

OSTRAVSKÁ UNIVERZITA  
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA  
KATEDRA FYZICKÉ GEOGRAFIE A GEOEKOLOGIE

# Distribuce povrchové rychlosti proudění ve vybraných meandrech řeky Odry při různých vodních stavech

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor práce: Pavel Sedláček  
Vedoucí práce: RNDr. Veronika Kapustová, Ph.D.

2024

UNIVERSITY OF OSTRAVA  
FACULTY OF SCIENCE  
DEPARTMENT OF PHYSICAL GEOGRAPHY AND GEOECOLOGY

# Distribution of surface flow velocity in selected meanders of the Odra River at various water stages

BACHELOR THESIS

Author: Pavel Sedláček  
Supervisor: RNDr. Veronika Kapustová, Ph.D.

2024

OSTRAVSKÁ UNIVERZITA

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2022/2023

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Pavel SEDLÁČEK**  
Osobní číslo: **R20543**  
Studijní program: **B0532A330014 Environmentální geografie**  
Specializace: **Kartografie a geoinformatika**  
Téma práce: **Distribuce povrchové rychlosti proudění ve vybraných meandrech řeky Odry při různých vodních stavech**  
Zadávající katedra: **Katedra fyzické geografie a geoekologie**

### Zásady pro vypracování

- Cílem práce je zjistit, zda a jakým způsobem dřevo v korytě ovlivňuje směr a rychlost povrchového proudění v daném úseku řeky Odry. Práce je součástí projektu zabývajícího se vlivem vegetace v korytě na morfodynamiku meandrového pásu v CHKO Poodří.

- Práce bude zahrnovat tyto části:

1) Rešerše literatury na téma využití obrazové velocimetrie (LSPIV – Large Scale Particle Image Velocimetry) při měření na vodních tocích

2) Terénní práce: kompletace povolení, asistence při pořízování videozáznamů pomocí technologie UAV při různých vodních stavech.

3) Zpracování dat: zpracování videozáznamů v programu Fudaa-LSPIV, vizualizace a interpretace výsledků.

- Práce bude vypracována a obhajována v češtině.

Rozsah pracovní zprávy: **minimálně 40 stran**

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

### Seznam doporučené literatury:

- FENTON, J.D., 2008. Obstacles in streams and their roles as hydraulic structures, in Hydraulic Structures – Proc. 2nd International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, 30.7-1.8.2008, Pisa, Italy, ed. Stefano Pagliara, Edizioni Plus, University of Pisa:15-22.

- JODEAU, M., HAUET, A., PAQUIER, A., LE COZ, J., DRAMAIS, G., 2008. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. Flow Measurement and Instrumentation, 19:117-127.

- JODEAU, M., HAUET, A., LE COZ J., FAURE, JB., BODART, G., 2022. Fudaa-LSPIV Version 1.9.2 User Manual, 65 s.

- LE BOURSICAUD, R., PÉNARD, L., HAUET, A., LE COZ, J., 2016. Gauging extreme floods on YouTube: Application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges. Hydrological Processes 30: 90-105.

- LE COZ, J., HAUET, A., PIERREFEU, G., DRAMAIS, G., CAMENEN, B., 2010. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers, Journal of Hydrology 394 (1-2): 42-52.

- PITON, G., RECKING, A., LE COZ, J., BELLOT, H., HAUET, A., JODEAU, M., 2018. 2D reconstruction of low-submergence, mobile-bed flows: an inverse method combining LS-PIV and Structure-from-Motion photogrammetry, Water Resources Research 54(6): 4164-4179.

- ZHU, X., LIPEME KOUYI, G., 2019. An analysis of LSPIV-based surface velocity measurement techniques for stormwater detention basin management, Water Resources Research 55(2): 888-903.

- Časopisy: Landslides, Geomorphology, Earth Surface Processes and Landforms a další.

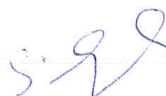
Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Veronika Kapustová, Ph.D.  
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Datum zadání bakalářské práce: 2. listopadu 2022  
Termín odevzdání bakalářské práce: 24. dubna 2023



---

RNDr. Veronika Kapustová, Ph.D.  
vedoucí bakalářské práce



---

RNDr. Václav Škarpich, Ph.D.  
vedoucí katedry



---

doc. RNDr. Jan Hradecký, Ph.D.  
garant studijního programu

V Ostravě dne 2. listopadu 2022

## ABSTRAKT

Cílem práce je zjištění a interpretování vlivu říčního dřeva v korytě vybraných úseků řeky Odry na rychlost a distribuci povrchového proudění vody v korytě a tím na morfodynamiku koryta za pomoci leteckých videozáznamů vybraných úseků koryta zpracovaných v softwaru Fudaa-LSPIV, který poskytl zobrazení směrů a rychlostí proudění v síti bodů pokrývající analyzovaný úsek.

Teoretická část práce zahrnuje vysvětlení a informace o částicové obrazové velocimetrii, pak její velkoměřítkové verzi a o samotném softwaru Fudaa-LSPIV. Charakteristika zájmového území se zabývá danou částí toku řeky Odry, kde se rozebírá, krom její polohy, také geologie, geomorfologie, hydrologie a klima studovaného území, taktéž jako vliv člověka. Praktická část obsahuje postup pořízení videozáznamů, instalace a seznámení se s pracovním prostředím softwaru Fudaa-LSPIV a následně úplný postup zpracování jednoho ze tří pořízených videozáznamů do výsledku zobrazujícího velocimetrii proudění. Ve výsledcích a diskusi jsou vyobrazeny všechny tři zpracované výsledky videozáznamů s vypsanými parametry, dále jsou interpretovány a jednotlivé úkazy na snímcích popsány. Právě podle těchto výsledků bylo možné vidět přímý vliv říčního dřeva, který svou přítomností působí v některých případech jak erozně, tak v jiných protierozně.

*Klíčová slova: Fudaa-LSPIV, UAV, PIV, říční dřevo, velocimetrie, CHKO Poodří*

## ABSTRACT

The aim of the work is to determine and interpret the influence of river wood in the riverbed of selected sections of the Oder River on the velocity and distribution of surface water flow in the riverbed and thus on the morphodynamics of the riverbed using aerial video recordings of selected sections of the riverbed processed in the Fudaa-LSPIV software, which provided a representation of flow directions and velocities in a grid of points covering the analyzed section.

The theoretical part of the work includes explanation and information about particle image velocimetry, then its large-scale version and about the Fudaa-LSPIV software itself. The characterization of the area of interest deals with the given part of the Oder River course, where, besides its location, the geology, geomorphology, hydrology and climate of the study area are also discussed, as well as the influence of man. The practical part includes the procedure of taking video recordings, installation and familiarisation with the working environment of the Fudaa-LSPIV software and then the complete procedure of processing one of the three video recordings into a result showing the flow velocimetry. In the results and discussion, the three processed video results are shown with the parameters listed, and the individual phenomena in the images are interpreted and described. It is according to these results that it was possible to see the direct influence of river wood, which by its presence is both erosive in some cases and anti-erosive in others.

*Keywords: Fudaa-LSPIV, UAV, PIV, river wood, velocimetry, Poodří PLA*

# ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Já, níže podepsaný student, tímto čestně prohlašuji, že text mnou odevzdané závěrečné práce v písemné podobě je totožný s textem závěrečné práce vloženým v databázi DIPL2.

Ostrava dne 4. 1. 2024



.....  
podpis studenta

Chtěl bych velice rád poděkovat RNDr. Veronice Kapustové Ph.D. za její vedení a pomoc, jak při psaní samotném, tak při terénní práci, u které bych chtěl obzvláště vyzdvihnout excelentní zvládnutí pilotáže dronu za účelem pořízení vstupních videozáznamů a dat.

Prohlašuji, že předložená práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Veškerou literaturu a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpal, v práci řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Ostravě dne 4.1.2024 .....

  
.....

(podpis)

# OBSAH

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÚVOD.....</b>                                         | <b>10</b> |
| <b>1 ČÁSTICOVÁ OBRAZOVÁ VELOCIMETRIE .....</b>           | <b>11</b> |
| 1.1 PIV (Particle Image Velocimetry) .....               | 11        |
| 1.2 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry).....  | 12        |
| 1.3 FUDAA-LSPIV software.....                            | 12        |
| <b>2 CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ.....</b>            | <b>14</b> |
| 2.1 Poloha a základní údaje o zkoumaném území .....      | 14        |
| 2.2 Geomorfologie a geologie území .....                 | 15        |
| 2.3 Hydrologie území.....                                | 15        |
| 2.4 Klima území .....                                    | 16        |
| 2.5 Vliv člověka .....                                   | 16        |
| <b>3 METODY .....</b>                                    | <b>18</b> |
| 3.1 Pořízení videozáznamů .....                          | 18        |
| 3.1.1 Technika UAV .....                                 | 18        |
| 3.1.2 Provedení letu .....                               | 18        |
| 3.2 Zpracování videozáznamů v softwaru Fudaa-LSPIV ..... | 19        |
| 3.2.1 Instalace softwaru .....                           | 19        |
| 3.2.2 Možné problémy se softwarem.....                   | 19        |
| 3.2.3 Uživatelské rozhraní .....                         | 21        |
| 3.2.4 Import videozáznamů do softwaru .....              | 22        |
| 3.2.5 Stabilizování sekvence snímků.....                 | 25        |
| 3.2.6 Transformace snímků .....                          | 27        |
| 3.2.7 Analýza LSPIV .....                                | 30        |
| 3.2.8 Post-processing snímků .....                       | 37        |
| <b>4 VÝSLEDKY A DISKUSE.....</b>                         | <b>40</b> |
| 4.1 1. záznam – 7. 10. 2022.....                         | 40        |
| 4.1 2. záznam – 7. 10. 2022.....                         | 41        |
| 4.1 3. záznam – 29. 8. 2022.....                         | 43        |
| <b>ZÁVĚR .....</b>                                       | <b>45</b> |
| <b>RESUMÉ .....</b>                                      | <b>46</b> |
| <b>SUMMARY .....</b>                                     | <b>47</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>                    | <b>48</b> |

## ÚVOD

Měření velocimetrie proudění patří k jednomu z nejzásadnějších hydrologických problematik, neboť z něho lze přímo zjistit přibližné informace o prostorových rychlostech a směrech proudění, například v rizikových oblastech v blízkosti břehu, kde může docházet k velkému smykovému napětí a odnosu materiálu. Takováto měření jsou ovšem na tocích velice náročná a obecně se pro praktické účely využívá pouze povrchové rozložení rychlosti (Fujita & Hino, 2003).

Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) je metoda měření proudění toku, která je velice snadná a nenáročná jak po technické stránce, tak po stránce náročnosti práce. To, co stačí je mít dobrý záznam vybraného úseku toku, který chci změřit a alespoň jednu referenční vzdálenost na úrovni vodní hladiny pro výpočet měřítka (Jodeau et al., 2017; Jodeau et al., 2022). Výsledkem je kompletní vyobrazení směru a přibližné rychlosti toku v měřeném úseku, podle kterého je možné odvodit vliv říčních překážek, jako je v tomto případě vegetace, na koryto řeky Odry.

Cílem práce je zjištění a interpretování vlivu říčního dřeva v korytě vybraných úseků řeky Odry pomocí zpracování a vizualizace výsledků z videozáznamů pořízených bezpilotním letadlem, na kterých jsou zobrazeny směry a přibližné rychlosti proudění.

# 1 ČÁSTICOVÁ OBRAZOVÁ VELOCIMETRIE

## 1.1 PIV (Particle Image Velocimetry)

Tato technologie, spadající pod tzv. PLV – Pulsed Light Velocimetry, patří do širší skupiny technik měření rychlosti malých ohraničených oblastí, nebo ploch tekutin, fungující na principu porovnání změny pozic částic ve dvou, nebo více časech. Tyto metody se vracejí k základní definici rychlosti a odhadují lokální rychlost  $\mathbf{u}$ , kde  $\Delta \mathbf{x}$  je rozdíl pozic částice umístěné v bodech  $\mathbf{x}$  v časech  $\mathbf{t}$ :

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \doteq \frac{\Delta \mathbf{x}(\mathbf{x}, t)}{\Delta t}$$

Technologie využívá viditelné částice/částičky, které jsou obvykle v kapalném nebo plynném prostředí v pevném skupenství, ovšem mohou to být také bubliny v kapalném prostředí, nebo kapičky v plynném. Částice v tekutině kontrastují a odrážejí světlo do fotografické čočky, která je umístěna pod úhlem 90 ° k měřené ploše, takže rovina objektu v ohnisku se shoduje s osvětlenou částí kapaliny. Obrázky se tvoří na fotografickém filmu, nebo na takzvaném video array detector a snímky jsou následně přeneseny do počítače pro automatickou analýzu. Analýza zaznamenaného obrazového pole je jedním z nejdůležitějších kroků v celém procesu, který je také časově nejnáročnější. Pokud zaznamenané obrazové pole obsahuje malé množství informací, jak je tomu například u snímku s rozlišením 500 x 500 pixelů, dokáže se rychlost vypočítat najednou. Pokud použijeme snímky s větším obrazovým polem, zjistí se lokální rychlost jednoho bodu v malé vybrané oblasti. Výsledné vektorové pole celého snímku se tedy získá opakováním tohoto postupu na mřížce takovýchto bodů (Adrian, 1991).

## 1.2 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry)

Velkoměřítková obrazová velocimetrie částic je metoda vizualizace rychlosti a směru proudění na povrchu kapaliny, vycházející z technologie Particle Image Velocimetry, rozšířená z laboratorního využití pomocí koryt a větrných tunelů na méně ovládané proudy většího měřítka, jako jsou například řeky. Měření se v základu skládá ze čtyř hlavních kroků:

- Pořízení sekvence přesně datovaných snímků měřeného úseku
- Geometrická korekce snímků pomocí ortorektifikace
- Výpočet rozdílů poloh částic v určitém vzoru podle statistické korelační analýzy.
- Konečné zpracování rychlostních dat, včetně screeningu, průměrování výsledků a možném odhadu průtoku

Výsledkem této analýzy je dvourozměrné rychlostní pole hladiny řeky, kde čas  $t$  odpovídá časovému rozdílu dvou snímků. Zprůměrované rychlostní pole lze pak vypočítat na základě všech, nebo části vybraných párů sekvence snímků. Za předpokladu, že je známá batymetrie příčného řezu daného úseku, lze na základě předpokladu o vertikální rychlosti proudění vypočítat průtok (Jodeau et al., 2017).

Jako stopovací částice je možné použít přírodní objekty, které na řece plavou, jako například unášené dřevo a listí (Fujita & Hino, 2003). V zimních měsících je také možné využít ledové bloky (Ettema et al., 1997). Umísťování umělých stopovacích částic do řeky obvykle není potřeba při zvýšených stavech řek, například při povodních, kdy pohyby a proudy řeky je možné v záběrech vizuálně rozpoznat a vypočítat tak rychlost proudění (Jodeau et al., 2017).

## 1.3 FUDAA-LSPIV software

Jedná se o opensource software vyvíjený od srpna roku 2010 společností DeltaCAD za finanční podpory společností EDF (Électricité de France) a Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture). Vývoj je součástí projektu zabývajícím se říční hydraulikou. Podporovanými jazyky jsou francouzština a angličtina a lze ho používat na operačních systémech Windows nebo Linux. Program je vytvořen v grafickém rozhraní programovacího jazyku Java, který se jmenuje Fortran executables (Jodeau et al., 2022).

Nalézt ho můžeme na stránkách zabývajících se výzkumem říční hydrauliky spadající pod Francouzský národní ústav pro zemědělský výzkumu INRAE (Institut national de la recherche agronomique), kde je možné nalézt také veškerou dokumentaci k softwaru.

## 2 CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Odra je jedna z hlavních evropských řek, pramenící v Oderských vrších, která na území České republiky zabírá zhruba 15 % své délky, tedy 131,7 km ze své celkové délky 854 km a s povodím o velikosti 6252 km<sup>2</sup> na našem území (Sedláček et al., 2019).

Jedná se o unikátní území v rámci střední Evropy, díky přirozené struktuře říčního koryta i říčních procesů. I když ve zdejší krajině docházelo a dochází k vlivu člověka, charakter povodní, které se v minulosti odehrávaly, patřící mezi významné krajinnotvorné procesy, se nezměnil. Právě minimální regulace koryta, absence velkých údolních nádrží a citlivý přístup ke správě řeky vedly k zachování jedinečného typu říční krajiny, která se vyznačuje meandrujícím tokem (Hradecký et al., 2016).

### 2.1 Poloha a základní údaje o zkoumaném území

Práce se zaměřuje na vybraný meandr řeky Odry, nacházející se na katastrálním území obce Proskovice v Moravskoslezském kraji. Jedná se o jeden z prvních meandrů Odry po soutoku s Ondřejnicí (obrázek 1).



Obrázek 1: Lokalizace zájmového území (Použita jsou základní podkladová data softwaru ArcGis Pro společnosti Esri)

## 2.2 Geomorfologie a geologie území

Oblast Poodří se nachází na území celku Moravské brány, která je součástí karpatské předhlubně, tedy severovýchodní části Západních Vněkarpatských sníženin s plochou 538,69 km<sup>2</sup>, střední výškou 263,5 m.n.m. a středním sklonem 2°02' (Demek & Mackovčín, 2006; Sedláček et al., 2019). Tvoří hranici mezi dvěma hlavními geologickými jednotkami ČR, tedy Českým masivem na severozápadě a Západními Karpaty na jihovýchodě a rozkládá se zhruba mezi městy Přerov a Ostrava (Hradecký et al., 2016).

Území leží konkrétně v podcelku Oderská brána, v severovýchodní části Moravské brány v povodí řeky Odry, severovýchodně od hlavního evropského rozvodí, s plochou 378,69 km<sup>2</sup>, střední výškou 260,9 m.n.m. a středním sklonem 1°46' (Demek & Mackovčín, 2006).

Severozápadní vrchovinná část povodí horního toku Odry zahrnuje spodnokarbonské (kulmské) flyšové horniny, jako jsou břidlice a droby. Jihovýchodní horská oblast se skládá z křídových až eocénních flyšových hornin, jako pískovce a břidlice. Moravská brána je vyplněna neogenními karpatskými a bádenskými mořskými siliciklastickými sedimenty (Sedláček et al., 2019). Kvartérní sedimenty zahrnují usazeniny kontinentálního sálského a halštrovského neboli elsterského a zalednění (Nývt et al., 2011), sprašovými uloženinami a fluvialními sedimenty říčních teras (Galia et al., 2023). Dominantním morfologickým tvarem je samotné koryto řeky Odry, které si zachovalo charakter přirozeného meandrujícího nížinného toku, i přes lokální úpravy, obvykle jen v blízkosti mostů (Gurkovský & Galia, 2019).

## 2.3 Hydrologie území

Území Poodří je mimořádné především díky zachovalému vodnímu režimu, který není ovlivněn žádnými velkými vodními díly. Pravidelně se zde objevují povodně pocházející z jarního tání sněhu, nebo související s intenzivními či dlouhodobými srážkami (Hradecký et al., 2016).

Povodně z minulosti jsou na řece až do roku 1896 uváděny pro celou část toku na území České republiky, nejstarší zaznamenaná byla 20. srpna roku 1501, za zmínku také stojí záplava z 5. srpna roku 1880, kdy Odra společně s Bečvou, Lubinou a Ostravicí zaplavila některé části Ostravy až do výšky 2,5 metru. Podle pramenů bylo uchráněno pouze hlavní náměstí s přilehlými ulicemi a kostel sv. Václava (Brázdil et al., 2005).

Z posledních desítek let přístrojového měření v Bartošovicích byly zaznamenány tyto tři povodně jako největší: 8. července 1997, kdy byl průtok v době kulminace  $367 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1}$ , tedy více než maximální stoletý kulminační průtok. Dále 25. června 2009 s průtokem  $126 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1}$ , více než dvouletý kulminační průtok a 18. května 2010 s průtokem  $76,2 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1}$  s méně než jednoletým maximálním kulminačním průtokem (Hradecký et al., 2016). Z poznatků a měření vyplývá, že frekvence povodní se po roce 1950 snížila z 8–9 povodní na 1–3 za desetileté období (Brázdil et al., 2005).

## 2.4 Klima území

Oblast Poodří spadá dle systému členění klimatu Quitta (1971) upraveného Tolaszem a kol. (2007) pod kategorii teplých oblastí W2. Charakteristická je počtem 50–60 letních dnů, 160–170 dnů s průměrnou teplotou  $10^\circ\text{C}$  a více, 100–110 dnů s mrazem, 30–40 ledových dnů, 40–50 dnů se sněhovou pokrývkou, 120–140 zatažených dnů a 40–50 jasných dnů.

Co se týká průměrných teplot, tak v lednu jsou  $-2^\circ\text{C}$  až  $-3^\circ\text{C}$ , v červenci  $18^\circ\text{C}$  až  $19^\circ\text{C}$ , v dubnu  $8^\circ\text{C}$  až  $9^\circ\text{C}$  a v říjnu  $7^\circ\text{C}$  až  $9^\circ\text{C}$ . Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více je 90–100. Suma srážek ve vegetačním období je 350–400 mm a v zimním období to je 200–300 mm (Tolasz et al., 2007).

## 2.5 Vliv člověka

Již od pravěku byla oblast Oderské brány využívána jako koridor obklopen horskými celky mezi úrodnými oblastmi jižní a střední Moravy s polskými rovinami. Později dokonce úsek fungoval také jako cesta mezi pobřežími středozevního a baltského moře. Krajina ovšem nebyla člověkem nikterak výrazně poznamenána, až do příchodu tzv. kultury s lineární keramikou, kteří jako první začali krajinu využívat pro obdělávání půdy, rybolov a stavbu stálých sídlišť a osad (Knápek, 2011).

Další významný přelom byl ke konci doby bronzové, kdy oblast obsadila rozsáhlá kultura tzv. popelnicových polí. Tato společnost byla pravděpodobně převážně pastevecká a v této době na území vznikala velká hradiště s dílnami. Kultura však zanikla v době železné, což zapříčinilo, že se krajina ocitla v pustém stavu a mohla se tak opět navrátit do přirozeného stavu (Hradecký et al., 2016; Knápek, 2011).

Po dlouhé odmlce se do oblasti lidé hojně vraceli v polovině 13. století, za účelem zde vytvořit stabilní osídlení. V té době zde byla prakticky divoká příroda, do které tato kolonizace přinesla již vyspělejší plánování sídelních sítí, osad, vymezení polí a struktur správy. Tyto procesy, mezi které patří mýcení a lesní těžba, tvorba lesních pastvin a další, začaly přetvářet krajinu do dnešní podoby (Knápek, 2011). V této době také vznikaly jedny z prvních ze sítě rybníků a kanály, pomáhající transportu vody do těchto rybníků (Hradecký et al., 2016). Vliv na vodní režim řeky Odry to mělo velký, díky mizení lesa a počátku zanášení toku splachy z vykácených ploch. Od středověku nabral tento erozivní proces na síle a je možné, že částečně stojí za vytvořením oderské nivy, jako kulturní krajiny, která je dodnes oblastí ochrany CHKO Poodří (Knápek, 2011; Hradecký et al., 2016).

## 3 METODY

### 3.1 Pořízení videozáznamů

Pro práci s programem je nutné vytvořit vstupní data, tedy videozáznamy vodního toku řeky Odry ve vybraných úsecích, kde se v korytu nachází říční dřevo. Videozáznam je možné pořídit například z mostu nad řekou, kde se dá kamera uchytit a stabilizovat, aby snímala tok ve svislém úhlu, nebo pokud to je možné, použít technologii UAV. S tímto mi velice pomohla vedoucí práce RNDr. Veronika Kapustová, Ph.D., která je držitelkou pilotního průkazu bezpilotních letadel a videozáznamy pořídila.

#### 3.1.1 Technika UAV

Pro pořízení videozáznamů bylo použito bezpilotní letadlo (UAV) typu Phantom 4 PRO od výrobce DJI spadající pod společnost Iflight Technology Company Limited. Přesněji se jedná o kvadrokoptéru s hmotností 1388 g, spadající do dronů třídy C2, tedy do maximální vzletové hmotnosti 4 kg. Dron krom manuálního ovládání letu dokáže letět v režimu GPS, podle předem nastavené trasy při propojení dálkového ovladače se zařízením s operačním systémem Android nebo iOS s nainstalovanou příslušnou aplikací. Také obsahuje několik funkcí, jako jsou senzory proti kolizi a několik módů autopilota (*Phantom 4 PRO/PRO+*, 2017). Kvadrokoptéry obecně dokážou svou konstrukcí a svými čtyřmi rotory, které svou rotací fungují jako horizontální nosné plochy, provádět VTOL (Vertical Take-off and Landing) a také zůstat ve vzduchu viset na místě, což je pro potřeby této práce nutností.

Kamera osazena na spodní straně dronu s 1palcovým CMOS snímačem má zorné pole 84 ° a rozlišení 20 megapixelů. Proto je schopný pořídit videozáznamy až s rozlišením C4K, tedy 4096 x 2160 se snímkovou frekvencí 60 snímků za vteřinu (*Phantom 4 PRO/PRO+*, 2017).

#### 3.1.2 Provedení letu

Předletové přípravě dronu jsem pouze přihlížel a asistoval. RNDr. Veronika Kapustová Ph.D. letovou trasu již naplánovala a provedla let, jehož součástí také bylo snímání pro ortografický snímek zájmového území. Pro samotný vstupní záznam pro LSPIV analýzu pak

uvedla dron do visu nad řekou a zaznamenala zhruba třiceti sekundové videonahrávky v různých částech koryta řeky ve svislé ose.

Výsledkem tedy jsou videozáznamy, které můžeme rovnou importovat do programu Fudaa LSPIV a následně s nimi pracovat.

V předkládané bakalářské práci jsou prezentovány výsledky analýzy 3 videozáznamů. První dva záznamy prezentované ve výsledcích práce byly pořízeny dne 7. 10. 2022 přibližně v 9:00 SELČ, ve výšce 20,7 m nad místem vzletu. Průtok v době pořizování záznamů činil  $6,3 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1}$  (ze záznamů hydrologické měrné stanice ČHMÚ Odra Svinov), jde tedy o záznamy s relativně nízkým průtokem (dlouhodobý průměrný roční průtok  $Q_a$  činí  $12,5 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1}$ ). Třetí prezentovaný záznam byl pořízen dne 29. 8. 2022 přibližně v 17:00 SELČ, ve výšce 30,4 m nad místem vzletu. Průtok v době pořizování záznamu činil  $45,2 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1}$  (ze záznamů hydrologické měrné stanice ČHMÚ Odra Svinov), jde tedy o záznam s relativně vysokým průtokem (jednoletý průtok  $Q_1$  činí  $128 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1}$ ).

## **3.2 Zpracování videozáznamů v softwaru Fudaa-LSPIV**

### **3.2.1 Instalace softwaru**

Instalace programu je jednoduchá a stačí si stáhnout instalátor, který je možné najít na oficiální webové stránce River hydraulics Fudaa-LSPIV. Jak již bylo na začátku práce zmíněno, software funguje v grafickém rozhraní programovacího jazyka Java, tedy přesněji Java Runtime Environment (JRE). Vyskytly se však problémy po instalaci, neboť program nepracoval správně. Funkce nefungovaly, import videa házel chyby a nechtěl video nahrát. Nakonec po různých pokusech pomohla instalace dvou starších verzí JRE, přesněji verzí jre1.8.0\_281 a jre1.8.0\_321. Je možné že na jiném počítači bude program fungovat správně, sám jsem zkoušel, že na záložním notebooku fungoval bez problému od začátku.

### **3.2.2 Možné problémy se softwarem**

Jelikož se jedná o laboratorní program, obsahuje několik problémů, se kterými jsem se setkal. Veliký problém je místo na disku, neboť velikost jednoho souboru uloženého projektu může mít velikost okolo 20–60 GB, dalším problémem je dlouhá doba procesů v programu. Ta je však závislá na výkonu a komponentech v počítači. Program byl tedy

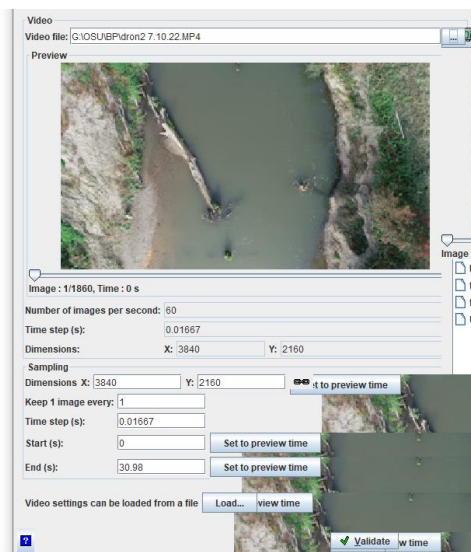
jedním z důvodů, proč jsem nedávno měnil procesor za nový výkonnější AMD Ryzen 7 5800X 8-Core Procesor a zvýšil počet paměti RAM u svého počítače na 32 GB. Doba trvání procesů se výrazně zkrátila, ovšem stále některé hlavní procesy jako ortorektifikace, nebo samotná LSPIV analýza trvají několik hodin.

Zjistil jsem také, že je třeba si dát také pozor na zahlcení místa na disku, neboť program využívá při procesech a výpočtech systémovou složku pro dočasné soubory **Temp** v **C:\Users\<uživatelské jméno>\AppData\Local\Temp**. Po dokončení procesu se však vytvořený soubor nesmaže a nadále zde zůstává, takže po nějaké době se nahromadí podobné soubory a počítač zbytečně zaplní (obrázek 2). Zjistil jsem také, že na některých jiných počítačích se tento problém nevyskytuje.

|                                       |          |          |        |       |        |            |
|---------------------------------------|----------|----------|--------|-------|--------|------------|
| ▼ 174,0 GB Temp                       | 174,5 GB | 174,0 GB | 27 568 | 3 703 | 87,2 % | 06.04.2023 |
| > 36,4 GB fudaaTmp8467477249069848966 | 36,3 GB  | 36,4 GB  | 1 859  | 10    | 20,9 % | 20.03.2023 |
| > 25,2 GB fudaaTmp6847622649678529899 | 25,2 GB  | 25,2 GB  | 1 464  | 9     | 14,5 % | 20.03.2023 |
| > 22,8 GB fudaaTmp3439005840129273286 | 22,8 GB  | 22,8 GB  | 5 437  | 13    | 13,1 % | 03.04.2023 |
| > 22,7 GB fudaaTmp3947276329896340048 | 22,7 GB  | 22,7 GB  | 4 746  | 12    | 13,1 % | 30.03.2023 |
| > 22,5 GB fudaaTmp1681341616628506886 | 22,5 GB  | 22,5 GB  | 3 972  | 12    | 12,9 % | 06.04.2023 |
| > 19,2 GB fudaaTmp3226572117059678816 | 19,2 GB  | 19,2 GB  | 4 315  | 12    | 11,0 % | 04.04.2023 |
| > 18,8 GB fudaaTmp7904501698158042861 | 18,8 GB  | 18,8 GB  | 730    | 8     | 10,8 % | 05.04.2023 |

Obrázek 2: Screenshot z programu TreeSize Free hledající velké soubory na PC

Problémem, který ovšem stále přetrvává jsou grafické závady softwaru a primárně jeho malých oken, ve kterých se nastavují parametry různých funkcí a procesů (obrázek 3). Tyto závady mnohdy znesnadňují, nebo úplně znemožňují práci v programu, neboť se v některých případech okna stávají naprosto nečitelná. Jelikož využívám dvou monitorů, empiricky jsem zjistil, že pomáhá okno přesunout z jedné obrazovky na druhou, nebo při najetí myši na roh okna změnit jeho velikost. Možné je, že problémy jsou opět způsobené špatnou verzí rozhraní JRE, nebo právě užíváním více monitorů, se kterými si JRE neumí dobře poradit.



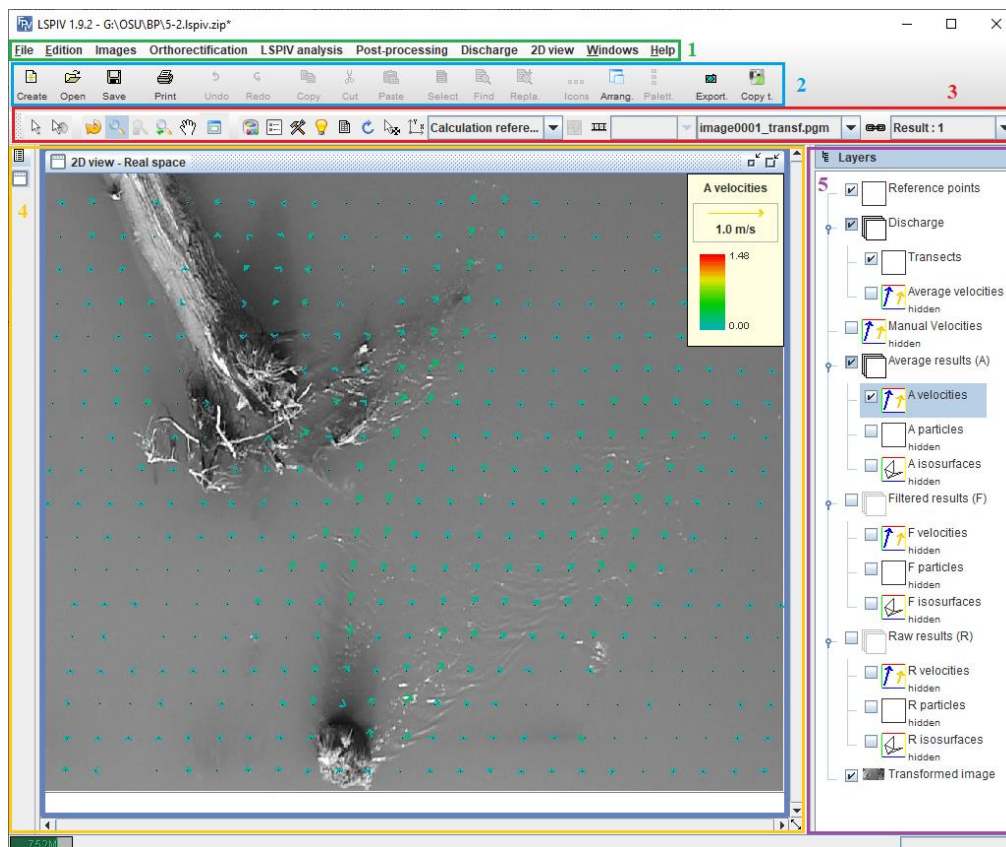
Obrázek 3: Grafická závada okna softwaru Fudaa-LSPIV

### 3.2.3 Uživatelské rozhraní

Software Fudaa-LSPIV se skládá z pěti panelů, které jsou popsány zde:

- Panel hlavní nabídky (**Panel 1** na obrázku 4), který slouží k vytváření, nebo otvírání již vytvořených souborů a přístupu k samotným jednotlivým procesům zpracování LSPIV.
- Panel rychlého přístupu (**Panel 2** na obrázku 4) zobrazuje nejpoužívanější funkce z hlavních funkcí různých nabídek.
- Panel grafických nástrojů (**Panel 3** na obrázku 4) umožňuje výběr a úpravy pohledů v grafickém zobrazení.
- Grafické zobrazení náhledů (**Panel 4** na obrázku 4) slouží k vizualizaci vstupových zdrojových dat, ortorektifikovaných snímků a výsledků výpočtů a analýz s malou legendou a spojitou barevnou stupnicí rychlostí v pravém horním rohu.

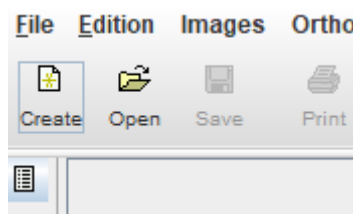
- Panel vrstev (**Panel 5** na obrázku 4) zobrazuje podobně, jako mnohé geoinformační softwary, používané vrstvy v projektu, umožňující výběr, nebo zrušení výběru, pro vizualizaci v grafickém zobrazení náhledů.



Obrázek 4: Rozhraní softwaru Fudaa-LSPIV

### 3.2.4 Import videozáznamů do softwaru

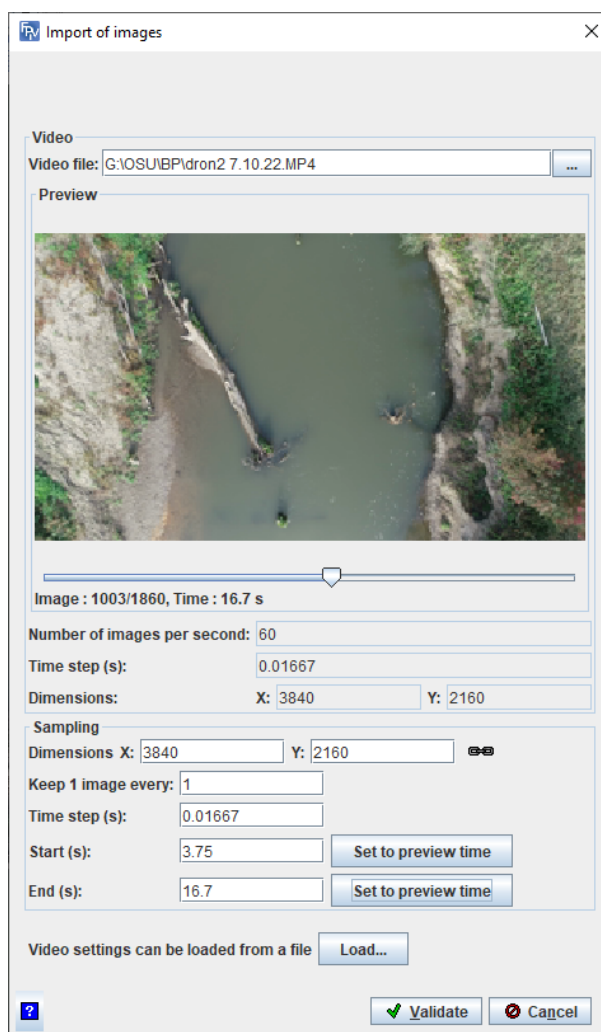
Když si spustíme software Fudaa LSPIV, aktuálně ve verzi 1.9.2, vyjede prázdné okno programu. Nutné je tedy si založit projekt funkcí **Create**, a to buď v panelu hlavní nabídky otevřením si nabídky **File > Create**, nebo kliknutím na samotnou funkci **Create** v Panelu rychlého přístupu (obrázek 5) .



Obrázek 5: Rozhraní softwaru přiblížené na funkci Create

Poté se zobrazí panel grafických nástrojů, samotná plocha pro grafické zobrazení náhledů a panel vrstev. Nyní přecházíme k samotnému importu videozáznamu do programu.

V hlavním panelu nástrojů přejdeme na **Images** a funkcí **Import images from video** vyjede okno **Import of images**, kde vybraný videozáznam importujeme pomocí tlačítka  umístěného nahoře vpravo. Následně se videozáznam do programu nahraje, transformuje do sekvence snímků a zobrazí v náhledovém okně, pod kterým je posuvník, pomocí kterého je možné náhled posouvat v čase (obrázek 6).



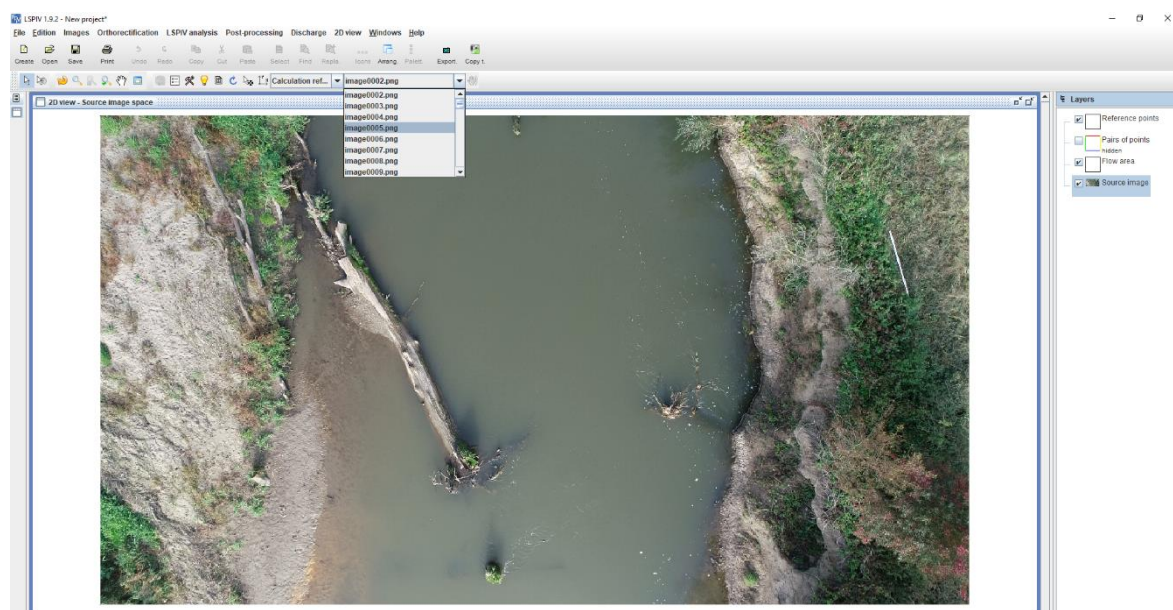
Obrázek 6: Okno importu videozáznamu

Při importu videa se nám automaticky vyplní tabulka s údaji o videozáznamu, jako je počet snímků za vteřinu, korespondující dobu mezi přechodem dvojice snímků a rozlišení videa v pixelech.

V tabulce s názvem **Sampling** (vzorkování videa) je možné tyto již zmíněné údaje pro potřeby změnit, což ovšem zde neuděláme, neboť nám vše vyhovuje. Co ale bude potřeba změnit, je časové rozmezí videozáznamu, které se do programu importuje, neboť délka záznamu ovlivňuje výrazně dobu zpracování softwarem, a to dokonce v řádů hodin.

Úsek se vytvoří při zadání časových údajů videa v kolonkách **Start** a **End**, možné je i použití tlačítka **Set to preview time**, kdy se v kolonce zobrazí přesný čas, který mám zvolený v náhledovém okně. Pro mé účely bude stačit úsek 13 vteřin videa.

Poté se celý proces importu potvrdí spodním tlačítkem **Validate**. Proces bude pár minut trvat, v závislosti na výkonu počítače. Když je proces hotov, v grafickém zobrazení náhledů se zobrazí importovaný videozáznam v jednotlivých snímcích, mezi kterými je možné procházet v panelu grafických nástrojů (obrázek 7). Poté je dobré si projekt uložit, například pomocí **Save** v panelu rychlého přístupu. Uložení zabere několik minut.

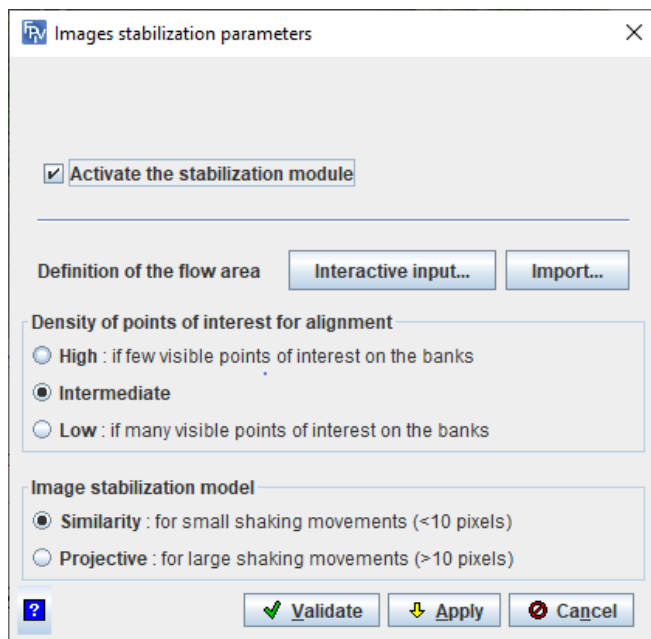


Obrázek 7: Rozhraní softwaru s náhledem jednotlivých snímků

Možné je využití fotozáznamů místo videa, k tomuto typu import je třeba přejít do nabídky **Images > Source images management File > Create**, kde pomocí tlačítka **Add** přidáme jednotlivé snímky, které je možné správně zařadit do chronologické sekvence pomocí tlačítek **Up** a **Down**. Poté je nutné vyplnit časový interval mezi dvěma sousedními snímky, nebo počet snímků za vteřinu, jako je tomu obdobně u videozáznamů.

### 3.2.5 Stabilizování sekvence snímků

Pro přesné použití programu je potřeba vytvořenou sekvenci snímků ze zdrojového videozáznamu stabilizovat. To je umožněno přímo v softwaru v nabídce **Images > Images stabilization parameters**, kde je nutné si v horní části zaškrtnout **Activate the stabilization module**, díky čemuž, jak z názvu vyplývá, se aktivuje funkce stabilizace (obrázek 8).



Obrázek 8: Okno stabilizace snímků

Dále je nutné si zhruba vymezit na snímku oblast toku, což uděláme tlačítkem **Interactive input**. Přejdeme na grafické zobrazení, kde vytvoříme polygon území toku (obrázek 9), který dvojklikem na posledním bodě potvrdíme a přejdeme opět do okna se stabilizací. Tento vymezený polygon je nyní oblast, kterou by algoritmus neměl používat jako referenční body. Jeho tvar by měl být za účelem urychlení zpracování co nejjednodušší.



Obrázek 9: Vytvořený jednoduchý polygon území toku

Zpět v okně stabilizace je poté tabulka **Density of the points of interest for alignment**, kde nastavujeme „kvalitu“ břehu. „Kvalitou“ říčního břehu je myšlena především textura a kontrast. Za kvalitní prostředí můžeme považovat břeh se silnou texturou, kontrastem a velkým počtem hran. Špatnou kvalitu mají hlavně umělé břehy, například vytvořené z hladkých betonových desek, na rozdíl od toho břehy složené z vegetace, kamenů, stromů a jejich stínů, se považují z a velice kvalitní. Proto platí že:

- Špatná „kvalita“: upřednostňuje se možnost **High**, kde je vysoká hustota bodů.
- Dobrá „kvalita“: upřednostňuje se možnost **Low**, kde je nízká hustota bodů.

Důležitým parametrem snímku je poměr břehu a toku. Pro zajištění dobré stabilizace by říční břehy měly pokrývat alespoň čtvrtinu snímku na každé straně toku, tedy 50 % toku a 50 % břehu celkově.

Pro tento projekt tedy použijí možnost **Low**, neboť „kvalita“ břehů, obsahující vegetaci a velkou míru nejednotvárnosti, je dobrá (Jodeau et al., 2022).

Druhou tabulkou je **Image stabilization model**, tedy model stabilizace, podle kterého bude stabilizace provedena. Možnosti jsou **Similarity** (Podobnost) a **Perspective** (Perspektiva). Výběr závisí na intenzitě chvění se kamery a také na již zmíněné „kvalitě“ břehů řeky.

Pokud se jedná o slabé chvění do 10 pixelů, upřednostňuje se model **Similarity**. Při chvění nad 10 pixelů je to model **Perspective**. Tato možnost se však nedoporučuje používat při výběru nízké hustoty bodů, neboť může dojít k chybám, kvůli větší citlivosti na nedostatek bodů.

Pro naše účely použijeme **Similarity**. Pro potvrzení výběru zmáčkneme opět tlačítko **Validate**. Nyní je nastavení hotovo a zbývá jen spustit samotný proces stabilizace opět přes nabídku **Images > Stabilize the images**. Proces trvá několik hodin, v závislosti na počtu snímků. Výsledné stabilizované snímky si můžeme prohlédnout, když v panelu grafických nástrojů kliknete na tlačítko  , které je momentálně poslední vpravo. Pokud jsme se stabilizací spokojeni, přejdeme na další krok (Jodeau et al., 2022).

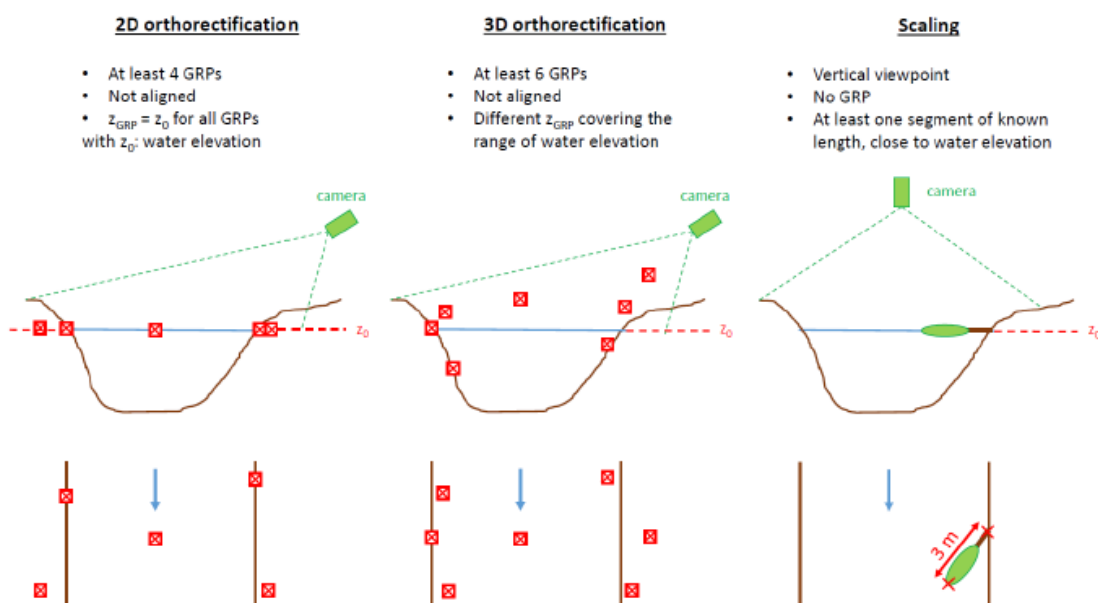
### 3.2.6 Transformace snímků

Následným krokem je transformace snímků ortorektifikací, pro který software nabízí dvě metody (obrázek 10):

**Kompletní ortorektifikace** – Metoda, používající se, pokud je zdrojové video zkreslené perspektivními vlivy, tedy například, že je natočeno z boční strany, třeba z břehu koryta, mostu nad řekou atd. Pro tento typ záznamu je třeba provést kompletní ortorektifikaci na základně referenčních bodů. Rozděluje se na 2D a 3D mód, které se liší potřebnými parametry, nebo také minimálním množstvím referenčních bodů.

**Scaling** – používá se, pokud videozáznam není zkreslen perspektivními vlivy, takže pokud je natočen z přímého svislého pohledu a bez zkreslení objektivu. Pro tuto metodu stačí zadat jednoduché měřítko v metrech, které nám program převede na pixely.

Tyto dvě metody nám umožňují provést 2D resp. 3D ortorektifikaci, nebo jednoduchý scaling, záležící na úhlu a pozici kamery a také na pozici referenčních bodů (obrázek 10).



Obrázek 10: Vyňatý obrázek metod transformací snímků z Fudaa-LSPIV Version 1.9.2 User Manual.

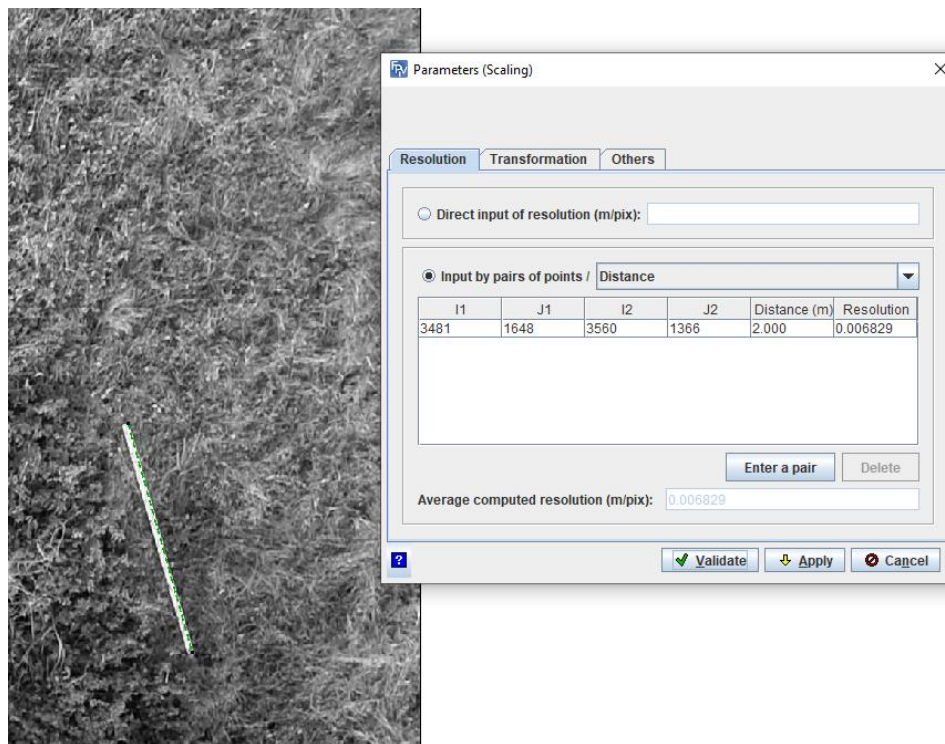
Protože videozáznam je pořízen za pomoci bezpilotního letadla se svislým pohledem, použijí metodu **Scalingu**. Proto přejdu do nabídky **Orthorectification > Orthorectification mode**, kde vyberu políčko **Scaling** a výběr potvrdím tlačítkem **Validate**.

Dále si otevřu opět okno nastavení parametrů scalingu pomocí nabídky **Orthorectification > Scaling > Parameters**. Vyskočí okno, ve kterém mohu v první záložce **Resolution** rovnou napsat přepočet rozlišení metru na pixel, nebo mohu vybrat minimálně jeden pár referenčních bodů, u kterých zadám koordináty, nebo body manuálně zaznačit v grafickém náhledu, čímž se mi vypočítá vzdálenost mezi nimi.

Jelikož jsme před pořizováním videozáznamu umístili na pravý břeh nivelační lať, která byla vysunuta na délku dvou metrů, můžeme tedy použít konce latě jako referenční body, které si manuálně definujeme, když vybereme možnost **Input by pairs of points**.

Pro zlepšení přesnosti je možné si náhled přiblížit pomocí nástroje **Zoom**. S ikonou lupy  si místo na snímku přiblížíme a klikneme na tlačítko **Enter a pair** (obrázek 11). Pro zlepšení přesnosti je možné si náhled ještě více přiblížit pomocí nástroje **zoom** s ikonou lupy a po označení je dobré si opět pohled resetovat do základní polohy  přes tlačítko **restore**. Oba najdeme v panelu grafických nástrojů. Poté přejdeme do grafického zobrazení náhledu a oba konce označíme.

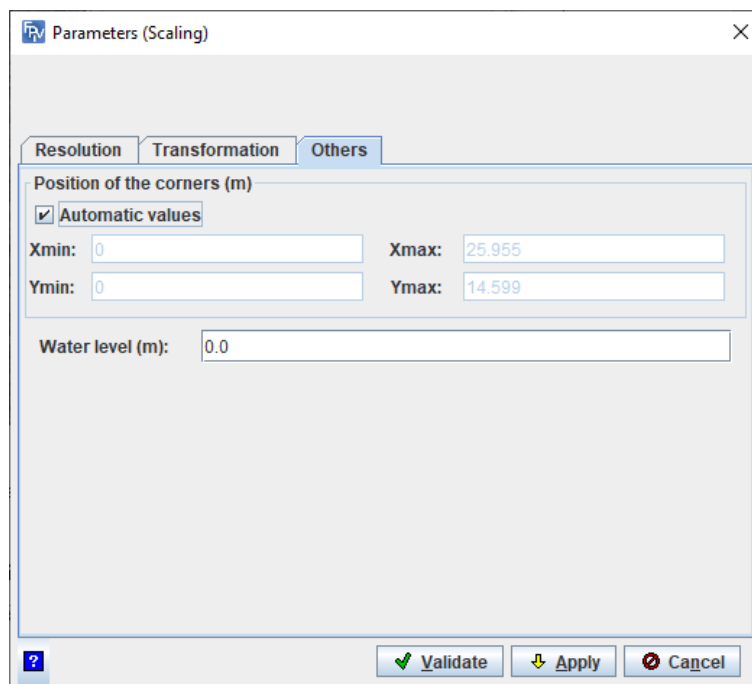
Program po definování bodů vyplní souřadnice na snímku, tedy od nulového bodu na rohu snímku, nikoliv reálné. Nyní je nutné zadat do sloupce **Distance (m)** reálnou délku objektu v metrech, tedy v tomto případě 2 metry.



Obrázek 11: Okno Parameters – Resolution při transformaci snímků

Dále přejdeme do druhé záložky **Transformation**, pro kontrolu, jestli je vybrána možnost **No translation/ rotation**, neboť v tomto případě není potřebná. Poté přejdeme na záložku **Others**, kde v tabulce **Positions of the corners (m)** se zadávají souřadnice rohů zájmového území, který je možno měnit, pokud chceme vytvořit výřez z původního videozáznamu. Jelikož chceme zachovat celou velikost snímku, zaškrtneme **Automatic values**, což automaticky označí rohy celého videozáznamu (obrázek 12).

V této záložce je rovněž možné zadat výšku hladiny vody, která je důležitá pro výpočet průtoku. Tu však nechám prázdnou, neboť výpočet průtoku není předmětem mé práce. Nakonec potvrdíme tlačítkem **Validate**.



Obrázek 12: Okno Parameters – Others při transformaci snímků

Proces ortorektifikace spustíme přes nabídku **Orthorectification > Transform the images**, proces opět trvá několik hodin a výsledkem jsou snímky připravené na samotný proces analýzy Large Scale Particle Image Velocimetry.

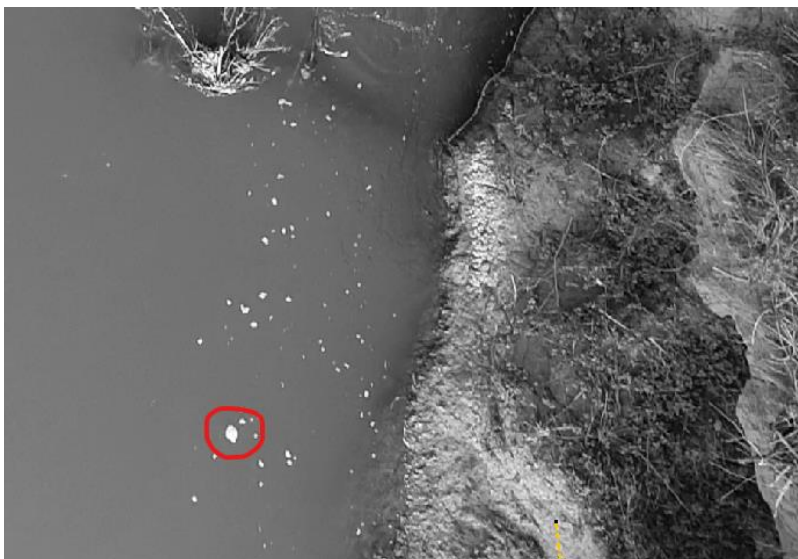
### 3.2.7 Analýza LSPIV

Software používá statistickou metodu křížové korelace na ortorektifikovaných snímcích k určení změny pozice, a tedy posunu částic viditelných na povrchu. Možnost je zde také měřit rychlosti ručně, pro porovnání s automatickou metodou a ověření její validity.

Provedeme tedy prvně několik manuálních výpočtů rychlosti přes nabídku **LSPIV analysis > Manual velocities calculation**, kde vyskočí okno pro manuální velocimetrii (obrázek 14). Nyní je možné si vybrat libovolný počet dobře viditelných částic, které budeme chtít změřit. Dobré je si vybrat částice z několika částí úseku pro lepší porovnání. Opět pro detailnější zobrazení je možno využít přibližování v panelu grafických nástrojů. Důležité je obměňování snímků a tím přechody v čase. Je možné si vybrat částici například ze snímku číslo 266. Změna aktuálního snímku je možná rovněž přes panel grafických nástrojů.

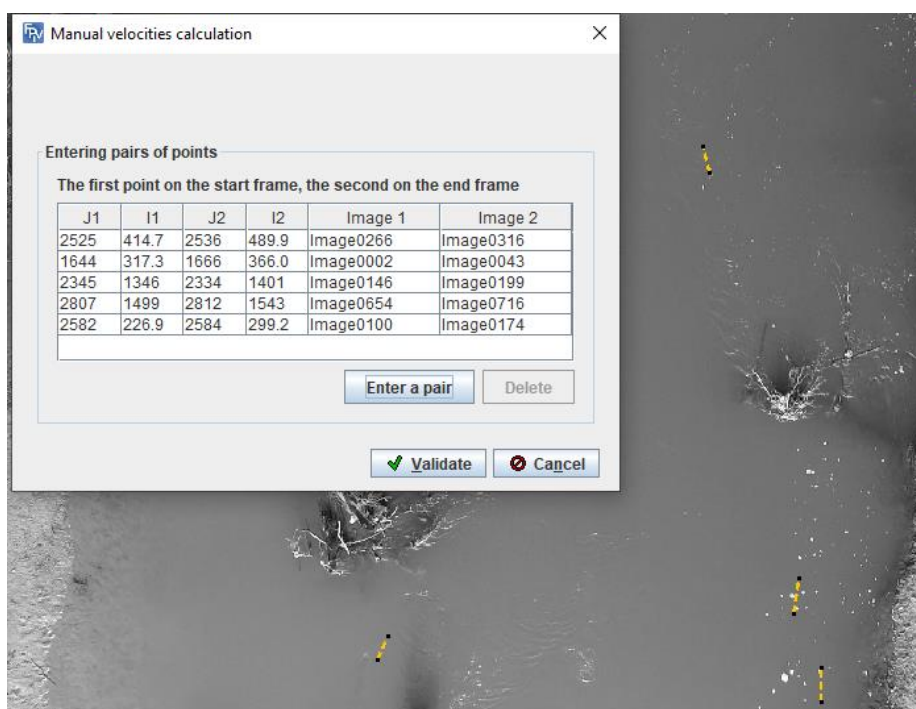
image0266\_transf.pgm

Pro účely ukázky jsem vybral dobře viditelný bod v pravé dolní části snímku číslo 266 (obrázek 13).



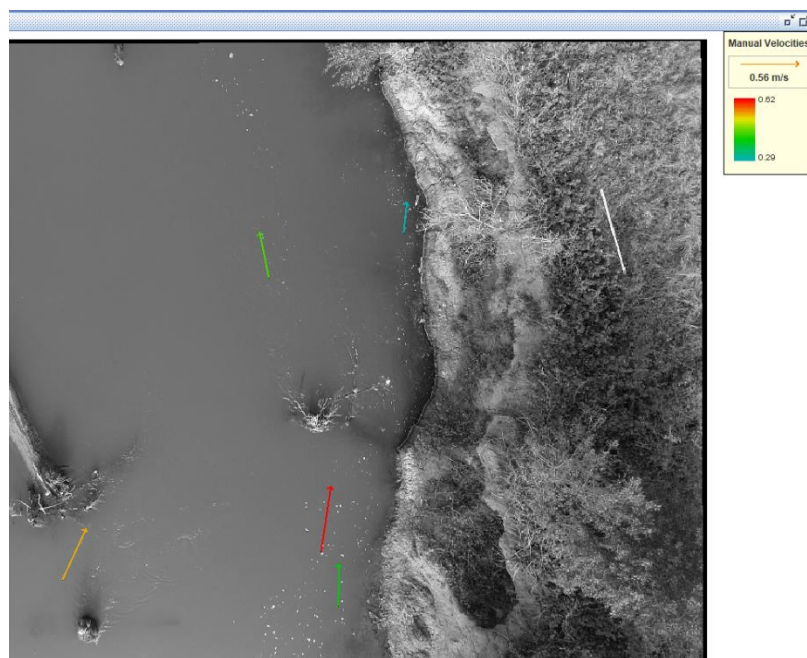
Obrázek 13: Přiblížený detail na dobře viditelnou částčku (v červeném kroužku) na snímku číslo 266

V okně **Manual velocities calculation** klikneme na tlačítko **Enter a pair** a příslušný bod označíme jedním kliknutím do jeho středu. Dále vybereme jiný obrázek, takový, aby byla změna pozice patrná a dobře viditelná, v tomto případě například obrázek číslo 316. Nyní podruhé klikneme na vybranou částici, která se v grafickém náhledu posunula. Mezi těmito body se vytvoří žlutá šrafovaná linie zobrazující rozdíl pozic. Počet takovýchto měřených částic je libovolný, dobré je také pro každou částici změnit rozmezí sekvence snímků, abychom měli dobrý časový rozptyl.



Obrázek 14: Okno manuálního výpočtu rychlostí

Když jsme s počtem manuálně vložených párů spokojeni, potvrdíme výběr tlačítkem **Validate**. Vytvoří se výsledek manuálního výpočtu rychlostí a v pravém horním rohu grafického zobrazení náhledů se objeví legenda s barevným vyznačením rychlostí, podle které se manuálně vybrané úseky zbarví (obrázek 15).



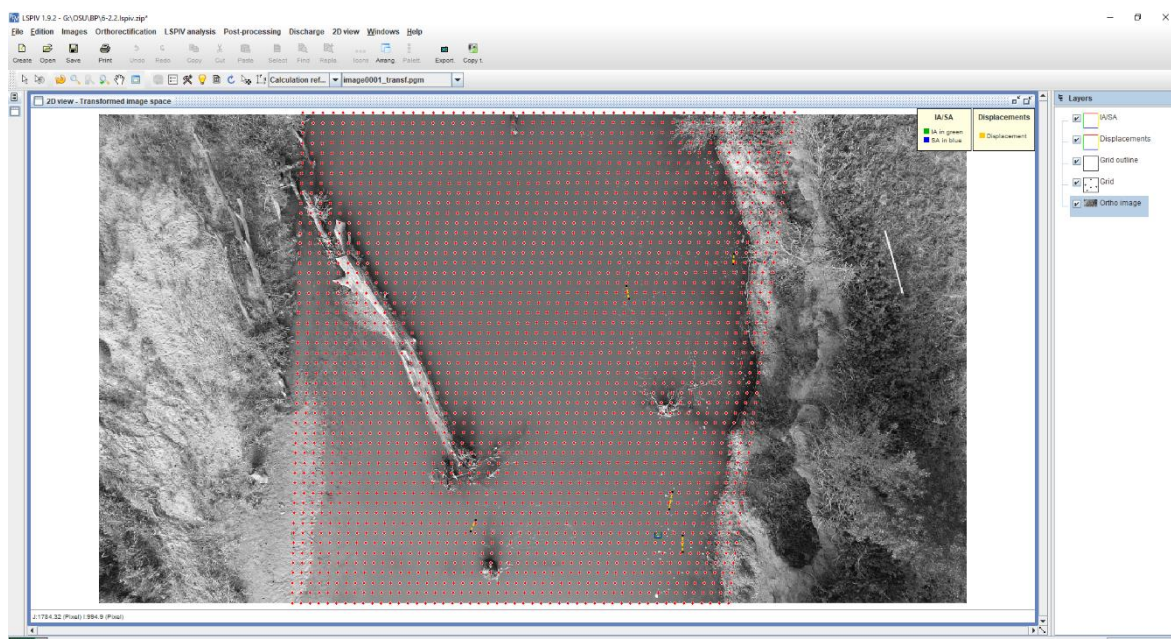
Obrázek 15: Výsledek manuální velocimetrie

Tou hlavní částí je ovšem automatický výpočet rychlosti, pro který je třeba vytvořit mřížku bodů pomocí nabídky **LSPIV analysis > Grid points > Define**. Nyní v grafickém zobrazení definujte čtyřmi body hranice měřeného území, tedy oblast toku. Jelikož oblast jde definovat pouze čtyřmi body, přetažení požadovaného území na břeh a přes hranice snímku nevádí.

Po zadání území vyskočí okno **Definition of the number of points in the grid**, do kterého zadáme počet bodů v segmentech mřížky (obrázek 16). První řádek definuje počet vertikálních bodů a druhý řádek počet horizontálních, takže pokud zvolíme 50 a 50 bodů, vytvoří se 2500 bodů. Nastavení potvrdíme tlačítkem **Validate**.

Obrázek 16: Okno nastavení počtu bodů v mřížce

Mřížka se vytvoří a zobrazí v grafickém náhledu červenými tečkami (obrázek 17). Na těchto bodech bude posléze provedena automatická kalkulace rychlosti.



Obrázek 17: Náhled snímků s vytvořenou mřížkou

Dalším krokem je definování parametrů automatického výpočtu rychlosti. Otevřeme nabídku **LSPIV analysis > Calculation parameters > Define**, což otevře okno **Calculation parameters** (obrázek 18), kde je nutné zadat parametry procesu LSPIV.

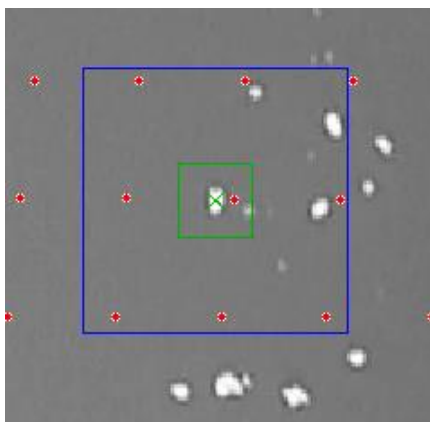
Obrázek 18: Okno nastavení parametrů LSPIV analýzy

V první tabulce **Interrogation area (IA)** se nastavuje **Area size**, tedy velikost oblasti hledání jednotlivých měřených částic. Tato oblast musí být dostatečně velká, aby se do ní

dané částice vlezly, ale přitom dostatečně malá, aby byla reprezentativní pro proudění (gradienty rychlosti zde musí být zanedbatelné). Upřednostňuje se velikost okolo 30 pixelů, číslo musí být sudé a čím větší hodnota, tím se výrazně doba výpočtu prodlužuje. **Center position** nám umožňuje na snímku v grafickém zobrazení náhledu si vybrat jednu částici, na které si mohu nastavení parametrů v grafickém zobrazení náhledů přirovnat. Nejlepší způsob je kliknout na tlačítko **Position...** a manuálně najít chtěnou částici, na kterou kliknu.

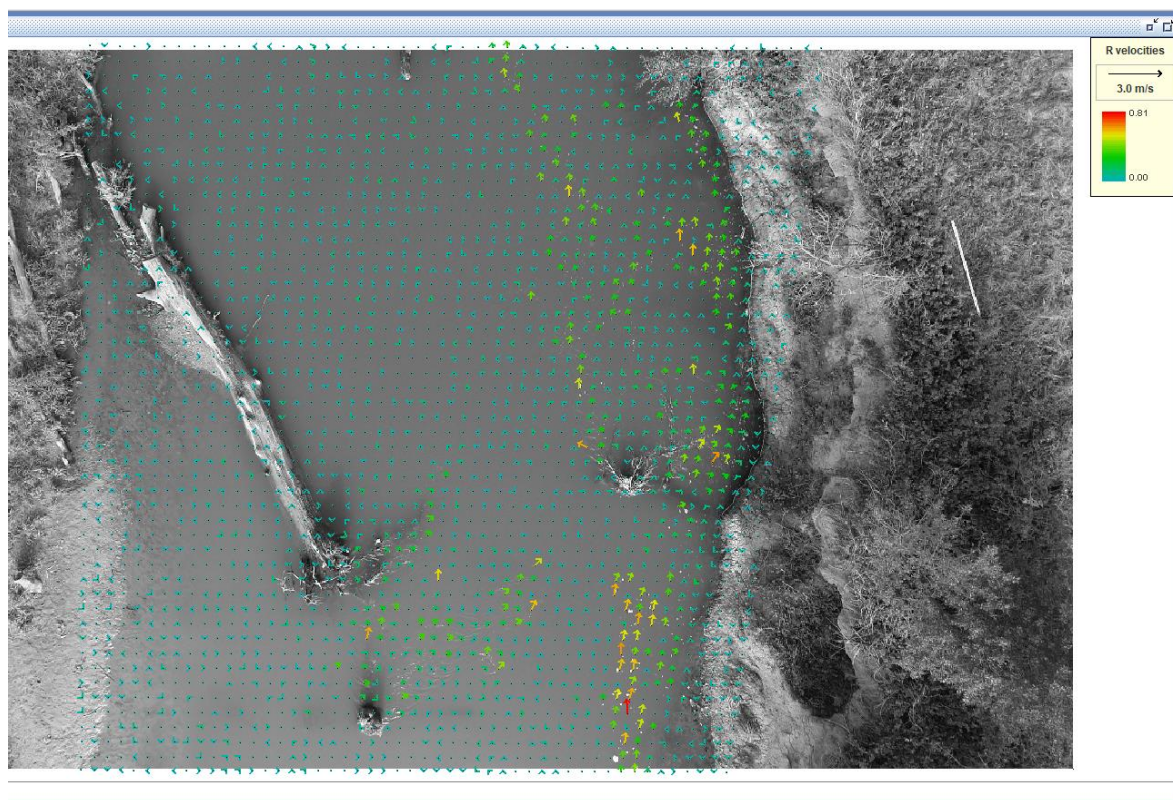
V následující tabulce **Search area** se zadávají parametry pro zjištění pozice částic na následujícím snímku, hodnoty musí být velké dostatečně na to, aby se zjistil opravdový směr proudu částic, ale opět dostatečně malé na to, aby se zabránilo detekci vychýlených hodnot a zkrátila doba výpočtu. V praxi se používá rozmezí okolo 5–50 pixelů a je užitečné začít s vyššími hodnotami k odhadu rychlosti a snižovat je. **Search area** je možná nastavit ve čtyřech směrech, možné je tedy upřednostňovat určitý směr ve vztahu ke směru proudění. S orientací pomáhá obrázek v pravé části tabulky, který ukazuje čísla řádků pro každý směr. Sice názvy v tabulce neodpovídají názvům stran v obrázku, ale platí, že číslo za písmenem **S** je pořadí řádku v tabulce.

Pro první výpočet tedy zadám všechny hodnoty na 50 pixelů, a zatím potvrdím tlačítkem **Apply**. Hodnoty se uloží a v ten moment se v grafickém zobrazení náhledu objeví náhled zadaných parametrů v místě vybrané částice (obrázek 19). Zelený čtverec s terčem zobrazuje nastavený **Area size** a modrý čtverec **Search area**, ve které bude program hledat stejnou částici na následujícím snímku. Jak je vidno, tato oblast je zbytečně velká, neboť částice se posune jen o pár cm, ovšem pro první pouze náhledový výpočet je lepší mít předimenzované hodnoty.



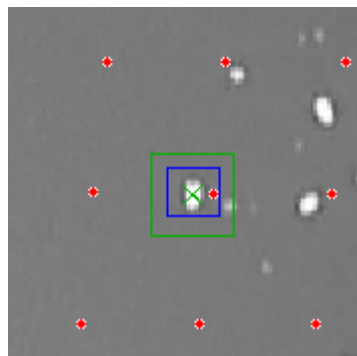
Obrázek 19: Detail na náhled se zobrazenou Area size a Search area

Pro vytvoření náhledu zmáčknu tlačítko **Preview...**, čímž se udělá výpočet LSPIV pro jeden snímek, který je momentálně vybraný v grafickém zobrazení náhledu (obrázek 20).



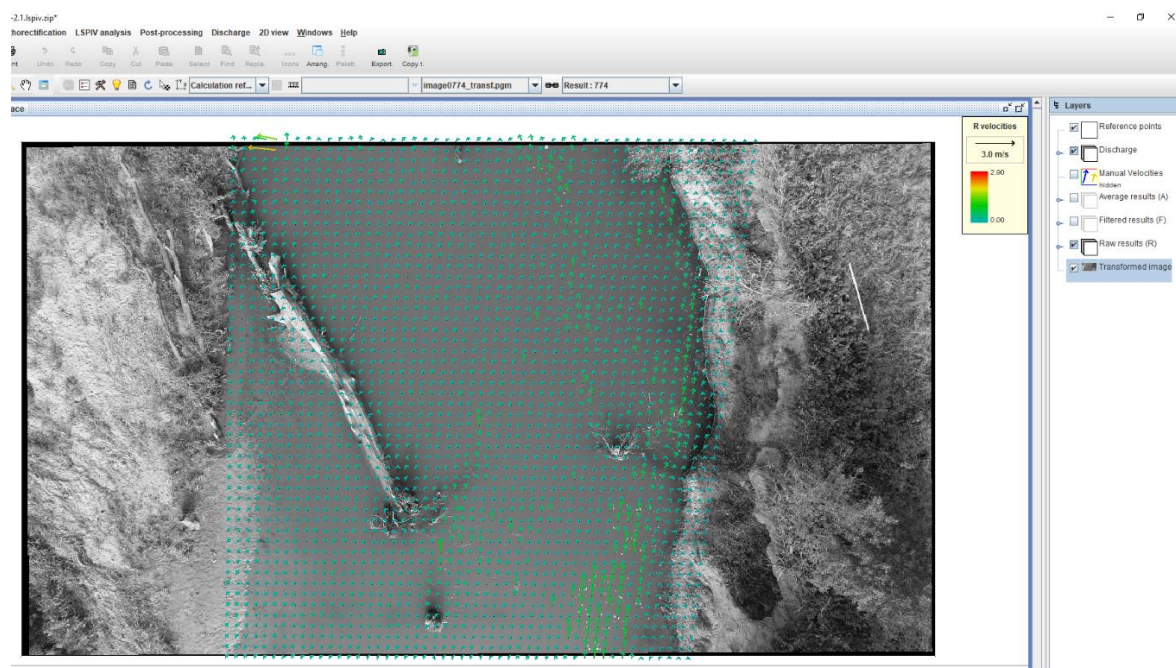
Obrázek 20: Náhled možného výsledku při zadaných hodnotách

Výsledný náhled v pravém horním rohu zobrazí legendu, na které je vidět, že nejvyšší rychlost proudu software zaznamenal 0,81 m/s. Proto **Search area** nastavím na nejnižší doporučené hodnoty, tedy 5 pixelů, což se v tomto měřítku rovná 2,05 m/s. První řádek, tedy S1 ovšem nastavím na 3 pixely, neboť v tomto případě vektor směřuje proti proudu řeky, tedy do směru, který považuji za marginální. Výběr potvrdím tlačítkem **Apply**, načez se mi také změni náhled parametrů (obrázek 21). Pro kontrolu se ještě provede jedno náhledové měření a pokud se hodnoty výrazně nezměnili, je vše v pořádku. Proto celé nastavení potvrdím tlačítkem **Validate**.



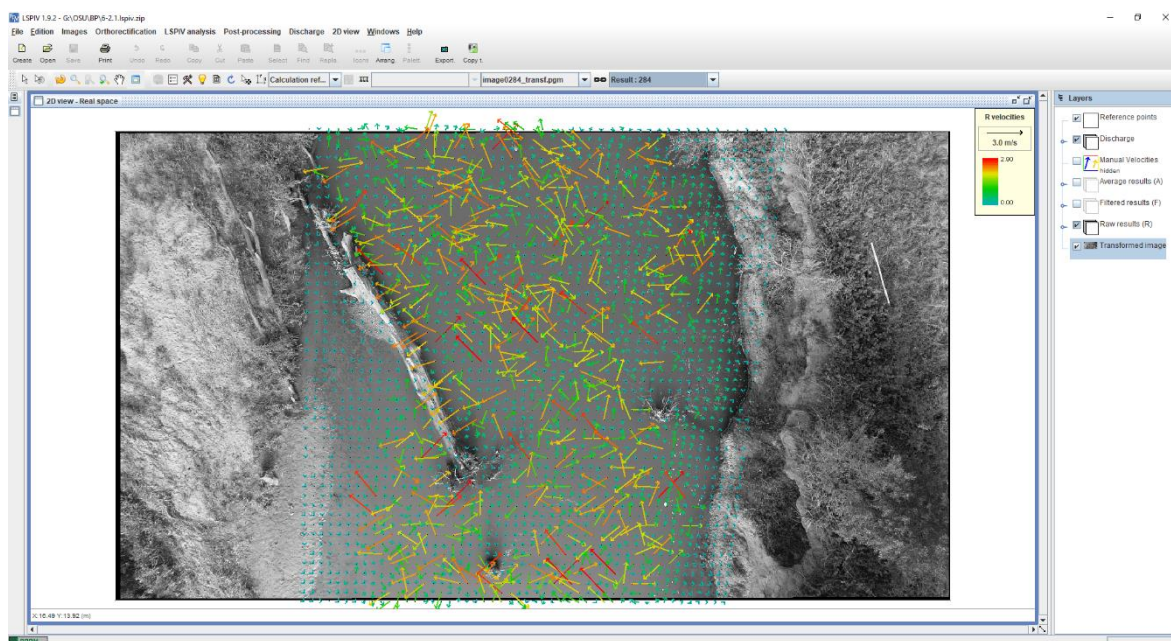
Obrázek 21: Detail na náhled s výslednou Area size a Search area

Nyní je třeba přejít k samotnému procesu výpočtu LSPIV v nabídce **LSPIV analysis > Calculation of the instantaneous results**. Samotný proces zabere na mém počítači okolo jedné hodiny. Výsledkem je surový nefiltrovaný výpočet pro každý snímek zvlášť. V panelu grafických nástrojů je možné mezi nimi přecházet. Dobrý příkladem pěkného výsledku je např. poslední snímek, tedy číslo 774 (obrázek 22).

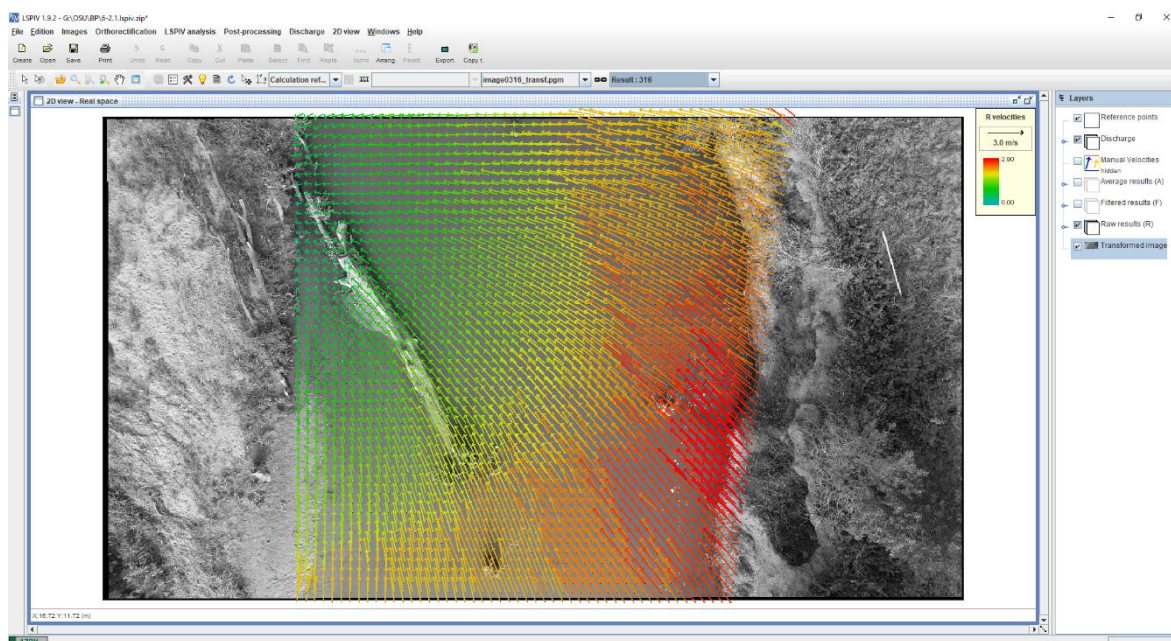


Obrázek 22: Výsledný zpracovaný snímek číslo 774

Při procházení snímků se občas objeví několik anomálií (obrázek 23), způsobené například pohybem obrázku při ne zcela dokonalé stabilizaci (obrázek 24), které je nutno pro správnou interpretaci odstranit pomocí statistické metody (viz následující kapitola).



Obrázek 23: Anomálie výsledku

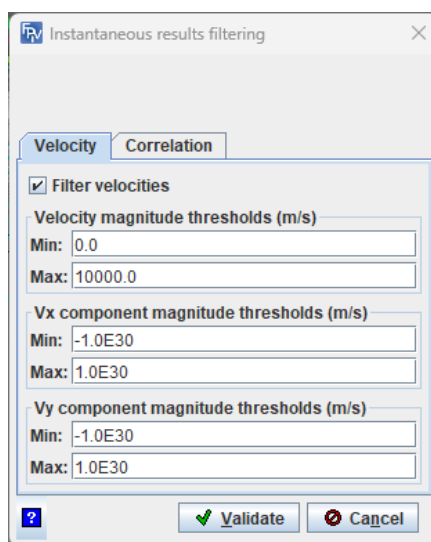


Obrázek 24: Anomálie výsledku, možná způsobená pohybem kamery

### 3.2.8 Post-processing snímků

Poslední částí úpravy snímků před výsledným zobrazením je vyfiltrování extrémů a anomálií vytvořených při samotné LSPIV analýze chybným výpočtem, nebo chybným rozpoznáním pohybu, například když se snímek nepatrně pohne vlivem ne zcela dokonalé stabilizace snímků nebo ortorektifikace. Proto přejdeme do nabídky **Post-processing** > **Instantaneous**

**results filtering.** Zobrazí se okno se záložkami **Velocity** a **Correlation** (obrázek 25). Právě v záložce Velocity je možné si nastavit prahové hodnoty rychlosti, se kterými budu pracovat. K tomuto je potřeba zkontrolovat, jestli je zaškrtnutá funkce **Filter velocities** a poté nastavit **Velocity magnitude thresholds**, tedy hned první dvě hodnoty v okně. Proces filtrování není nikterak časově náročný, tudíž je možno zkoušet více hodnot a vybrat ty nejlepší.



Obrázek 25: Okno filtrování výsledků

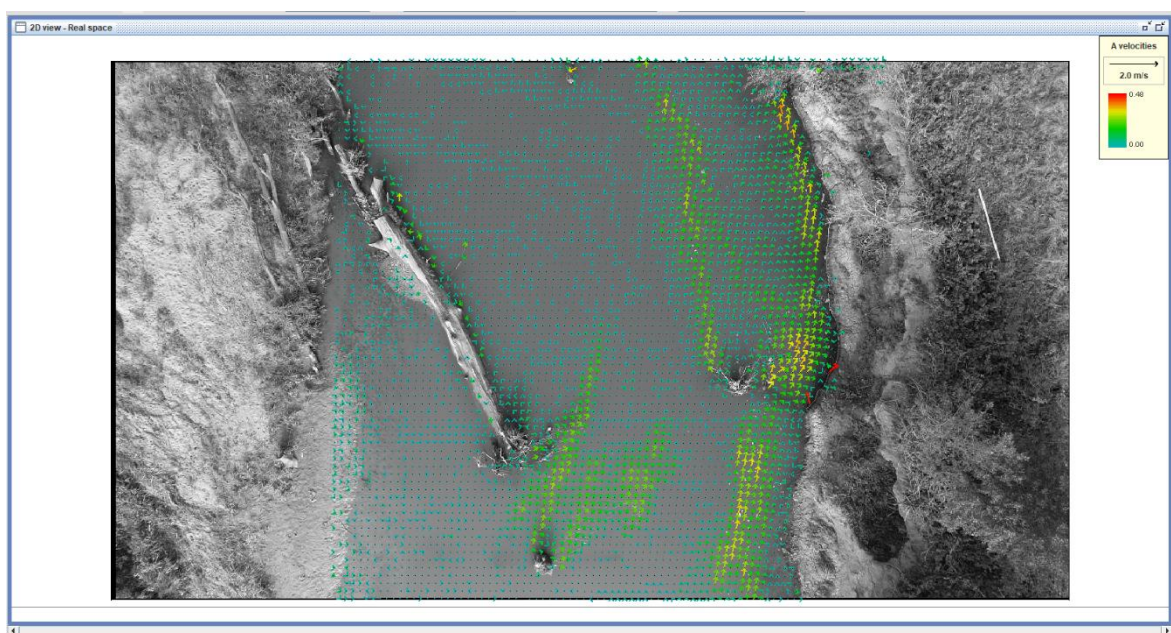
Pomocí zvýšení hodnoty minimálního prahu rychlosti jdou vyfiltrovat výsledky, které jsou statické, nebo téměř statické v místech, kde téměř žádný proud není a také na břehu, kde se nachází body měření z mřížky vytvořené při analýze LSPIV. Hodnota by měla být malá, aby se zachovalo co nejvíce pohybů v toku, ale zase velká dostatečně na to, aby byly vyfiltrovány výsledky z břehu. Pro tento projekt jsem vybral minimální hodnotu 0,03.

Snížení hodnoty maximálního prahu rychlosti vyfiltruje nežádoucí výsledky způsobené chybným výpočtem v případech již popsanými na předchozí stránce. K hodnotě, kterou zadáme, mohou pomoci výsledky manuální velocimetrie, u které je vyhodnocena i maximální rychlost manuálně zadaných vzorků v legendě. Předpokládám, že jsem měřil v jednom z míst s nejsilnějším proudem, nejvyšší rychlost v manuální velocimetrii vyšla 0,62 m/s. Budu tedy předpokládat, že nejvyšší rychlost proudu nebude zásadně vyšší, a tak vyberu maximální hodnotu 1,2.

Po nastavení prahů rychlostí je možné změnit v záložce **Correlation** minimální a maximální práh korelace. Minimální hodnota se nastavuje podle chování sledovaných částic. Vývojáři softwaru doporučují nastavit hodnotu kolem 0,7 pokud částice zachovávají tvar, a hodnotu kolem 0,4 pokud se částice deformují, například důsledkem turbulentního proudu, pěněním

atd. Maximální hodnota vylučuje falešně naměřené rychlosti například na březích, hranicích snímku, nebo pohyby odrazů světla, stínů apod. Výchozí hodnota je 0,98. Tyto hodnoty v tomto případě ponechám. Vše opět potvrdím tlačítkem **Validate**, čímž se zahájí proces filtrování obsahu všech snímků.

Výsledné snímky budou vypadat poněkud chaoticky, což je pouze dočasné, nyní zbývá aktivovat proces Průměru filtrovaných okamžitých výsledků přes **Post-processing > Filtered instantaneous results average**. Pokud nechci z procesu vyloučit nějaký specifický snímek/snímky, stačí kliknout na tlačítko **Validate** a software vytvoří již finální výsledek zprůměrovaných rychlostí ze všech zvolených snímků (obrázek 26).



Obrázek 26: Konečný zfiltrovaný náhled výsledku

Sice výsledek stále obsahuje několik chybných vektorů, ale jinak je dostačující pro další zpracování a interpretaci.

## 4 VÝSLEDKY A DISKUSE

Říční dřevo má opravdu veliký vliv na morfologii koryta, primárně erozním působením, který se projevuje vznikem tůní pod vývraty kmenů v korytě řeky vlivem vychýlení proudnice toku (Gurkovský & Galia, 2019). Dokonce i jednotlivé velké padlé stromy lze považovat za schopné lokálně zvětšit objem tůní (Kail, 2003). Kmeny také mohou naopak působit protierozně, tedy když kmen brání a oddaluje erozi konkávního břehu, pokud se nachází u nárazového břehu. Za kmeny může docházet k tvorbě proudového stínu a mechanické turbulenci (Gurkovský & Galia, 2019).

Pořízené letecké videozáznamy, natočené dronem za visu pohledem svisle dolů, byly importovány do softwaru Fudaa-LSPIV, kde za pomoci definované sítě bodů, byly vypočteny směry a rychlosti povrchového proudění toku pro každý jednotlivý snímek z videozáznamu. Poté byly všechny zprůměrovány do jednoho konečného výsledku, podle kterého je možné finálně zjistit, jak říční dřevo ovlivňuje právě proudění v korytě řeky.

### 4.1 1. záznam – 7. 10. 2022

První záznam ze dne 7. 10. 2022 ukazuje nejrychlejší proudění na pravé straně toku, které je způsobeno levotočivou zákrutou před zvoleným úsekem, a tedy tvoří pravý nárazový břeh, zatímco levý břeh je nánosový. Maximální rychlost proudu software detekoval 0,48 m/s.

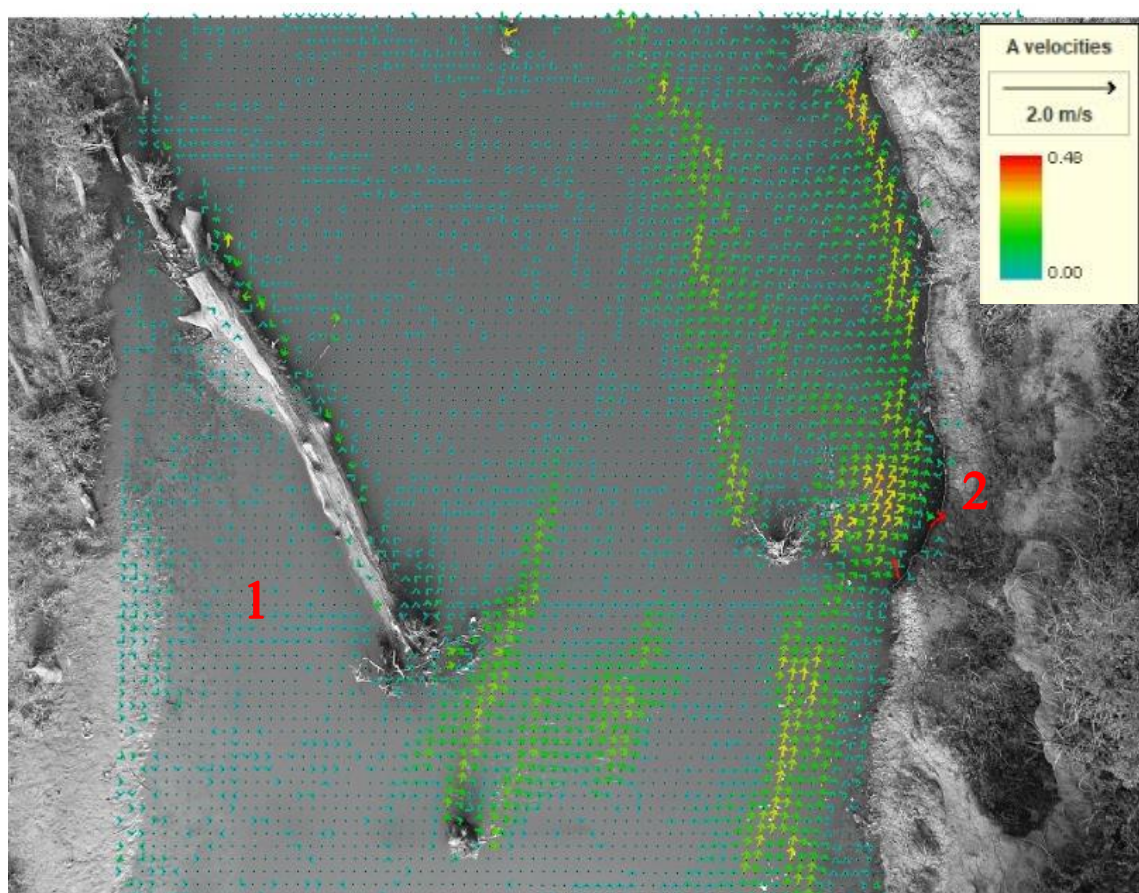
Pro zpracování byly použity v softwaru hodnoty pro velikost oblasti hledání částic (Area size) 28 pixelů a pro velikost oblasti hledání totožných částic v následujícím snímku (Search Area) byly parametry nastaveny na Sim: 3 pix, Sip: 5 pix, Sjm: 5 pix, Sjp: 5 pix. Po samotné LSPIV analýze byly ještě prahy filtrování nastaveny na minimální hodnotu 0,01 m/s a maximální 1,2 m/s.

Na snímku vlevo leží v korytě spadlý kmen, před kterým je jasně viditelný nános materiálu. Z výsledku je vidět, že kmen vytvořil proudový stín, za ním již nános není, a proto je možné, že právě spadlý kmen zablokováním části koryta tento nános způsobil (číslo **1** na obrázku 27).

Dále je možné vidět u pravého břehu kus zaseklé dřeviny tvořící mechanickou turbulenci, která proud směřuje do boků. Právě na této metodě znázornění velocimetrie je dobře vidět, jak proudnice pokračují do břehu a narážejí do něj. Rychlost proudu je umocněna zúžením lokálního proudu kmenem, a tudíž zhuštěním proudnic, podle Venturiho efektu,

který vychází z Bernoulliho rovnice. Jednoduše řečeno jde o jev, kdy například proud v korytě teče určitou rychlostí s určitým statickým tlakem. Pokud se koryto zúží, vzroste dynamický tlak tekutiny a statický tlak klesá, důsledkem čehož je zrychlení proudu. Stejný jev je možné vypožorovat například na zvýšení rychlosti větru v oblasti úzkých koridorů hor, třeba horským sedlem (Keller et al., 2019).

Tento jev by mohl být důvod, proč je v těchto místech břeh více erodován, neboť může docházet k většímu odnosu materiálu vlivem vyšší rychlosti a dynamického tlaku. (číslo 2 na obrázku 27).



Obrázek 27: Oříznutý výsledek z 1. videozáznamu pořízeného dne 7.10.2022

#### 4.1 2. záznam – 7. 10. 2022

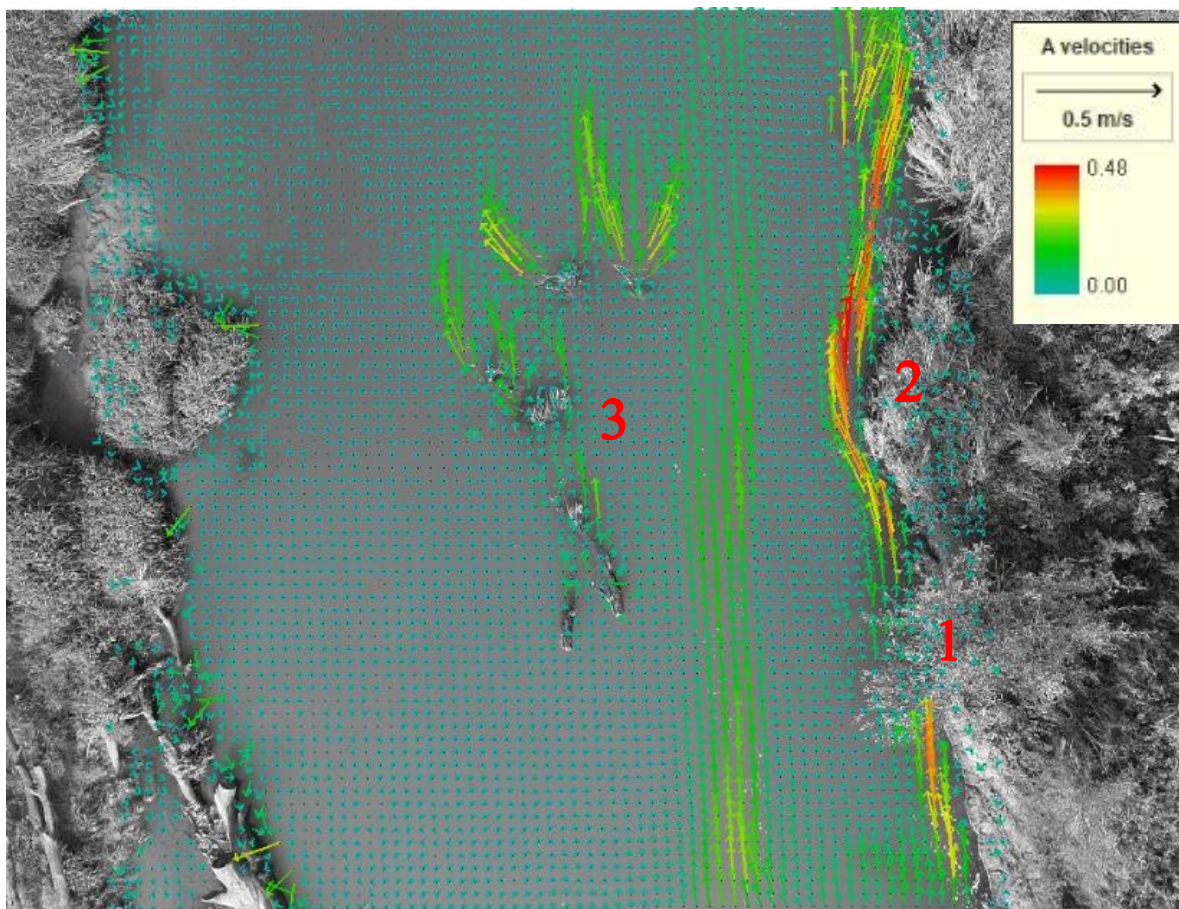
Druhý videozáznam je úsek toku posunutý směrem po proudu. Vlevo dole lze vidět část spadlého kmenu z prvního videozáznamu. Jednotlivé ukazatele směrů a rychlostí proudění se na tomto výsledku zdají být větší, neboť software výsledek vytvořil s jiným měřítkem rychlostí, spojitá barevná stupnice však zůstává nezměněna. Bohužel se mi nepodařila

měřítka rychlostí manuálně nastavit, ani zjistit, zdali to je v aktuální verzi softwaru možné. Maximální rychlost proudu software detekoval 0,48 m/s.

Pro zpracování druhého výsledku byly použity hodnoty pro Area size 30 pixelů, pro Search Area byly parametry nastaveny na Sim: 4 pix, Sip: 5 pix, Sjm: 5 pix, Sjp: 5 pix. Prahy filtrování byly nastaveny na minimální hodnotu 0,01 m/s a maximální 0,6 m/s.

Rychlost proudu je opět největší u pravého, tedy nárazového břehu. Část měření zakrývá porost, tudíž touto metodou velocimetrii v zákrytu zjistit nemůžeme (číslo **1** na obrázku 28). Největší rychlost proud dosáhl v místě, kde kousek břehu vyčnívá směrem do koryta, a tedy vytváří překážku a zužuje v tomto místě koryto, vytvářeje opět Venturiho efekt (číslo **2** na obrázku 28).

Říční dřevo, které leží uprostřed koryta, opět tvoří blokádu, vytváří turbulentní proudění a vychyluje proudnice. Jedná se však o poměrně malé objekty, které navíc ve své poloze nemají téměř vliv na utváření morfologie koryta v oblasti břehů (číslo **3** na obrázku 28).



Obrázek 28: Oříznutý výsledek z 2. videozáznamu pořízeného dne 7.10.2022

#### 4.1 3. záznam – 29. 8. 2022

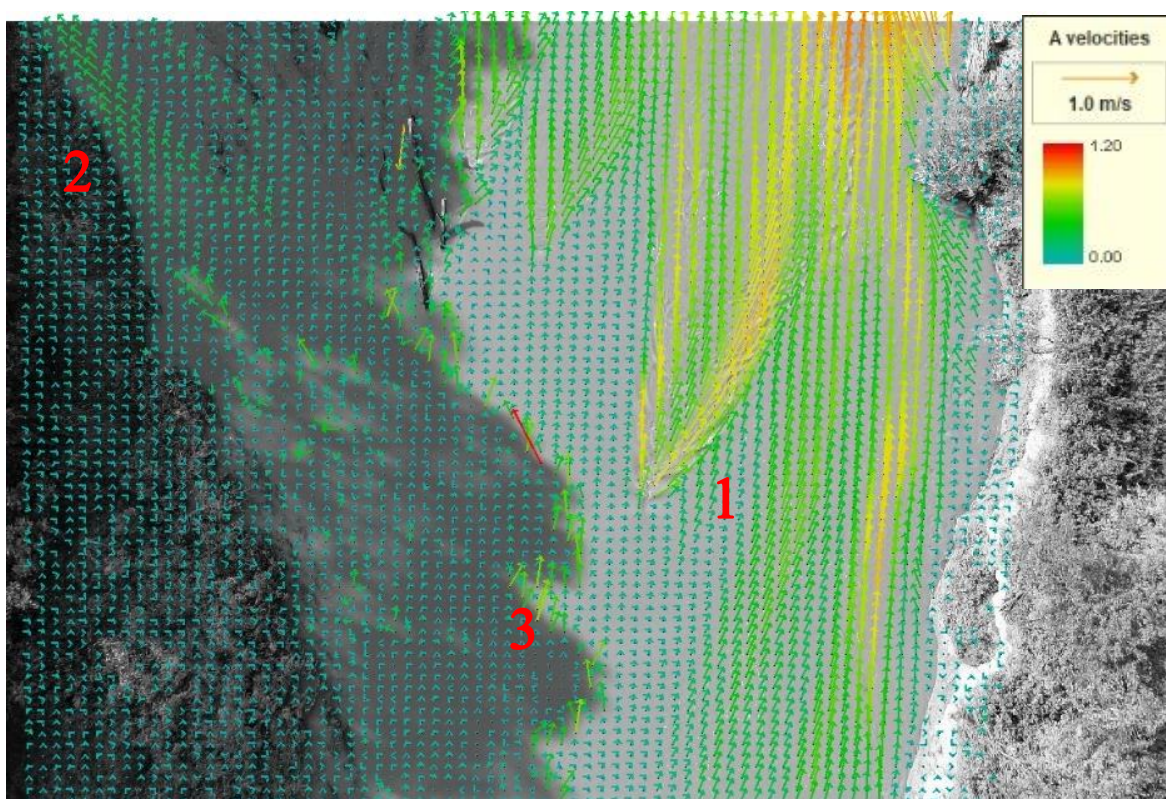
Poslední analyzovaný záznam je ze dne 29. 8. 2022 a pořízen byl zhruba v pozici prvního videozáznamu, ale ve větší výšce. Hned na první pohled je patrné, že se jedná o období zvýšeného průtoku. Maximální rychlost proudu software detekoval 1,2 m/s. Proud je výrazně silnější a jsou zřetelně vidět místa, kde se pod vodou nacházejí vyvýšené části kmenů a zbytků stromů, které jsou dobře vidět na předešlých výsledcích. Tyto místa tvoří turbulentní oblasti, které mají za následek vyšší rychlosti proudění také větší prostorový dosah (číslo **1** na obrázku 29).

Pro zpracování posledního výsledku byly použity hodnoty pro Area size 26 pixelů, pro Search Area byly parametry nastaveny na Sim: 3 pix, Sip: 4 pix, Sjm: 4 pix, Sjp: 4 pix. Prahy filtrování byly nastaveny na minimální hodnotu 0,04 m/s a maximální 2 m/s.

Možným pozitivním faktorem na vytvoření druhého, levobokého proudu, který existuje při zvýšeném průtoku, je právě velký kmen viditelný na 1. záznamu (obrázek 27). Tento kmen

by mohl být důvodem vytvoření právě tohoto levého proudu, neboť v den pořízení záznamu pod hladinou tvoří zátaras hlavnímu proudu v téměř polovině šířky hlavního koryta řeky a odvádí ho na levou stranu toku (číslo **2** na obrázku 29). Morfologii tohoto levého vedlejšího proudu je možné vidět na leteckém snímku s menším měřítkem v předešlé části práce (obrázek 1).

Nedostatkem tohoto videozáznamu je čas pořízení, neboť se zde objevuje stín stromů, se kterým si software neumí poradit jinak než ho brát jako součást proudu. Proto v těchto místech dochází k falešným výsledkům v důsledku pohybu dronu, tudíž i záznamu (číslo **3** na obrázku 29).



Obrázek 29: Oříznutý výsledek z 3. videozáznamu pořízeného dne 29.8.2022

## ZÁVĚR

Říční dřevo má opravdu značný vliv na morfodynamiku toku, jak v erozní funkci, například urychlováním proudění poblíž břehu, a tudíž i odnosu materiálu, tak také ve funkci protierozní, když například spadlý kmen utvoří bariéru a zahradí tak část toku, kde může vytvořit nános materiálu, který by mohl dokonce odklonit tok, či vytvořit úplně nové, vedlejší koryto, které se ho snaží obejít.

Použití metody velkoměřítkové obrazové velocimetrie částic umožňuje velice jednoduše zjistit rychlost a směr proudění ve vybraném úseku toku. Potřebuje však, aby v korytě plavaly nějaké částičky, například spadlé listí, kousky pěny apod. Jen tak lze zaručit, že software Fudaa-LSPIV dokáže pohyb rozeznat a správně ho vyhodnotit.

V našem případě nebylo třeba částičky uměle do řeky vhazovat, neboť jich v toku bylo dostatečné množství pro zpracování záznamu. Ovšem pro použití v jiných podmínkách by mohlo být sypání částíček do koryta nezbytné. Možné by také bylo porovnání kvality dvou výsledků, při kterém by v jednom případě na stejném místě ve stejný čas byly částičky vysypány do řeky a druhý výsledek by byl zpracován bez nich.

Pro budoucí použití této metody za pomoci softwaru Fudaa-LSPIV je vhodné pro pořizování videozáznamů zvolit čas kolem poledne, aby byl stín objektů kolem koryt co nejmenší a tím se vyvarovat chybným a falešným pohybům, které software vyhodnotí v okolí přechodu ze stinných míst na odkryté. Ze stejného důvodu by bylo dobré vybrat bezvětřný den, nebo alespoň vítr co nejklidnější. Výsledný záznam by měl být co nejstabilnější pro odstranění chybných výsledků při pohybu záběru.

Fudaa-LSPIV dokáže vyexportovat číselné výsledky, například do Excel tabulky, které by mohli v budoucnu být použity třeba v GIS softwarech. Bohužel neobsahují reálné souřadnice, pouze souřadnice definované nulovými body na rohu snímku, tudíž je třeba mít na záznamu několik vlíčovacích bodů se známou reálnou pozicí, podle kterých půjde snímek a samotné výsledky přenést na správnou pozici na mapě.

## RESUMÉ

Tato bakalářská práce směřuje k objasnění a interpretaci dopadu říčního dřeva na morfodynamiku vybraných úseků řeky Odry. Využívá letecké videozáznamy, zpracované prostřednictvím softwaru Fudaa-LSPIV.

Teoretická část práce pojednává o částicové obrazové velocimetrii, její velkoměřítkové varianty, samotného softwaru Fudaa-LSPIV, vlivu říčního dřeva na koryto a charakteristiku vybraného území. Praktická část obsahuje popis vytvoření videozáznamů, a práci se softwarem Fudaa-LSPIV skrz zpracování jednoho z konečných výsledků.

Výsledky prezentují tři zpracované snímky s uvedenými parametry, na kterých jsou popsány některé jevy, které přímě souvisí s říčním dřevem. Mezi ně patří třeba spadlý kmen, který zahradil část koryta a tím vytvořil nános materiálu a mohl se podílet na vytvoření bočního proudu, který kmen obeplovává zleva. Dále například kusy dřevin uprostřed koryta, tvořící mechanické překážky proudu, za kterými se tvoří turbulentní proudění, které může být umocněno zvýšenou rychlostí proudu a průtokem. Nebo taktéž kus dřeviny blízko pravého břehu, který zapříčiňuje zhuštění proudnic u břehu a možné zvýšení erozního účinku proudu na samotný břeh, který je v těchto místech výraznější. Právě tyto jevy mohou být příklady vlivu říčního dřeva svou existencí na morfodynamiku koryt toků.

## SUMMARY

This bachelor thesis aims to clarify and interpret the impact of river wood on the morphodynamics of selected sections of the Odra River. It uses aerial video recordings, processed by the Fudaa-LSPIV software.

The theoretical part of the thesis deals with particle image velocimetry, its large-scale variant, the Fudaa-LSPIV software itself, the influence of river wood on the channel and the characterization of the selected area. The practical part includes a description of the creation of the video recordings, and the operation of the Fudaa-LSPIV software through the processing of one of the final results.

The results are presented by three processed images with the given parameters, where some phenomena directly related to river wood are described. These include, for example, a fallen log that has obstructed part of the channel and thus created a deposit of material and may have contributed to the creation of a lateral current that encircles the log from the left. Also, for example, pieces of wood in the middle of the channel forming mechanical obstacles to flow, behind which turbulent flow is created, which may be enhanced by increased flow velocity and discharge. Or also a piece of wood close to the right bank, which causes a compaction of the stream currents at the bank and a possible increase in the erosive effect of the stream on the bank itself, which is more significant at these locations. These phenomena may be examples of the influence of river wood by its existence on the morphodynamics of stream channels.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Adrian, R. J. (1991). Particle-Imaging Techniques For Experimental Fluid-Mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1), 261-304. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.23.1.261>
2. Brázdil, R., Tolasz, R., Dobrovolny, P., Elleder, L., Katos, V., Kotyza, O., Kveton, V., Macková, J., Müller, M., Štekl, J., & Valášek, H. (2005). *Historie počasí a podnebí v Českých zemích* (1. vyd). Masarykova univerzita v Brně.
3. Demek, J., & Mackovčín, P. (eds.). (2006). *Zeměpisný lexikon ČR* (Vyd. 2). AOPK ČR.
4. Ettema, R., Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1997). Particle-image velocimetry for whole-field measurement of ice velocities. *Cold Regions Science and Technology*, 26(2), 97-112. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(97\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(97)00011-6)
5. Fujita, I., & Hino, T. (2003). Unseeded and seeded PIV measurements of river flows videotaped from a helicopter. *Journal of Visualization*, 6(3), 245-252. <https://doi.org/10.1007/BF03181465>
6. Galia, T., Horáček, M., Ruiz-Villanueva, V., Poledníková, Z., & Škarpich, V. (2023). Large wood retention in a large meandering river: Insights from a 5-year monitoring in the Odra River (Czechia). *CATENA*, (224). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106973>
7. Gurkovský, V., & Galia, T. (2019). Vliv říčního dřeva na morfologické a sedimentologické parametry koryta na příkladu meandrujícího toku Odry. *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 26(1-2). <https://doi.org/10.5817/GVMS2019-1-2-34>
8. Hradecký, J., Dušek, R., Velešík, M., Chudaničová, M., Škarpich, V., & Lipina, J. (2016). Landscape of Ponds and a Preserved Meander Belt of the Odra River. In T. Pánek & J. Hradecký, *Landscapes and Landforms of the Czech Republic* (pp. 333-346). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27537-6\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27537-6_26)
9. Jodeau, M., Hauet, A., Coz, J., Bercovitz, Y., & Franck, L. (2017). Laboratory and field lspiv measurements of flow velocities using Fudaa-LSPIV a free user-friendly software. [https://www.researchgate.net/publication/315684488\\_Laboratory\\_and\\_field\\_lspiv\\_measurements\\_of\\_flow\\_velocities\\_using\\_Fudaa-LSPIV\\_a\\_free\\_user-friendly\\_software](https://www.researchgate.net/publication/315684488_Laboratory_and_field_lspiv_measurements_of_flow_velocities_using_Fudaa-LSPIV_a_free_user-friendly_software)
10. Jodeau, M., Hauet, A., Le Coz, J., Faure, J., & Bodart, G. (2022). Fudaa-LSPIV Version 1.9.2 User Manual. <https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv/files>

11. Kail, J. (2003). Influence of large woody debris on the morphology of six central European streams. *Geomorphology*, 51(1-3), 207-223.  
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00337-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00337-9)
12. Keller, L., Nejezchleb, M., Dvořák, P., Janíček, T., Jelínek, A., Dzvoník, O., Grotz, M., Havelka, R., Hodan, J., Mečiár, M., Kroufek, J., & Vecko, M. (2019). Základy letu – Teorie proudění. In *Učebnice pilota 2019: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost* (p. 135,177,178). Svět křídel.
13. Knápek, A. (2011). Vliv lidské přítomnosti na Poodří od pravěku do vrcholného středověku. *Poodří*, 14, 7-10.
14. Nývlt, D., Engel, Z., & Tyráček, J. (2011). Pleistocene Glaciations of Czechia. In J. Ehlers, P. Gibbard & P. Hughes, *Developments in Quaternary Sciences* (Volume 15, pp. 37-46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00004-0>
15. *Phantom 4 PRO/PRO+: User Manual V1.4*. (2017). DJI.  
[https://dl.djicdn.com/downloads/phantom\\_4\\_pro/20171017/Phantom\\_4\\_Pro\\_Pro\\_Plus\\_User\\_Manual\\_EN.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20171017/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_User_Manual_EN.pdf)
16. Sedláček, J., Kapustová, V., Bábel, O., & Sekanina, M. (2019). Initial stages and evolution of recently abandoned meanders revealed by multi-proxy methods in the Odra River (Czech Republic). *Geomorphology*, (333), Pages 16-29.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.027>
17. Tolasz, R., Míková, T., Valeriánová, A., & Voženílek, V. (2007). *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia* (1. vyd). Český hydrometeorologický ústav.