



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# NÁVRH RYCHLOBĚŽNÉ VODNÍ TURBÍNY S TVAROVANOU NÁBĚŽNOU HRANOU LOPATKY OBĚŽNÉHO KOLA

DESIGN OF HIGH-SPECIFIC SPEED HYDRAULIC TURBINE WITH CONTOURED SHAPE OF THE  
RUNNER BLADE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MARCELA FOJTÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL RUDOLF, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Marcela Fojtíková

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Fluidní inženýrství (2301T036)**

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

**Návrh rychloběžné vodní turbíny s tvarovanou náběžnou hranou lopatky oběžného kola**

v anglickém jazyce:

**Design of high-specific speed hydraulic turbine with contoured shape of the runner blade**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vírová turbína se vyznačuje vysokou rychloběžností, která je dosažena absencí rozváděcího kola a pouze dvěma nenatáčivými lopatkami. Diplomová práce by měla přinést informace o možnosti rozšíření provozního pásma vírové turbíny využitím vhodné tvarové profilace náběžné hrany lopatky.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše poznatků o vlivu vlnitého tvaru náběžné hrany osamoceného aerodynamického profilu na jeho charakteristiku.
2. Zjištění vlivu vlnitého tvaru náběžné hrany na charakteristiku lopatkové mříže vírové turbíny s využitím CFD modelování.

Seznam odborné literatury:

1. Pochylý, F.; Haluza, M.; Rudolf, P.; Šob, F.: Vírová turbína. Patent 292197. Praha, 2003
2. Holub, J.: Rychloběžná vodní turbína. Diplomová práce VUT v Brně, vedoucí doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D., 2010.
3. Miklosovic, D.S., Murray, M.M., Howle, L.E., Fish, F.E.: Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaengliae*) flippers, *Physics of Fluids*, Vol. 16, No 5, 2004.
4. Favier, J., Pinelli, A., Piomelli, U.: Control of separated flow around airfoil using a wavy leading edge inspired by humpback flippers, *C.R. Mecanique*, No 340, pp. 107-114, 2012.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Návrh rychloběžné vodní turbíny s tvarovanou náběžnou hranou lopatky oběžného kola vypracovala samostatně s využitím literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

24.5.2013

.....

Bc. Marcela Fojtíková

Ráda bych poděkovala doc. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. a doc. Miloslavu Haluzovi, CSc. Za cenné rady a připomínky při tvorbě této diplomové práce. Dále také děkuji těm, kteří mi byli oporou a za jejich trpělivost.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá zjištěním vlivu tvarované náběžné hrany lopatky oběžného kola vírové turbíny na charakteristiku lopatkové mříže. Vychází se zde z reálných dat pro vírovou turbínu, kdy upravená náběžná hrana lopatky byla tvořena na základě předchozích studií prováděných na NACA profilech. Hlavním cílem práce je srovnání výsledků jednotlivých modifikovaných lopatek s hladkým profilem pomocí CFD výpočtů. Pro tvorbu geometrie a výpočetní sítě byly použity programy SolidWorks a Gambit.

## **Klíčová slova**

Vírová turbína, Keporkak, Tvarovaná náběžná hrana

## **Abstract**

This master thesis is devoted to examination of influence of bumped leading edge of hydraulic turbines rubber blade to characteristics of blade cascade. Thesis is based on hydraulic turbine which countoured/bumped leading edge of blade was created using previous studies on NACA profiles. The main goal of this thesis is to Compare shaped leading edge with flat leading edge using CFD calculations. Programms like SolidWorks and Gambit were used to calculate geometrics and meshes.

## **Keywords**

Hydraulic turbine, Humpback whale, Bumped leading edge

## Seznam použitých zkratk a symbolů

|        |                                               |
|--------|-----------------------------------------------|
| CAD    | - Computer Aided Design                       |
| CFD    | - Computational Fluid Dynamics                |
| D      | - odpor                                       |
| DES    | - Detached Eddy Simulation                    |
| IGES   | - Initial Graphics Exchange Specification     |
| INDEX  | - INternational DEsign eXhibition             |
| L      | - vztlak                                      |
| NACA   | - National Advisory Committee for Aeronautics |
| SLDPRT | - SolidWorks Part                             |

## Obsah

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 1 Úvod .....                                              | 2  |
| 2 Keporkak.....                                           | 3  |
| 2.1 Tělesná stavba .....                                  | 3  |
| 2.2 Manévrovací schopnosti .....                          | 4  |
| 2.3 Geometrie ploutve .....                               | 4  |
| 3 Předchozí studie .....                                  | 6  |
| 4 Uplatnění tvarovaných povrchů .....                     | 10 |
| 5 Vírová turbína.....                                     | 14 |
| 5.1 Základní informace.....                               | 14 |
| 5.2 Princip vírové turbíny .....                          | 14 |
| 5.3 Konformní zobrazení .....                             | 16 |
| 6 Hladká náběžná hrana vírové turbíny: .....              | 18 |
| 6.1 Geometrie hladkého profilu .....                      | 18 |
| 6.2 Výpočetní doména (Gambit 2.4.6) .....                 | 18 |
| 6.3 Nastavení výpočtu (Fluent 14.0) .....                 | 20 |
| 6.4 Přepočet $c_x$ a $c_y$ na $c_d$ a $c_l$ .....         | 22 |
| 6.5 Výsledné součinitele odporu a vztlaku.....            | 23 |
| 7 Modifikovaná náběžná hrana lopatky vírové turbíny ..... | 25 |
| 7.1 Geometrie tvarovaných náběžných hran.....             | 25 |
| 7.2 Výpočetní doména (Gambit 2.4.6) .....                 | 28 |
| 7.3 Nastavení výpočtu (Fluent 14.0) .....                 | 30 |
| 8 Srovnání lopatek.....                                   | 31 |
| 8.1 Vyhodnocení $c_d$ a $c_l$ .....                       | 31 |
| 8.2 Rozložení tlaku po profilu.....                       | 37 |
| 8.3 Rozložení tlaku v blízkosti lopatky.....              | 47 |
| 8.4 Vektory rychlosti okolo profilu.....                  | 56 |
| 8.5 Proudnic na profilu lopatky .....                     | 64 |
| 9 Závěr.....                                              | 67 |
| 10 Seznam použité literatury .....                        | 68 |
| Příloha .....                                             | 71 |

## 1 Úvod

Mnoho technologických průlomů přichází ze zajímavých aplikací některých inovativních modelů. Jiné přicházejí díky možnostem napodobování toho, co už za nás vymyslela příroda. V minulosti byla technologie spíše považována za prostředek pro lidi, aby se vyhnuli rozmarům přírody a vynálezy pocházely z lidské představivosti. Dnes se vztah mezi inženýrstvím (technologii) a biologií (přírodou) obrací. Příroda je v dnešní době považována za vzor pro zlepšení a vývoj nejrůznějších technologií. Jedná se především o snahu aplikovat některé vlastnosti živých systémů na systémy technické. V případě tvarované náběžné hrany se vědci nechali inspirovat charakteristickými výstupky na předních stranách prsních ploutví mořského savce keporkaka, který je díky nim obdařen výbornými manévrovacími schopnostmi.

V předchozích studiích vědci zjistili, že tvarovaná náběžná hrana má příznivé vlastnosti na klouzavost (aerodynamickou jemnost) daného profilu, což se projevuje zvýšením vztlaku a poklesem odporu, oproti profilu s hladkou náběžnou hranou. Studie byly prováděny na NACA profilech, kdy byl jako proudící médium volen vzduch. Tato práce vychází z předchozích výsledků, ale proudícím médiem je zde voda a profilem byl zvolen střední průřez lopatky vírové turbíny. Snahou této diplomové práce je zjistit, zda by byla aplikace tvarované náběžné hrany na vodní turbíny přínosem, protože tvarovaná náběžná hrana má již své uplatnění při použití na větrných turbínách, ventilátorech a jiných.

## 2 Keporkak [1, 3]

Jedná se o mořského savce, který díky milionům let evoluce získal neuvěřitelné hydrodynamické výhody (obrázek 1). Jeho latinský název je *Megaptera Novaeangliae*. První část je z řečtiny, kdy *mega* znamená velký a *ptera* znamená křídlo. *Novaeangliae* značí místo na severovýchodním pobřeží Ameriky v Nové Anglii, kde poprvé tyto velryby vědecky popsal německý přírodovědec Georg Heinrich Borowski. V překladu to tedy znamená „velké křídlo Nové Anglie“. Jiný název tohoto mořského savce je plejtvák dlouhoploutvý nebo dřívejší označení velryba hrbatá nebo také hrboun dlouhoploutvý.



Obrázek 1: Keporkak (*Megaptera Novaeangliae*) (převzato z [4])

### 2.1 Tělesná stavba [1, 2]

Pokud se zaměříme na konstrukční stavbu keporkaka, zjistíme, že tento kytovec je dlouhý 10-20 metrů a jeho váha se pohybuje v rozmezí od 25 do 45 tun. Charakteristický je pro keporkaka v první řadě jeho „hrbol“, tedy tukový polštářek u báze jeho hřbetní ploutve, který má různý tvar. Ocasní ploutev má nepravidelně vroubkovaný okraj a její šířka je zhruba třetina délky jeho těla. Za použití této silné ocasní ploutve je keporkak schopen se téměř celý vynořit z vody. I přes svou velikost je tento kytovec velmi mrštný. Jeho pohyblivost je dána uchycením a tvarem prsních ploutví, které mu umožňují skvělé manévrovací schopnosti. Oproti ostatním kytovcům má totiž keporkak extrémně dlouhé prsní ploutve (nejdelší ze všech kytovců), které jsou na náběžné hraně opatřeny hrboly (výběžky). Délka ploutví se pohybuje od 0,25 do 0,33 násobku celkové tělesné délky. Ploutve jsou vysoce mobilní a po délce vykazují jistou flexibilitu, zejména ve srovnání s jinými druhy velryb. Keporkak s nimi často mává nad hladinou a jsou k vidění zejména při jeho převalování.

## 2.2 Manévrovací schopnosti [1, 2, 3]

Keporkaci nepoužívají prsní ploutve k pohybu (k tomu jim slouží ocas), ale k manévrování (klonění a zatáčení), při lovu, k usměrnění mláďat apod., plní tedy potažmo původní funkci paží. V době krmení mohou díky nim tyto velryby plavat po velmi malé zakřivené spirální dráze, která v průměru dosahuje i méně než 10 metrů. Při lovu sledů je dva až čtyři keporkaci vyvedou z míry pomocí silnějšího zvuku, který vydávají a zaženou je do těsného hejna. Toto kompaktní hejno obeplouvají dokola a současně produkují mraky nebo sloupce bublin, z nichž vytvoří jakousi síť a svoji potravu tím zaženou ještě těsněji k sobě. Poté provedou ostrou zatáčku a vyrazí do středu hejna s doširoka otevřenými tlamami a nasbírají tak kilogramy ryb. Jejich ostré, kloněné zatáčky prováděné při velkých rychlostech, jsou zvýhodněny vysokými vztakovými (odporovými) vlastnostmi, které jsou kombinací hrbolů a velkých poměrů stran ploutví. Vztaková síla vyvolaná ploutví má vodorovnou složku, která dodává dostředivou sílu potřebnou k udržení obratu. Vztlak a úhel náklonu je nepřímo úměrný poloměru otáčení. Kromě toho, zvýšení úhlu náběhu až do pádového bodu (odtržení) zvyšuje vztlak, což pomáhá při provádění těsnějších zatáček. Pokud by ale ploutve velryby byly při vysokých úhlech náběhu v zatáčce příliš skloněné, došlo by na nich k dosažení maximálního vztaku a tím k odtržení proudu, čímž bude mít velryba sníženou dostředivou sílu a kořist by mohla uniknout.

## 2.3 Geometrie ploutve [2]

Při pohledu na samotnou ploutev vidíme, že zakulacené hrboly jsou na ploutvích uspořádány sinusově a dávají ploutvi vroubkovaný vzhled (obrázek 2). Počet hrbolů se obvykle pohybuje v rozmezí 9-11. Největší hrboly jsou první a čtvrtý z ramene lopatky. První je o velikosti 14,9% a čtvrtý je 19,4% z místní tětiny, což je zhruba 4% z rozpětí ploutve. Ostatní hrboly jsou menší s klesající velikostí ke špičce ploutve.



Obrázek 2: Ploutev keporkaka s tvarovanou náběžnou hranou (převzato z [5])

Z mnoha studií bylo zjištěno, že výskyt hrbolků na ploutvi napomáhá zlepšení hydrodynamického výkonu. Předpokládá se, že hrboly na ploutvích keporakaka jsou analogické k „turbulátorům - vířičům“ (z anglického výrazu *strakes*) používaných na letadlech. Jedná se o generátory velkých vírů, které mění charakteristiky odtržení proudu na křídle. Při vytváření vírů zde dochází k předávání energie u povrchu křídla a díky tomu k pozdějšímu odtržení mezní vrstvy. Částice proudu se zde pak nepohybují pouze ve vodorovném směru, ale i ve vertikálním a ty částice, které se nachází těsně u povrchu křídla, dostanou energii od částic přilétajících shora. Díky tomu mají částice u povrchu křídla energii se pohybovat a nemají tendenci se odtrhnout.

### 3 Předchozí studie [2, 3, 6, 10]

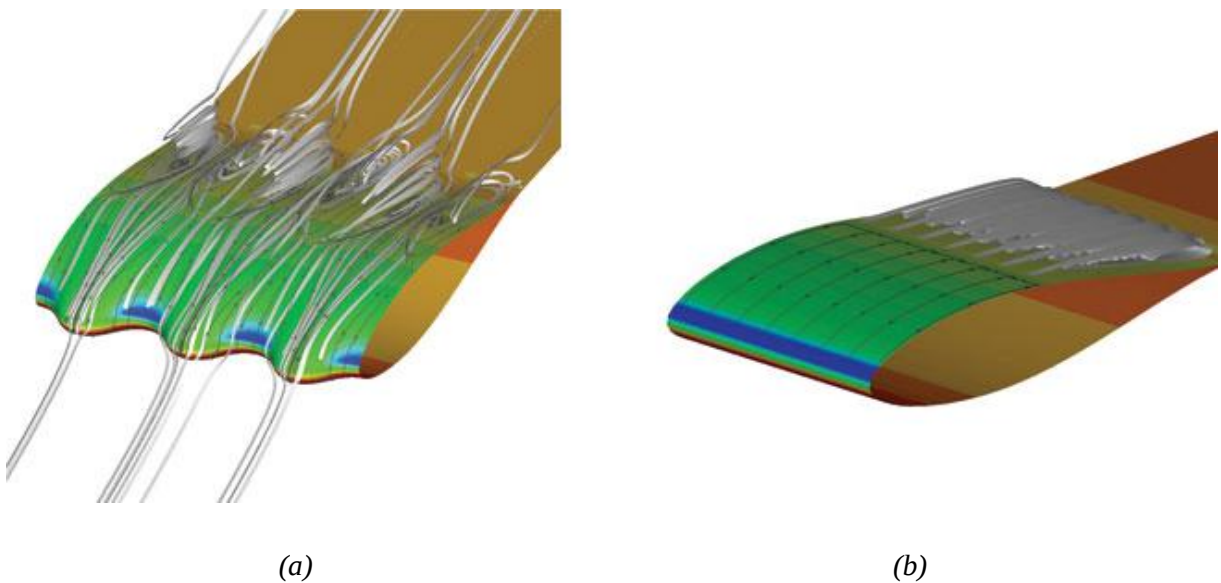
První zmínka o studii je z doby, když Frank E. Fish získal titul v zoologii. O několik let později se mu naskytla možnost prostudovat tělo mrtvé velryby keporkaka na břehu v New Jersey. Ruční pilou odřezal velrybě její ploutve, odvezl je a uložil do velkých mrazících boxů pro následnou studii. Vůbec nedokázal pochopit, proč se rovnoměrně umístěné hrbolky nacházejí právě na přední straně, když tam vůbec nemají být. Z rozřezaných „steaků“ velrybí ploutve vytvořil jejich digitalizaci a následně na to 3D model. Provedl několik jednoduchých simulací a zjistil, že mají hodně co dočinění s odporem. Zjistil tedy, že velrybí ploutev je něco jako křídlo. Normální křídla umožňují proudění při 11 až 12° úhlu náběhu, jinak ztratí vztlak.

Frank E. Fish a inženýr Phil Watts vyvinuli jednoduchý model a zjistili, že hrboly snižují odpor. V srpnu 2001 představili své předběžné závěry o dynamice kapalin u velrybích ploutví na konferenci o bezpilotní podvodní ponorce. Na základě toho se strojní inženýr Laurence Howle rozhodl podílet na budování plastové ploutve, která měla být testována v aerodynamickém tunelu námořní akademie. Howle na základě obrázků rozřezaných ploutví sestrojil software, díky jehož pomoci je bylo možné importovat do programu CAD. Následně na to byl vytvořen model, který je vidět na obrázku 3.



*Obrázek 3: Model ploutve keporkaka s tvarovanou náběžnou hranou (vpravo) a s hladkou náběžnou hranou (vlevo) (převzato z [6])*

Dále byl sestaven model s hladkou náběžnou hranou o jinak stejných parametrech. On a dva postgraduální studenti Mark Murray a David Miklosovic [11] testovali ploutve v aerodynamickém tunelu. Testy ukázaly, že při rychlostech plavající velryby hrboly zlepšují vztlak a oddalují odtrhávání, a s tím spojený prudký pokles vztlaku. Experimenty v aerodynamickém tunelu jim umožnily, aby vyvinuli CFD (Computational Fluid Dynamics) modely. Vytvořili rovnoměrně rozmístěné výběžky podél náběžné hrany ploutve. Tyto zaoblené hrboly vytvořily víry, které se vychýlily do údolí mezi nimi (obrázek 4). Každé údolí bylo obklopeno dvěma hrboly a víry z každého z nich měly opačný směr rotace. Když se tyto víry smísí v údolí, zrychlí se průtok kapaliny na zadní straně ploutve. Výsledkem experimentů bylo zvýšení vztlaku a snížení odporu.



Obrázek 4: (a) proudění přes tvarovanou náběžnou hranu, (b) proudění přes hladkou náběžnou hranou (převzato z [6])

Výzkum Fishe a Wattse [8] s modely v CFD byl prováděn pro velká Reynoldsova čísla a odlišné úhly náběhu. Pro křídla s tvarovanou náběžnou hranou se ve výsledku zvýšila klouzavost oproti hladkému křídlu. Pro úhel náběhu  $10^\circ$  došlo k nárůstu ve výsledném vztlaku o 4,8%, zatímco snížení odporu bylo 10,9%. Poměr  $L/D$  ( $L$  – vztlak,  $D$  – odpor) se zvýšil na 17,6%. Jen Shiang Kouh a další zkoumali profil NACA0012 s délkou tělvisy  $c = 0,12\text{m}$ , vybavený různými hrbolky sinusového tvaru s amplitudou od  $0,025c$  do  $0,75c$  a vlnovou délkou od  $0,2c$  do  $0,3c$ . Analýzou, provedenou s Reynoldsovým číslem  $Re = 123\,000$  ukázali, že snížení hodnoty vlnové délky u hrbolků vyústí v nárůst kritického úhlu náběhu a snížením amplitudy hrbolků se zvýší vztlak. Jejich křídlo dosáhlo maximálního kritického úhlu náběhu při  $15^\circ$  pro nejmenší vlnové délky  $0,02c$  a maximálního vztlaku pro nejmenší amplitudu, což je v podstatě křídlo s hladkou náběžnou hranou. Fish a Watts [7] si nechali tento koncept patentovat v roce 2002.

Miklosovic a další [11] prováděli několik měření v aerodynamickém tunelu, které ukázaly, že u tvarované náběžné hrany na idealizované ploutvi kepokaka došlo ke zpoždění odtržení proudu. Dále se zde zvýšil celkový vztlak bez výrazného zvýšení odporu. Modely ploutve (obrázek 5) byly založeny na profilu NACA 0020 a oproti reálné ploutvi zde byly v měřítku 1:4. Testy byly prováděny s určitým rozsahem úhlů náběhu při  $Re = 500\,000$ . Vztlakový koeficient se až do začátku odtržení monotónně zvyšoval jak u tvarovaných profilů, tak i u profilu s hladkou náběžnou hranou. U tvarované ploutve se ale maximální vztlak zvýšil oproti hladké ploutvi o 6 %. Náhlé odtržení (ztráta vztlaku) bylo u hladké náběžné hrany při úhlu náběhu  $11^\circ$ . U tvarované ploutve došlo k postupnému odtržení u úhlu náběhu o 40 % vyšším než u hladké ploutve. Součinitel odporu u tvarované ploutve pro úhly náběhu od  $12^\circ$  do  $17^\circ$  byl u tvarované lopatky nižší než u hladké a pro hodnoty úhlů náběhu od  $10^\circ$  do  $12^\circ$  byl pouze mírně větší. Pro úhly náběhu pod  $10^\circ$  nebyl rozdíl mezi oběma ploutvemi. Pro tvarovanou ploutev dosahovala klouzavost (poměr  $L/D$ ) lepších výsledků.



*Obrázek 5: Vlevo zvlněný a vpravo hladký model ploutve testovaný v aerodynamickém tunelu Miklosovicem (převzato z [10])*

Hansen a další [9] prováděli experimenty mezi nezměněným NACA0021 profilem a s profily s tvarovanou náběžnou hranou různých amplitud při poměru  $A/c$  od 0,03c do 0,11c a vlnových délek při poměru  $\lambda/c$  od 0,11c do 0,43c, kdy  $c$  je délka tětiny. Pro tento případ bylo  $c = 70$  mm. Experiment prováděli při velikosti Reynoldsova čísla 120 000. Z výsledků bylo zjištěno, že pro malá Reynoldsova čísla došlo u profilu s hrbolky ke zpoždění odtržení proudu, zatímco zvýšení výkonu bylo nevýznamné. Došli k závěru, že účinnost tvarované náběžné hrany byla velmi závislá právě na Reynoldsových číslech.

Hamid Johari se svými výzkumnými asistenty [12] měřil vztlak, odpor a klopný moment profilů s tvarovanou náběžnou hranou a porovnali ji ve vodním tunelu s výchozím profilem NACA 634-021. Testovali šest profilů se sinusovou náběžnou hranou při třech různých rychlostech a z toho byla zaznamenána pouze data pro Reynoldsovo číslo o velikosti 183 000 s rychlostí volného proudu 1,83 m/s. Odhalili snížení vztlaku a zvýšení odporu pro upravené profily s úhlem náběhu menším než úhel odtržení. Po tomto úhlu odtržení se vztlak u profilu se sinusovými hrboly na náběžné hraně zvýšil až o 50% než bylo u počátečního profilu s malým nebo žádným zvýšením odporu. Dále bylo zjištěno, že amplituda hrbolků měla zřetelný vliv na klouzavost křídel, přičemž vlnová délka zde měla malý účinek.

Další studie byla provedena Pedrem a Kobayashim [13] pro nízká Reynoldsova čísla ( $Re < 500000$ ). Jednalo se o numerickou simulaci proudění přes ploutev kepokaka s tvarovanou náběžnou hranou a s hladkou hranou. Tyto simulace byly zaměřeny na úhly náběhu v rozmezí 12 až 18 stupňů v domněnku, že jsou to ty úhly náběhu, kde by mohlo dojít k největším rozdílům. Jejich studie zjistila zvýšení aerodynamické výkonnosti vroubkovaných ploutví. Došli k závěru, že použití turbulentního DES (Detached Eddy Simulation) modelu bylo úspěšné v určení aerodynamiky ploutve při nízkých Reynoldsových číslech a že vyšší aerodynamický výkon ploutve je díky přítomnosti vírů ve směru proudění, které byly vytvořeny výběžky na náběžné hraně ploutve.

Anil Kumar Malipeddi [10] zkoumal vlivy výčnělků na čtyřech křídlech a srovnával je s hladkým křídlem při nízkých Reynoldsových číslech. Výčnělky na křídlech se lišily amplitudou i vlnovou délkou podél náběžné hrany křídla. Vybrané hodnoty amplitudy a vlnové délky byly na základě rozsahu těch, které se nacházejí na ploutvích kepokaka. Pro křídlo byl v této studii zvolen profil NACA 2412. Délka tětiny křídla byla zvolena  $c = 0,1\text{m}$  a rozpětí  $s = 0,1\text{m}$ . Díky tomu měly všechny modely stejnou povrchovou plochu. Pro definování výčnělků byly použity dvě amplitudy  $A1 = 0,025c$ ,  $A2 = 0,05c$  a dvě vlnové délky  $\lambda1 = 0,25c$ ,  $\lambda2 = 0,5c$ . Jeho výzkum ukázal, že křídlo s nejkratší vlnovou délkou a s nejmenší amplitudou má stále vlastnosti pro úhel náběhu menší než  $12^\circ$ , při kterém začne odtrhávání a na křídle dojde ke ztrátě vztlaku. Pro úhel náběhu větší než  $16^\circ$  se vztlak na tvarovaném křídle zvýšil o 48% a odpor byl o 44% nižší než na běžném křídle. Výsledky také odhalily, že amplituda tvarovaného křídla výrazně ovlivňuje klouzavost při větších úhlech náběhu.

## 4 Uplatnění tvarovaných povrchů [2, 6, 14, 16, 18]

Asi nejvýznamnější aplikací, kde byla ploutev keporkaka inspirací, jsou větrné turbíny. Právě unikátní design s tvarovanou náběžnou hranou (obrázek 6) lopatky umožňuje strmější provozní úhel lopatky a 40% nárůst výkonu. Tyto lopatky přenášejí energii větru přes hřídel na generátor, který vyrábí elektřinu. Jedním z mnoha kritických aspektů větrné turbíny jsou samotné lopatky. Vzhledem k tomu, že větrná turbína pracuje ve většině provozních podmínek při nízkých rychlostech větru, jejich provoz musel být vylepšen. Použití silnějších generátorů a lopatek je užitečné při provozu při vysokých rychlostech větru, ale při nízkých jsou neúčinné. Zlepšení výkonu při nízkých rychlostech je možné zvýšením úhlu náběhu. Jenže příliš velké zvyšování úhlu náběhu vede k odtržení proudu na lopatce. Proto je výrobce při rozvoji lopatek omezen právě těmito úhly, aby bylo odtrhávání pokud možno minimální.

Řešením by mohla být právě tvarovaná náběžná hrana inspirovaná keporkakem. Dr. Frank E. Fish, profesor biologie, zjistil, že výčnělky na ploutvi keporkaka umožňují zvýšit provozní úhel od 11 do 17° než dojde k odtržení, což je asi čtyřicetiprocentní zlepšení klouzavosti. Při proudění vzduchu v údolích mezi hrbolky je na každé straně konkrétního výběžku generován vír. Tento vír zabraňuje proudění vzduchu v oddělování a odtrhávání od profilu. Pokud se proudění přes tvarovanou ploutev zvyšuje vztlak a snižuje odpor, tak je zřejmé, že velryba při obratu spotřebuje méně energie. Což byl asi hlavní předpoklad pro aplikaci tvarované náběžné hrany na lopatku větrné turbíny. Výsledkem je, že větrné turbíny takto opatřené pracují efektivněji při mírných rychlostech větru. Odtrhávání na hraně lopatky je zde prakticky vyloučeno a větrné turbíny jsou schopny lépe zvládnout i vyšší rychlosti větru. Testování těchto větrných turbín s tvarovanou náběžnou hranou probíhalo po dobu jednoho roku s pomocí Wind Energy Institute on Canada's Prince Edward Island. Z výsledků lze předpokládat, že výběžky umožňují efektivnější využití větrné turbíny, delší provozní životnost a eliminují problémy s mazivy.



Obrázek 6: Tvarovaná náběžná hrana lopatky větrné turbíny (převzato z [15])

V srpnu roku 2009 byla tato technologie pro větrné turbíny oceněna jako finalista pro INDEX Award v Kodani. Použití tvarované náběžné hrany bylo převzato společností WhalePower pro použití ve větrných turbínách, ventilátorech, čerpadlech a kompresorech. EviraNorth pro velké ventilátory a Fluid Earth pro surfařskou ostruhu.

Frank Fish a jeho partner Stephan Dewar založili společnost s názvem WhalePower. Přišli na trh s technologií, která bere inspiraci z přírodního designu prsní ploutve keporkaka. Lopatka založená na této technologii má vyšší vztlak bez následku zvýšení odporu. Stephen Dewar řekl, že ventilátory (obrázek 7) o průměru 24 stop založené na této technologii používají poloviční počet lopatek a i přes to dosahují vyšší účinnosti o 25% a spotřebují o 25% méně energie než ventilátory s klasickými listy při stejné rychlosti otáčení.



*Obrázek 7: Whale Power technologie použitá na ventilátoru (převzato z [17])*

Další aplikací je surfařská ostruha (obrázek 8) od komerční společnosti Fluid Earth, která svým průkopnickým designem poskytuje lepší manévrovací schopnosti a vyšší výkon při jízdě. Jedná se zde opět o tvarovanou náběžnou hranu, která zde nahrazuje klasickou hladkou hranu ostří.



*Obrázek 8: Surfařská ostruha (surfboard skeg) od komerční společnosti Fluid Earth (převzato z [19])*

Jako další příklad použití výběžků na kontrolních plochách je člověkem poháněná ponorka Umpty Squash (obrázek 9). Postavili ji studenti Sussex County Technical High School. V roce 2005 ponorka soutěžila v mezinárodních ponorkových závodech pořádaných na David Taylor Model Basin v Bethesda, Maryland. Ponorka byla schopná dělat 90° otáčky na 7,5 metrech.



*Obrázek 9: Ponorka Umpty Squash (převzato z [16])*

Další možnost použití tvarované náběžné hrany je na křídlech letounu (obrázek 10) při vysokých úhlech náběhu s odtrháváním víru na náběžné hraně křídla nebo na aerodynamicky více zatíženém křídle. Použití tvarované náběžné hrany vede ke zpoždění odtržení proudu právě u vysokých úhlů náběhu. Tvarované náběžné hrany se mohou použít u běžných letadel a to nahrazením řídicích prvků v „mezní vrstvě“, jako jsou klapky a sloty. Tyto prvky jsou

nezbytné pro zabránění odtržení, zejména při vysokých úhlech náběhu, tj. vzlet a přistání. Odstraněním klapek a slotů s jejich příslušenstvím by se mohla snížit hmotnost letadla a tím by se mohla snížit i spotřeba paliva.



*Obrázek 10: Model komerčního proudového letadla s tvarovanou náběžnou hranou na křídlech a stabilizátorech (převzato z [20])*

## 5 Vírová turbína

Vírová turbína (obrázek 11), byla navržena dle idee prof. Pochylého v roce 2001 na Vysokém učení technickém v Brně (Odbor fluidního inženýrství Viktora Kaplana).

### 5.1 Základní informace [21, 22]

Na středovém náboji vírové turbíny jsou umístěny minimálně dvě oběžné lopatky, které mají tvar zborcené šroubové plochy.



*Obrázek 11: Vírová turbína (převzato z [23])*

Mezi výhody této turbíny patří především nepřítomnost rozváděcího kola a vysoké otáčky, takže v mnoha případech nepotřebuje ani převodovku. To vše představuje úspory navíc. Jednoduchost turbíny také zvyšuje její spolehlivost a tím se eliminují i některé možné poruchy. Hydraulická účinnost dosahuje až 86%. Ideální využití této turbíny je pro menší vodní toky s malým spádem od jednoho do tří metrů.

### 5.2 Princip vírové turbíny [21, 24]

Princip rychloběžné (vírové) turbíny je opačný než u Kaplanovy. V Kaplanově turbíně se kapalina přivádí pomocí rozváděcího kola, které kapalině udělí rotaci. Oproti tomu vírová turbína postrádá rozváděcí kolo a proud vody na ni vstupuje rovnoběžně s osou rotace a po průchodu lopatkami turbíny vychází rotující kapalina.

Pro popis principu vírové turbíny vyjdeme z Eulerovy turbínové rovnice:

$$g \cdot H \cdot \eta_h = u_1 \cdot c_{u1} - u_2 \cdot c_{u2}$$

kde:

$g$  ... tíhové zrychlení

$H$  ... spád na turbínu

$\eta_h$  ... hydraulická účinnost

$u_1$  ... unášivá rychlost na vstupu do oběžného kola

$c_{u1}$  ... obvodová složka rychlosti na vstupu do oběžného kola

$u_2$  ... unášivá rychlost na výstupu z oběžného kola

$c_{u2}$  ... obvodová složka rychlosti na výstupu z oběžného kola

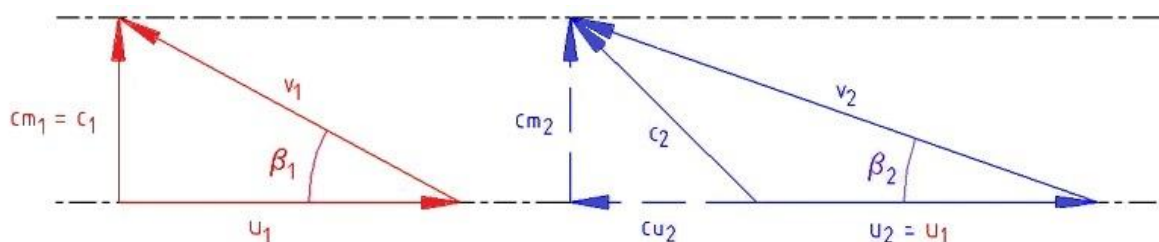
V případě vírové turbíny vstupuje kapalina do oběžného kola bez rotace, proto je obvodová složka rychlosti na vstupu do oběžného kola  $c_{u1}$  nulová.

Po následné úpravě Eulerovy turbínové rovnice dostaneme

$$g \cdot H \cdot \eta_h = -u_2 \cdot c_{u2} .$$

Po vyjádření obvodové složky rychlosti na výstupu z oběžného kola  $c_{u2}$  dostaneme

$$c_{u2} = -\frac{g \cdot H \cdot \eta_h}{u_2} .$$

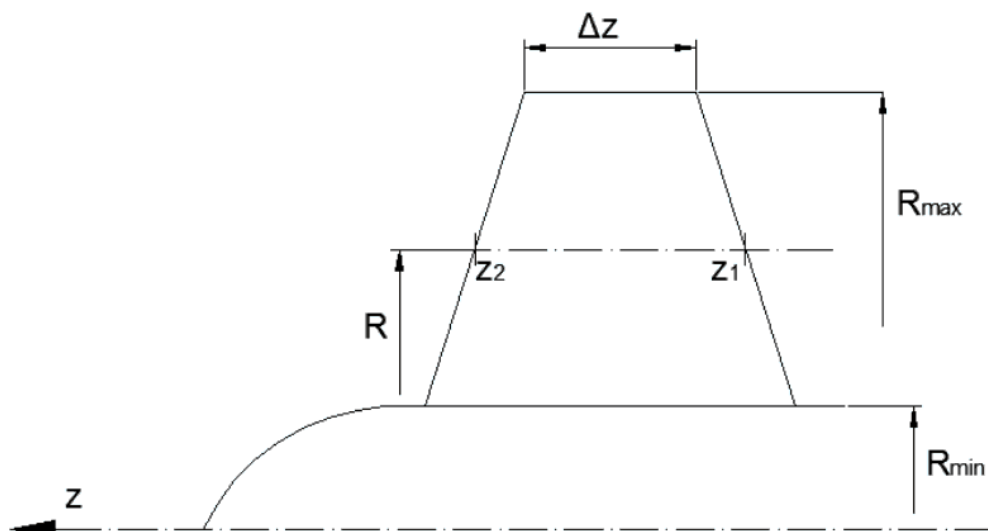


Obrázek 12: Vstupní (vlevo) a výstupní (vpravo) trojúhelník vírové turbíny

Z Eulerovy turbínové rovnice i z obrázku rychlostního trojúhelníku (obrázek č. 12) je patrné, že voda sice vstupuje do oběžného kola bez rotace, tj. rovnoběžně s osou rotace, ale vír tvořený za lopatkami oběžného kola rotuje proti směru rotace oběžného kola.

### 5.3 Konformní zobrazení [24, 29]

Konformní zobrazení slouží k transformaci střední čáry lopatky nebo lopatky ze souřadnic  $R, \varphi, z$  do souřadnic  $\zeta, \eta$ . Při transformaci souřadnic zůstávají zachovány úhly a stejný poměr délek úseček.



Obrázek 13: Zjednodušené schéma vírové turbíny (převzato z [24])

Upravené obecné vztahy pro konformní zobrazení:

$$\eta = \frac{h}{a} \cdot \varphi$$

kde:

$h$  ... zvolená hloubka profilu mříže

$a$  ... konstanta lopatkové mříže

$\varphi$  ... souřadnice  $z$  válcového souřadnicového systému

$$\zeta = h \cdot \left( \frac{1}{a} \int_{z_1}^z \frac{dz}{R} - \frac{1}{2} \right)$$

$$\zeta = \frac{h \cdot R}{(z_2 - z_1)} \cdot (z - z_1) \cdot \frac{1}{R} - \frac{h}{2}$$

$$\zeta = \frac{h(z - z_1)}{(z_2 - z_1)} - \frac{h}{2}$$

kde:

$z$  ... souřadnice ve směru osy  $z$

$z_1, z_2$  ... souřadnice na ose  $z$  (obrázek 13)

$R$  ... souřadnice válcového řezu

Konstanta lopatkové mříže:

$$a = \int \frac{d\sigma}{R}, d\sigma = dz$$

$$a = \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{R}$$

$$a = (z_2 - z_1) \cdot \frac{1}{R}$$

## 6 Hladká náběžná hrana vírové turbíny:

V této práci bylo potřeba vytvořit nejen lopatky s modifikovanou náběžnou hranou, ale právě i lopatku s hladkou náběžnou hranou. Bez ní by nebylo možné srovnání a nedalo by se určit, zda má tvarovaná lopatka nějaké výhody nebo v čem jsou její parametry horší.

### 6.1 Geometrie hladkého profilu

Geometrie profilu hladké lopatky vírové turbíny je definována řadou bodů ze souboru obsahujících data reálné vírové turbíny v konformním zobrazení (návrh přímoproudé varianty vírové turbíny od doc. Haluzy z roku 2010). Tento soubor bodů je přiložen v příloze a byl pro tuto práci dodán jako zadání bodů reálných hodnot vírové turbíny, se kterými se dále pracovalo. Profil vytvořený z jednotlivých bodů je znázorněn na obrázku 14. Jednalo se o body středního průřezu lopatky mezi nábojem a komorou vírové turbíny na poloměru  $r = 0,0625\text{m}$ . K vytvoření profilu bylo použito celkem 188 bodů, které byly následně spojeny v programu Gambit 2.4.6 a vznikl nám potřebný profil pro naše výpočty.

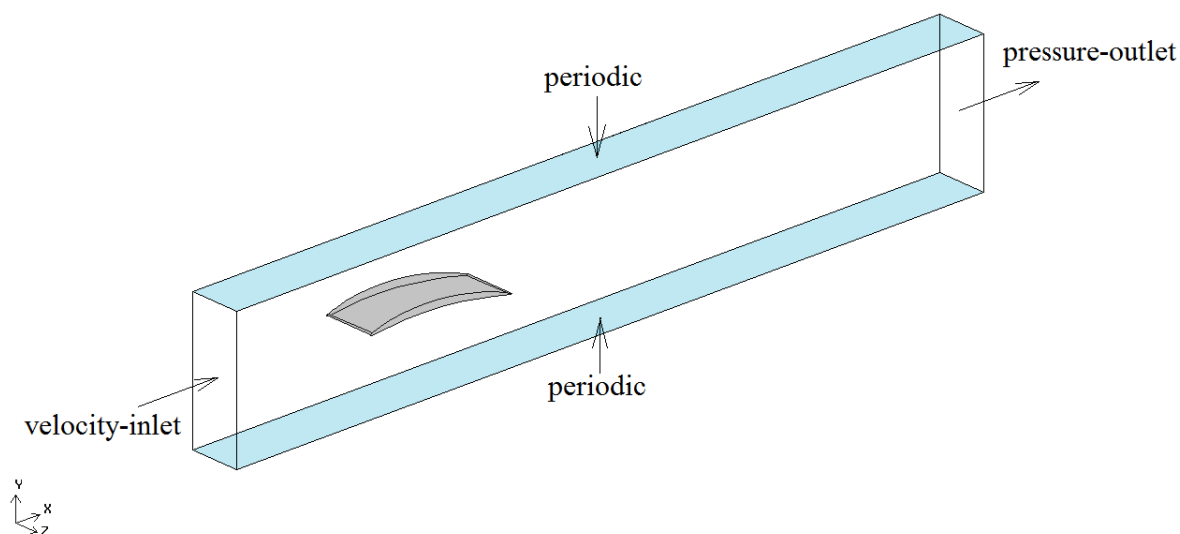


Obrázek 14: Geometrie profilu lopatky s hladkou náběžnou hranou v konformním zobrazení

### 6.2 Výpočetní doména (Gambit 2.4.6)

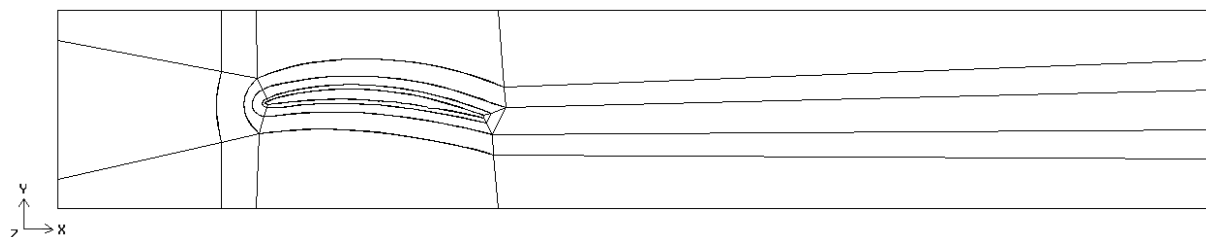
3D model a celá výpočetní doména, včetně sítě potřebné pro výpočet proudění kolem lopatky byly vytvořeny pomocí programu Gambit 2.4.6. Rozvržení výpočetní domény je znázorněno na obrázku 15.

Šířka lopatky (tj. vzdálenost mezi nábojem a komorou) pro výpočet  $s = 0,075\text{m}$  je shodná se šířkou skutečné lopatky a proto byla v této práci jako jedna z výchozích hodnot. Výška výpočetní domény byla zvolena  $0,2\text{m}$ , což odpovídá orientačně  $0,5c$  nad lopatkou a  $0,5c$  pod lopatkou, kde  $c$  je délka tělvy lopatky vírové turbíny na poloměru  $r = 0,0625\text{m}$ . Délka tělvy je přibližně  $0,2\text{m}$ . Velikost výpočetní domény byla ve směru proudění zvolena  $1,2\text{m}$ , z toho se  $0,2\text{m}$  nacházelo před lopatkou. Toto uspořádání domény by mělo být schopno zaznamenat celý průběh proudění kolem lopatky a mělo by dostatečně vyhovovat našim výpočtům. Zároveň jsou okrajové podmínky, především výstupní okrajová podmínka, dostatečně vzdáleny od profilu a nemohou ovlivňovat proudění kolem profilu.

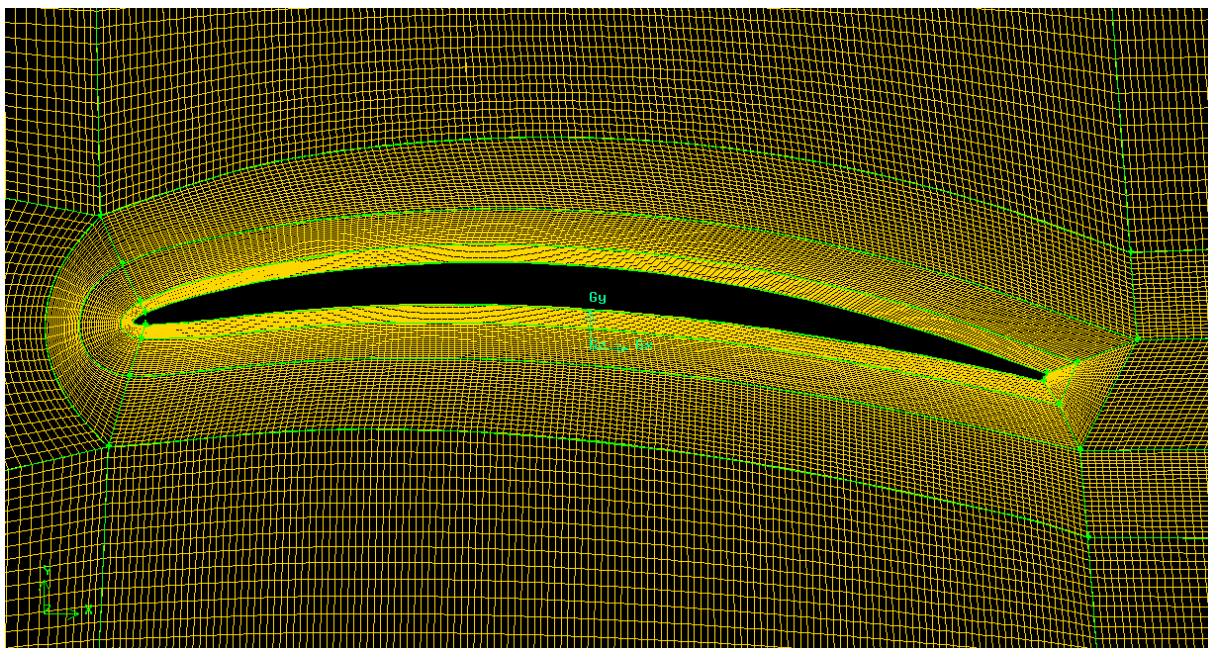


Obrázek 15: Zjednodušená výpočetní doména - program Gambit 2.4.6

Doménu bylo potřeba rozdělit na několik menších objemů z důvodu lepšího a kvalitnějšího rozvržení sítě, viz obrázek 16. Na hranách daného objemu byly navrženy body sítě tak, aby síť kolem lopatky měla větší hustotu (obrázek 17) a byla tak dodržena stěnová podmínka  $wall\ y^+$ , která vypovídá o kvalitě sítě. Síť výpočetní domény pro hladký profil je v celé doméně tvořena elementy HEXA typu MAP. Tato síť obsahuje celkem 2 050 000 buněk s kvalitou nejhoršího prvku 0,570596. Při kontrole kvality v programu Fleunt byla zjištěna hodnota Minimum Orthogonal Quality = 6,23994e-01. Tato hodnota se pohybuje v rozmezí 0 a 1, kdy 0 koresponduje s nejnižší kvalitou sítě. A hodnota Maximum Aspect ratio je v této síti rovna 2,53396e+01. Což jsou pro náš případ dostačující výsledky.



Obrázek 16: Rozvržení domény pro hladkou lopatku – program Gambit (pohled kolmý na směr proudu)



*Obrázek 17: Rozvržení sítě kolem hladkého profilu lopatky (Gambit)*

V programu Gambit bylo nutné předepsat základní okrajové podmínky. Na povrch lopatky byla předepsána okrajová podmínka WALL, tj. podmínka ulpívání. Stejně tak byla předepsána podmínka WALL pro stěny výpočetní domény. Pro vstupní část domény pak byla předepsána okrajová podmínka velocity-inlet a pro výstupní část podmínka pressure-outlet. Protože nás zajímá proudění v lopatkové mříži, byla na horní a spodní straně domény zvolena podmínka WALL, ze které byla následně v programu Fluent 14.0 vytvořena periodická okrajová podmínka, která způsobí, že je s doménou počítáno tak, jako by jich bylo více a byly naskládány těsně nad sebou. Tím dosáhneme simulace proudění v lopatkové mříži.

### 6.3 Nastavení výpočtu (Fluent 14.0)

Veškeré výpočty byly prováděny pomocí programu Fluent 14.0, kde byl jako výpočetní model pro tuto úlohu zvolen model  $k-\varepsilon$  realizable. V blízkosti stěny pak funkce Non Equilibrium Wall Function, která platí pro nerovnovážné mezní vrstvy.

Jelikož se jedná o úlohu lopatky vodní turbíny, byla jako proudící médium (jednotlivé buňky) zvolena voda.

Pro vstup do domény bylo nutné upřesnit některé okrajové podmínky zadávané dříve v programu Gambit, tj. zadat některé vstupní parametry, které byly součástí zadání pro výpočet vírové turbíny. Rychlost  $v = 9,87 \text{ m/s}$  byla zadávána v kartézském souřadnicovém systému pro jednotlivé směry  $x, y$  podle aktuálního úhlu náběhu proudu. Pro dokonalé pokrytí vlastností proudění kolem profilu, bylo nutné postupně měnit úhel náběhu  $\alpha$  a to v našem případě od  $\alpha = -40^\circ$  do  $\alpha = 40^\circ$  vždy po 10ti stupních, tedy 9 výpočetních nastavení pro jednu

lopatku. Pro zadání turbulentních veličin jsme zvolili intenzitu turbulence 10% a hydraulický průměr 0,075m.

Pro výstup byla na hranici domény zvolena okrajová podmínka pressure-outlet a pro výstupní turbulenci zde byla zvolena intenzita turbulence 20% a hydraulický průměr 0,075m.

Pro samotný výpočet bylo potřeba zvolit diskretizační schémata, se kterými se následně počítalo. Ty jsou zobrazeny v tabulkách č. 1 a 2. Tyto metody výpočtu byly stejné i v případě lopatek s tvarovanou náběžnou hranou.

V prvním kroku výpočtu se počítalo s metodami:

|                            |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| Scheme                     | SIMPLE                   |
| Gradient                   | Least Squares Cell Based |
| Pressure                   | Standard                 |
| Momentum                   | First Order Upwind       |
| Turbulent Kinetic Energy   | First Order Upwind       |
| Turbulent Dissipation Rate | First Order Upwind       |
| Transient Formulation      | First Order Upwind       |

*Tabulka 1: Nastavení výpočtu ve Fluentu pro první část výpočtu*

Po průběhu určitého počtu iterací, kdy už docházelo ke konvergenci residuí, byl výpočet přepnut na vyšší řád přesnosti pro dosažení lepších výsledků.

|                            |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| Scheme                     | SIMPLE                   |
| Gradient                   | Least Squares Cell Based |
| Pressure                   | Standard                 |
| Momentum                   | QUICK                    |
| Turbulent Kinetic Energy   | Second Order Upwind      |
| Turbulent Dissipation Rate | Second Order Upwind      |
| Transient Formulation      | First Order Upwind       |

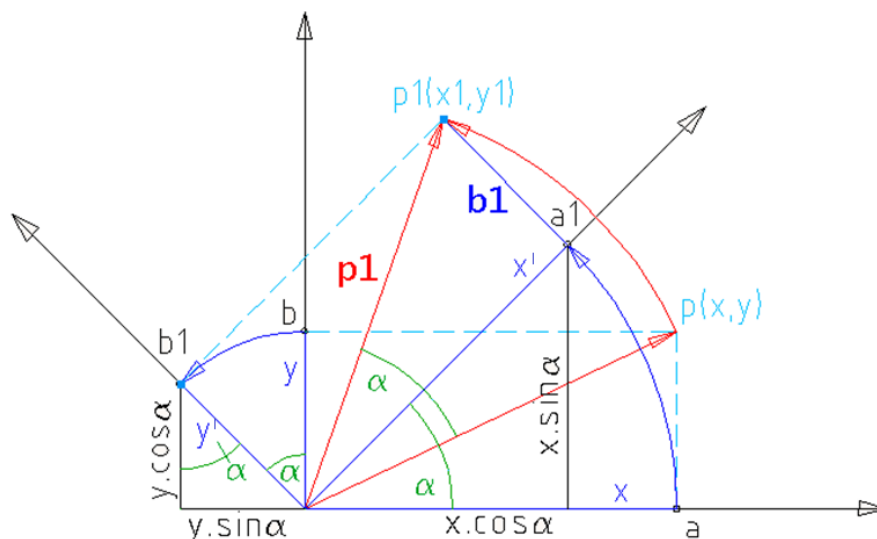
*Tabulka 2: Nastavení výpočtu ve Fluentu pro druhou část výpočtu*

Při vyšších úhlech náběhu  $\alpha$  docházelo k nestacionárnímu proudění. V té chvíli bylo potřeba změnit výpočet na nestacionární (transient). Diskretizační schéma pro nestacionární člen bylo změněno na Second Order Upwind. Při nestacionárním proudění probíhal výpočet s časovým krokem 0,001s, s maximem iterací na časový krok roven 20.

Pro srovnání lopatek, jak už s hladkou náběžnou hranou, tak s tvarovanou náběžnou hranou, jsou pro nás rozhodující výsledky vztakových a odporových součinitelů. Ty byly průběžně zaznamenávány pro každý úhel náběhu. Pro nestacionární proudění nás zajímala jejich střední hodnota, abychom je mohli vynést do grafu v závislosti na úhlu náběhu k porovnání jednotlivých lopatek. Hodnoty součinitelů vztaku  $c_l$  a odporu  $c_d$  byly zaznamenány v souřadnicích  $c_y$  a  $c_x$ , proto bylo nutné tyto hodnoty přepočítat.

### 6.4 Přepočet $c_x$ a $c_y$ na $c_d$ a $c_l$

Přepočet hodnot součinitele odporu  $c_x$  a součinitele vztlaku  $c_y$ , získané výpočtem z programu Fluent, na  $c_d$  a  $c_l$ , potřebných pro srovnání lopatek, spočíval v transformaci souřadnic v 2D systému, jelikož souřadnice  $z$  pro nás byla neměnná. Jednalo se o rotaci souřadného systému o úhel  $\alpha$ , viz obrázek 18. Kde  $x = c_x$ ,  $y = c_y$ ,  $x' = c_d$  a  $y' = c_l$ .



Obrázek 18: Rotace souřadného systému

$$\begin{aligned}\vec{a}_1 &= (x \cdot \cos\alpha, x \cdot \sin\alpha) \\ \vec{b}_1 &= (-y \cdot \sin\alpha, y \cdot \cos\alpha) \\ \vec{p}_1 &= \vec{a}_1 + \vec{b}_1\end{aligned}$$

Pro otáčení v rovině o úhel  $\alpha$  kolem počátku souřadného systému platí vztah:

$$\begin{aligned}x' &= x \cdot \cos\alpha - y \cdot \sin\alpha \\ y' &= x \cdot \sin\alpha + y \cdot \cos\alpha\end{aligned}$$

V maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

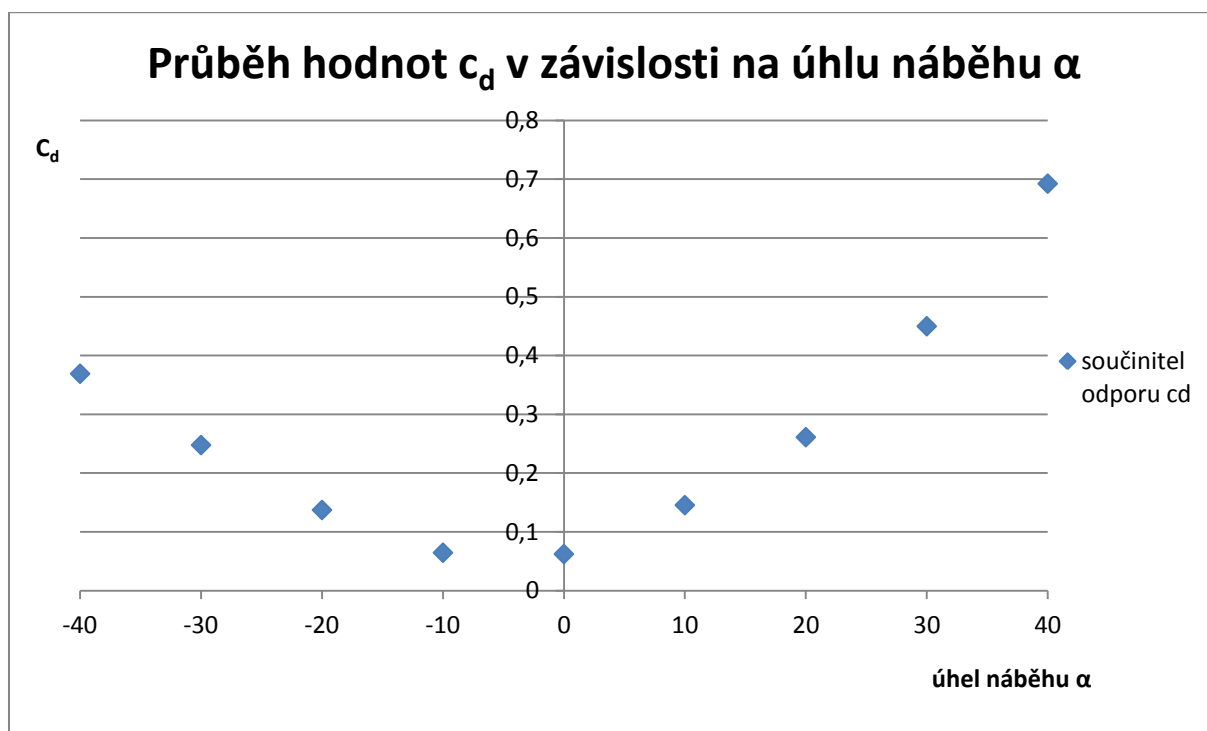
## 6.5 Výsledné součinitele odporu a vztlaku

Přepočítané hodnoty součinitele vztlaku a odporu pro jednotlivé úhly náběhu lopatky s hladkou náběžnou hranou jsou vidět v následující tabulce 3 a dále v grafech na obrázcích 19 a 20.

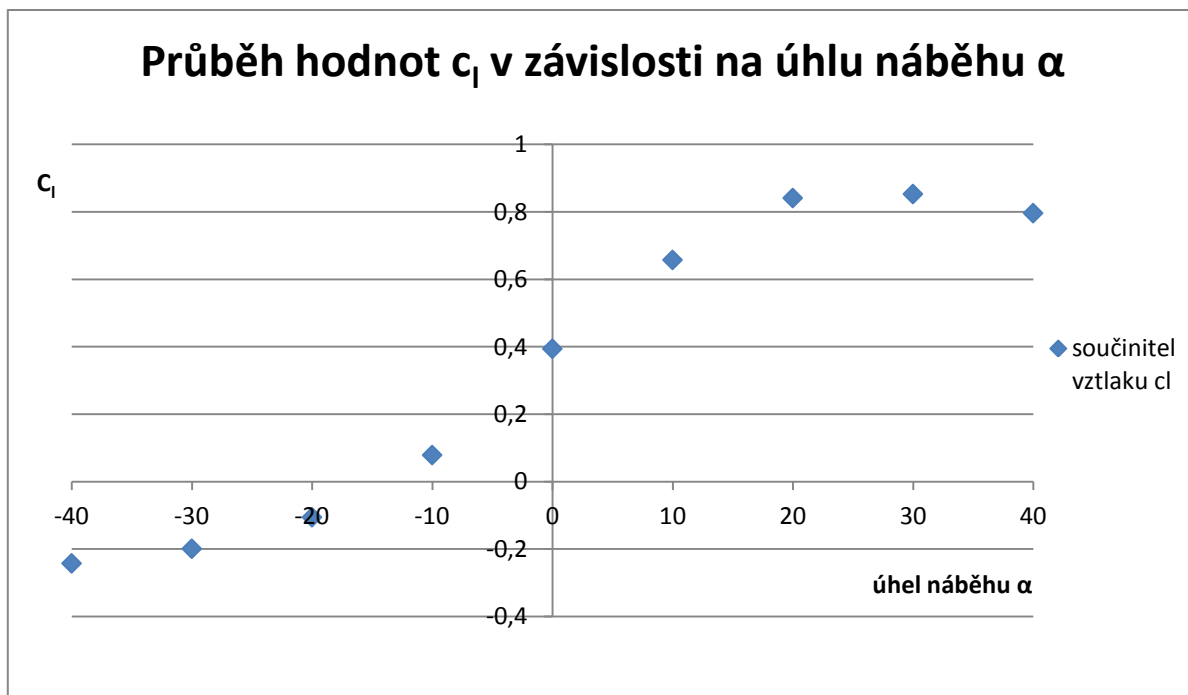
| $\alpha$ | -40      | -30      | -20     | -10     | 0       |
|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| $c_d$    | 0,3688   | 0,24748  | 0,13697 | 0,06431 | 0,06199 |
| $c_l$    | -0,24223 | -0,19876 | -0,1054 | 0,07908 | 0,39447 |

| $\alpha$ | 10      | 20      | 30      | 40      |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| $c_d$    | 0,14524 | 0,26086 | 0,44967 | 0,69229 |
| $c_l$    | 0,65792 | 0,8415  | 0,85343 | 0,79667 |

Tabulka 3: Přepočítané hodnoty součinitelů vztlaku a odporu



Obrázek 19: Hodnoty součinitele odporu  $c_d$  v závislosti na úhlu náběhu pro hladký profil



Obrázek 20: Hodnoty součinitele vztlaku  $c_l$  v závislosti na úhlu náběhu pro hladký profil

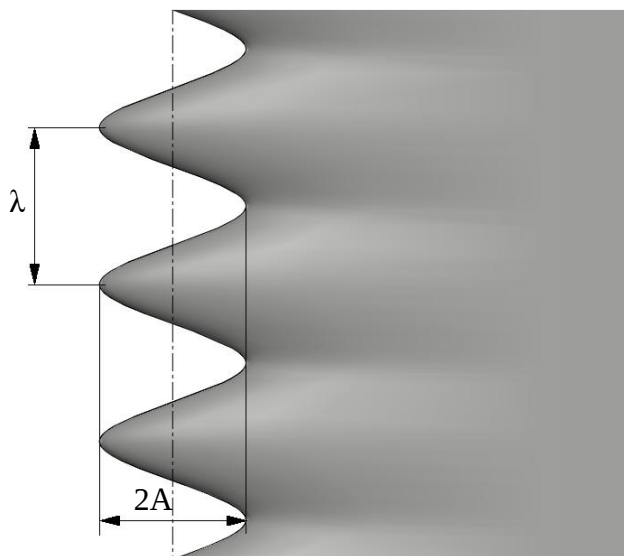
Další částí této diplomové práce byla tvorba tvarovaných náběžných hran lopatek vírové turbíny a zjištění hodnot  $c_d$  a  $c_l$  v závislosti na úhlu náběhu  $\alpha$ , které bychom porovnali s hodnotami  $c_d$  a  $c_l$  pro lopatku s hladkou náběžnou hranou. Veškeré výsledky a srovnání jednotlivých lopatek mezi sebou se nacházejí v kapitole 8

## 7 Modifikovaná náběžná hrana lopatky vírové turbíny

Tato kapitola představuje lopatky s různou modifikací (tvarem) náběžné hrany od geometrie až k samotným výpočtům. Při tvorbě tvarovaných lopatek byla snaha vycházet z předchozích studií, které byly inspirované právě hrbolatou ploutví mořského savce keporkaka.

### 7.1 Geometrie tvarovaných náběžných hran

Lopatky s tvarovanou náběžnou hranou byly tvořeny pro odlišné amplitudy a odlišné vlnové délky. Celkem bylo vytvořeno 11 různých lopatek s tvarovanou náběžnou hranou označených písmeny A až K. Amplituda se u těchto lopatek pohybuje od  $0,00189c$  do  $0,025c$ , s vlnovou délkou od  $0,025c$  do  $0,054c$ , kde  $c$  je délka tětivy. Vlnová délka byla volena s ohledem na počet hrbolků. U lopatek A až I byly vlnové délky hrbolků voleny podle počtu hrbolků na lopatce. Počet hrbolků byl v našem případě u lopatek A až I zvolen 7, 10 a 15. Z toho následně vyšla vlnová délka jako podíl šířky lopatky a počtu hrbolků. Hrbolky na těchto lopatkách jsou menší z důvodu zjištění vlivu tvarované náběžné hrany s menší amplitudou. U lopatek J a K byla amplituda větší, abychom do studie zahrnuli větší rozmezí použitých amplitud a jejich vlivu na proudění kolem lopatky. Na obrázku 21 jsou znázorněny amplitudy s vlnovou délkou, které byly specifické pro každou modifikovanou náběžnou hranu lopatky. Jednotlivé hodnoty použitých amplitud a vlnových délek lopatek A až K jsou vidět v tabulce 4. Šířka lopatek  $s = 0,075\text{m}$  byla stejná pro všechny lopatky.



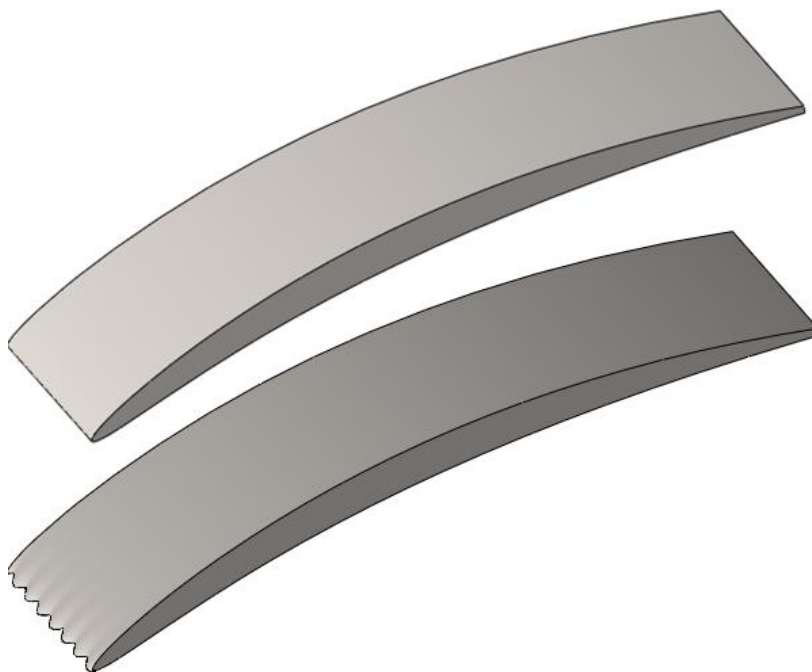
Obrázek 21: Základní geometrie pro tvorbu tvarované lopatky, kde  $A$  značí amplitudu a  $\lambda$  vlnovou délku

| Lopatka            | A     | B      | C     | D    | E      | F    | G     |
|--------------------|-------|--------|-------|------|--------|------|-------|
| Amplituda [mm]:    | 0,375 | 0,375  | 0,375 | 0,75 | 0,75   | 0,75 | 1,125 |
| Vlnová délka [mm]: | 7,5   | 10,714 | 5     | 7,5  | 10,714 | 5    | 7,5   |
| Počet hrbolků [-]: | 10    | 7      | 15    | 10   | 7      | 15   | 10    |

| Lopatka            | H     | I   | J  | K   |
|--------------------|-------|-----|----|-----|
| Amplituda [mm]:    | 1,125 | 3   | 5  | 5   |
| Vlnová délka [mm]: | 5     | 10  | 5  | 10  |
| Počet hrbolků [-]: | 15    | 7,5 | 15 | 7,5 |

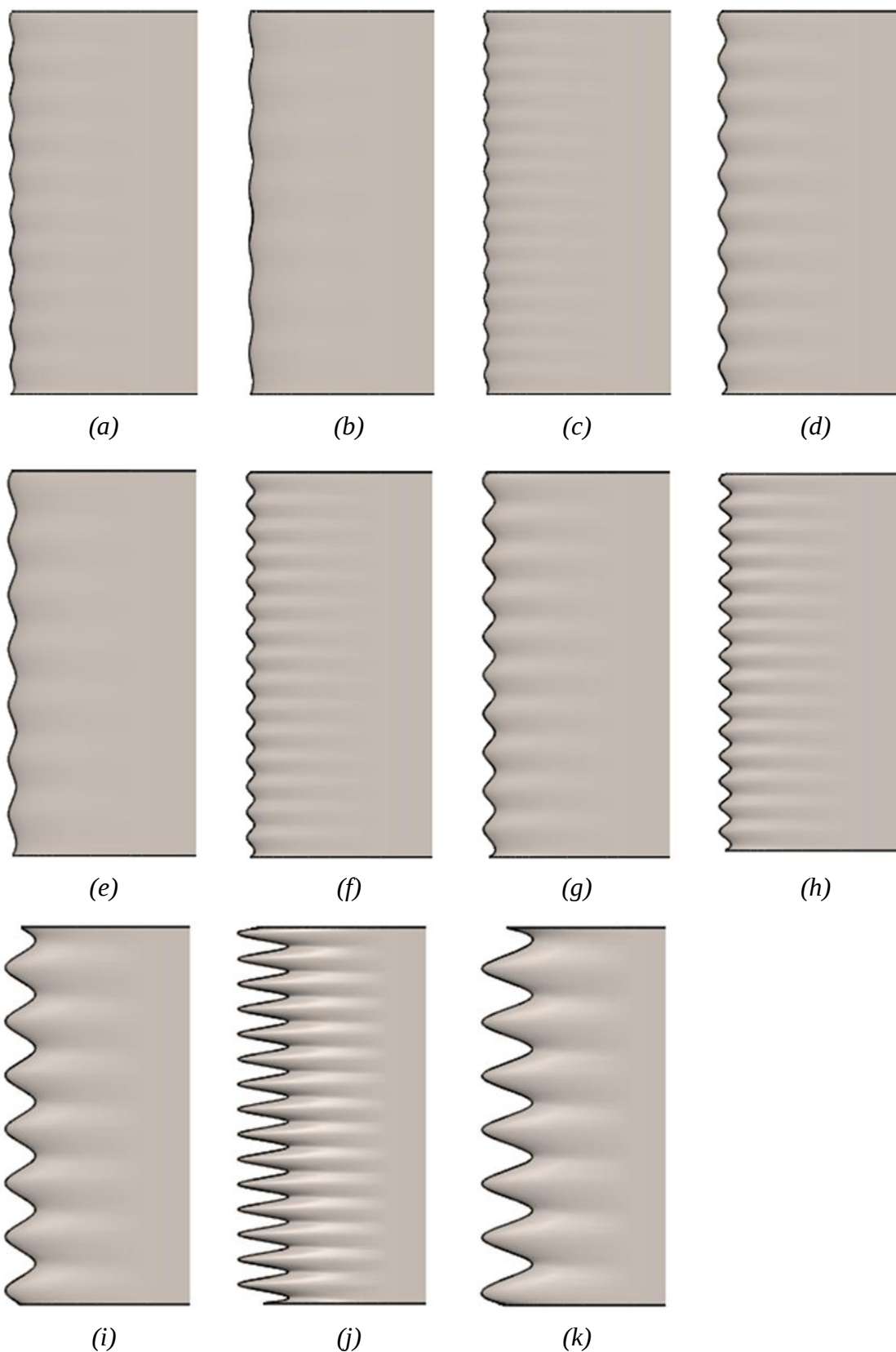
Tabulka 4: Výchozí charakteristika jednotlivých lopatek

Při tvorbě tvarovaných lopatek bylo nutné pro porovnání výsledků dodržet plochu lopatky při promítnutí do osy  $y$ , abychom měli stejné podmínky pro výpočet a porovnání jednotlivých lopatek. Na obrázku 22 jsou vidět rozdíly ve tvaru náběžné hrany. Zbytek lopatky, jak je vidět z obrázku, zůstává nezměněn.



Obrázek 22: 3D model lopatky vírové turbíny s hladkou náběžnou hranou a lopatky s modifikovanou náběžnou hranou, vytvořené v programu SolidWorks 2011

Přehled tvaru modifikovaných náběžných hran jednotlivých lopatek s šířkou  $s = 0,075\text{m}$  je znázorněn na obrázku č. 23.



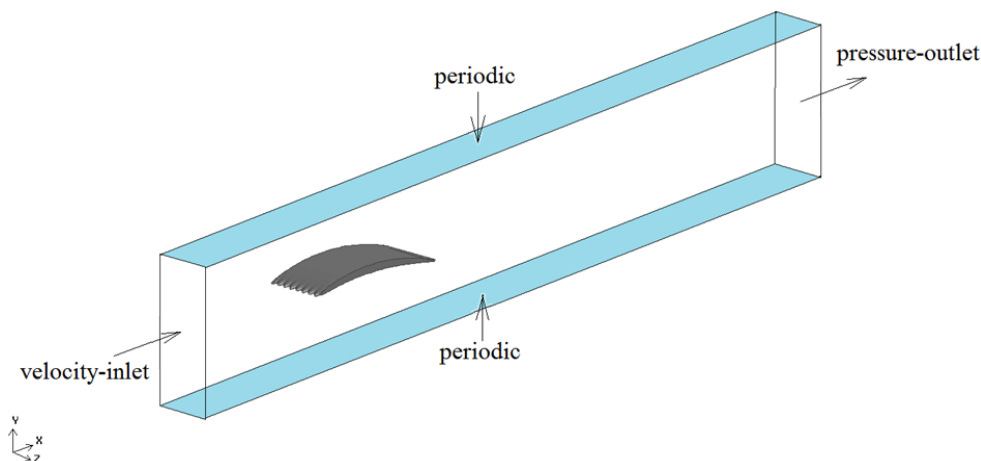
Obrázek 23: Modifikovaná náběžná hrana lopatky vírové turbíny s tvarovanou náběžnou hranou: (a) lopatka A; (b) lopatka B; (c) lopatka C; (d) lopatka D; (e) lopatka E; (f) lopatka F; (g) lopatka G; (h) lopatka H; (i) lopatka I; (j) lopatka J; (k) lopatka K

## 7.2 Výpočetní doména (Gambit 2.4.6)

Každá modifikovaná lopatka byla vytvořena v programu SolidWorks 2011, z něhož byla následně převedena do programu Gambit 2.4.6. V programu Gambit byla k lopatce vytvořena výpočetní doména, dále také celá síť, včetně okrajových podmínek.

Jako výchozí geometrie byla pro tvorbu tvarované náběžné hrany v programu SolidWorks 2011 použita geometrie profilu hladké lopatky. Z ní byl následně vytvořen 3D model celé lopatky, odpovídající zbytkem rozměrů původní hladké lopatce. Změna oproti hladkému profilu tedy byla v tvarované náběžné hraně, kdy ovlivněná oblast lopatky je zhruba 10% z délky tělivity (cca 20mm). Velikosti amplitud a vlnových délek, které předepisují, jak bude náběžná hrana vypadat, jsou uvedeny v tabulce 4. Jednotlivé modifikované náběžné hrany lopatek jsou na obrázku 23. Po vytvoření modifikovaných lopatek A až K programem SolidWorks 2011 je bylo nutné převést z formátu SLDPRT do formátu IGES. Dále došlo k jejich upravení v programu Gambit 2.4.6, kde bylo nutné vytvořit celou výpočetní doménu, včetně sítě a okrajových podmínek.

Velikost výpočetní domény všech typů lopatek s tvarovanou náběžnou hranou byla stejná jako velikost výpočetní domény (obrázek 24) pro základní model s hladkou náběžnou hranou. Tedy šířka výpočetní domény shodná s šířkou lopatky  $s = 0,075\text{m}$ , výška výpočetní domény  $0,2\text{m}$  a délka  $1,2\text{m}$ . Lopatka byla umístěna ve vzdálenosti  $0,2\text{m}$  od vstupu do domény ve výšce  $0,5c$ , kde  $c$  je délka tělivity, stejně jak tomu bylo u hladkého profilu.

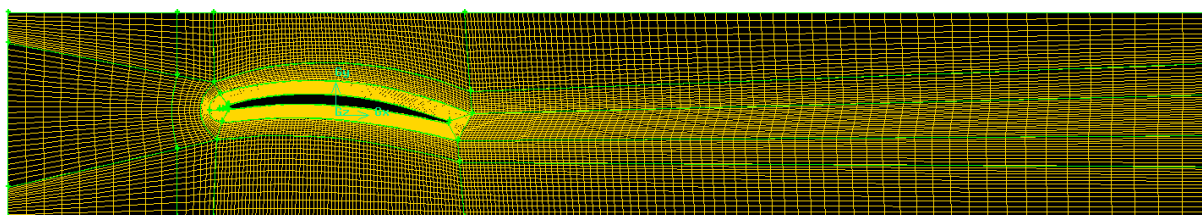


Obrázek 24: Zjednodušená výpočetní doména pro lopatku s tvarovanou náběžnou hranou

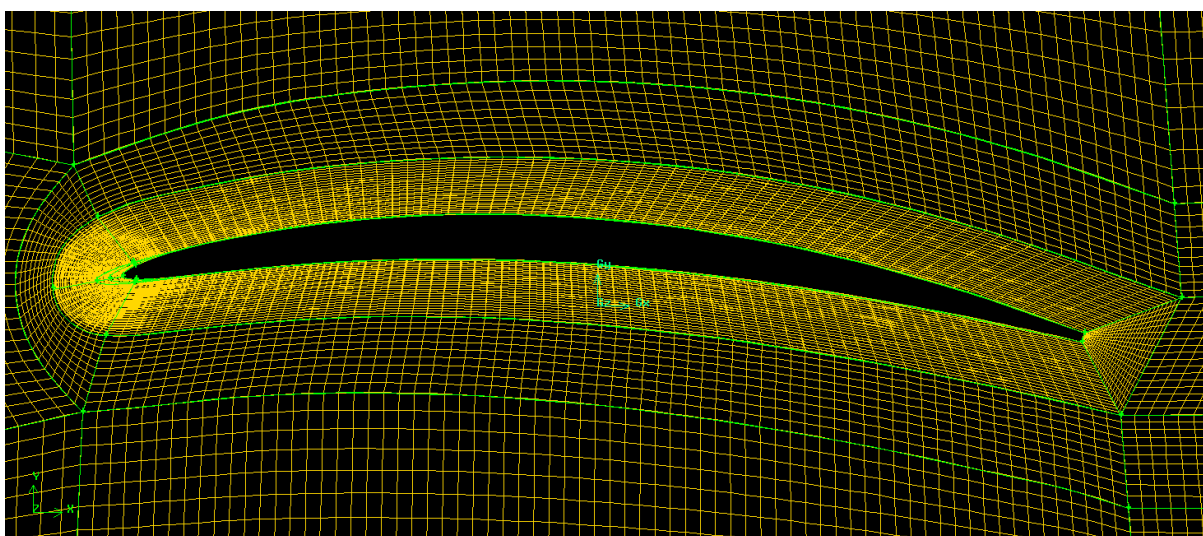
Co se týče rozložení jednotlivých částí (objemů) celé výpočetní domény, bylo nutno provést několik úprav. A to zejména rozdělením objemů na menší. Při zachování původní kompozice s původním počtem objemů docházelo k deformaci tvarované náběžné hrany lopatky, což bylo nepříjemné.

Dále bylo nutné, z hlediska komplikovanější geometrie náběžné hrany, zvýšit i počty buněk jednotlivých sítí. Tato část byla složitější, protože bylo zapotřebí hledat optimální

kompromis mezi kvalitou sítě a přijatelným počtem buněk pro výpočet. Čím byla geometrie lopatky komplikovanější, tím větší problém byl toho dosáhnout. Proto je kvalita nejhoršího prvku u lopatek s tvarovanou náběžnou hranou vyšší, než je tomu u lopatky s hladkou náběžnou hranou. Na obrázku 25 je znázorněna síť celé domény a na obrázku 26 potom detailnější pohled na síť kolem profilu modifikované lopatky. Jak je vidět z obrázků je síť v oblasti těsného okolí lopatky více nahuštěná a zejména pak v oblasti tvarované náběžné hrany. Pro veškeré domény jednotlivých lopatek je síť tvořena elementy HEXA typu MAP. V tabulce č. 5 jsou uvedeny přesnější informace o kvalitě sítě a počtu buněk.



*Obrázek 25: Rozvržení sítě v celé výpočetní doméně (lopatka M)*



*Obrázek 26: Detailnější rozvržení sítě kolem profilu (lopatka M)*

|                           |           |           |           |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Lopatka:                  | A         | B         | C         |
| Počet buněk:              | 2 050 000 | 2 050 000 | 2 050 000 |
| Kvalita nejhoršího prvku: | 0,682684  | 0,613329  | 0,620637  |

|                           |           |           |           |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Lopatka:                  | D         | E         | F         |
| Počet buněk:              | 2 460 000 | 2 050 000 | 2 460 000 |
| Kvalita nejhoršího prvku: | 0,768791  | 0,659522  | 0,788915  |

|                           |           |           |           |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Lopatka:                  | G         | H         | I         |
| Počet buněk:              | 2 460 000 | 2 460 000 | 2 668 680 |
| Kvalita nejhoršího prvku: | 0,761086  | 0,798279  | 0,682251  |

|                           |           |           |
|---------------------------|-----------|-----------|
| Lopatka:                  | J         | K         |
| Počet buněk:              | 2 417 040 | 2 169 900 |
| Kvalita nejhoršího prvku: | 0,83187   | 0,80642   |

*Tabulka 5: Informace o velikosti a kvalitě sítě k jednotlivým lopatkám A až K*

Okrajové podmínky jsou v případě modifikovaných lopatek stejné jako u lopatky s hladkou náběžnou hranou. Jak již bylo řečeno u lopatky s hladkou náběžnou hranou, zajímá nás i v případě tvarovaných náběžných hran proudění v lopatkové mříži. Proto je na horní i spodní straně výpočetní domény přiřazena periodická podmínka.

### 7.3 Nastavení výpočtu (Fluent 14.0)

Při výpočtu samotného proudění v programu Fluent 14.0 bylo nutné dodržet nastavení výpočtu tak, aby bylo možné lopatky mezi sebou porovnávat a to především s lopatkou hladkou. Jako výpočetní model byl tedy opět zvolen model k- $\epsilon$  realizable. V blízkosti stěny pak funkce Non Equilibrium Wall Function. Stejně tak upřesnění okrajové podmínky velocity-inlet, kdy byla zachována rychlost  $v = 9,87$  m/s, při intenzitě turbulence 10% s hydraulickým průměrem 0,075m. Pro okrajovou podmínku pressure outlet byla výstupní turbulence 20% s hydraulickým průměrem 0,075m, stejně jako tomu bylo u hladkého profilu.

Pro každou modifikovanou lopatku s tvarovanou náběžnou hranou bylo potřeba provést 9 výpočtů. A to pro různé úhly náběhu, kdy se úhel náběhu  $\alpha$  pohyboval po 10ti stupních od  $\alpha = -40^\circ$  do  $\alpha = 40^\circ$ .

Diskretizační schémata pro výpočet tvarované náběžné hrany byly voleny stejně jako pro lopatku s hladkou náběžnou hranou. Díky tomu se nám dostalo lepšího srovnání jednotlivých lopatek mezi sebou. Tyto metody jsou uvedeny v kapitole 6, tabulka 1 a 2. Při nestacionárním proudění u vyšších úhlů náběhu  $\alpha$  bylo nutné přepnout diskretizační schéma pro nestacionární výpočet na vyšší řád přesnosti (Second Order Upwind). Opět s časovým krokem 0,001s s maximem iterací na časový krok roven 20.

## 8 Srovnání lopatek

Při samotném výpočtu byly průběžně zaznamenávány hodnoty součinitele odporu  $c_d$  a vztlaku  $c_l$ . Na základě těchto získaných hodnot můžeme lopatky mezi sebou srovnávat.

### 8.1 Vyhodnocení $c_d$ a $c_l$

Obecnou sílu působící na lopatku je možno rozložit do dvou složek: odporu, který se promítá do směru rovnoběžného s nabíhajícím proudem a dále vztlaku, který je složkou kolmou na směr nabíhajícího proudu. Monitorované hodnoty  $c_x$  a  $c_y$  proto bylo nutné přepočítat (viz kapitola 6.4) na hodnoty  $c_d$  a  $c_l$ , abychom dostali charakteristiku jednotlivých lopatek a mohli provést jejich srovnání.

Hodnoty dosažené u tvarovaných lopatek jsou spolu s hladkým profilem zaznamenány v tabulce 6 a pro názornější přehled jsou vyneseny do grafů, viz obrázek 27 a 28. Hodnoty, které v tabulce 6 chybí, nebyly z důvodu výpočetní časové náročnosti zaznamenány.

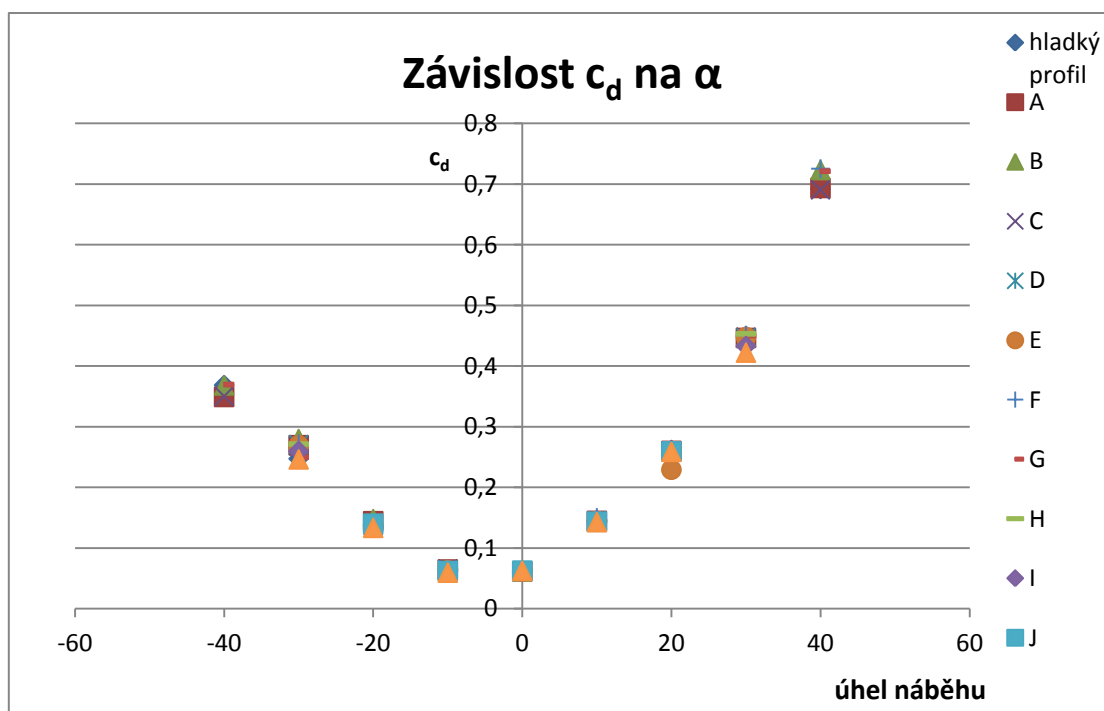
Z výsledků uvedených v tabulce 6 není příliš patrné, zda je tvarovaná náběžná hrana na lopatce vírové turbíny přínosem, ovšem při pohledu na následující grafy na obrázcích 27 a 28 jsou již patrné drobné odchylky ve velikostech vztlaku a odporu.

|          | Hladký profil |         | Lopatka A |         | Lopatka B |         | Lopatka C |         |
|----------|---------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| $\alpha$ | cd            | cl      | cd        | cl      | cd        | cl      | cd        | cl      |
| 40       | 0,69229       | 0,79667 | 0,69383   | 0,79761 | 0,72335   | 0,82867 | 0,69074   | 0,79524 |
| 30       | 0,44967       | 0,85343 | 0,44651   | 0,85329 | 0,44739   | 0,85219 | 0,44798   | 0,85354 |
| 20       | 0,26086       | 0,8415  | 0,26033   | 0,84042 | 0,26039   | 0,84034 | 0,26045   | 0,83944 |
| 10       | 0,14524       | 0,65792 | 0,14495   | 0,65696 | 0,14496   | 0,65692 | 0,14498   | 0,65683 |
| 0        | 0,06199       | 0,39447 | 0,06181   | 0,39381 | 0,06182   | 0,39382 | 0,06195   | 0,39375 |
| -10      | 0,06431       | 0,07908 | 0,06473   | 0,06293 | 0,06429   | 0,08015 | 0,06582   | 0,06037 |
| -20      | 0,13697       | -0,1054 | 0,14438   | -0,1155 | 0,14779   | -0,1522 | 0,13704   | -0,1063 |
| -30      | 0,24748       | -0,1988 | 0,26967   | -0,256  | 0,27989   | -0,2798 | 0,26833   | -0,2538 |
| -40      | 0,3688        | -0,2422 | 0,34925   | -0,2099 | 0,36835   | -0,2413 | 0,35047   | -0,2117 |

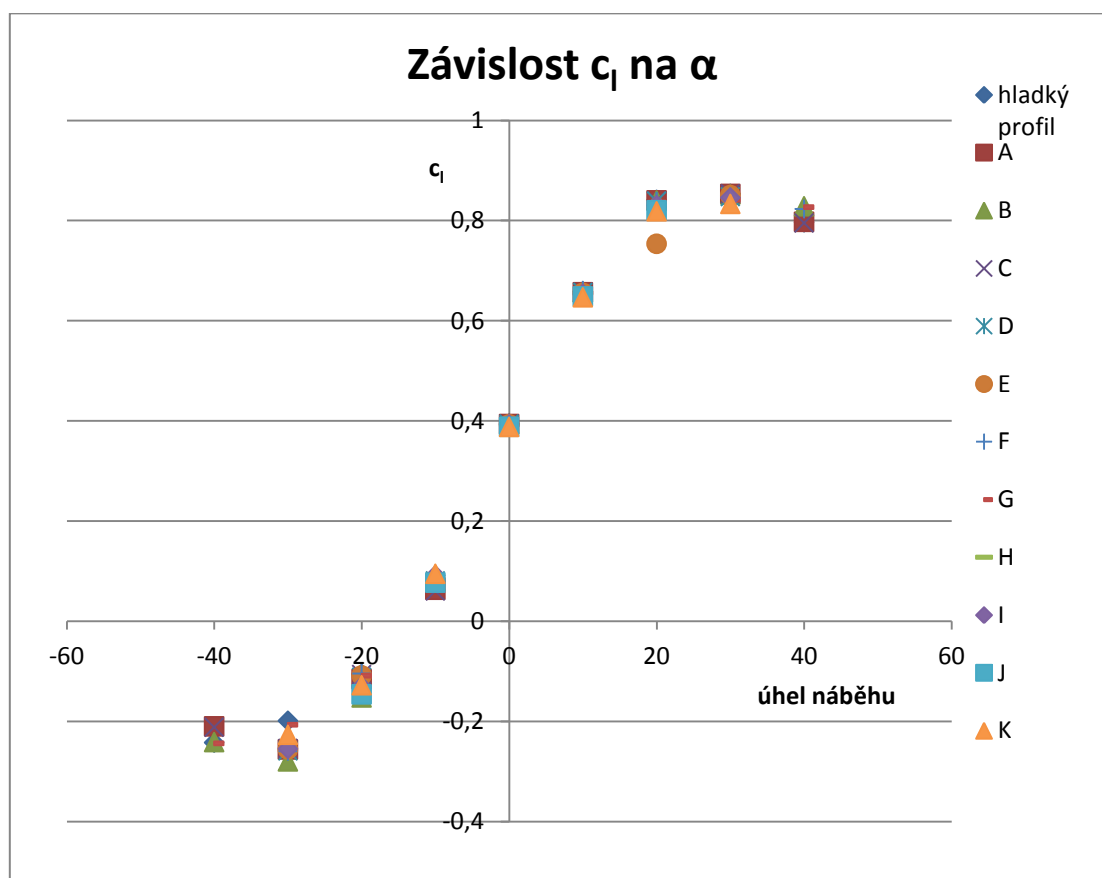
|          | Lopatka D |         | Lopatka E |         | Lopatka F |         | Lopatka G |         |
|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| $\alpha$ | cd        | cl      | cd        | cl      | cd        | cl      | cd        | cl      |
| 40       | -         | -       | -         | -       | 0,72563   | 0,82324 | 0,72146   | 0,82696 |
| 30       | 0,44676   | 0,84782 | 0,44803   | 0,85097 | 0,45115   | 0,84709 | 0,45063   | 0,84195 |
| 20       | 0,2604    | 0,83888 | 0,22932   | 0,75369 | 0,26069   | 0,83828 | 0,26036   | 0,83635 |
| 10       | 0,14492   | 0,6566  | 0,14472   | 0,6558  | 0,15061   | 0,66093 | 0,14472   | 0,65559 |
| 0        | 0,06181   | 0,39348 | 0,06173   | 0,39319 | 0,06169   | 0,3933  | 0,06196   | 0,39312 |
| -10      | 0,06394   | 0,08067 | 0,06335   | 0,08267 | 0,06361   | 0,0794  | 0,0637    | 0,08197 |
| -20      | 0,13787   | -0,1118 | 0,13714   | -0,1081 | 0,13673   | -0,1044 | 0,13694   | -0,1087 |
| -30      | 0,27086   | -0,2588 | 0,26941   | -0,256  | 0,27183   | -0,2595 | 0,24979   | -0,2067 |
| -40      | -         | -       | -         | -       | -         | -       | 0,3697    | -0,2438 |

|          | Lopatka H |         | Lopatka I |         | Lopatka J |         | Lopatka K |         |
|----------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| $\alpha$ | cd        | cl      | cd        | cl      | cd        | cl      | cd        | cl      |
| 40       | -         | -       | -         | -       | -         | -       | -         | -       |
| 30       | 0,45333   | 0,84363 | 0,43329   | 0,84599 | -         | -       | 0,42239   | 0,83338 |
| 20       | 0,26066   | 0,83621 | 0,26176   | 0,83071 | 0,25952   | 0,82069 | 0,25879   | 0,81865 |
| 10       | 0,14463   | 0,65548 | 0,14524   | 0,65351 | 0,14353   | 0,64864 | 0,14284   | 0,64692 |
| 0        | 0,06183   | 0,39268 | 0,06291   | 0,39278 | 0,0629    | 0,38839 | 0,06268   | 0,38806 |
| -10      | 0,06453   | 0,07808 | 0,06144   | 0,09145 | 0,06234   | 0,0771  | 0,05955   | 0,09478 |
| -20      | 0,13684   | -0,1037 | 0,13432   | -0,1305 | 0,14026   | -0,1459 | 0,13343   | -0,1277 |
| -30      | 0,2716    | -0,2587 | 0,26018   | -0,2546 | -         | -       | 0,24627   | -0,2267 |
| -40      | -         | -       | -         | -       | -         | -       | -         | -       |

Tabulka 6: Hodnoty součinitelů  $cd$  a  $cl$  pro jednotlivé lopatky



Obrázek 27: Závislost součinitele odporu na úhlu náběhu pro všechny typy lopatek



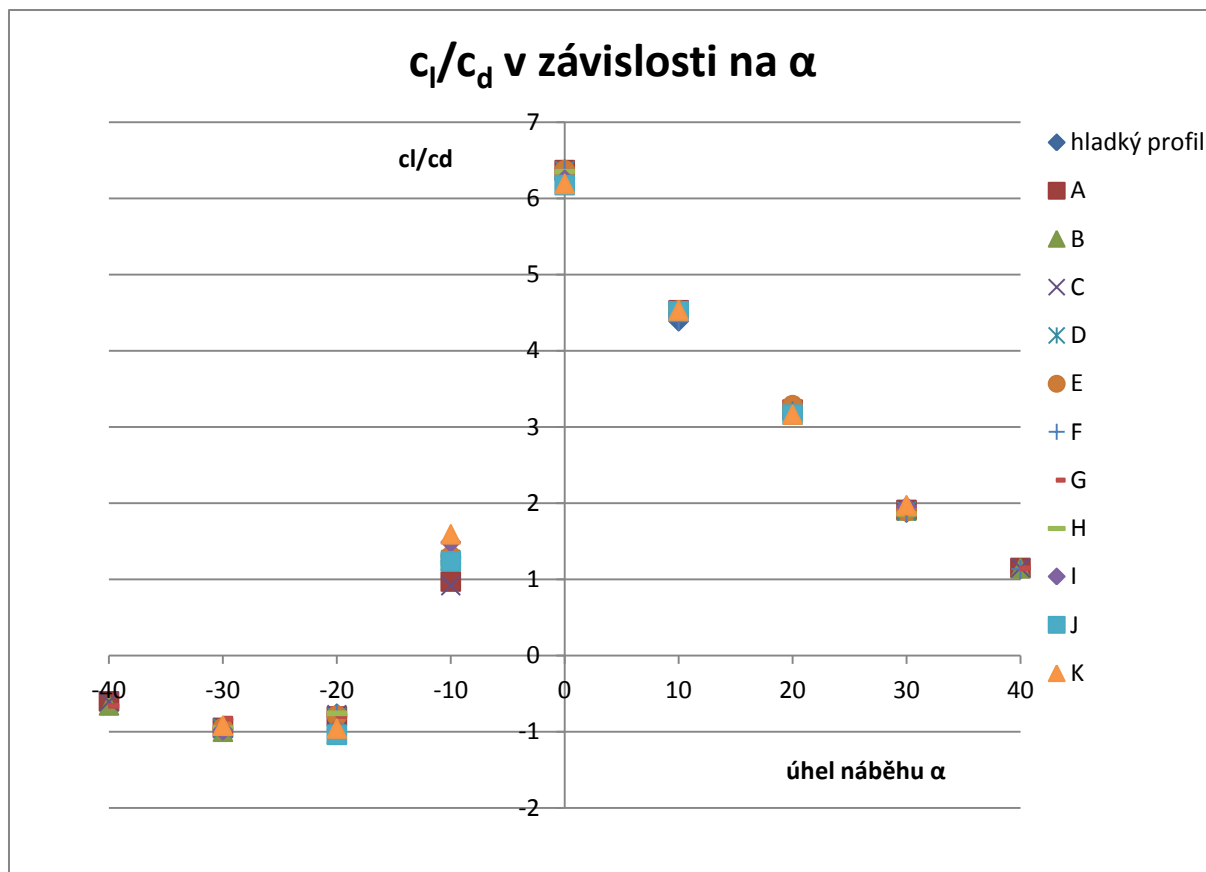
Obrázek 28: Závislost součinitele vztlaču na úhlu náběhu pro všechny typy lopatek

Pro následující vyhodnocení výsledků je v tabulce 7 uveden podíl součinitele vztlaku a odporu ( $c_l/c_d$ ) při daném úhlu náběhu. V aerodynamice se tento podíl  $c_l/c_d$  nazývá aerodynamická jemnost (klouzavost). Ta nám umožňuje efektivně využívat energii proudu. Čím větší je podíl  $c_l/c_d$ , tím je využití proudu pro danou lopatku efektivnější.

| $\alpha$ | Hladký profil | A       | B       | C       | D       | E       | F       | G       |
|----------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 40       | 1,150778      | 1,14958 | 1,14559 | 1,1513  | -       | -       | 1,13451 | 1,14622 |
| 30       | 1,897896      | 1,91103 | 1,90483 | 1,9053  | 1,8977  | 1,89935 | 1,87762 | 1,86837 |
| 20       | 3,225816      | 3,22825 | 3,22724 | 3,22302 | 3,22149 | 3,28659 | 3,21563 | 3,21232 |
| 10       | 4,529920      | 4,53246 | 4,53166 | 4,53059 | 4,53074 | 4,53159 | 4,38822 | 4,52993 |
| 0        | 6,363633      | 6,37177 | 6,37023 | 6,35564 | 6,36581 | 6,36964 | 6,37529 | 6,34476 |
| -10      | 1,229659      | 0,97219 | 1,2466  | 0,91721 | 1,26167 | 1,30513 | 1,24827 | 1,28683 |
| -20      | -0,769498     | -0,8001 | -1,0298 | -0,7756 | -0,8113 | -0,7885 | -0,7637 | -0,7935 |
| -30      | -0,803164     | -0,9495 | -0,9998 | -0,9459 | -0,9556 | -0,9503 | -0,9548 | -0,8274 |
| -40      | -0,656802     | -0,6011 | -0,655  | -0,604  | -       | -       | -       | -0,6595 |

| $\alpha$ | H       | I       | K       | J       |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| 40       | -       | -       | -       | -       |
| 30       | 1,86098 | 1,9525  | 1,973   | -       |
| 20       | 3,20809 | 3,17361 | 3,16338 | 3,16232 |
| 10       | 4,53217 | 4,49957 | 4,5291  | 4,51906 |
| 0        | 6,35124 | 6,24343 | 6,19117 | 6,17456 |
| -10      | 1,20986 | 1,48841 | 1,59163 | 1,23671 |
| -20      | -0,7576 | -0,9712 | -0,9574 | -1,0405 |
| -30      | -0,9525 | -0,9786 | -0,9206 | -       |
| -40      | -       | -       | -       | -       |

Tabulka 7: Hodnoty  $c_l/c_d$  pro všechny typy lopatek v závislosti na úhlu náběhu



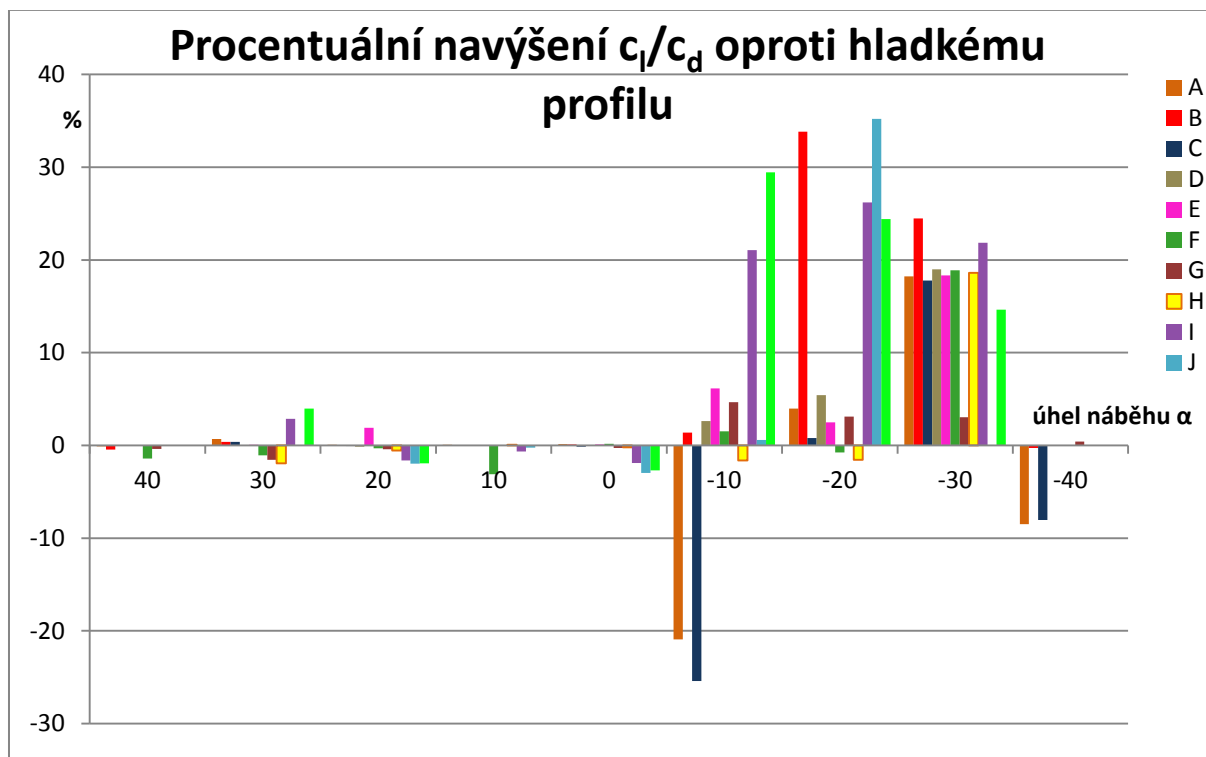
Obrázek 29: Srovnání podílu  $c_l/c_d$  v závislosti na úhlu náběhu pro všechny typy lopatek

V tabulce 8 jsou uvedeny procentuelní hodnoty o kolik se tvarované lopatky liší podílem  $c_l/c_d$  od hladkého profilu. Kladné hodnoty zaznamenali zlepšení oproti hladké lopatce, záporné hodnoty znamenají zhoršení oproti hladké lopatce. Je zde vidět, že hrbolky na náběžné hraně mají lepší výsledky u některých zkoumaných lopatek a to zejména pro záporné úhly náběhu. Prokazatelně lepších výsledků bylo dosaženo u lopatky B, I a K, které vykazují při kladných úhlech náběhu stejných vlastností jako hladká lopatka, ale při záporných úhlech náběhu ji převyšují v řádech několika procent. Lopatka B například dosahuje lepších výsledků zejména při úhlech náběhu  $\alpha = -20^\circ$ , kdy došlo k zlepšení oproti hladkému profilu o 33,8% a při  $\alpha = 30^\circ$  došlo k zlepšení vlastností  $c_l/c_d$  o 24%. Velmi uspokojivých výsledků dosáhla také lopatka I, která při úhlech náběhu  $\alpha = -10^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$  dosahuje zlepšení přes 20%. Další příznivé výsledky můžeme pozorovat u lopatky K, která má při úhlu náběhu  $\alpha = -10^\circ$  o téměř 30% lepší výsledky než hladký profil. Při úhlu náběhu  $\alpha = -20^\circ$  dosahuje lopatka K navýšení  $c_l/c_d$  o 24% oproti hladkému profilu a při  $\alpha = -30^\circ$  dosahuje navýšení o necelých 15%. Dalším kandidátem na dobré výsledky je i lopatka J, ale z důvodu časové náročnosti jednotlivých výpočtů nemůžeme s ostatními porovnat její vlastnosti při úhlech náběhu  $-30^\circ$  a  $-40^\circ$ . Všechny výsledky jsou znázorněny pro lepší přesnost v grafu na obrázku 30.

| $\alpha$ | A        | B        | C        | D        | E        | F        | G        |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 40       | -0,10411 | -0,45051 | 0,045052 | -        | -        | -1,4132  | -0,3957  |
| 30       | 0,691875 | 0,365125 | 0,390303 | -0,01017 | 0,076696 | -1,06841 | -1,55578 |
| 20       | 0,075331 | 0,044031 | -0,08663 | -0,13421 | 1,883851 | -0,31581 | -0,41847 |
| 10       | 0,056115 | 0,038429 | 0,014794 | 0,018076 | 0,036759 | -3,12807 | 0,000117 |
| 0        | 0,127903 | 0,103732 | -0,12562 | 0,034147 | 0,094327 | 0,183244 | -0,29664 |
| -10      | -20,938  | 1,377903 | -25,4095 | 2,602851 | 6,137728 | 1,513568 | 4,649415 |
| -20      | 3,977139 | 33,82684 | 0,790133 | 5,4287   | 2,47281  | -0,75343 | 3,118477 |
| -30      | 18,2192  | 24,48102 | 17,76713 | 18,98462 | 18,31449 | 18,88101 | 3,018372 |
| -40      | -8,48065 | -0,26778 | -8,03868 | -        | -        | -        | 0,415219 |

| $\alpha$ | H        | I        | J        | K        |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 40       | -        | -        | -        | -        |
| 30       | -1,94535 | 2,876889 | -        | 3,957193 |
| 20       | -0,54954 | -1,61824 | -1,96823 | -1,93537 |
| 10       | 0,049597 | -0,67007 | -0,23976 | -0,0182  |
| 0        | -0,1947  | -1,88889 | -2,97115 | -2,71019 |
| -10      | -1,61042 | 21,04273 | 0,573717 | 29,43659 |
| -20      | -1,54968 | 26,21289 | 35,21515 | 24,41708 |
| -30      | 18,58771 | 21,8454  | -        | 14,61695 |
| -40      | -        | -        | -        | -        |

Tabulka 8: Procentuální rozdíl  $c_l/c_d$  tvarovaných lopatek oproti hladkému profilu



Obrázek 30: Srovnání  $c_l/c_d$  tvarovaných lopatek s hladkým profilem (vyjádřeno v procentech)

## 8.2 Rozložení tlaku po profilu [25, 26]

Pro určení rozložení tlaku po profilu a jeho vynesení do grafu nám sloužil tlakový součinitel. Jeho hodnota se vynášela s ohledem na poloze, kde se jeho hodnota na těživě lopatky nachází.

Tlakový součinitel je bezrozměrné číslo popisující rozložení tlaku po profilu. Je odvozen z Bernoulliho rovnice za přispění jednoduchých matematických úprav, pomocí statického a dynamického tlaku v proudící tekutině.

Pokud je  $\rho = \rho_0 = \text{konstanta}$ , tak

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v^2 = p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_0^2$$

$$p - p_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot (v_0^2 - v^2)$$

potom:

$$c_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_0^2}$$

kde:

$\rho$  ... hustota [kg.m<sup>-3</sup>]

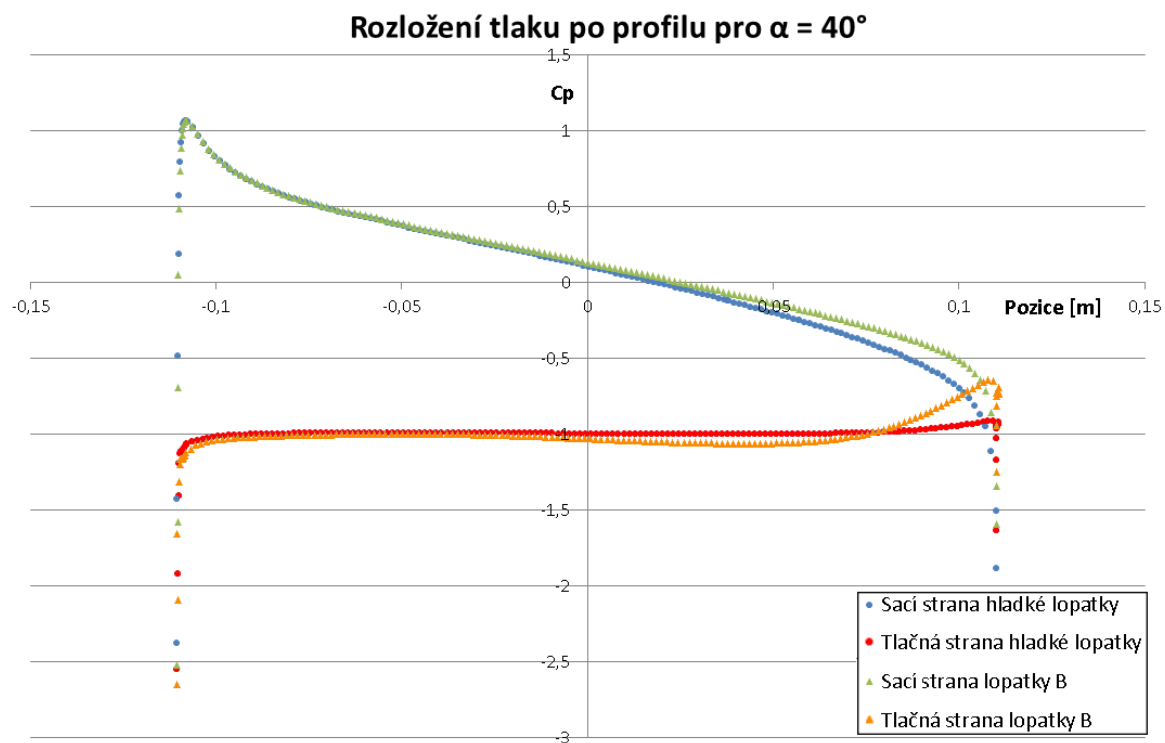
$p$  ... místní tlak na profilu [Pa]

$p_0$  ... tlak nerozrušeného proudu na vstupu [Pa]

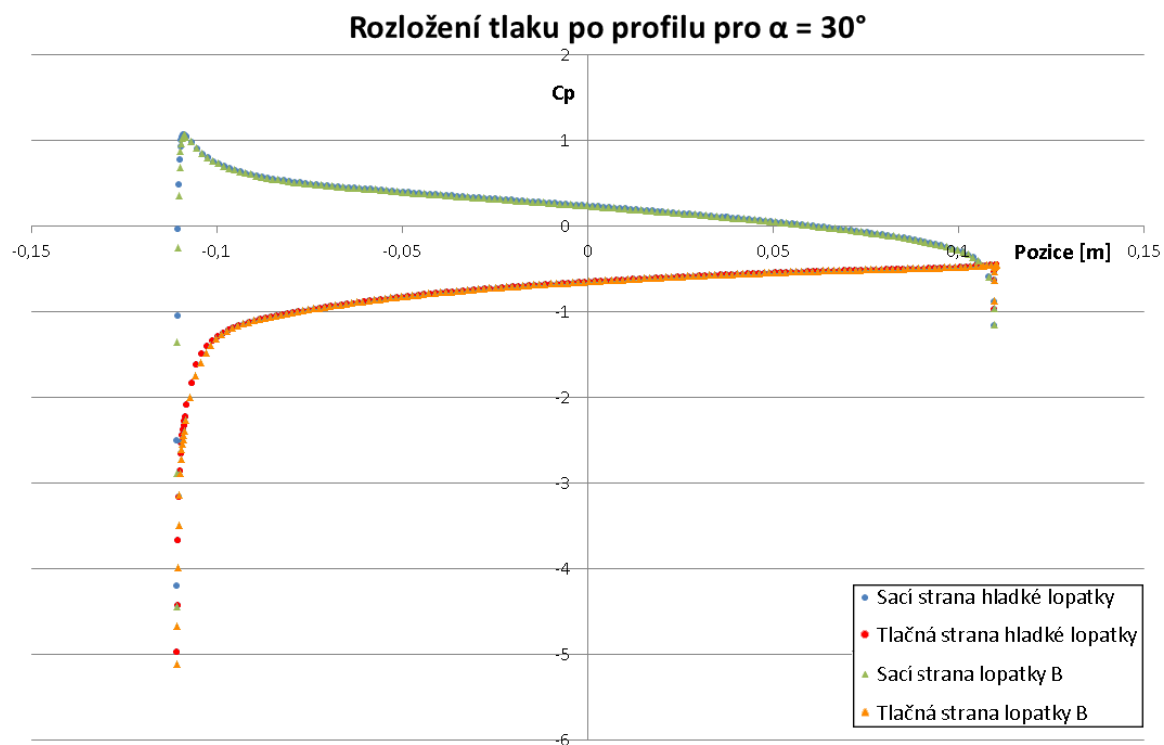
$v$  ... místní rychlost na profilu [m/s]

$v_0$  ... rychlost nerozrušeného proudu na vstupu [m/s]

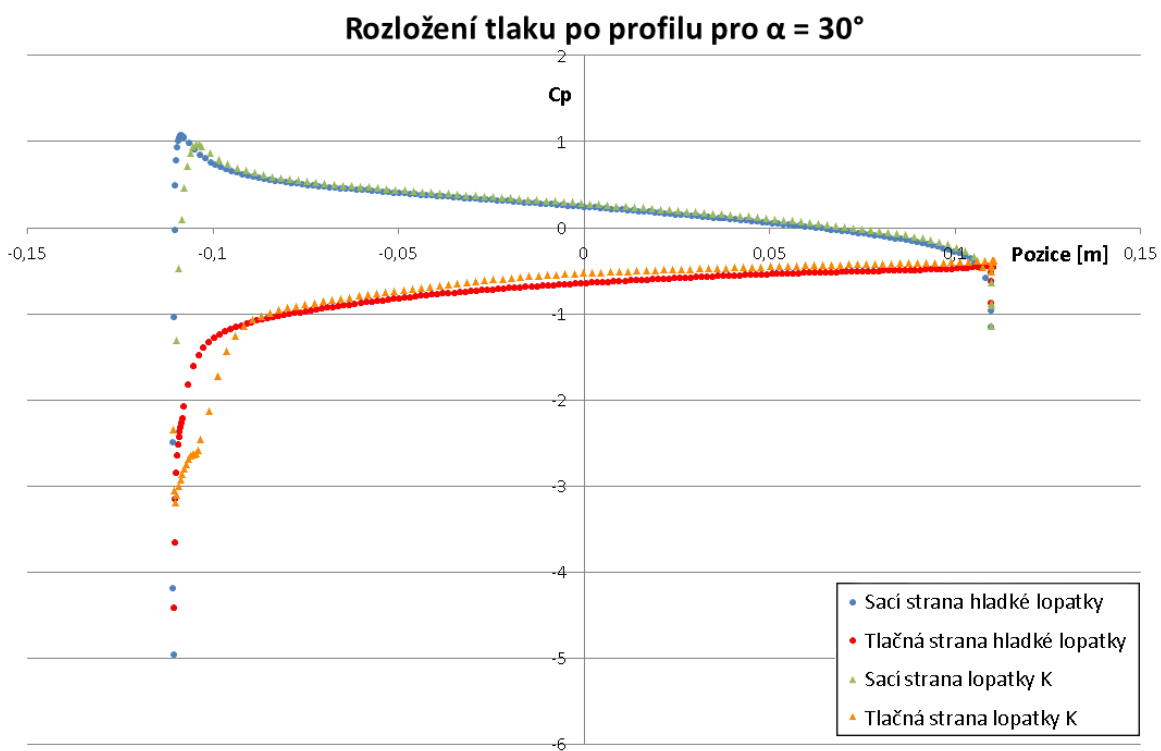
Ke grafickému znázornění rozložení tlaku po profilu pomocí bezrozměrného tlakového součinitele, byly zvoleny lopatky B a K, které jsou z hlediska výsledků jedny z nejlepších. V následujících obrázcích 31 až 46 jsou tyto lopatky srovnány s hladkou lopatkou.



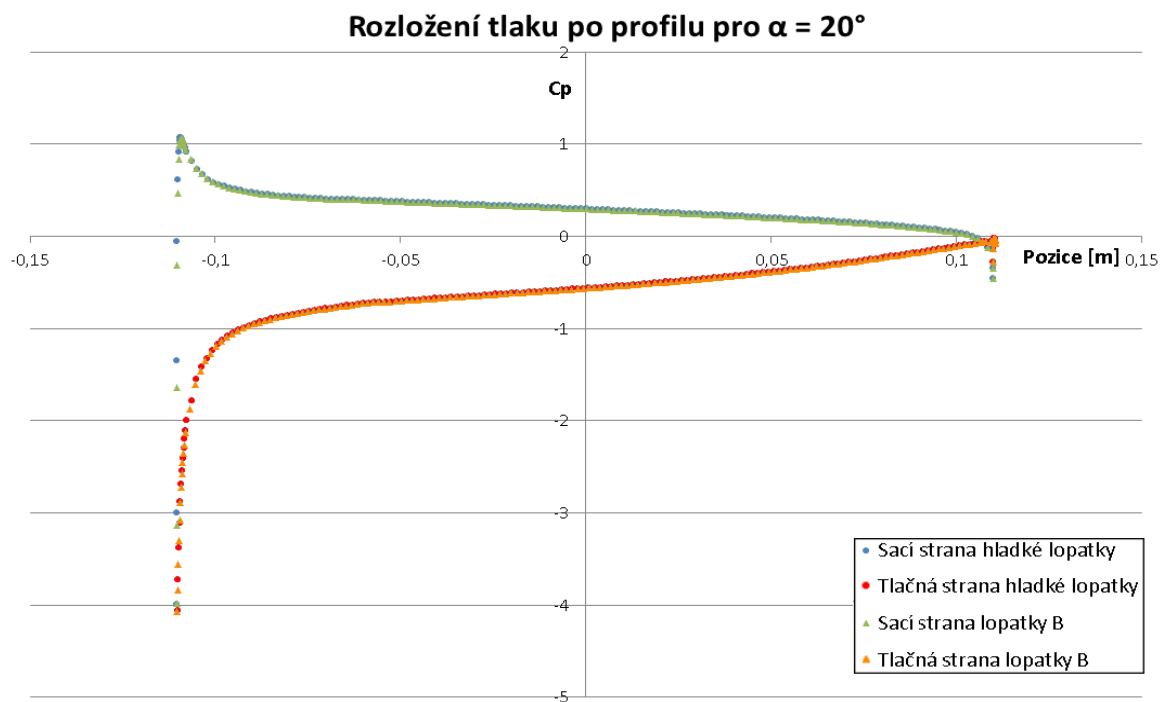
Obrázek 31: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou B ( $\alpha = 40^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



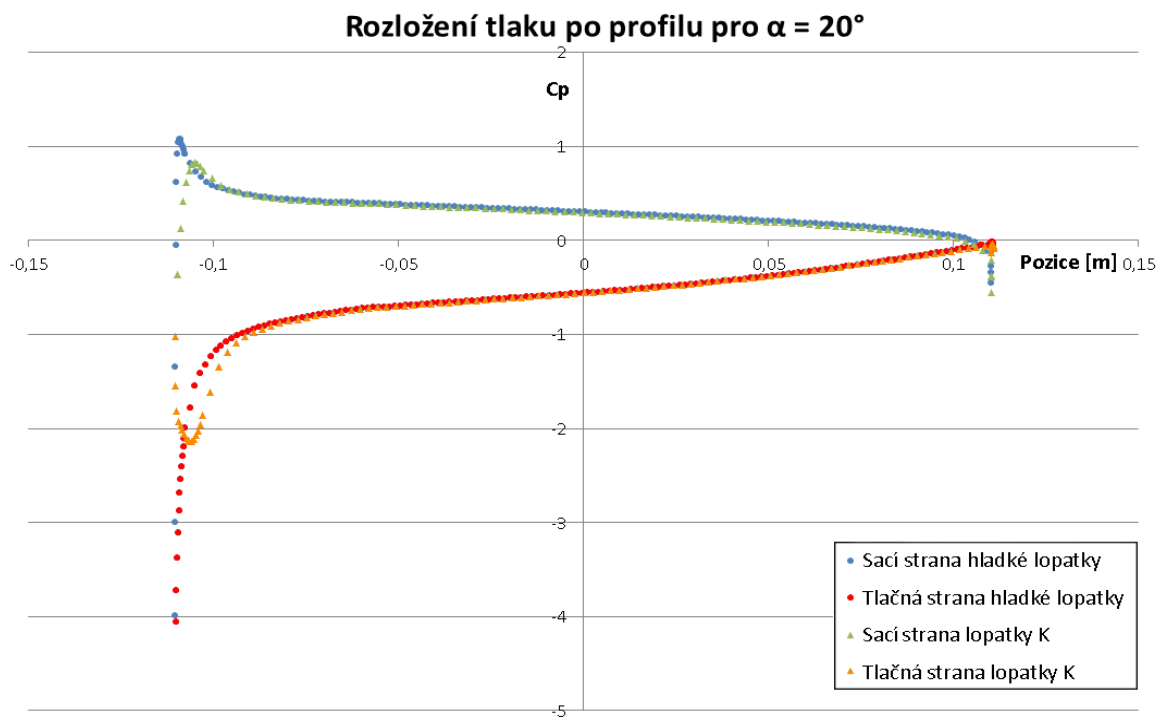
Obrázek 32: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou B ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



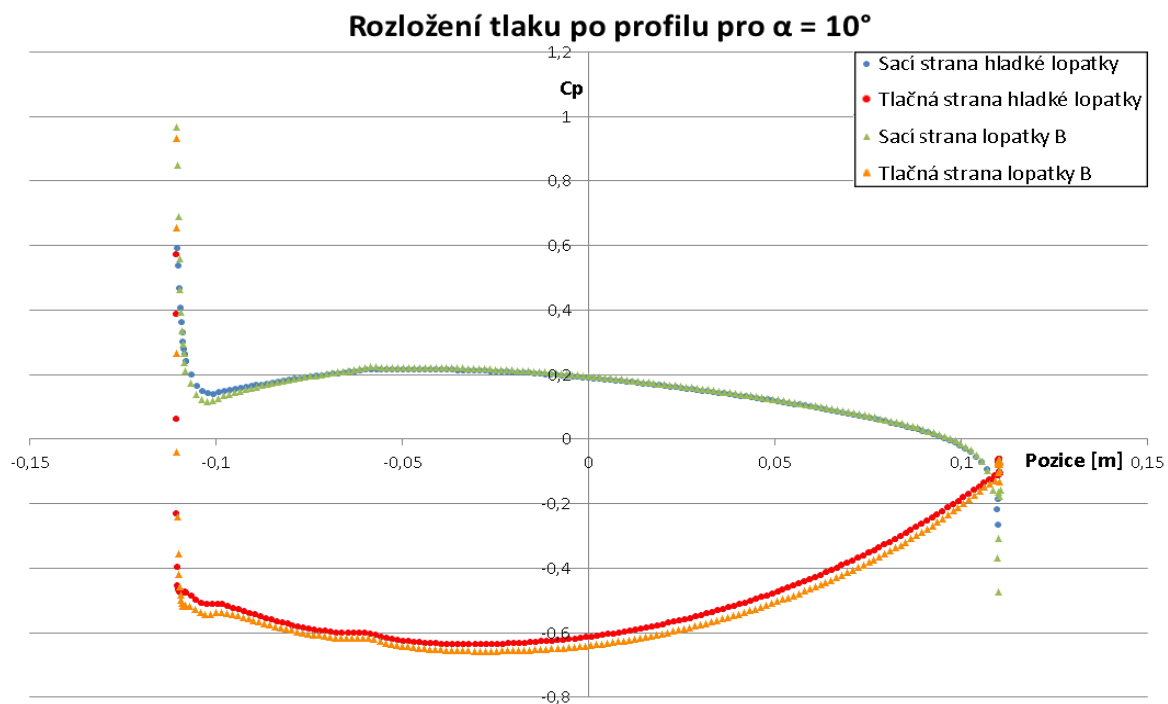
Obrázek 33: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou K ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



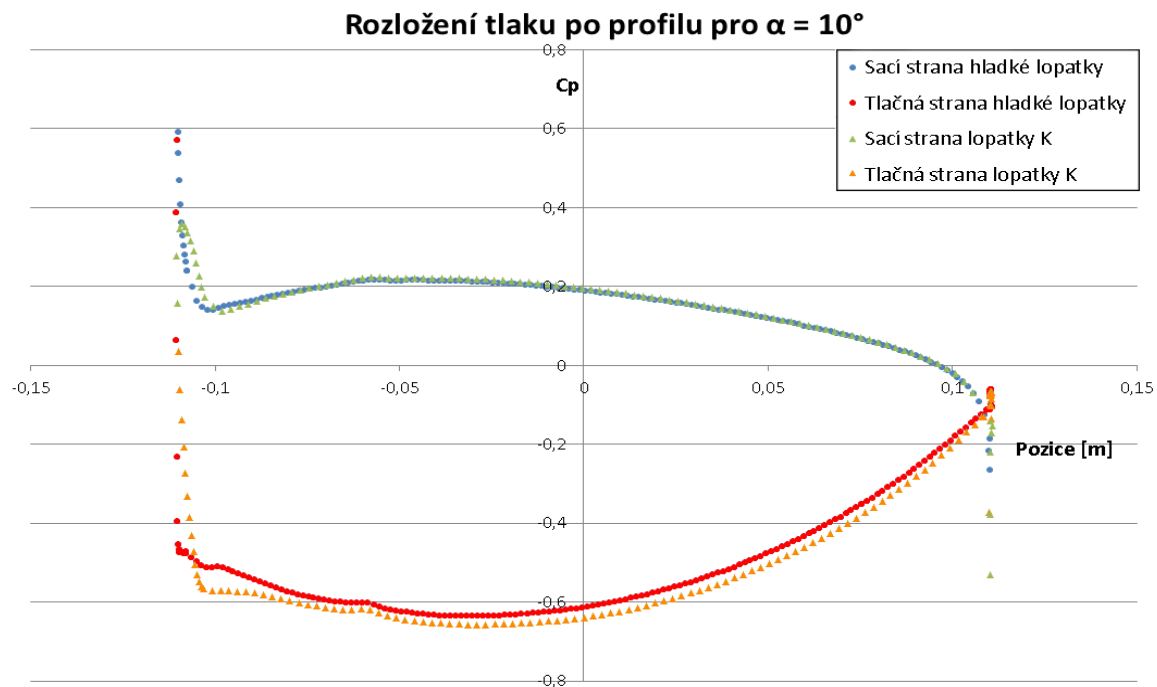
Obrázek 34: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou B ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



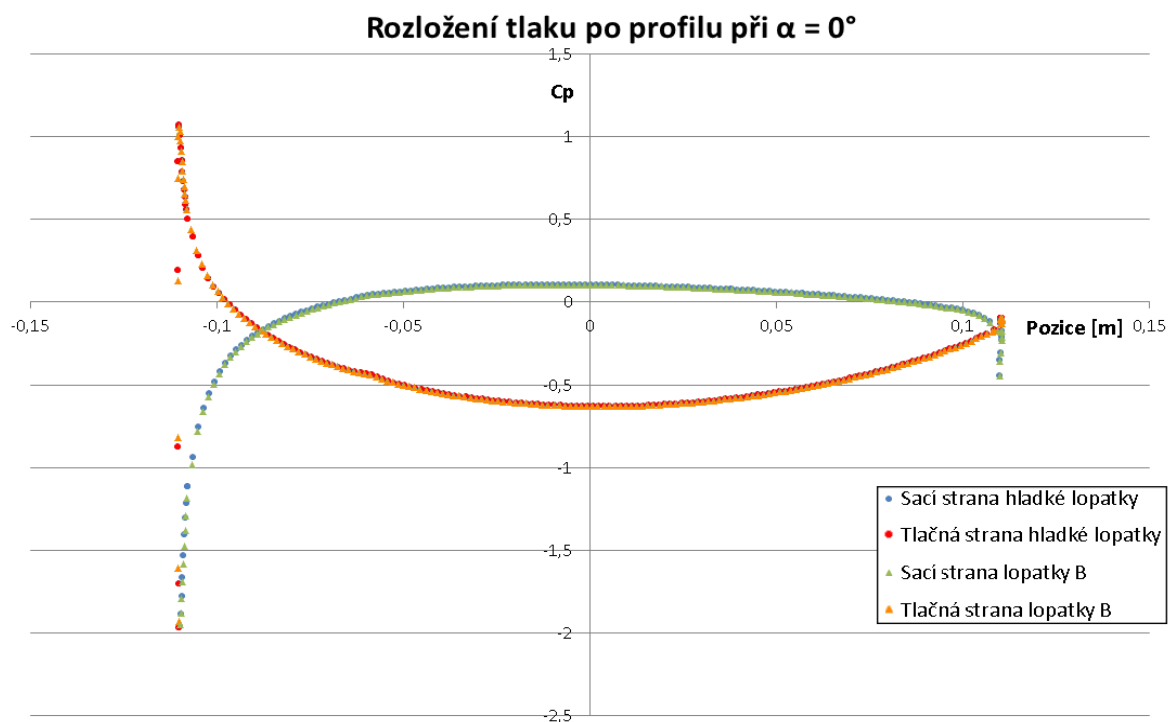
Obrázek 35: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou K ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



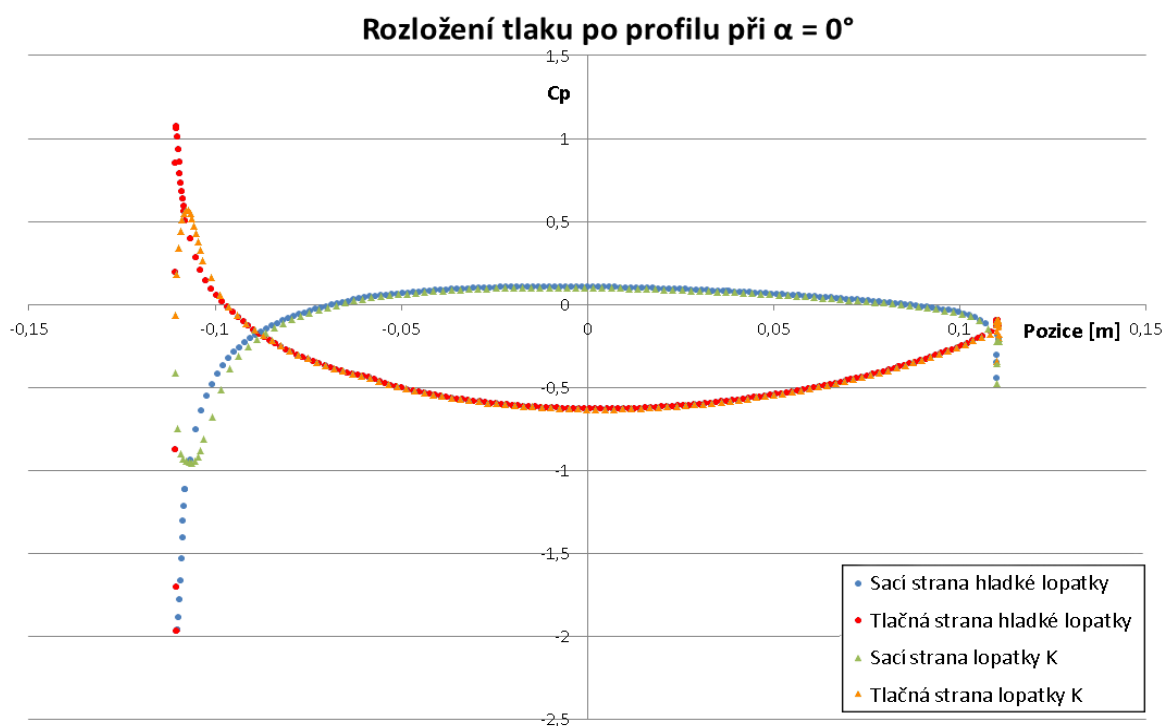
Obrázek 36: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou B ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



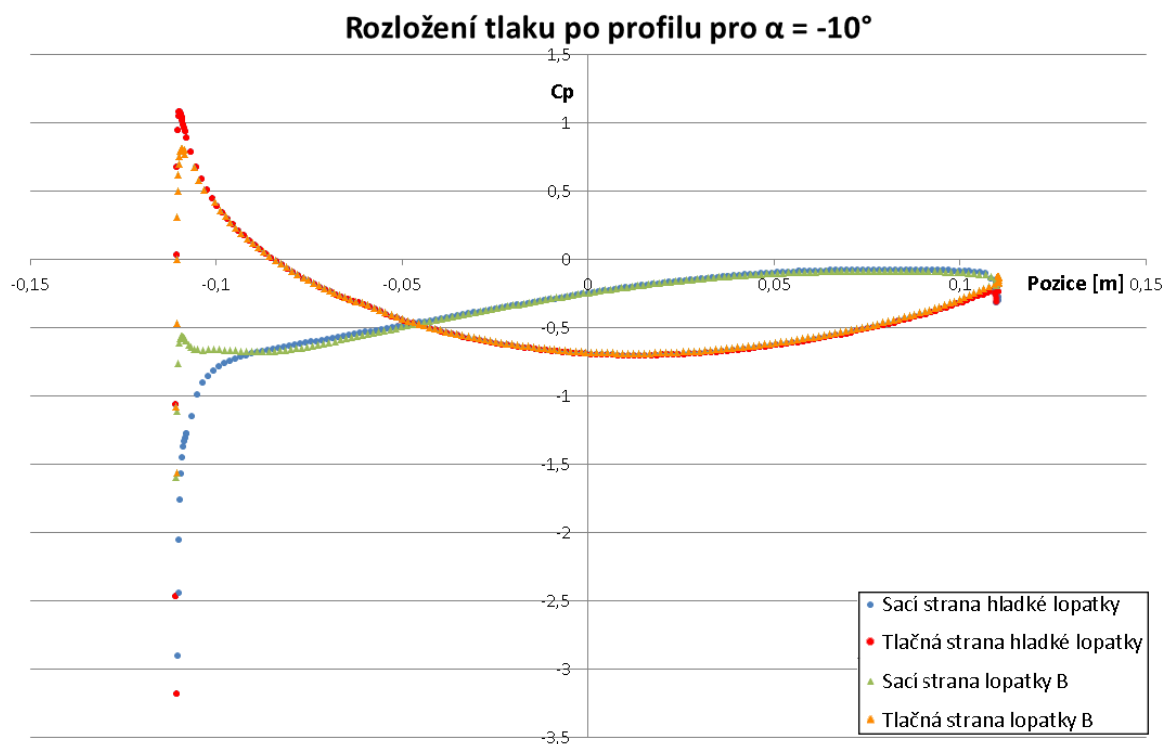
Obrázek 37: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou K ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



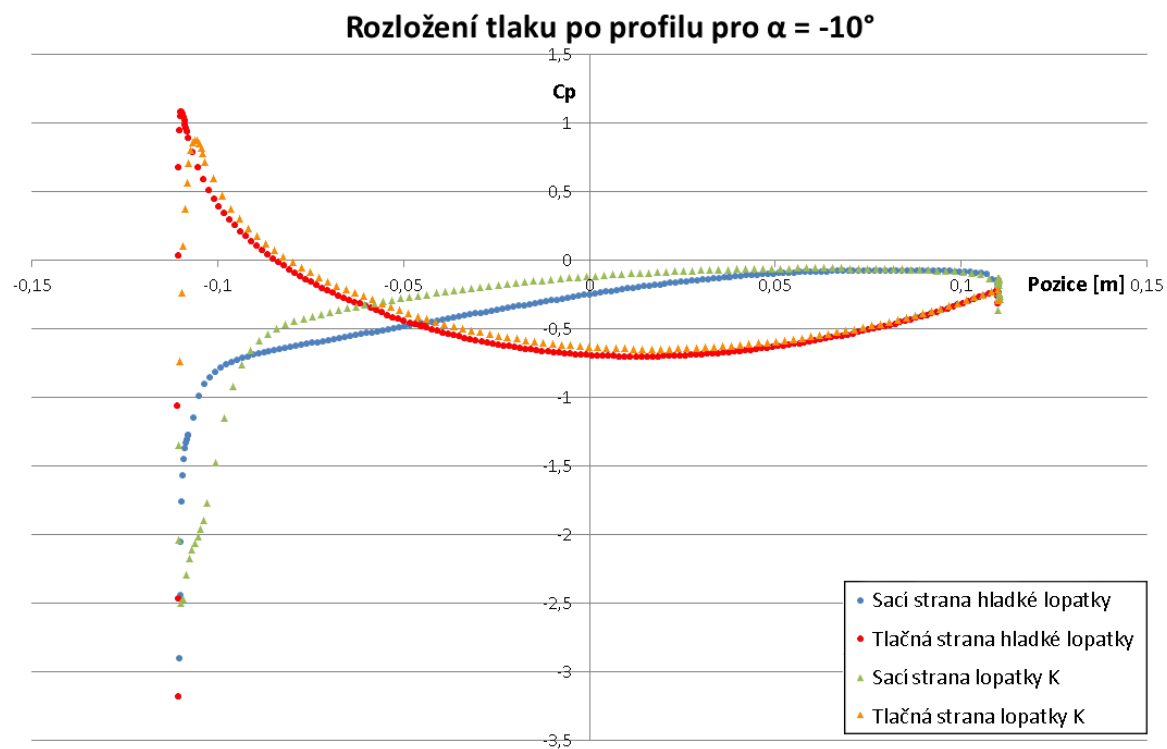
Obrázek 38: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou B ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



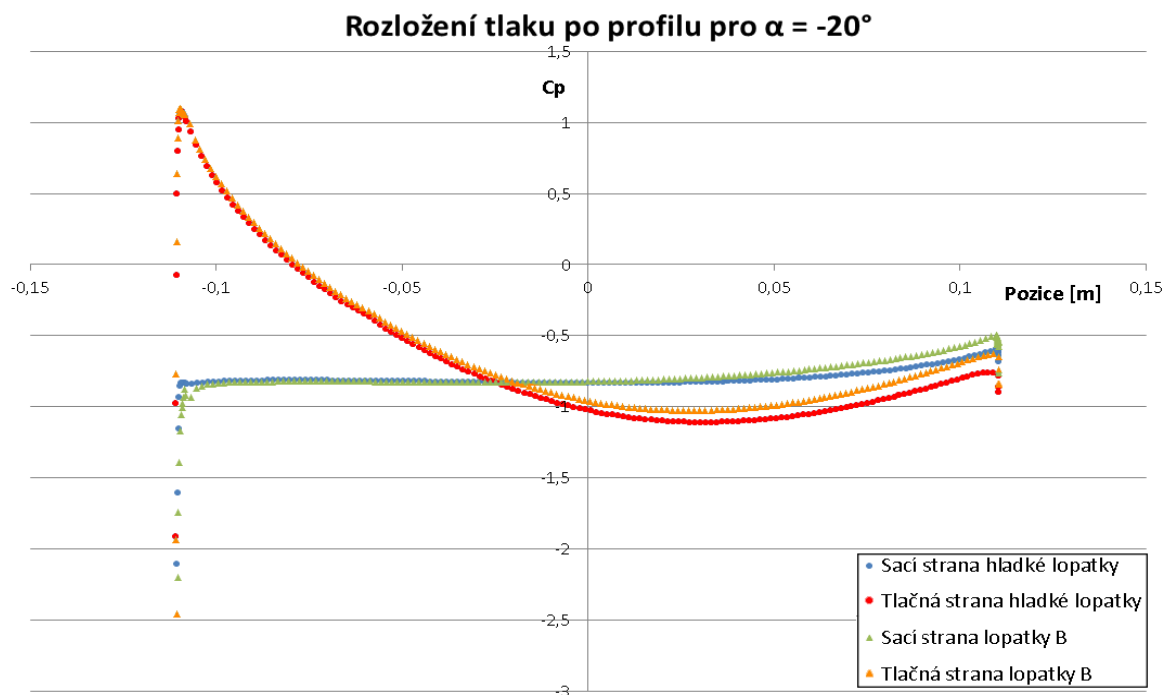
Obrázek 39: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou K ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



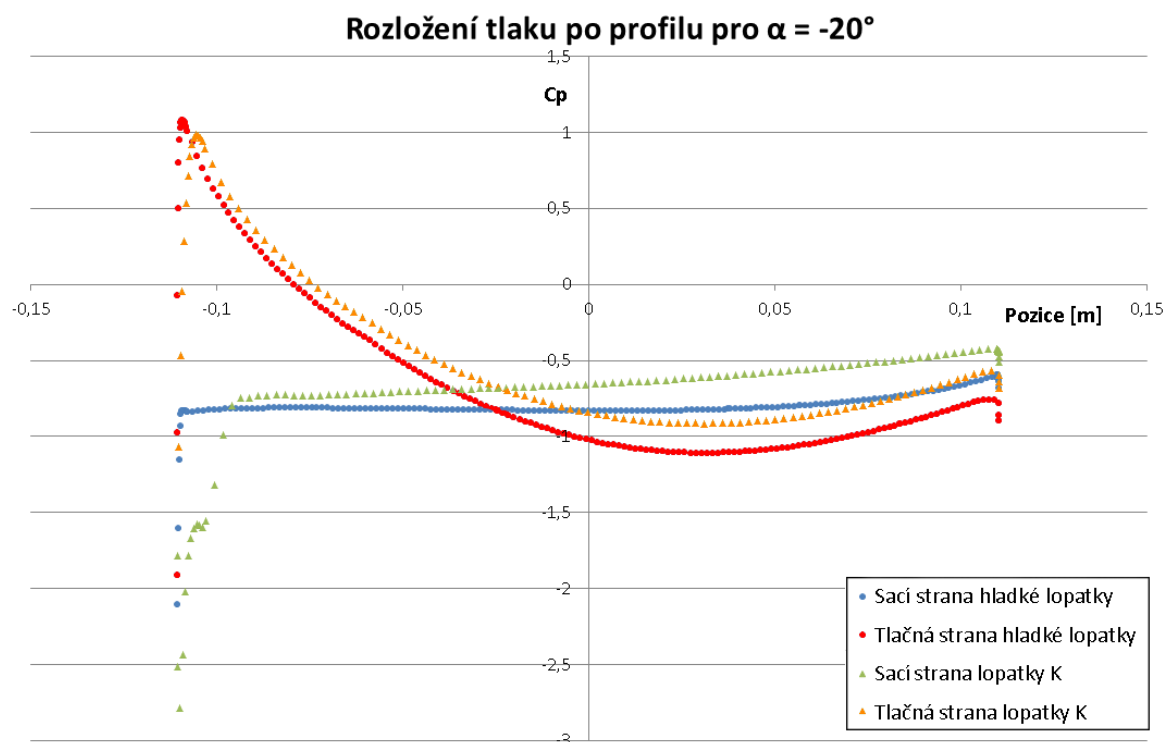
Obrázek 40: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou B ( $\alpha = -10^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



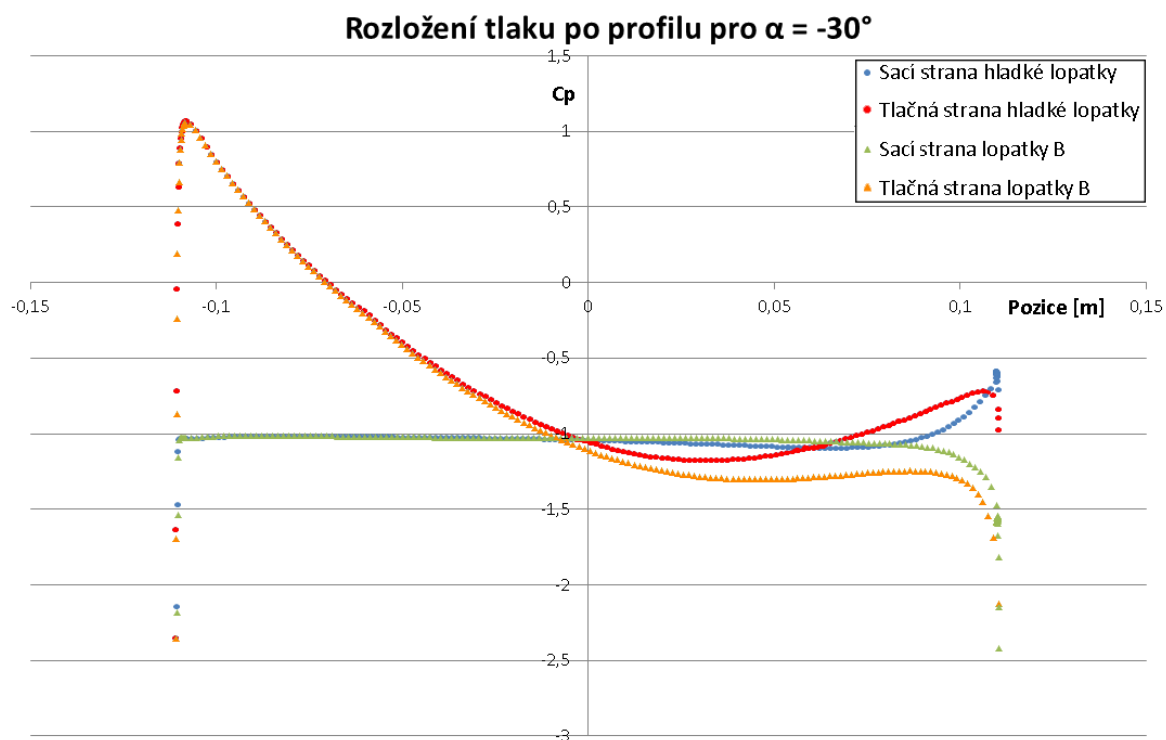
Obrázek 41: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou K ( $\alpha = -10^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



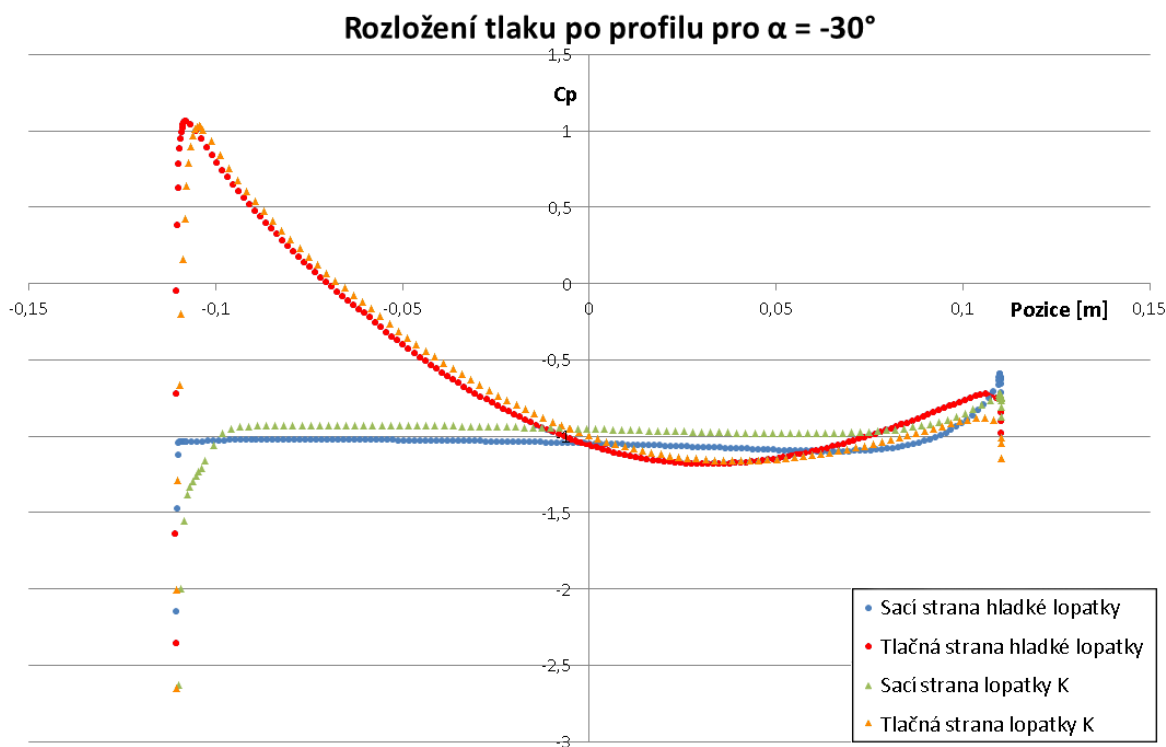
Obrázek 42: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou B ( $\alpha = -20^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



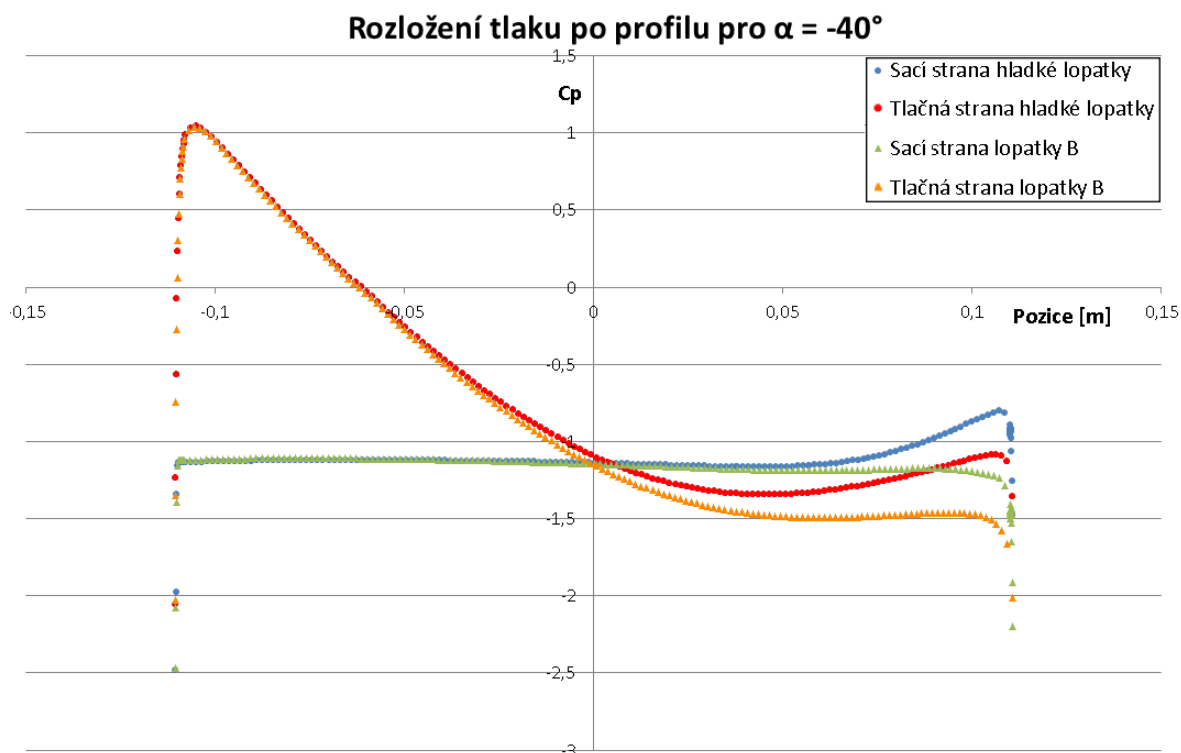
Obrázek 43: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou K ( $\alpha = -20^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



Obrázek 44: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou B ( $\alpha = -30^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



Obrázek 45: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou K ( $\alpha = -30^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )



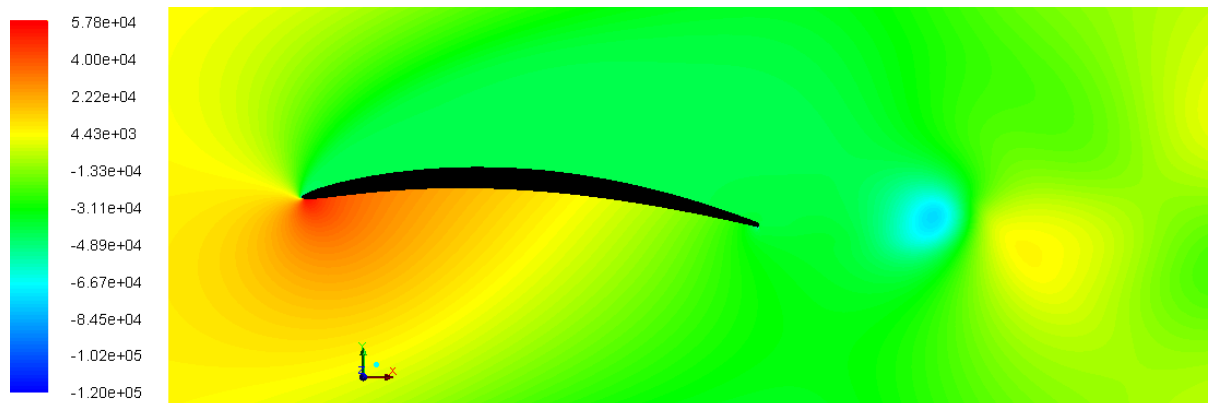
Obrázek 46: Srovnání rozložení tlaku po profilu hladké lopatky s lopatkou B ( $\alpha = -40^\circ$ ,  $z = 0,0375$ )

Z předchozích grafů je patrné, že pro lopatku B v rozmezí úhlů náběhu  $\alpha = 0^\circ$  až  $\alpha = 30^\circ$  je rozložení tlaku po profilu shodné s rozložením tlaku na hladké lopatce. Při  $\alpha = 10^\circ$  docházelo u lopatky B ke snížení tlaku po celé délce tlačné strany lopatky. Sací strana zůstala shodná s původní lopatkou, což mělo za následek zlepšení poměru  $c_l/c_d$  oproti hladkému profilu. Nicméně, zlepšení není příliš výrazné. Při pohledu na záporné úhly náběhu můžeme u lopatky B pozorovat větší rozdíly v rozložení tlaku po profilu. Při  $\alpha = -10^\circ$  je rozložení tlaku téměř shodné s hladkou lopatkou. Změna je pouze ve zvýšení tlaku na vstupu sací strany lopatky. Pokud máme úhel náběhu  $\alpha = -20^\circ$  až  $\alpha = -40^\circ$ , jsou změny rozložení tlaku patrnější a to zejména na konci profilu lopatky. Při  $\alpha = -30^\circ$  dochází na odtokové hraně k poklesu tlaku a tím k odtržení proudu.

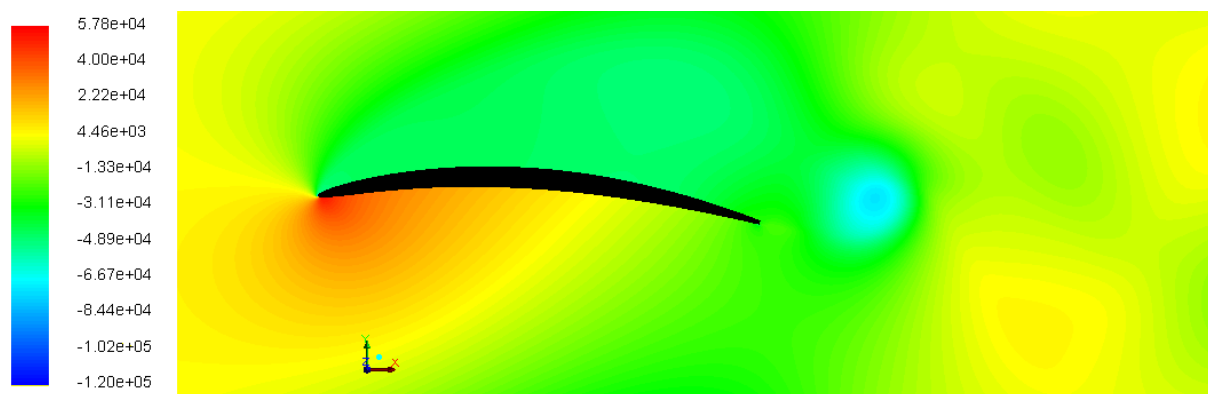
Pokud srovnáváme s hladkým profilem lopatku K, která má oproti lopatce B výraznější amplitudu, můžeme pozorovat větší změny tlaku po profilu lopatky a to jak na vstupu pro kladné úhly náběhu, tak i po délce sací a tlačné strany lopatky po celém profilu lopatky. Znázornění tlaku v okolí profilu lopatky je znázorněno na obrázcích 47 až 71 v následující kapitole 8.3.

### 8.3 Rozložení tlaku v blízkosti lopatky

Je nutné brát v potaz, že znázornění tlaku při vyšších úhlech náběhu je vlastně okamžitý snímek z nestacionárního výpočtu. Jedná se převážně o úhly  $\alpha = \pm 30^\circ$  a  $\alpha = \pm 40^\circ$ .



Obrázek 47: Rozložení statického tlaku v okolí profilu s hladkou náběžnou hranou ( $\alpha = 40^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 48: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky B ( $\alpha = 40^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 49: Rozložení statického tlaku v okolí profilu s hladkou náběžnou hranou ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 50: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky B ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 51: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky K ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



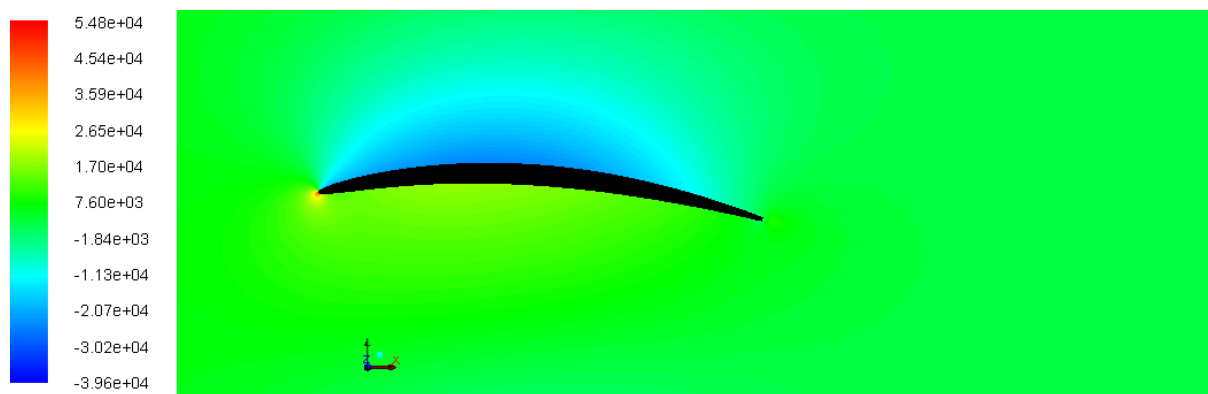
Obrázek 52: Rozložení statického tlaku v okolí profilu s hladkou náběžnou hranou ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ )



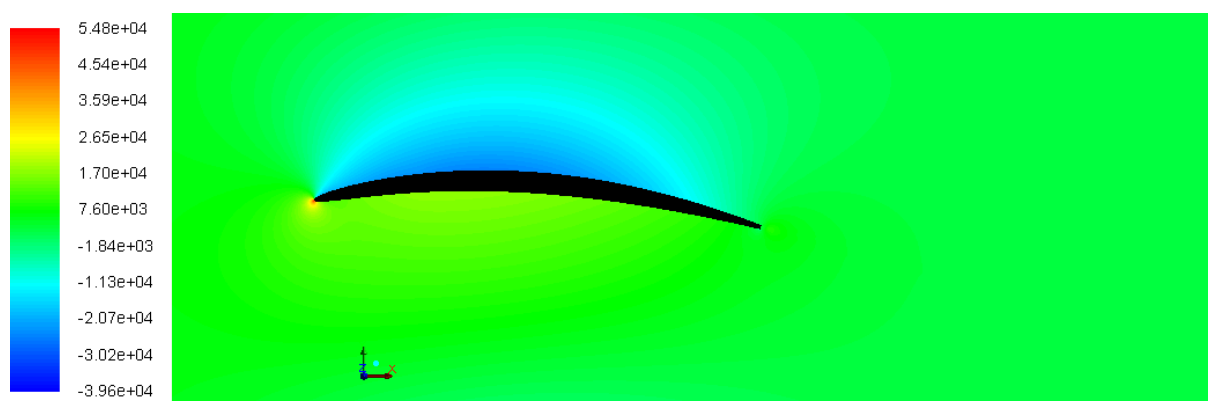
Obrázek 53: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky B ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ )



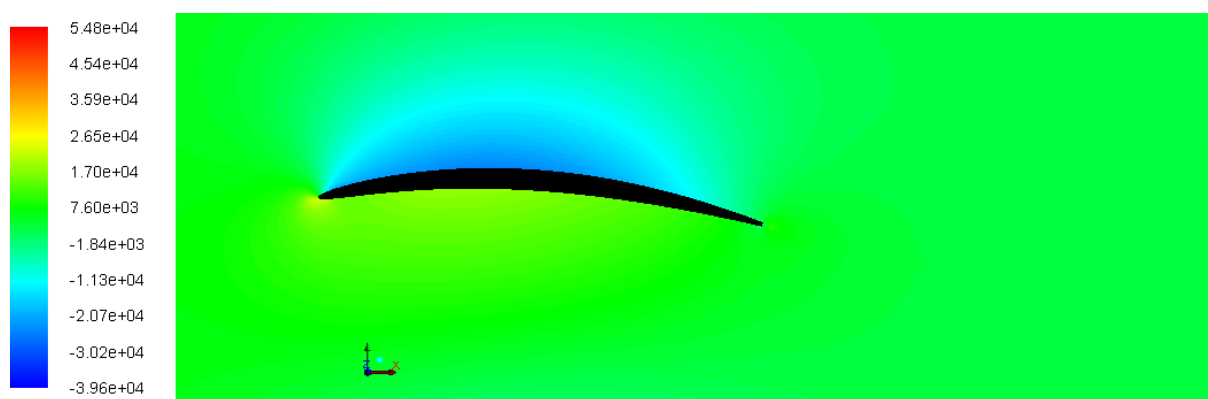
Obrázek 54: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky K ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ )



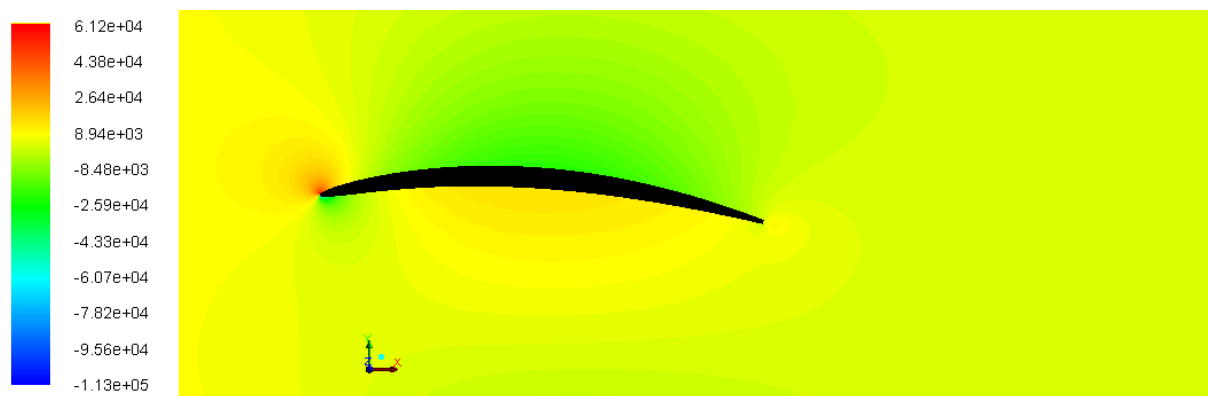
Obrázek 55: Rozložení statického tlaku v okolí profilu s hladkou náběžnou hranou ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



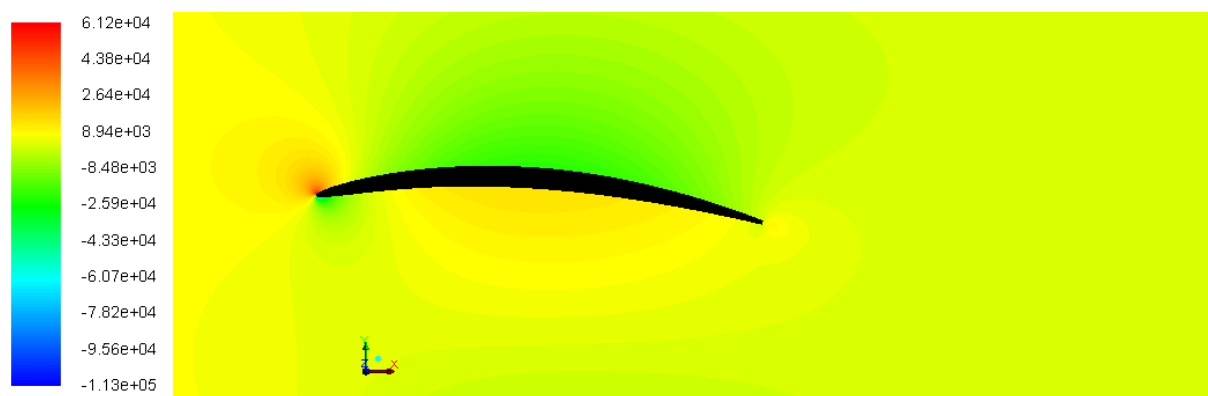
Obrázek 56: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky B ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



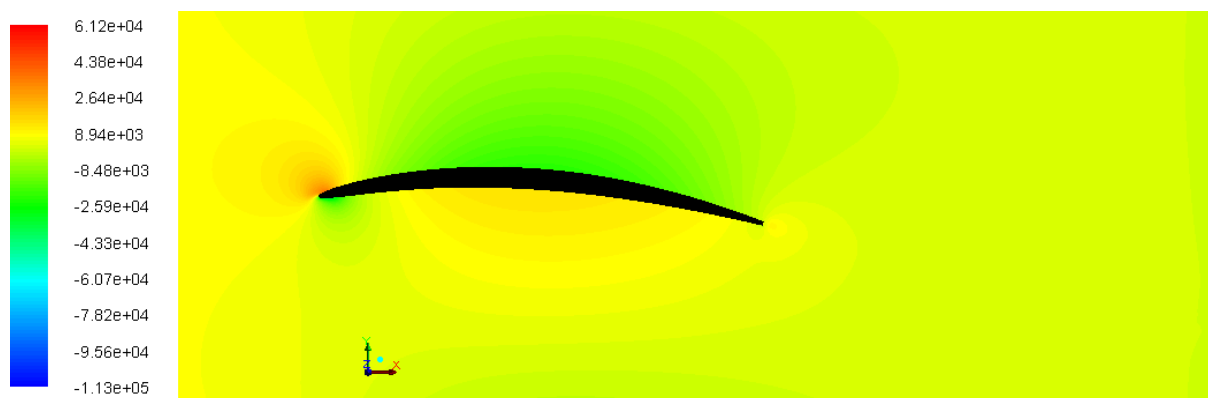
Obrázek 57: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky K ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 58: Rozložení statického tlaku v okolí profilu s hladkou náběžnou hranou ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 59: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky B ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 60: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky K ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 61: Rozložení statického tlaku v okolí profilu s hladkou náběžnou hranou ( $\alpha = -10^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 62: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky B ( $\alpha = -10^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 63: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky K ( $\alpha = -10^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



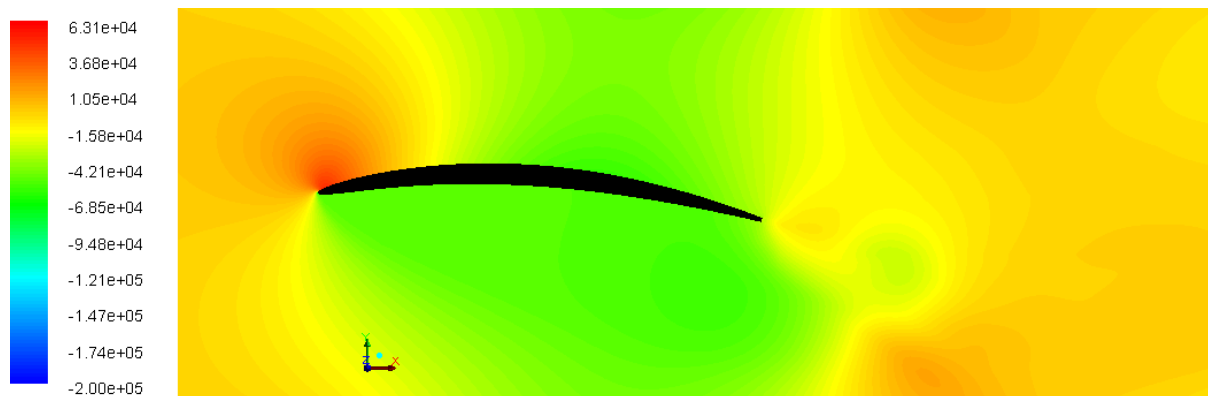
Obrázek 64: Rozložení statického tlaku v okolí profilu s hladkou náběžnou hranou ( $\alpha = -20^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



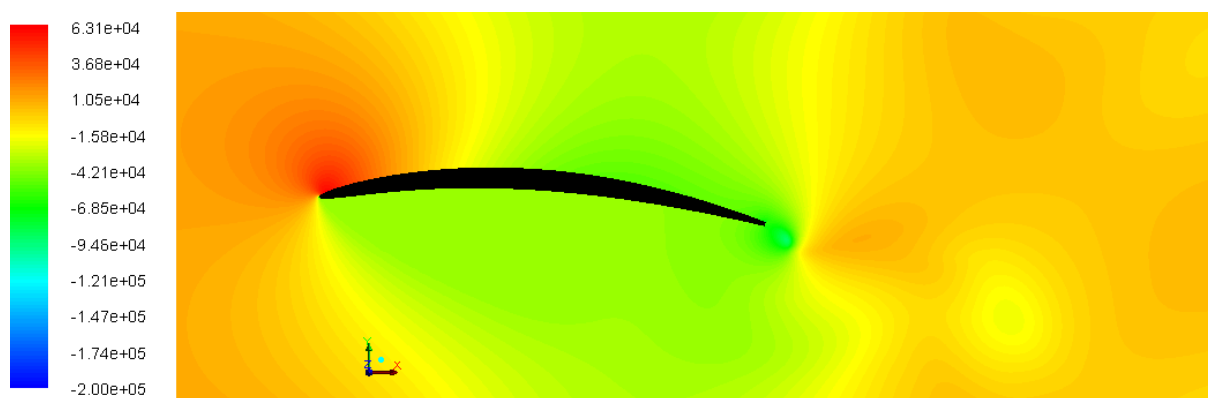
Obrázek 65: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky B ( $\alpha = -20^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



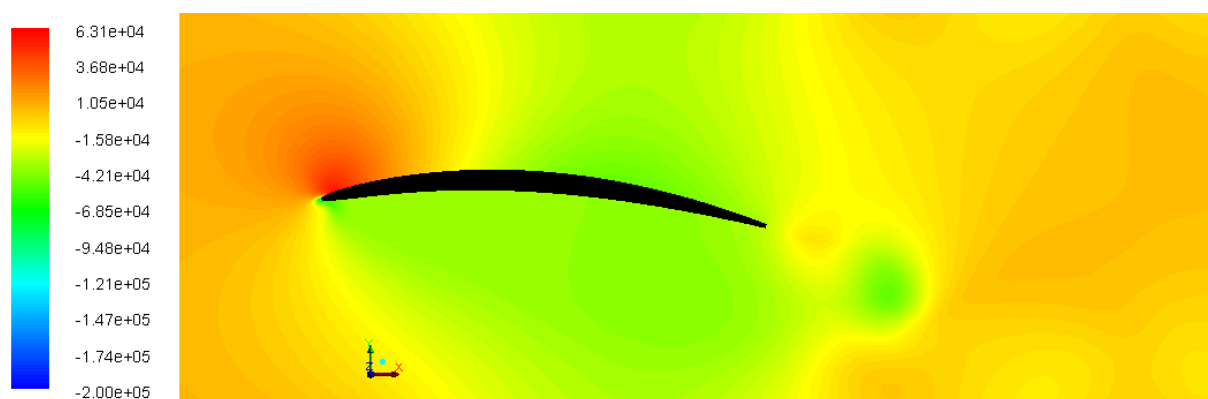
Obrázek 66: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky K ( $\alpha = -20^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



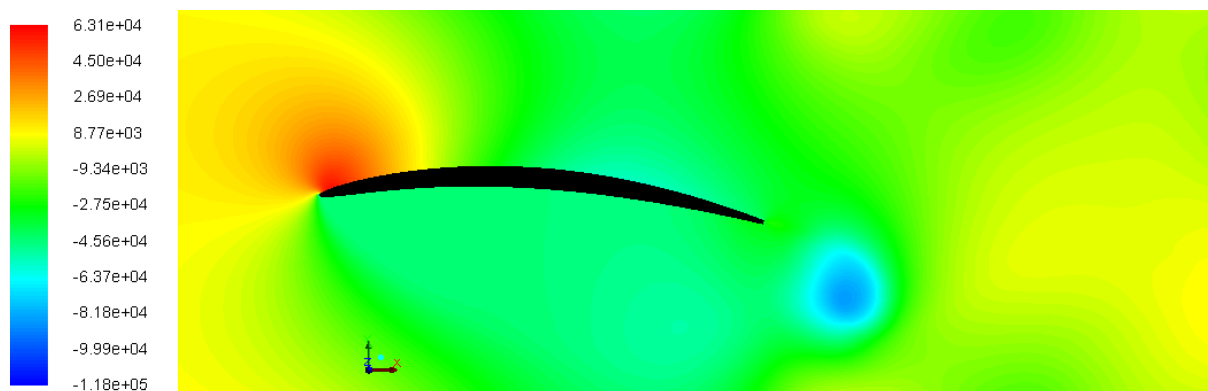
Obrázek 67: Rozložení statického tlaku v okolí profilu s hladkou náběžnou hranou ( $\alpha = -30^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



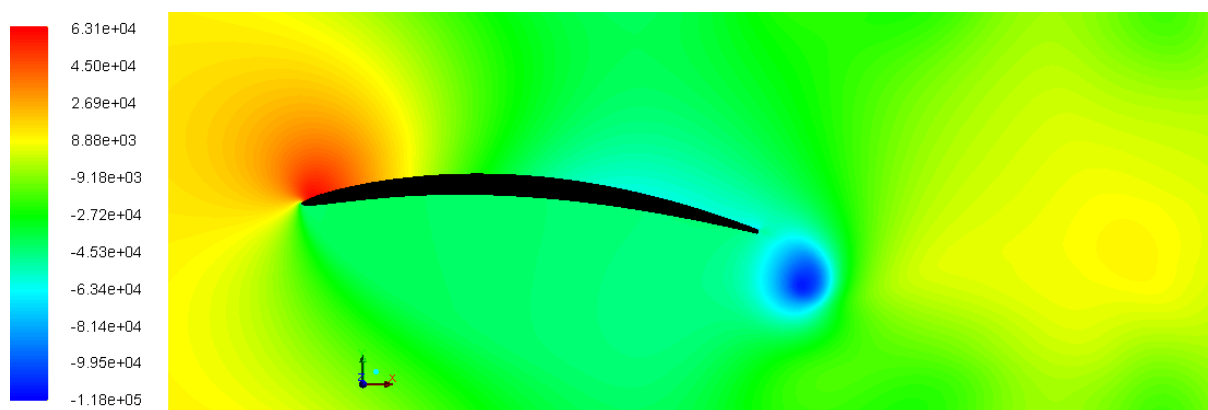
Obrázek 68: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky B ( $\alpha = -30^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



Obrázek 69: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky K ( $\alpha = -30^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



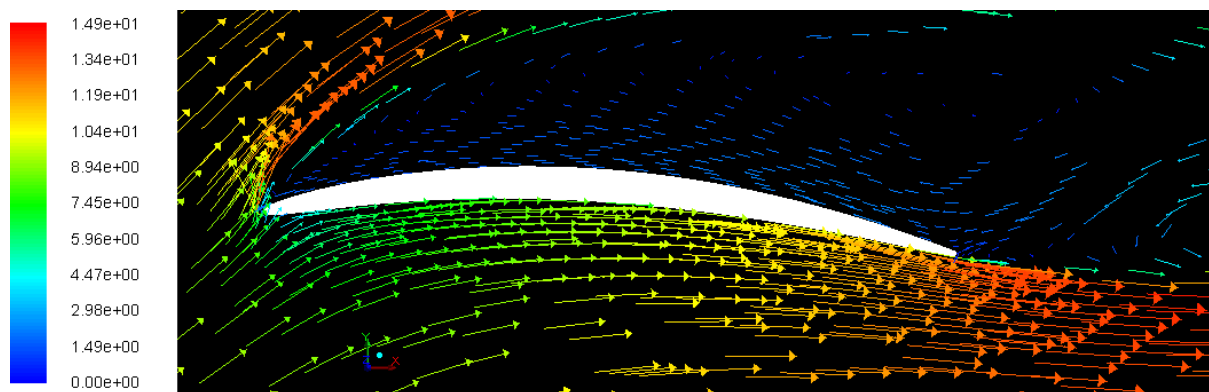
Obrázek 70: Rozložení statického tlaku v okolí profilu s hladkou náběžnou hranou ( $\alpha = -40^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )



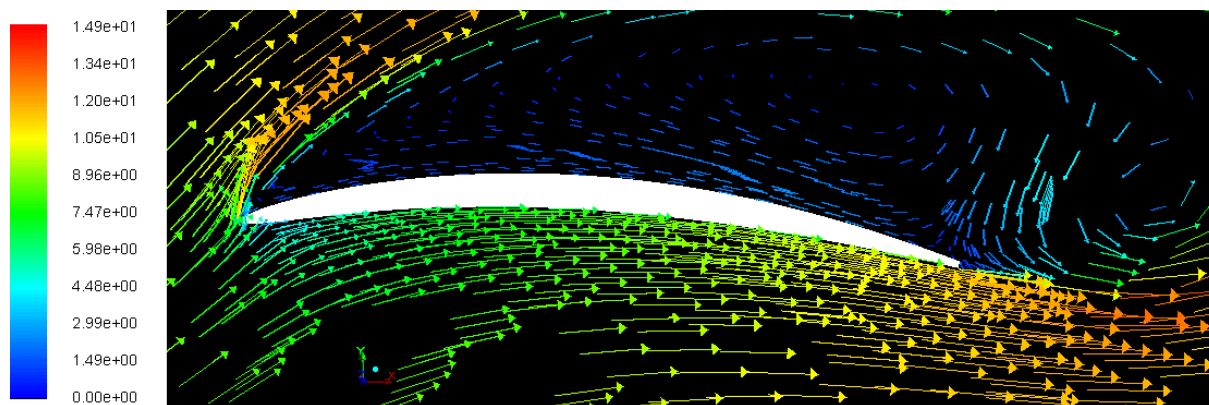
Obrázek 71: Rozložení statického tlaku v okolí profilu lopatky B ( $\alpha = -40^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ )

## 8.4 Vektory rychlosti okolo profilu

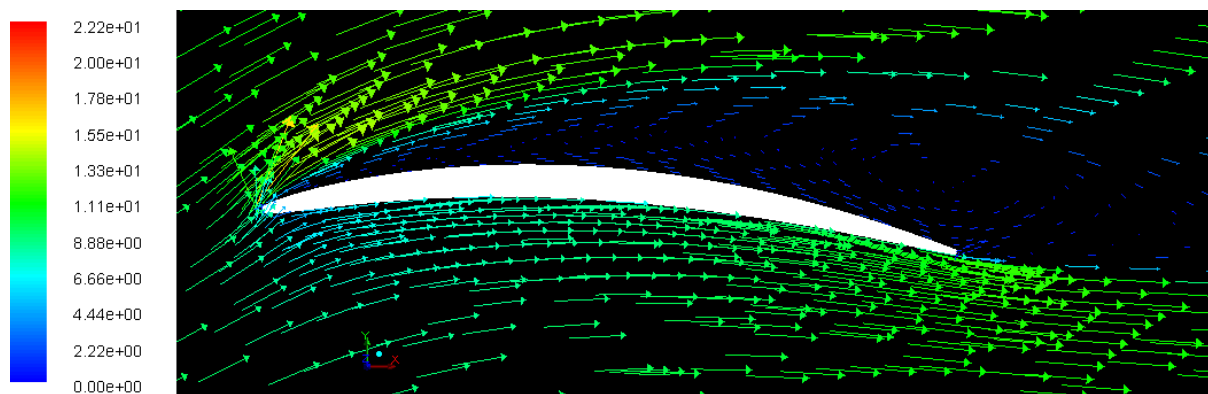
V této kapitole je srovnání předchozích modifikovaných lopatek B a K spolu s hladkým profilem. Je zde znázorněno proudění kolem profilu lopatky vírové turbíny, odtrhávání proudu od lopatky a tvorba vírů vznikajících za lopatkou. Vše pomocí vektorů rychlosti znázorněných na jednotlivých obrázcích 72 až 96. Stejně jako v předchozí kapitole při znázornění rozložení tlaku se i zde při vyšších úhlech náběhu jedná o okamžitý snímek z nestacionárního výpočtu.



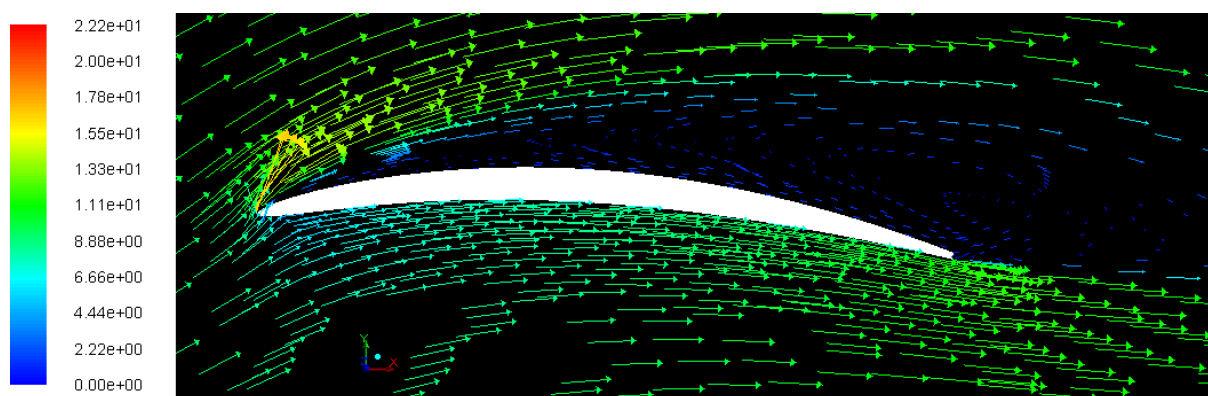
Obrázek 72: Vektory rychlosti hladkého profilu ( $\alpha = 40^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



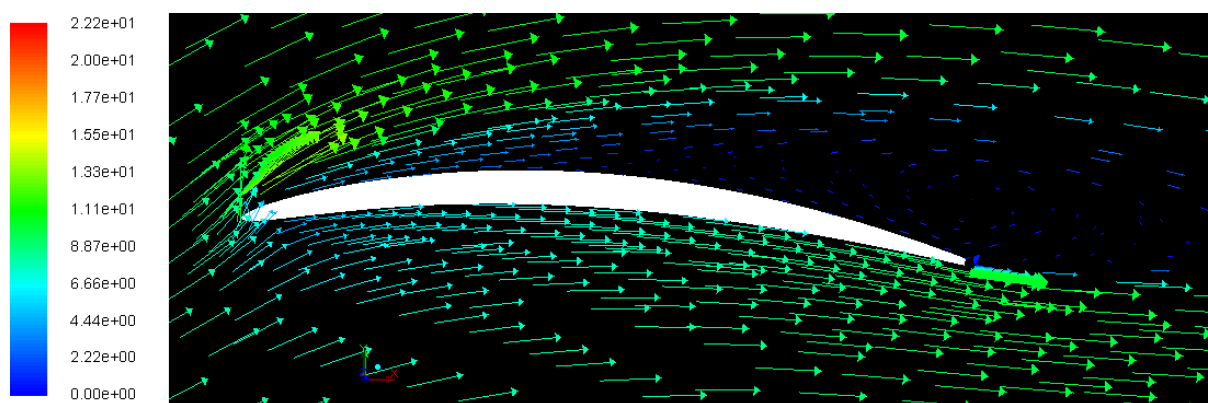
Obrázek 73: Vektory rychlosti lopatky B ( $\alpha = 40^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



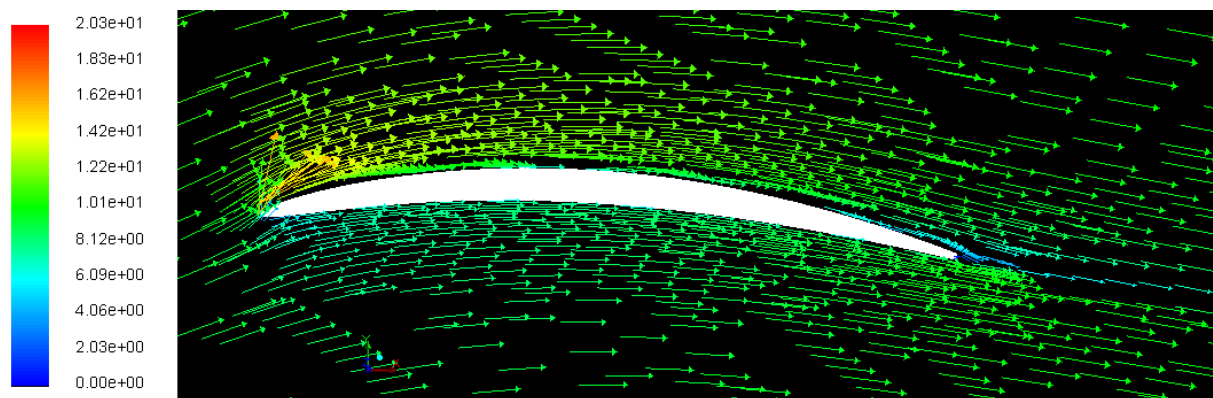
Obrázek 74: Vektory rychlosti hladkého profilu ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



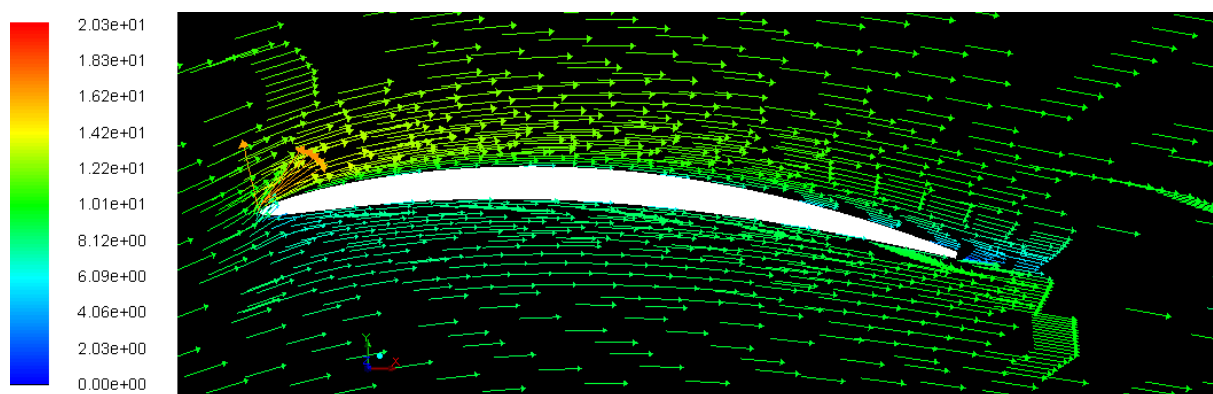
Obrázek 75: Vektory rychlosti lopatky B ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



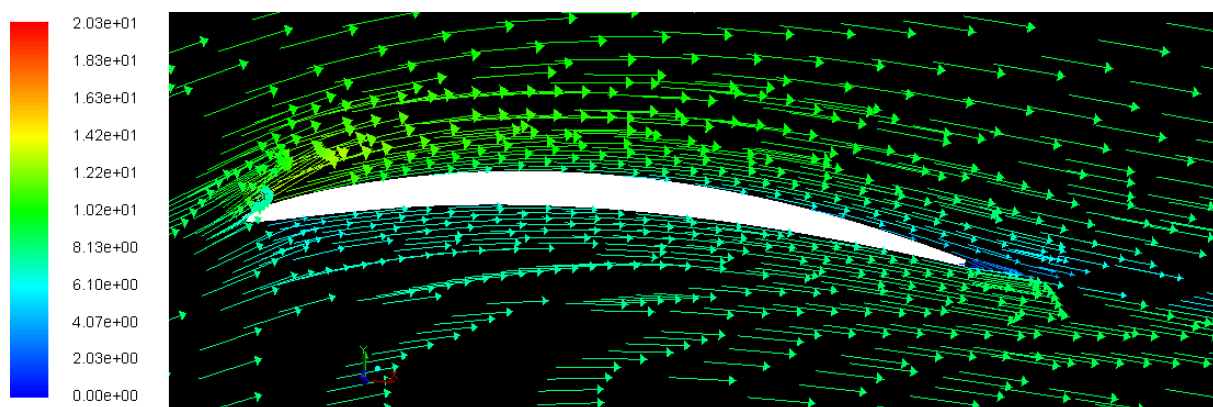
Obrázek 76: Vektory rychlosti lopatky K ( $\alpha = 30^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



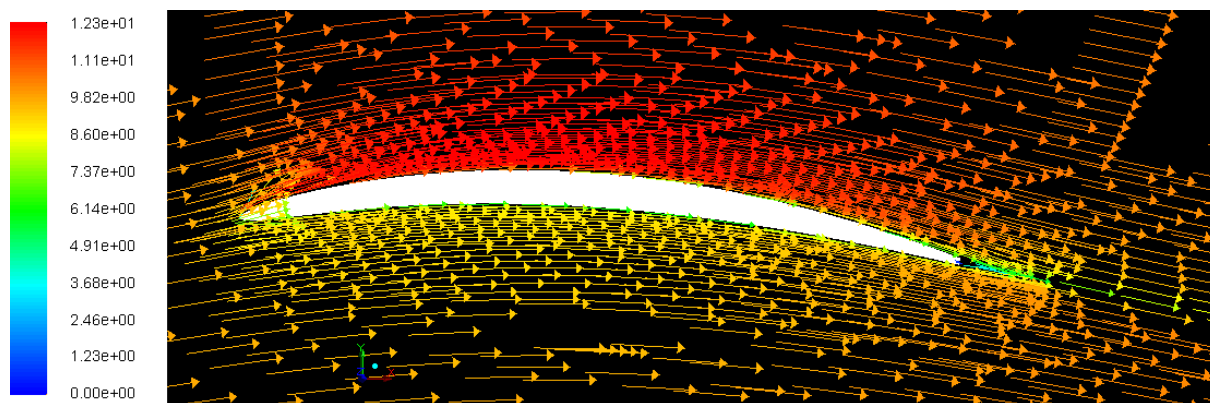
Obrázek 77: Vektory rychlosti hladkého profilu ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



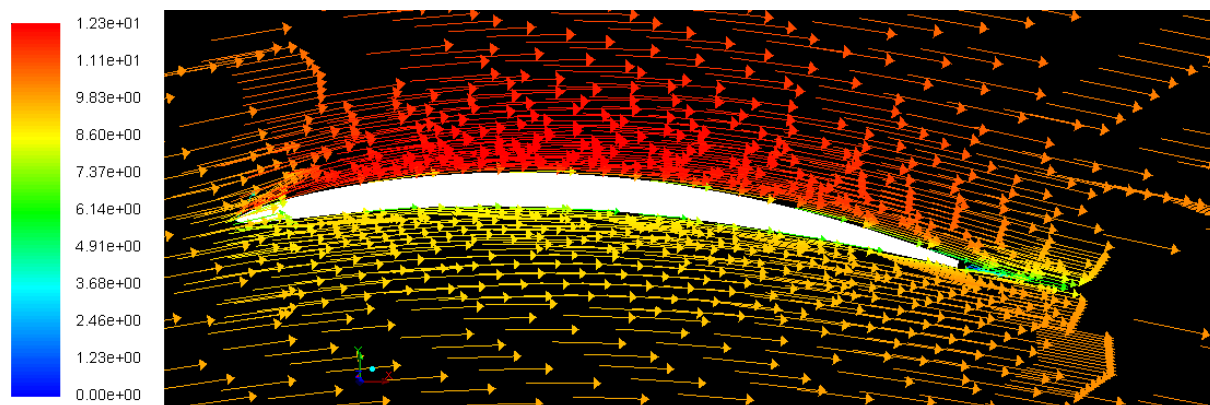
Obrázek 78: Vektory rychlosti lopatky B ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



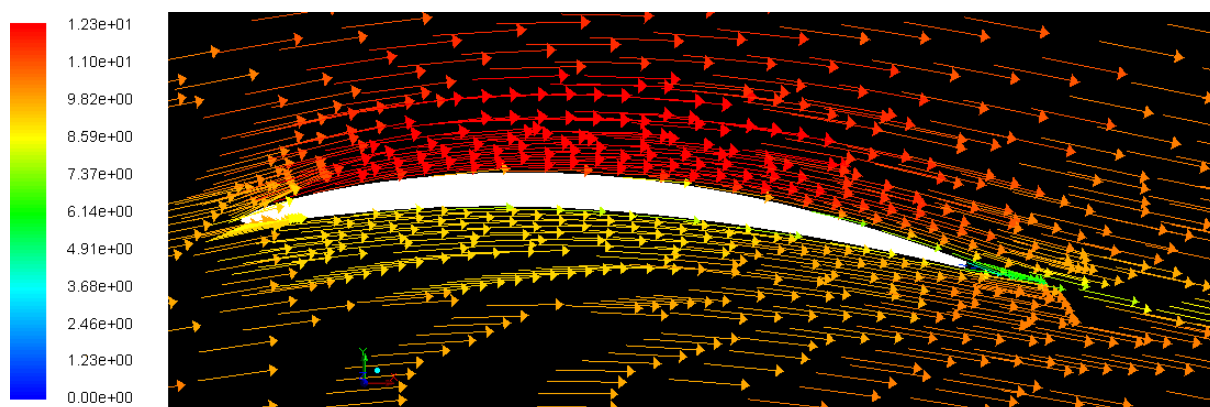
Obrázek 79: Vektory rychlosti lopatky K ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



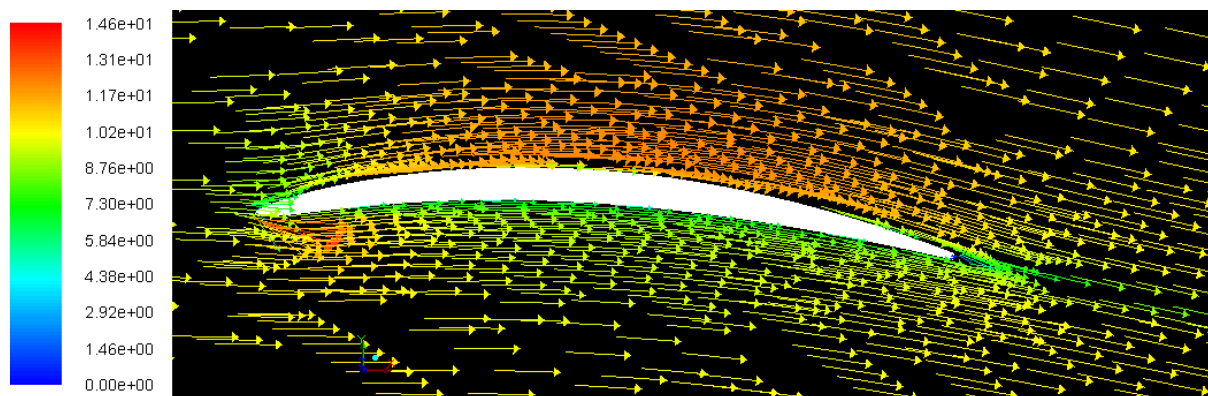
Obrázek 80: Vektory rychlosti hladkého profilu ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



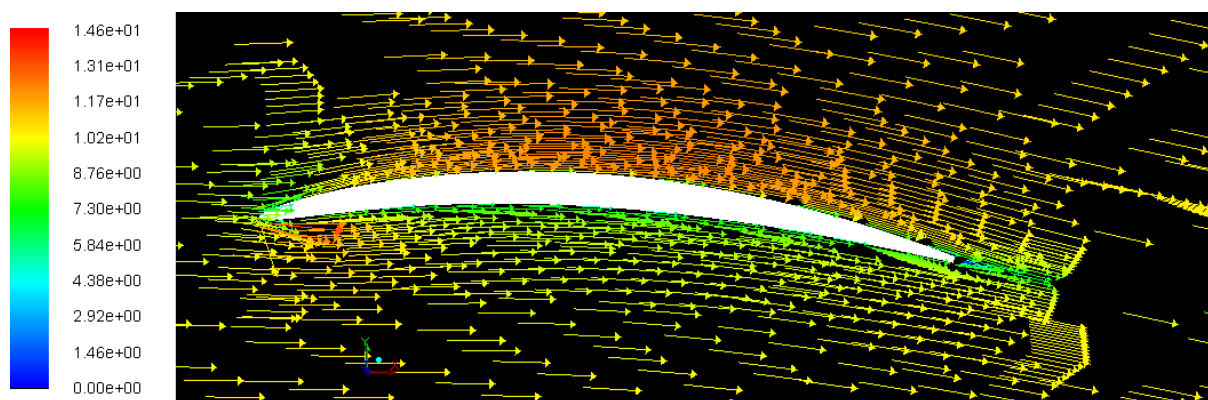
Obrázek 81: Vektory rychlosti lopatky B ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



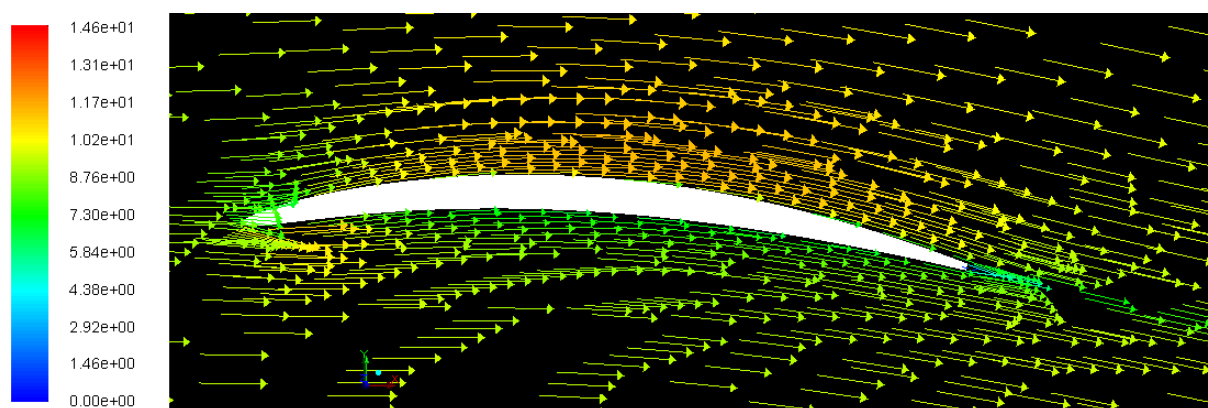
Obrázek 82: Vektory rychlosti lopatky K ( $\alpha = 10^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



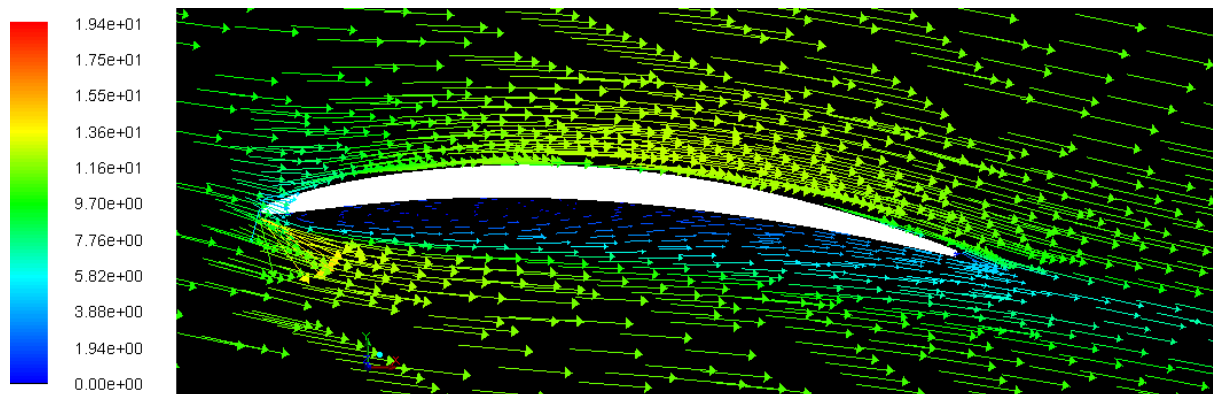
Obrázek 83: Vektory rychlosti hladkého profilu ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



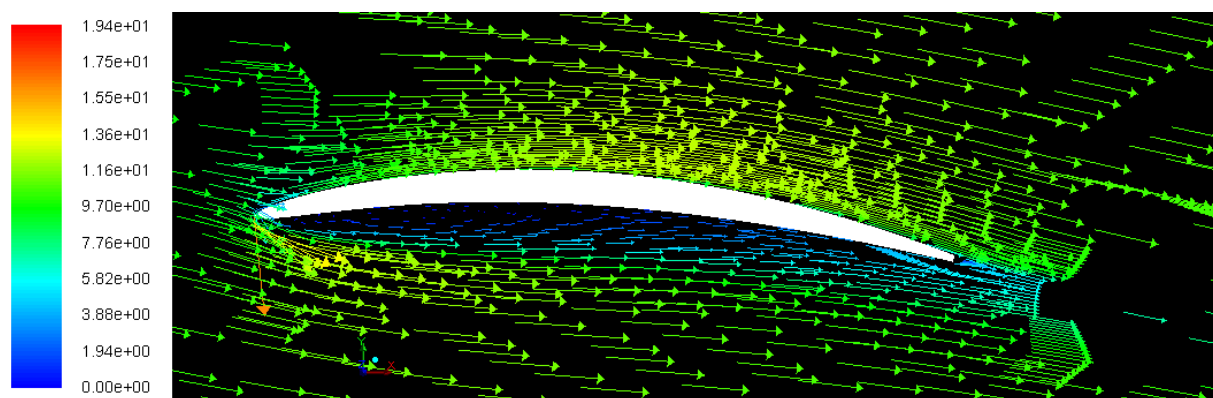
Obrázek 84: Vektory rychlosti lopatky B ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



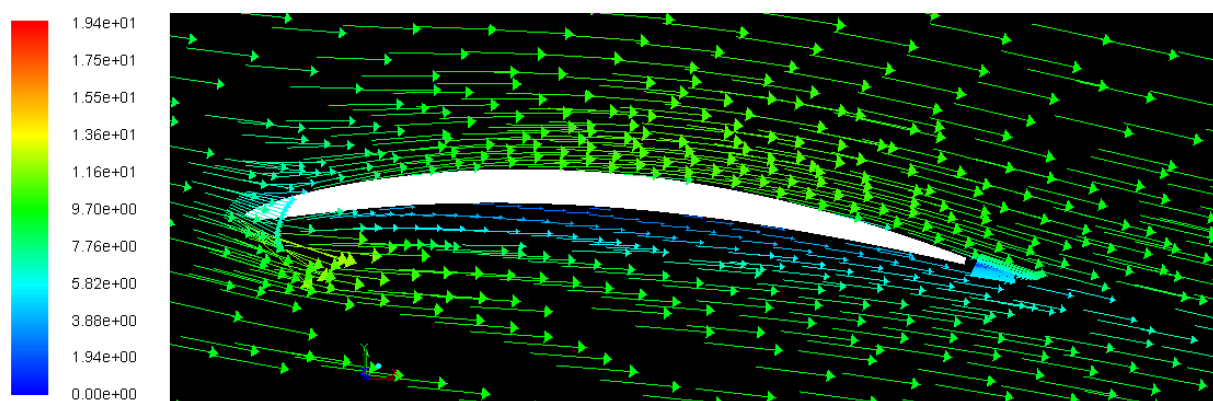
Obrázek 85: Vektory rychlosti lopatky K ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



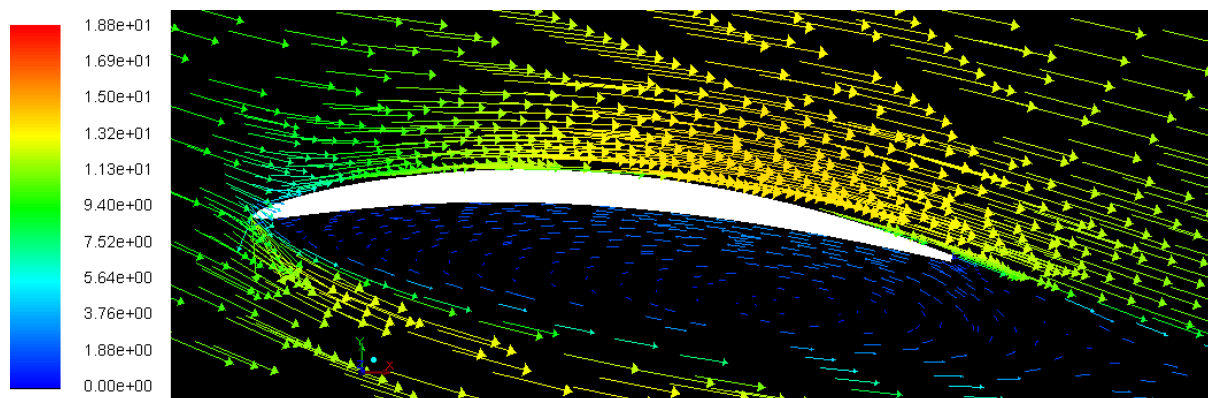
Obrázek 86: Vektory rychlosti hladkého profilu ( $\alpha = -10^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ ) obarvené velikostí rychlosti



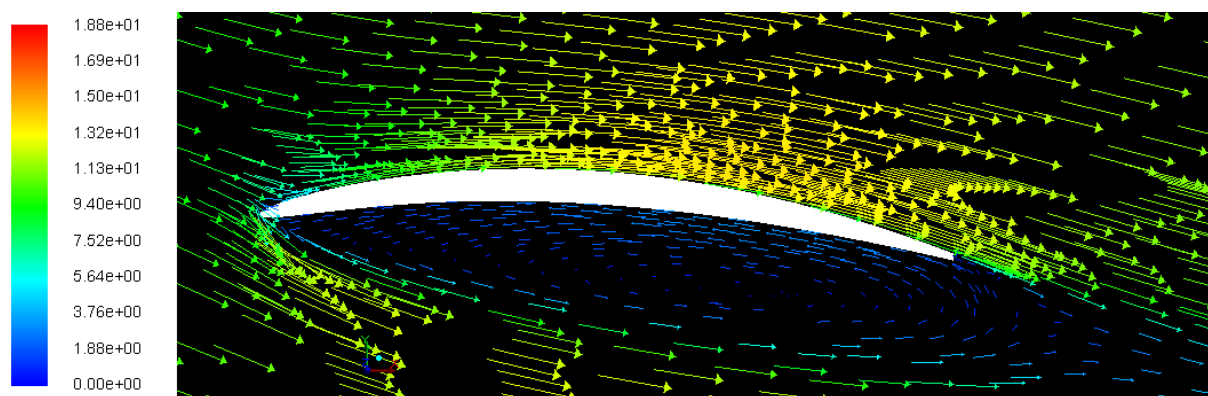
Obrázek 87: Vektory rychlosti lopatky B ( $\alpha = -10^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ ) obarvené velikostí rychlosti



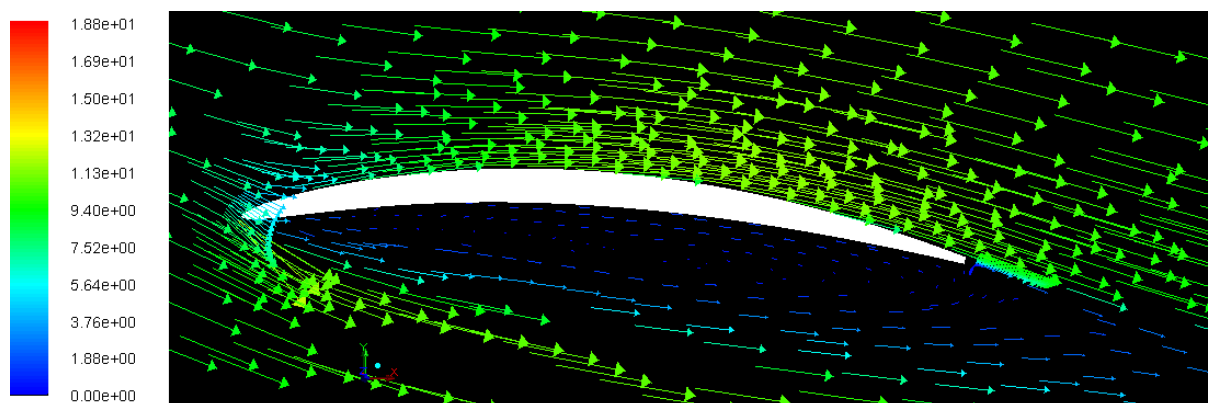
Obrázek 88: Vektory rychlosti lopatky K ( $\alpha = -10^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ ) obarvené velikostí rychlosti



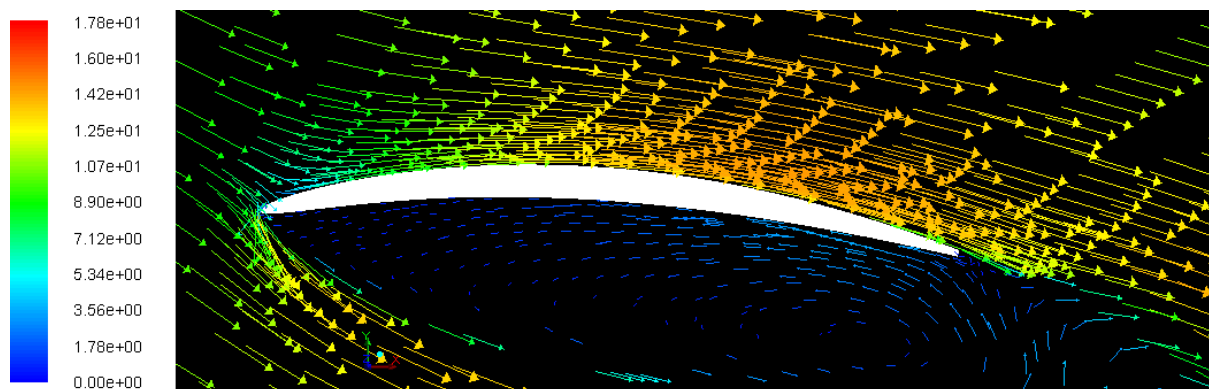
Obrázek 89: Vektory rychlosti hladkého profilu ( $\alpha = -20^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ ) obarvené velikostí rychlosti



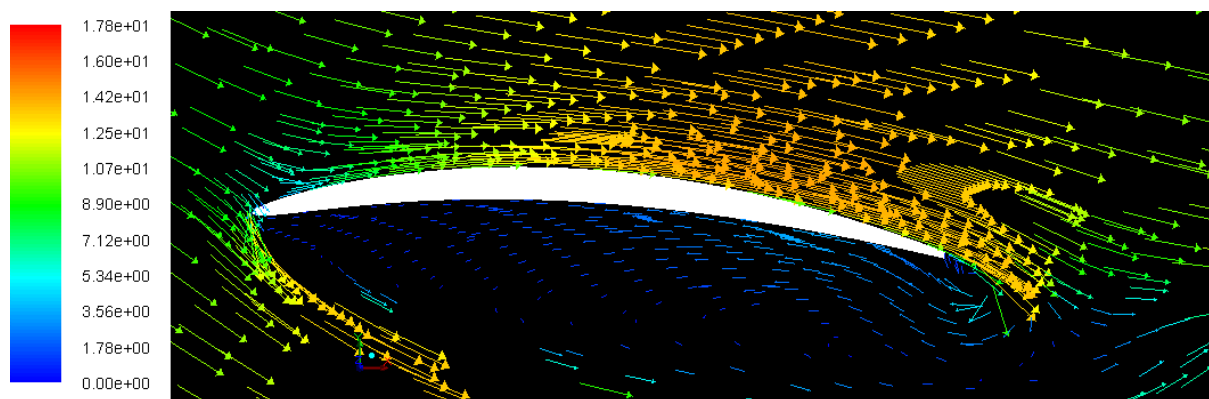
Obrázek 90: Vektory rychlosti lopatky B ( $\alpha = -20^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ ) obarvené velikostí rychlosti



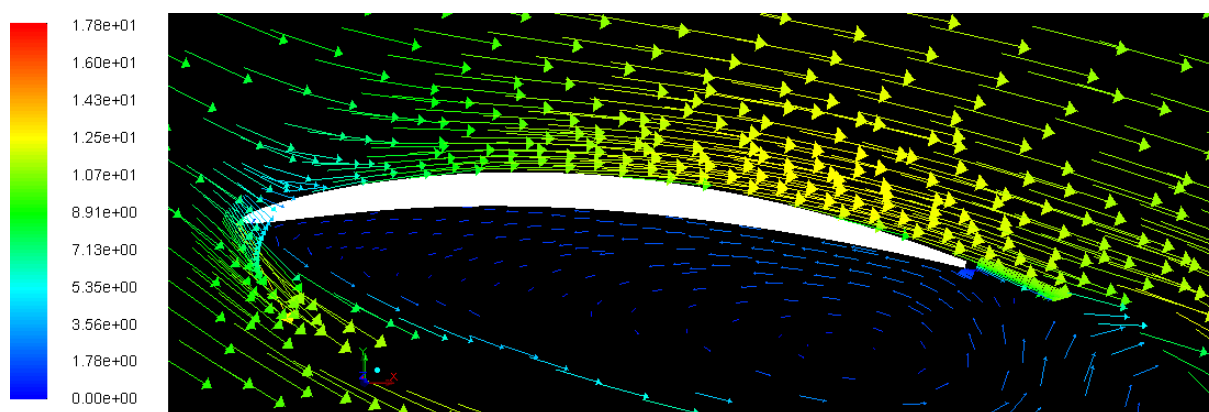
Obrázek 91: Vektory rychlosti lopatky K ( $\alpha = -20^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ ) obarvené velikostí rychlosti



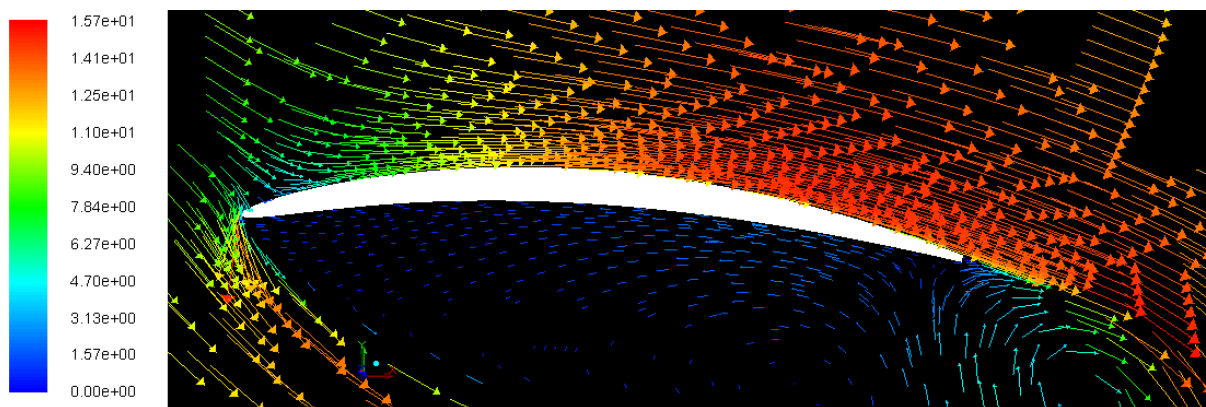
Obrázek 92: Vektory rychlosti hladkého profilu ( $\alpha = -30^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ ) obarvené velikostí rychlosti



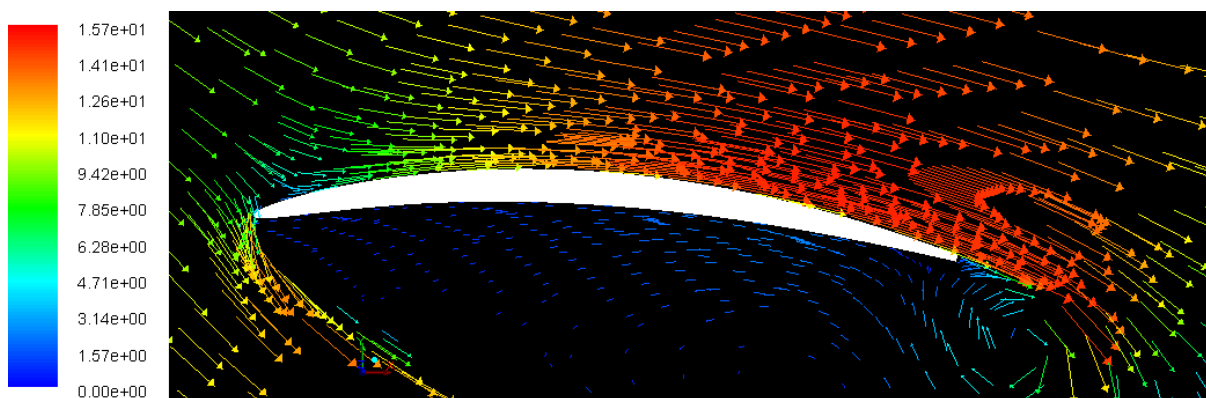
Obrázek 93: Vektory rychlosti lopatky B ( $\alpha = -30^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ ) obarvené velikostí rychlosti



Obrázek 94: Vektory rychlosti lopatky K ( $\alpha = -30^\circ$ ,  $z = 0,0375\text{m}$ ) obarvené velikostí rychlosti



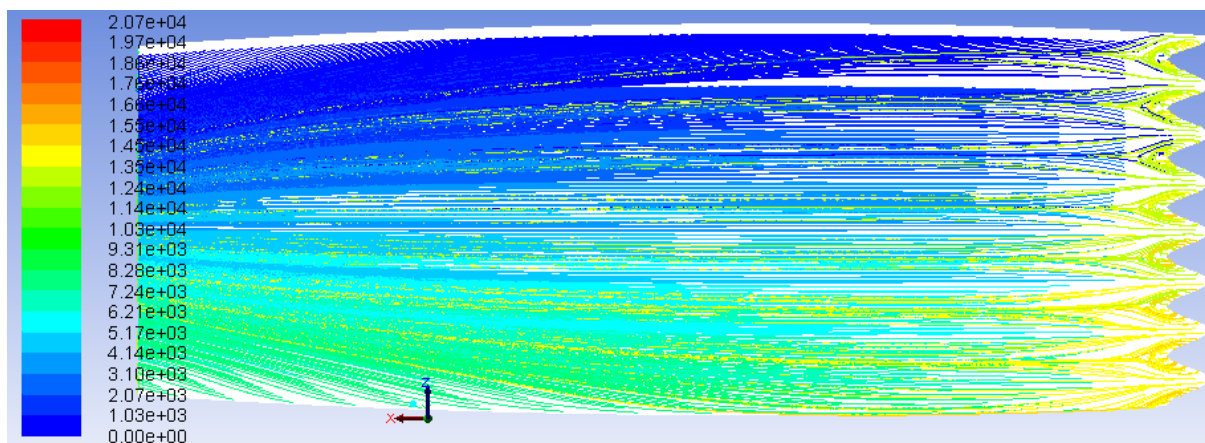
Obrázek 95: Vektory rychlosti hladkého profilu ( $\alpha = -40^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti



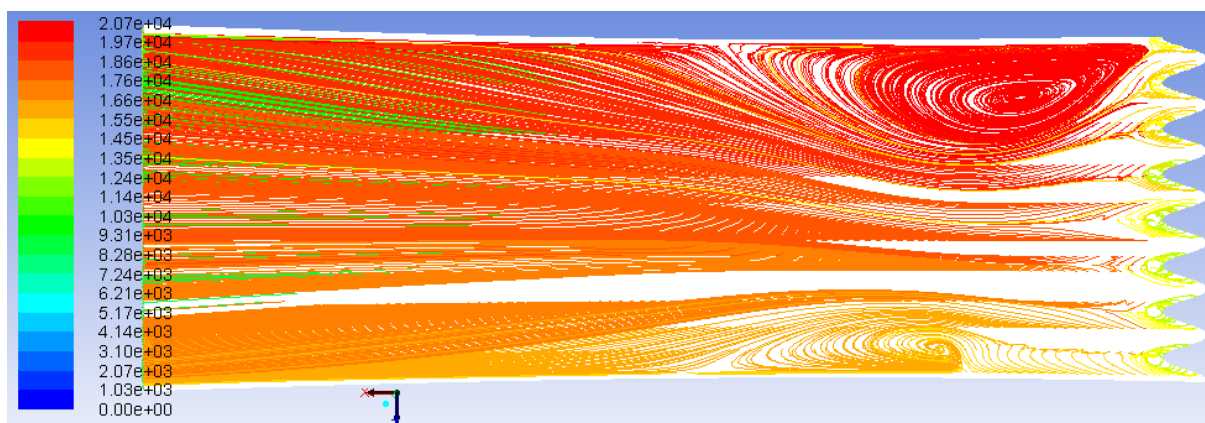
Obrázek 96: Vektory rychlosti lopatky B ( $\alpha = -40^\circ$ ,  $z = 0,0375m$ ) obarvené velikostí rychlosti

## 8.5 Proudnice na profilu lopatky

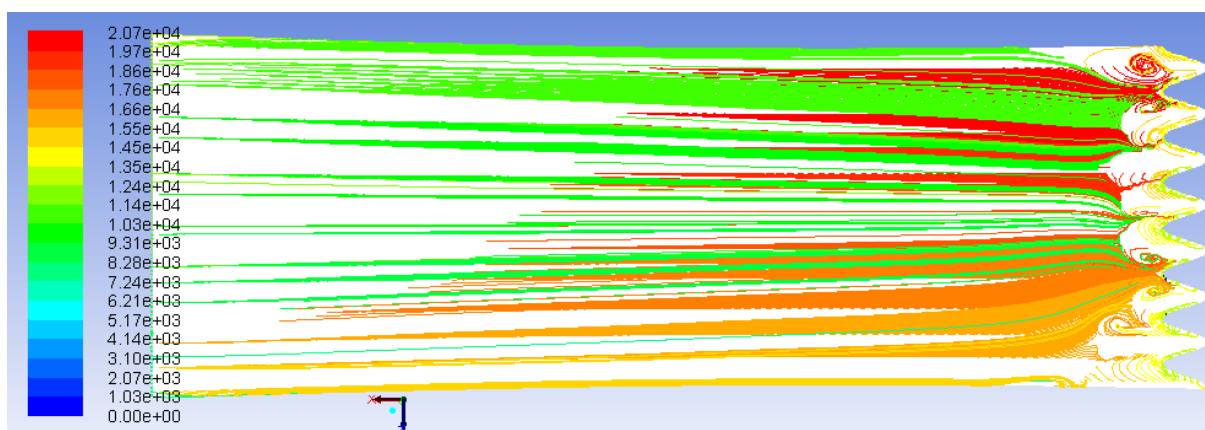
Při vizualizaci proudění pomocí proudnic na profilu tvarované lopatky s velkou amplitudou je vidět, že při menších úhlech náběhu se proudění uchyluje do „údolí“ mezi hrbolky, kde plynule proudí přes profil (obrázek 97 a 98). Při proudění s větším úhlem náběhu dochází k tvorbě vírů v údolích těsně za hrbolky, čímž se nám potvrdila studie, kterou provedl M. Murray a D. Miklosovic [11]. Víry tvořené mezi hrbolky mají opačný směr rotace, čímž se při jejich smísení zvýší rychlost průtoku kapaliny na sací straně. Při vytváření vírů zde dochází totiž k předávání energie u povrchu profilu a díky tomu k pozdějšímu odtržení mezní vrstvy. Když se podíváme na výsledky z kapitoly 8.1, je patrné že to má za následek zvýšení vztlaku a pokles odporu. Pokud ale máme menší amplitudu jako je tomu u lopatky B, k tvorbě vírů mezi hrbolky nedochází.



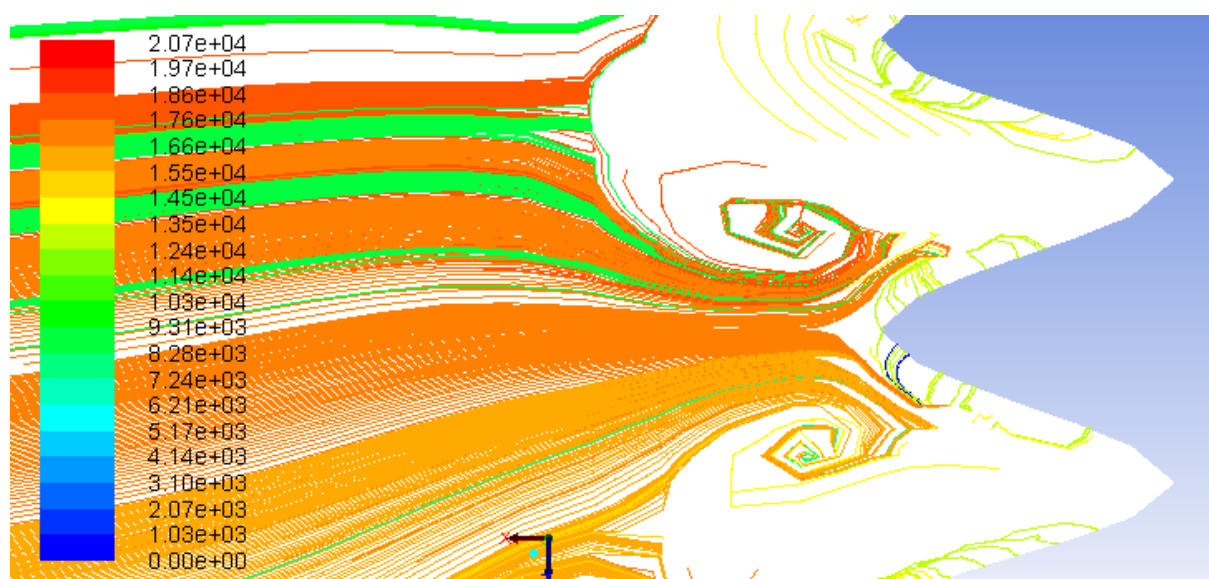
Obrázek 97: Proudnice na profilu lopatky K při úhlu náběhu  $20^\circ$  (tlačná strana)



Obrázek 98: Proudnice na profilu lopatky K při úhlu náběhu  $-10^\circ$  (sací strana)



Obrázek 99: Proudnice na profilu lopatky K při úhlu náběhu  $-30^\circ$  (sací strana)



Obrázek 100: Detail vírů tvořených mezi hrbolky na profilu lopatky K při  $-30^\circ$  (sací strana)

## 9 Závěr

Vzhledem k ubývajícimu množství neobnovitelných zdrojů, má přírodní energie stále větší uplatnění. Neustále se staví nové elektrárny, vyměňují se staré stroje za nové s větší účinností a životností. Neustálý vývoj toho, co již bylo vynalezeno, vede k lepším výsledkům, které postupně nacházejí své uplatnění. V případě této diplomové práce šlo o modifikaci náběžné hrany lopatky vírové turbíny a její vliv na charakteristiku lopatkové mříže.

Inspirací pro tuto práci byly předchozí studie mnoha odborníků (kapitola 3), kteří našli využití pro tvarované náběžné hrany lopatek a různých profilů (viz kapitola 4). Jejich výsledky ukázaly, že hrbolky na náběžné hraně mají pozitivní vliv na vlastnosti proudění a to především nárůstem vztlaku a poklesem odporu. Tato práce, stejně jako předchozí studie, vycházela z aplikace přírodního systému na již zavedenou technologii. Jednalo se zde konkrétně o přední stranu prsních ploutví keporkaka (kapitola 2), která je opatřena hrbolky sinusového tvaru. V případě keporkaka jde o velmi efektivní systém. Keporkak má díky němu i přes svou velikost výborné manévrovací schopnosti a je tak schopen provádět ostré kloněné zatáčky při velkých rychlostech.

Při návrhu tvarované náběžné hrany lopatky oběžného kola vírové turbíny bylo potřeba sestavit nejdříve hladký profil (kapitola 6) z bodů reálné vírové turbíny v konformním zobrazení. Na základě toho byly tvořeny tvarované lopatky (kapitola 7), kdy ovlivněná oblast je zhruba 10 procent z délky tělivity a zbytek lopatky zůstává zachován. Při návrhu modifikovaných lopatek se měnili pouze dva parametry, a to amplituda a vlnová délka. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4 (kapitola 7). Výpočty pro každou lopatku byly prováděny v rozmezích úhlů náběhu od  $-40^\circ$  do  $40^\circ$ .

Porovnáním tvarovaných lopatek s hladkým profilem (kapitola 8) docházíme k závěrům, že hrbolky na náběžné hraně dosahují lepších výsledků při záporných úhlech náběhu. U některých lopatek dochází ke 20% zlepšení oproti hladkému profilu. Při kladných úhlech náběhu jsou modifikované lopatky buď totožné s hladkým profilem nebo nepatrně horší. Zhoršené vlastnosti jsou oproti navýšení  $c_l/c_d$  při záporných úhlech náběhu zanedbatelné. Porovnáním výsledků vyšly nejlépe lopatky B, I, K, které spojuje podobná vlnová délka. V případě lopatky B je  $\lambda = 10,714$  a u lopatek I a K je  $\lambda = 10$ . Hlavní výhodou hrbolků je vznik vírů, které modifikují vlastnosti turbulentní mezní vrstvy. Díky tomu se sníží tvarový odpor vznikající na povrchu lopatky a dosahujeme lepších výsledků poměru  $c_l/c_d$ .

Z důvodu časové náročnosti jednotlivých výpočtů nebylo možné zahrnout další rozmezí vlnových délek a amplitud.

Veškeré výsledky zatím vycházejí z výpočtové simulace na přímé lopatkové mříži. V budoucnu by měly být provedeny simulace na rotující mříži se skutečnou lopatkou, s proměnným profilem od náboje ke komoře. Následně by pak měly být zjištěné poznatky ověřeny experimentálně.

## 10 Seznam použité literatury

- [1] TALAFÚSOVÁ, A. *Keporkaci: Biologie a osobní zkušenost z Tonga*. Tethys: Potápění v pohodě [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.tethys.cz/clanek.php?id=r2012tonga>
- [2] FISH, F.E.; WEBER, P.W.; MURRAY, M.M.; HOWLE, L.E. *The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology*. Integrative and Comparative Biology 51(1): 203-213, 2011.
- [3] ČARIJA, Z.; MARUŠIĆ, E.; NOVAK, Z.; FUČAK, S. *Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristics of a Bumped Leading Edge Turbine Blade*. Engineering Review XX(X): XX-XX, 201X.
- [4] NIEDERMAYR, W. *Diving Silver Bank, Dominican Republic: In the water with humpback whales*. Underwater Photography Guide [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.uwphotographyguide.com/humpback-whales-silverbank>
- [5] Galerie Tonga. *Tethys: Potápění v pohodě* [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.tethys.cz/galerie.php?gal=tonga&big=no&nadpis=Tonga>
- [6] BROWN, A.S. *From Whales to Fans: A second look at a piece of sculpture led to a promising technology*. Himpunan Mahasiswa Mesin Unsyiah [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://himpunanmahasiswamesinunsyiah.wordpress.com/2011/05/29/from-whales-to-fans/>
- [7] WATTS, P.; FISH, F.E. *Scalloped wing leading edge* [patent]. USA. US 6,431,498 B1. Uděleno 13.8.2002.
- [8] WATTS, P.; FISH, F.E. *The influence of passive, leading edge tubercles on wing performanc*. Proceedings of the 12th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, UUST01, Autonomous Undersea Systems Institute, Durham, NH, 2001.
- [9] HANSEN, K.L.; KELSO, R.M.; DALLY, B.B. *An Investigation of Three-Dimensional Effects on the Performance of Tubercles at Low Reynolds Numbers*. 17<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference Auckland, New Zealand, 2010.
- [10] MALIPEDDI, A.K. *Numerical analysis of effects of leading-edge protuberances on aircraft wing performance*. Bachelors of Technology. Jawaharlal Nehru Technological University. India, 2011.
- [11] MIKLOSOVIC, D.S.; MURRAY, M.M.; HOWLE, L.E.; FISH, F.E. *Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (Megaptera novaeangliae) flippers*. Physics of fluid 16(5), 2004.

- 
- [12] JOHARI, H.; HENOC, C.; CUSTODIO, D.; LEVSHIN, A. *Effects of Leading-Edge Protuberances on Airfoil Performance*. AIAA Journal 45(11), 2007.
  - [13] PEDRO, H.T.C.; KOBAYASHI, M.H. *Numerical Study of stall delay on humpback whale flippers*. 46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. 2008.
  - [14] CANTER, N. *Humpback whales inspire new wind turbine technology*. TECH BEAT. Technology & Lubrication Technology, 2008.
  - [15] GOODMAN, T. *Humpback Whale Inspires Best Wind Power Turbines: WhalePower Tubercle Technology*. Inventorspot: Serious fun for the inventor all of us [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://inventorspot.com/articles/humpback\\_whale\\_inspires\\_energy\\_saving\\_whalepower\\_tubercle techno\\_30079](http://inventorspot.com/articles/humpback_whale_inspires_energy_saving_whalepower_tubercle techno_30079)
  - [16] FISH, F.E. *Research Interests: Bio-inspiration and Biomimetics*. Liquid Life Laboratory [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://darwin.wcupa.edu/~biology/fish/research/>
  - [17] *HVLS Whale Power Fans*. Industrial Maid [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://shop.industrial-maid.com/category-s/605.htm>
  - [18] *Humpback Skeg*. Fluid Earth [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.fluidearthstore.org/product.sc?productId=14&categoryId=1>
  - [19] SWALES, H. *The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology*. Oxford Journals: Integrative and Comparative Biology [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://icb.oxfordjournals.org/content/early/2011/05/14/icb.icr016/F7.expansion.html>
  - [20] *The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology*. Oxford Journals: Integrative and Comparative Biology [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://icb.oxfordjournals.org/content/early/2011/05/14/icb.icr016/F8.expansion.html>
  - [21] KAPLAN, A. *Obnovitelné zdroje: Vírová turbína*. 3 PÓL: Magazín plný energie [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://3pol.cz/1261-virova-turbina>
  - [22] MAUKŠ, I. *Vírová turbína vědců z Brna je příslibem pro využití menších vodních toků*. INOVACE.CZ [online]. 2009 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://www.inovace.cz/novinky/435-virova-turbina-vedcu-z-brna-je-prislibem-pro-vyuziti-mensich-vodnich-toku>
  - [23] *Galerie: Vírová turbína*. Brněnský deník [online]. 2011 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: [http://brnensky.denik.cz/galerie/virova\\_turbina\\_pochyly.html](http://brnensky.denik.cz/galerie/virova_turbina_pochyly.html)
  - [24] HOLUB, J. *Rychloběžná vodní turbína*. Diplomová práce. VUT Brno, 2012.

- [25] LNĚNIČKA, J. *Profily nosných a ocasních ploch, listů vrtulí a rotorů: 3.část*. E-magazín Akademie Letectví [online]. 2008 [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2008/09/profily.php>
- [26] DALA, L. *Preassure Coefficient, cp*. Aerospace Students [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: <http://www.aerostudents.com/files/introductionToAerospaceEngineering/AerodynamicsPressureCoefficients.pdf>
- [27] HALUZA, M. *Vývoj vírové turbíny zkrácená verze habilitační práce*. Brno. VUTIUM, 2004. 29 s. ISBN 80-214-2731-0
- [28] POCHYLÝ, F.; HALUZA, M.; RUDOLF, P.; ŠOB, F. VUT V BRNĚ, FSI. Vírová turbína [patent]. 292197. Uděleno 12.06.2003
- [29] FLEISCHNER, P. a M. NECHLEBA. *Hydromechanika lopatkových strojů*. Vysoké učení technické v Brně, 1980.

## Příloha

Souřadnice středního průřezu lopatky vírové turbíny na poloměru  $r = 0,0625\text{m}$ :

| x              | x             | x              | y             |
|----------------|---------------|----------------|---------------|
| -50            | 98,5250398847 | -42,4762485995 | 94,4678553589 |
| -49,9900187291 | 98,3152239675 | -42,2719825727 | 86,2164628366 |
| -49,9752863311 | 98,7356472210 | -41,6711854430 | 93,7530249376 |
| -49,9195008321 | 97,9922489141 | -41,4056061521 | 85,0497489497 |
| -49,8782945657 | 98,9342231970 | -40,8291632033 | 92,9820996603 |
| -49,8231610703 | 97,6784090929 | -40,4851167372 | 83,8112044968 |
| -49,7054493457 | 97,3750419964 | -39,9412148040 | 92,1519303852 |
| -49,6766849055 | 99,0490602630 | -39,5077405349 | 82,4957218216 |
| -49,5763346159 | 97,0774157067 | -39,0045355184 | 91,2589626421 |
| -49,4446367987 | 99,0728702652 | -38,4706457894 | 81,0977151806 |
| -49,4384720462 | 96,7848880677 | -38,0172441164 | 90,2996844824 |
| -49,2135872694 | 99,0506274233 | -37,3711974571 | 79,6117966188 |
| -49,1330601714 | 96,1919932055 | -36,9791300709 | 89,2720291007 |
| -48,9033548927 | 98,9644995440 | -36,1930065525 | 78,0135412832 |
| -48,7845418797 | 95,5700625055 | -35,8796207729 | 88,1633277827 |
| -48,5983415479 | 98,8522576966 | -34,9598407235 | 76,3324502063 |
| -48,3966462954 | 94,9184600024 | -34,7228489819 | 86,9751915792 |
| -48,2993151638 | 98,7155370582 | -33,6538589176 | 74,5414436338 |
| -48,0042239261 | 98,5655194872 | -33,5100313109 | 85,7062572059 |
| -47,9715180327 | 94,2365038952 | -32,2715080006 | 72,6321480247 |
| -47,7130510168 | 98,4048521014 | -32,2250917121 | 84,3366211328 |
| -47,5091805168 | 93,5216757044 | -30,8674649753 | 82,8619330096 |
| -47,1547557514 | 98,0687291281 | -30,8319603617 | 70,6275026695 |
| -47,0090102751 | 92,7713121373 | -29,4518375491 | 81,2940860830 |
| -46,5726285687 | 97,6871339947 | -29,2872338226 | 68,4561687099 |
| -46,4696381300 | 91,9827267282 | -27,9436631540 | 79,5904762580 |
| -45,9665952884 | 97,2634673082 | -27,6562136627 | 66,1390814539 |
| -45,8731104074 | 91,1282298972 | -26,3780010230 | 77,7855536040 |
| -45,3326369739 | 96,7965962957 | -25,9275112923 | 63,6540255431 |
| -45,2470578241 | 90,2559876452 | -24,7079528472 | 75,8194089658 |
| -44,6693381976 | 96,2860246819 | -24,1353068958 | 61,0435693275 |
| -44,5717544934 | 89,3322947751 | -22,9777836940 | 73,7375884407 |
| -43,9749799044 | 95,7303808436 | -22,2144511697 | 58,2048505781 |
| -43,8528513135 | 88,3534439870 | -21,1328246692 | 71,4669253284 |
| -43,2431964252 | 95,1238094150 | -20,2434377175 | 55,2282839570 |
| -43,0872132012 | 87,3167017453 | -19,2252363602 | 69,0630637790 |

| x              | y              | x             | y              |
|----------------|----------------|---------------|----------------|
| -18,1548299675 | 51,9861446260  | 32,2299671733 | -26,4812641557 |
| -17,1972021760 | 66,4439978360  | 32,7856343025 | -53,6936419818 |
| -15,9616262463 | 48,5160763738  | 33,8474249979 | -31,2573778098 |
| -15,0963391011 | 63,6593814563  | 33,9608093527 | -56,9361308958 |
| -13,6688413654 | 44,8129155983  | 35,0608316044 | -60,0128940121 |
| -12,8614179619 | 60,6286433946  | 35,2918862391 | -35,7102295131 |
| -11,2884981990 | 40,8820072528  | 36,0816250589 | -62,9043088506 |
| -10,5215185390 | 57,3987582138  | 36,6207449318 | -39,9794777184 |
| -8,7664912610  | 36,6161427106  | 37,0302872755 | -65,6229986092 |
| -8,0956939929  | 53,9482925915  | 37,8110211779 | -43,9580599785 |
| -6,1372644202  | 32,0521089570  | 37,9144002359 | -68,1844221705 |
| -5,5539149185  | 50,2164865555  | 38,7340450277 | -70,5831554100 |
| -3,4211003641  | 27,2047050075  | 38,9075269348 | -47,7651792365 |
| -2,8894030010  | 46,1705189889  | 39,5037474259 | -72,8569095386 |
| -0,5575648772  | 21,9401751214  | 39,8931449310 | -51,3139603689 |
| -0,1395305697  | 41,8421049563  | 40,2238380873 | -75,0029027938 |
| 2,4063962807   | 16,3146869445  | 40,7995776771 | -54,6932856653 |
| 2,7121841613   | 37,1793063672  | 40,8953047777 | -77,0202795349 |
| 5,4716753724   | 10,2973726136  | 41,5228965220 | -78,9202460232 |
| 5,6680774130   | 32,1454675055  | 41,6287211190 | -57,8896638734 |
| 8,6716402057   | 3,7946456415   | 42,1097700266 | -80,7095739037 |
| 8,7120410028   | 26,7317230779  | 42,3776074542 | -60,8703730000 |
| 11,6868762952  | -2,5476798668  | 42,6563511510 | -82,3870828533 |
| 11,8433319290  | 20,8972145497  | 43,0682101947 | -63,7042087083 |
| 14,4797058823  | -8,6174529077  | 43,1704275991 | -83,9744940440 |
| 15,0529179446  | 14,6093067987  | 43,6524759853 | -85,4715063468 |
| 17,0390031609  | -14,3524469746 | 43,7017288348 | -66,3812743547 |
| 18,3100425599  | 7,8658861988   | 44,1032372089 | -86,8789713067 |
| 19,3869746946  | -19,7650969499 | 44,2807575740 | -68,8975153279 |
| 21,2633638361  | 1,3941429347   | 44,5255769625 | -88,2042534657 |
| 21,5635734972  | -24,9168292629 | 44,8092048299 | -71,2561929572 |
| 23,5496229749  | -29,7341180424 | 44,9214065085 | -89,4521295680 |
| 23,9248626020  | -4,7664897203  | 45,2924962574 | -90,6271063764 |
| 25,3978104837  | -34,3198056774 | 45,2972290646 | -73,4905816140 |
| 26,3512442493  | -10,6878927827 | 45,6404961897 | -91,7333983850 |
| 27,1082522487  | -38,6544051612 | 45,7451822581 | -75,5920797937 |
| 28,5136022844  | -16,2397946431 | 45,9664229024 | -92,7734917392 |
| 28,6913496945  | -42,7458815505 | 46,1580846277 | -77,5747249940 |
| 30,1658190180  | -46,6268140801 | 46,2727429573 | -93,7545068150 |
| 30,4603618639  | -21,4857111157 | 46,5384111441 | -79,4418849557 |
| 31,5334162140  | -50,2882004297 | 46,5602293885 | -94,6781747123 |

| x             | y              |
|---------------|----------------|
| 46,8300501564 | -95,5478582369 |
| 46,8881490519 | -81,1956619119 |
| 47,0833933431 | -96,3666917574 |
| 47,2119179360 | -82,8519263839 |
| 47,3212410083 | -97,1376666399 |
| 47,5106542071 | -84,4099949623 |
| 47,5446496922 | -97,8635604605 |
| 47,7544657080 | -98,5470289412 |
| 47,7871845154 | -85,8786460121 |
| 47,9516098494 | -99,1905308014 |
| 48,0430552296 | -87,2614481095 |
| 48,1222696111 | -99,1511186191 |
| 48,2800103316 | -88,5633519231 |
| 48,2930227736 | -99,1117060496 |
| 48,4637047592 | -99,0722931746 |
| 48,4991706310 | -89,7864559326 |
| 48,6343567125 | -99,0328803249 |
| 48,7029867723 | -90,9407807638 |
| 48,8050570179 | -98,9934672889 |
| 48,8921735267 | -92,0275686585 |
| 48,9758146852 | -98,9540541791 |
| 49,0678850398 | -93,0507424775 |
| 49,1465261027 | -98,9146409470 |
| 49,2312268045 | -94,0140032470 |
| 49,3172101906 | -98,8752279664 |
| 49,3831256210 | -94,9208438413 |
| 49,4879080934 | -98,8358146315 |
| 49,5245269094 | -95,7745536034 |
| 49,6562289311 | -96,5782363896 |
| 49,6586053956 | -98,7964015508 |
| 49,7789335436 | -97,3348223168 |
| 49,8292981929 | -98,7569884457 |
| 49,8932996580 | -98,0470712849 |
| 50            | -98,7175742169 |