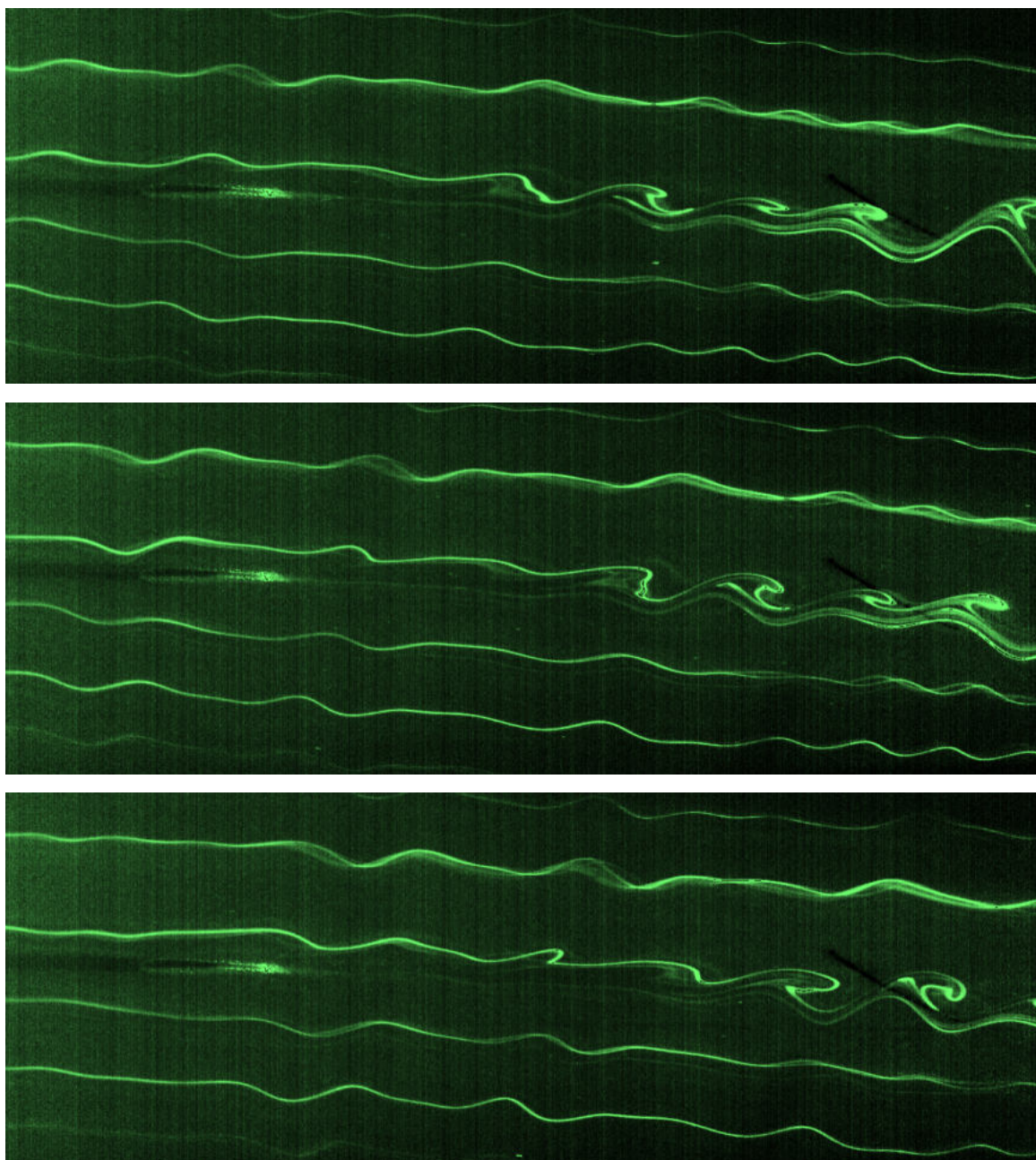
**Příloha 1: Experimentální měření**

**Příloha 2: Použitá zařízení**

## Příloha 1: Experimentální měření

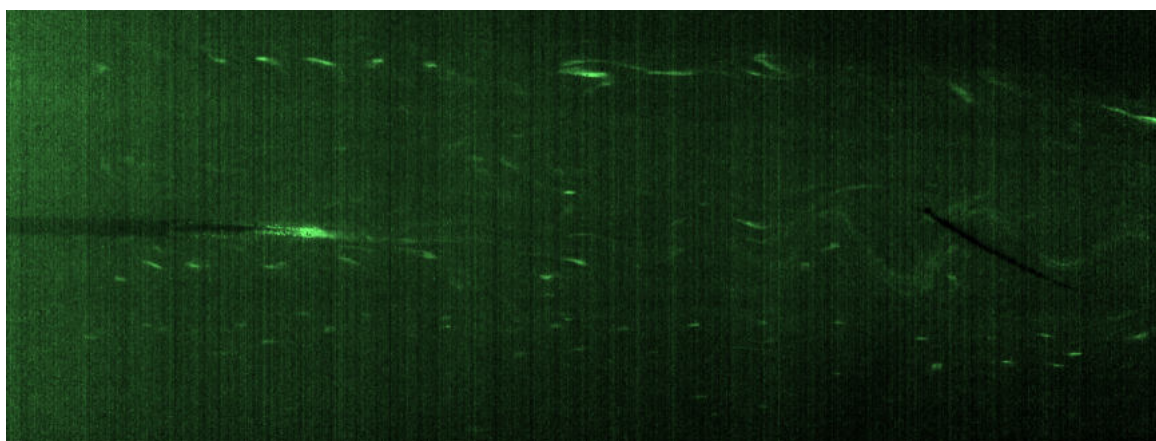
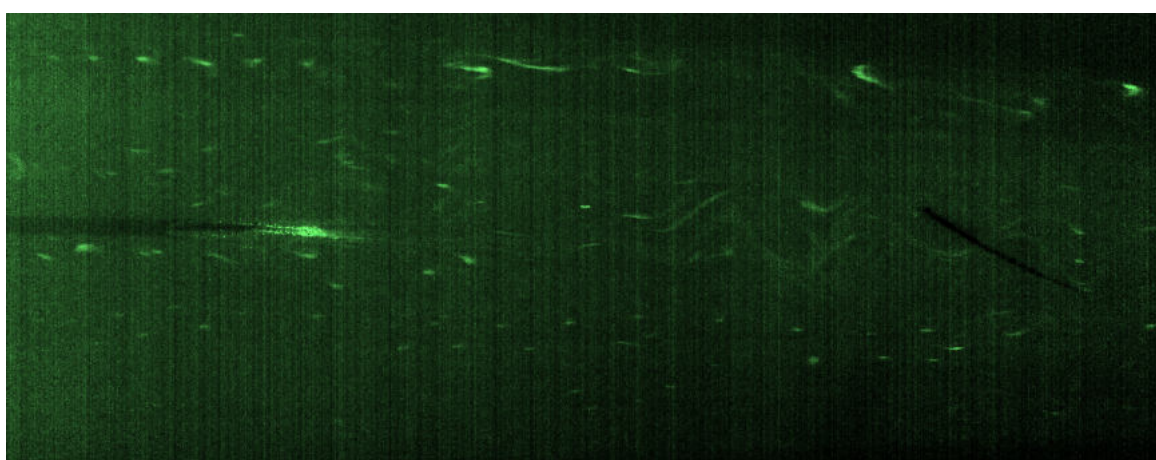
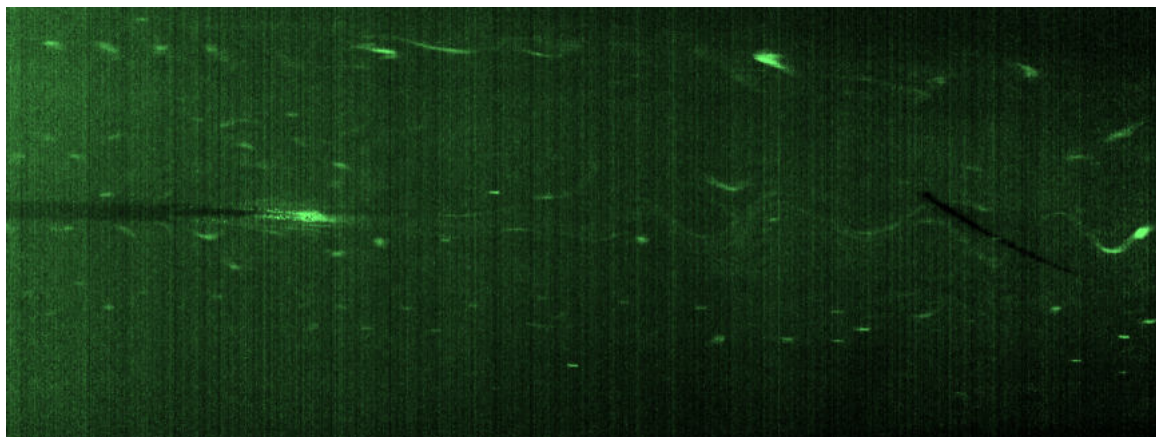
Řez 1, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 700$



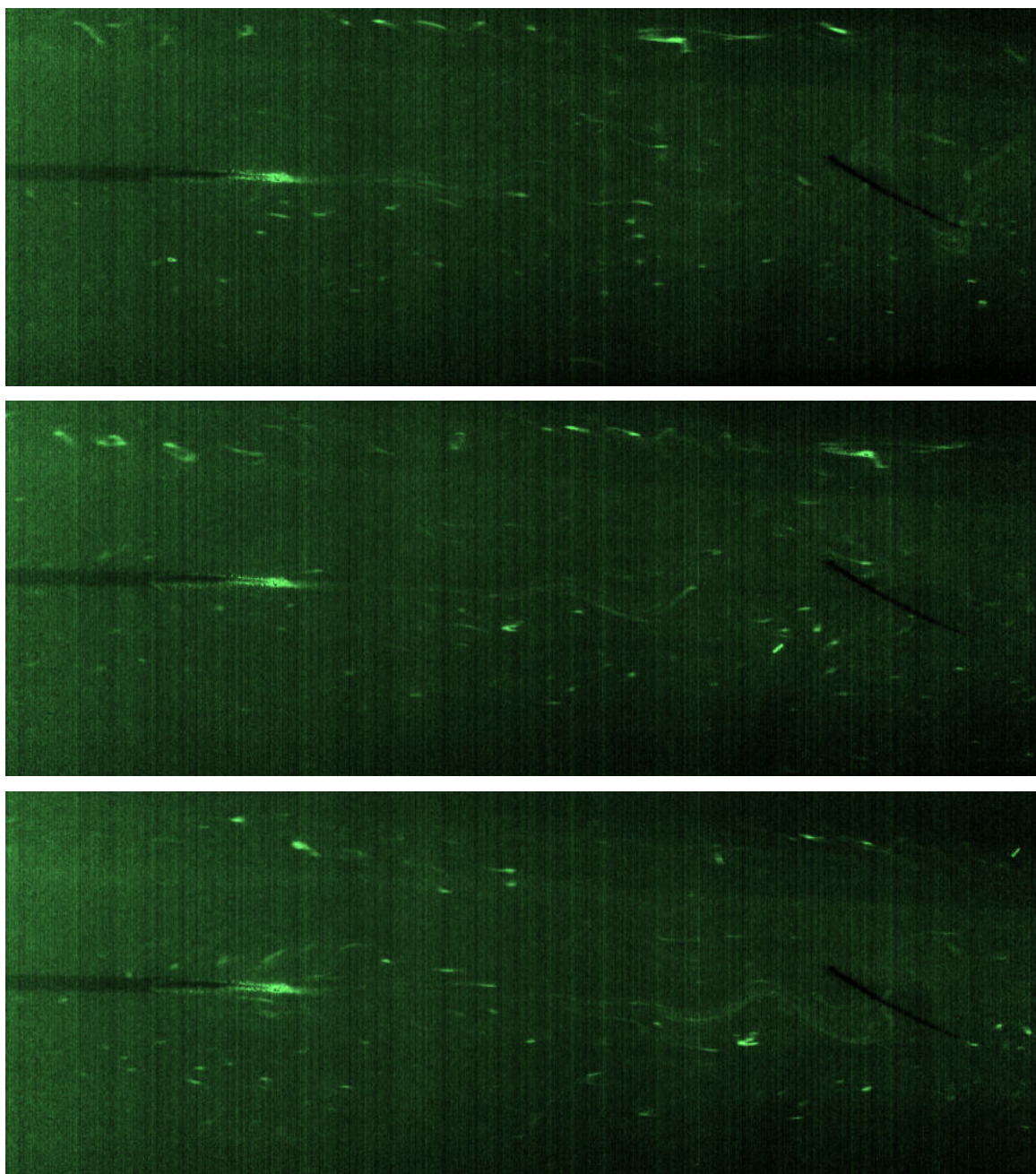


Obr. 5.1 Řez 1, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 700$ .

Řez 1, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 1400$

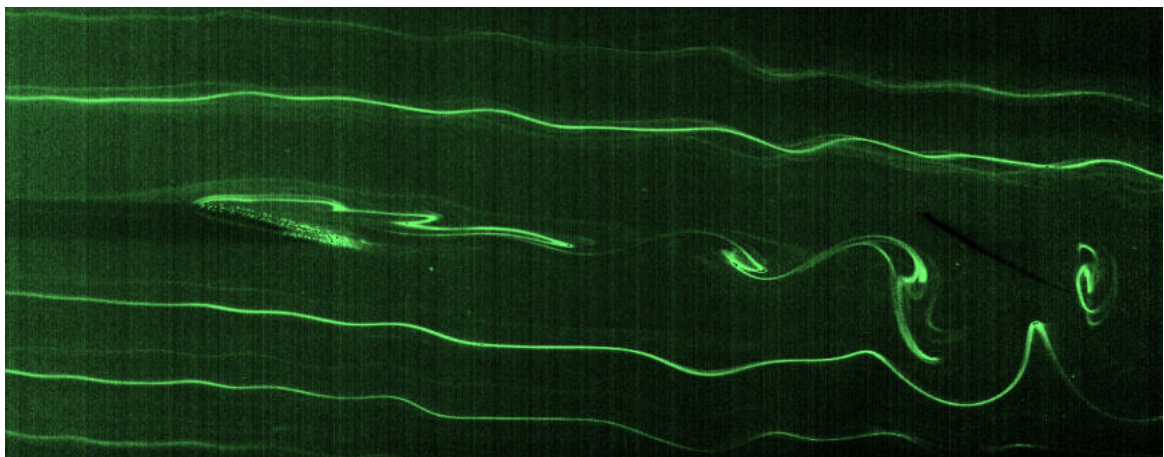
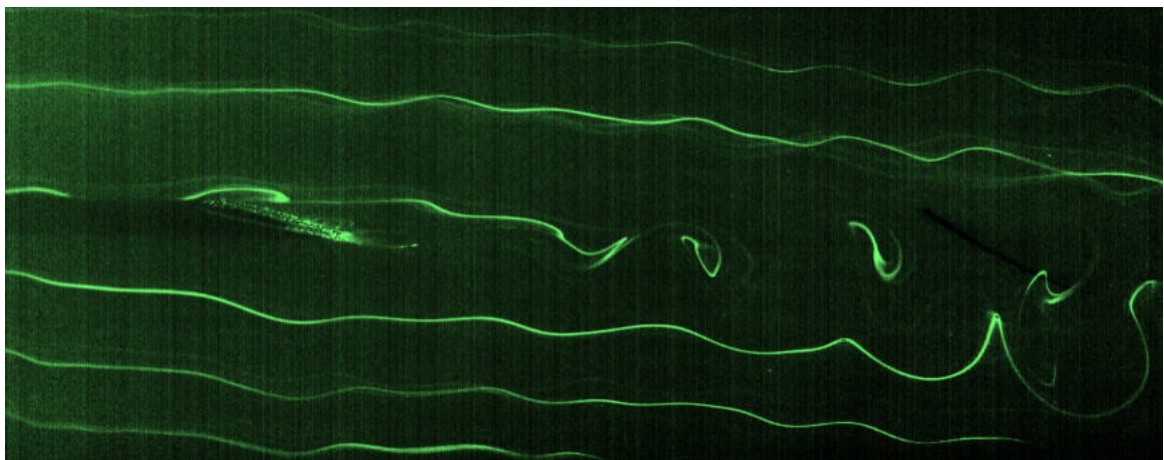
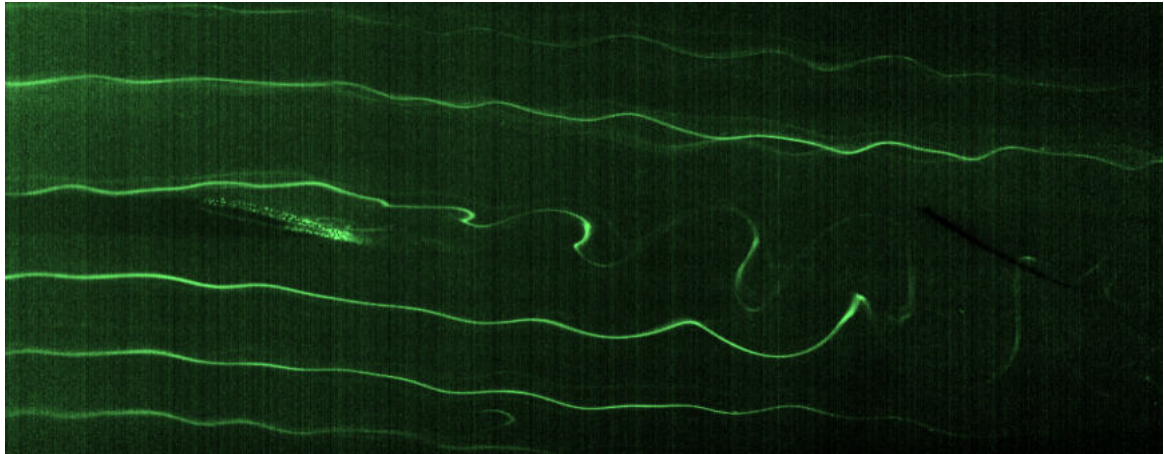


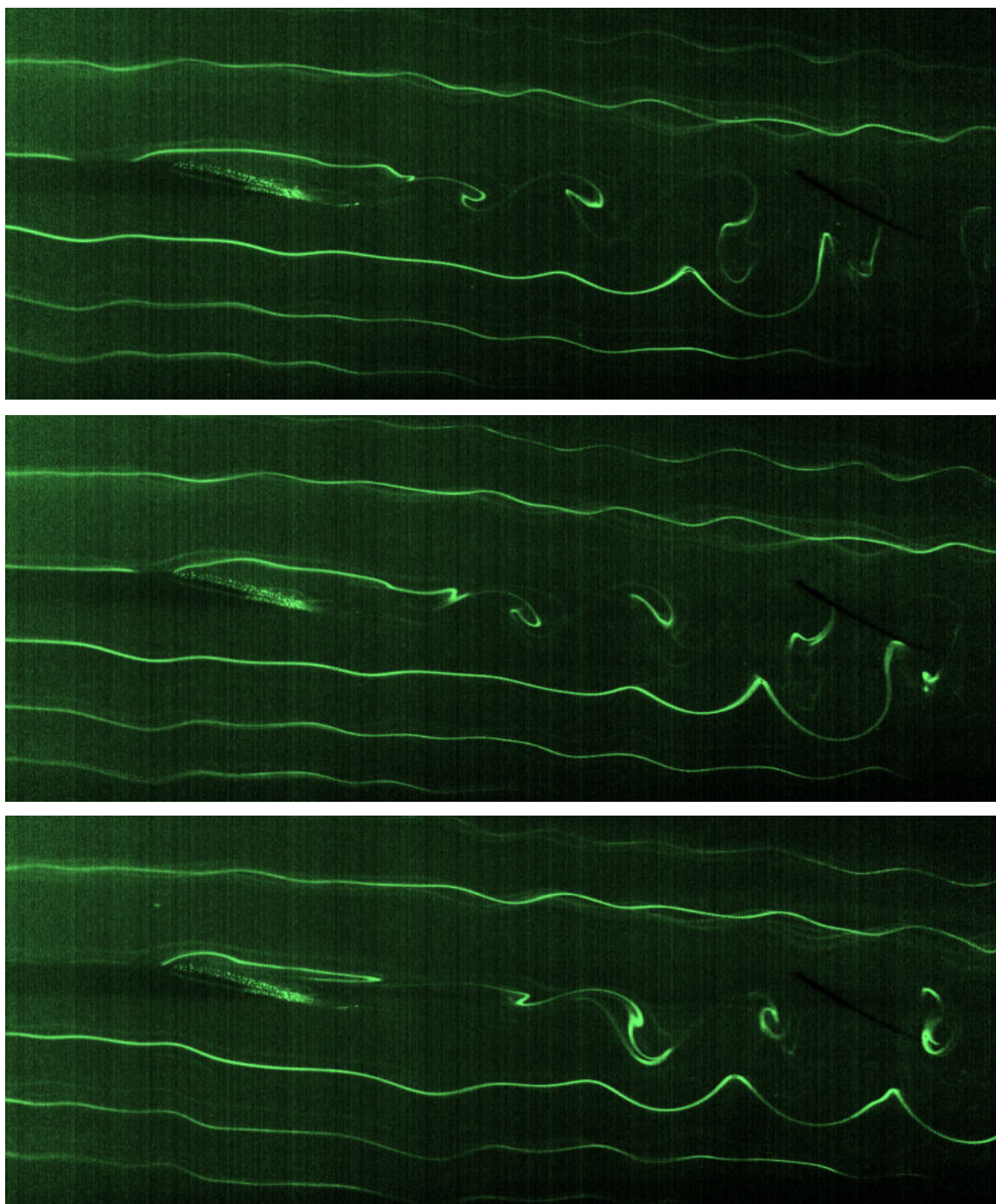




Obr. 5.2 Řez 1, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 1400$ .

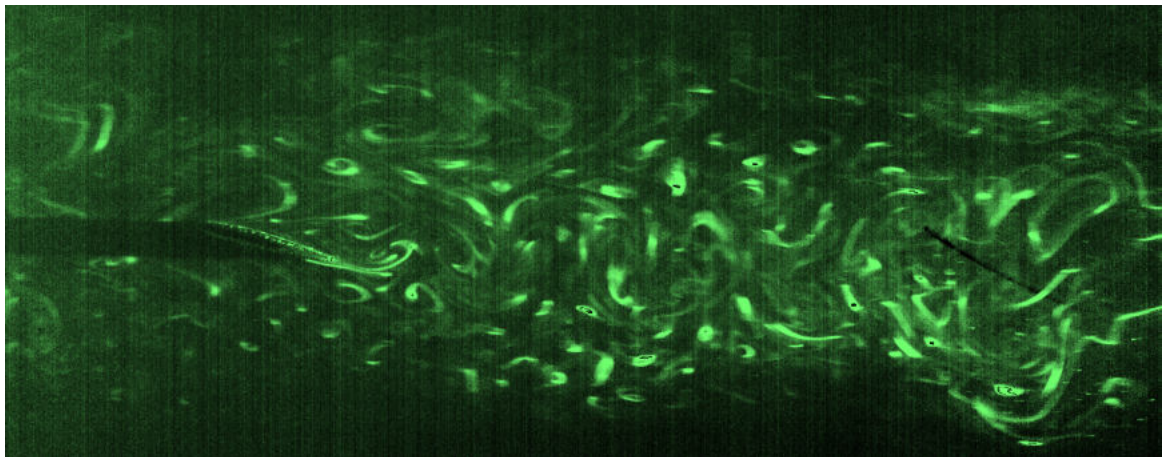
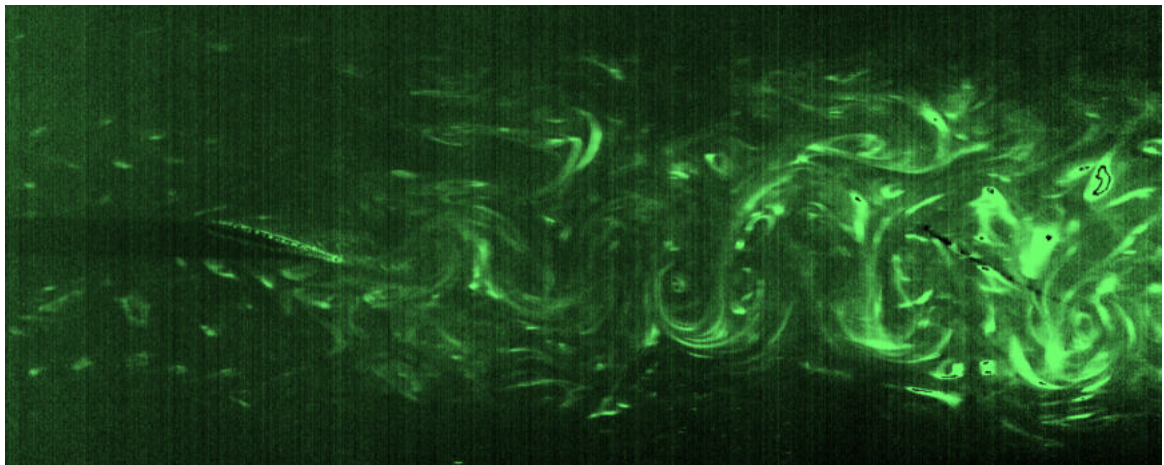
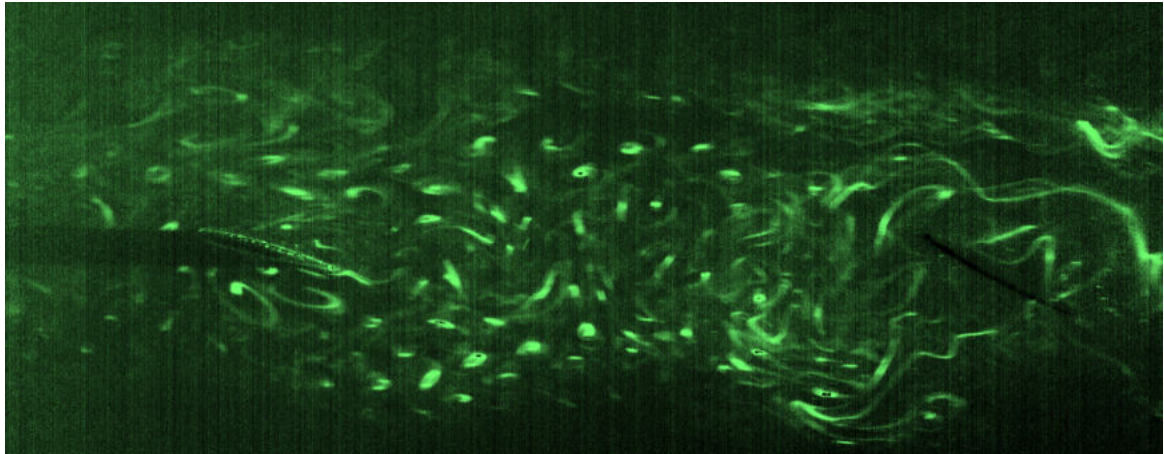
Řez 1, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 700$

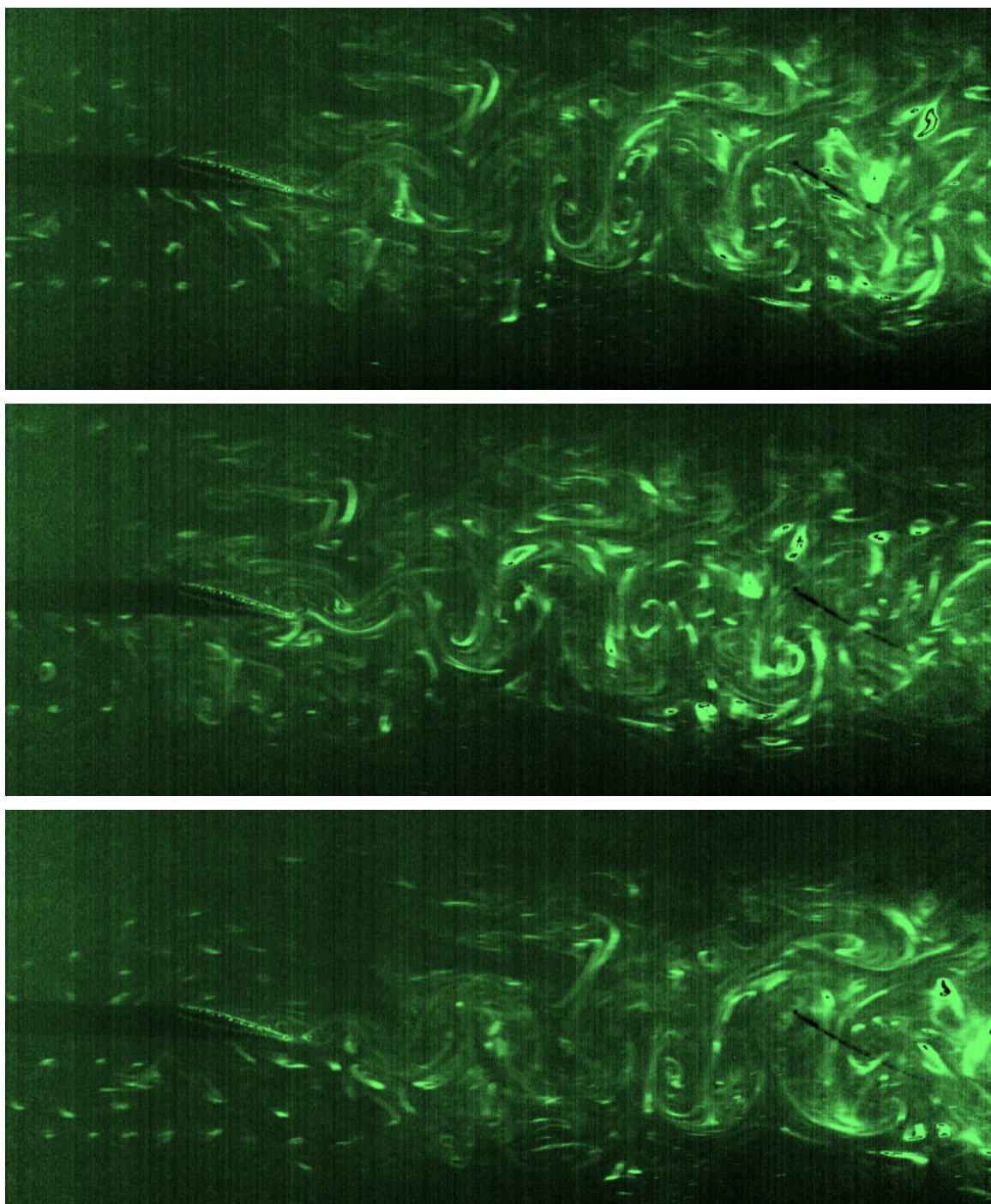




Obr. 5.3 Řez 1, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 700$ .

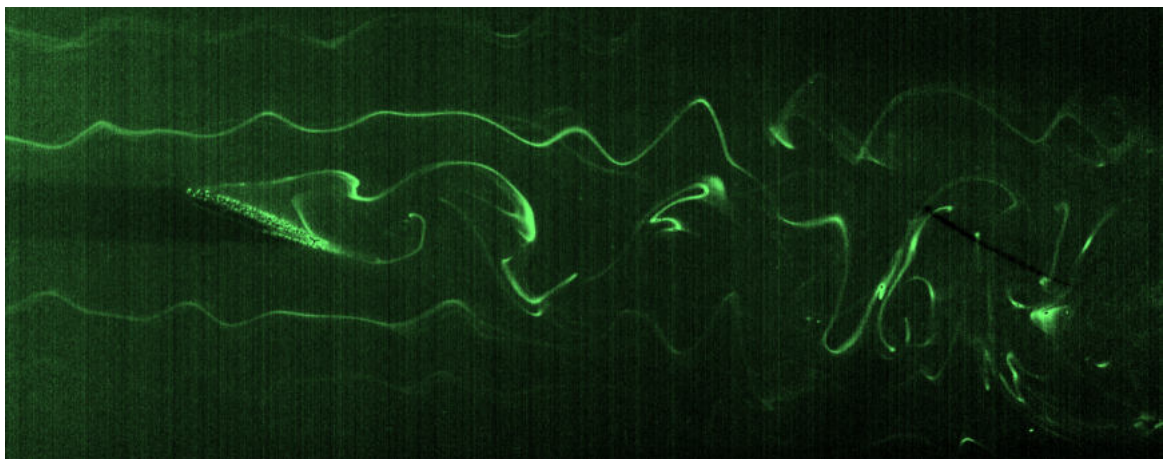
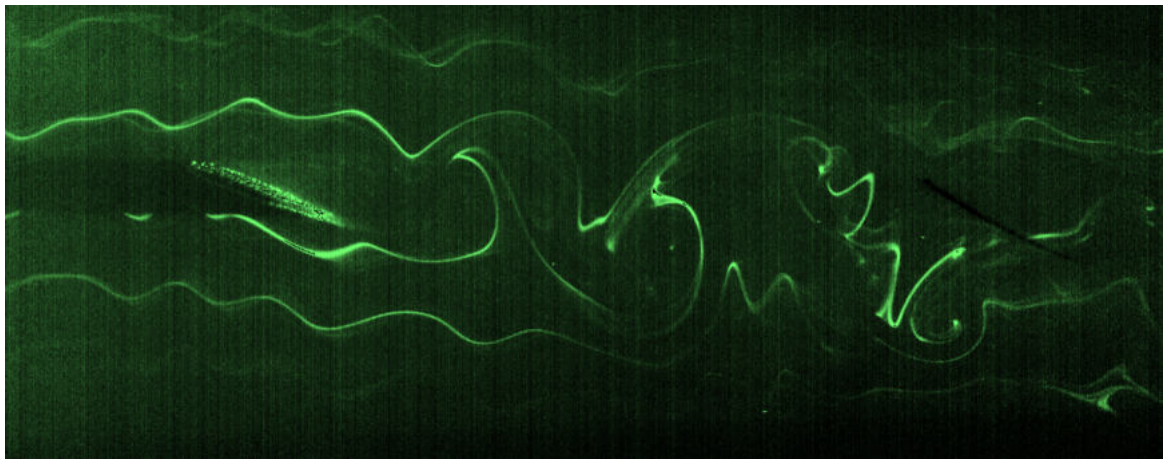
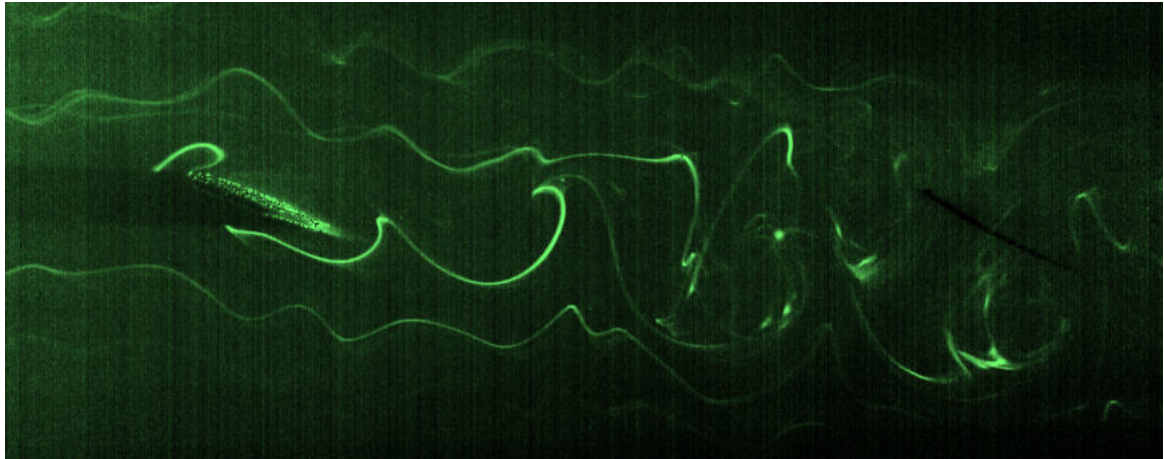
Řez 1, úhel náběhu 10°, Re = 1400

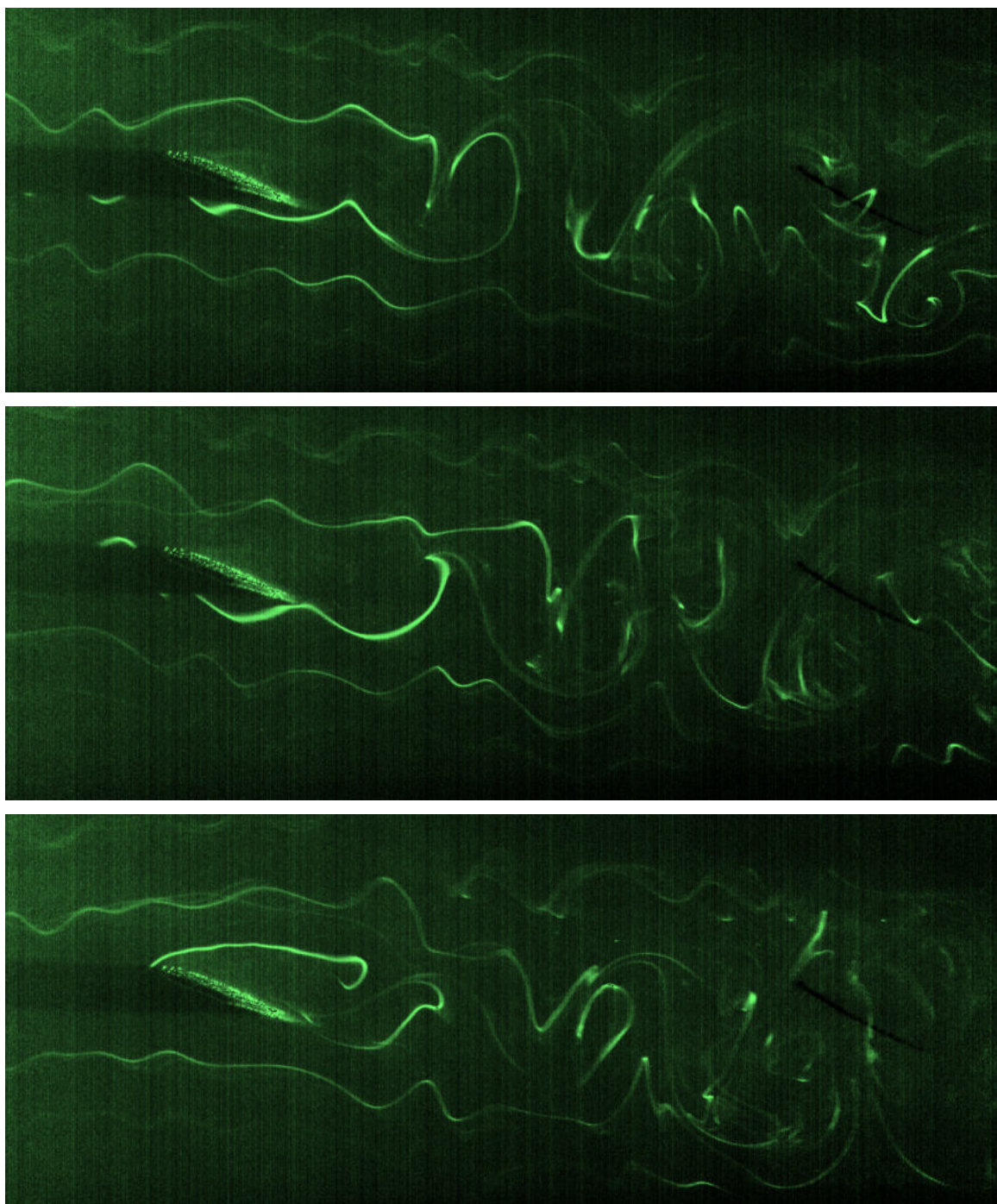




Obr. 5.4 Řez 1, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 1400$ .

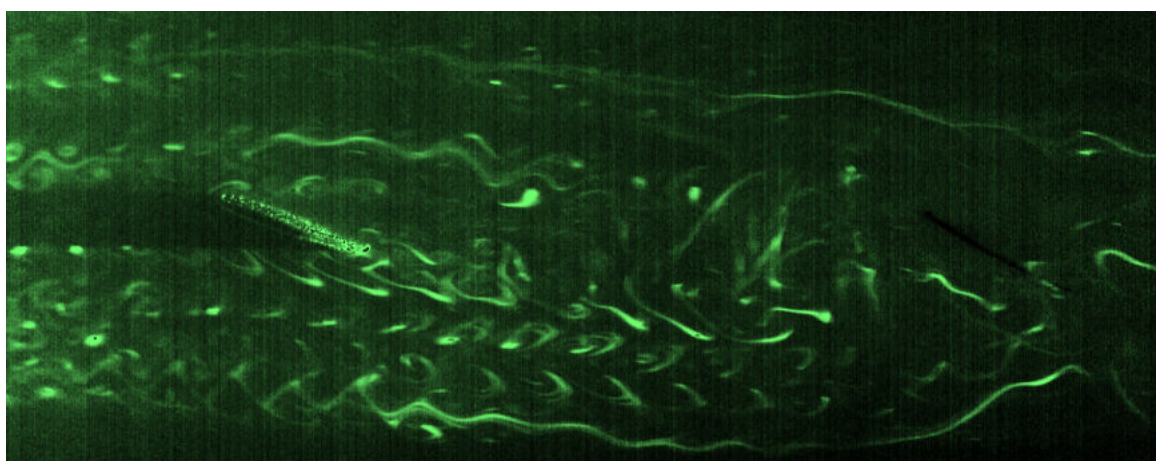
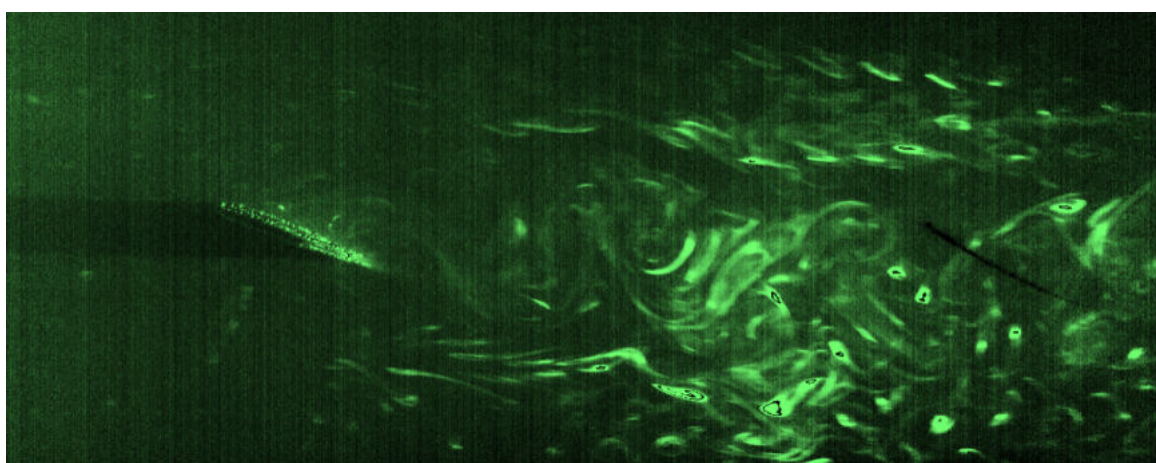
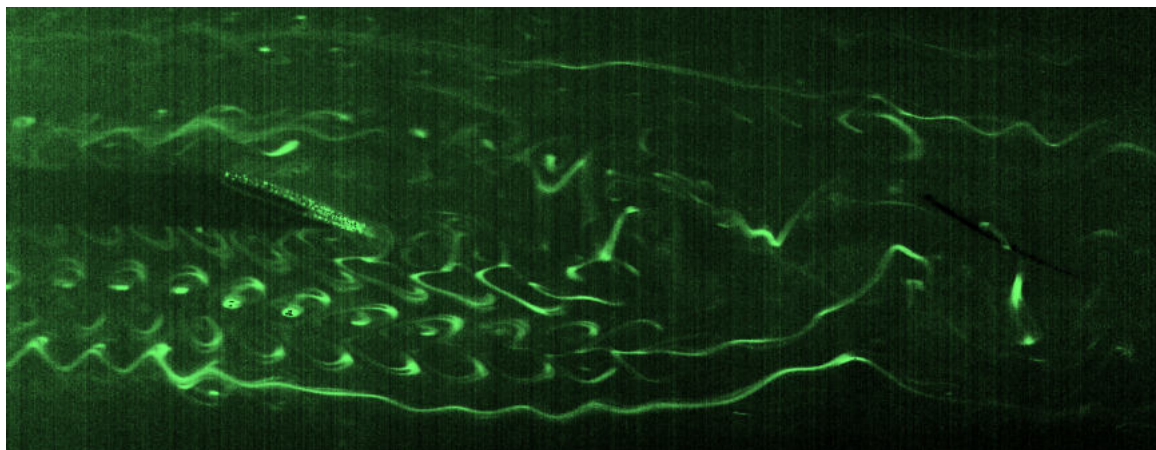
Řez 1, úhel náběhu 20°, Re = 700



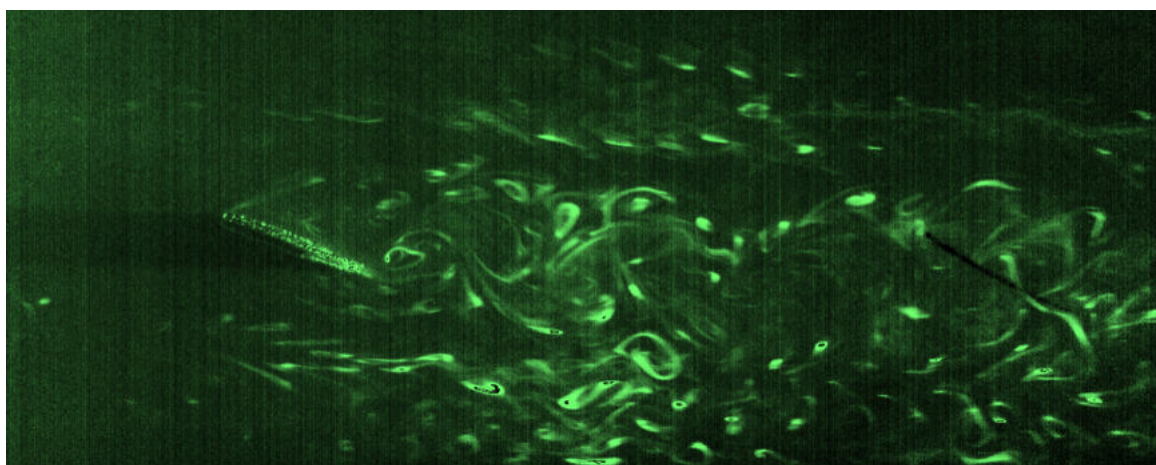
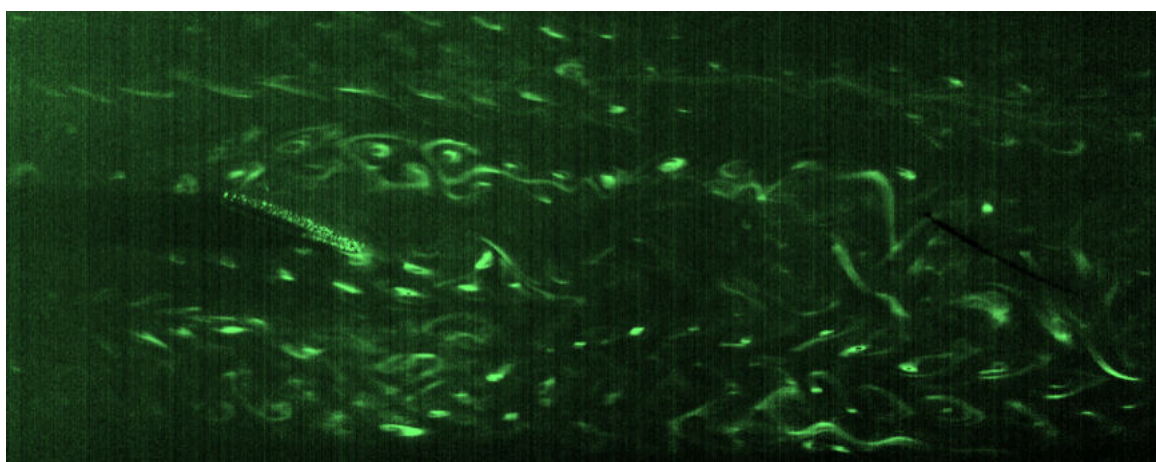
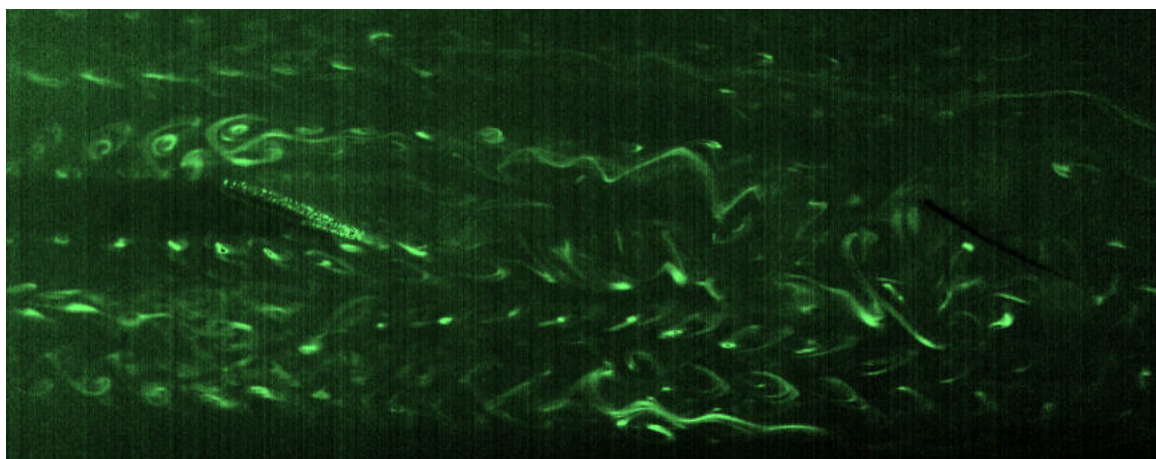


Obr. 5.5 Řez 1, úhel náběhu 20°, Re = 700.

Řez 1, úhel náběhu 20°, Re = 1400

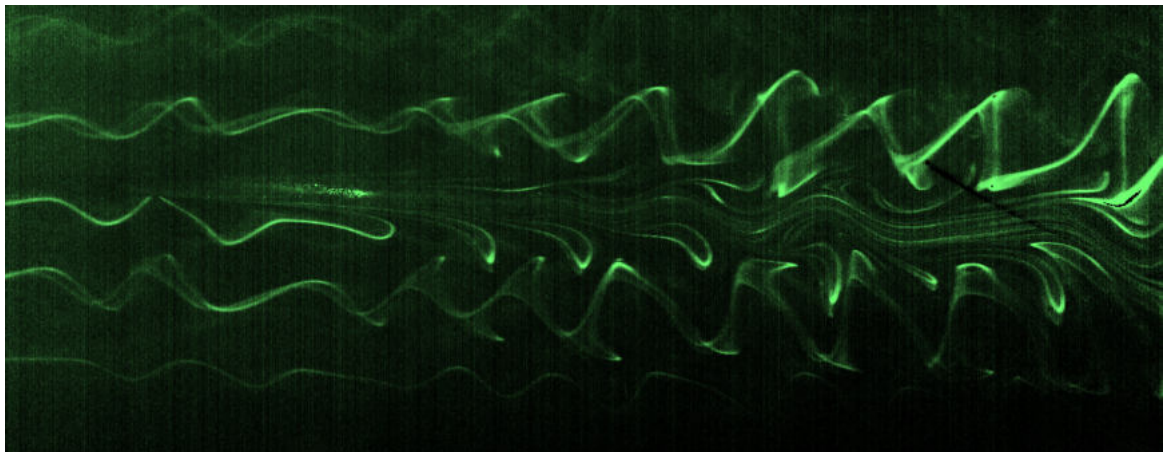
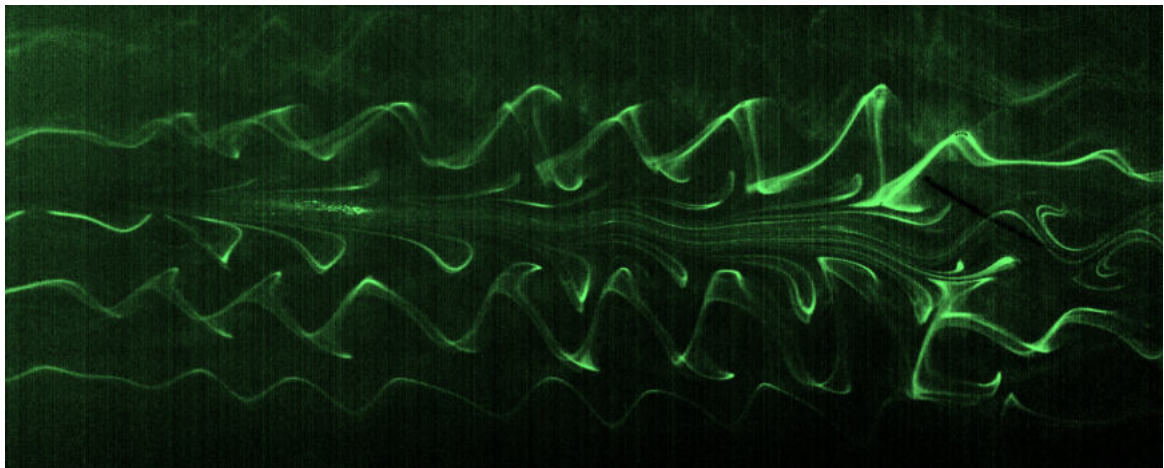
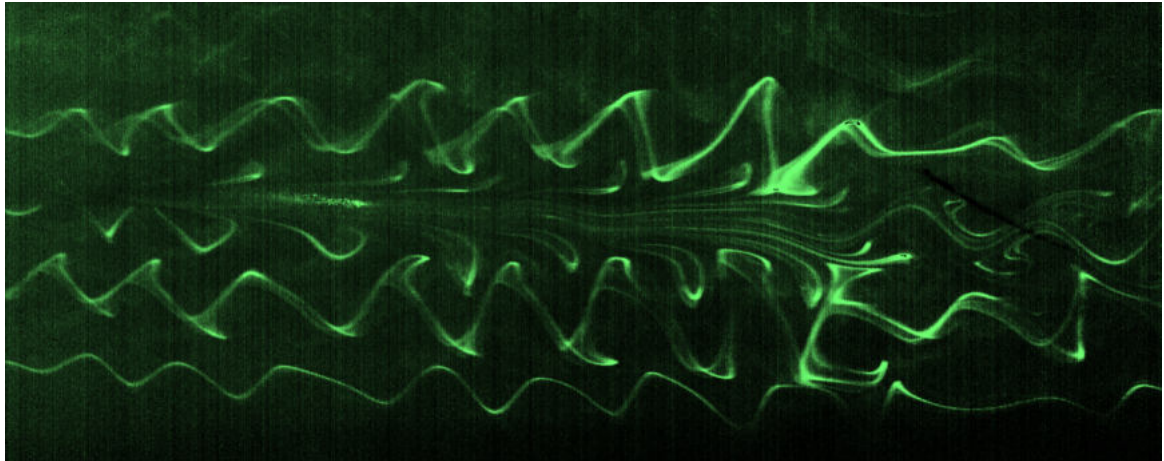


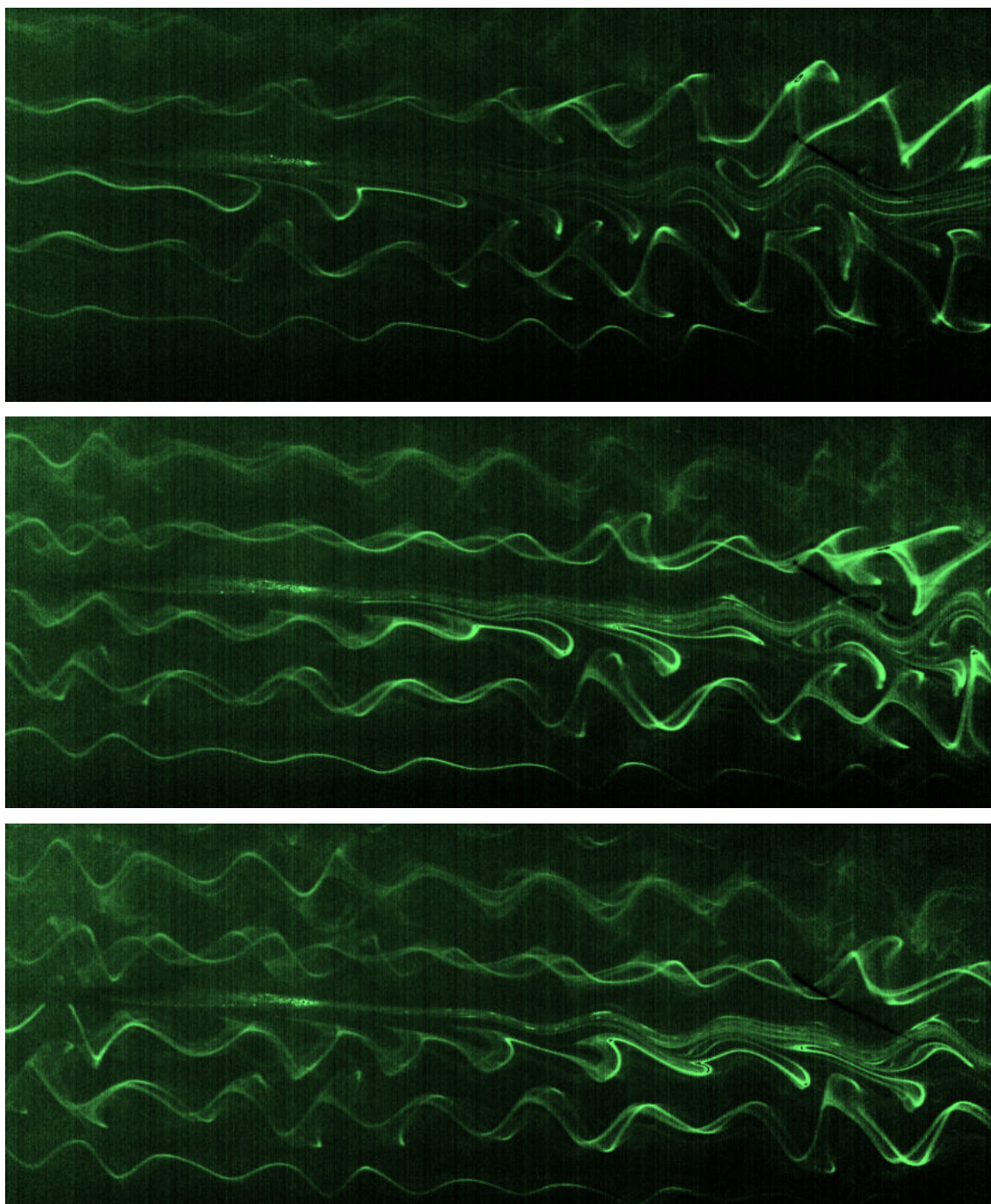




Obr. 5.6 Řez 1, úhel náběhu 20°, Re = 1400.

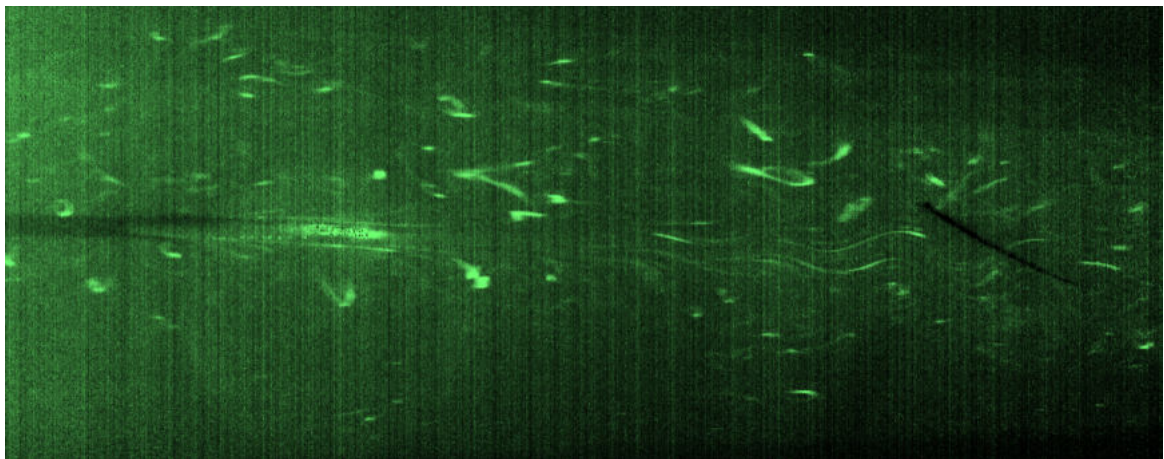
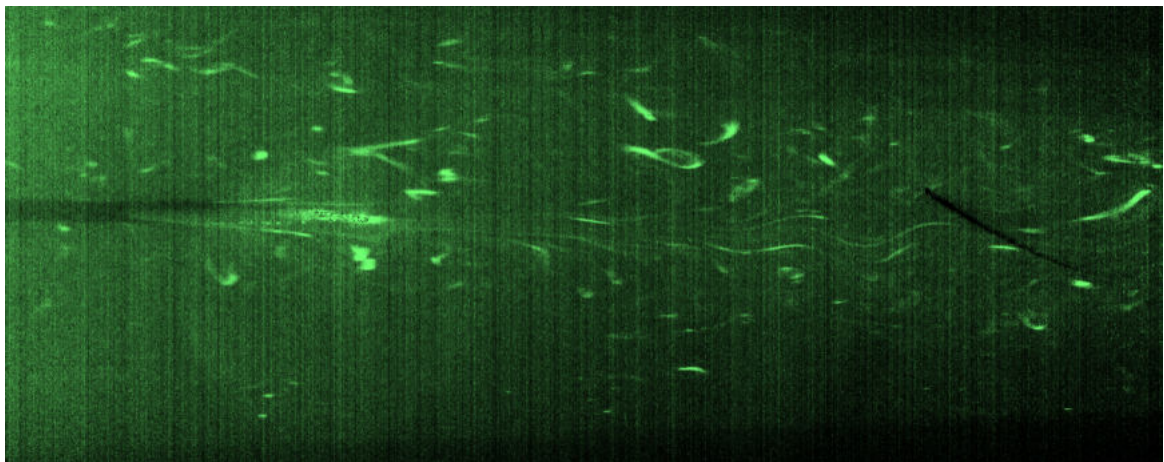
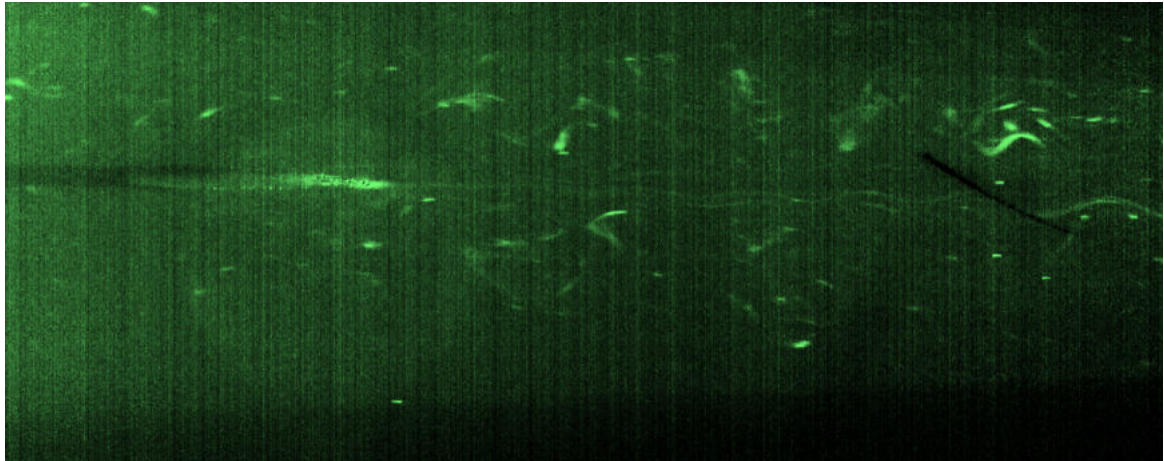
Řez 2, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 700$

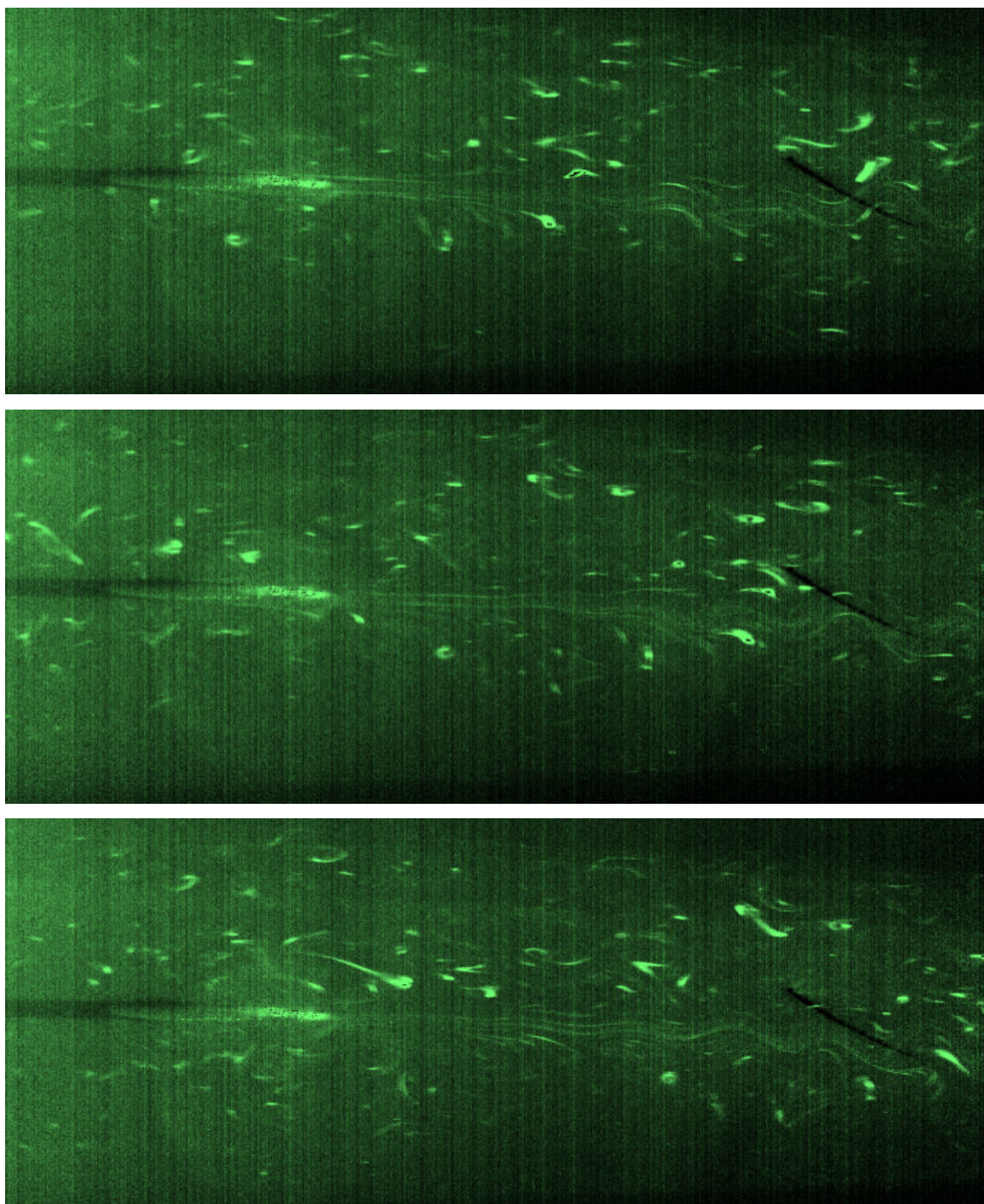




Obr. 5.7 Řez 2, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 700$ .

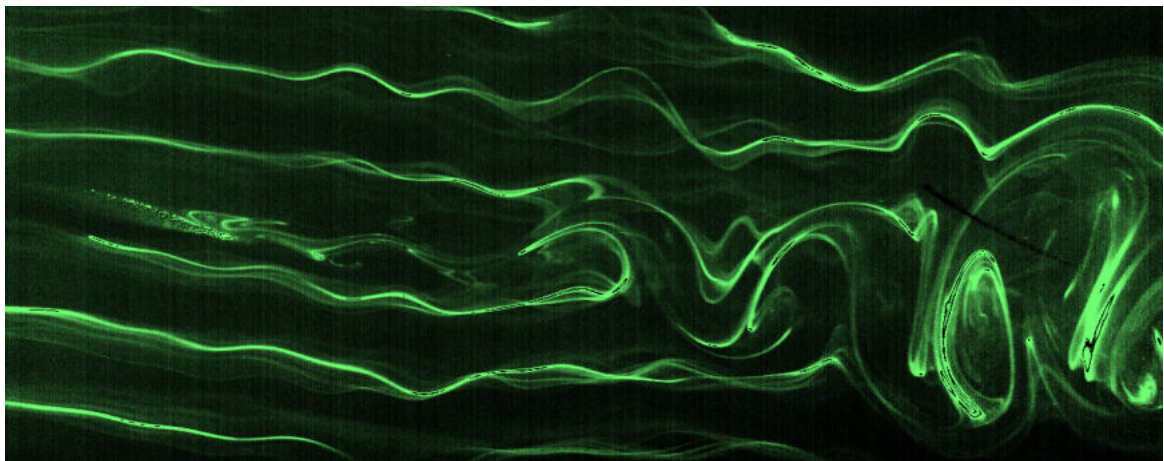
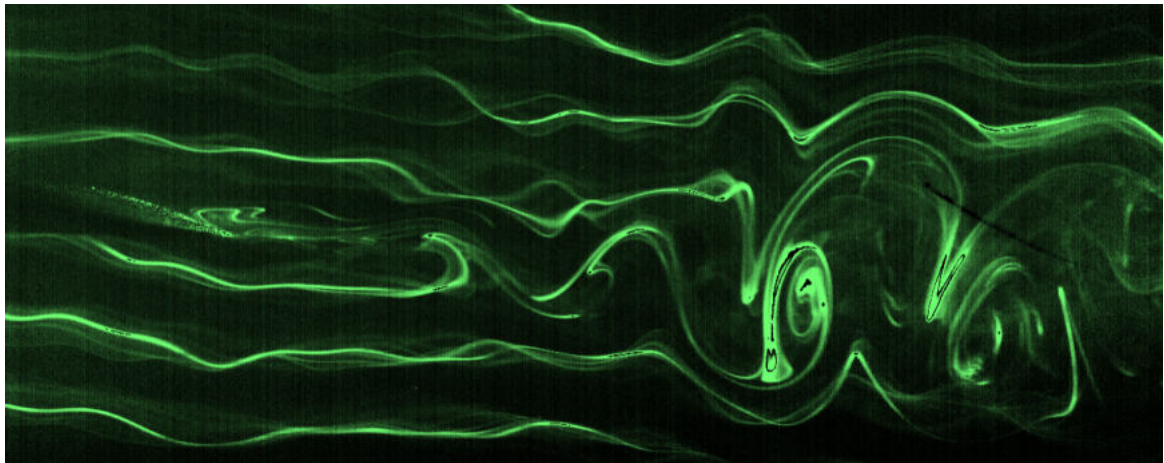
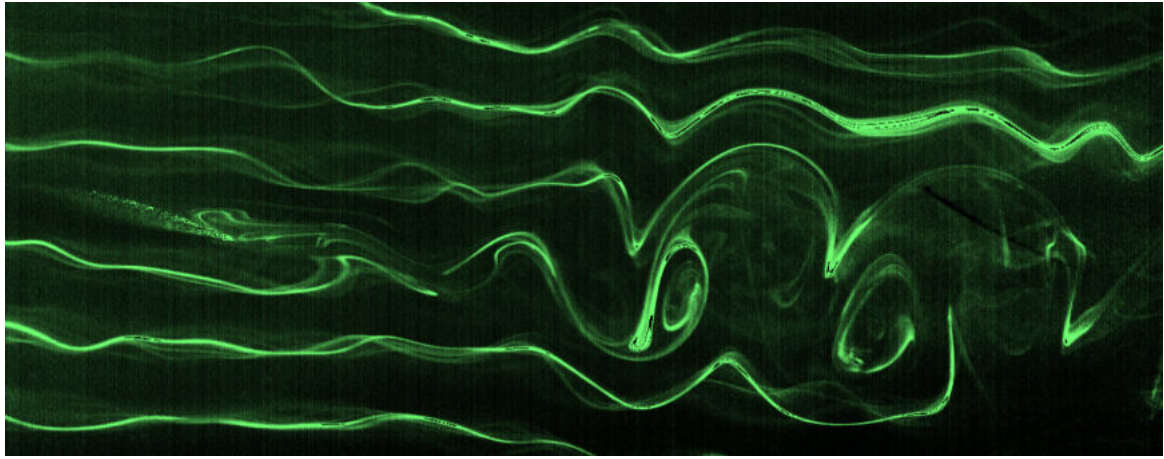
Řez 2, úhel náběhu 0°, Re = 1400

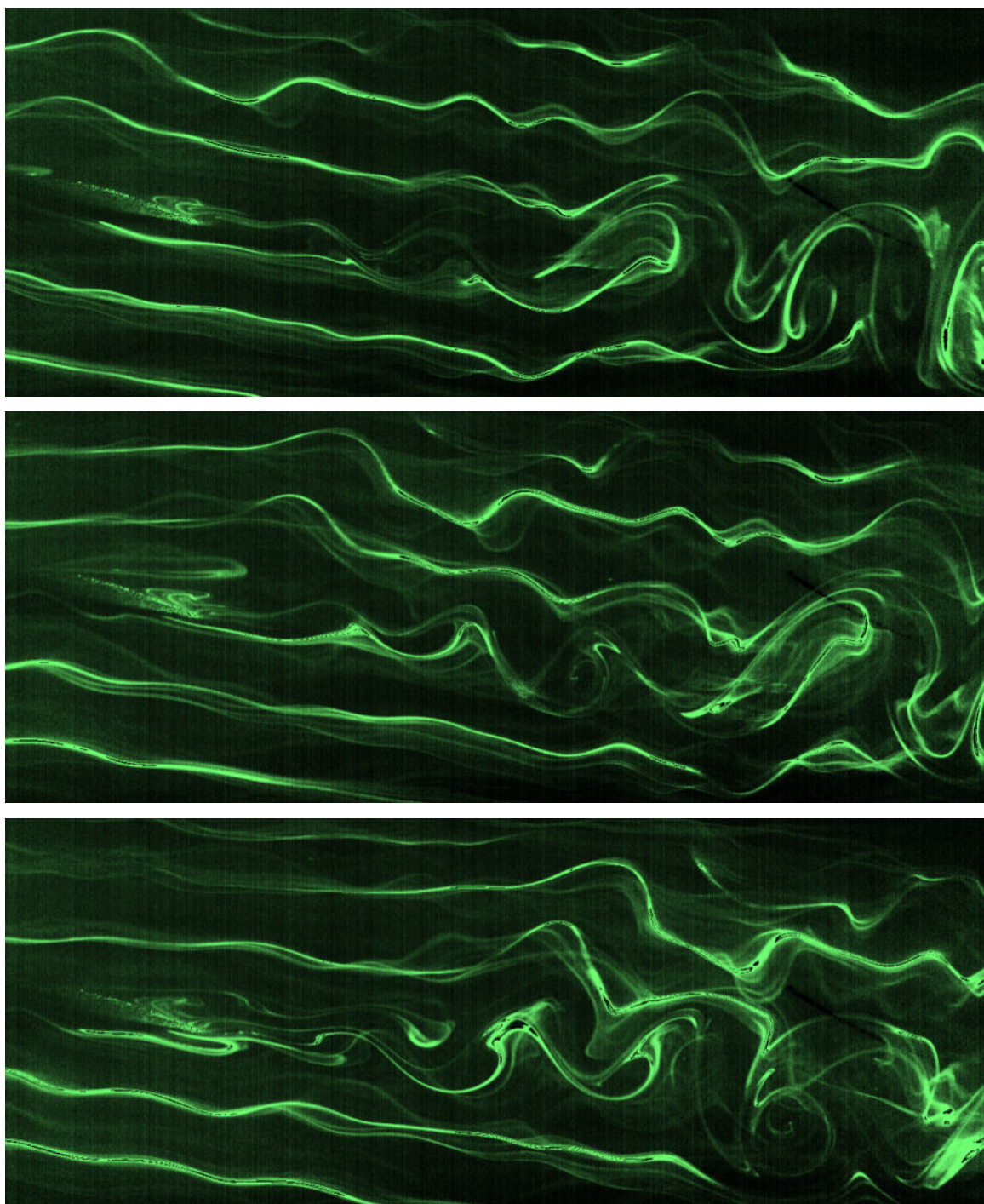




Obr. 5.8 Řez 2, úhel náběhu  $0^\circ$ ,  $Re = 1400$ .

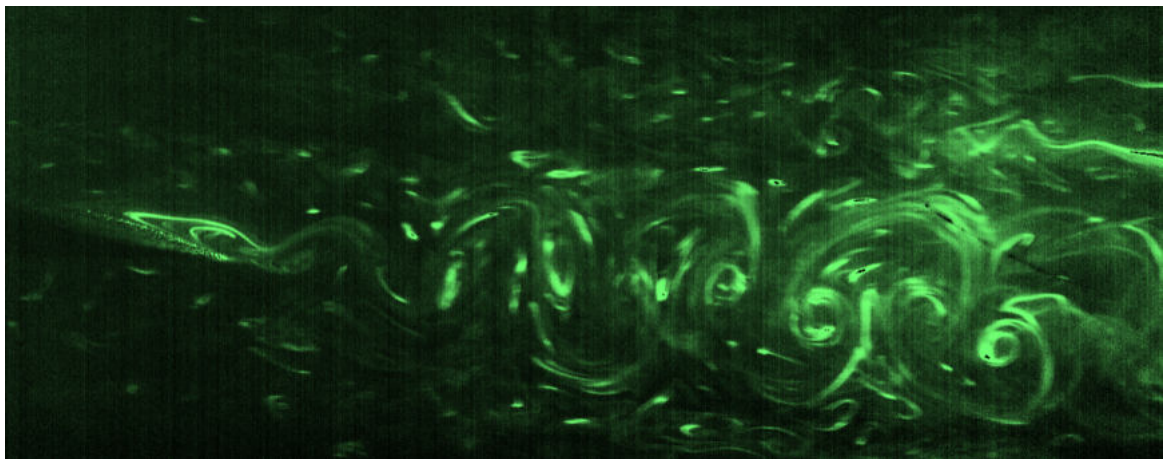
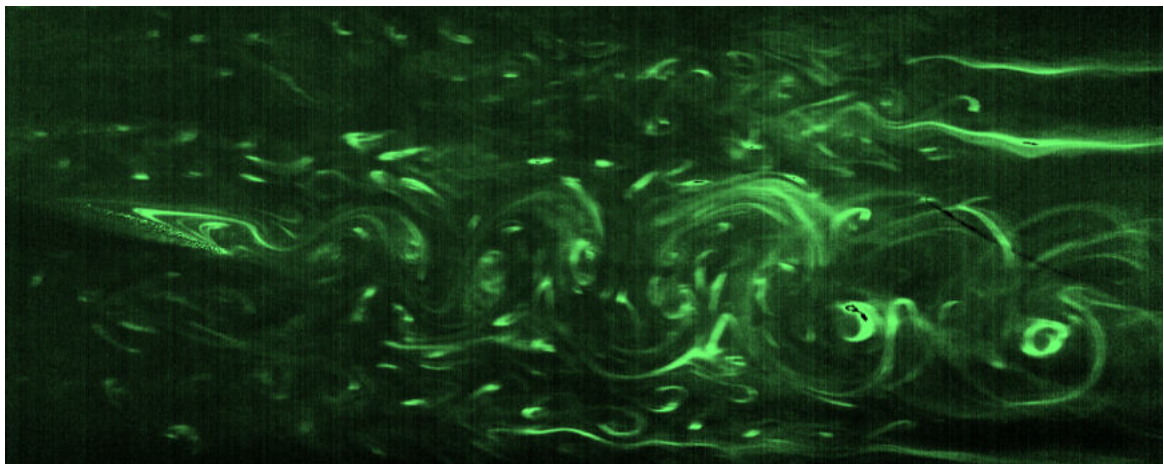
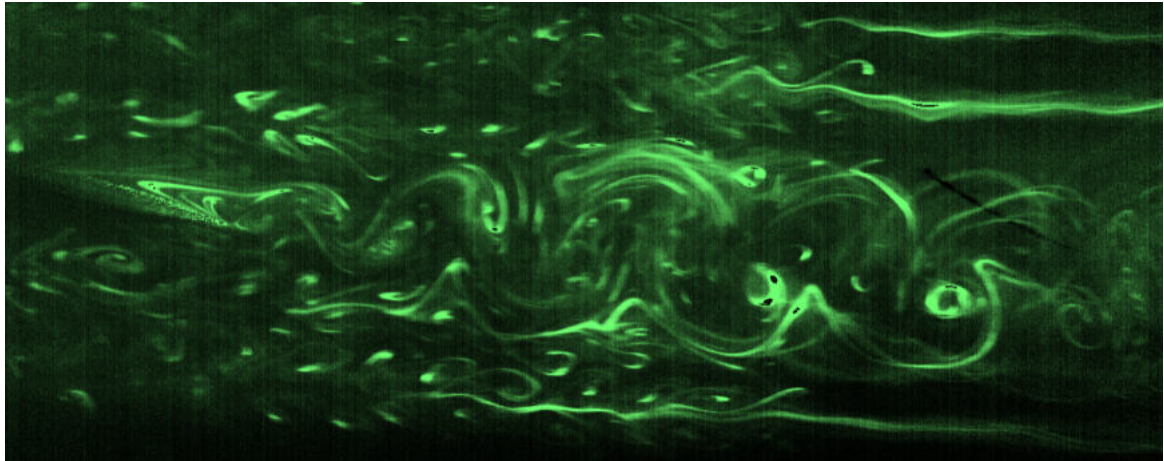
Řez 2, úhel náběhu 10°, Re = 700



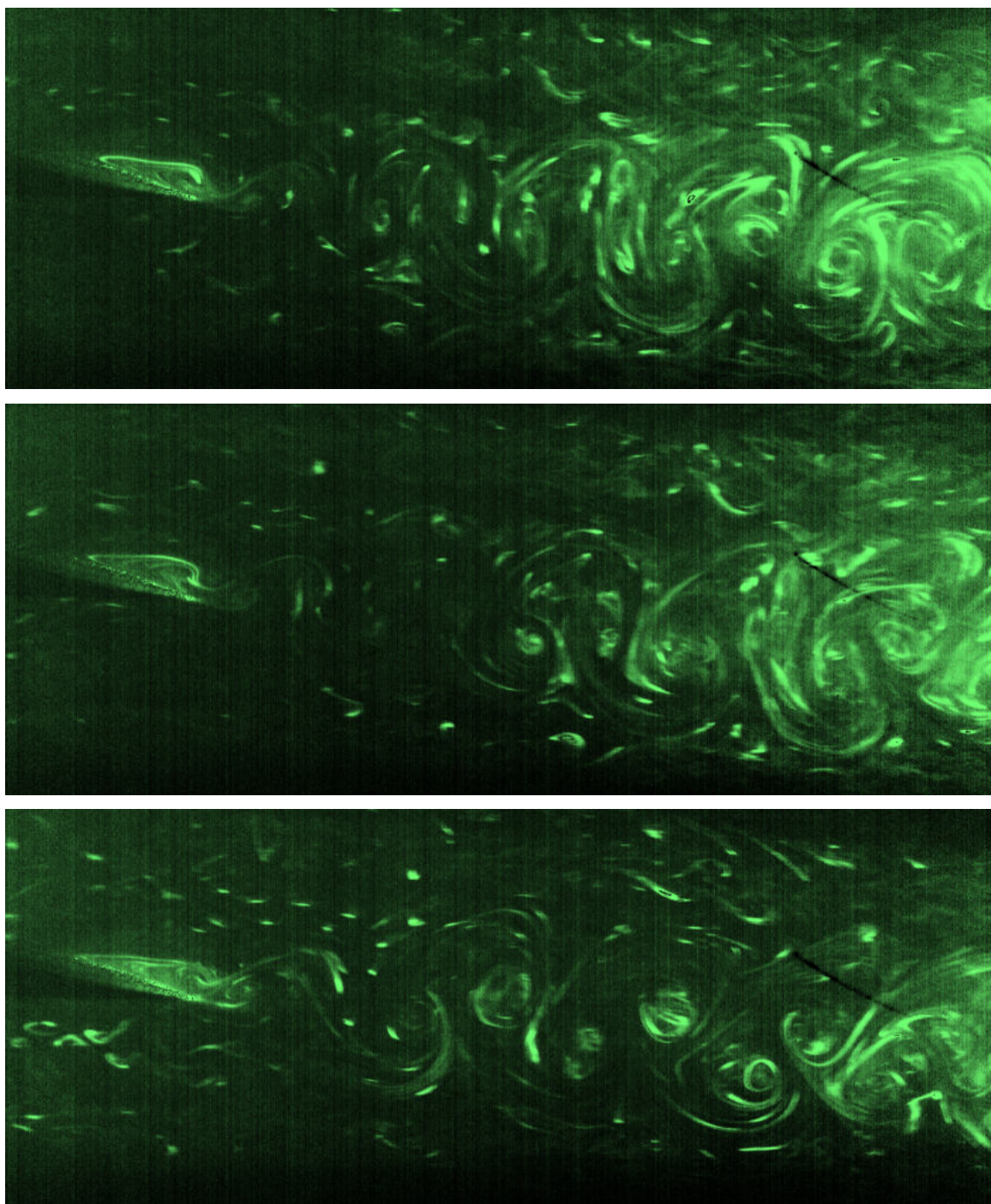


Obr. 5.9 Řez 2, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 700$ .

Řez 2, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 1400$

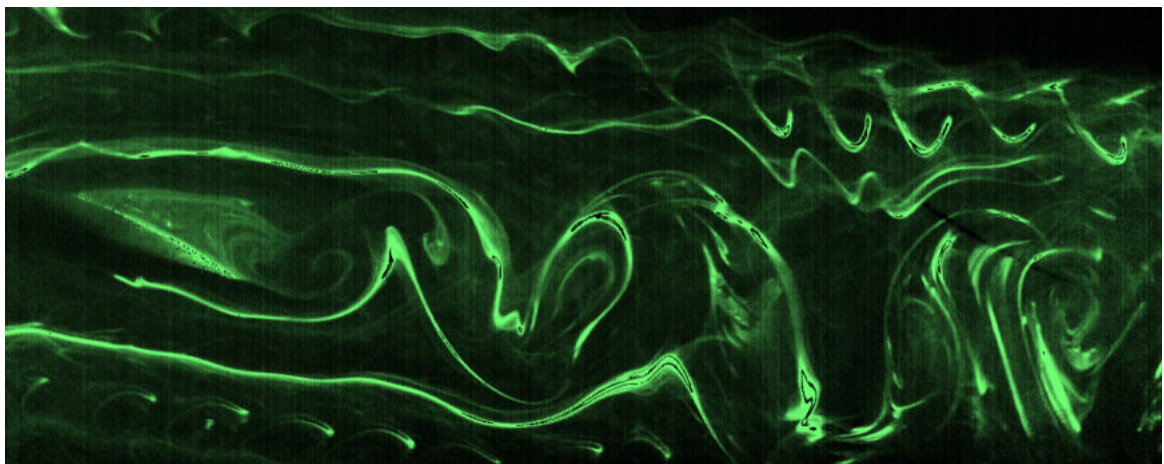
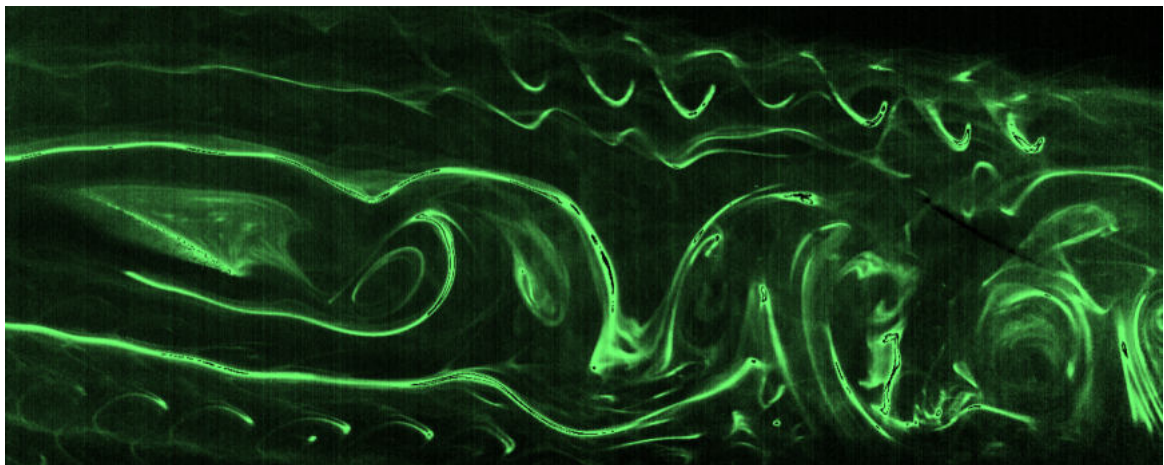
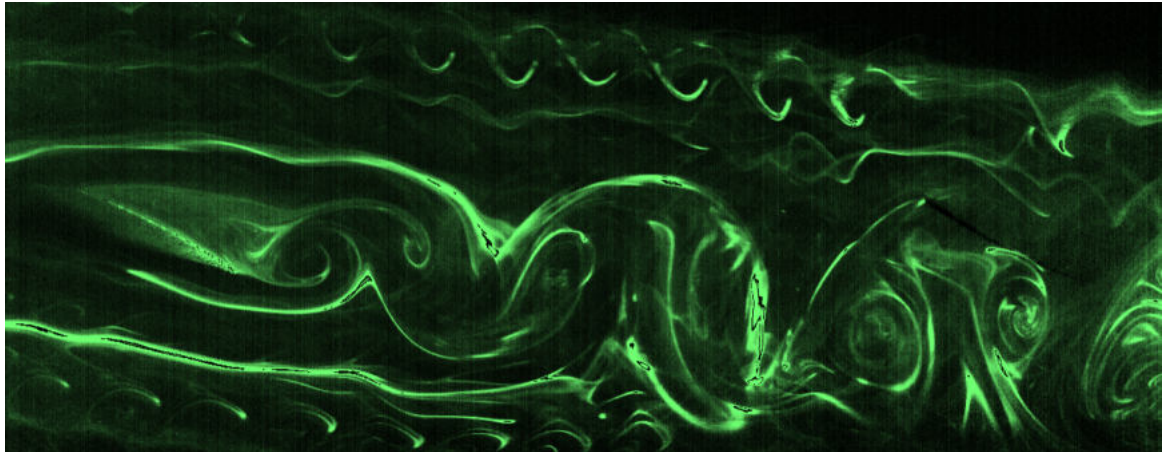


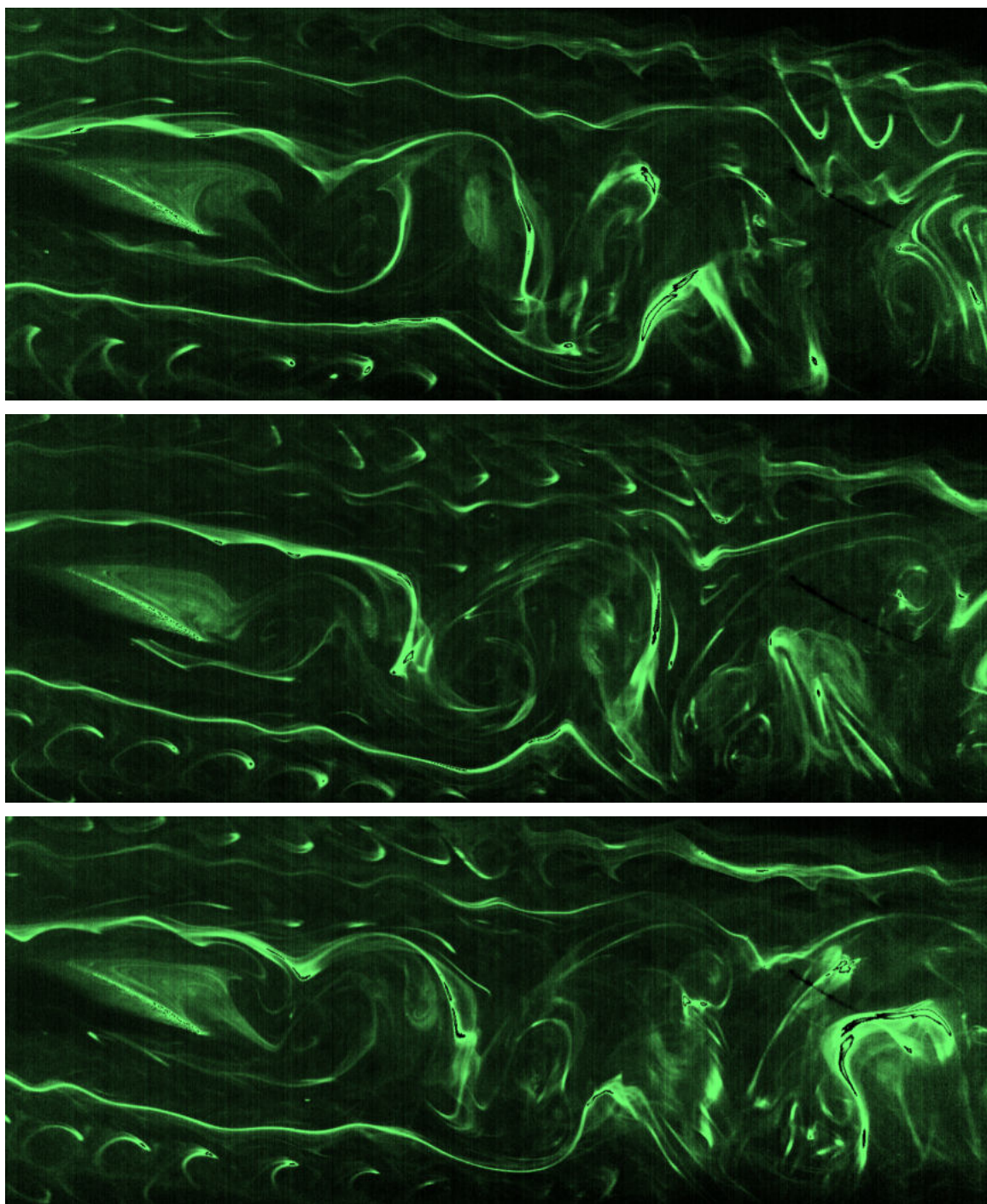




Obr. 5.10 Řez 2, úhel náběhu  $10^\circ$ ,  $Re = 1400$ .

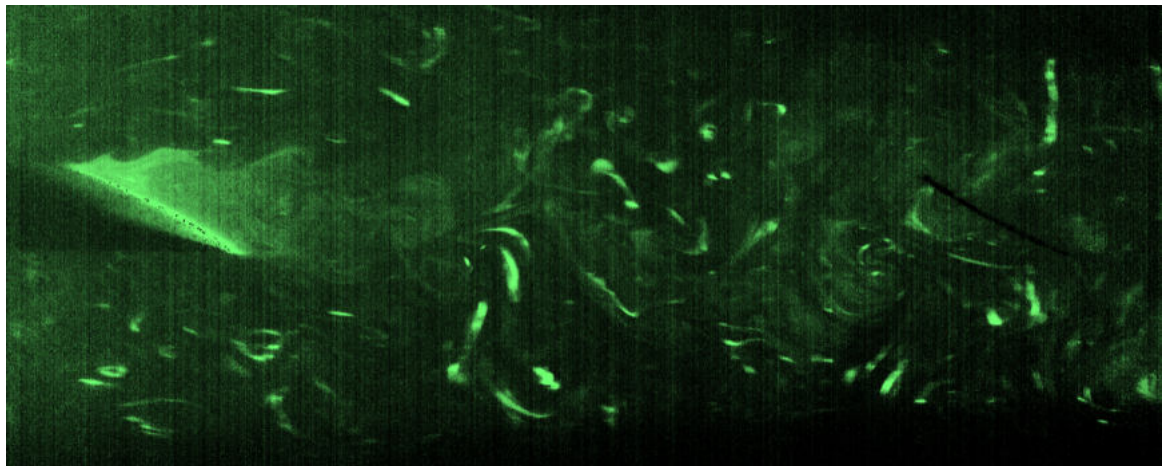
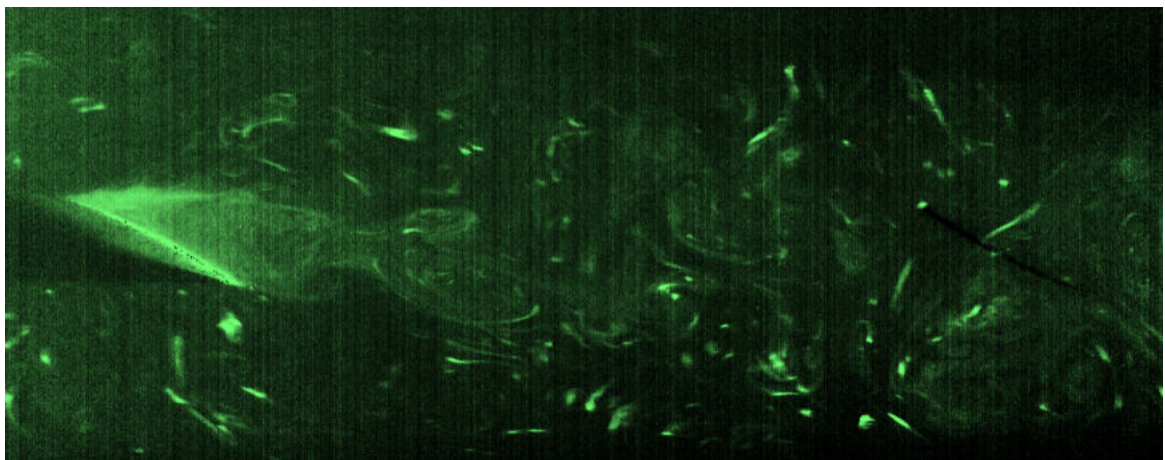
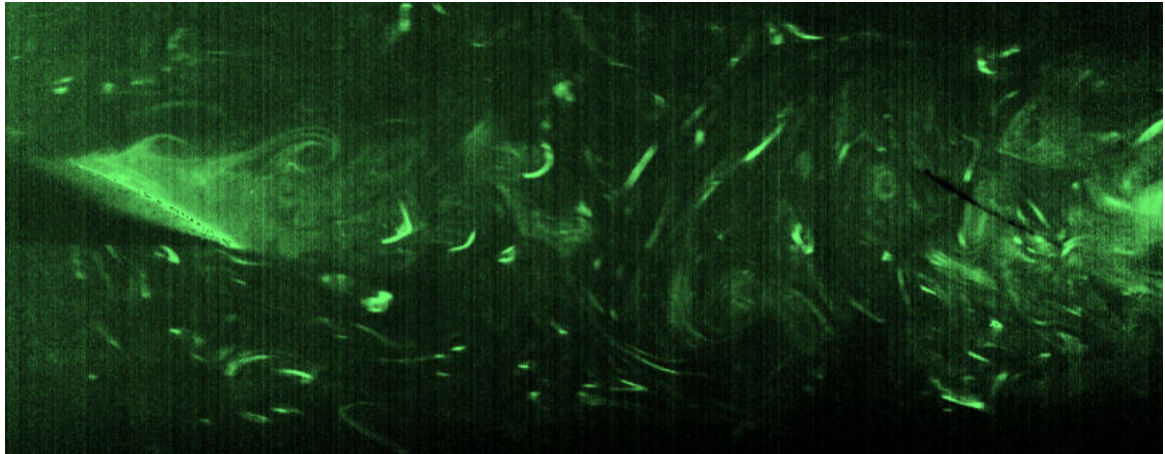
Řez 2, úhel náběhu 20°, Re = 700

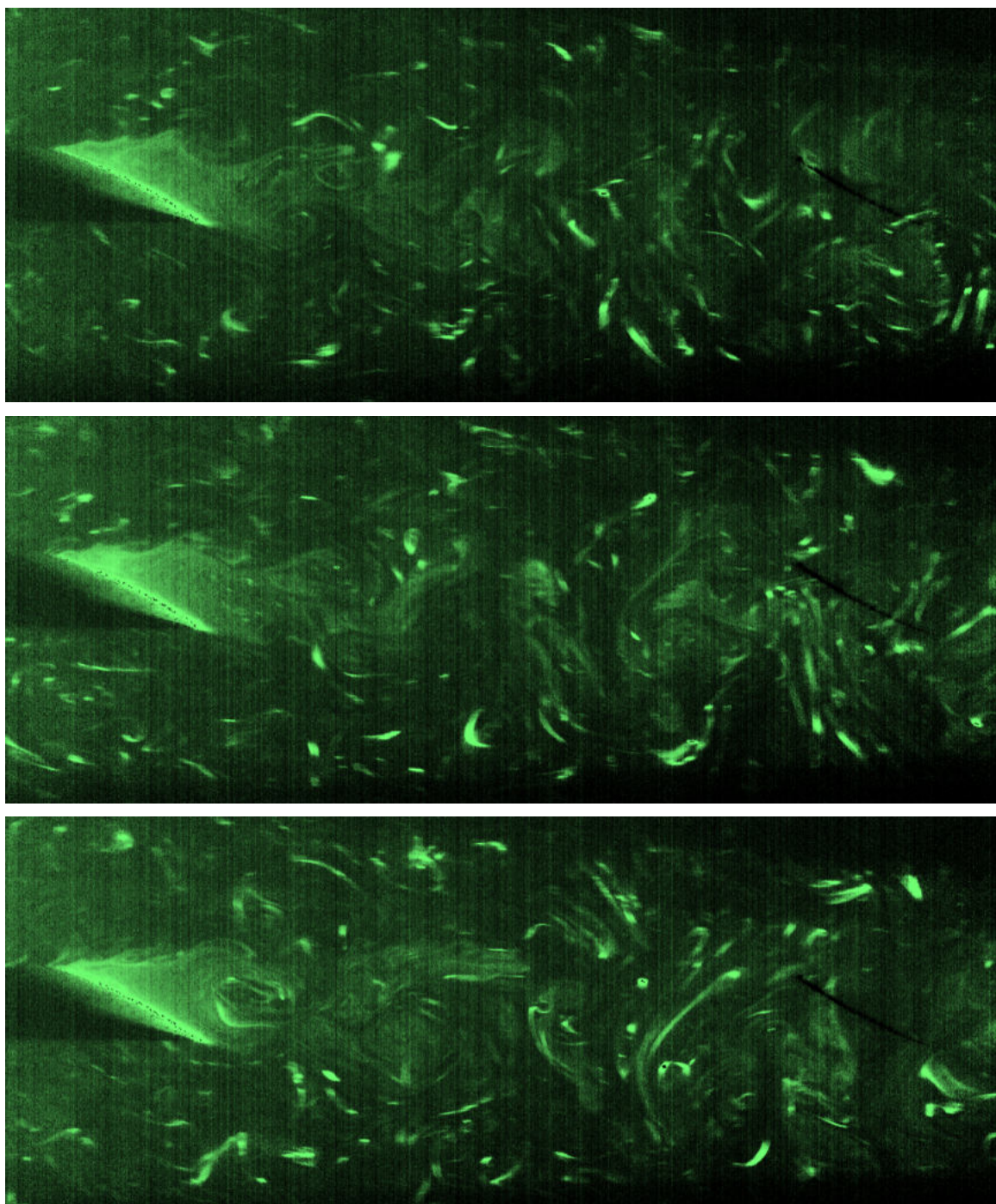




Obr. 5.11 Řez 2, úhel náběhu  $20^\circ$ ,  $Re = 700$ .

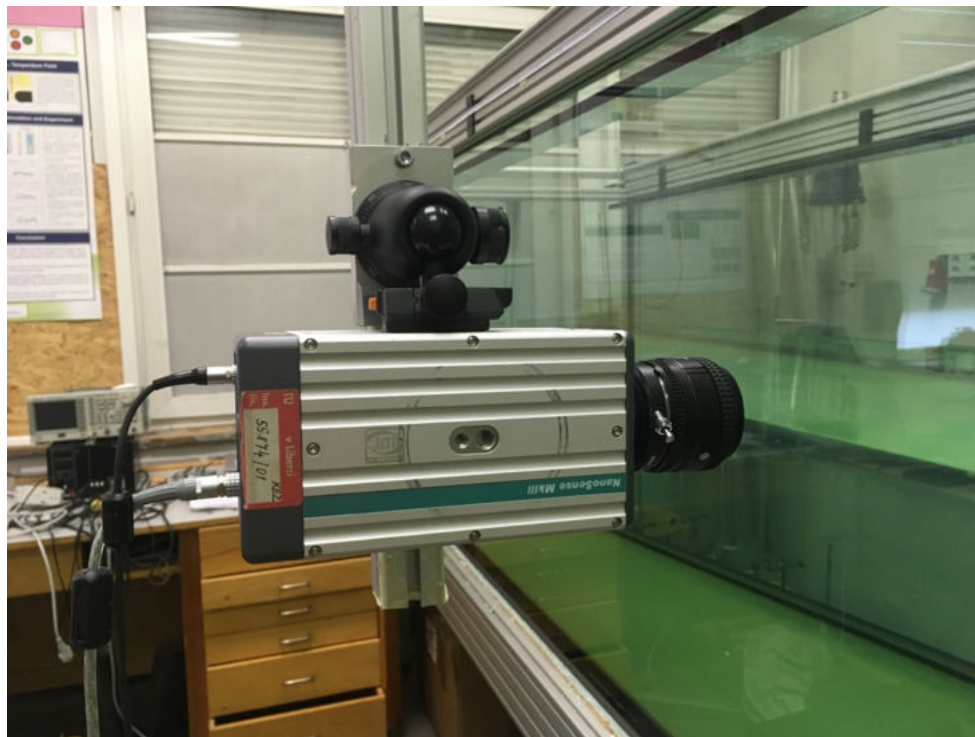
Řez 2, úhel náběhu 20°, Re = 1400





Obr. 5.12 Řez 2, úhel náběhu  $20^\circ$ ,  $Re = 1400$ .

## Příloha 2: Použitá zařízení



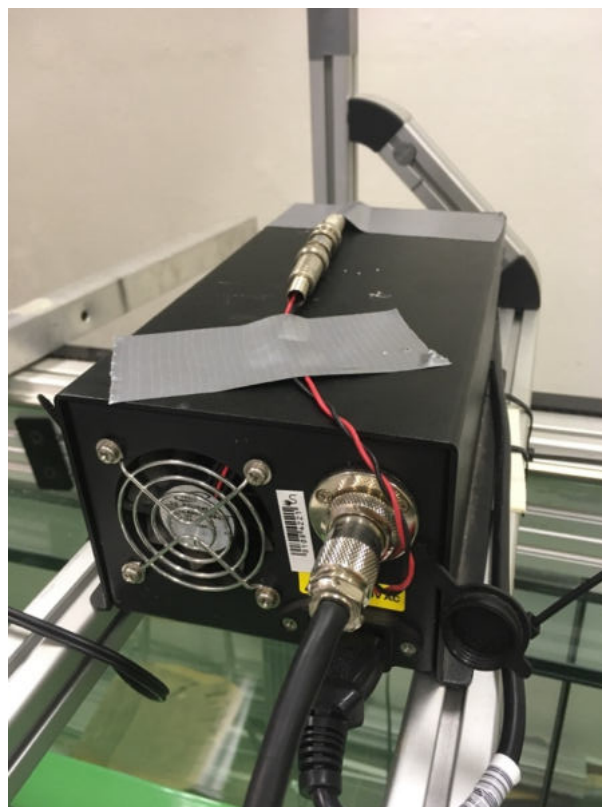
Obr. 6. 1 Vysokorychlostní kamera.



Obr. 6. 2 Sestava laseru se zrcadlem.



Obr. 6. 3 Laser.



Obr. 6. 4 Zdroj pro laser.



Obr. 6. 5 Osciloskop.



Obr. 6. 6 Zdroj pro elektrolýzu