

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Fakulta rybářství a ochrany vod

Ústav akvakultury a ochrany vod

Bakalářská práce

**Horizontální proudění vody v malých
rybnících**

Autor: Tereza Šťastná

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Otakar Strunecký, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: MSc. Kim Anh Nguyen

Studijní program a obor: Ochrana vod

Forma studia: Prezenční

Ročník: 3.

České Budějovice 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracovala pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....

Tereza Šťastná

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu Mgr. Otakaru Struneckému, Ph.D. a konzultantce MSc. Kim Anh Nguyen, za odborné vedení a trpělivost při pokusech, modelování i tvorbě písemné části. A dále bych ráda poděkovala své rodině za podporu a poskytnuté připomínky a rady.

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

Fakulta rybářství a ochrany vod

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Tereza ŠTASTNÁ
Osobní číslo: V20B041P
Studijní program: B0588A030002 Ochrana vod
Téma práce: Horizontální proudění vody v malých rybnících
Zadávající katedra: Ústav akvakultury a ochrany vod

Zásady pro vypracování

Měření fyzikálních a chemických vlastností vody slouží ke stanovení základních vlastností rybníků. Tato měření jsou zpravidla v hydrobiologické praxi omezena z časových a finančních důvodů na jedno místo, nejčastěji na to nejhlubší v blízkosti hráze. Předchozí kontinuální měření ovšem ukázala, že vlastnosti vody se dynamicky mění a zejména koncentrace kyslíku často a neočekávaně roste i po západu slunce. Jediné přijatelné vysvětlení je přísun na kyslík bohatší vody z jiných částí rybníka. Prostorová heterogenita fyzikálních vlastností vody tak může pozitivně ovlivňovat podmínky pro ekonomickou produkci ryb.

Studiu pohybu vody v jezerech se věnovali hydrobiologové v 50. až 70. letech minulého století, ovšem od té doby je tomuto jevu věnována pozornost minimální. Studentka tak provede rešerši literárních pramenů, zejména se zaměřením na proudění vody v mělkých jezerech. Další část bakalářské práce bude zaměřena terénní měření pohybu vody při hladině ve dvou až třech vybraných rybnících za různých atmosférických podmínek. K tomu využije GPS, flowmetr, anemometr a oxymetr. Zjištěné údaje studentka vyhodnotí a stanoví rychlost proudění vody u hladiny v reálných podmínkách. Pokusí se vytvořit zjednodušený 3D model rybníka a jeho okolí a simulovat proudění v jeho hlubších vrstvách pomocí simulací v programu ANSYS. Takto získané výsledky pak studentka dále vyhodnotí a srovná s informacemi z dostupné literatury. Studentka tak vytvoří základní rámec pro porozumění důležitosti parametru rychlosti pohybu vodní masy v prostředí jihočeských rybníků. Její výsledky pomohou porozumět procesům, které se odehrávají v jihočeských rybnících a mohou v dlouhodobém horizontu přispět k jejich účinnějšímu managementu.

Rozsah pracovní zprávy: 40-70 stran
Rozsah grafických prací: dle potřeby
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam doporučené literatury:

Cole, Gerald A, and Paul E Weihe. *Textbook of Limnology*. Waveland Press, 2015.
Hartman, P., and J. Regenda. *Praktika V Rybníkářství*. Vodňany: FROV JU, 2016.
Lampert, Winfried, and Ulrich Sommer. *Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams*. Oxford university press, 2007.
Moss, Brian R. *Ecology of Freshwaters: Earth's Bloodstream*. John Wiley & Sons, 2018.
Ruttner, Franz. *Fundamentals of Limnology*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2020.
Schwoerbel, Jürgen. *Methods of Hydrobiology: (Freshwater Biology)*. Elsevier, 2016.
Smith, Ralph. „Limnology-Inland Water Ecosystems.“ 2002.

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Otakar Strunecký, Ph.D.**
Ústav akvakultury a ochrany vod

Konzultant bakalářské práce: **MSc. Kim Anh Nguyen**

Datum zadání bakalářské práce: **21. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. května 2023**

02-
prof. Ing. Pavel Kozák, Ph.D.
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
FAKULTA RYBÁŘSTVÍ A OCHRANY VOD
Zátiší 728/II
389 25 Vodňany (2)


Ing. Jan Kašpar
ředitel

V Českých Budějovicích dne 25. února 2022

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Literární rešerše	9
2.1 Základní typy proudění	9
2.1.1 Laminární a turbulentní proudění	9
2.1.2 Vertikální proudění vody.....	10
2.1.3 Horizontální proudění vody.....	11
2.2 Druhy vln	12
2.2.1 Kapilární vlny	13
2.2.2 Povrchové gravitační vlny	13
2.2.3 Stojaté povrchové vlny	14
2.2.4 Vnitřní seiche.....	15
2.2.5 Kelvinovy vlny	16
2.2.6 Poincarého vlny	17
2.3 Míchání vody	18
2.3.1 Cirkulace vyvolaná větrem.....	18
2.3.2 Langmuirovo proudění	18
2.3.3 Hypolimnetické proudy a Kelvin-Helmholtzovo míšení	19
2.4 Turbulentní míchání a biota	20
2.4.1 Časová měřítka biotické odezvy.....	21
2.5 Programy používané pro vizualizaci GPS dat.....	21
2.5.1 Program Base Camp	21
2.5.2 Program Google Earth Pro	21
2.6 Ansys.....	22
2.6.1 Ansys Student.....	22
2.6.2 Ansys Fluent.....	22
3. Materiály a metodika	23
3.1 Vývoj zařízení pro zaznamenávání proudění	23
3.1.1 Plovoucí pouzdra pro přístroje	23
3.1.2 Zařízení a aplikace.....	25
3.2 Další použité vybavení.....	27

3.3 Výběr rybníku pro měření	28
3.4 Postup měření na Dehtáři	29
3.5 Programy použité pro vyhodnocení výsledků	30
3.6 Postup při simulování proudění v Ansys Fluent	30
3.6.1 Krok Workbench	31
3.6.2 Krok Geometry	31
3.6.3 Krok Mesh	32
3.6.4 Krok Setup	34
3.6.5 Krok Setup Fluent	34
3.6.6 Krok Results	37
4. Výsledky	39
4.1 Měření na Dehtáři	39
4.1.1 Výsledky měření 29. 11. 2022	39
4.1.2 Výsledky měření 01. 12. 2022	40
4.1.3 Výsledky měření 08. 12. 2022	42
4.3 Simulace v programu Ansys	44
5. Diskuze	46
6. Závěr	51
7. Přehled použité literatury	52
8. Seznam příloh	56
9. Přílohy	57
10. Abstrakt	99
11. Abstract	101

1. Úvod

Pro stanovení základních vlastností rybníků je důležité měření fyzikálních a chemických vlastností vody, ta jsou však v praxi často z časových a finančních důvodů omezena na jedno místo (nejčastěji nejhlubší místo v blízkosti hráze). Z některých měření však vyplývá, že vlastnosti vody se mění a například koncentrace kyslíku často roste i po západu slunce, což by mohlo být vysvětleno přísunem na kyslík bohatší vody z jiných částí rybníka pomocí různého proudění.

Vztah mezi teplotou vody a míšením jezerní vody byl studován již dlouhou dobu. Pohybu vody v jezerech a rybnících byla věnována pozornost hydrobiologie hlavně v 50. až 70. letech minulého století. Ti zjistili, že voda v povrchové vrstvě se dobře mísí s horizontálním tokem a je tak homogenizovaná. Je však zřejmé, že teplota a kvalita vody se mírně liší v oblastech poblíž břehu a v oblastech středu jezera. (Sato, 2007).

V dnešní době není věnovaná pozornost tomuto jevu velká. Přímých měření proudění (obzvláště v oblasti hypolimnia) je minimum, protože rychlost proudu ve středních a malých rybnících nebo jezerech bývá velice malá a vzniká tak problém s jejím zaznamenáváním standardními měřidly (Imboden a kol., 1983). S tímto nedostatkem měření a výzkumu je spojeno i malé množství vydaných publikací a článků zabývajících se tímto tématem.

Z těchto důvodů se v této práci budu věnovat proudění vody v malých rybnících a mělkých jezerech se zaměřením na horizontální proudění. Provedu terénní měření pohybu vody při hladině pomocí GPS a podobných zařízení ve vybraných rybnících za různých atmosférických podmínek a z výsledků stanovím rychlost proudění vody u hladiny v reálných podmínkách. Následně vytvořím zjednodušený 3D model rybníka a pomocí programu ANSYS Student se pokusím simulovat proudění v jeho hlubších vrstvách.

2. Literární rešerše

Mělká jezera a rybníky jsou nejhojnějšími typy jezer v globální krajině. Poskytují nesčetné množství ekosystémových a sociálních služeb, přičemž mají velkou ochrannářskou hodnotu, například pro stěhovavé ptáky. Obvykle se vyskytují v nížinných oblastech a často souvisí se sezónními změnami v povodňových režimech řek. Původ mnoha z těchto systémů může také souviset s geologickými poruchami, jako jsou pohyby ledovce nebo jiné procesy, které vytvářejí deprese v krajině. Také mnoho mělkých jezer a rybníků bylo vytvořeno lidmi po tisíciletích úprav krajiny, jako je úprava potoků a řek nebo při těžbě kovů, písku, šterku a rašeliny nebo zakládáním chovných rybníků (Meerhoff a Jeppesen, 2009).

2.1 Základní typy proudění

Proudění vody v rybnících a jezerech vzniká působením různých faktorů jako například větrem, změnami tlaku, přítokem a odtokem tepla, přítokem a odtokem vody a gravitací (Sato, 2007). Zatímco v oceánech si proudové vzorce zachovávají svou strukturu po desetiletí (jako např. Golský proud), celozjerní proudy v takových časových úsecích nepřetrvávají, protože většina jezer je malá a silněji tak prožívají variabilitu hnacích sil (O'Sullivan a Reynolds, 2003). Jezerní proudy jsou výsledkem komplexních interakcí různých sil, ale v mnoha případech dominuje malý počet konkrétních sil (Lane, 2000).

Díky všudypřítomnému pohybu a míšení poskytují rybníky, jezera i oceány vodním organismům prostředí s pozoruhodnou fyzikální a chemickou homogenitou. Pohyb celého systému je zodpovědný za transport živin, biomasy a dalších složek (O'Sullivan a Reynolds, 2003).

2.1.1 Laminární a turbulentní proudění

Laminární proudění vzniká při velmi pomalých průtocích, kdy je viskozita vody dostatečně vysoká, aby umožnila vrstvám vody klouzat po sobě uspořádaným (laminárním) způsobem, protože viskózní síly, které vážou tekutinu, převažují nad silami zrychlení. Se zvyšujícím se průtokem vody v jezeře se koherentní struktura rozpadá a nastává nový turbulentní pohyb vířivých a chaotických vírů. Proces se šíří tak, že se víry rozdělují na menší, dokud není překonána zbytková energie a není obnovena viskózní koherence (Smith, 1979).

Interakce mezi viskózními vlastnostmi kapaliny a měnícími se rychlostmi proudění, které na ni působí, lze definovat bezrozměrným Reynoldsovým číslem Re

$$Re = \frac{U \times L}{\nu},$$

kde U je střední rychlost proudu ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), L je hloubka nebo tloušťka vrstvy (m) a ν je kinematická viskozita ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Kinematická viskozita neboli kinematická vazkost je podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny a lze ji zjistit například pomocí kapilárních viskozimetrů (Kalff, 2002). Hodnota Reynoldsova čísla, která rozděluje proudění na laminární a turbulentní, zjištěná pomocí experimentů, je přibližně 1000. Díky této hodnotě lze pro danou tekutinu (v tomto případě vodu) zjistit střední rychlost, při níž přechází laminární proudění na turbulentní a obráceně (Reichl a Všetická, 2006).

Za míchání tepla, plynů, živin a částic ve vodě a povrchu sedimentů v lotických a lentických systémech je zodpovědné více turbulentní než laminární proudění (Kalff, 2002).

Měření naznačují, že hluboké vody stratifikovaných jezer jsou většinou charakterizovány laminárním prouděním, ale i přerušovaným obdobím turbulence v termoklině, na izolovaných místech v hypolimniu a také na dně jezera. Vodní hladina rozvířená větrem a povrchové ochlazování jezer vytváří potřebnou turbulentní kinetickou energii (TKE). TKE je potřeba k rozbití povrchových gravitačních vln poblíž břehu tam, kde se dotýkají dna jezera. Vítr vytváří povrchové proudy, ale protože voda má větší viskozitu, pohybuje se pomaleji než vítr a vytváří sílu ve vertikálním směru. Tato síla, známá jako **smyk**, vytváří gradient rychlosti schopný transportovat vodu systémem. Smyk určuje nejen proudy a související turbulence, ale také tloušťku difuzní mezní vrstvy, charakterizované laminárním prouděním, přes pevné povrchy v jezerech a potocích. Ve volné vodě jezer narušuje smyk laminární proudění povrchových proudů kvůli neschopnosti hustší vody pohybovat se tak rychle jako proudění větru. Pokusy na laboratorních nádržích ukázaly, že ke změně proudění z laminárního na turbulentní stačí nízká proudová rychlost (Kalff, 2002).

2.1.2 Vertikální proudění vody

Vertikální cirkulace je způsobena především rozdílem hustoty vody, kdy voda při 4 °C má největší hustotu a klesá tak ke dnu, přičemž k ochlazování dochází na hladině jezera. Další vliv má také smykové napětí větru. Vertikální proudění způsobuje

promíchávání jezerní vody, které je zkoumáno sledováním distribuce kvality vody, hlavně s využitím profilů rozpuštěného kyslíku (Sato, 2007).

V mělkých jezerech větrná energie často rozpohybuje celý objem vody, přičemž turbulence dokáže zcela promíchat vodní sloupec až ke dnu, což spouští intenzivní rozmíchávání živin, sedimentů a znečišťujících látek zpět do vodního sloupce. Mělká jezera tak většinou nevykazují stratifikaci typickou pro hluboká jezera. (Fenocchi a kol, 2016).

Mělká jezera s pravidelnými břehy a batymetrií vykazují hlavní cirkulace ve vertikální rovině, s návětrnými proudy v povrchové vrstvě a zpětnými toky v oblasti dna. Zatímco horizontální cirkulace je místo toho obvyklá v jezerech s nepravidelnými břehy, složitou batymetrií, nehomogenním rozložením rychlosti větru a rozšířenými vegetačními plochami. (Fenocchi a kol, 2016).

2.1.3 Horizontální proudění vody

Horizontální proudění vzniká hlavně smykovým napětím větru a pomocí horizontálních tlakových gradientů (Sato, 2007). **Horizontální tlakové gradienty** mohou být výsledkem mnoha různých procesů, které působí tak, že vytvářejí gradienty hustoty. Jedním z příkladů je situace solárního ohřevu v mělké oblasti poblíž pobřeží, kde se teplo využívá k ohřevu relativně malého objemu vody. To produkuje vodu s nižší hustotou, než má voda blízko povrchu v přilehlé hluboké oblasti, kde se teplo šíří do většího objemu. V důsledku toho bude síla tlakového gradientu působit tak, že přesune teplejší vodu od pobřeží a nahradí ji zespodu vodou chladnější. Horizontální tlakové gradienty jsou důležité v jezerech, kde jsou významné přítoky vody s odlišnou hustotou od hustoty okolního jezera nebo kde dochází k výraznému rozdílnému povrchovému ohřevu (Lane, 2000).

V případě horizontálního proudění bez horizontálních tlakových gradientů (za předpokladu, že nedochází k žádnému tření), se voda uvedená do pohybu, bude na severní polokouli stáčet doprava a na jižní polokouli doleva, protože Země rotuje ze západu na východ. Tento efekt se nazývá **Coriolisova síla** a bude pokračovat v ovlivňování pohybu vody, dokud nedojde k rovnováze s odstředivou silou. Tento pohyb způsobí, že se volně plovoucí značky pohybují eliptickým způsobem s periodou, která závisí na zeměpisné šířce. Například v jezeře Ontario je to asi 17 hodin (Lane, 2000). Rotační efekt je největší na pólech a nulový na rovníku, takže se očekává, že vliv

konkrétní rychlosti větru na směr proudů bude větší ve velkých rovníkových jezerech bez rotačního efektu než v jejich protějšcích v mírném pásmu (Kalff, 2002).

Důsledkem této progresivní rotace je, že v určité hloubce, nazývané hloubka třetího odporu, je směr proudění přesně opačný než směr větru. V tomto bodě je aktuální rychlost ve stratifikovaných jezerech přibližně stejná jako na povrchu. Výsledné proudění připomínající točité schodiště sahá od hladiny jezera až do hloubky třetího odporu a nazývá se Ekmanova spirála. Odchýlený proud se nazývá **Ekmanův drift** a oba jsou pojmenovány po objeviteli V. W. Ekmanovi. Minimální velikost jezera, kde bude patrný posun je více než 1 km² a hloubka větší než 4 m. Ekmanův drift je však důležitý pouze u větších jezer (nad 5 km), kdy vítr fouká z jednoho směru po delší dobu (George, 1981).

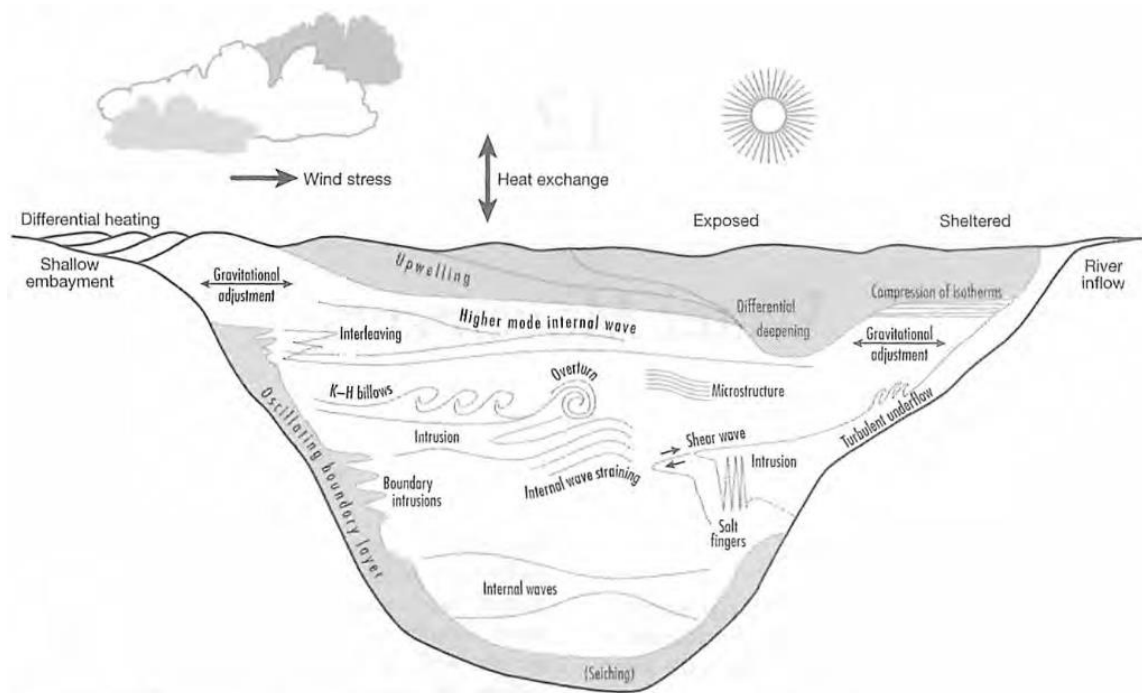
Obecně se předpokládá, že horizontální difuzivita je dostatečně velká, aby vytvořila horizontální jednotnost chemického složení a složení planktonu, což umožňuje vědcům odebírat vzorky z pelagické zóny většiny jezer pouze na jediné stanici. Naneštěstí se horizontální difuzivita a proudy značně mění v čase a prostoru v reakci na větrem vyvolané míchání a lokalizované rozdíly v zahřívání a ochlazování. Malá jezera jsou často ovlivněna lokalizovanou ochranou před větrem, zatímco difuzivita ve velkých jezerech se liší v odezvě na prostorově odlišný vítr, ohřívání a vypařování, což přispívá ke složitosti pohybu vody (Kalff, 2002).

K měření směru a rychlosti proudění se používají povrchově plovoucí lahve nebo hloubkově specifické přístroje zavěšené na malém hladinovém plováku a ukotvené proudoměry (Kalff, 2002).

Řada vědců zabývajících se mořskými a sladkovodními systémy určila faktor větru, který popisuje rychlost povrchového proudu jako zlomek rychlosti větru v průběhu času. Například v jezeře Windermere (Velká Británie) se rychlosti proudění při povrchu pohybují mezi 1,5 a 3,5 procenty střední rychlosti větru, přičemž hodnota klesá na relativně konstantní jedno procento při rychlostech větru nad 6 m·s⁻¹ (George, 1981).

2.2 Druhy vln

V jezerech a rybnících můžeme pozorovat mnoho různých druhů vln a proudů (viz Obr. 1), způsobených rozdílnými silami. V následujících kapitolách se proto budu věnovat těm nejčastějším a nejdůležitějším z nich.



Obr. 1: Různé druhy míchání a vln ve stratifikovaném jezeře (Kalff, 2002)

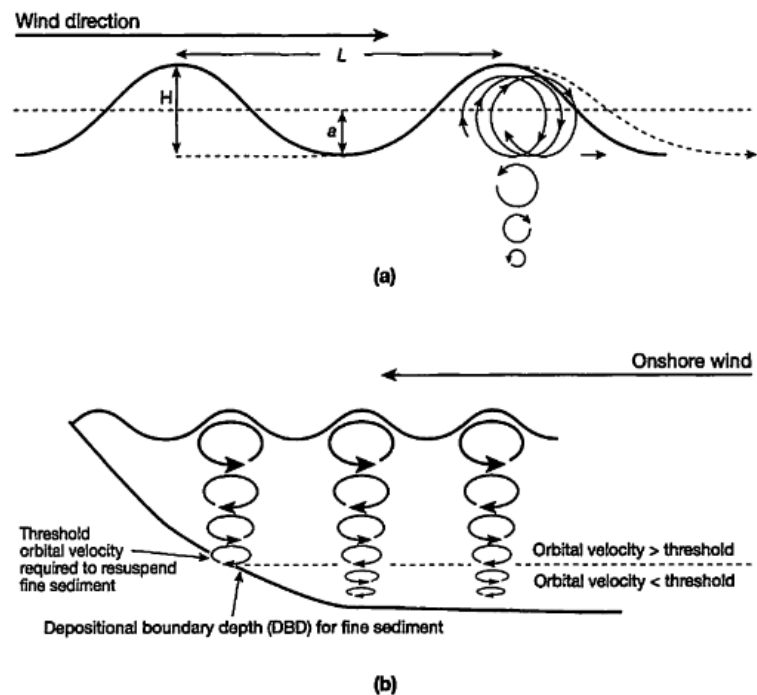
2.2.1 Kapilární vlny

Jedná se o malé povrchové vlny s tak krátkou vlnovou délkou, že je do původního stavu uvádí povrchové napětí vody. Jejich maximální vlnová délka je zhruba 0,0173 m. Rychlost kapilárních vln se zvyšuje s klesající vlnovou délkou, přičemž minimální rychlost je $0,231 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pokud roste rychlost větru, kapilární vlny se zvětšují a následně vedou k větším vlnám již ovládaným gravitací. (Britannica, 1998)

2.2.2 Povrchové gravitační vlny

Povrchové gravitační vlny jsou typické vlny pozorované na hladině jezer a oceánů a jsou nejzřetelnějším projevem kinetické energie přenášené větrem. Výška vln v jezerech se pohybuje od občasných zvlnění v klidných dnech až po vlny o vlnové délce 5-10m a výšce jeden metr nebo více během období trvalého silného větru nad velkými jezery. Vlnová délka ve volné vodě jezer je přibližně dvacetinásobek výšky vlny. Povrchové gravitační vlny způsobují kmitání vodních částic primárně ve tvaru elipsy s pouze malým horizontálním pohybem. Energie přenášená větrem je do značné míry rozptýlena vytvořením vertikální řady elips, jejichž velikost se s rostoucí hloubkou rychle zmenšuje (viz Obr. 2). Kruhový pohyb se přerušuje, když se vlny „dotknou dna“, což se děje v místech, kde je voda mělká než přibližně polovina vlnové délky. Pohyb je pak předáván dopředu, dokud se vlny nerozbijí blízko pobřeží v místě, kde je hloubka

jezera zhruba $4/3$ výšky vln. „Bílé čepice“ můžeme pozorovat na jezerech všech velikostí, přesahuje-li rychlost větru $4-5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a jsou výsledkem extrémní turbulence (pěnění) na rozhraní vzduchu a vody, nikoliv velikostí vln (Smith, 1979).



Obr. 2: Základní pohyb povrchových gravitačních vln (Kalff, 2002)

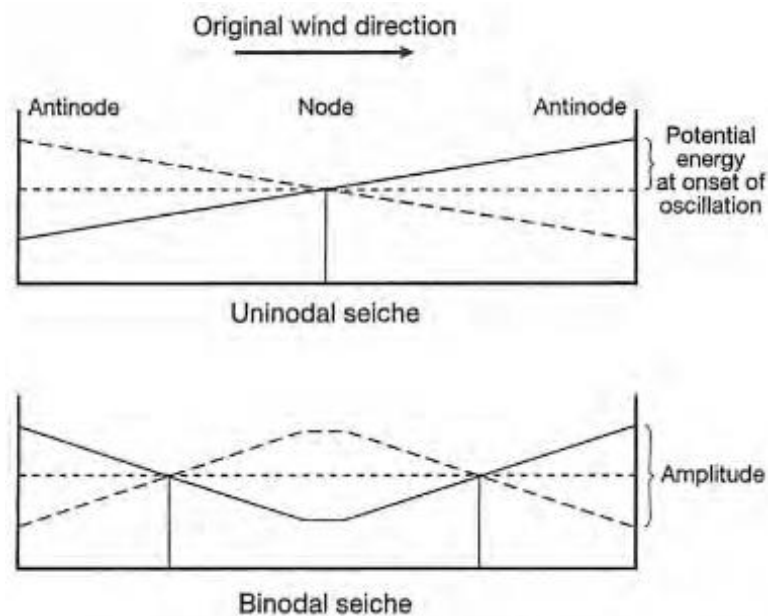
Pohyb vody spojený s povrchovými gravitačními vlnami přispívá jen mírně k celkové turbulenci míchané vrstvy v malých jezerech. Vertikálně přenášená energie je však dostatečná k tomu, aby hrála důležitou roli při resuspenzi částic jemného sedimentu ve větších jezerech během největších ročních bouří z hloubek podstatně větších, než jsou ty, kde se vlny lámou u pobřeží (Rowan a kol., 1992).

2.2.3 Stojaté povrchové vlny

Stojaté povrchové vlny neboli **povrchové seiche**, jsou volné oscilace, při kterých voda na jednom konci jezera stoupá v reakci na stálý vítr z jednoho směru, a když vítr povolí, proudí zpět v opačném směru. Voda, která se nahromadila po větru, teče zpět, ale dostane se přes rovnovážnou polohu v opačném směru. Výsledkem je tedy stojatá vlna, která se kolébá z jedné strany na druhou. Povrchové seiche se nejčastěji měří pomocí zařízení pro záznam hladiny vody umístěného na jednom konci jezera blízko břehu (Kalff, 2002).

Nejjednodušší typ se nazývá **uninodální** seiche, ale často dochází k interakci mezi ní a morfometrií jezera a mohou se vytvořit **binodální** nebo **multinodální** seiche (viz

Obr. 3). Pohyby vody vyvolané seichemi se dále komplikují, až časem houpavé pohyby klesají, dokud se neobnoví následným větrem. Stojaté povrchové vlny vykazují maximální vertikální transport na okrajích a žádný ve středu, zatímco horizontální transport je největší ve středu, přičemž rychlost je přímou funkcí amplitudy seiche. Povrchové seiche s typickou vertikální amplitudou několika centimetrů u středně velkých jezer jsou v biologické a chemické limnologii málo zajímavé, protože jejich energetické hladiny jsou nízké v důsledku třecího smyku na rozhraní vzduchu a vody a na březích (Kalff, 2002).

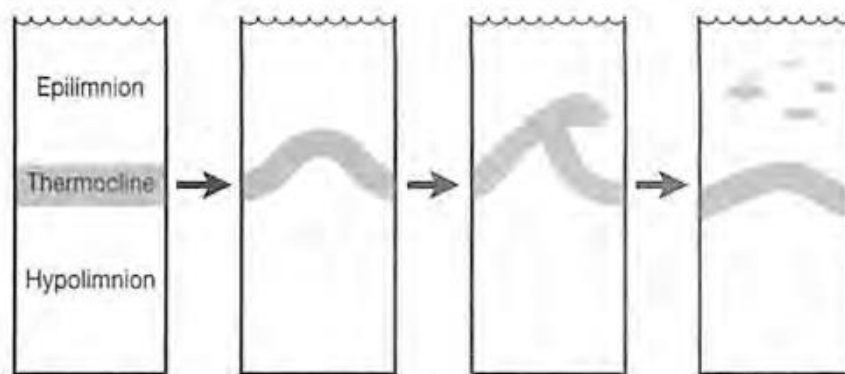


Obr. 3: Uninodální a binodální seiche v pravoúhlém jezeře (Kalff, 2002)

2.2.4 Vnitřní seiche

Vnitřní neboli termoklinové seiche jsou mnohem důležitější než povrchové, protože mají mnohem větší amplitudu a účinek. Tam, kde se stanou strmými a nestabilními, nebo jsou narušeny kontaktem s podvodními pahorky nebo hranicemi jezera, způsobují významné proudy a turbulence v hypolimniu (viz. Obr. 4) (Davies-Colley, 1988). Značný vertikální transport vody a živin z hypolimnia do epilimnia, je možný tam, kde je významná vertikální amplituda seiche (Ostrovsky a kol, 1996). Adektivní transport nahoru a dolů nejen přenáší vodu a živiny do eufotické zóny, ale také přináší rozpuštěný kyslík a teplo do hypolimnia. Dále zodpovídají za vývoj hypolimnetických proudů a intruzních proudů, které nesou strženou vodu a živiny z okrajů jezera do středu. Strhávání živin do eufotické zóny má velký vliv na produkci fytoplanktonu, stejně jako

vnášení rozpuštěných živin pocházejících z příbřežních oblastí jezer, která jsou dostatečně průhledná, aby umožnila metalimnetické maximum chlorofylu (Kalff, 2002).



Obr. 4: Schéma formování a rozpadu vnitřní seiche (Kalff, 2002)

Vnitřní seiche se vytvářejí, když tlak větru tlačí epilimnetickou vodu směrem k povětrnému konci jezera, způsobí zhuštění tamní míšené vrstvy, což způsobí naklonění termokliny a snížením rychlosti větru se vytvoří její charakteristická oscilace (Kalff, 2002).

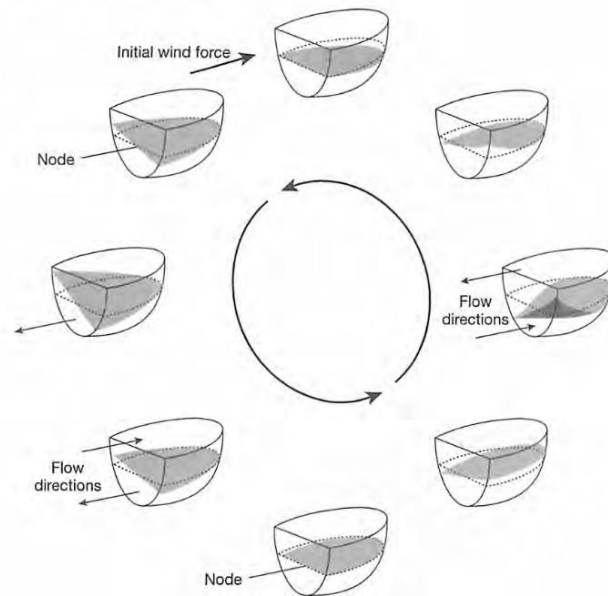
Druhý typ seiche, který v některých jezerech dominuje, ale je zřídka uváděn, je typ, ve kterém je oblast termokliny periodicky „stlačována“ z jednoho konce jezera na druhý horními a spodními vrstvami (Gloor a kol., 1994).

Rychlost vnitřních vln závisí na délce povodí a hustotním gradientu. Vyvolává ji smyk napříč termoklinou a může být až $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Čím větší je gradient hustoty (tj. čím vyšší je stabilita), tím menší je amplituda. Proto jsou vnitřní vlny větší ve slabě stratifikovaných jezerech než v těch stabilně stratifikovaných. Všeobecně rozšířená představa, že vnitřní vlny a související turbulence mají v malých jezerech malý význam, je tedy pravděpodobně výsledkem tradičního zaměření fyzikálních limnologů na velká jezera a oceány a mnoha výzkumů na stabilně stratifikovaných malých jezerech (Kalff, 2002).

2.2.5 Kelvinovy vlny

Jedná se o vnitřní gravitační vlny, které rotují na hranici jezera proti směru hodinových ručiček (na severní polokouli) kolem centrálního stacionárního bodu v jezere (viz. Obr. 5). Vlny produkují velké oscilace poblíž pobřeží, které vytvářejí rychlé proudy běžící paralelně s pobřežím. Kelvinovy vlny mohou naklonit pobřežní termoklinu o několik metrů, což umožňuje průsak hypolimnetické vody a živin do dobře

osvětlených typicky produktivních pobřežních zón. Když se Kelvinovy vlny stanou nestabilními a po kontaktu se dnem jezera se zlomí, produkují jiné typy vln, které zvyšují turbulenci v blízkosti pobřeží (MacIntyre a kol., 1999). Vlny v intervalech obracejí svůj směr, což umožňuje znečišťujícím látkám a organismům, které byly koncentrovány v pobřežní zóně, rychle se transportovat z pobřeží (Boyce, 1977).



Obr. 5: Cyklus pohybu Kelvinovy vlny (Kalf, 2002)

2.2.6 Poincarého vlny

Stejně jako Kelvinovy vlny se Poincarého vlny vyvíjejí po nástupu termoklinových seiches ve velkých jezerech, ale jejich účinek je nejzřetelnější v pelagické zóně, kde v některých místech vytvářejí tlak na termoklinu, zatímco uvolňují tlak v přilehlých oblastech. To vytváří mozaiku střídajících se vodních valů a prohlubní, které se zdají být důležitými mechanismy pro vytváření proudů v hypolimniu (Mortimer, 1974).

Když Kelvinovy a Poincarého vlny interagují se svažujícím se dnem, vnitřní vlnové spektrum se změní. Zvýšení energie a smyku může být důsledkem vychýlení a odrazu vln, které produkují nestabilitu a míšení, v procesu vytváření turbulentní hraniční vrstvy na dně jezera (Saggio a Imberger, 1998).

Měření v jezeře Mono v Kalifornii umožnila dospět k závěru, že míšení blízkého pobřeží na bázi termokliny po silných větrech vytváří horizontální proudy. Tyto proudy zásobovaly fytoplankton v metalimniu dostatečným množstvím NH_4^+ , takže se dokázala udržet primární produktivita maxima chlorofylu v celém jezeře (MacIntyre a kol., 1999).

2.3 Míchání vody

2.3.1 Cirkulace vyvolaná větrem

Větreem indukované hydrodynamické cirkulace hrají významnou roli v procesu transportu a míšení znečišťujících látek a živin ve velkých mělkých jezerech, ale byly obvykle přehlíženy (Liu a kol., 2018).

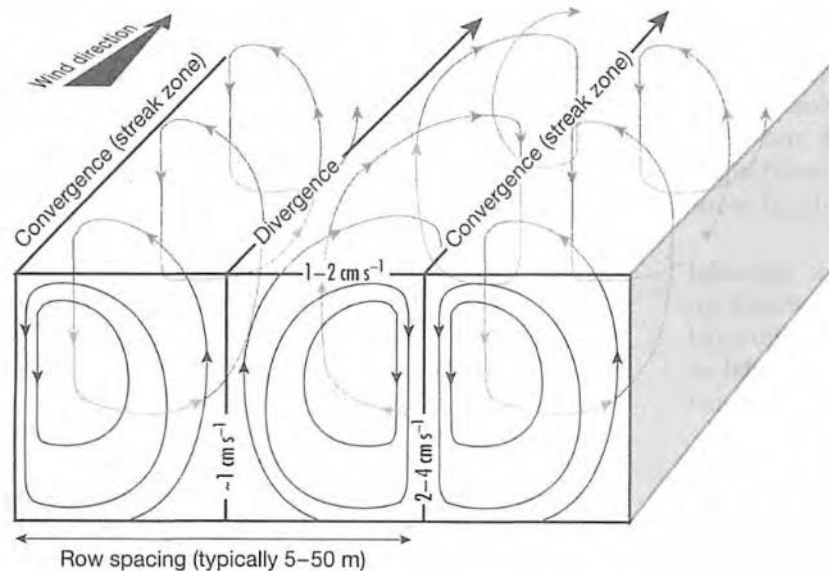
Vzorce cirkulace v protáhlých jezerech jsou podle George (1981) dvou základních typů. V protáhlých mělkých jezerech středojezerní proud tekoucí ve směru větru je vyvážen zpětnými proudy podél břehů, zatímco hlubší, nezvrstvená jezera stejného obrysu mají zpětné proudy tekoucí pod povrchovými proudy. Jiný typ cirkulace se vyskytuje ve stratifikovaných jezerech. Například v jezeře Windermere (Velká Británie) byla cirkulace koncipována jako deformovaný „dopravní pás“ probíhající podél osy větru, přičemž protiproud těsně nad termoklinou teče o 90° nalevo od směru větru. Výsledná spirálová cirkulace znamená delší dobu zdržení pro znečišťující látky nebo živin vstupujících z povodí (George, 1981). Naopak měření proudů Velkých jezer v Severní Americe, které jsou proporcionálně mnohem širší, neukazují deformovaný vzor dopravníkového pásu jako je tomu u jezera Windermere, což ukazuje na důležitost jezerní morfometrie při vytváření proudových vzorců specifických pro jezera. Tento vzorec proudění však způsobuje, že se vstupující odpadní vody během stabilních meteorologických podmínek koncentrují v oblastech blízko pobřeží (Boyce, 1974).

2.3.2 Langmuirůvo proudění

Existenci těchto proudů objevil I. Langmuir při plavbě přes Atlantik, kde si všiml paralelních, protáhlých linií mořských řas a pěny, v místech kde se proudy sbíhaly. Následně zkoumal linie pěny a jejich přidružené části v jezeře George v New Yorku a zaznamenal, že pruhy byly orientovány zhruba ve stejném směru jako vítr. Nyní je jasné, že se pruhy tvoří tam, kde se spirálovité proudy sbíhají na povrchu, než jsou směřovány pod povrch. Sestupný proud zachycuje například přírodní oleje a pěnidla, zbytky rostlin a zooplankton na povrchu nebo v jeho blízkosti. Oblast mezi pruhy je charakterizována difuznějším a pomalejším vztlínáním (George a Edwards, 1973).

Limnologický význam Langmuirůva proudění spočívá především ve spirálovitém proudění (s jeho spádovými a vzestupnými složkami) (viz Obr. 6), které hrají důležitou roli v difuzi tepla a hmoty a také při vertikálním transportu planktonu v promíchávané

vrstvě. Tyto proudy jsou patrné během větrných období na všech jezerech, kromě těch velmi malých chráněných před větrem. Jak toto proudění vzniká, stále není zcela pochopeno, ale je zřejmé, že je výsledkem interakcí mezi horizontálními povrchovými proudy (drift) a povrchovými gravitačními vlnami (Leibovich, 1983).



Obr. 6: Schéma Langmuirova proudění (Kalff, 2002)

Měření v jezerech a oceánech (Assaf a kol., 1971) ukazují, že ke vzniku pruhů může dojít až při rychlosti větru $3-4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kdy jsou pruhy s rozestupy $3-6 \text{ m}$ běžné. Při poněkud vyšších, ale stále mírných rychlostech větru ($5-15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) se objeví druhá velká řada pruhů. Vzdálenost mezi největší sadou pruhů při nejvyšších rychlostech větru je přibližně stejná jako hloubka míšené vrstvy (Harris a Lott, 1973). Cirkulace Langmuirova typu může dosáhnout hloubky více než 100 m a během stratifikace přispívají k erozi termoklin a k vysokým vertikálním vířivým difuzním koeficientům v míšených vrstvách a výslednému rychlému promíchávání rozpuštěných látek v jezerech (Boyce, 1974).

2.3.3 Hypolimnetické proudy a Kelvin-Helmholtzovo míšení

Různé vnitřní vlny samy o sobě nezpůsobují turbulence a proudy, ale erodují termokliny, vytvářejí proudy v hypolimniu a resuspendují a transportují sedimenty a další materiály, když se stanou nestabilními a jejich energie se přemění na energii turbulentní. Přeměna energie vln na turbulentní může být vyvolána různými interakcemi například vlna-vlna nebo vlna-sediment a nestabilitou ve stříhu větru (Kalff, 2002).

Horizontální proudy a související turbulence v hypolimniu se vytvářejí, když vnitřní seiche (a Kelvinovy a Poincaré vlny ve velkých jezerech) přecházejí přes nerovnosti vyskytující se při břehu jezera a když jsou vnitřní vlny v pelagické zóně dostatečně velké, aby se sklon náběžné hrany stal nestabilní a zlomil se. Výsledné turbulentní vlny zvyšují difuzi přes termoklinu. Toto se nazývá **Kelvin-Helmholtzovo míšení** (neboli K-H nestabilita) a přesahuje metalimnion ve vertikálním směru, prohlubuje smíšenou vrstvu a generuje proudy (turbulence) v hypolimniu. Ve větších jezerech se vytvářejí rychlé proudy, které se prohánějí tam a zpět v rámci termoklinálních vrstev o jen mírně odlišných hustotách, vytvářejí turbulence a přispívají k K-H nestabilitě. Jak turbulence vytvářená vnitřními vlnami klesá, vznikají nové vnitřní vlny (Imberger, 1985).

Přímých měření proudů v hypolimniu je málo, protože minimální rychlost proudu, kterou lze zaznamenat standardními měřidly v malých a středně velkých jezerech, je blízká nebo nižší než pozorované rychlosti hypolimnetického proudu. Například přímá měření byla získána nade dnem monomiktického jezera Baldeggersee, pomocí ukotvené plovoucí koule, jejíž odchylka od svislice byla fotografována každé tři minuty kamerou umístěnou nad ní. Vychýlení ukazovalo aktuální rychlosti blízko dna v průběhu kolem $0,015 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v létě i zimě, ale aktuální rychlosti $> 0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nebyly v létě neobvyklé (Imboden a kol., 1983).

2.4 Turbulentní míchání a biota

Přestože bylo dosaženo důležitého pokroku, současné vzorce, vnitřní vlny a související turbulence jsou velmi složité a nelze je zatím komplexně modelovat a předpovídat. Proudění a vlny se liší nejen prostorově a jako funkce morfometrie povodí, ale také dočasně v reakci na změny v přísunu tepla a větrné zátěže. Jezera s komplexní morfometrií jsou zvláště vystavena prostorově proměnlivému ohřevu, chlazení a míchání větrem, které vytváří horizontálně se měnící gradienty hustoty a proudy. Biota rychle fyziologicky reaguje na změny tepla, difuzi živin a plynů a změny ozáření, které se se zpožděním promítají do změn tempa jejich růstu. Pokud bude změna trvat dostatečně dlouho, projeví se s určitým zpožděním ve změnách velikosti a struktury populace (Kalff, 2002).

2.4.1 Časová měřítka biotické odezvy

Pozorovaná časová měřítka se pohybují v rozmezí několika minut pro změny povrchového ozáření ovlivňujícího rychlost fotosyntézy řas až po období půl hodiny až několika hodin, které jsou zapotřebí k promíchání eufotické zóny a změně maximální rychlosti fotosyntézy (Cullen a Lewis, 1988). Je zapotřebí období hodin až týdnů nebo měsíců k dosažení velkých změn v ohřevu, ochlazení, stratifikaci, proplachování a přísunu živin. Fyzikální procesy, které fungují v časovém měřítku měsíců až let, jsou zodpovědné za změny sezónních a meziročních teplot, stratifikaci, koncentrace rozpuštěného kyslíku v hypolimniu a zatížení vodou a živinami. Fyzikální procesy fungující v časovém měřítku desetiletí nebo staletí (odrážející se ve změnách klimatu, využívání půdy a znečištění), přinášejí hlavně změny ve složení populací, produktivitě a lze je nejlépe vyhodnotit paleolimnologickými technikami. Hlavní determinanty struktury a funkce populací a vhodné přístupy k modelování se tedy musí měnit se zkoumaným časovým měřítkem (Kalff, 2002).

2.5 Programy používané pro vizualizaci GPS dat

2.5.1 Program Base Camp

Program **BaseCamp** umožňuje vytváření, úpravu a třídění tras a trasových bodů přenesených ze zařízení na počítači a jejich následné uložení v požadovaném formátu (TXT, GPX, KML,...). Jeho nevýhodou je potřeba importovat mapy, které lze stáhnout nebo zakoupit (na DVD nebo microSD kartě), ale poté zobrazuje data topografické mapy ve 2D nebo 3D na obrazovce počítače, včetně vrstevnic a výškových profilů (Garmin, 2023).

2.5.2 Program Google Earth Pro

Jedná se o bezplatný pokročilý software poskytovaný společností Google, který umožňuje vizualizaci Země a studium různých geografických aspektů. Google Earth Pro umožňuje kromě zkoumání planety ve vysokém rozlišení i vyhledat konkrétní souřadnice a stáhnout soubory geoprostorových dat v KML (Keyhole Markup Language) formátu pro budoucí použití. I když se nejedná o skutečný GIS (geografický informační systém) na profesionální úrovni, stále je používán studenty a vědci po celém světě a díky své dostatečné jednoduchosti umožňuje i příležitostným uživatelům pracovat s GIS daty. (Lacoma, 2023).

2.6 Ansys

Ansys je software FEA (Finite Element Analysis – metoda konečných prvků) používaný pro inženýrskou simulaci a navrhování 3D modelů od společnosti ANSYS Inc. Ansys nabízí komplexní softwarovou sadu, která pokrývá celou škálu fyzikálních oborů a poskytuje přístup prakticky ke všem oblastem inženýrských simulací, které proces návrhu vyžaduje. Simulace umožňuje inženýrům vidět, jak se jejich návrhy budou chovat v různých podmínkách a zároveň sníží nebo dokonce odstraní potřebu nákladného testování. Je používán k výpočetní simulaci počítačových modelů struktur, elektroniky nebo součástí strojů pro analýzu pevnosti, pružnosti, odolnosti, elektromagnetismu, proudění tekutiny a dalších vlastností (ANSYS, Inc., 2023).

2.6.1 Ansys Student

Ansys Student je bezplatný software programu Ansys, který nabízí přístup k balíčku založenému na Ansys Workbench, který obsahuje Ansys Mechanical, CFD, Discovery (který je součástí až od verze 2023R1), SPEOS, Autodyn a SpaceClaim. Lze ho stáhnout a nainstalovat na libovolný podporovaný 64bitový počítač se systémem MS Windows. Tato verze je využívána studenty po celém světě (ANSYS, Inc., 2023).

2.6.2 Ansys Fluent

Ansys Fluent je univerzální software pro výpočetní dynamiku tekutin (CFD – Computational Fluid Dynamics), který se používá k modelování proudění tekutin, přenosu tepla a hmoty, chemických reakcí a podobně. Fluent nabízí moderní a uživatelsky přívětivé rozhraní, které zjednodušuje proces CFD v rámci jednoho pracovního okna. Také je známý svými pokročilými možnostmi fyzikálního modelování, které zahrnují i modelování turbulence, jednofázového i vícefázového proudění, spalování, modelování baterií a interakce kapalina-struktura. Velké modely lze snadno řešit v aplikaci Fluent na více procesorech. K dispozici je více možností řešení, včetně řešení na bázi tlaku a hustoty pro CPU (Central Processing Unit – Centrální procesorová jednotka), které pokrývají proudění od nízkých rychlostí až po hypersonické proudění, a nativního řešení na bázi tlaku pro GPU (Graphics Processing Unit – grafický procesor) (ANSYS, Inc., 2023).

3. Materiály a metodika

3.1 Vývoj zařízení pro zaznamenávání proudění

Protože nám není známo, že by se komplexnějším zaznamenáváním horizontálního proudění někdo v České republice zabýval, neměli jsme tedy k dispozici již vyvinutá vhodná a levná zařízení přizpůsobená k tomuto účelu. Proto jsme byli nuceni vytvořit si svá vlastní.

3.1.1 Plovoucí pouzdra pro přístroje

Bylo zhotoveno několik různých variant plovoucích „schránek“ do kterých lze umístit zařízení zaznamenávající průběžně svou polohu a tím i proudění vody. Všechny byly vyzkoušeny kvůli těsnosti, dostatečnému ponoru a podobným vlastnostem, které by mohly mít negativní dopad na zařízení a správnost jejich zaznamenávání a byly opatřeny cedulkou upozorňující, že se jedná o výzkumné zařízení vysoké školy.

První variantou byla menší PVC trubka o výšce 0,25 m a průměru 0,08 m, z jedné strany napevno uzavřená, z druhé strany otevíratelná a vyvážená olověnými broky (viz Obr. 7 a 8). Největší problém byl, že i při skoro úplném zanoření na ní příliš působil vítr a ovlivňoval tak měření. Dále nebyla dostatečně velká pro některá další zařízení a také do ní zatékalo.



Obr. 7: Plovoucí schránka – varianta 1
(foto autor)



Obr. 8: Ponor plovoucí schránky 1 ve vodě
(foto autor)

Druhá varianta byla zhotovena z čistícího kusu pro kanalizační potrubí z PVC o výšce 0,5 m a průměru 0,16 m se dvěma napevno uzavřenými otvory a jedním otevíratelným (viz Obr. 9). S touto verzí byl hlavní problém v tom, že byla příliš snadno ovlivnitelná větrem (viz Obr. 10) a tudíž by zařízení zaznamenávaly s chybou a velmi

obtížně se vyvažovala. Na druhou stranu do ní po zadělání bočního otvoru silikonem již tolik nezatékalo a měla dostatečný prostor pro všechny druhy přístrojů.



Obr. 9: Plovoucí schránka – varianta 2
(foto autor)



Obr. 10: Ponor plovoucí schránky 2 ve vodě
(foto autor)

Třetí varianta byla vytvořena z kanalizačního potrubí z PVC o výšce 1 m a průměru 0,11 m se spodním otvorem napevno uzavřeným a horním otevíratelným. Potrubí bylo vyváženo železnými válečky na výslednou hmotnost necelých 5 kg (viz Obr. 11 a 12), aby bylo dostatečně ponořené ve vodě a díky tomu se pohybovalo jen za pomoci proudění vody a nebylo ovlivněné větrem. Tato verze byla nejlepší, při ošetření těsnění vazelinou do ní nezatékalo, uvnitř měla dostatek prostoru a nejlépe kopírovala pohyb svrchní vrstvy vody v porovnání s ostatními verzemi, proto byla nakonec vybrána. Nevýhodou by však kvůli její relativně velké délce mohlo být její použití v malých a velmi mělkých rybnících, kde by se mohla zachytávat o dno a zkreslovat měření.



Obr. 11: Plovoucí schránka – varianta 3
(foto autor)



Obr. 12: Vnitřek plovoucí schránky 3
(foto autor)

3.1.2 Zařízení a aplikace

V průběhu testování plovoucích schránek byla zároveň zkoušena i různá zařízení, které by mohly průběžně zaznamenávat pohyby vody. Hlavními parametry byla cena, tj. co nejmenší finanční ztráta při jejich ztrátě či potenciálním ukradení a co největší přesnost a schopnost přijímat signál i přes stěnu schránky a při nízkém signálu. První volbou proto byla dvě nám přístupná GPS zařízení schopná zaznamenávání své aktuální polohy s vysokou přesností, GARMIN GPSMAP 78s a GARMIN GPSMAP 60CSx.

GARMIN GPSMAP 78s (viz Obr. 13) je přenosné GPS navigační zařízení, které je díky své odolnosti a dlouhé výdrži baterie (až 20 hodin) vhodné pro outdoorové aktivity, zaměřování dat v terénu a různé vodní sporty. GPSMAP 78s obsahuje GPS navigaci s vysokou citlivostí a s barometrickým výškoměrem, který pomáhá dosahovat vyšší přesnosti v určení výšky a je vybaven automatickou kalibrací na výšku GPS, aby nedocházelo k chybám v určení výšky vlivem kolísání barometrického tlaku. Dále také obsahuje 3-osý náměrový elektromagnetický kompas, který dokáže orientovat mapu přístroje podle jeho natočení a pro správné určení směru není potřeba kompas držet v přesně vodorovné poloze. Její další výhodou je odolnost proti vodě, kde norma IPX7 zaručuje odolnost proti ponoření do vody o hloubce 1 m po dobu 30 minut. Velmi užitečnou výhodou je také to, že při pádu do vody zůstane plavat na hladině a nepotopí se ke dnu. (Sporticus, 2023)



Obr. 13: GARMIN GPSMAP 78s (foto autor)

GARMIN GPSMAP 60CSx (viz. Obr. 14) je podobně jako GPSMAP 78s přenosné GPS navigační zařízení pro všestranné použití. Obsahuje GPS přijímač (SiRF III, Mediatec), který společně s tyčkovou anténou zaručuje extrémní citlivost a díky této inovaci přijímá GPS signál i v místech, kde by běžný GPS přijímač nefungoval. Dále obsahuje vestavěný barometrický výškoměr bez nutnosti kalibrace a elektromagnetický náměrový kompas, který funguje správně jen při vodorovné poloze (orientace

směrového čidla kompasu je vyznačena pomocí rysky na krytu zařízení). GPSMAP 60CSx je ideální pro použití v extrémních podmínkách a odolává ponoření do vody (do hloubky 1 m na dobu 30 minut). (1M.cz - první mobilní, 2001-2023)



Obr. 14: GARMIN GPSMAP 60CSx (foto autor)

Jako další zařízení, který bylo testováno (je schopné zaznamenávání polohy), byl LAMAX GPS Locator, který se běžně používá pro hlídání mazlíčků, kufrů a dalších movitých věcí. Tento lokátor funguje společně s aplikací LAMAX Tracking, přes kterou je možné podívat se na zaznamenaná data. Pokusy s tímto zařízením však ukázaly, že má nižší přesnost, problém s komunikací s aplikací, zaznamenáváním polohy a hlavně s automatickým vypínáním zařízení při jeho nečinnosti, kterou zařízení detekovalo při uzavření do schránky a ponoření do vody, která se pohybovala velmi pomalu. Z těchto důvodů byl tedy nevhodný pro naše měření a nadále nebyl používán.

Dále byly zakoupeny dva telefony **Motorola Moto E20** (viz Obr. 15) na kterých byly odzkoušeny různé aplikace, například Geo Tracker, Mapy.cz, My Tracks, Boating a GPS Logger. Většina z nich měla podobné problémy jako LAMAX Locator a byly proto nespolehlivé a nedali se využít. Nedá se ovšem vyloučit, že by fungovaly lépe, kdyby byl použit dražší a výkonnější telefon.



Obr. 15: Telefony Motorola Moto E20 (foto autor)

Nejlépe se osvědčila jednoduchá aplikace **GPS Logger**, která slouží k zaznamenávání polohy a cesty, ale můžete v ní i přidávat poznámky k značkám míst na cestě, zobrazovat svou polohu, rychlost, nadmořskou výšku, směr a mnoho dalších statistik. K zaznamenaným trasám se lze kdykoliv vrátit pomocí seznamu tras, ale detailněji si je můžete prohlížet jen v externím prohlížeči, protože aplikace nemá integrované mapy. Naštěstí lze data uložit a sdílet ve formátu GPX, KML a TXT mnoha různými způsoby, jako například přes E-mail, Google Drive, Dropbox a FTP (Basic Air Data, 2011).

Po provedení zkušebních testů mimo vodní plochy i na rybníku Bagr v Českých Budějovicích, které měli zjistit vhodnost zařízení pro naše potřeby, bylo tedy rozhodnuto, že budeme pro zaznamenávání proudění používat kombinaci dvou GPS přístrojů (GARMIN GPSMAP 78s a GPSMAP 60CSx) a telefonů s aplikací GPS Logger.

3.2 Další použité vybavení

Pro měření rychlosti větru a proudění vody byly použity dva různé anemometry. **Multifunkční anemometr MC20** od firmy Schiltknecht (viz Obr. 16) se dvěma různými sondami pro měření rychlosti vzduchu a vody a přenosný přístroj **Flowtherm NT** od firmy Höntzsch (viz Obr. 17) s jednou sondou pro měření malých rychlostí proudění vody. Další data o rychlostech a směru větru byla přebrána z webových stránek ČHMÚ (přehled ze stanice v Českých Budějovicích).



Obr. 16: Anemometr MC20 (foto autor)



Obr. 17: Flowtherm NT (foto autor)

3.3 Výběr rybníku pro měření

Pro měření bylo zvažováno několik různých rybníků. Jako první mělo být měření prováděno na rybníce Štičí sádky, který se nachází na území obce Branišov, protože má ideální tvar a velikost a je na oploceném pozemku (lidé tak nemohou ovlivnit měření svou činností nebo zařízení odnést). Bohužel v době provádění pokusů obsahoval malé množství vody vzhledem k předchozí suché zimě, takže jsme byli přinuceni hledat jiné podobně vhodné místo.

Dva testy byly provedeny na malém rybníce v Lišově u střelnice SSK Lišov. Tento rybník byl vybrán, protože se nachází na lidem běžně nepřístupném pozemku střelnice. Testy však ukázaly, že takto malé rybníky jsou nevhodné, protože odchylky při zaznamenávání polohy byly příliš velké na takto malou plochu a záznamy tedy neodpovídaly reálnému proudění.

Po následné úvaze byl nakonec pro měření zvolen rybník **Dehtář** (viz Obr. 18), který je větší než předchozí vybrané rybníky, a jeho velkou výhodou jsou dobře zdokumentované podmínky, které na něm panují. Nachází se v obci Žabovřesky (na katastrálním území Dehtáře u Českých Budějovic) na Dehtářském potoce a má rozlohu přes 230 hektarů. Jeho zemní hráz je téměř 10 m vysoká, 234 m dlouhá a zadržuje 6,5 milionu metrů krychlových vody. Ve střední části rybníka se nachází ostrov, který nejdříve sloužil k chovu kachen a nyní je hustě zalesněn dubovým porostem. (Jihočeský venkov, 2023).



Obr. 18: Rybník Dehtář (Mapy Google, 2023)

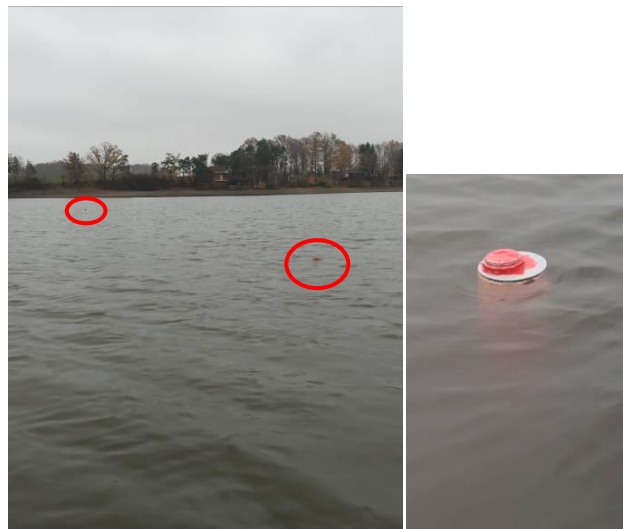
3.4 Postup měření na Dehtáři

Konečný postup zaznamenávání proudění byl po odzkoušení všech zařízení a několika zkušebních měření připraven k finálním měřením. Vybraná zařízení byla zapnuta a po dvojicích (vždy jedna GPS a jeden telefon, kdyby jednomu z nich došla baterie nebo nezaznamenával) uložena do uzavíratelných sáčků, které je chránily proti případnému vniknutí vody a následnému poškození, a následně vložena do schránek.

S pomocí pramice ve vlastnictví FROV (viz Obr. 19) byla zařízení vypuštěna dál od břehu vždy přibližně 100 m od sebe (viz Obr. 20 a 21) a byla po stanovený čas (cca 5 hodin) ponechána nerušeně zaznamenávat. Cílem bylo, aby zařízení zaznamenávala až 24 hodin, ale GPS neměly tak velkou kapacitu baterie (proto byla testována jiná zařízení). Další překážkou pro delší měření bylo také to, že se zařízení po nějaké době vždy dostane ke břehu, kde se může zachytit o větve stromů nebo rákosí a bylo tedy zbytečné nechat ho zaznamenávat dlouho. Také hrozilo, že někdo z místních lidí nebo náhodný kolemjdoucí bude mít k relativně drahému zařízení GPS u břehu přístup a odcizí ho. Proto bylo nakonec rozhodnuto, že bude uskutečněno několikahodinové měření (zhruba pět až šest hodin). Při vypuštění zařízení byla také změřena a zaznamenána rychlost (pomocí anemometru) a přibližný směr větru.



Obr. 19: Fakultní pramice (foto autor)



Obr. 20 a 21: Vypuštěná zařízení (foto autor)

Po době měření byla zařízení vyzvednuta z vody a zařízení uvnitř vypnuta. Vyhodnocení zaznamenaných dat probíhalo v počítači pomocí různých programů po návratu z Dehtáře a zároveň byly také ze stránek Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) získány údaje o rychlostech a směru větru v okolí Českých Budějovic za celý den.

3.5 Programy použité pro vyhodnocení výsledků

Pro zobrazení a následné vyhodnocení zaznamenaných dat pomocí GPS zařízení a telefonů byly použity dva různé programy (BaseCamp a Google Earth Pro).

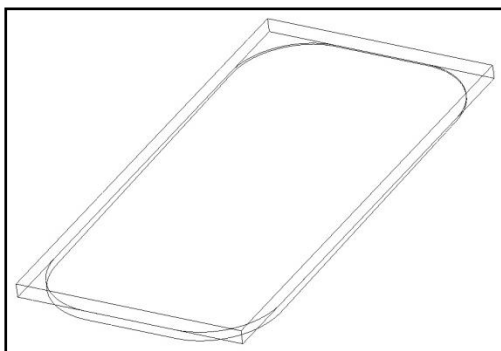
Zaznamenaná data byla zobrazena pomocí programu **BaseCamp**, ale protože neměl importované mapy, byl použit pouze pro uložení a převedení dat do dále využitelných formátů (TXT, GPX a KML) a pro jejich zběžnou kontrolu. Uložená data ve formátu KML (Keyhole Markup Language) byla následně zobrazena pomocí programu **Google Earth Pro**, který umožnil vyobrazení bodů přímo na mapě. Zde byly provedené také výpočty reálných rychlostí proudění vody pomocí zaznamenaných časů a změřených vzdáleností pomocí funkce *Pravítko – Cesta*.

3.6 Postup při simulování proudění v Ansys Fluent

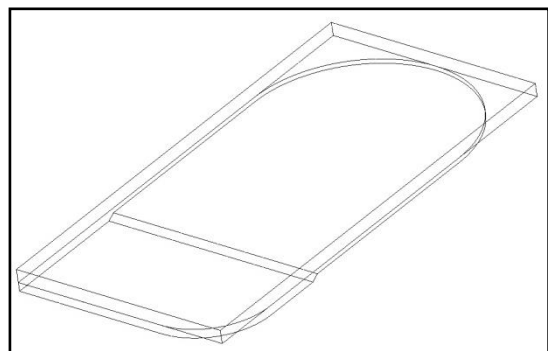
Pro simulování proudění byl stažen a nainstalován bezplatný software programu Ansys ve verzi pro studenty (Ansys Student), který lze zdarma získat z webových stránek ansys.com/academic/students/ansys-student. Pro naši potřebu se nejlépe osvědčilo modelování v programu Ansys Fluent (viz kapitola 2.6 Ansys).

Modelovány byly dva tvary rybníků. První verze měla rozměry 100 m na šířku, 200m na délku (což jsou přibližně 10krát zmenšené horizontální rozměry Dehtáře), dno bylo nakloněné s hloubkou od 0,5 do 4 m a rybník měl ze všech čtyř stran zaoblené hrany (viz Obr. 22.).

Druhý rybník měl rozměry také 100 m na šířku a 200 m na délku, ale dno bylo vodorovné s následným šikmým přechodem do prohlubně (která simulovala loviště) o šířce 100 m a délce 60 m. Jeho hloubka byla tedy 2 m a v prohlubni 4 m. Z jedné strany byl rybník zaoblený do půlkruhu, jeden roh byl ponechán v pravém úhlu a poslední byl mírně zaoblen, aby bylo docíleno nepravidelného tvaru (viz Obr. 23).



Obr. 22: Obrvs modelu 1 (foto autor)



Obr. 23: Obrvs modelu 2 (foto autor)

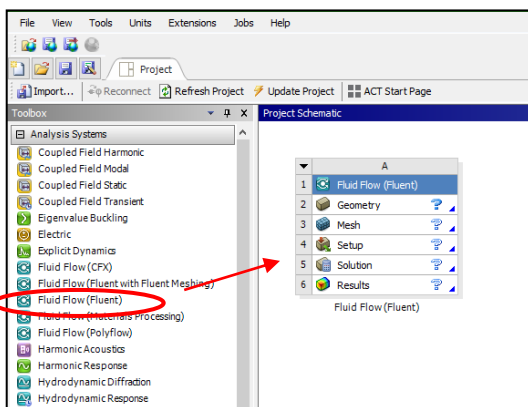
Proudění bylo simulováno pro rychlosti větru 0,5; 1; 2; 4; 8 a 16 m·s⁻¹ a také pro 4 směry větru. Pro model s nakloněným dnem byly použity pouze tři směry větru, protože měl symetrický tvar.

Pro podporu studií vývoje různých procesů lze vytvořit a použít modely v malém měřítku, které jsou neúplnou reprezentací složitějšího, nákladnějšího a/nebo fyzicky většího systému. Model by měl být reprezentativní pro navrhovaný proces, jeho vývoj by měl zohledňovat vlivy měřítka a výsledky zmenšeného modelu by měli odpovídat procesům v nezmenšených podmínkách (EMA, 2011).

Pro vytvoření modelů bylo použito 6 po sobě následujících kroků.

3.6.1 Krok Workbench

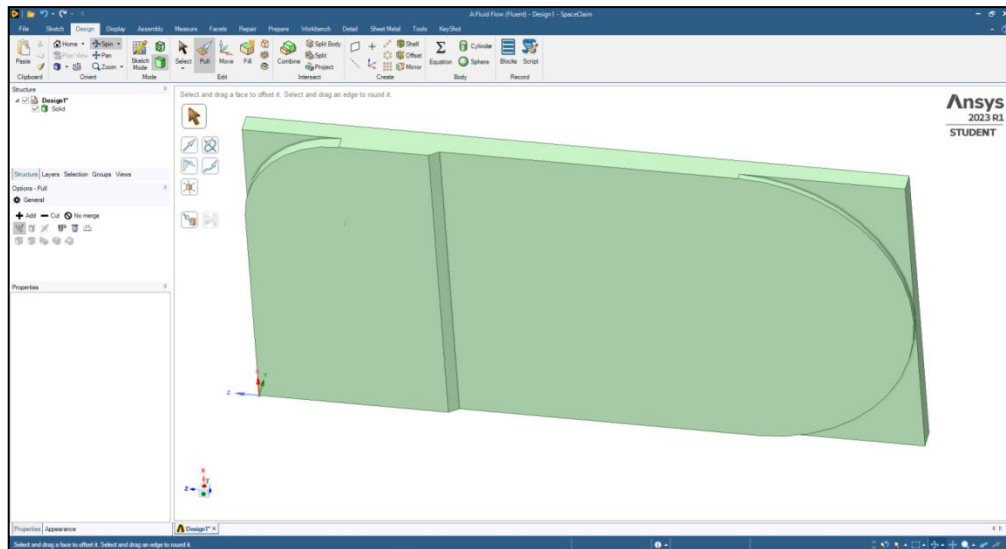
Po nainstalování byla spuštěna aplikaci Workbench, zde se nacházely dvě důležité oblasti (*Toolbox* a *Project Schematic*). V okně *Toolbox* se nacházely všechny analytické systémy a jejich komponenty, které lze využívat (nás zajímala hlavně analýza toku tekutin pomocí Fluentu – *Fluid Flow (Fluent)*). Okno *Project Schematic* sloužilo k zobrazení rozpracovaného projektu a prováděly se v něm veškeré akce a úpravy. V okně *Toolbox* byl nalezen systém s názvem *Fluid Flow (Fluent)* a přesunut do okna *Project Schematic* (viz Obr. 24)



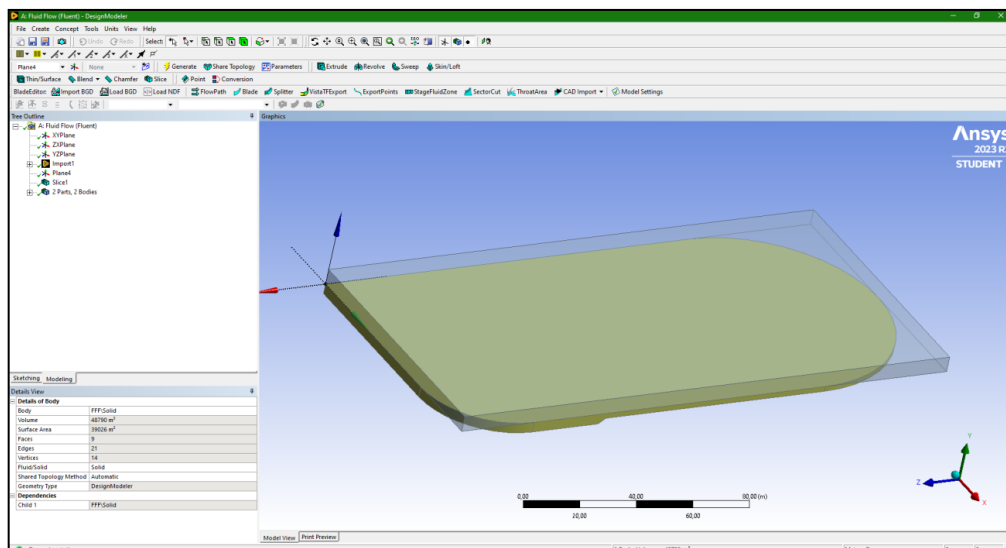
Obr. 24: Ansys Workbench (foto autor)

3.6.2 Krok Geometry

Dále byla potřeba vytvořit geometrii modelu (jak vzduchu, tak vody). Kliknutím pravým tlačítkem na okno *Geometry* byla zobrazena nabídka aplikací, ve kterých lze geometrii vytvořit. Nejdříve byl pomocí SpaceClaim vytvořen model pro spojenou geometrii dvou domén (viz Obr. 25) a následně byly v DesignModeleru rozděleny na dvě oddělené domény (viz Obr. 26).



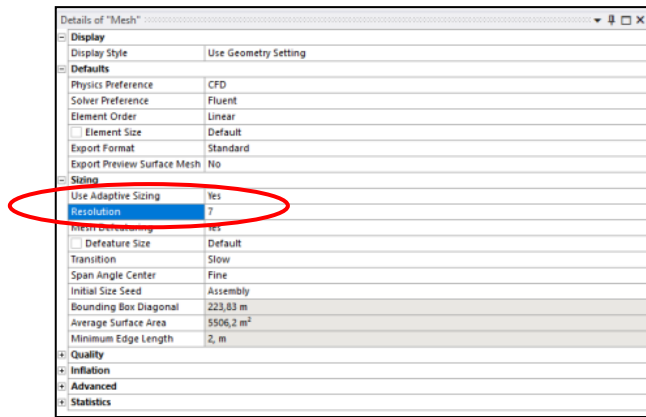
Obr. 25: Vytvořená geometrie v SpaceClaim (foto autor)



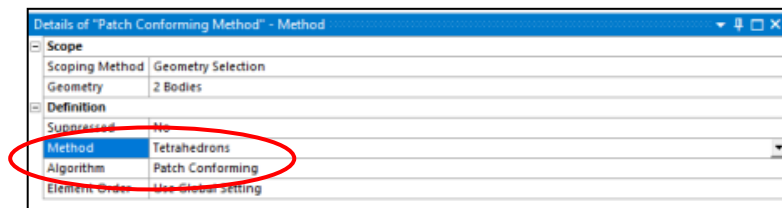
Obr. 26: Rozdělené domény v DesignModeler (foto autor)

3.6.3 Krok Mesh

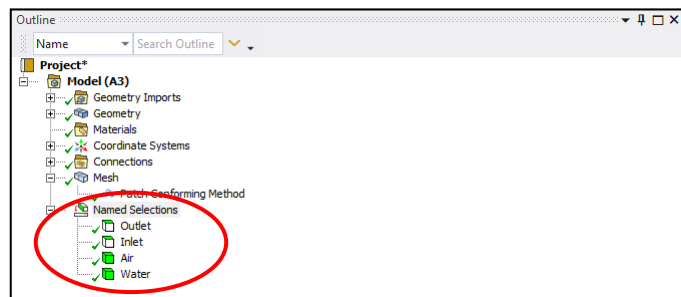
Následným krokem bylo vytvořit mesh pro danou geometrii, to bylo provedeno otevřením okna *Mesh*. Pro vodu i pro vzduch bylo použito *Adaptive Sizing* a *Resolution* byla nastavena na nejvyšší hodnotu s parametrem 7 (viz Obr. 27). Poté byla nastavena metoda na *Tetrahedrons* a algoritmus na *Patch Conforming* (viz Obr. 28). Nakonec byly pojmenovány obě domény pomocí *Create Named Sections* (na Air a Water) a plochy, ze kterých bude foukat vítr (Inlet a Outlet) (viz Obr. 29) a byla vygenerována mesh pomocí tlačítka *Generate* (viz Obr. 30).



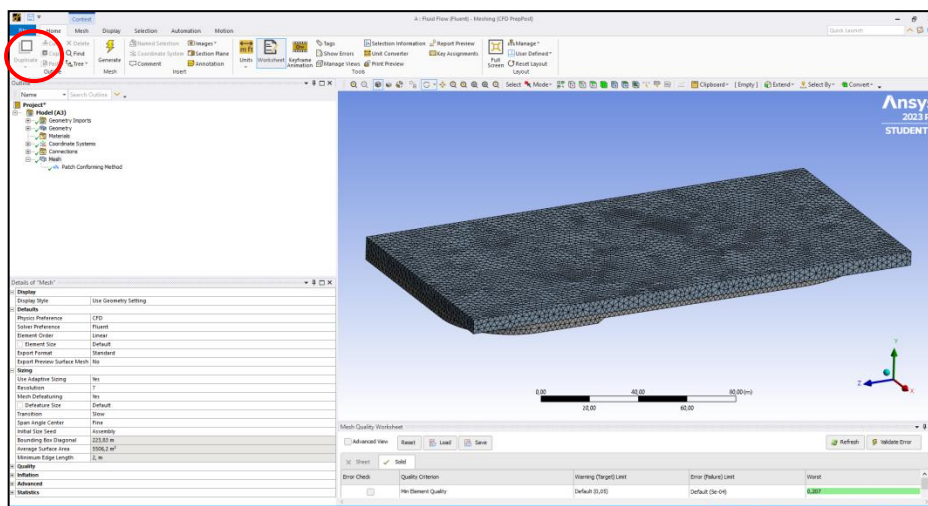
Obr. 27: Nastavení Adaptive Sizing a Resolution (foto autor)



Obr. 28: Nastavení metody a algoritmu (foto autor)



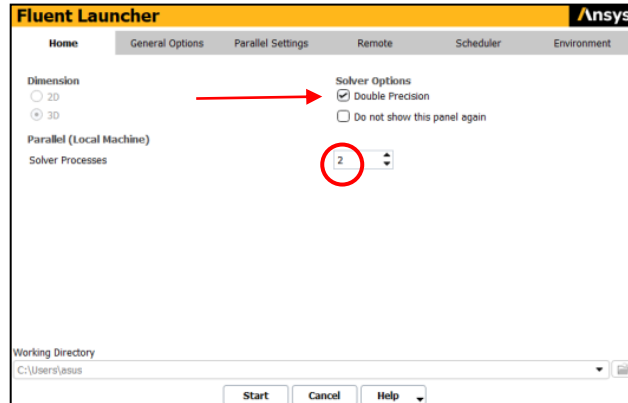
Obr. 29: Pojmenování částí modelu (foto autor)



Obr. 30: Ikona Generate a vytvořená mesh (foto autor)

3.6.4 Krok Setup

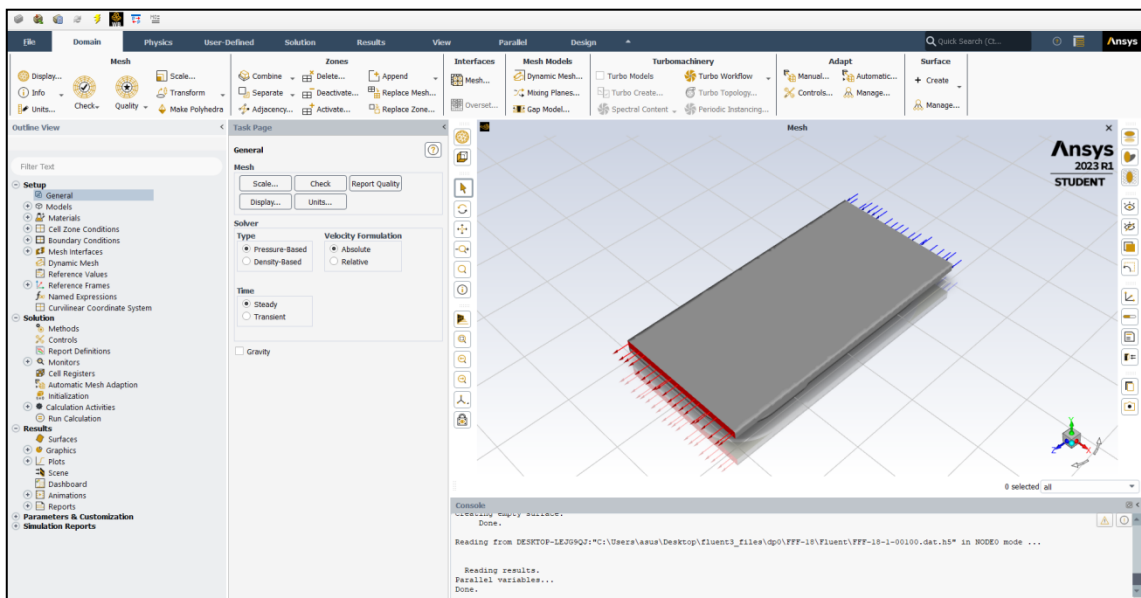
Dalším krokem bylo nastavení vlastností modelu a samotné simulace pomocí otevření okna *Setup*. Pro složitější modely byly nastaveny parametry *Solver Processes* na dva a byla zapnuta *Double Precision* (viz Obr. 31).



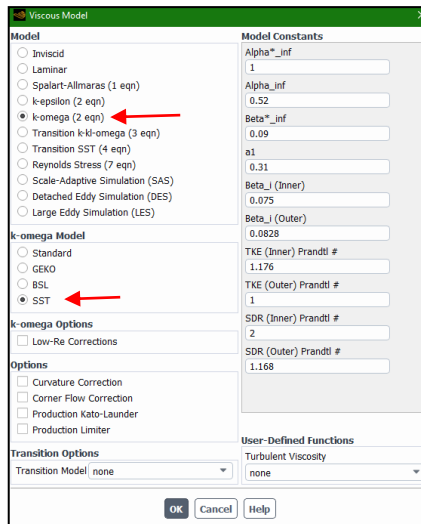
Obr. 31: Nastavení před spuštěním Setup (foto autor)

3.6.5 Krok Setup Fluent

Po otevření Fluentu (viz Obr. 32) byl jako první nastaven model na *Viscous (SST k-omega)* (viz Obr. 33) v sekci Setup – Models. Následně pomocí *Fluent Database* byl vytvořen nový materiál (water-liquid) v sekci Setup – Materials – Fluid a byl nastaven jako materiál pro doménu pojmenovanou jako Water, v sekci Setup – Cell Zone Conditions – Fluid - Water. Doména Air měla již v základu nastavený materiál jako vzduch.

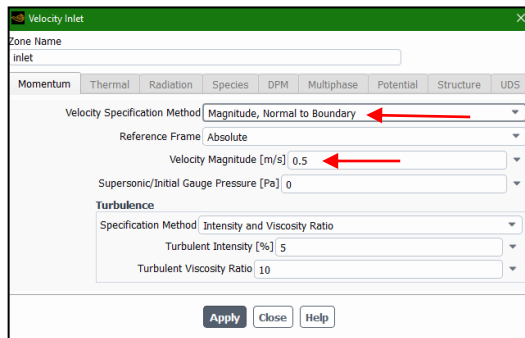


Obr. 32: Spuštěný Setup Fluent (foto autor)



Obr. 33: Nastavení vlastností modelu (foto autor)

V sekci Setup – Boundary Conditions byla otevřena kolonka *Inlet*, kde byla nastavena *Velocity Specification Method* na *Magnitude, Normal to Boundary* a pak změněna rychlost proudění podle potřeby (viz Obr. 34). V kolonce *Outlet* byl nastaven *Pressure Outlet* a vybrán *Prevent Reverse Flow* (viz Obr. 35).

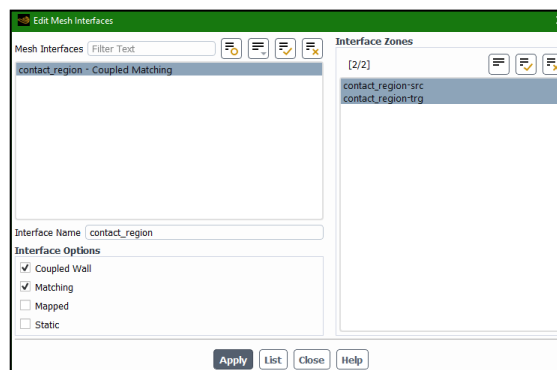


Obr. 34: Nastavení Inlet (foto autor)



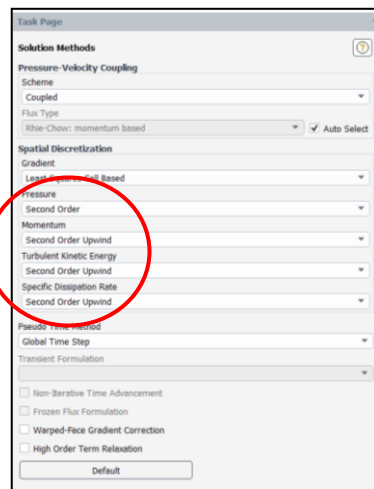
Obr. 35: Nastavení Outlet (foto autor)

Následně v sekci Setup – Mesh Interfaces – Contact_region byly vybrány u *Interface Options* možnosti *Coupled Wall* a *Matching* (viz Obr. 36).



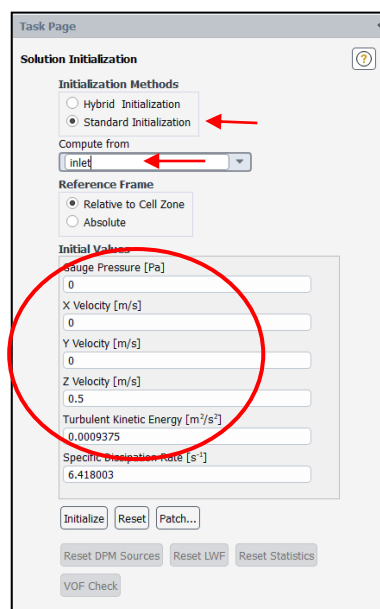
Obr. 36: Nastavení Contact_region (foto autor)

Jako předposlední bylo zkontrolováno, že v sekci Solution – Methods u kolonek *Pressure*, *Momentum*, *Turbulent Kinetic Energy* a *Specific Dissipation Rate* je nastaveno *Second Order Upwind (Second Order)* (viz Obr. 37).



Obr. 37: Nastavení Methods (foto autor)

Nakonec v sekci Solution – Initialization byly nastaveny *Initialization Methods* na *Standard Initialization* a v kolonce *Compute from* vybráno *Inlet*, díky tomu se *Initial Values* nastavili sami (viz Obr. 38). Pak už stačilo jen v sekci *Solution* dát *Run Calculation*. Výpočet výsledků může trvat delší dobu, záleží na složitosti modelu a na nastavení.

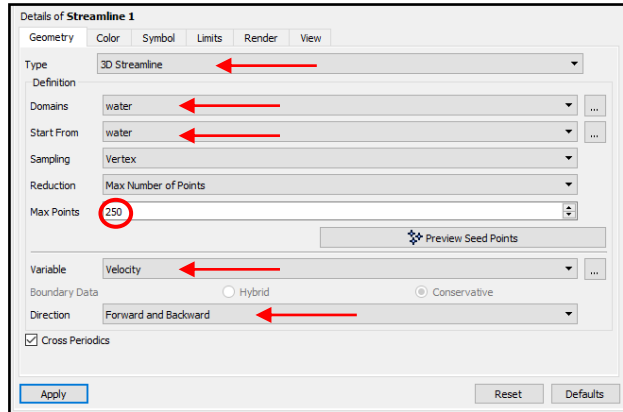
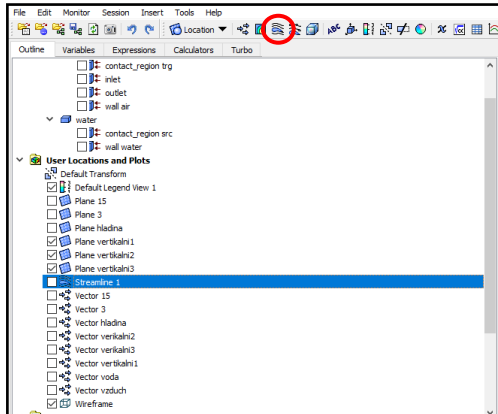


Obr. 38: Nastavení Initiaization Methods (foto autor)

3.6.6 Krok Results

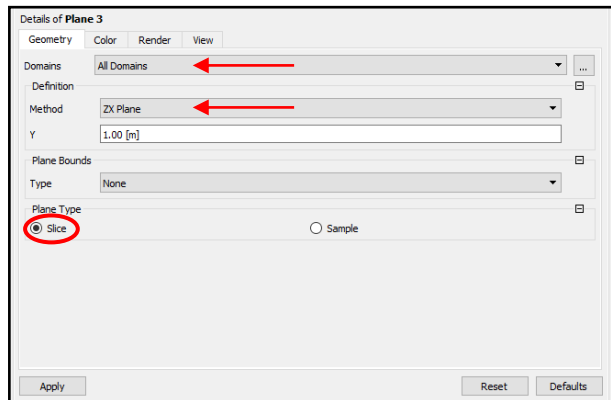
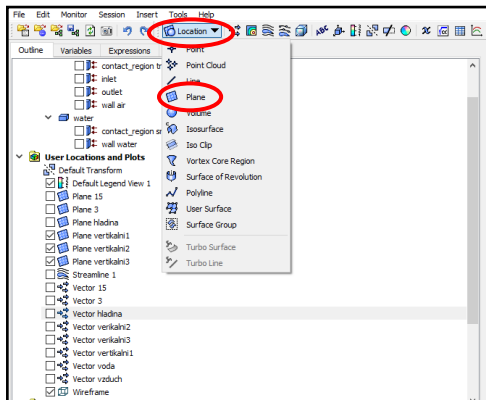
V tomto kroku byly vizualizovány parametry jako rychlost a směr proudění pomocí vytvoření proudnic (pro celý model), vektorů (pro hloubku 0; 1,5 a 3 m, proudnice a vzduch) a ploch/rovin (pro hloubku 0; 1,5 a 3 m a vertikální profil).

Proudnice byly vytvořeny pomocí tlačítka *Streamline* (viz Obr. 39) a nastavením *Type* na *3D Streamline*, *Domains* a *Start From* na *water*, *Max Points* na hodnotu 250, *Variable* na *Velocity* a *Direction* na *Forward and Backward* (viz Obr. 40).



Obr. 39: Tlačítko Streamline (foto autor) **Obr. 40:** Nastavení pro vytvoření proudnic (foto autor)

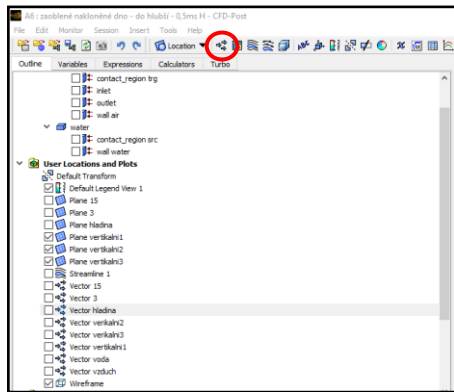
Roviny zobrazující rychlost proudění v různých vrstvách byly vytvořeny pomocí tlačítka *Location - Plane* (viz Obr. 41) a nastavením parametrů *Domains* na *All Domains*, *Method* na *ZX Plane*, *Y* na chtěnou hloubku a *Plane Type* na *Slice* (viz Obr. 42).



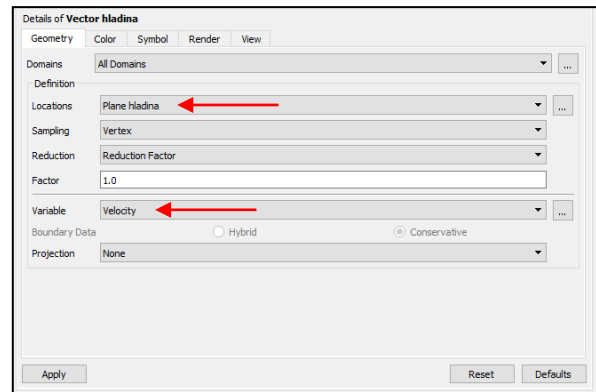
Obr. 41: Tlačítko Location - Plane (foto autor)

Obr. 42: Nastavení pro vytvoření roviny (foto autor)

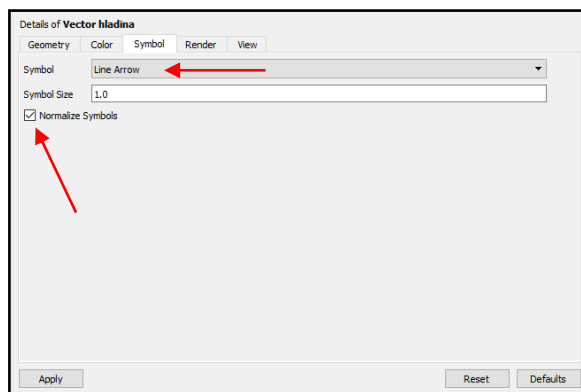
Vektory byly vytvořeny pomocí tlačítka *Vector* (viz Obr. 43) a nastavením *Locations* na *Plane* nebo *Streamline* (podle toho pro co byly zrovna tvořeny), *Variable* na *Velocity* (viz Obr. 44), *Symbol* na *Line Arrow* a vybráním *Normalize Symbols* (viz Obr. 45).



Obr. 43: Tlačítko Vector (foto autor)



Obr. 44: Nastavení pro vytvoření vektorů - geometry (foto autor)



Obr. 45: Nastavení pro vytvoření vektorů - symbol (foto autor)

4. Výsledky

4.1 Měření na Dehtáři

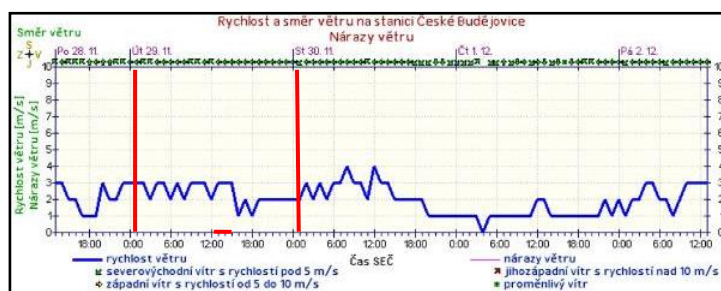
Bylo provedeno deset pokusů (čtyři na rybníku Bagr v Českých Budějovicích, jeden na Štičích sádkách, jeden na rybníce v Lišově a čtyři na Dehtáři), z toho byla kvůli metodickým problémům v zaznamenávání polohy díky použitým zařízením (viz kapitola 3.1 Vývoj zařízení pro zaznamenávání proudění) plně použitelná pouze tři měření pohybu vodní masy na Dehtáři.

4.1.1 Výsledky měření 29. 11. 2022

V tento den byla použita zařízení GPSMAP 78s a GPSMAP 60CSx, která zaznamenávala v časovém rozmezí 11:30 až 13:40 (2 hodiny a 10 minut). Po celou dobu bylo zataženo a mlhavo (viz Obr. 46) a rychlost větru naměřená na místě se pohybovala v rozmezí 2-3 m·s⁻¹ a podle dat z ČHMÚ byla po celý den 1-3 m·s⁻¹ (viz Obr. 47).



Obr. 46: Počasí 29. 11. 2022
(foto autor)

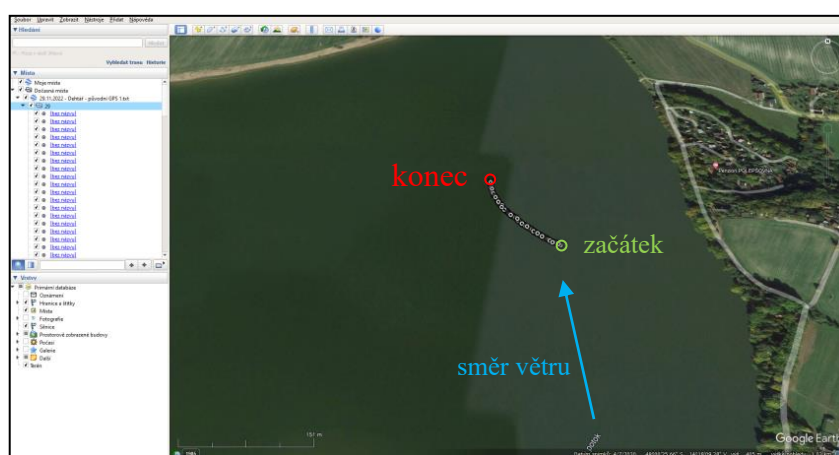


Obr. 47: Rychlost větru 29. 11. 2022 – podle ČHMÚ
(ČHMÚ, 2022a)

Zařízení GPSMAP 60CSx bohužel nezvládlo zaznamenat vše, jak je vidět na obrázku 48, zato GPSMAP 78s zaznamenával úspěšně celé 2 hodiny a 10 minut (viz Obr. 49). Pro snadnější orientaci je směr větru znázorněn modrou šipkou, první zaznamenaný bod je označen zeleně a poslední bod červeně (stejně je tomu i u ostatní obrázků s prouděním).



Obr. 48: Zaznamenané proudění 29. 11. 2022 – GPSMAP 60CSx (foto autor)



Obr. 49: Zaznamenané proudění 29. 11. 2022 – GPSMAP 78s (foto autor)

Podle doby zaznamenávání a ze vzdálenosti, kterou zařízení urazila, byla vypočítána přibližná rychlost proudění ($0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Voda se tedy pohybovala až 120krát pomaleji než vzduch, ale směr proudění byl podobný jako směr větru.

4.1.2 Výsledky měření 01. 12. 2022

Následné měření proběhlo pomocí GPSMAP 78s, GPSMAP 60CSx a telefonu MOTOROLA s aplikací GPS Logger. Zaznamenávání probíhalo v době 8:45 až 14:55 (6 hodin a 10 minut), počasí bylo mírně mlhavé (viz Obr. 50) a vítr vál jen velmi mírný. Na místě byl naměřen vítr o rychlosti $0,3\text{-}0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a ČHÚM pro tento den udávala rychlost $0\text{-}2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (viz Obr. 51)



Obr. 50: Počasí 01. 12. 2022
(foto autor)

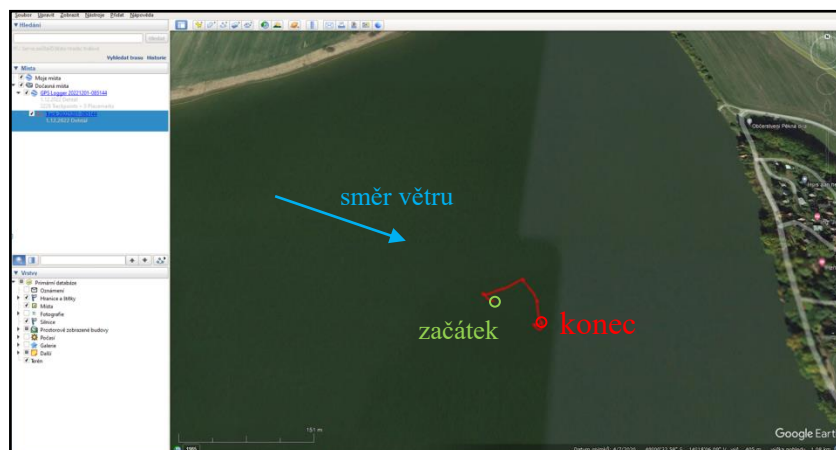


Obr. 51: Rychlost větru 01. 12. 2022 – podle ČHMÚ
(ČHMÚ, 2022a)

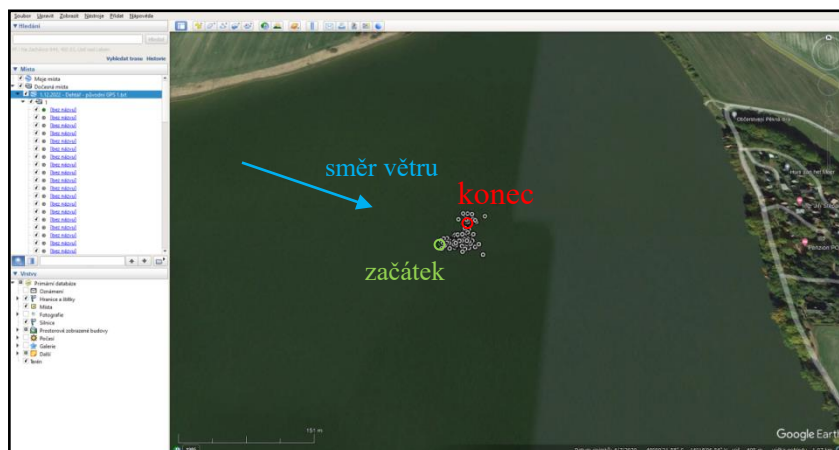
Při tomto měření zaznamenávala proudění po celou dobu všechna zařízení. GPSMAP 60CSx byla ve stejné schránce jako telefon MOTOROLA, proto je proudění na obrázku 52 a 53 podobné (tato shoda tak potvrzuje shodnost měření). GPSMAP 78s se nacházela a zaznamenávala samostatně v další schránce umístěné o cca 100 m dál (viz Obr. 54).



Obr. 52: Zaznamenané proudění 01. 12. 2022 – GPSMAP 60CSx (foto autor)



Obr. 53: Zaznamenané proudění 01. 12. 2022 – aplikace GPS Logger (foto autor)



Obr. 54: Zaznamenané proudění 01. 12. 2022 – GPSMAP 78s (foto autor)

Podle těchto záznamů byla rychlost proudění **0,0083 m·s⁻¹**, což je 120,5krát méně než byla rychlost větru (pokud počítáme s průměrnou rychlostí větru 1 m·s⁻¹). Proudění také nemělo tak jednoznačný směr jako při předchozím měření, ale stále se pohybovalo přibližně ve směru větru, i když pohyb byl více omezen na jedno místo.

4.1.3 Výsledky měření 08. 12. 2022

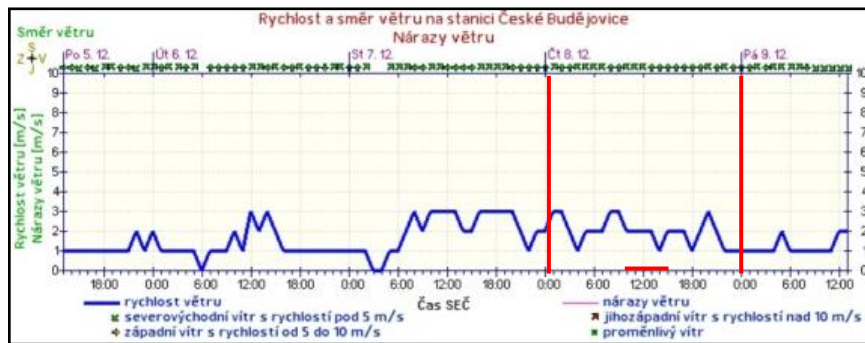
K poslednímu měření bylo použito pouze GPSMAP 78s a GPSMAP 60CSx. Zaznamenávání probíhalo v čase 10:15 až 14:40 (4 hodiny a 25 minut). Počasí bylo celý den jasné, hladina však byla ráno mírně zamrzlá (viz Obr. 55), ale voda i led se stále pohybovaly a měření tak nebylo zabráněno. Led navíc v průběhu dopoledne roztál a začalo být více větrno (viz Obr. 56). Rychlost větru naměřená při vypouštění zařízení byla (0,7-1 m·s⁻¹), při ukončení zaznamenávání (1,7-2,3 m·s⁻¹) a podle ČHMÚ byla rychlost přes den v rozmezí 1-3 m·s⁻¹ (viz Obr. 57), zároveň se v průběhu měření změnil i směr větru.



Obr. 55: Zamrzlá hladina (foto autor)

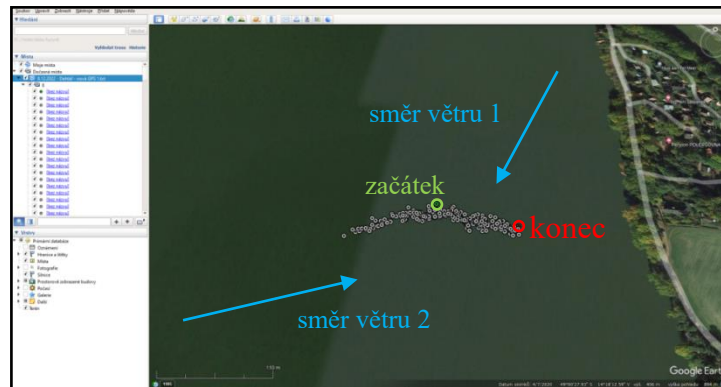


Obr. 56: Počasí 08. 12. 2022 (foto autor)

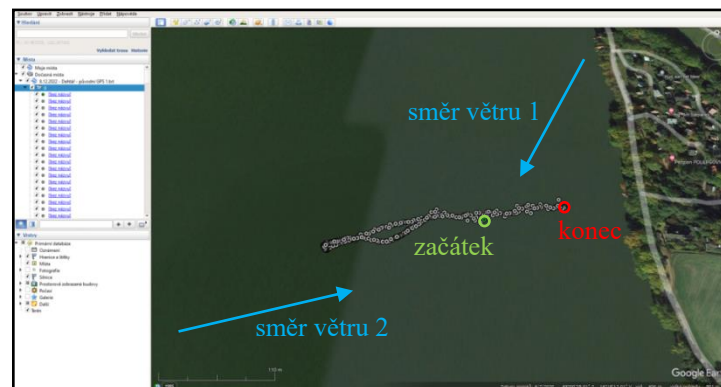


Obr. 57: Rychlost větru 08. 12. 2022 – podle ČHMÚ (ČHMÚ, 2022b)

GPSMAP 78s a GPSMAP 60CSx byly umístěny každá zvlášť do jiných schránek a obě dvě zaznamenávaly po celou dobu pokusu a výsledky můžeme vidět na obrázku 58 a 59. Směr věru při vypouštění je znázorněný modrou šipkou s číslem 1 a následná změna větru je označena modrou šipkou s číslem 2.



Obr. 58: Zaznamenané proudění 08. 12. 2022 – GPSMAP 60CSx (foto autor)

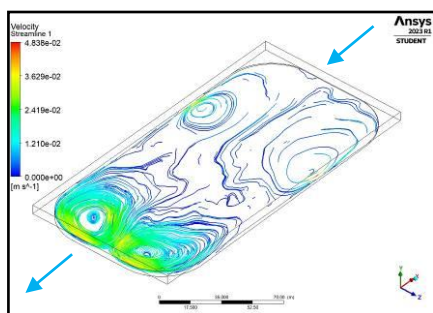


Obr. 59: Zaznamenané proudění 08. 12. 2022 – GPSMAP 78s (foto autor)

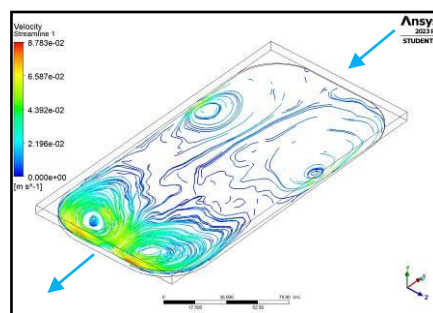
Vypočítaná rychlost proudění byla nejdříve $0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a po změně větru, která nastala přibližně ve 12:00, byla rychlost $0,0375 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. To znamená, že proudění vody bylo 40krát a 50krát pomalejší než rychlost větru. Na záznamech lze také velmi dobře pozorovat, jak proudění vody reagovalo na změnu rychlosti a směru větru.

4.3 Simulace v programu Ansys

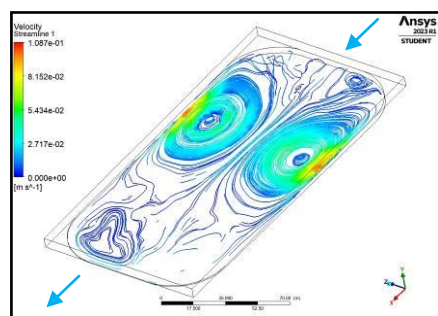
Celkem bylo vymodelováno 341 scénářů pro různé tvary a rozměry rybníků a rychlosti větru. Výsledky simulací (včetně proudnic, vertikálních a horizontálních průřezů v různých hloubkách a místech a vektorů zobrazujících směr a rychlost proudění) pro dva vybrané tvary rybníků (viz kapitola 3.6 Postup při simulování proudění v Ansys Fluent) a všechny směry a rychlosti větru naleznete v Příloze č. 1. Pro názornou ukázkou jsem vybrala jen výsledky zobrazující proudnice u obou modelů při rychlostech větru $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (tyto rychlosti se totiž vyskytovali nejčastěji při měření v terénu) a při třech a čtyřech směrech větru (viz Obr. 60 až 73). Na těchto obrázcích byl vidět například vznik proudění tvořící víry a místa s minimálním až nulovým mícháním.



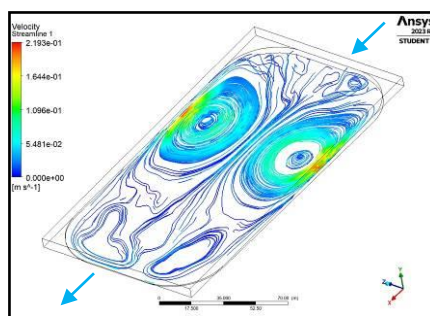
Obr. 60: Nakloněné dno – vítr do hloubky $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



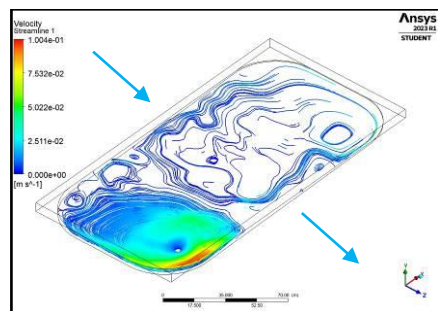
Obr. 61: Nakloněné dno – vítr do hloubky $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



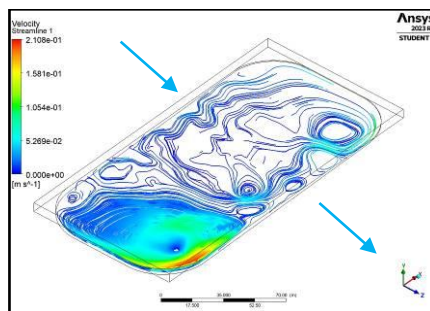
Obr. 62: Nakloněné dno – vítr do mělčiny $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



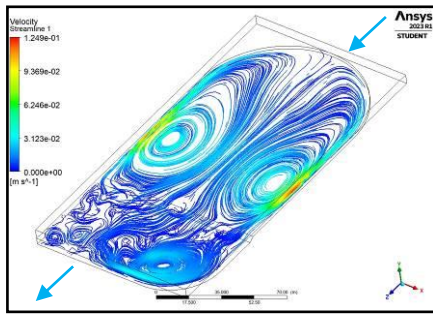
Obr. 63: Nakloněné dno – vítr do mělčiny $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



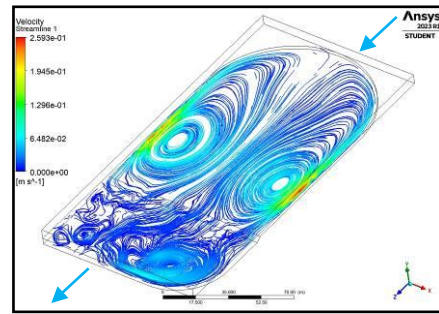
Obr. 64: Nakloněné dno – vítr zleva $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



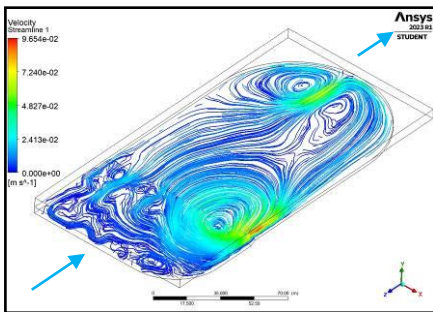
Obr. 65: Nakloněné dno – vítr zleva $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



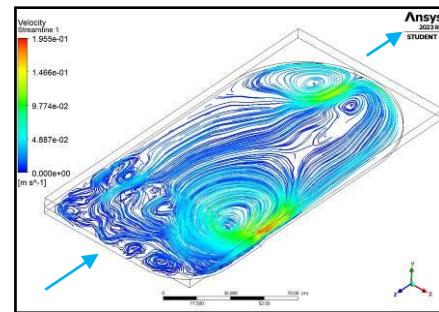
Obr. 66: Zvláštní tvar – vítr do prohlubně $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



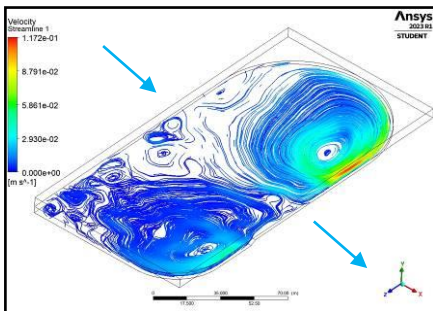
Obr. 67: Zvláštní tvar – vítr do prohlubně $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



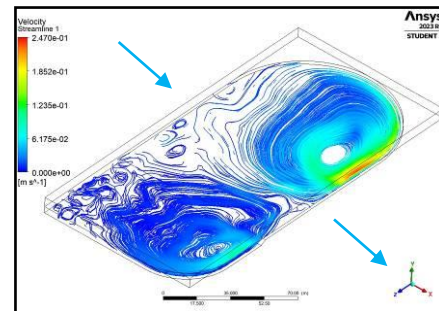
Obr. 68: Zvláštní tvar – vítr od prohlubně $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



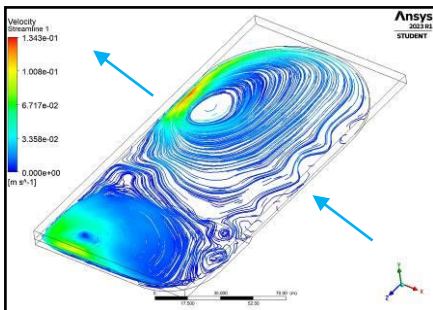
Obr. 69: Zvláštní tvar – vítr do prohlubně $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



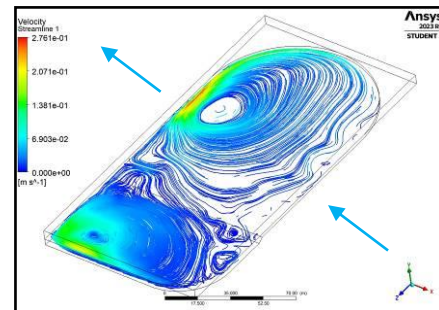
Obr. 70: Zvláštní tvar – vítr zleva $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



Obr. 71: Zvláštní tvar – vítr zleva $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



Obr. 72: Zvláštní tvar – vítr zprava $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)



Obr. 73: Zvláštní tvar – vítr zprava $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (foto autor)

5. Diskuze

Proudění vody v rybníku může zásadně ovlivnit podmínky (chemické i biologické) v jednotlivých částech rybníku, ale horizontální pohyby vody a vítr, jako jedny z nejzásadnějších faktorů míchání vody, nejsou v jejich studiu obvykle zahrnovány. Přitom rybníky mohou mít různou produkci ryb, která nemusí být způsobena pouze trofií, ale i teplotou vody (Desai a Singh, 2009), která může být ovlivněna mícháním způsobeným jejich orientací k převládajícím větrům. Například v Izraelském jezeře Kinneret byla zjištěna v různých místech rozdílná horizontální distribuce produktivity (Ostrovsky a kol., 1996). I tak je standardem odebírat vzorky na chemismus, plankton a podobně v nejhlubší části rybníku, která ale například u Dehtáře tvoří jen zhruba 10 %.

Vzhledem k tomu, že nám není známo, že by se někdo zabýval komplexním zaznamenáváním horizontálního proudění v malých rybnících, není mnoho zdrojů, se kterými lze porovnávat výsledky této bakalářské práce a většina výzkumných prací se zabývá cirkulačními vzorci ve velkých a mělkých jezerech v zahraničí, jako například Sato (2007) nebo Liu a kol. (2018).

Již během našeho měření na Dehtáři bylo možné pozorovat některé druhy vln. Například povrchové gravitační vlny (viz Obr. 56) byly pozorovány pravidelně, hlavně 08. 12. 2022, kdy byl vítr nejrychlejší. Ale vlny s “bílou čepicí“ nebylo možné pozorovat v žádný den, protože podle Smitha (1979) tyto vlny vznikají při rychlostech větru $4\text{--}5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a v dny měření byla maximální rychlost větru $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Během měření 01. 12. 2022, když byl vítr jen mírně nad $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, bylo možné pozorovat i kapilární vlny (viz Obr. 50). Naopak stojaté povrchové vlny, vnitřní seiche, Kelvinovy a Poincaré vlny nejdou pomocí našich měření a přístrojů zaznamenat nebo následně rozpoznat.

Projevy Langmuirova proudění (protáhlé linie pěny) jsme během měření nezaznamenali, protože tento typ proudění podle měření Harrise a Lotta (1973) vzniká až při rychlostech větru $3\text{--}4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a tato rychlost větru se během našeho měření prakticky nevyskytovala.

První měření 29. 11. 2022 na Dehtáři ukázalo, že výsledné proudění se mírně stáčelo do oblouku (ve směru hodinových ručiček) po směru větru (viz Obr. 49), což by mohlo indikovat postupný vznik vířivého proudění, které nám ukazovaly simulace v programu Ansys. Vypočítaná rychlost proudění ($0,025\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) byla 0,83–2,5 % rychlosti větru.

Při druhém měření 01. 12. 2022 při velmi nízkých rychlostech větru můžeme pozorovat na záznamech z prvních dvou zařízení, že směr proudění byl nejdříve skoro kolmo na směr větru a následně rovnoběžně se směrem větru. Třetí zařízení se dokonce pohybovalo chvíli i proti směru větru. Všechna zařízení se však pohybovala pomalu po spirálovitých drahách nebo chvíli na jednu a hned na to na druhou stranu na velmi malé ploše. Toto naznačuje, že zde bylo proudění velmi turbulentní i přes malou rychlost větru. Vypočítaná rychlost proudění ($0,0083 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) byla 0,4-2,7 % rychlosti větru.

Výsledky měření z třetího dne (08. 12. 2022) byly ideální ukázkou reakce proudění na změnu rychlosti a směru větru. Zařízení nejdříve zaznamenala vlnivý pohyb, který nebyl ve směru větru, následně byl na záznamu vidět moment, kdy se změnil směr a rychlost větru, protože směr proudění vody se otočil a začal proudit rychleji ve směru větru, přičemž jedno ze zařízení zaznamenalo mírné stáčení proudění ve směru hodinových ručiček. Toto stáčení, podobně jako při prvním měření, může indikovat vývoj vířivého proudění. Vypočítaná rychlost proudění před změnou větru ($0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) byla 2,5-3,6 % rychlosti větru a po změně větru ($0,0375 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) byla 1,6-2,2 % rychlosti větru.

Simulace proudění provedené v programu Ansys ukázaly, že horizontální proudění je velmi podstatné a může převládat nad vertikálním a že v rybníku se mohou tvořit místa s minimálním až nulovým mícháním. Zároveň lze pozorovat vznik vírového proudění vody při konstantním směru a rychlosti větru. Vznik vírů v jezerech a rybnících při obdobných podmínkách (konstantním směru větru) ukázal i výzkum horizontálních cirkulačních vzorů v jezeře Taihu v Číně, kde se po dvou dnech stálého větru vytvořilo 13 různě velkých vírů se stabilním prouděním (Liu a kol., 2018). V našich simulacích víry vznikali více v oblastech s větší hloubkou, ale i v mělkých částech modelovaného rybníku se často objevovali pomalé víry. V pomalejších a menších vírech se doba zdržení pohybovala i okolo 6 dnů, zatímco u těch největších a rychlejších byla přes 7 hodin. Tyto hodnoty mohou ovlivnit množství kyslíku v těchto místech, protože během oblačného počasí nemusí být množství vznikajícího kyslíku v těchto oblastech dostatečné a bez možnosti přísunu kyslíku z jiných oblastí může dojít k jeho vyčerpání, nebo pokud se do těchto míst dostanou živiny, nemusí se dále distribuovat do zbytku rybníku.

Také se zde pravděpodobně bude koncentrovat plankton, a ryby tak mohou do těchto míst dělat nájezdy za potravou, protože plankton je organismus, obvykle mikroskopický, který je unášen proudy a nedokáže se proti těmto silám pohybovat vlastními silami. Většina planktonu je takto unášen po celý svůj životní cyklus, ale některé druhy nakonec dorostou do takové velikosti, že mohou proti proudům plavat (NOAA, 2023). Některé druhy zooplanktonu projevují únikovou reakci (schopnost rychlejšího pohybu na krátkou dobu) a mohou se ve vodním sloupci pohybovat nahoru a dolů. Například buchanky vykazují zřetelný trhavý způsob plavání, který jim dává průměrnou rychlost $0,001$ až $0,005 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a při potřebě uniknout predátorovi mohou plavat rychlostí až $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ po dobu přibližně jedné sekundy (Strickler, 1975). Z tohoto vyplývá, že i při námi nejmenší vypočítané rychlosti proudění v Dehtáři ($0,0083 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) je pravděpodobné, že plankton zachycený těmito proudy by jimi byl unášen bez možnosti přesunout se jinam.

Koncentrování planktonu v námi zjištěných vírech potvrzuje i zdokumentovaná heterogenita chlorofylu v rybníku Dehtáři, kde naměřené hodnoty utvořily oblasti s maximálním obsahem chlorofylu, které odpovídaly pozici vírů podle našich simulací (Hummelová, 2017).

Obecně simulace ukázaly, že rychlost proudění roste s rychlostí větru, kdy například při rychlosti větru $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (pro model s nakloněným dnem) byla nejčastější rychlost proudění přibližně $0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a při větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mělo proudění rychlost okolo $0,044 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zároveň se voda nejrychleji pohybovala v místech, kde se víry dotýkaly okraje rybníku, ale v jejich středu se často tvořila místa s velmi nízkými rychlostmi. Simulace také ukázaly, že s hloubkou rychlost proudění klesá a u dna byla tak velmi nízká. Převládající rychlost proudění byla pro všechny simulace zhruba 3 % rychlosti větru a voda se míchala do 95 % hloubky.

Při simulacích pro rybník s nakloněným dnem se při všech rychlostech větru a směrech do hloubky a do mělčiny vždy objevily dva hlavní vířivé proudy (viz Obr. 60 až 63) Při větru do hloubky byly oba víry v nejhlubší části v zaoblených rozích a dva menší vznikaly v mělké části (viz Obr. 60 a 61). Při větru do mělčiny byly oba hlavní víry také v nejhlubší části rybníku, ale dále od rohů (viz Obr. 62 a 63). Naopak při větru kolmém na levou delší stranu rybníku vznikal vždy jen jeden velký vír také v nejhlubší

části v zaobleném rohu a ve zbytku rybníku bylo vlnivé proudění s více menšími víry (viz Obr. 64 a 65).

Pro rybníky s prohlubní (lovištěm) simulace ukazovaly při větru směrem do prohlubně vznik dvou velkých vírů v mělké části, jednoho v hluboké části u zaobleného rohu a u nezaobleného rohu pomalého proudění s řadou drobných vírů (viz Obr. 66 a 67). Při větru od prohlubně vznikl jeden velký vír na přelomu mělčiny a prohlubně a dva menší těsně u sebe v mělké části těsně u okraje rybníku (viz Obr. 68 a 69). V hlubší části také vznikalo podél kratší strany rybníka vlnité proudění s drobnými víry (viz Obr. 68 a 69). Za tohoto směru větru bylo také vertikální proudění nejznatelnější. Při větru kolmém na levou i při větru kolmém na pravou delší stranu rybníku se vždy tvořily dva velké víry (viz Obr. 70 až 73), jeden v mělké části a druhý v prohlubni (oba při okraji). Jenom při větru kolmém na levou delší stranu vznikaly v nezaobleném rohu malé a pomalé víry (viz Obr. 70 a 71) zatímco při větru kolmém na pravou delší stranu rybníku vznikalo vlnivé proudění podél delší strany rybníku na druhé straně od vzniklých velkých vírů (viz Obr. 72 a 73).

Proudění bylo simulováno pro zjednodušené modely rybníku a nemusí tak plně odpovídat reálným podmínkám, protože reálné proudění je ovlivněno mnoha různými faktory jako například různým ohříváním vody v odlišných oblastech rybníku, hloubkou, změnami v rychlosti a směru větru a hlavně velmi složitou morfometrií rybníku (nerovnosti ve dně, nepravidelný tvar břehu, porosty vodních rostliny,...). Mnoho z těchto faktorů je velmi obtížné jak změřit, tak i modelovat.

Například heterogenita prostředí se obtížně měří a rychlost větru je podle našich měření vysoce proměnlivá (například při pokusech na Dehtáři 23. 6. 2022 byla rychlost větru zaznamenávána několikrát každou hodinu a pro ukázkou, naměřené rychlosti za první hodinu byly 0,58; 0,43; 0,3; 0; 1,04; 0 m·s⁻¹). Rychlost větru je také odlišná v různých částech rybníku, což je způsobeno orografií, lesním porostem a zástavbou, kdy rychlost větru bývá nejvyšší právě u orografických překážek (ČHMÚ, 2023). Vybavení studovaného místa by tak vyžadoval 30 meteostanic a rozsáhlý výzkum. Proto je modelování zjednodušeného rybníku legitimním a finančně nenáročným přístupem, který simuluje podmínky, které by měly být samozřejmě následně experimentálně verifikovány.

Z časových důvodů (dlouhý vývoj měřících zařízení) jsme při měření a následném modelování nebrali v úvahu stratifikaci, vliv různého ohřívání v odlišných částech rybníku, jiné rychlosti větru v různých částech rybníku a vliv stromů na vítr. Stratifikaci jsme nebrali v úvahu, vzhledem k tomu, že pokusy byly prováděny v období listopadu a prosince za chladného počasí a za větrných podmínek, a je tedy pravděpodobné, že díky podzimní cirkulaci vody v rybníku stratifikace nevznikala.

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provedení terénních měření pohybu vody při hladině pomocí různých zařízení a z výsledků stanovit rychlost a trajektorii proudění vody v reálných podmínkách. Tato data následně sloužila k validaci simulací proudění provedených pro zjednodušený model rybníku v programu Ansys. Z důvodu časové náročnosti ověření správné funkčnosti zařízení pro zaznamenávání proudění bylo nutné vytvořit simulaci bez některých ovlivňujících faktorů (jako například bez stromů na hrázi, které by ovlivňovaly vítr) a zúžit rozsah terénního měření.

Z terénních výsledků vyplývá, že proudění v rybníku je sice závislé na směru a rychlosti větru (proudění se často pohybuje ve směru větru), ale důležitou roli hraje i morfometrie, která má vliv na vznik různých vířivých proudů i ve směru proti větru.

Pomocí simulací proudění i v hlubších vrstvách bylo zjištěno, že se v rybnících často tvoří víry (a oblasti s žádným nebo minimálním mícháním) i s relativně dlouhou dobou zdržení vody, což může mít negativní vliv na koncentraci kyslíku a také se zde bude hromadit například plankton, který není schopen proudění odolávat a je jím unášen a následně koncentrován uvnitř víru.

Z terénních měření a výsledků simulací tedy vyplývá, že rybníky nejsou v horizontální rovině rovnoměrně promíchávané, jak bylo usouzeno hydrobiology v 50. až 70. letech minulého století a proto by se měla horizontálnímu proudění v dnešní době věnovat větší pozornost.

Výsledky měření a simulací v této bakalářské práci mohou přispět k pochopení procesů probíhajících v rybníku Dehtář a mohou být základem pro následné mapování cirkulačních vzorců, což by mohlo mít pozitivní vliv na hospodaření na tomto rybníku.

7. Přehled použité literatury

- Ansys, 2023 [online]. ANSYS, Inc. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>
- Ansys Fluent, 2023 [online]. ANSYS, Inc. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent#tab1-1>
- Ansys Student, 2023 [online]. ANSYS, Inc. [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>
- Aplikace BaseCamp, 2023 [online]. Garmin [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.garmin.com/cs-CZ/software/basecamp/>
- Assaf, G., Gerard, R., Gordon, A.L., 1971. Some Mechanisms of Oceanic Mixing Revealed in Aerial Photographs. *Journal of Geophysical Research*. 76(27), s. 6550-6572.
- Boyce, F.M., 1974. Some Aspects of Great Lakes Physics of Importance to Biological and Chemical Processes. *Journal of the Fisheries Board of Canada*. 31, s. 689-730.
- Boyce, F.M., 1977. Response of the Coastal Boundary Layer on the North Shore of Lake Ontario to a Fall Storm. *Journal of Physical Oceanography*. 7(5), s. 719-732.
- Cullen, J.J., Lewis, M.R., 1988. The Kinetics of Algal Photoadaptation in the Context of Vertical Mixing. *Journal of Plankton Research*. 10(5), s. 1039-1063.
- Davies-Colley, J.R., 1988. Mixing Depths in New Zealand Lakes. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 22(4), s. 517-527.
- Desai, A.S., Singh, R.K., 2009. The effects of water temperature and ration size on growth and body composition of fry of common carp, *Cyprinus carpio*. *Journal of Thermal Biology*. 34(6), s. 276-280.
- Downing, J.A., 2010. Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot [online]. *Limnetica*, 29(1), s. 9-24 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.limnetica.com/en/node/439>.
- Fenocchi, A., Petaccia, G., Sibilla, S., 2016. Modelling flows in shallow (fluvial) lakes with prevailing circulations in the horizontal plane: Limits of 2D compared to 3D models [online]. *Journal of Hydroinformatics*. 18(6), s. 928-945 [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/303182380_Modelling_flows_in_shallow_fluvial_lakla_with_prevaling_circulations_in_the_horizontal_plane_Limits_of_2D_compared_to_3D_momode
- GARMIN GPSMAP 60CSx PRO černá, 2001-2023 [online]. 1M.cz - první mobilní [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.1m.cz/garmin-gpsmap-60csx-pro-cerna-d11975/>
- GARMIN GPSMAP 78s, 2023 [online]. Sporticus [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.sporticus.cz/p/garmin-gpsmap-78s/>

- George, D.G., 1981. Wind-induced Water Movements in the South Basin of Windermere. *Freshwater Biology*. 11(1), s. 37-60.
- George, D.G., Edwards, R.W., 1973. Daphnia Distribution within Langmuir Circulations. *Limnology and Oceanography*. 18, s. 798-800.
- Gloor, M., Wüest, A., Münnich, M., 1994. Benthic Boundary Mixing and Resuspension Induced by Internal Seiches. *Hydrobiologia*. 284, s. 59-68.
- GPS Logger, 2011 [online]. Basic Air Data [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.basicairdata.eu/projects/android/android-gps-logger/>
- Harris, G.P., Lott, J.N.A., 1973. Observations of Langmuir circulations in Lake Ontario. *Limnology and Oceanography*. 18(4), s. 584-589.
- Hummelová, S., 2017. Chemismus a fyzikální parametry rybníků během hydrologického roku. Bakalářská práce (Bc.). Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Fakulta rybářství a ochrany vody, Katedra ústavu akvakultury a ochrany vod. s. 23-42
- ICH guideline Q11 on development and manufacture of drug substances (chemical entities and biotechnological/biological entities, 2011 [online]. European Medicines Agency [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.ema.europa.eu/en/ich-q11-development-manufacture-drug-substances-chemical-entities-biotechnological-biological>
- Imberger, J., 1985. Thermal Characteristics of Standing Waters: An Illustration of Dynamic Processes. *Hydrobiologia*. 125, s. 7-29.
- Imboden, D.M., Lemmin, U., Joller, T., Schurter, M., 1983. Mixing Processes in Lakes: Mechanisms and Ecological Relevance. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*. 45, s. 11-44.
- Kalff, J., 2002. *Limnology: Inland Water Ecosystems*. USA: Prentice Hall, Inc. 179-201.
- Lacoma, T., 2023. Google Earth Pro: Everything you need to know [online]. Android Police [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.androidpolice.com/google-earth-pro-explainer/>
- Lane, R.K., 2000. Lake [online]. Britannica [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/lake/Currents>
- Liebovich, S., 1983. The Form and Dynamics of Langmuir Circulations. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 15, s. 391-427.
- Liu, S., Ye, Q., Wu, S., Stive, M.J.F., 2018. Horizontal Circulation Patterns in a Large Shallow Lake: Taihu Lake, China [online]. *Water*, 10(6) [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/w10060792>
- MacIntyre, S., Flynn, K.M., Jellison, R., Romero, J.R., 1999. Boundary Mixing and Nutrient Fluxes in Mono Lake, California. *Limnology and Oceanography*. 44(3), s. 512-529.

- Meerhoff, M., Jeppesen, E., 2009. Shallow lakes and ponds. *Encyclopedia of Inland Waters*. Elsevier. s. 645-655.
- Mortimer, C.H., 1974. Lake Hydrodynamics. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Mitteilungen*. 20(1), s. 124-197.
- Ostrovsky, I., Yacobi, Y.Z., Walline, P., Kalikhman, I., 1996. Seiche-induced Mixing: Its Impact on Lake Productivity. *Limnology and Oceanography*. 41(2), s. 323-332.
- O'Sullivan, P.E., Reynoldd, C.S., ed., 2003. *The Lakes Handbook Volume 1: Limnology and Limnetic ecology*. Oxford: Blackwell Publishing, s. 115-149.
- Počasí v České republice – České Budějovice, 2022a [online]. Český hydrometeorologický ústav [cit. 2022-12-02]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/prehled-stanic/ceske-budejovice?l=cz>
- Počasí v České republice – České Budějovice, 2022b [online]. Český hydrometeorologický ústav [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/prehled-stanic/ceske-budejovice?l=cz>
- Reichl, J., Všetická, M., 2006. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- Rowan, D.J., Kalff, J., Rasmussen, J.B., 1992. Estimating the Mud Deposition Boundary Depth in Lakes from Wave Theory. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 49(12), s. 2490-2497.
- Rybník Dehtář, 2023 [online]. Google [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/place/Deht%C3%A1%C5%99/@49.0057735,14.2671487,13z/data=!4m10!1m2!2m1!1zZGVodMOhxZkgbWFweQ!3m6!1s0x477357ace7e0d827:0x6a290a48c4b8db92!8m2!3d49.0075425!4d14.2995641!15sCg1kZWh0w6HFmSBtYXB5kgEJcmVzZXJ2b2ly4AEA!16s%2Fg%2F121kw1c5>
- Rybník Dehtář, 2023 [online]. Oficiální stránky Jihočeský venkov, z.s. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: https://www.jihoceskyvenkov.cz/vylety/koupani/rybnik-dehtar-0_141.html
- Sato, Y., 2007. Circulation and mixing of lake water. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*. 37(4), s. 201-208.
- Saggio, A., Imberger, J., 1998. Internal Wave Weather in a Stratified Lake. *Limnology and Oceanography*. 43(8), s. 1780-1795.
- SIVS – Vítr, 2023 [online]. Český hydrometeorologický ústav [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/sivs/vitr.html>
- Smith, I.R., 1997. Conditions in Isothermal Lakes. *Freshwater Biology*. 9(2), s. 119-145

- Strickler, J.R., 1975. Swimming of Planktonic Cyclops Species (Copepoda, Crustacea): Pattern, Movements and Their Control. Z knihy: Wu, T.Y.T., Brokaw, C.J., Brennen, C. (eds) Swimming and Flying in Nature. s. 599-613.
- The Editors of Encyclopaedia Britannica, 1998. Capillary wave [online]. Encyclopedia Britannica [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/capillary-wave>
- What are plankton?, 2023 [online]. National Oceanic and Atmospheric Administration [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/plankton.html>

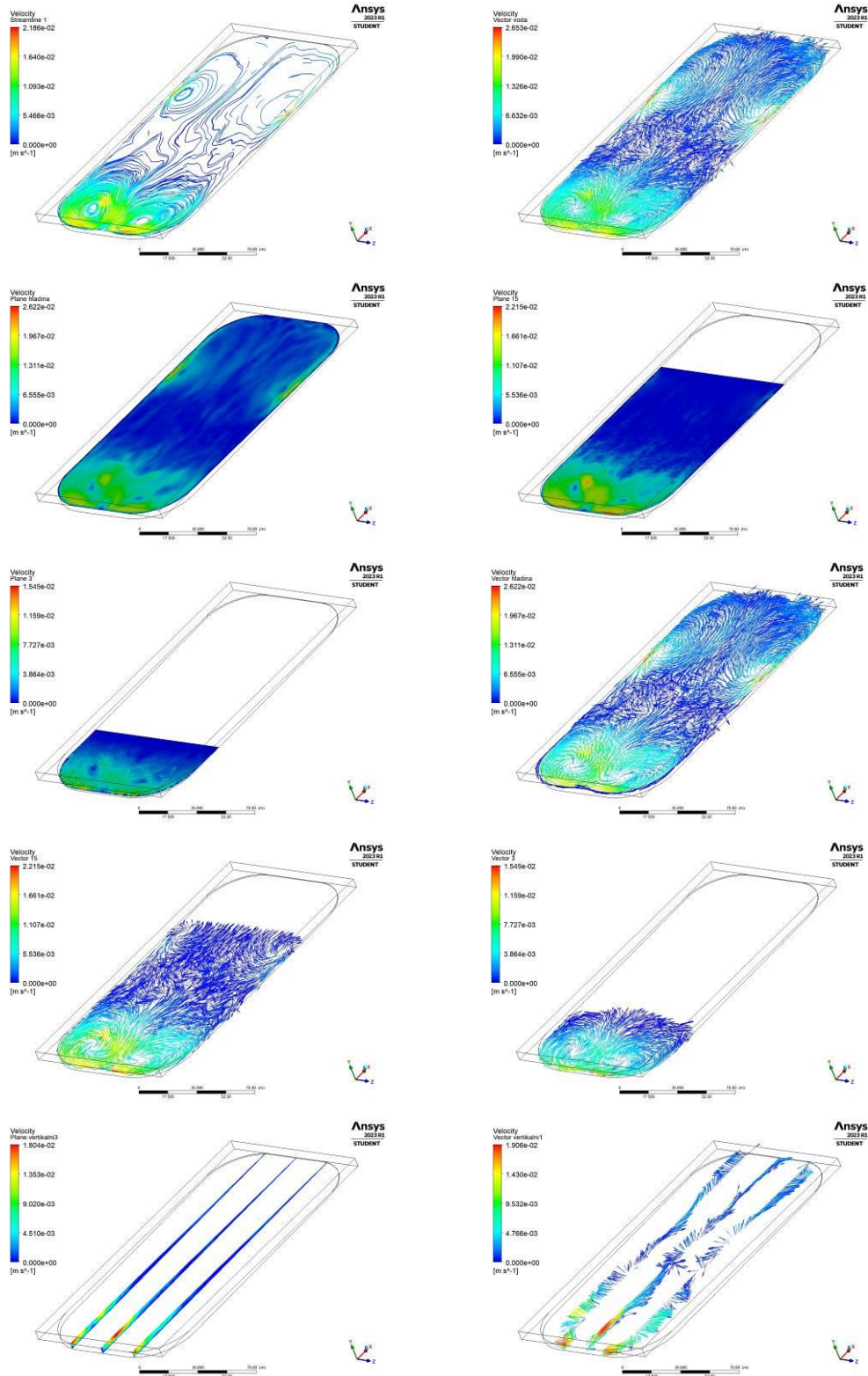
8. Seznam příloh

Příloha č. 1: Modely rybníků vytvořené v programu ANSYS

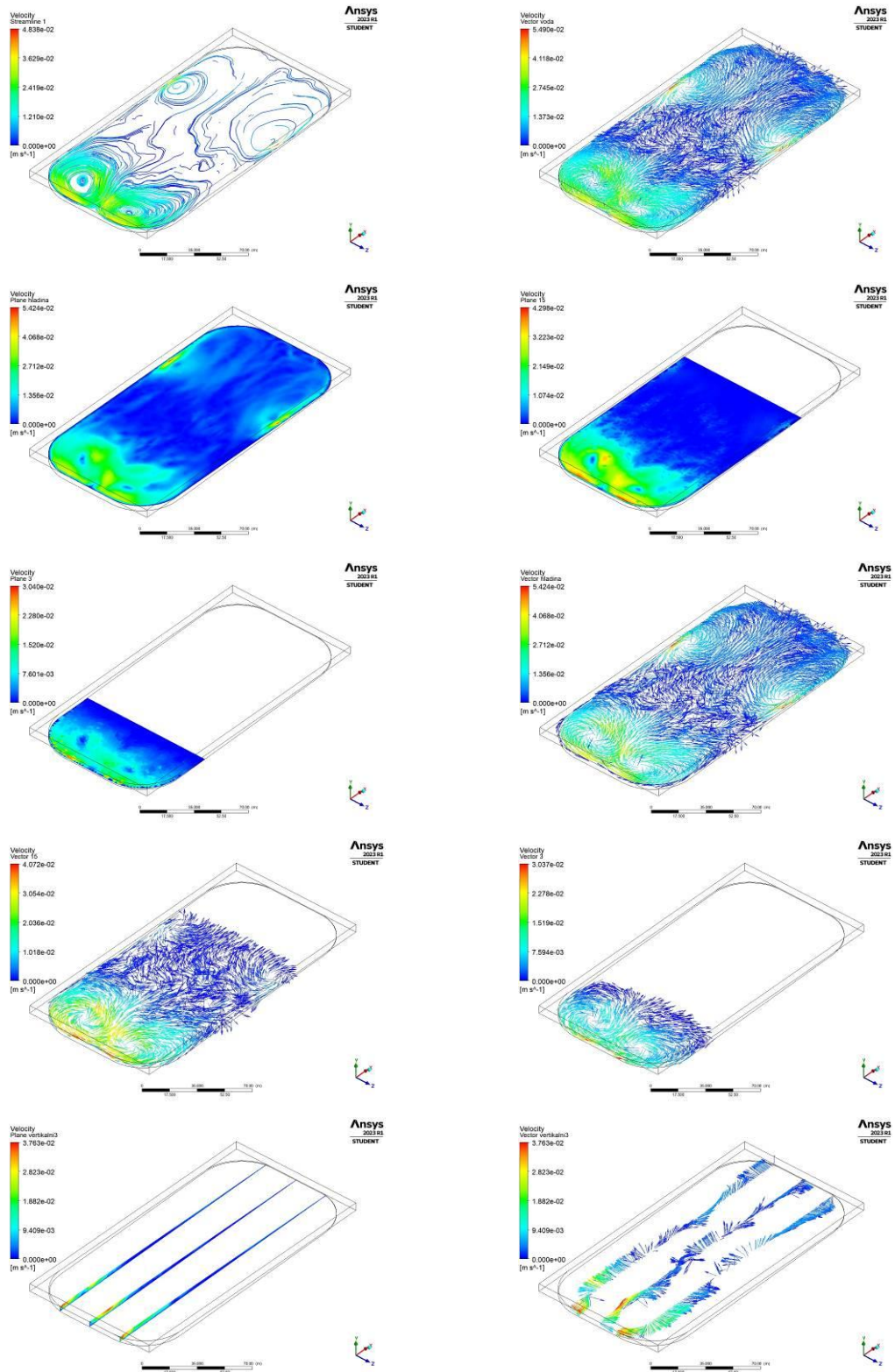
9. Přílohy

Příloha č. 1

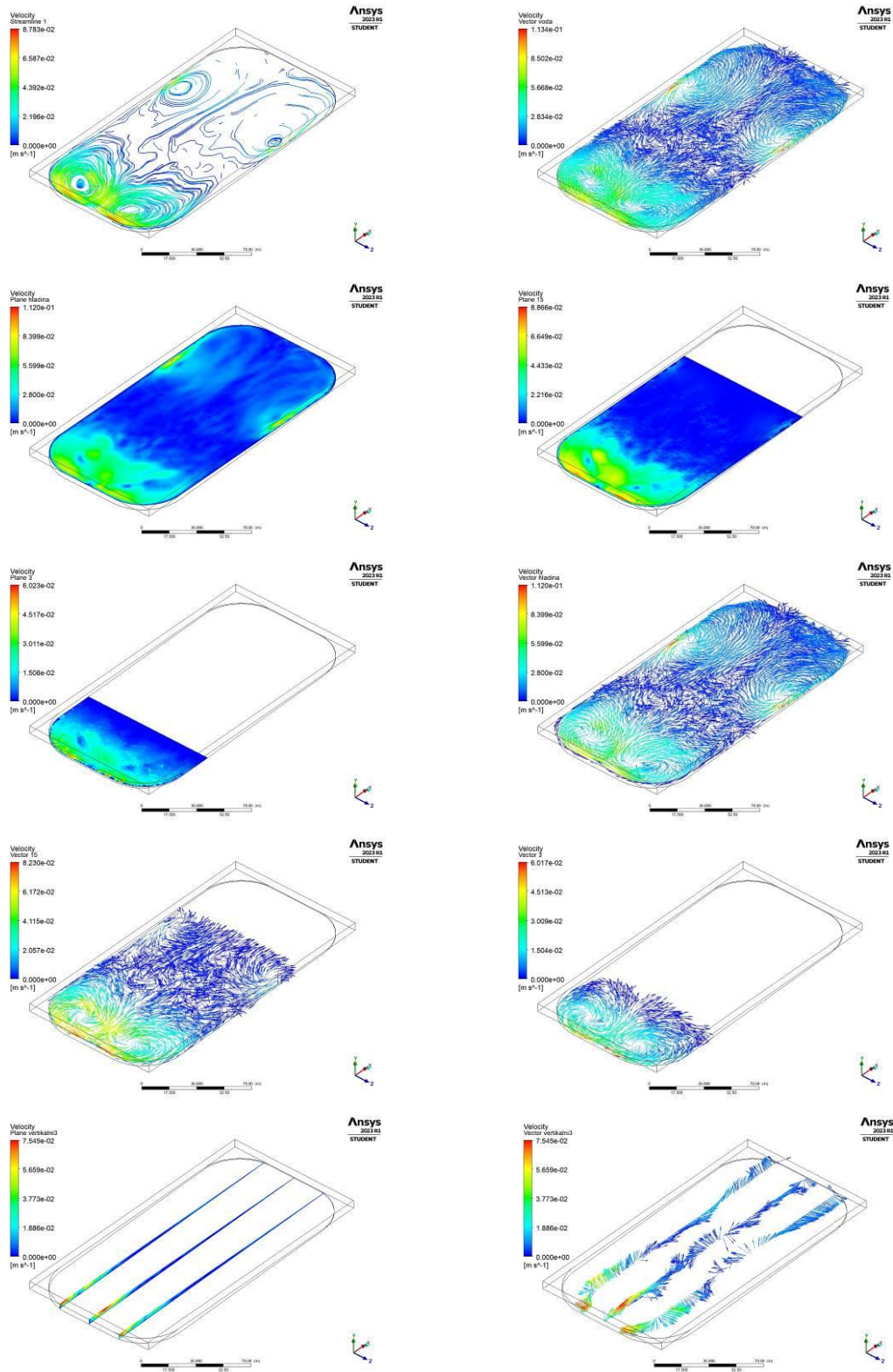
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr do hloubky:



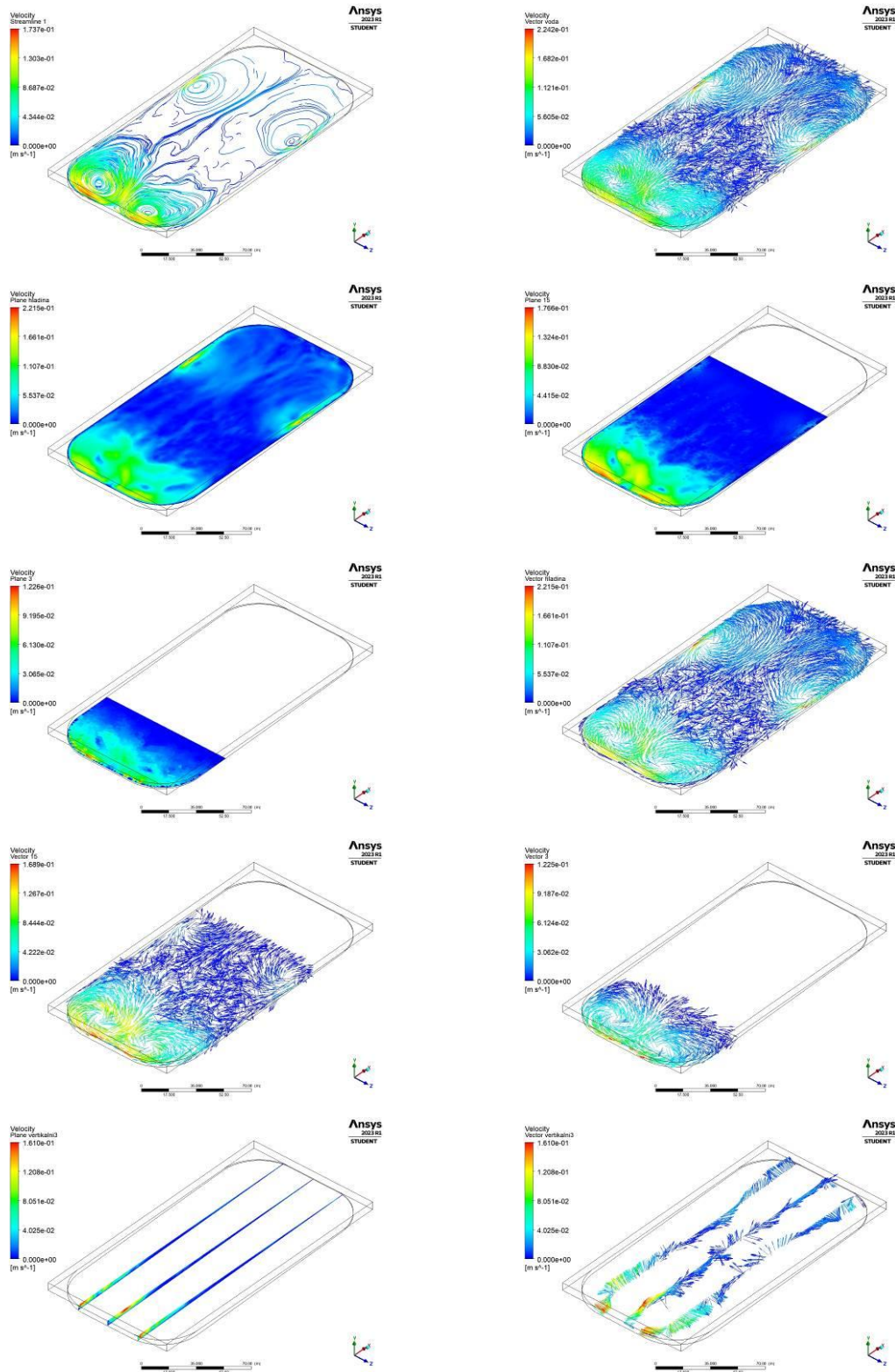
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr do hloubky:



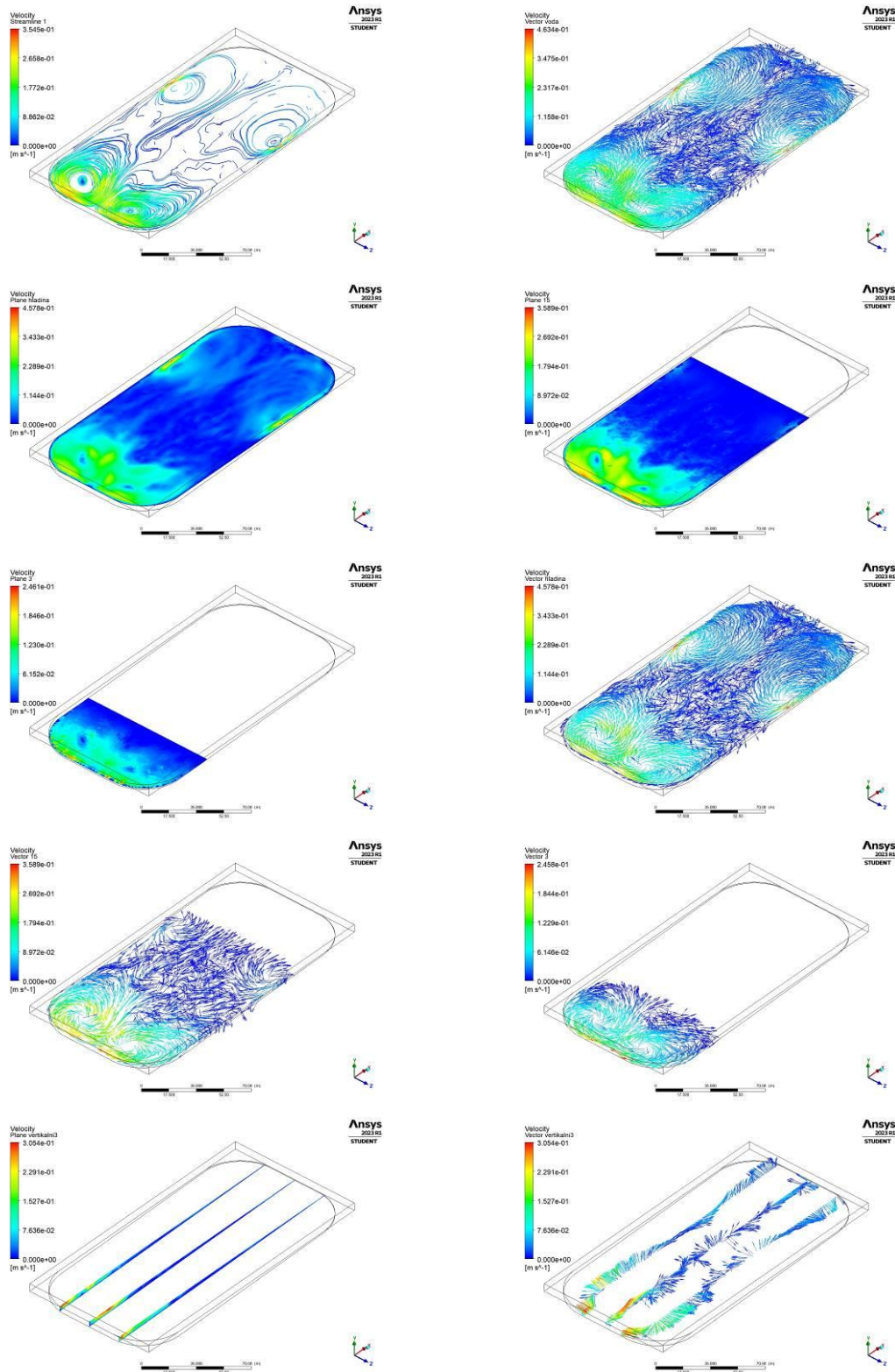
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr do hloubky:



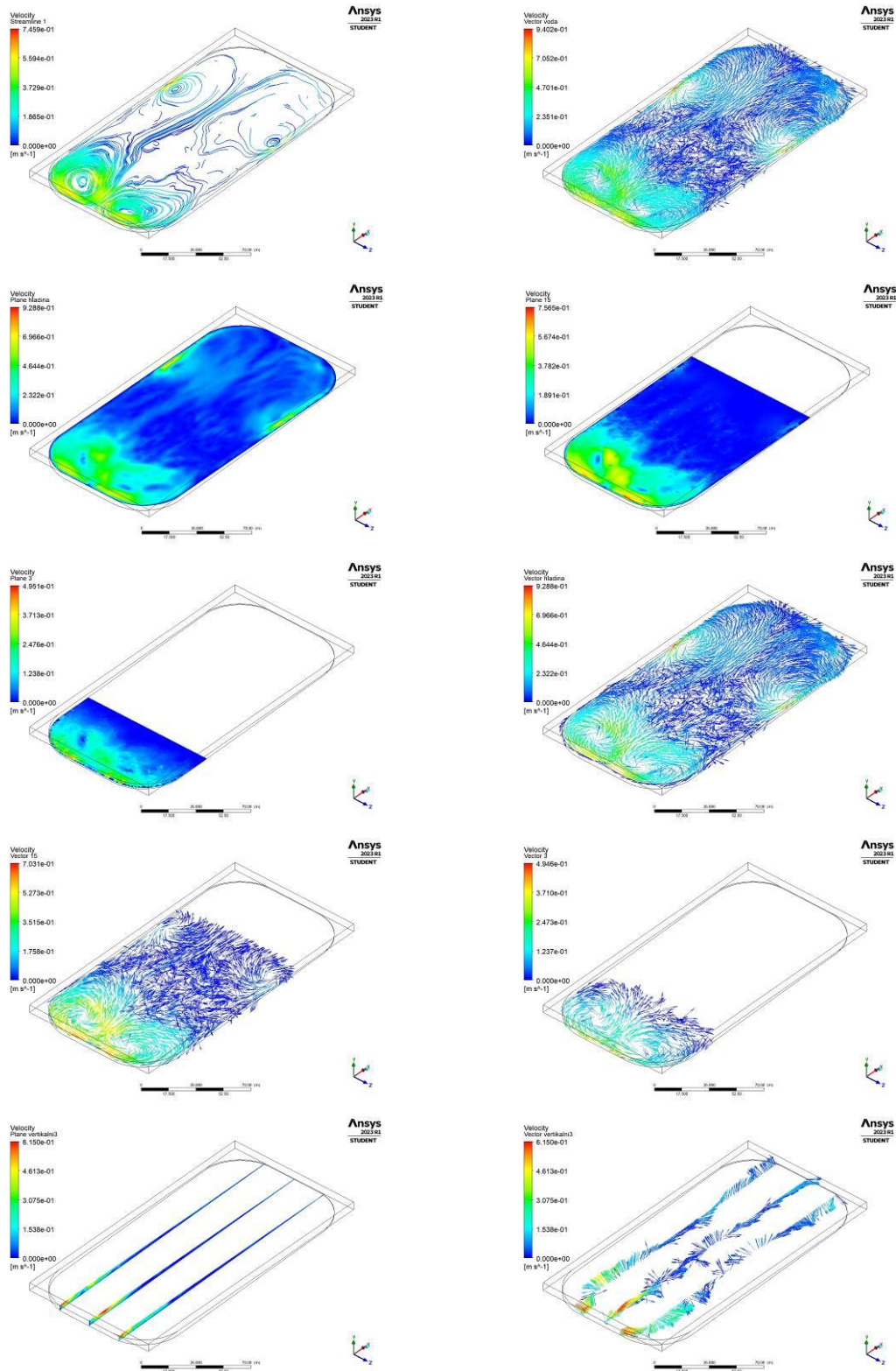
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr do hloubky:



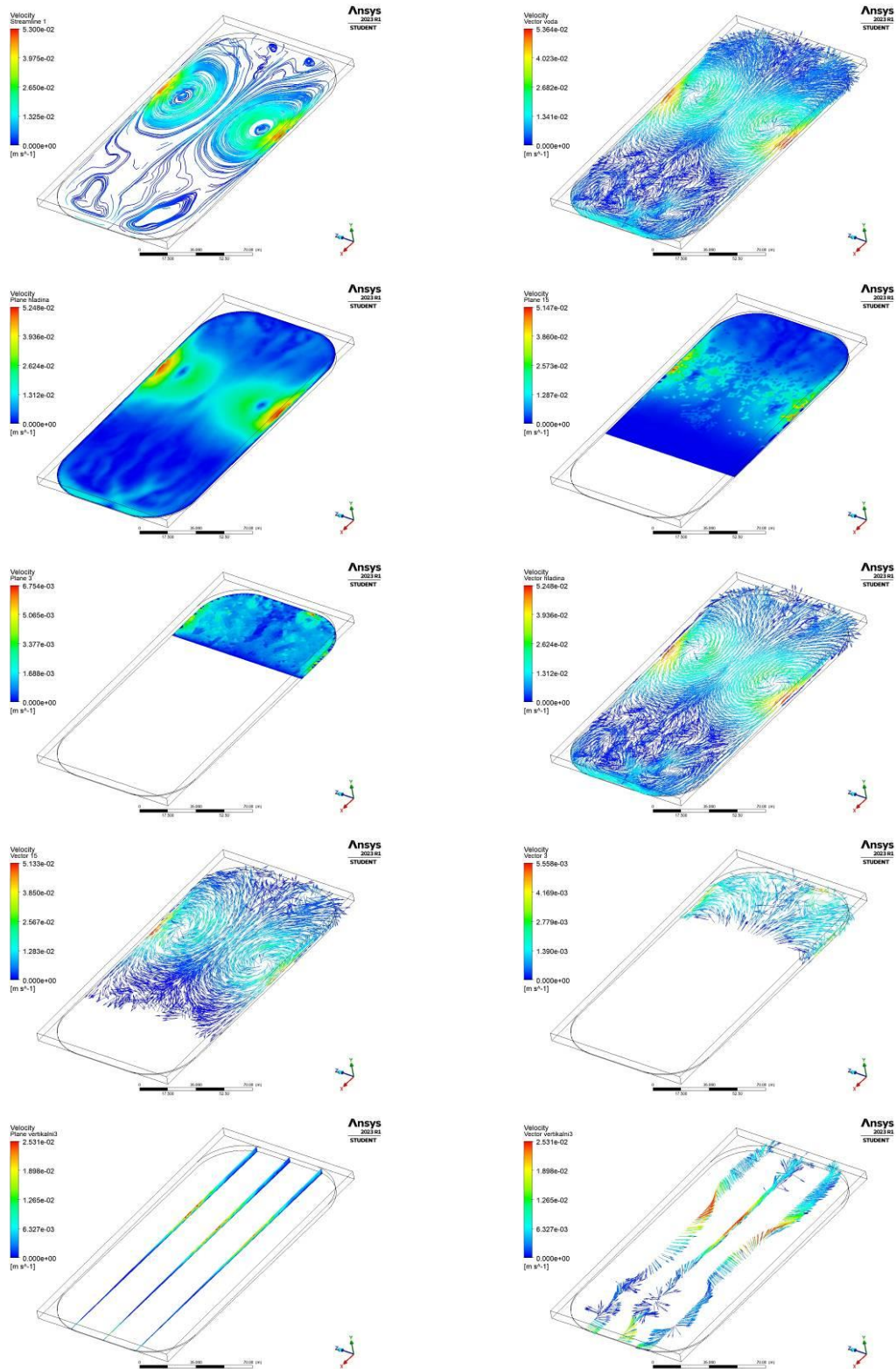
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr do hloubky:



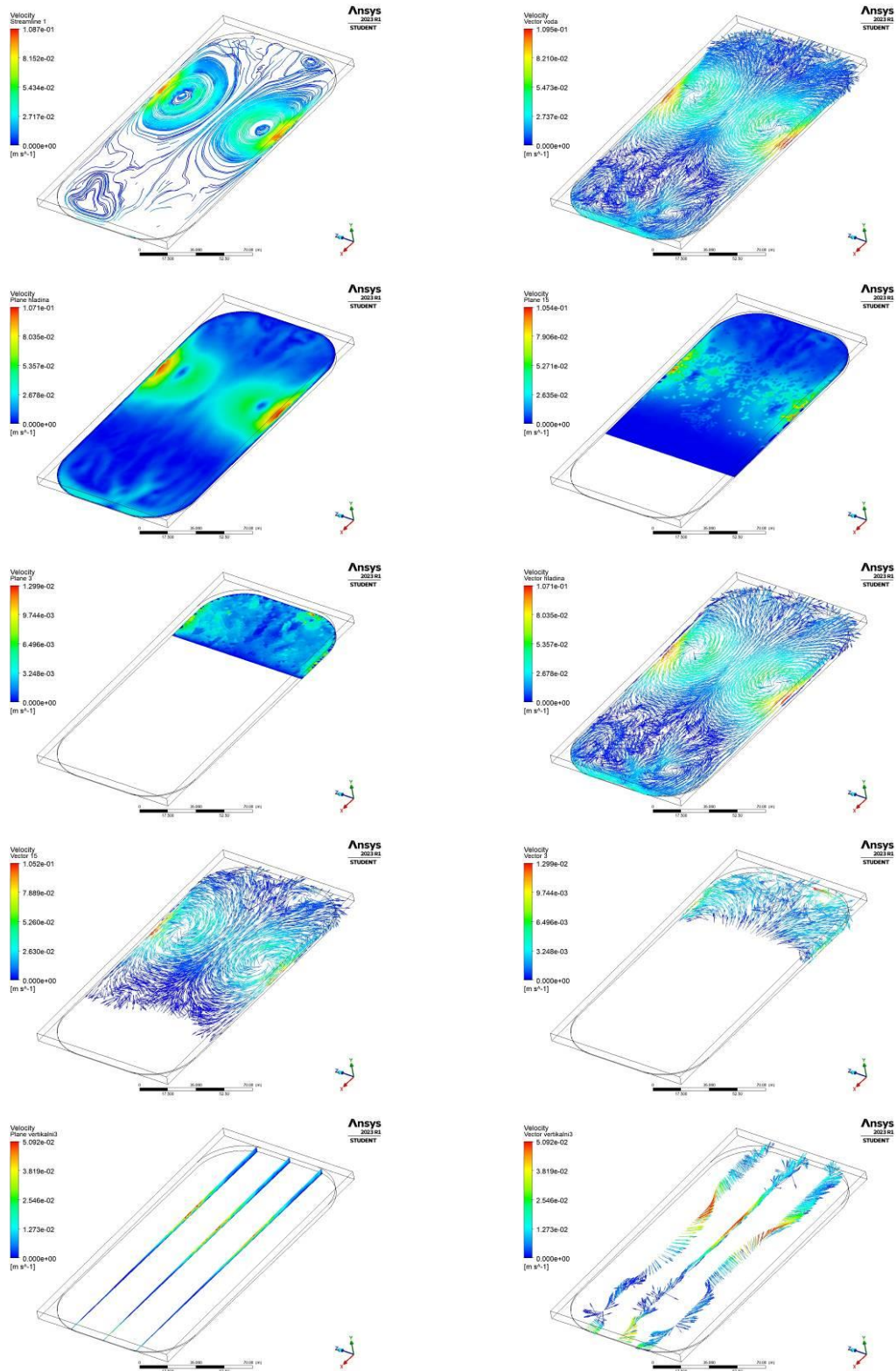
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr do hloubky:



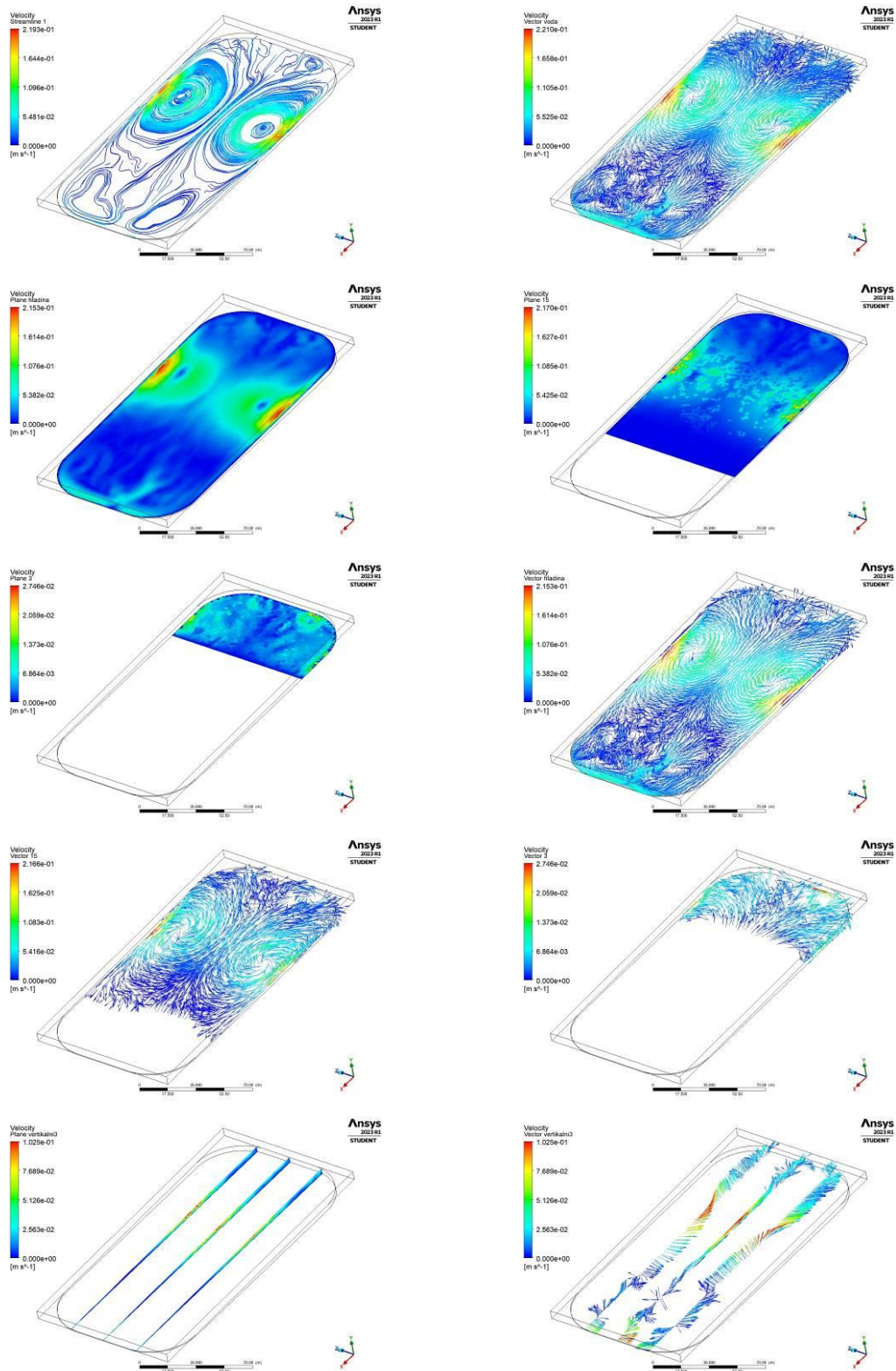
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr na mělčinu:



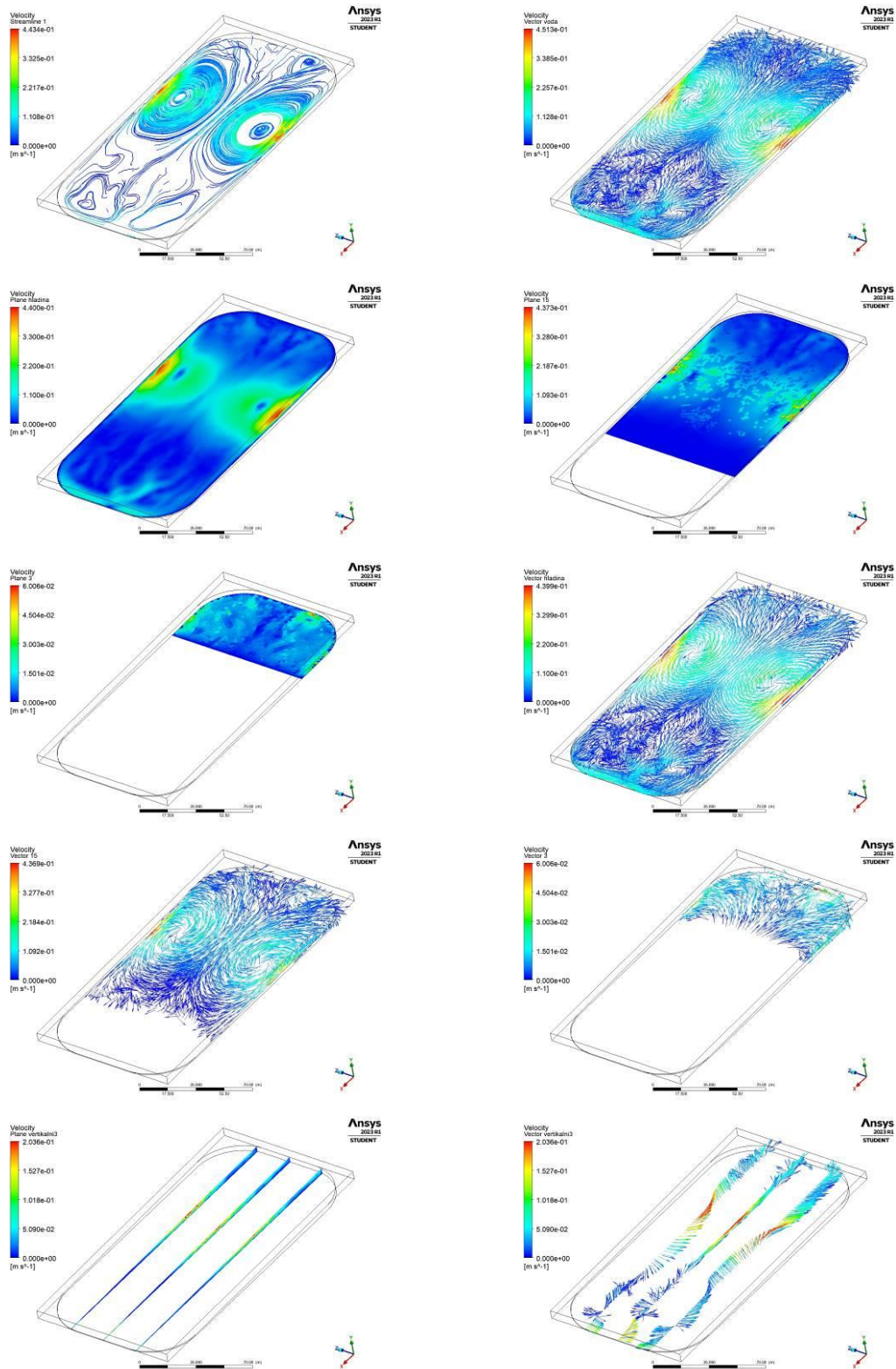
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr na mělčinu:



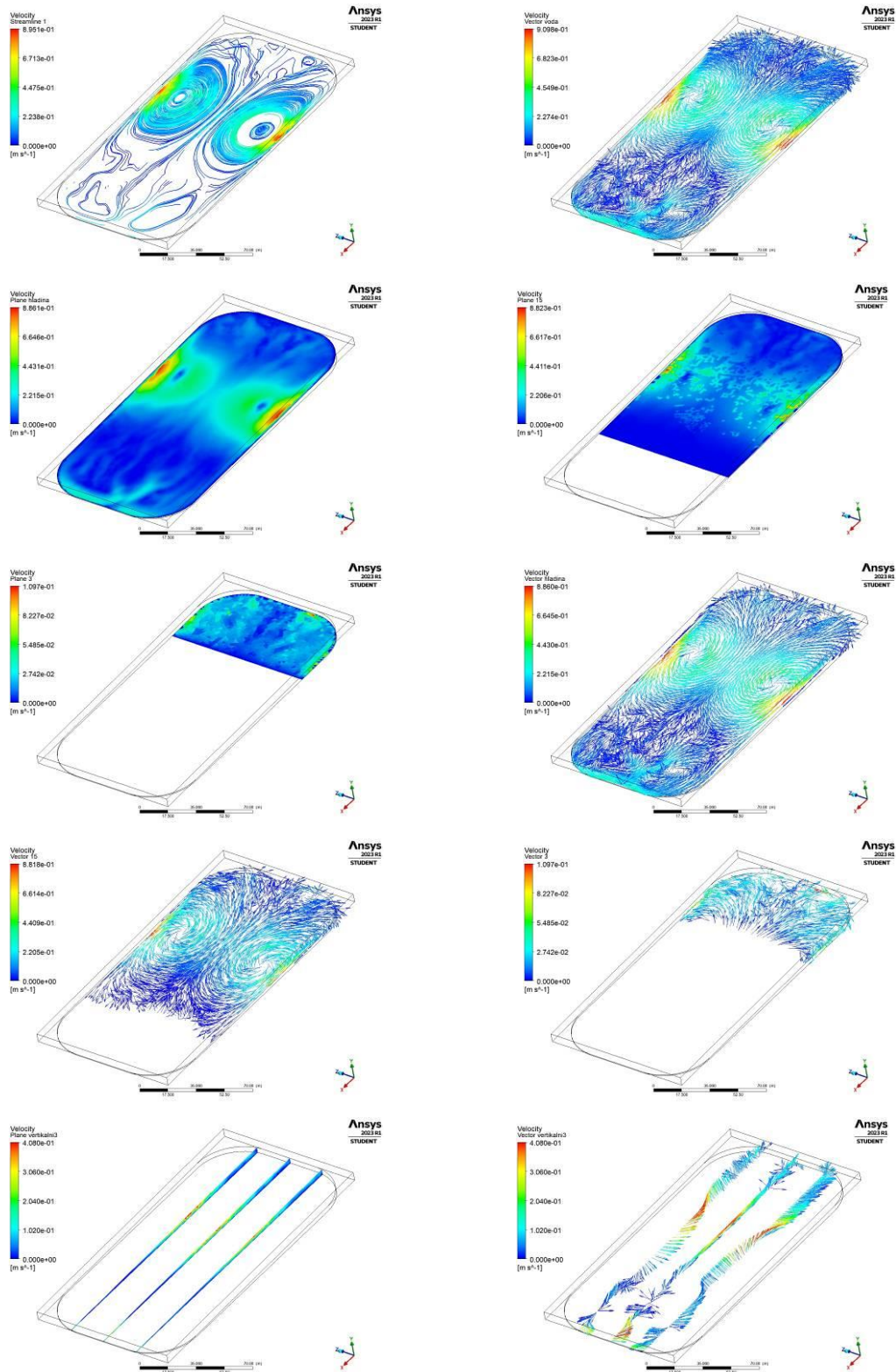
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr na mělčinu:



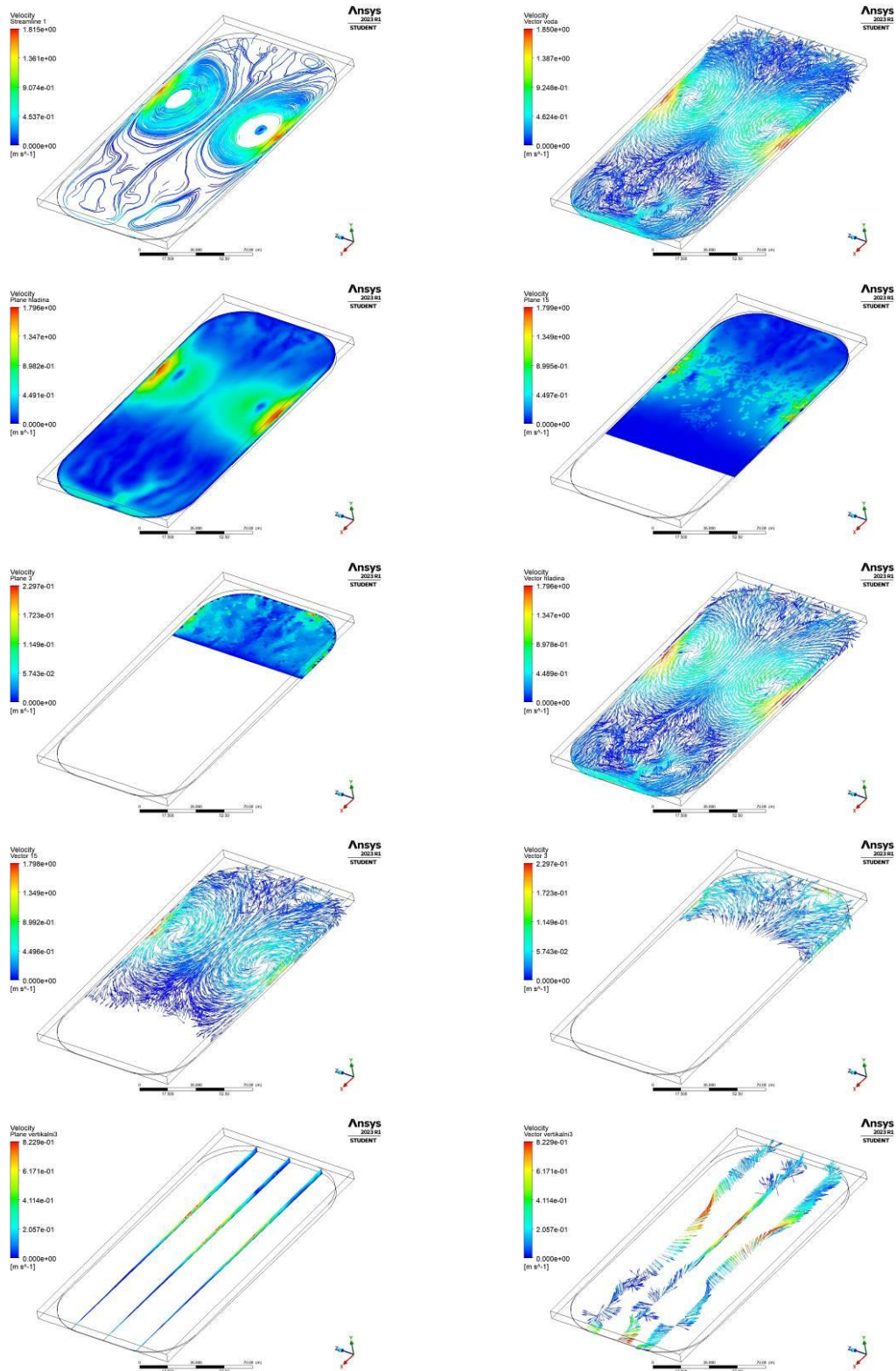
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr na mělčinu:



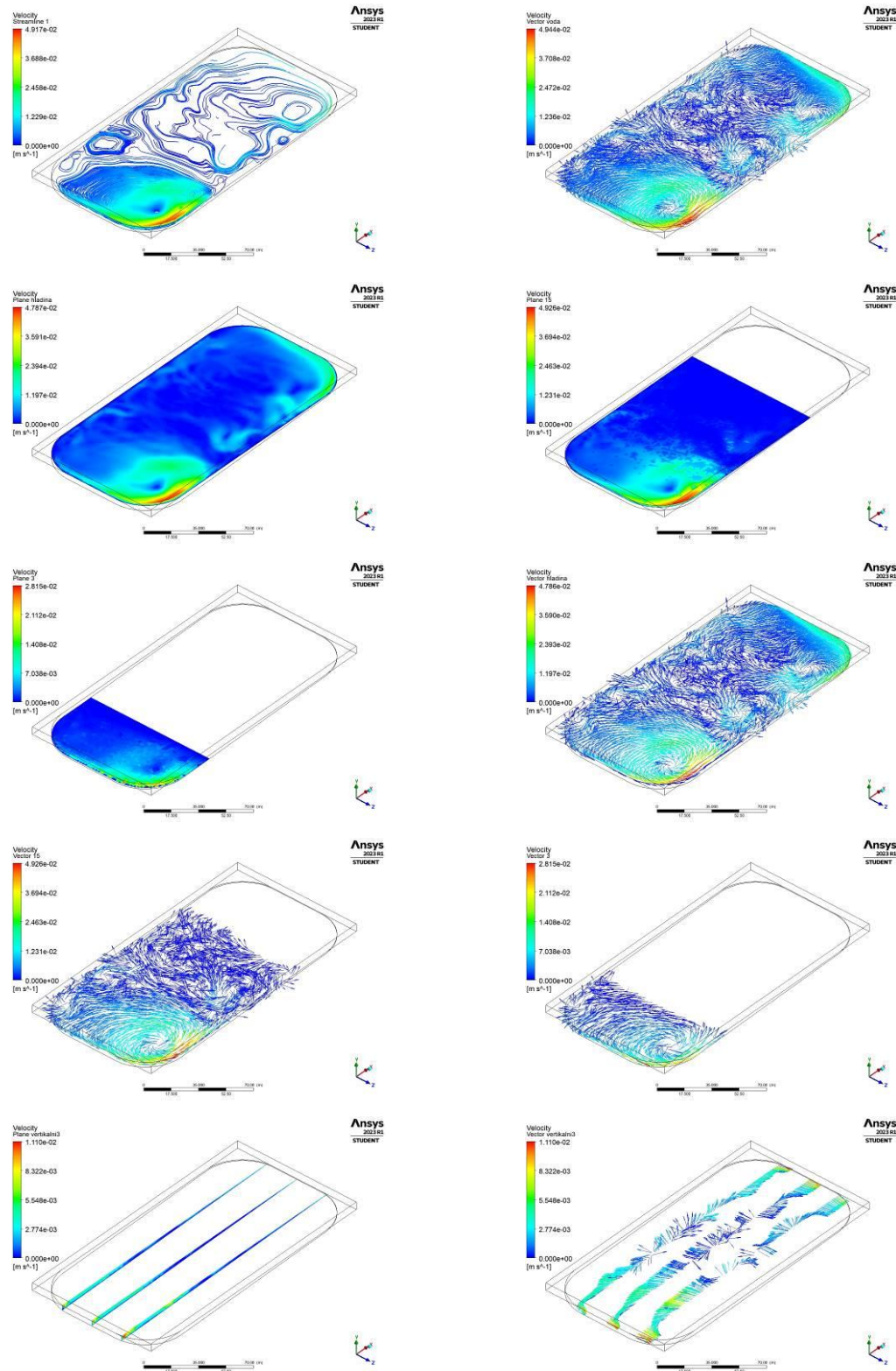
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru 8 m·s⁻¹ a směr na mělčinu:



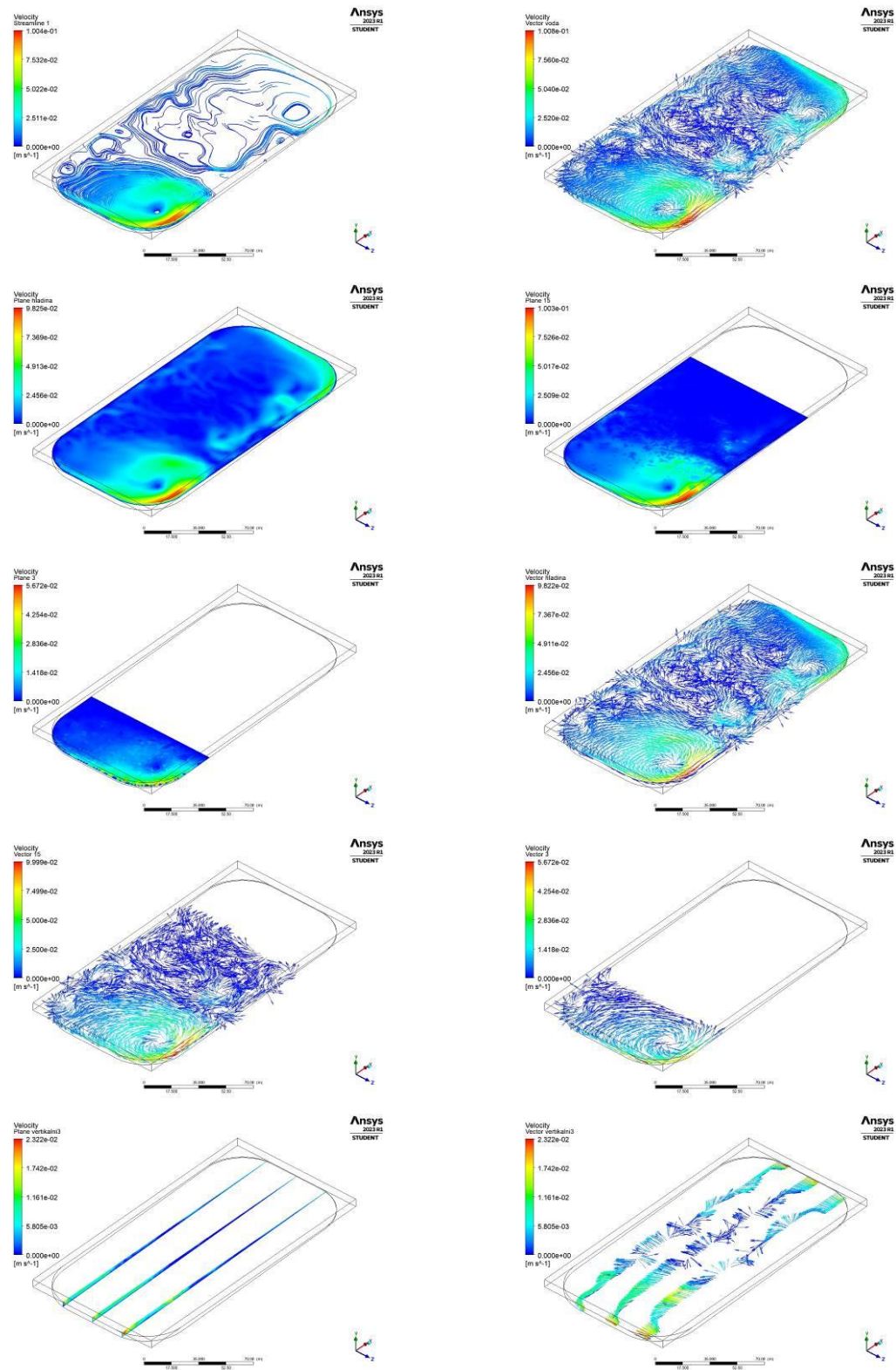
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr na mělčinu:



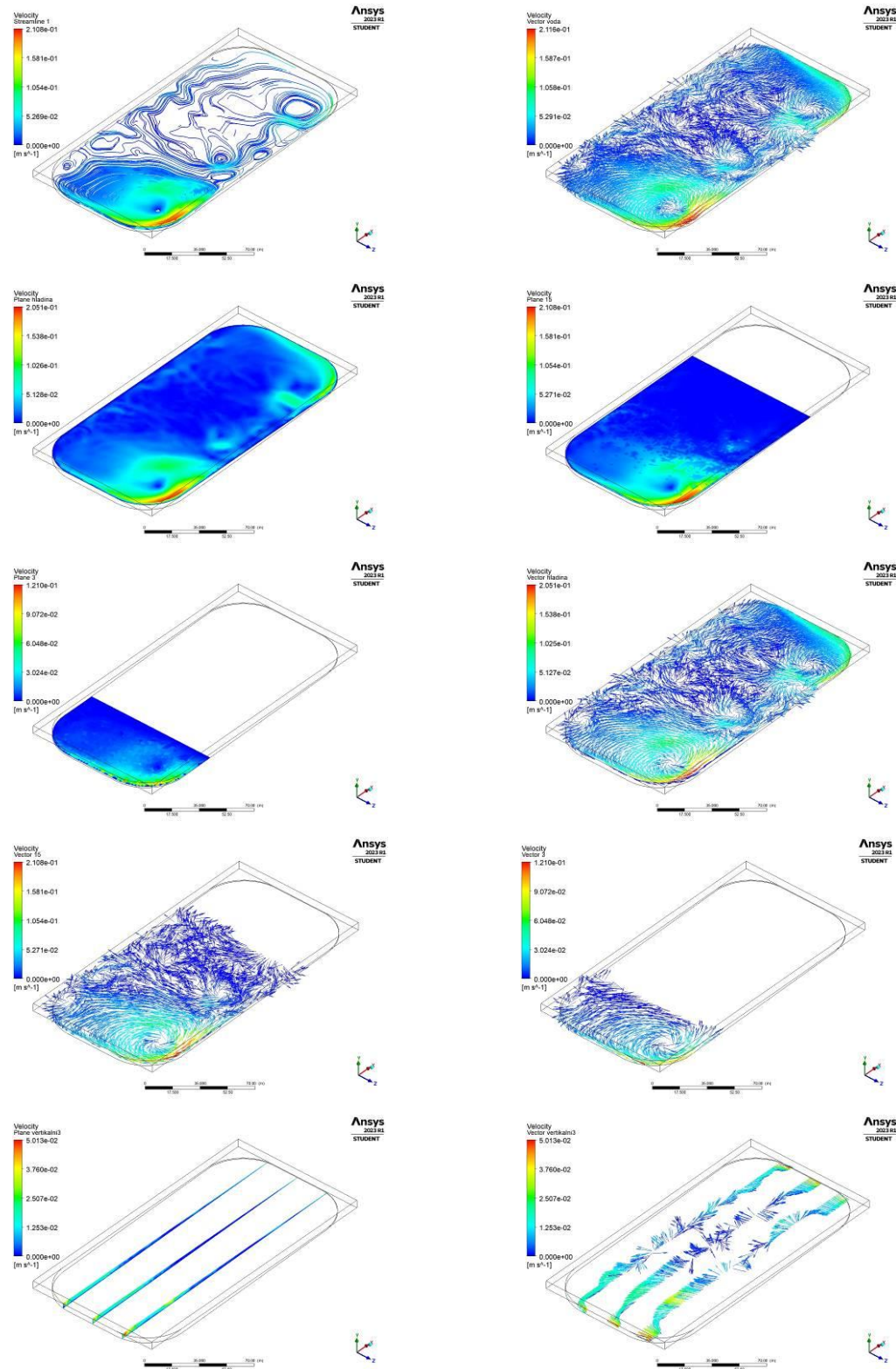
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



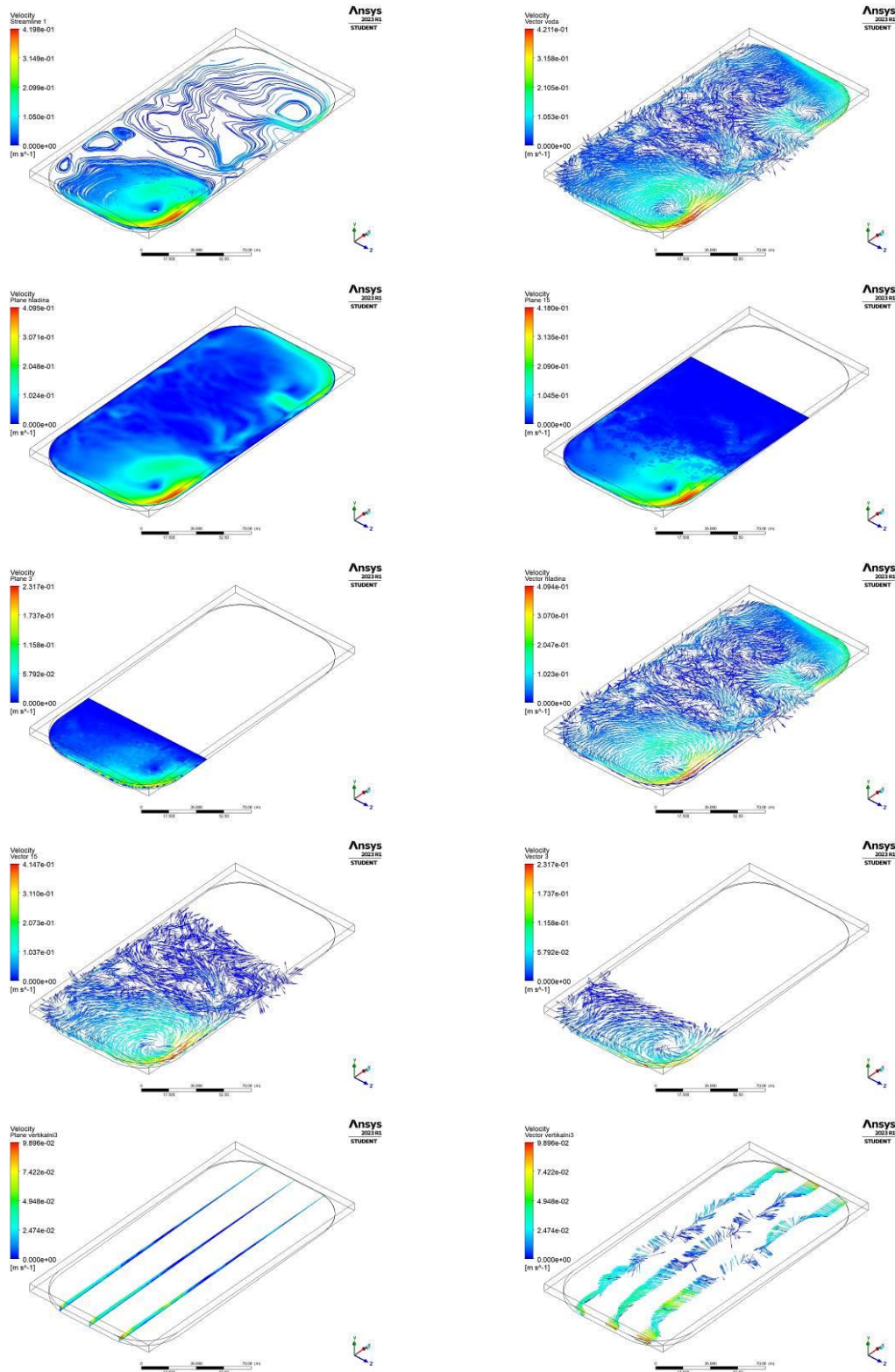
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



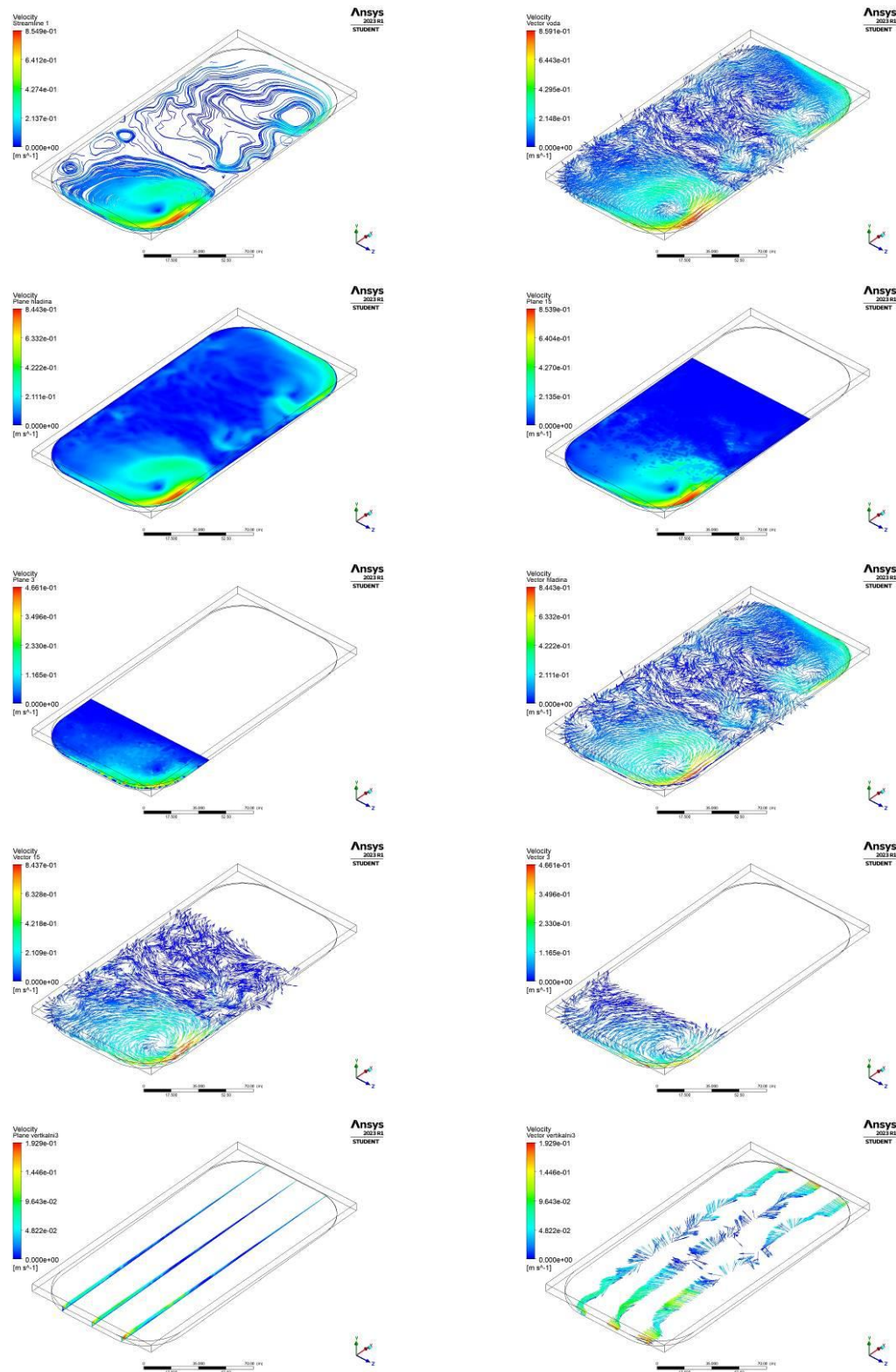
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



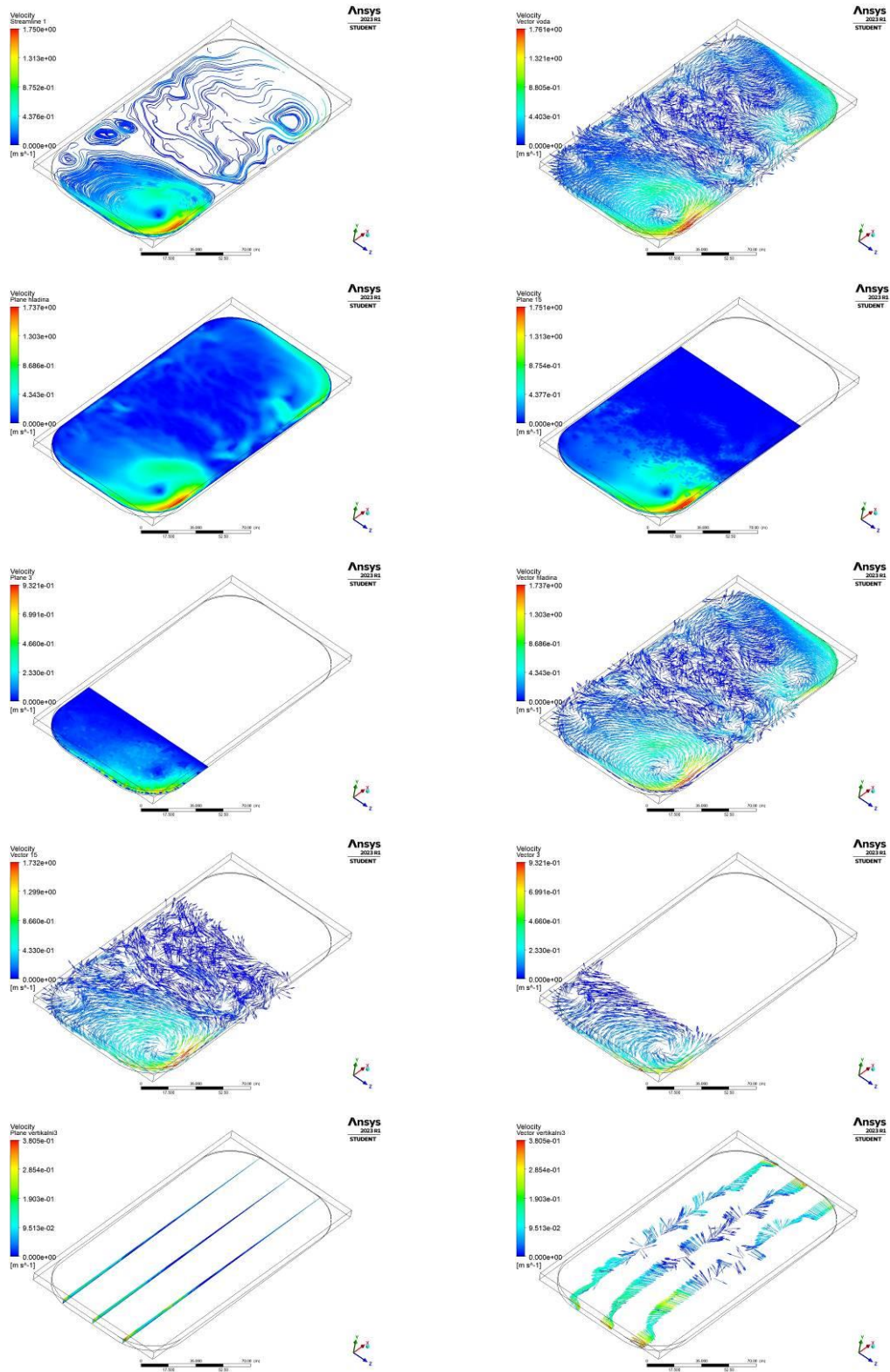
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



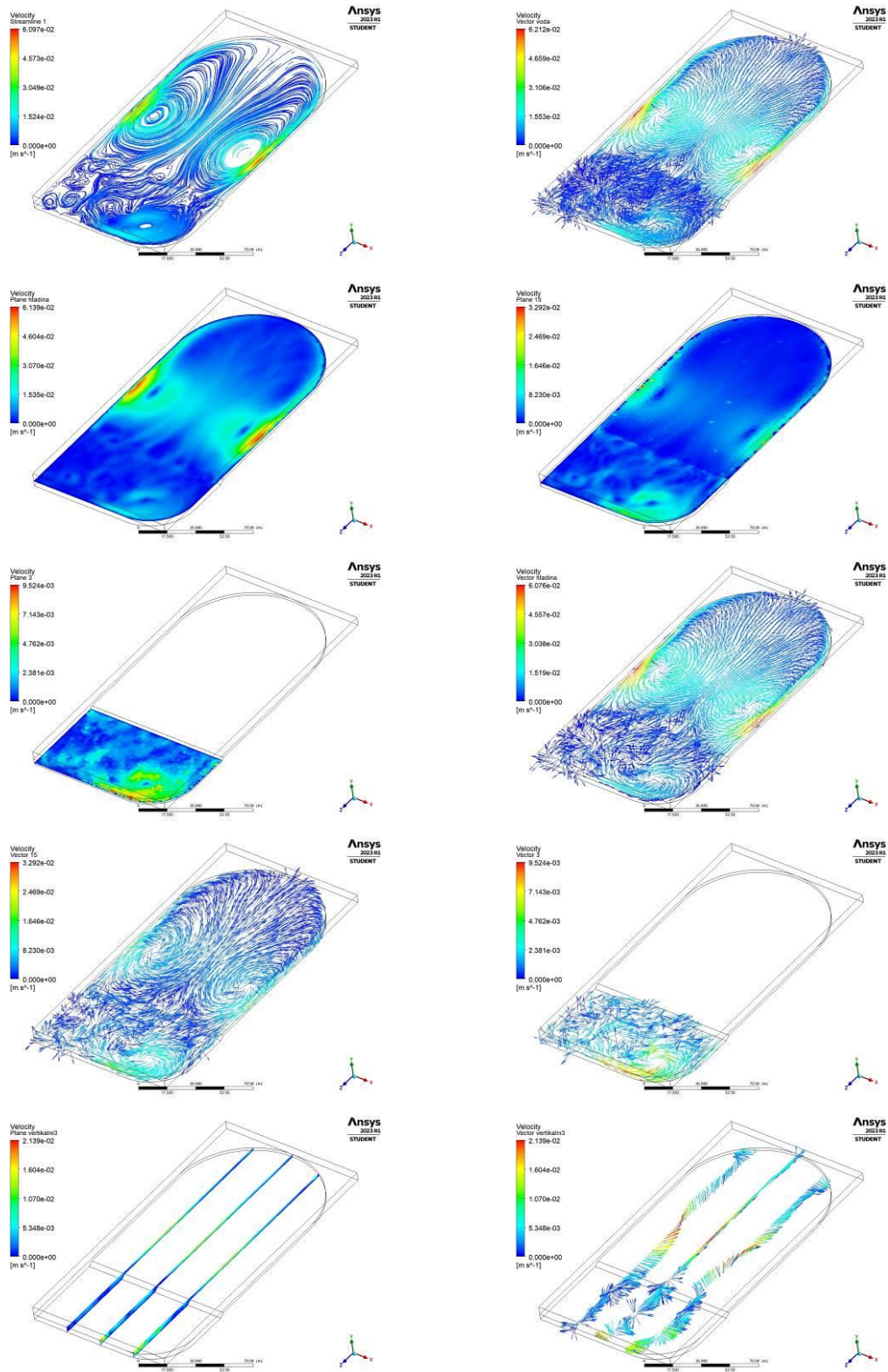
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



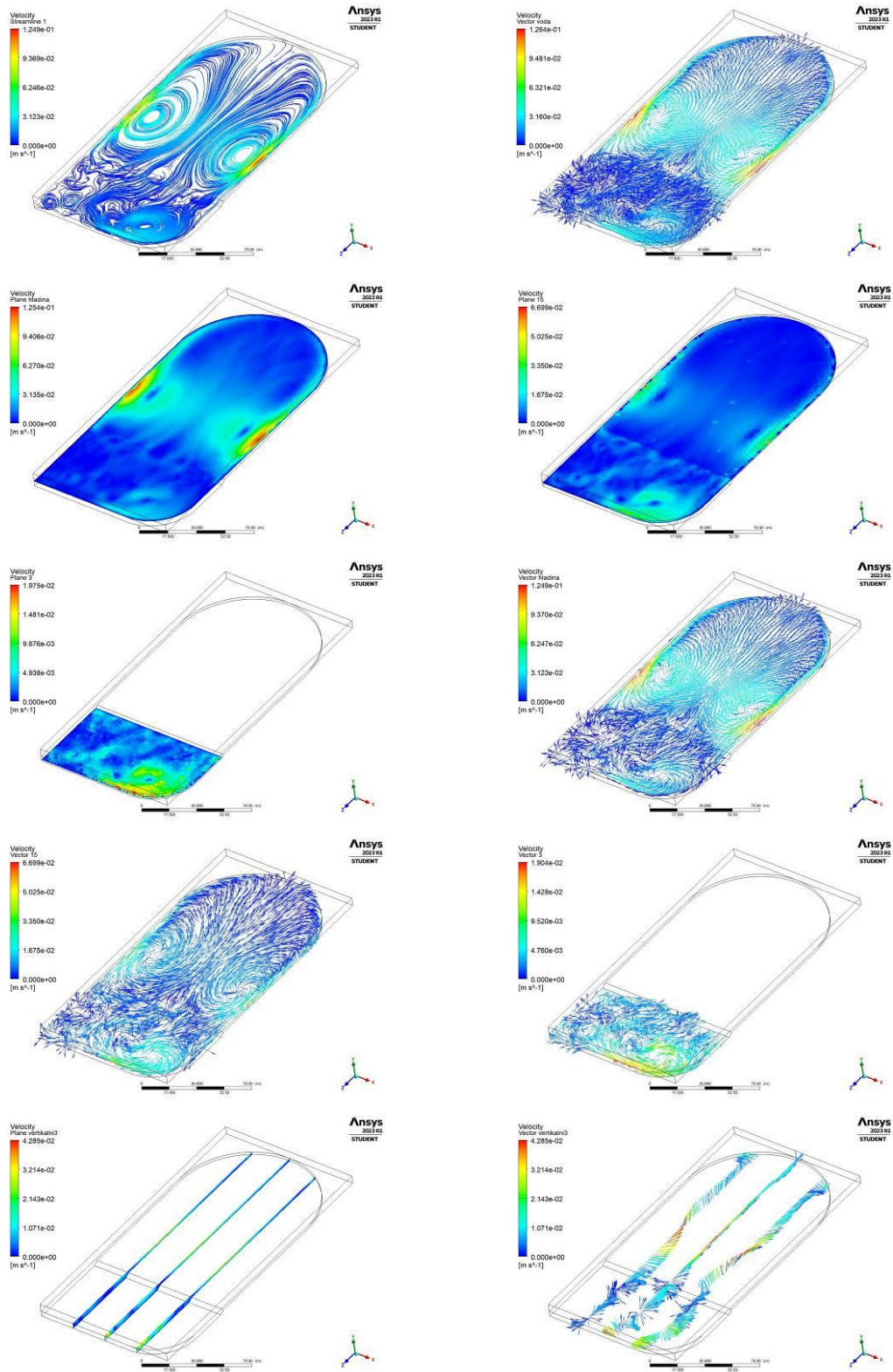
Model se zaoblenými hranami a nakloněným dnem (hloubka od 0,5 – 4 m), rychlost větru $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



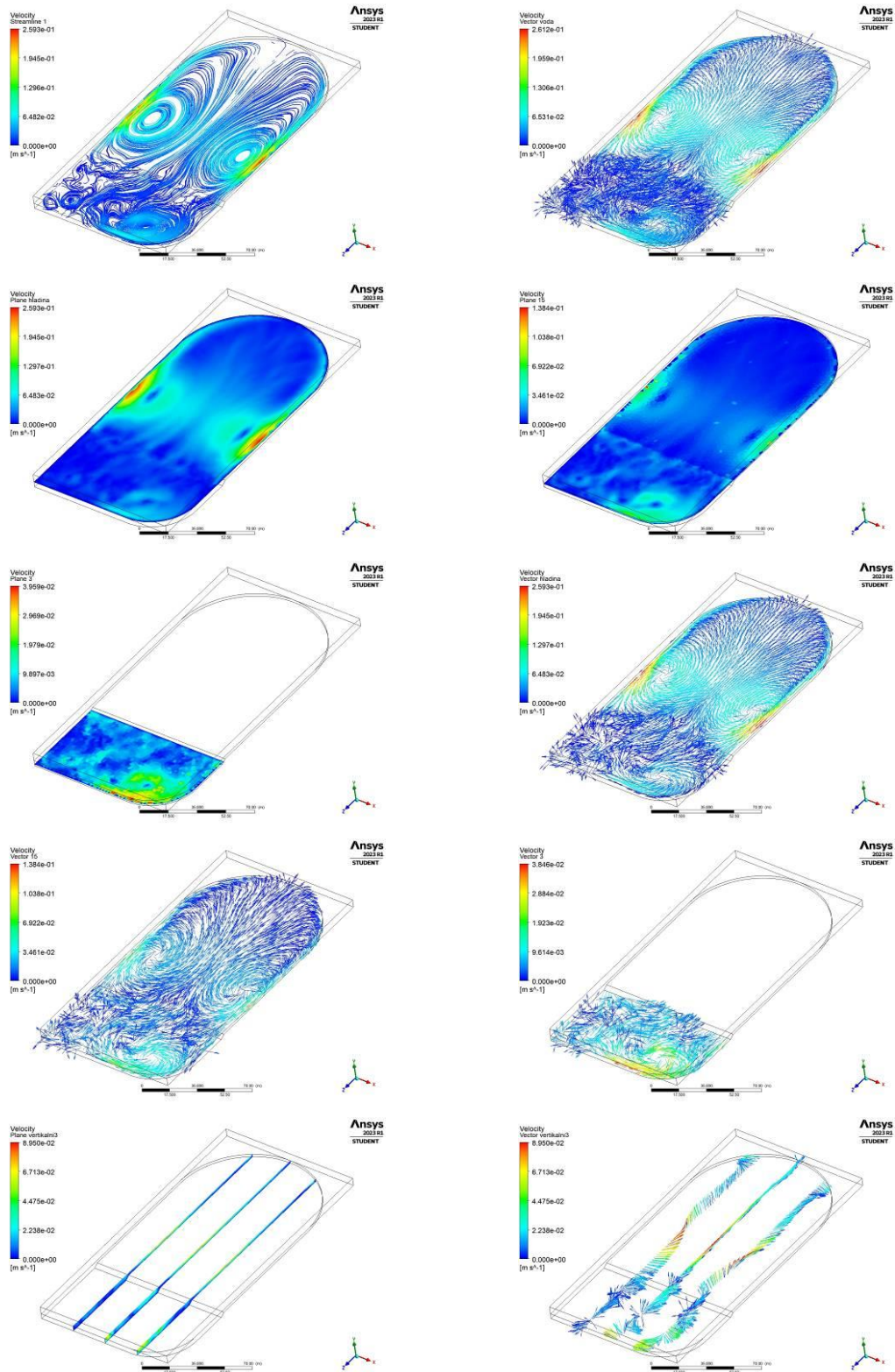
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 0,5 m·s⁻¹ a směr do prohlubně:



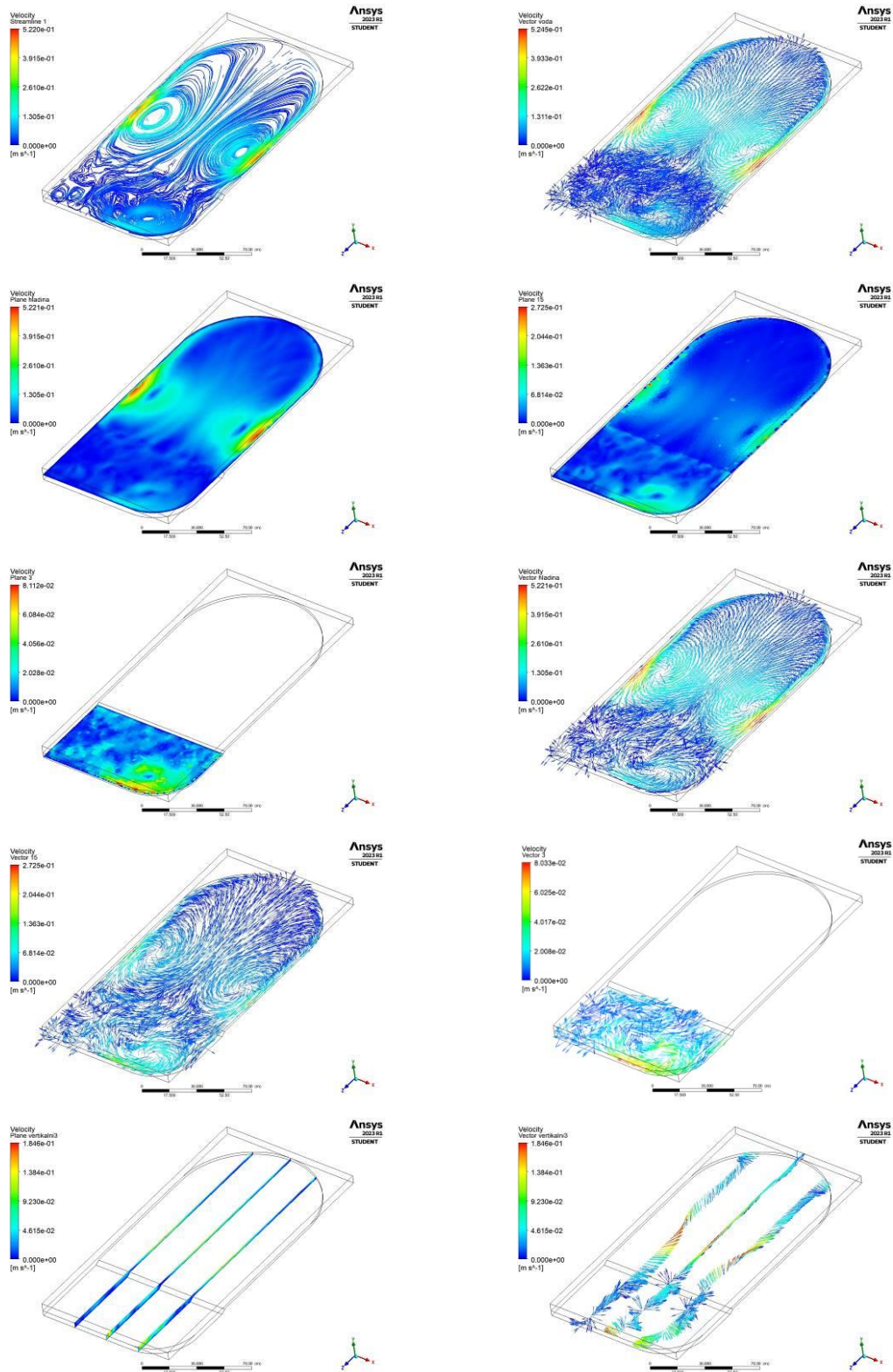
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr do prohlubně:



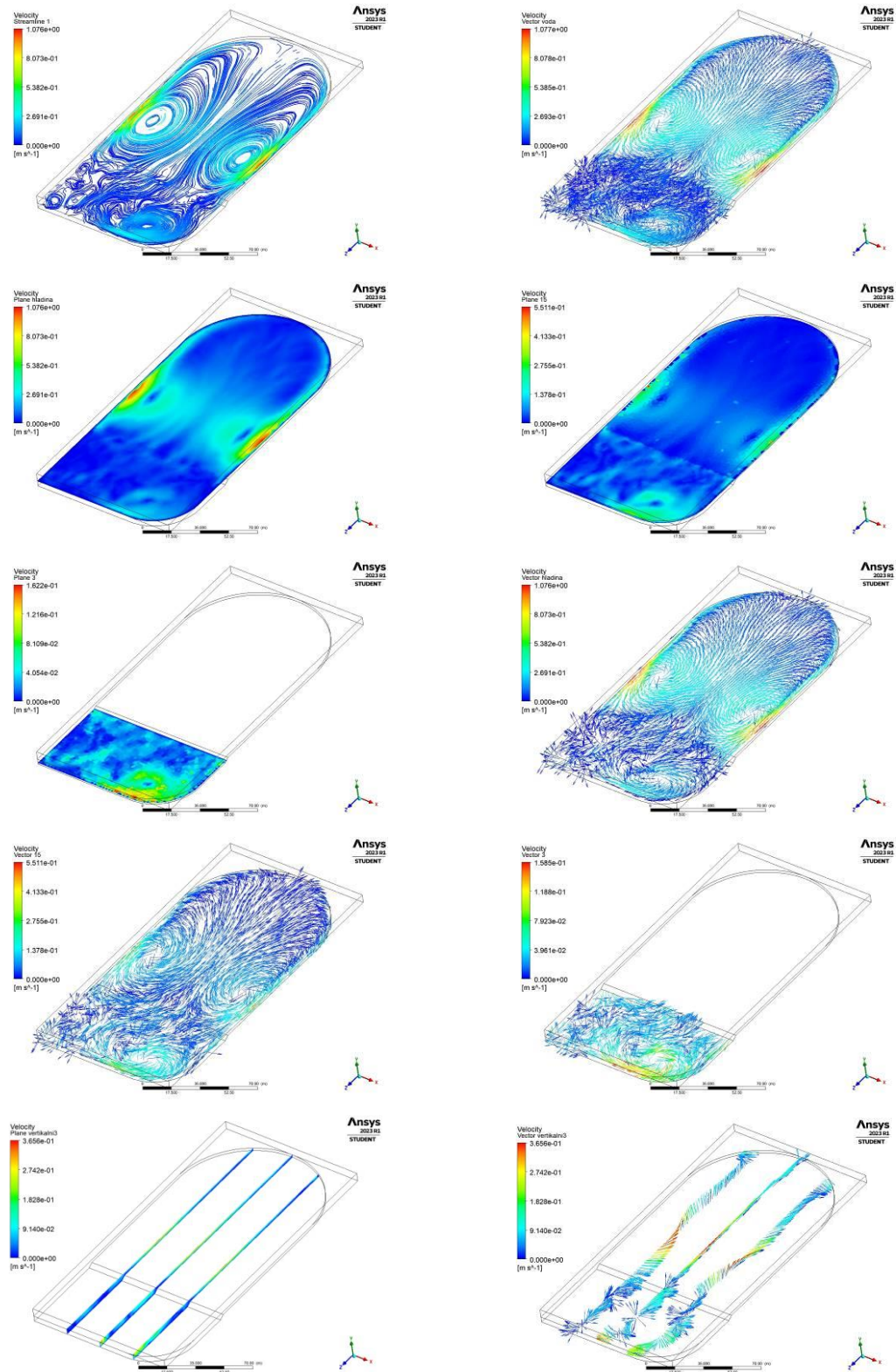
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr do prohlubně:



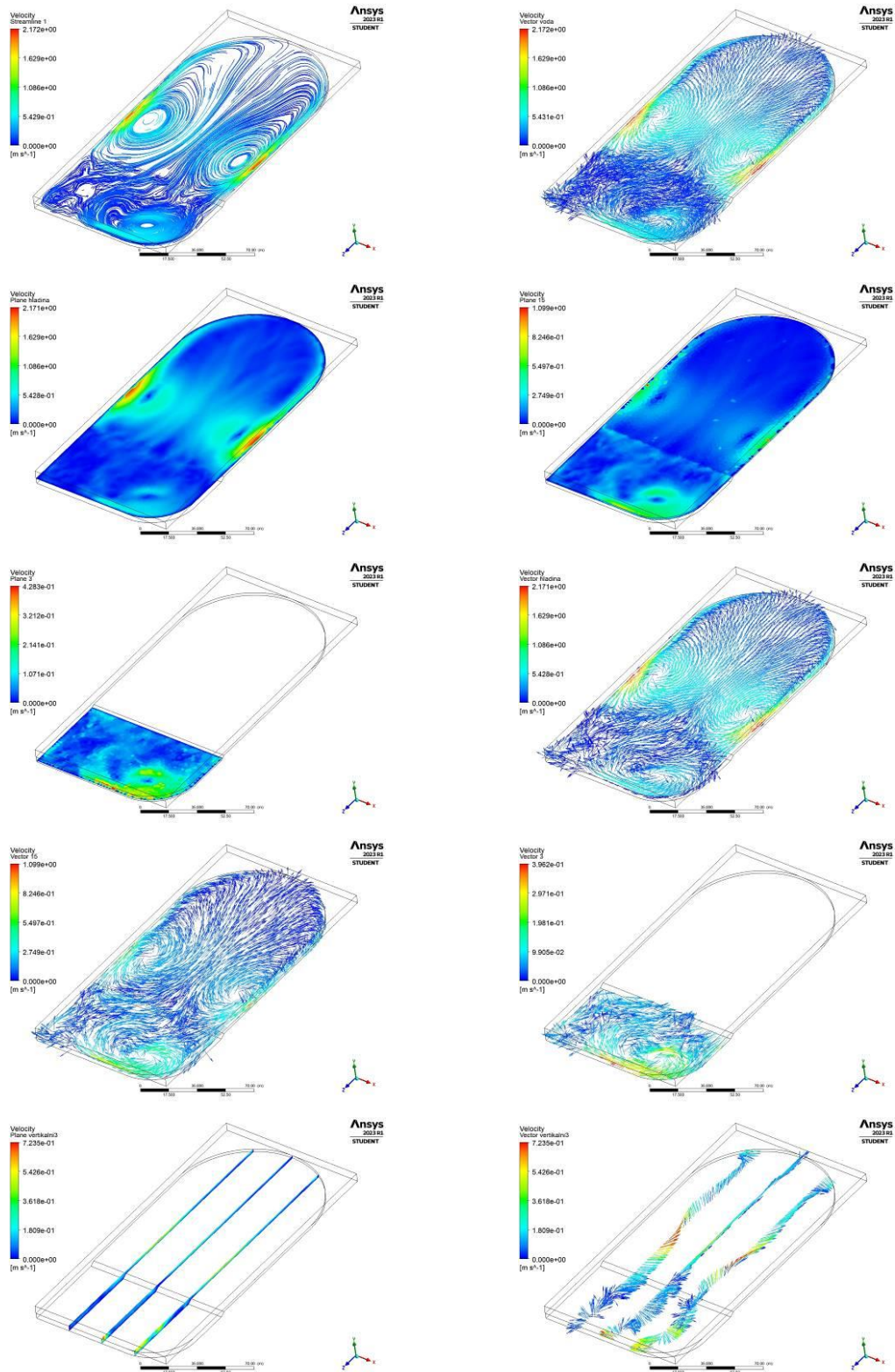
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 4 m·s⁻¹ a směr do prohlubně:



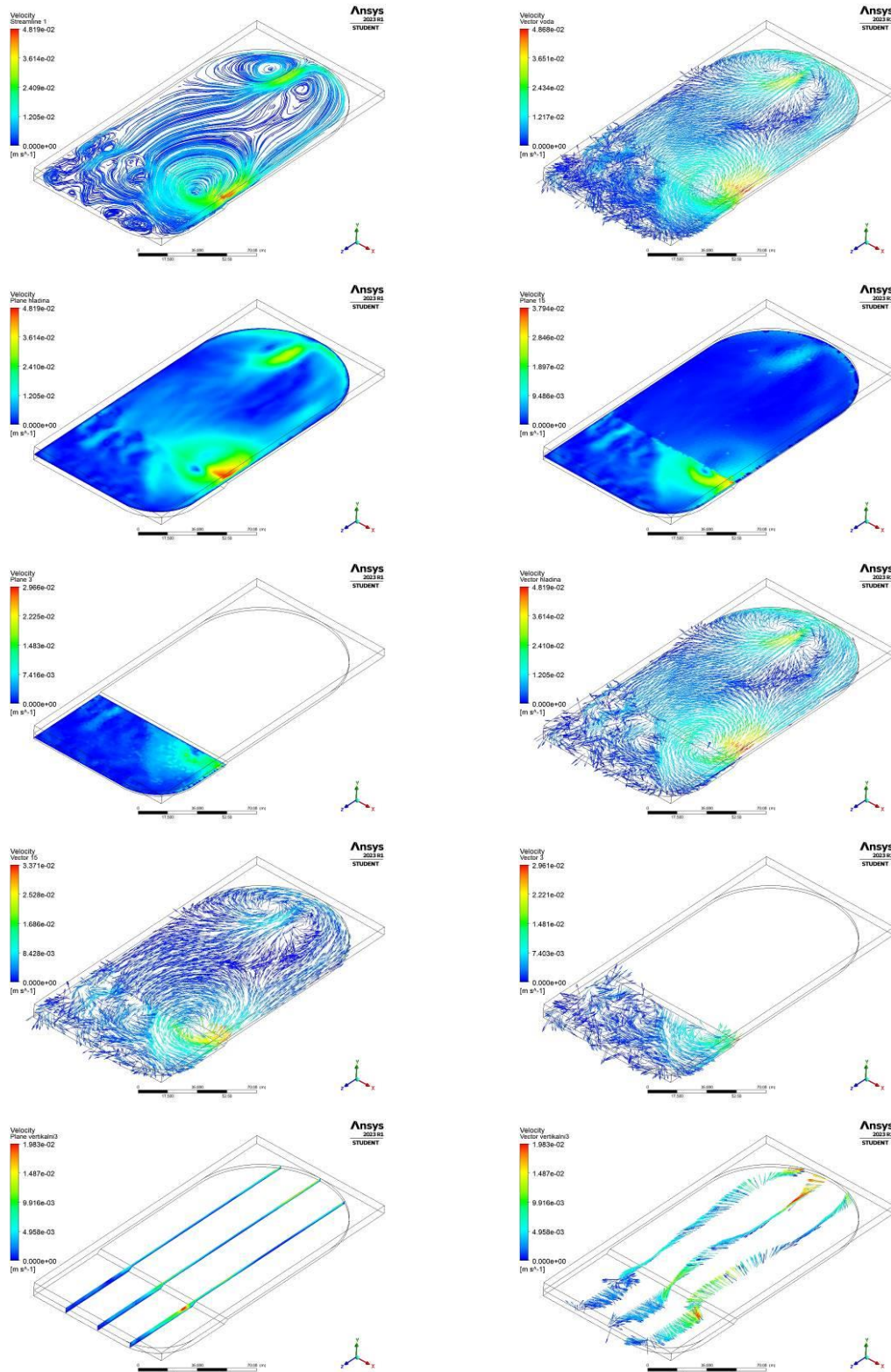
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 8 m·s⁻¹ a směr do prohlubně:



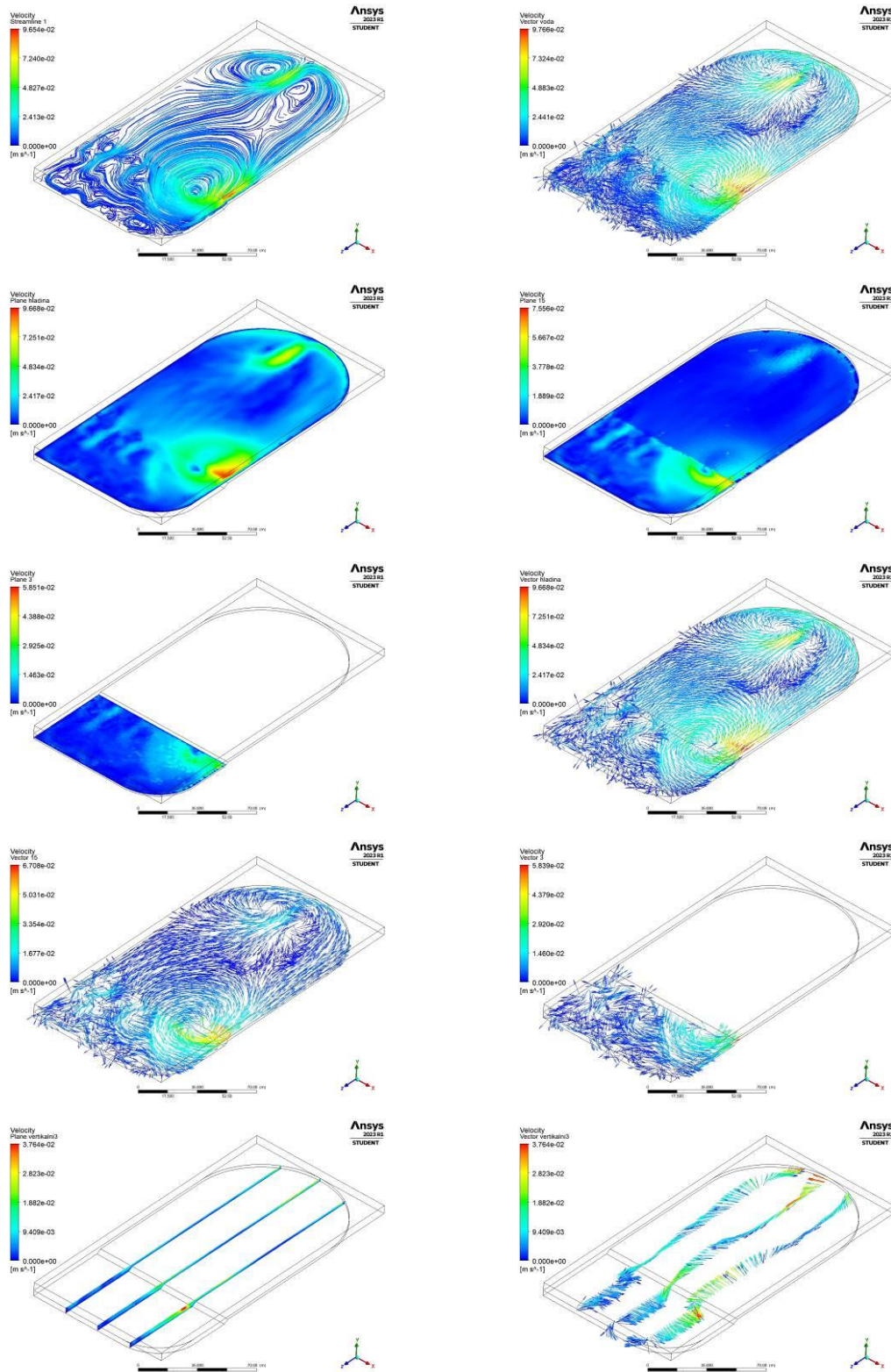
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 16 m·s⁻¹ a směr do prohlubně:



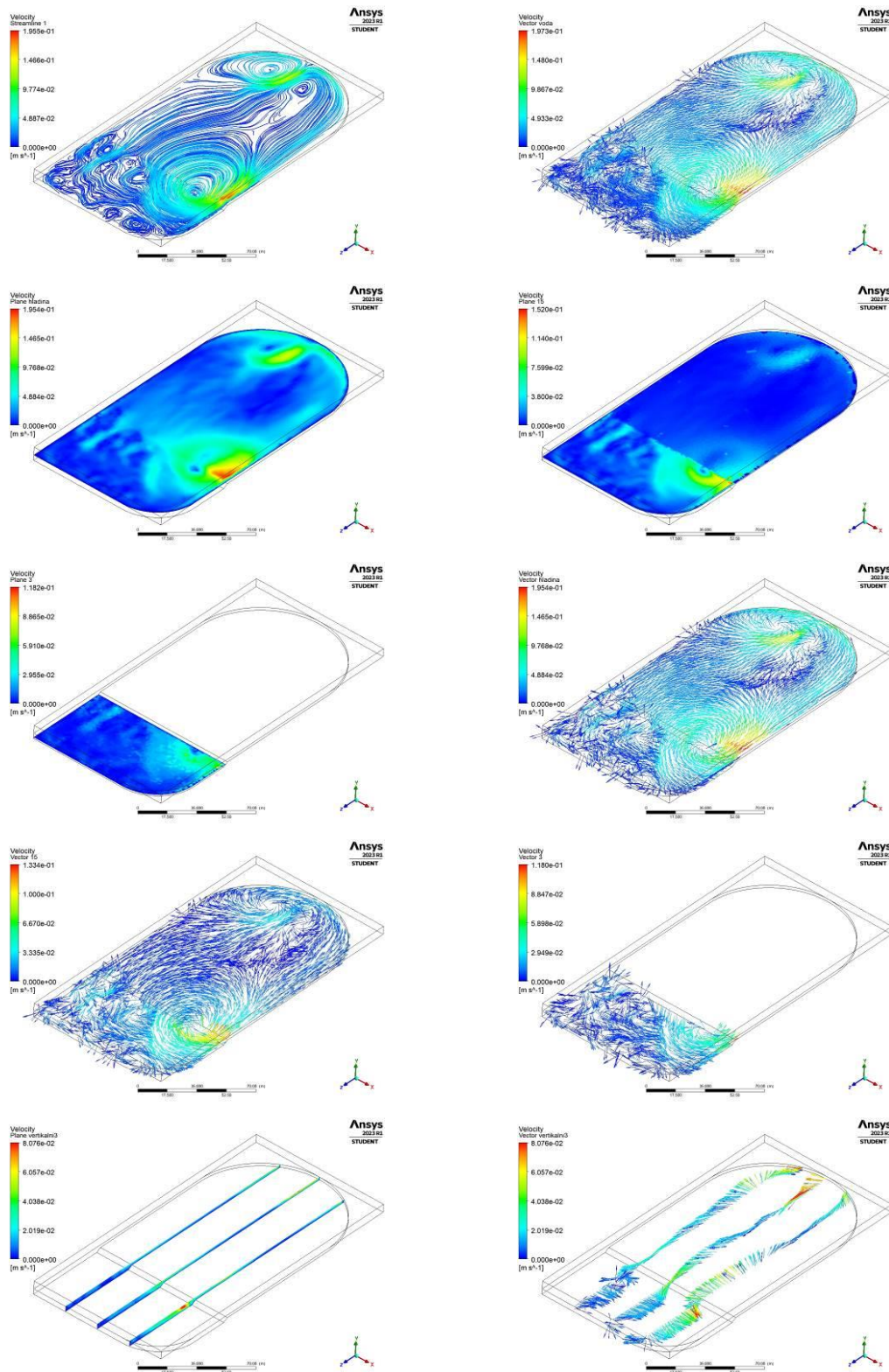
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr od prohlubně:



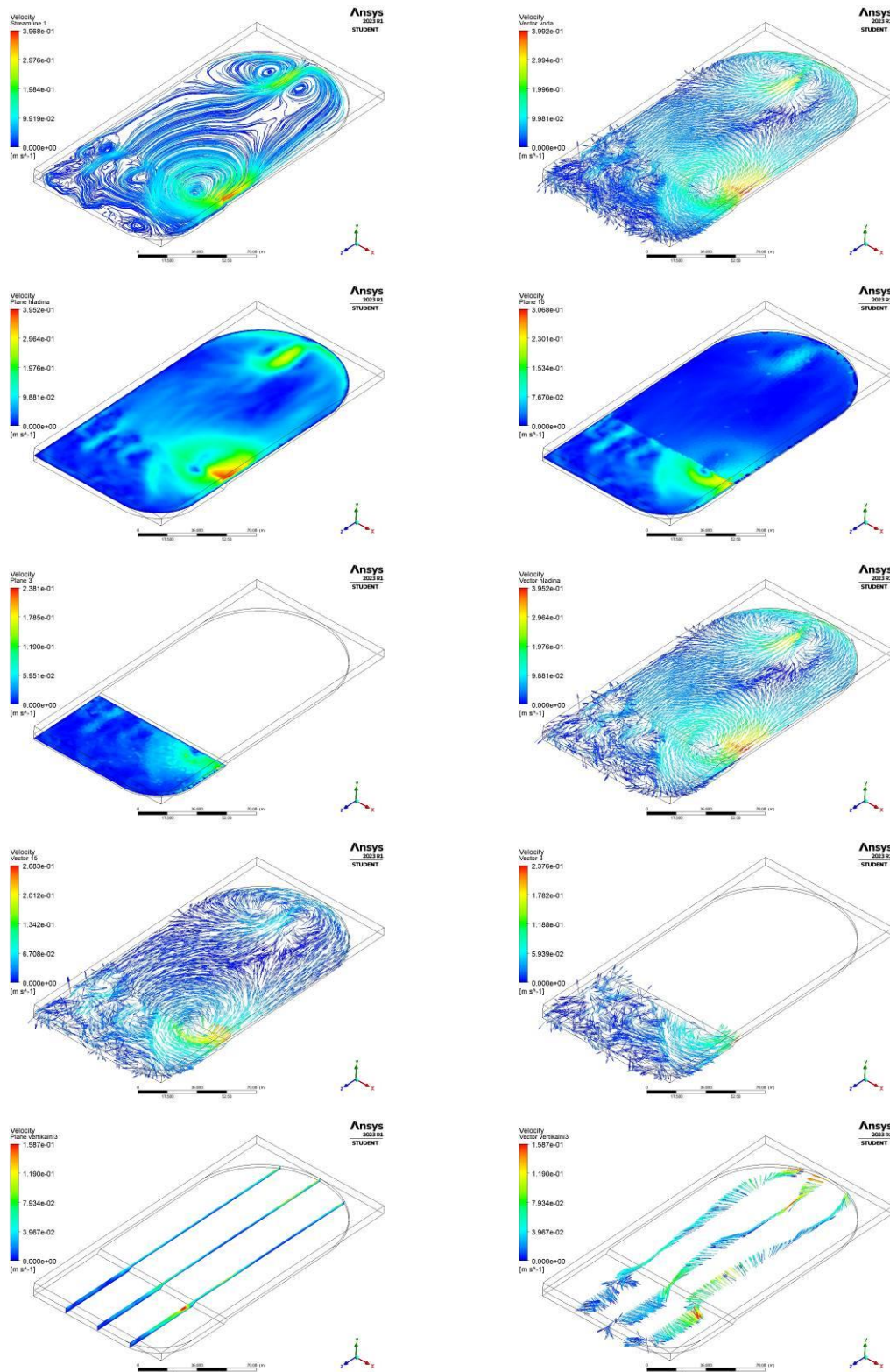
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 1 m·s⁻¹ a směr od prohlubně:



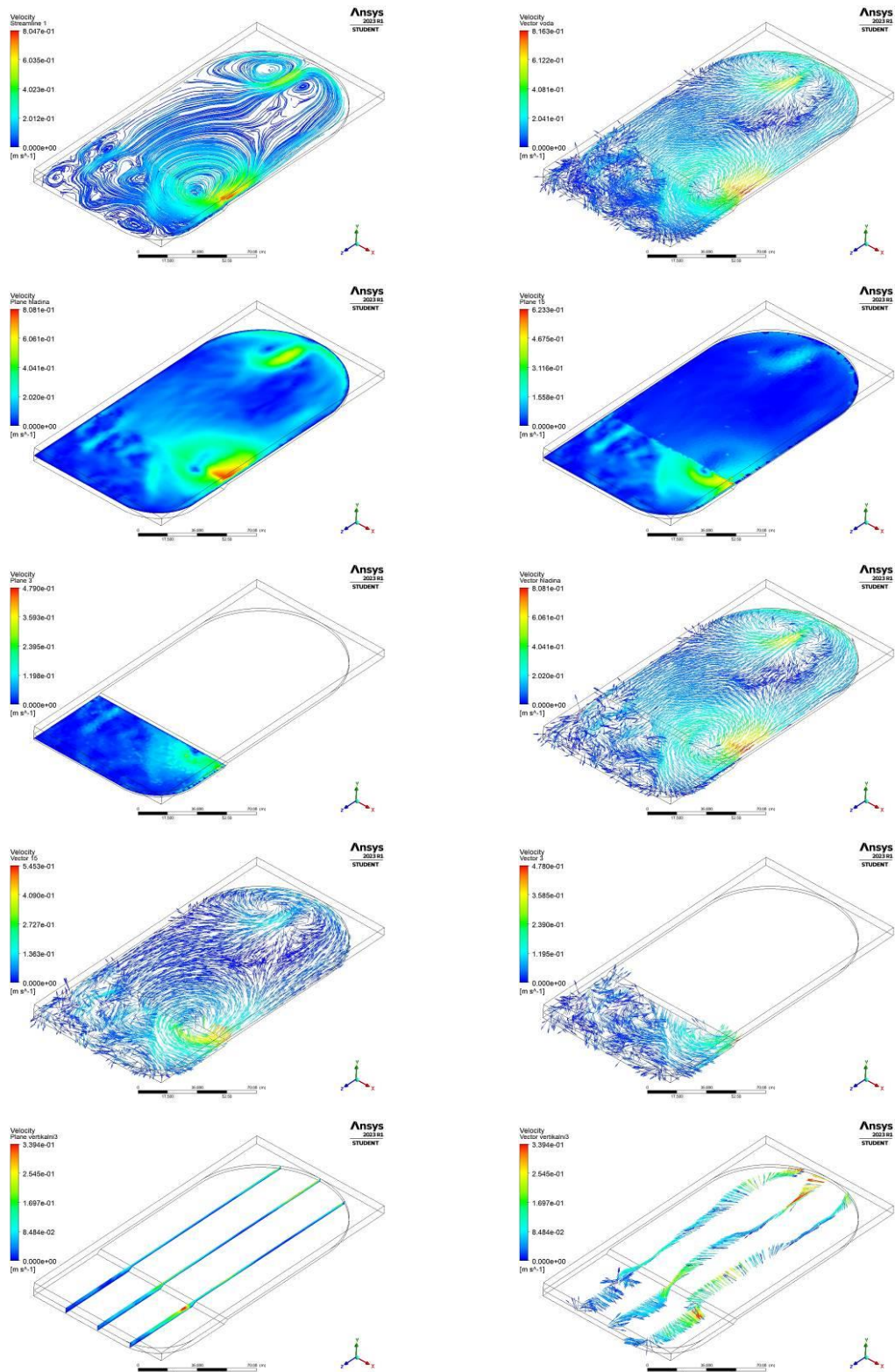
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr od prohlubně:



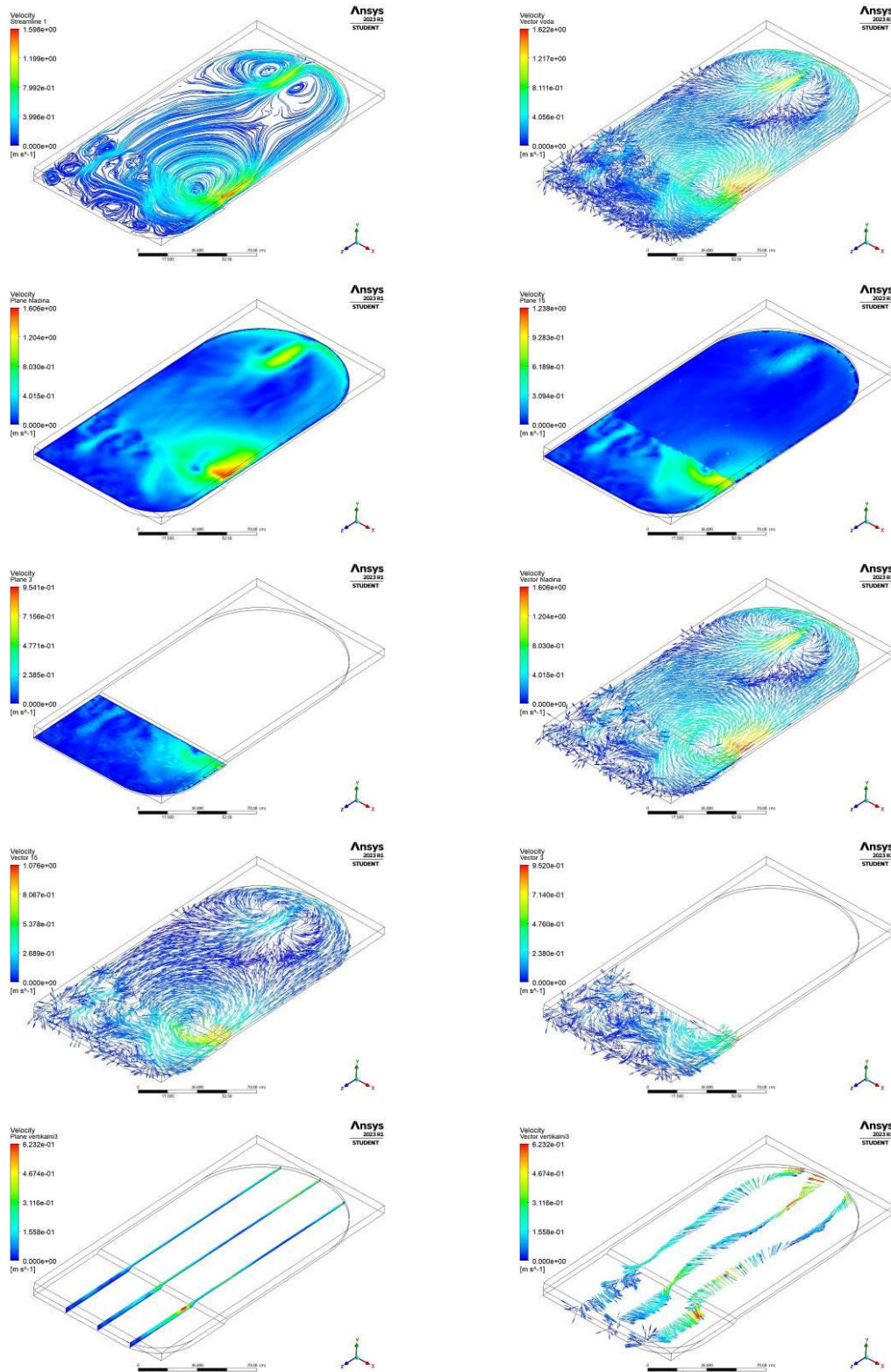
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 4 m·s⁻¹ a směr od prohlubně:



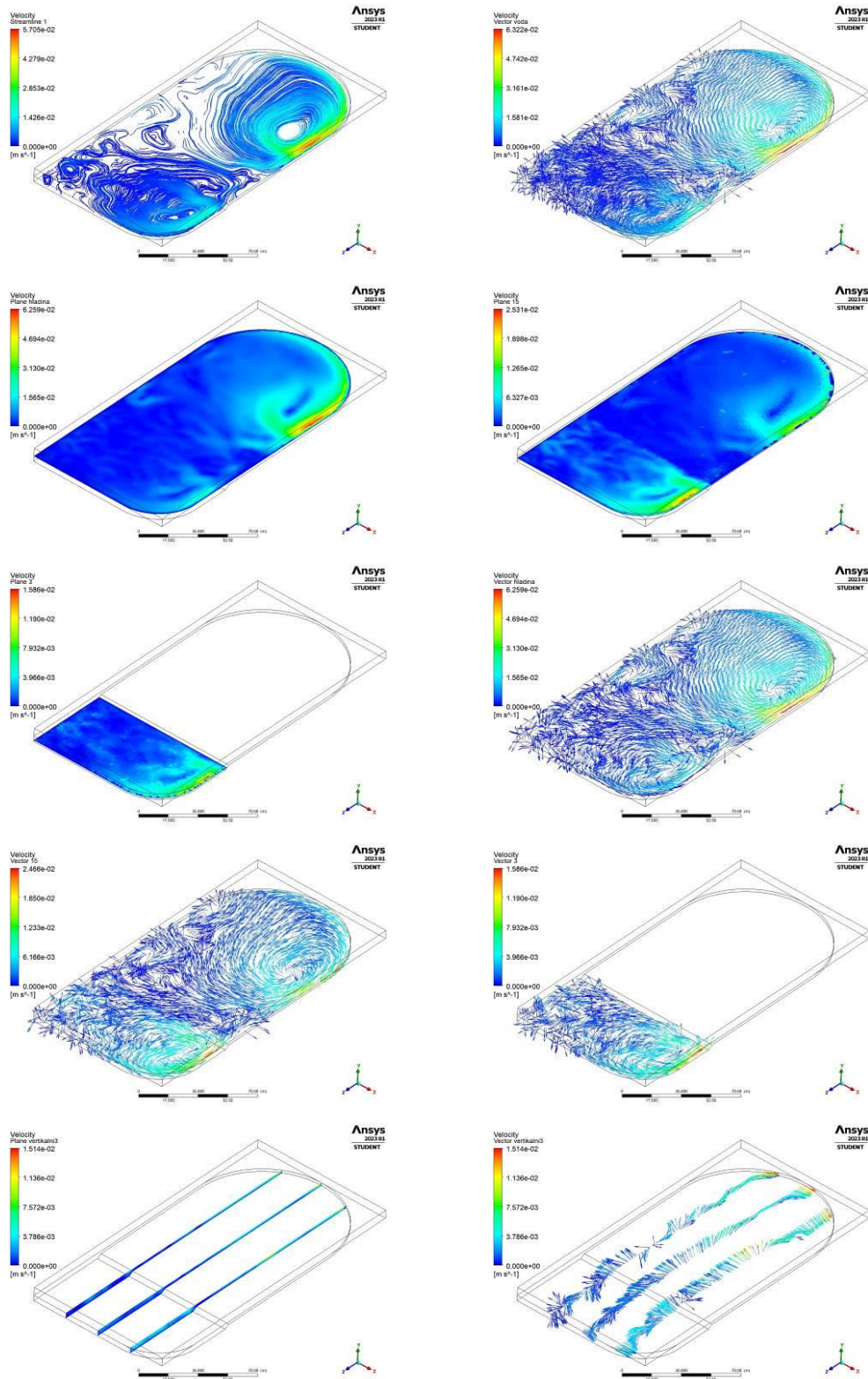
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 8 m·s⁻¹ a směr od prohlubně:



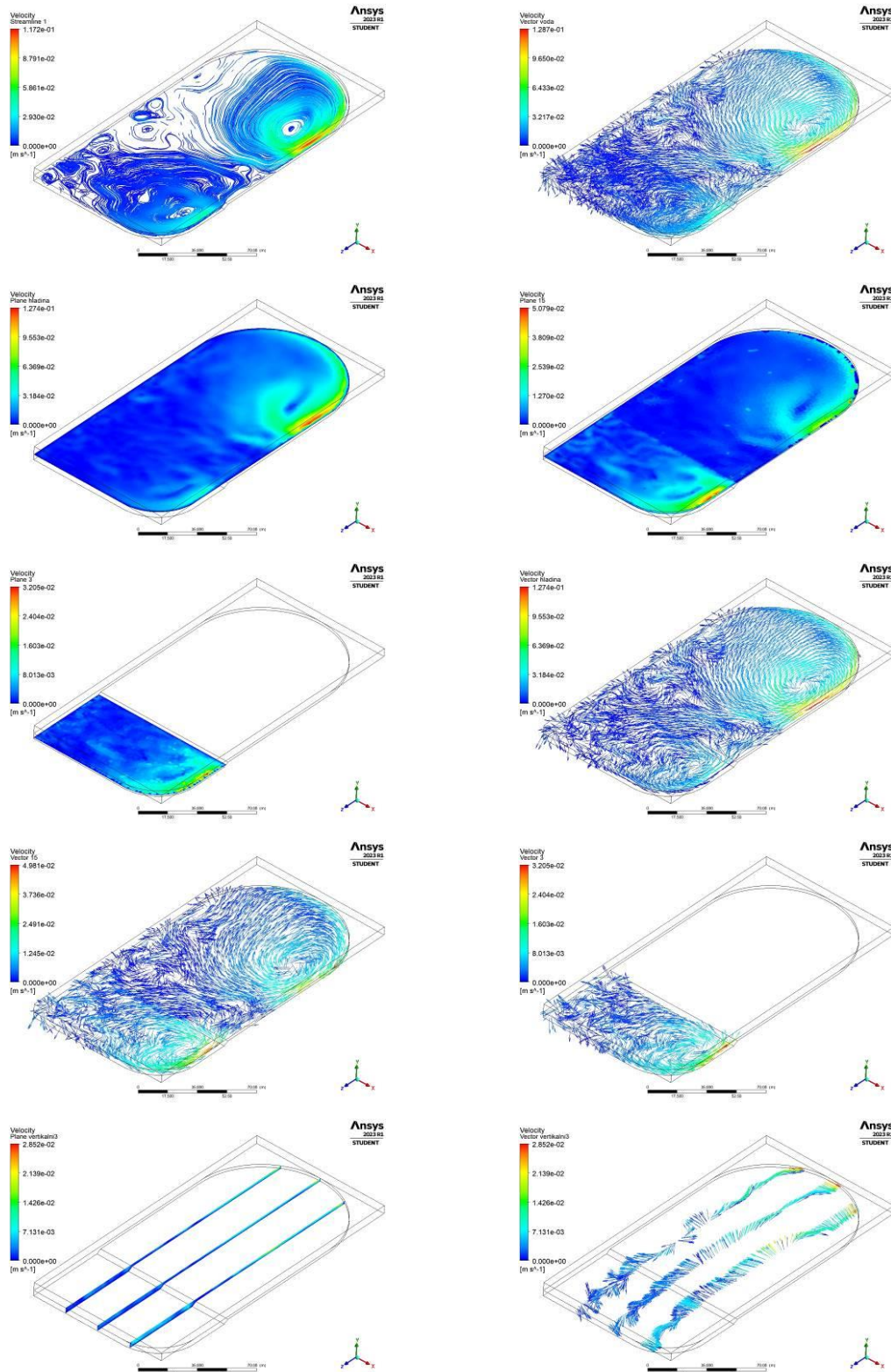
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 16 m·s⁻¹ a směr od prohlubně:



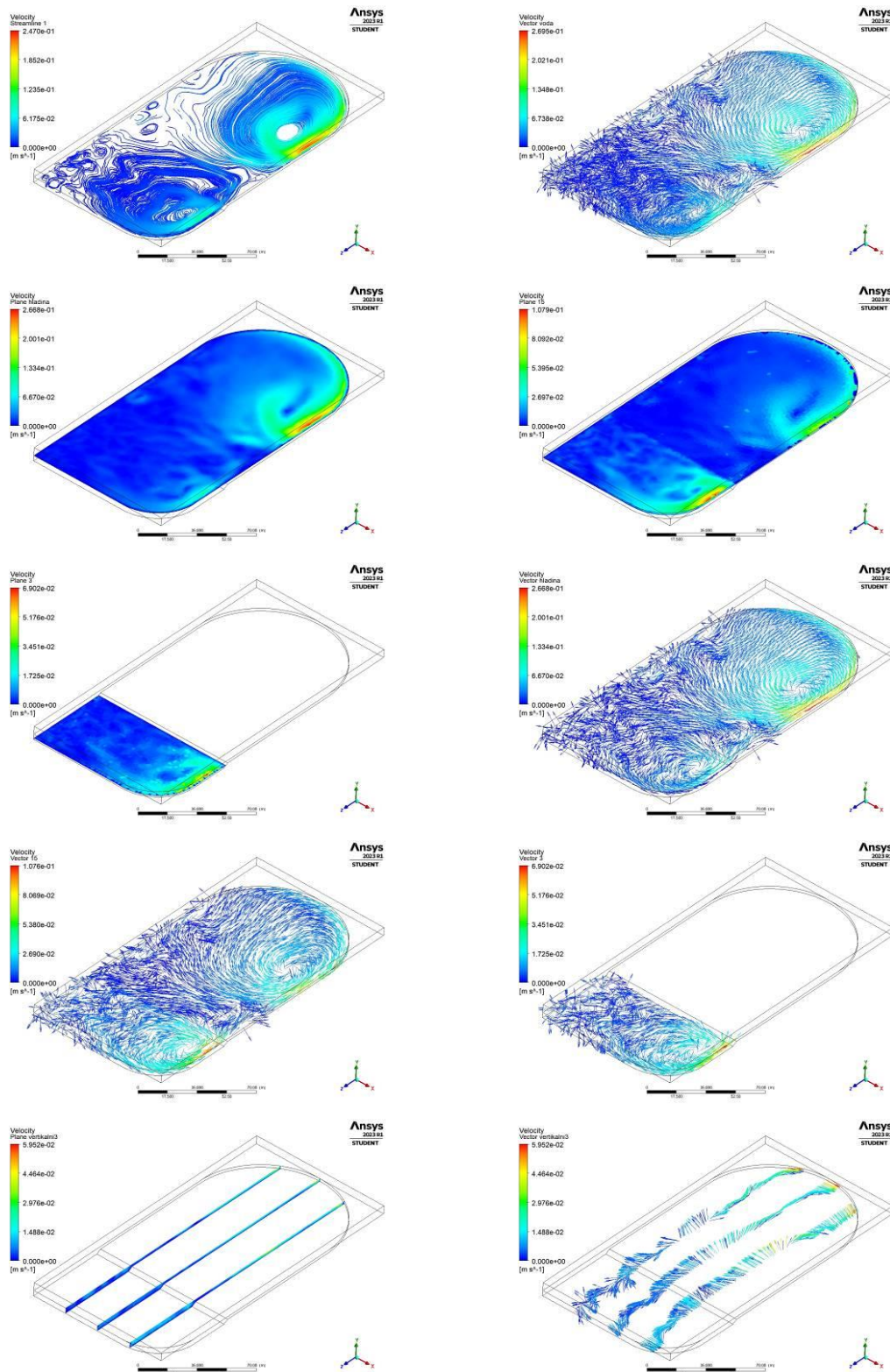
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



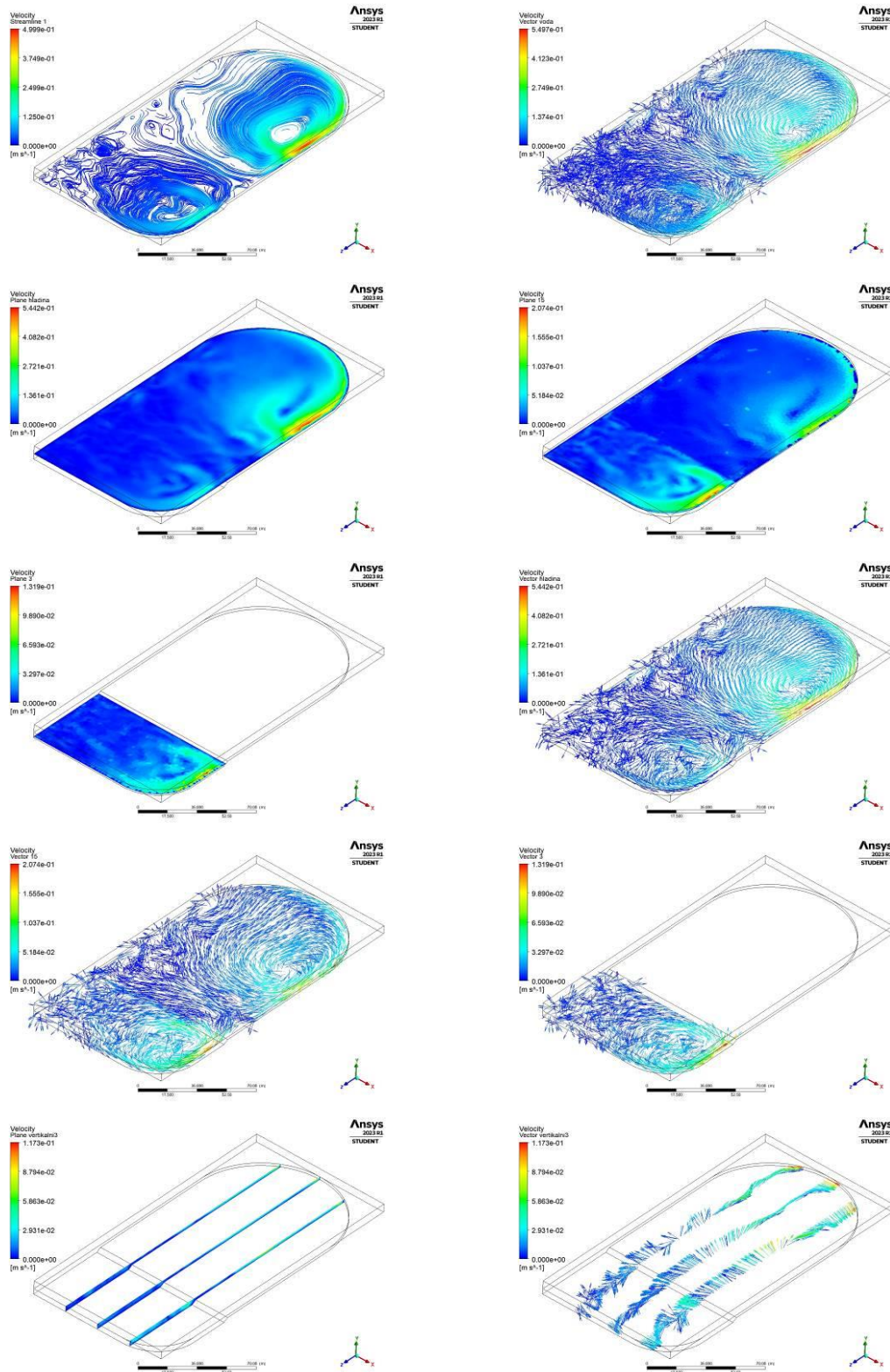
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



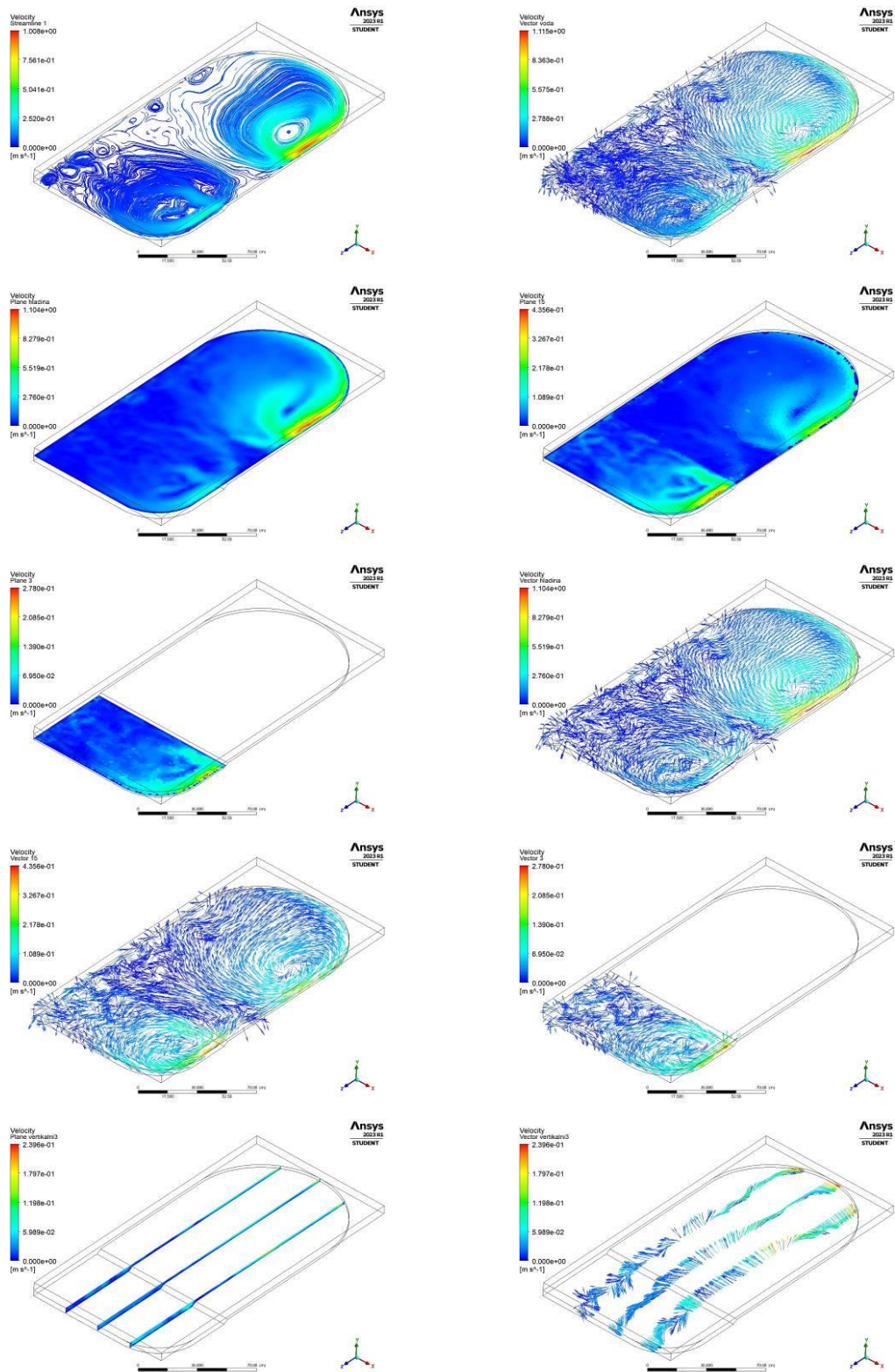
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



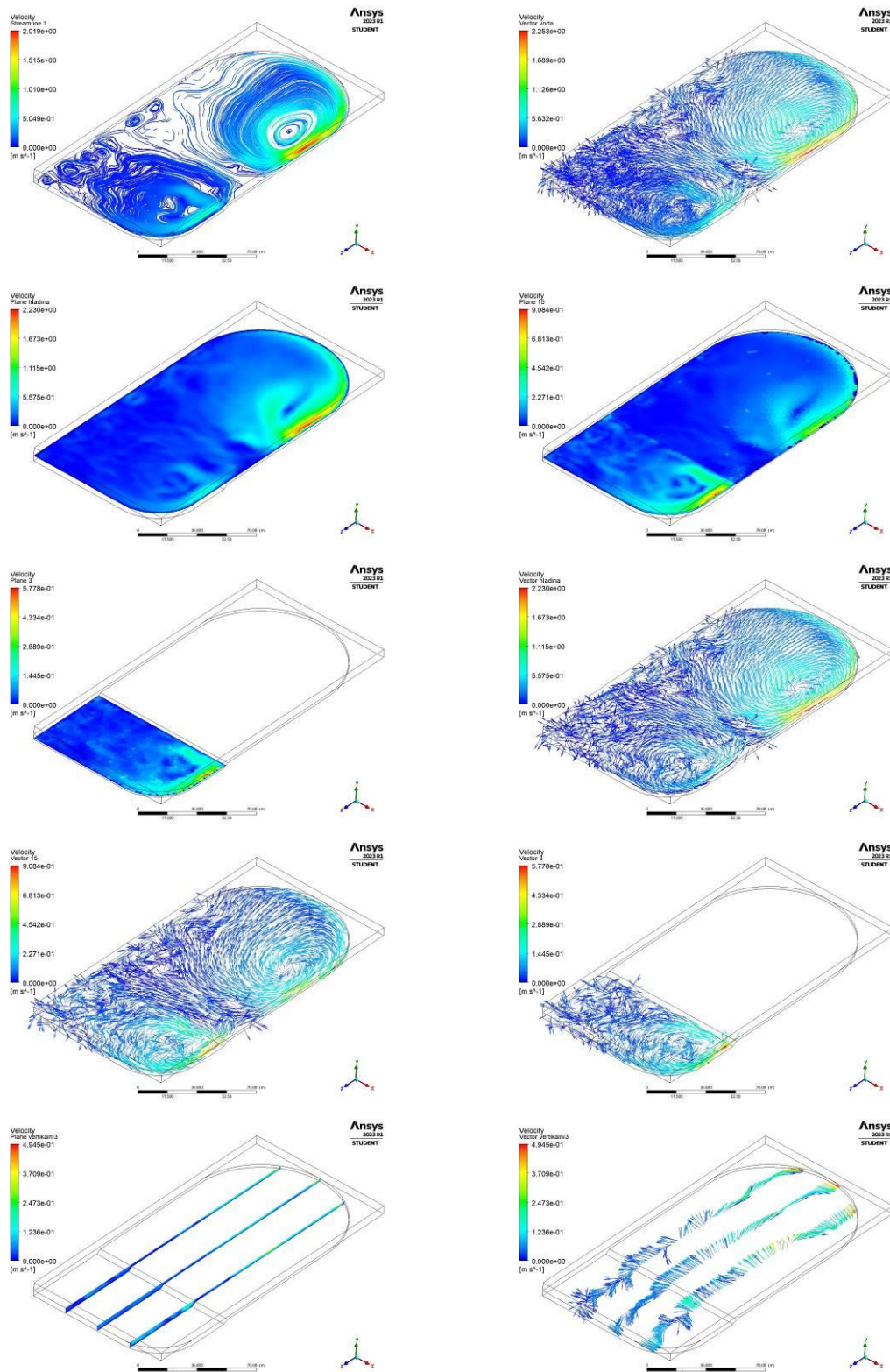
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z levé strany:



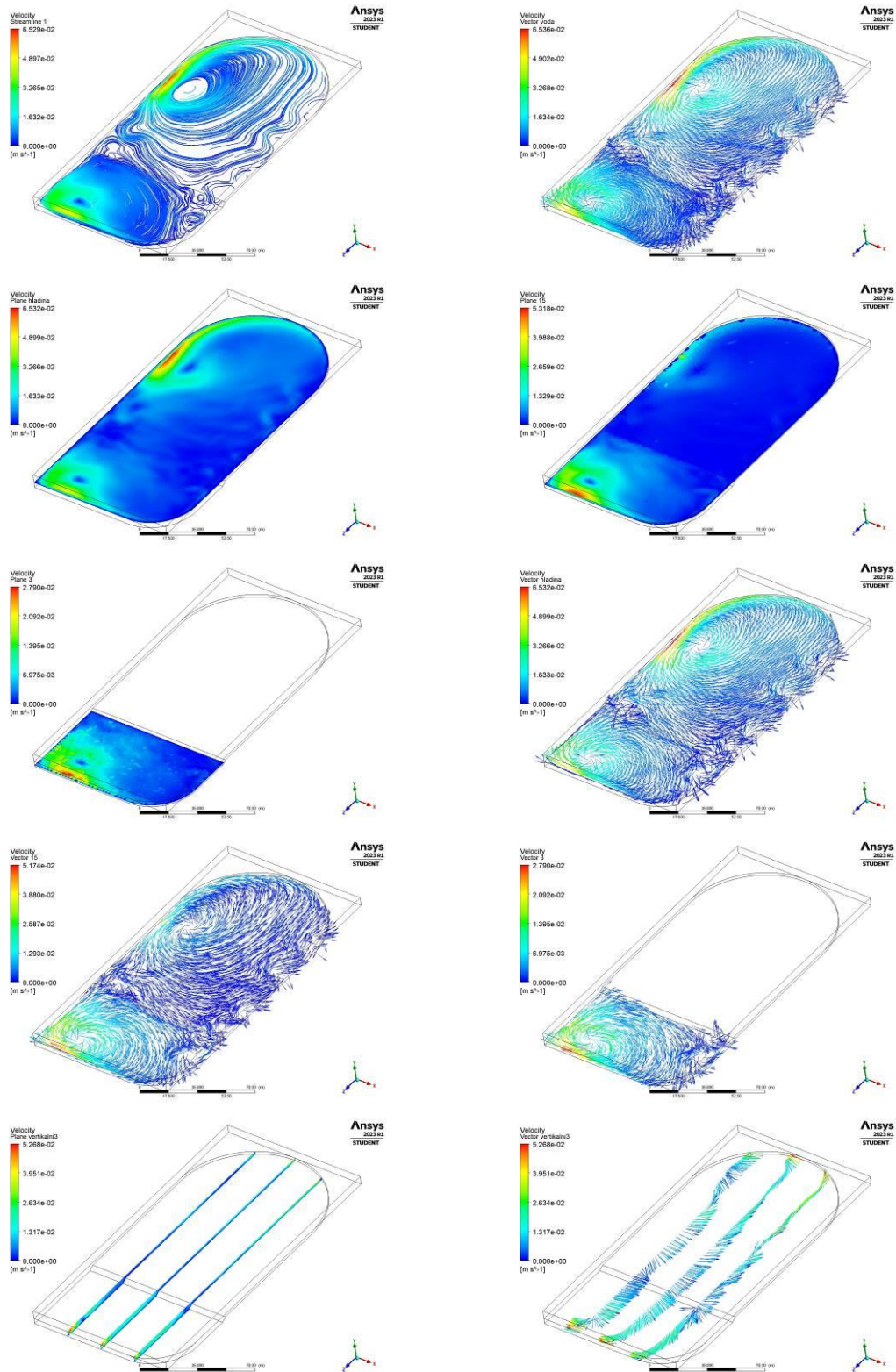
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 8 m·s⁻¹ a směr z levé strany:



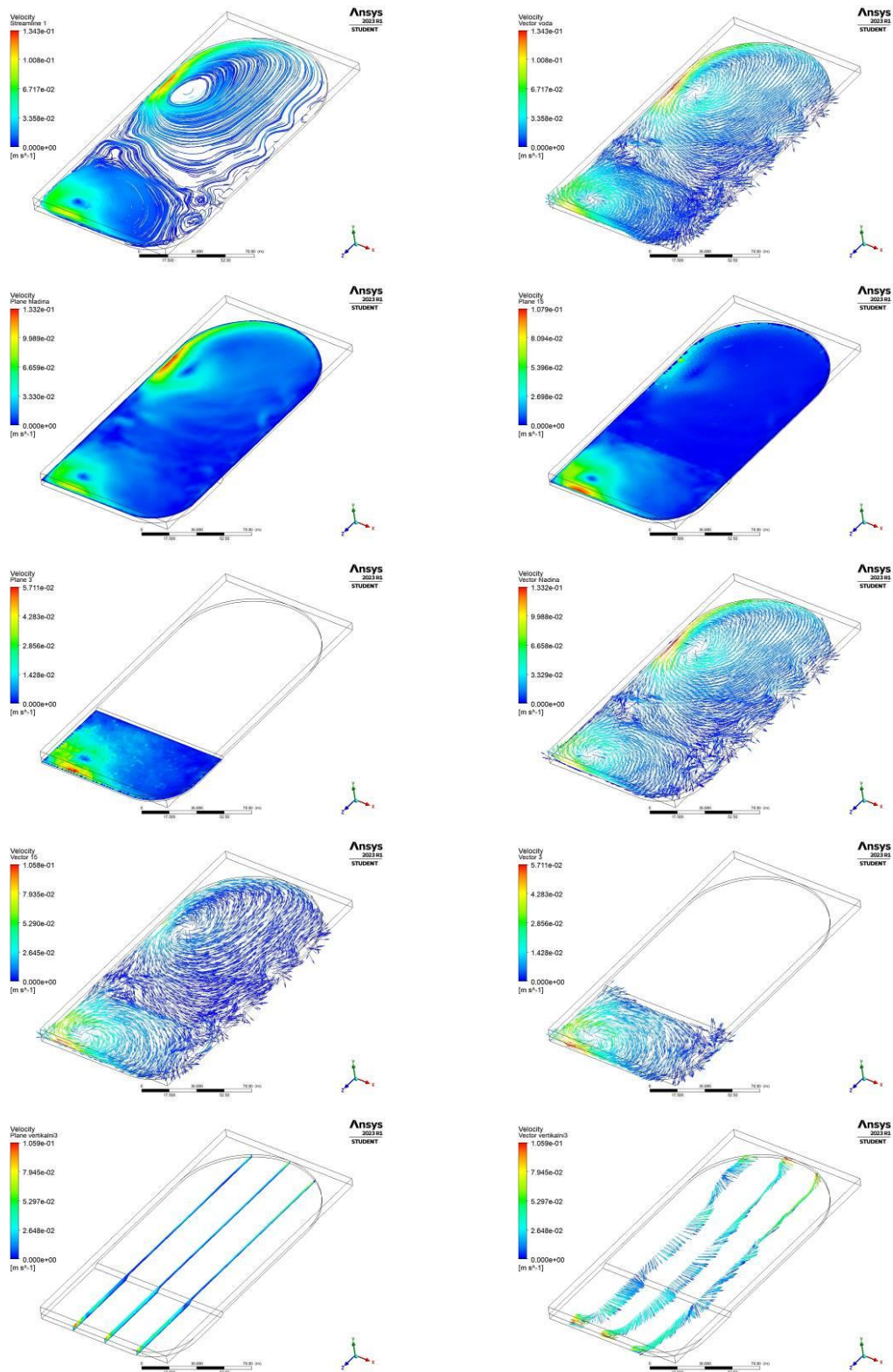
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 18 m·s⁻¹ a směr z levé strany:



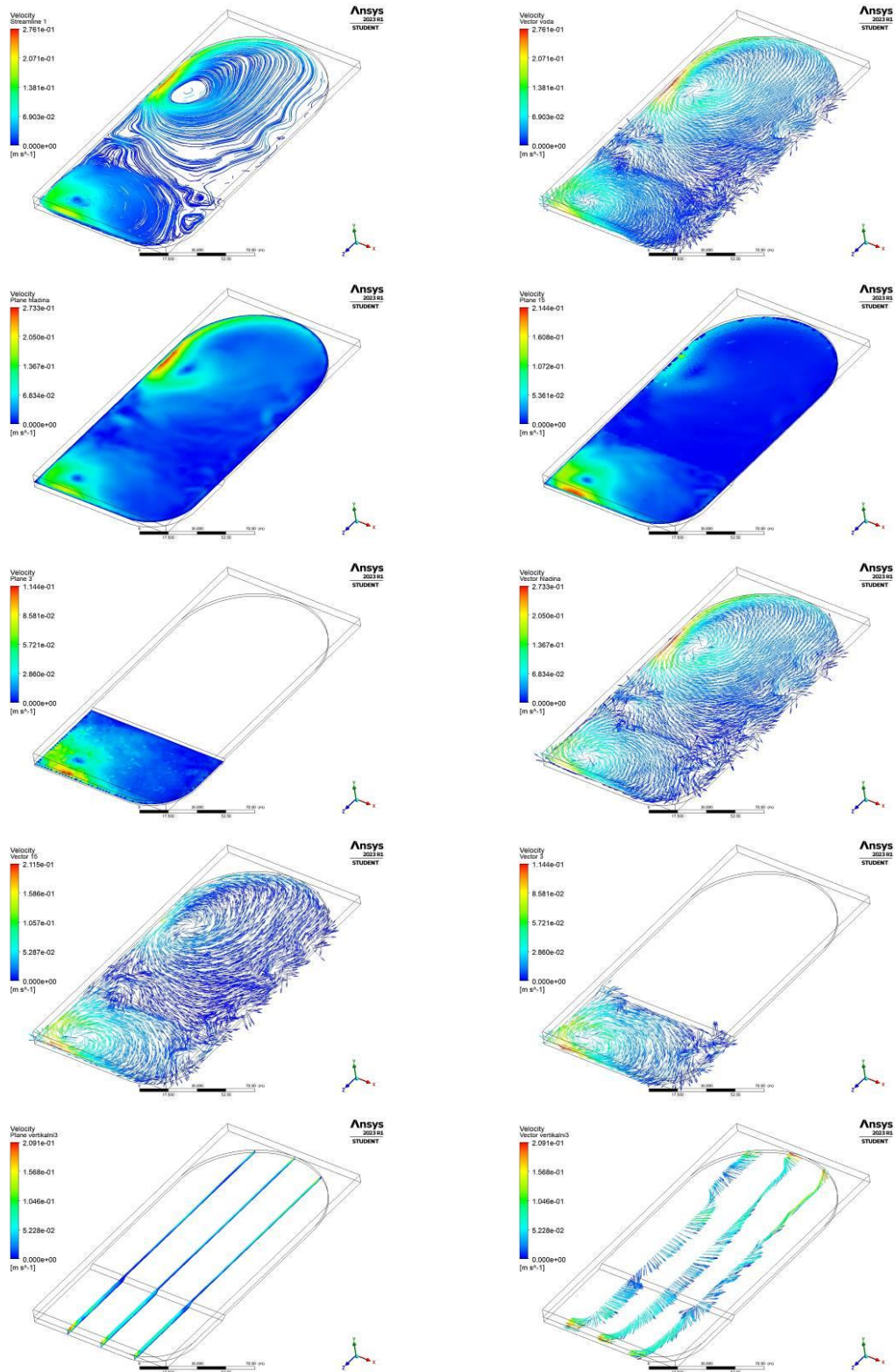
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 0,5 m·s⁻¹ a směr z pravé strany:



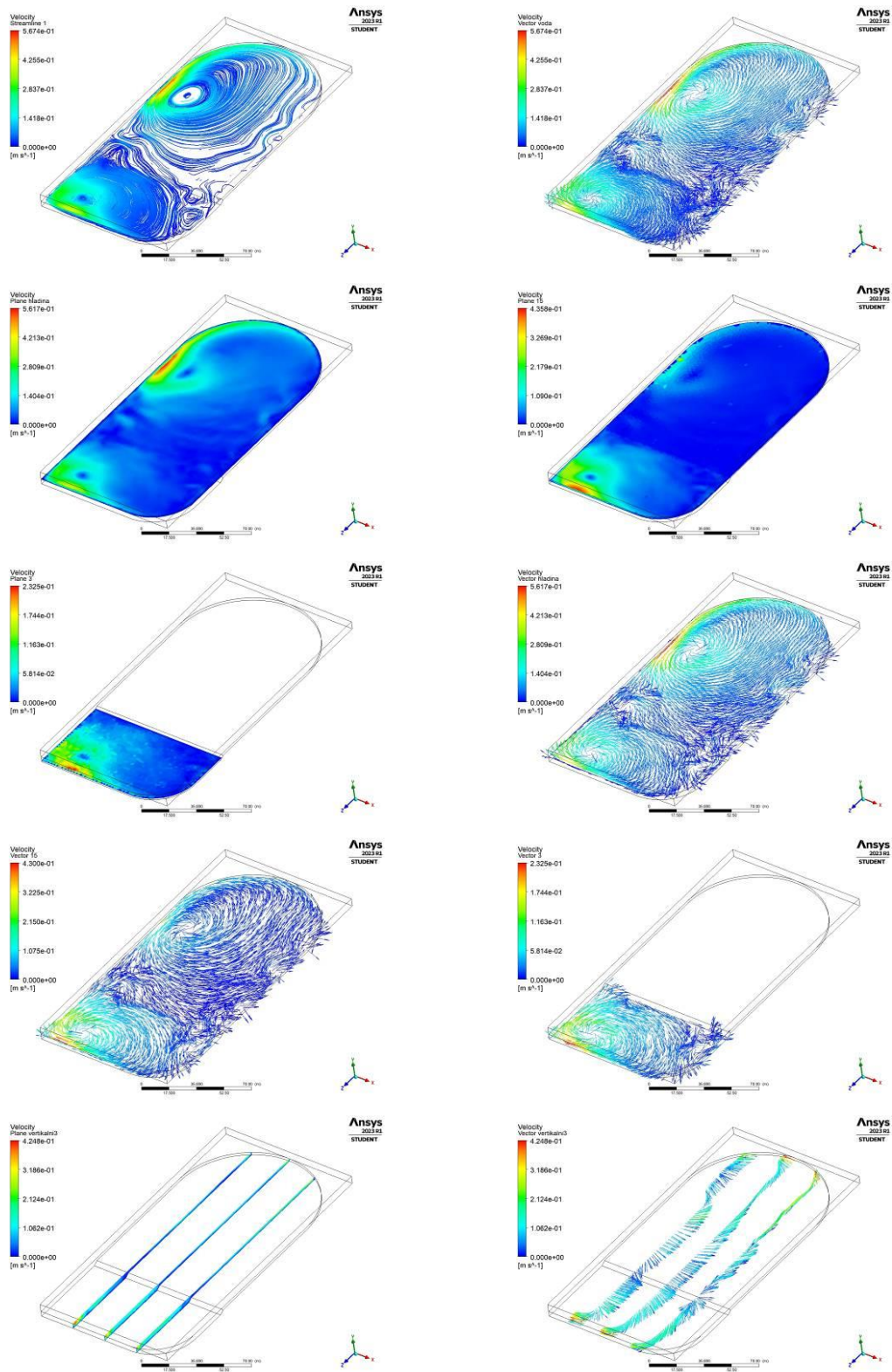
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z pravé strany:



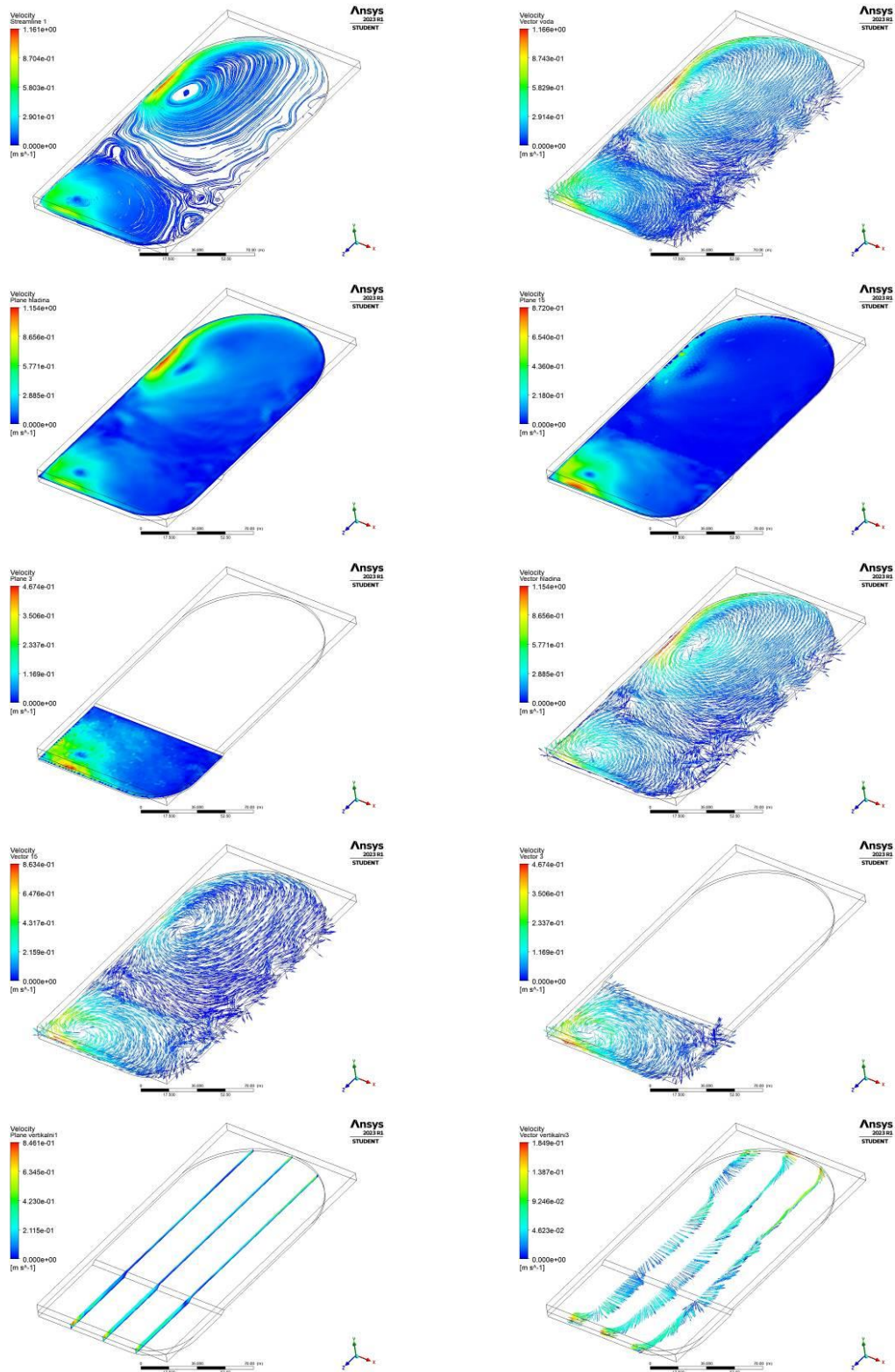
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a směr z pravé strany:



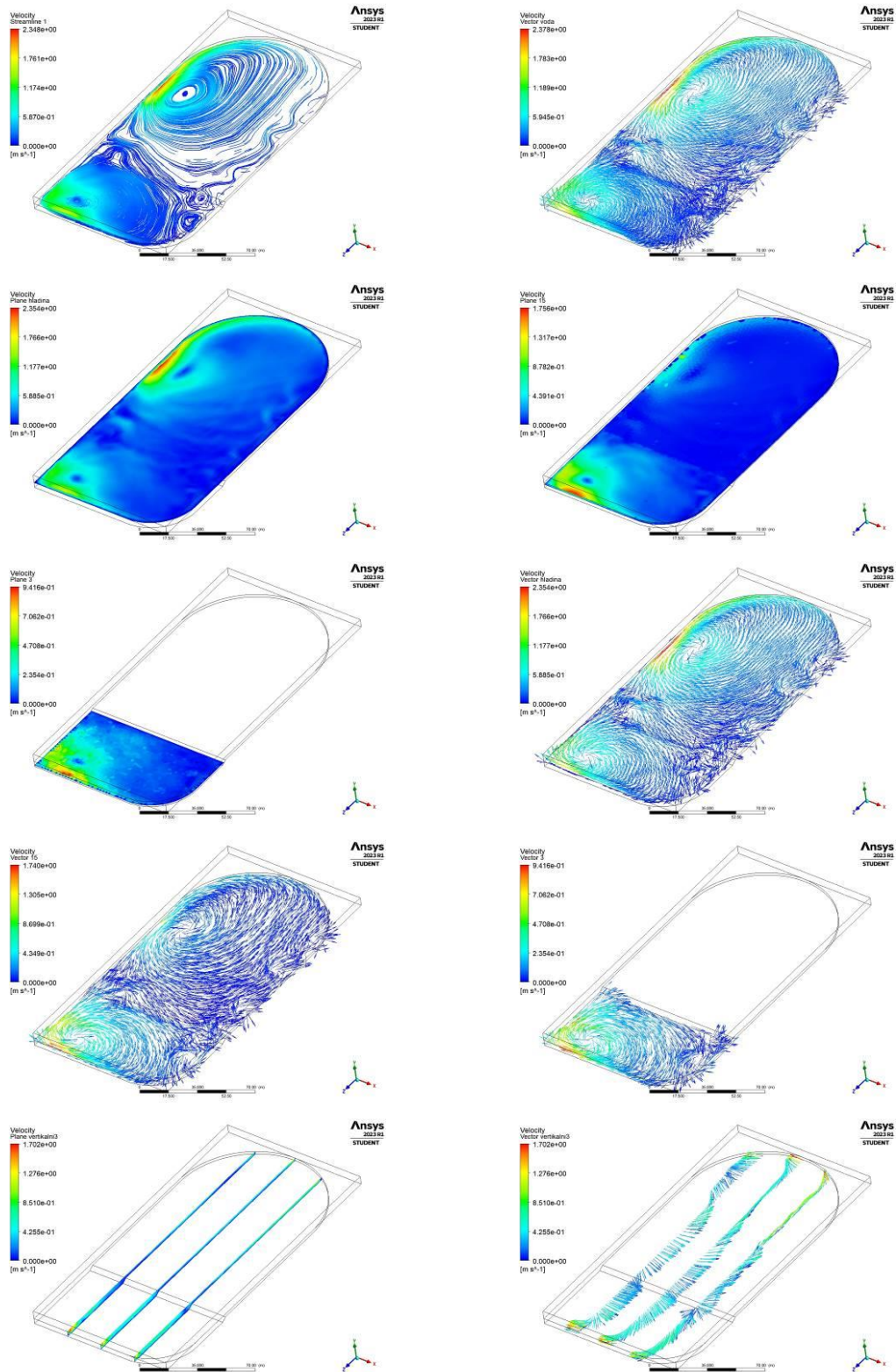
Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 4 m·s⁻¹ a směr z pravé strany:



Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 8 m·s⁻¹ a směr z pravé strany:



Model se zvláštním tvarem a hloubkou 2 a 4m (prohlubeň), rychlost větru 16 m·s⁻¹ a směr z pravé strany:



10. Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývala prouděním v malých rybnících (konkrétně v rybníku Dehtář nedaleko obce Žabovřesky) se zaměřením na horizontální proudění. Jejím cílem bylo provedení terénních měření pohybu vody při hladině (pomocí námi vyvinutých zařízení vybavených GPS přístroji) za různých atmosférických podmínek a z výsledků stanovit rychlost proudění vody u hladiny v reálných podmínkách. Pro měření byly použity přístroje GPSMAP 78s, GPSMAP 60CSx a telefony MOTOROLA s aplikací GPS Logger vložené do vyvážených PVC trubek. Dalším cílem bylo vytvořit zjednodušený 3D model rybníku a pomocí programu Ansys simulovat proudění v jeho hlubších vrstvách.

Výsledkem terénního měření byly proudnice znázorňující směr proudění pro svrchní vrstvu vody. Při rychlosti větru $1-3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ za mlhavého a zataženého počasí, byla zjištěná rychlost proudění přibližně $0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při velmi nízké rychlosti větru $0-1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ za mlhavého počasí, byla rychlost proudění $0,0083 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Za proměnlivých podmínek, kdy hladina byla nejdříve mírně zamrzlá, ale následně roztála a začal foukat silnější vítr z jiného směru, byla výsledná rychlost proudění nejdříve $0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (při rychlosti větru $0,7-1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a později $0,0375 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (při větru o rychlosti $2-3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Výsledkem modelování v programu Ansys byly simulace proudění v zjednodušených rybnících dvou tvarů (jeden s nakloněným dnem, hloubkou $0,5-4 \text{ m}$ a zaoblenými rohy a druhý se stálou hloubkou 2 m a s prohlubní (lovištěm) o celkové hloubce 4 m a se zaoblenými třemi rohy) při různých rychlostech ($0,5; 1; 2; 4; 8$ a $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a třech nebo čtyřech směrech větru. Obecně simulace ukázaly, že rychlost proudění roste s rychlostí větru, kdy převládající rychlost proudění byla pro všechny simulace zhruba 3% rychlosti větru. Zároveň s hloubkou rychlost proudění klesá a voda se míchala přibližně do 95% hloubky (do $3,8 \text{ m}$). Simulace také ukázaly tvorbu vírů, zde se voda pohybovala nejrychleji v místech, kde se víry dotýkaly okraje rybníku, ale v jejich středu se často tvořila místa s velmi nízkými rychlostmi proudění a relativně dlouhou dobou zdržení vody (od sedmi hodin po šest dnů).

Výsledky terénních měření a simulací v této bakalářské práci mohou přispět k pochopení procesů (například vlivu míchání vody na obsah kyslíku, planktonu a živin v různých místech) probíhajících v rybníku Dehtář. Mohou tak být základem pro následné mapování jeho cirkulačních vzorců, které mohou mít vliv na vznik a vývoj

kyslíkových deficitů a na koncentrování přirozené potravy a živin v některých částech rybníku. Čímž mohou pomoci při určování vhodnosti míst například pro krmení ryb nebo pro odběr vzorků a mít tak pozitivní vliv na zlepšení hospodaření na tomto rybníku.

Klíčová slova: Ansys, Fluent, horizontální, míchání, proudění, rybník, vlny

11. Abstract

This bachelor thesis dealt with the flow in small ponds (specifically in pond Dehtář near the village Žabovřesky) with a focus on horizontal flow. Its aim was to perform field measurements of water movement of the surface (using devices developed by us, equipped with GPS logger) under various atmospheric conditions and from the results to determine the water flow velocity at the surface in real conditions. GPSMAP 78s, GPSMAP 60CSx and MOTOROLA phones with GPS Logger application inserted into balanced PVC pipes were used for measurements. Another objective was to create a simplified 3D model of the pond and simulate the flow in its deeper layers using Ansys software.

Field measurements resulted in streamlines showing the direction of flow for the top layer of water. With wind speeds of 1-3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ in foggy and cloudy weather, the observed flow velocity was approximately 0.025 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. At very low wind speeds of 0-1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ in foggy weather, the flow velocity was 0.0083 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Under variable conditions, when the surface was first slightly frozen but then melted and stronger winds from a different direction began to blow, the resulting flow velocity was first 0.025 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (at a wind speed of 0.7-1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and later 0.0375 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (at a wind speed of 2-3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

The Ansys modelling resulted in simulations of flows in simplified ponds of two shapes (one with a sloping bottom, 0.5-4 m depth and rounded corners and the other with a constant depth of 2 m and a depression with a total depth of 4 m and rounded three corners) at different wind velocities (0.5; 1; 2; 4; 8 and 16 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and three or four wind directions. In general, the simulations showed that the flow velocity increased with wind speed, with the prevailing flow velocity being about 3% of the wind speed for all simulations. At the same time, flow velocity decreased with depth, and water was mixed to approximately 95% of the depth (up to 3.8 m). The simulations also showed the formation of eddies, here the water moved fastest where the eddies touched the edge of the pond, but in the centre of the eddies there were often areas of very low flow velocities and relatively long residence times (from seven hours to six days).

The results of the field measurements and simulations in this thesis can contribute to the understanding of the processes (e.g. the effect of water mixing on oxygen, plankton and nutrient content at different areas) occurring in pond Dehtář. They may thus provide a basis for subsequent mapping of its circulation patterns, which may

influence the origin and development of oxygen deficiencies and the concentration of natural food for fish and nutrients in certain parts of the pond. They can thus help to determine the suitability of areas, for example for fish feeding or sampling and thus have a positive impact on improving the management of this pond.

Key words: Ansys, flow, Fluent, horizontal, mixing, pond, waves