



Vybrané neinvazivní metody průzkumu rybničních hrází

certifikovaná metodika pro praxi

Václav David a kolektiv

Václav David a kolektiv

Vybrané neinvazivní metody průzkumu rybníčních hrází

certifikovaná metodika pro praxi

Metodika byla zpracována na pracovišti Fakulty stavební ČVUT v Praze v rámci řešení výzkumného projektu NAKI II DG16P02M036 “Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví”.



Vydalo ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2020

ISBN 978-80-01-06803-8

Kolektiv autorů:

Ing. Václav David, Ph.D. ¹⁾

doc. Ing. Josef Krása, Ph.D. ¹⁾

Ing. David Zumr, Ph.D. ¹⁾

Ing. Kateřina Černochová ^{1), 2)}

¹⁾ České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

²⁾ České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky

Odborní oponenti:

Ing. Stanislav Žatecký, Vodní díla – TBD, a.s.

Ing. František Pavlík, Ph.D., Státní pozemkový úřad

Metodika byla uznána osvědčením Odboru státní správy ve vodním hospodářství a správy povodí Ministerstva zemědělství České republiky pod č. j. 01/2021.

Obsah

1	Úvod	5
1.1	Cíl metodiky	5
1.2	Stručný popis metodiky a novost postupů	5
1.3	Uplatnění metodiky	6
1.4	Přínosy metodiky a ekonomické aspekty	6
2	Běžné metody průzkumu hrází	9
2.1	Výskyt nehomogenit	9
2.2	Deformace koruny hráze	9
2.3	Vývěry a lokalizované průsaky	10
2.4	Množství a kvalita drenážních vod	11
2.5	Vegetace na hrázích	11
3	Geofyzikální metody průzkumu hrází	13
3.1	Potenciál geofyzikálních metod pro průzkum zemních hrází	13
3.2	Přehled geofyzikálních metod využitých pro neinvazivní průzkum zemních hrází	14
3.3	Postup měření	19
3.4	Příklad geofyzikálního průzkumu zemní hráze	23
4	Využití metod dálkového průzkumu Země k průzkumu hrází	29
4.1	Parametry rybníků a jejich hrází, jež lze monitorovat prostředky dálkového průzkumu Země	29
4.2	Přehled metod a nástrojů dálkového průzkumu Země využitelných pro průzkum	30
4.3	Ukázka postupu získání a zpracování RGB dat	40
4.4	Ukázka postupu získání a zpracování IR dat	44
5	Závěr	49
6	Použitá literatura a zdroje	51
6.1	Literatura	51
6.2	Normy a předpisy (použité a související)	55
7	Seznamy	56

7.1	Použité zkratky	56
7.2	Seznam obrázků	57
7.3	Seznam tabulek	58

1 Úvod

Tato metodika vznikla jako výstup výzkumného projektu NAKI II DG16P02M036 “Údržba, opravy a monitoring hrází historických rybníků jako našeho kulturního dědictví“. Důvodem ke tvorbě této metodiky byla především potřeba představení moderních metod v souvislosti s možnostmi průzkumu rybníčních hrází. Rybníky se na území České republiky vyskytují již tisíc let. Největší množství jich bylo vybudováno v takzvané zlaté éře rybníkářství, která se datuje zejména do šestnáctého století, případně je zahrnována i druhá polovina století patnáctého a počátek století sedmnáctého. Z toho ovšem mimo jiné vyplývá, že hráze rybníků jsou velmi starými konstrukcemi, které byly budovány technologiemi dostupnými v době jejich vzniku. Množství dochovaných rybníků z té doby je bezpochyby dokladem obdivuhodných schopností tehdejších stavitelů. Na druhou stranu je třeba si uvědomit, že tehdy dostupné technologie měly svá omezení a limity ve srovnání se současnou úrovní znalostí a technologiemi dostupnými v dnešní době. Dalším důležitým aspektem je skutečnost, že po dobu své dlouhé existence jsou zemní tělesa rybníčních hrází vystavena působení různých vlivů, které mohou způsobovat jejich narušení. Jedná se především o vlivy fyzikální (filtrační proudění), chemické (voda v tělesech hrází) či biologické (působení flory i fauny). Díky tomu roste riziko poruch zemních hrází, které mohou mít až katastrofální důsledky. Detailní průzkumy hrází jsou potřebné v případě podezření na vznik nebo existenci poruchy, aby bylo možné předejít jejich rozšiřování a provést včasnou sanaci. K tomuto účelu lze využít některé moderní technologie, díky nimž je možné provést kvalifikovanější posouzení rozsahu poruchy či problému a navrhnout nejvhodnější způsob řešení. Tato metodika představuje vybrané technologie, které byly testovány v rámci řešení uvedeného projektu.

1.1 Cíl metodiky

Cílem této metodiky je především představit vybrané pokročilé technologie využitelné k průzkumu hrází rybníků a malých vodních nádrží. Je ovšem zapotřebí uvést, že se jedná o technologie, které nejsou s ohledem na jejich náročnost široce aplikovatelné a těžiště jejich využití leží především u specifických případů, u kterých není možné nebo dostatečné využít běžných postupů monitoringu či kontroly hrázových objektů. Zmínit je nutno i skutečnost, že představované metody mají svá omezení a že není možné, aby je využívaly osoby bez potřebné erudice.

1.2 Stručný popis metodiky a novost postupů

Metodika zahrnuje především dvě hlavní části zaměřené na nové nebo dosud málo využívané technologie. Těmi jsou využití geofyzikálních metod (GF) a metod dálkového průzkumu Země (DPZ). Konkrétně se v případě geofyzikálních metod

jedná o elektrickou rezistivní tomografii (ERT), georadar (GPR) a dipólové elektromagnetické profilování (DEMP). V případě dálkového průzkumu Země je představeno využití snímků pořizovaných v různých částech spektra senzory umístěnými buď na družicích nebo na bezpilotních leteckých prostředcích (UAV), pro které je často používáno označení drony.

Novost metodiky spočívá především v představení možností metod, které dosud pro průzkumy hrází buď nebyly využívány vůbec nebo byly využívány pouze omezeně. Představené metody jsou neinvazivní a nevyžadují tak zásahy do zemních těles hrází jako například v případě provádění průzkumných vrtů. Vzhledem k tomu, že se jedná o metody pokročilé a vyžadující značnou odbornost, se nejedná o postupy, které by mohly být běžně uplatněny jakýmkoli uživatelem. Metodika si však klade za cíl, aby byly běžným uživatelům dostupné informace o možnostech představovaných metod a aby se tito uživatelé následně mohli na základě v metodice prezentovaných informací rozhodnout, zda je pro ně některá z nich využitelná.

Mimo výše uvedené pokročilé metody je pro úplnost do metodiky zařazena i kapitola zabývající se běžnými metodami kontroly hrází rybníků a malých vodních nádrží.

1.3 Uplatnění metodiky

Metodika je zpracována tak, aby především představila možnosti pokročilých metod potenciálně využitelných pro průzkumy hrází malých vodních nádrží a rybníků, využitelná je však i v případě velkých vodních nádrží se sypanými hrázemi. Metodiku mohou využít jednak vlastníci, správci či uživatelé malých vodních nádrží a jednak projektanti v rámci projekční činnosti v oblasti rekonstrukcí malých vodních nádrží. Materiál by pro uvedené osoby měl být především podkladem představujícím možnosti zahrnutých metod. Jejich aplikaci je ovšem většinou zapotřebí svěřit odborným institucím či osobám s dostatečnou kvalifikací. To se týká zejména využití GF, pro kterou je nutné jednak dosti nákladné vybavení a jednak vysoká odbornost a zkušenosti s vyhodnocením a interpretací pořízených dat.

1.4 Přínosy metodiky a ekonomické aspekty

Přínos této metodiky spočívá především v představení zahrnutých metod a jejich možností v rámci průzkumů a diagnostiky hrází malých vodních nádrží a rybníků. Nejedná se o detailní popis aplikace prezentovaných metod, protože ty musí být ve většině případů používány osobami s dostatečnou odborností a zkušenostmi. Metodika však rozšiřuje možnosti, které mají správci, vlastníci či provozovatelé malých vodních nádrží v případě podezření na problém s tělesem

hráze. Vzhledem k tomu, že prezentované postupy a metody zvyšují možnosti identifikace problémů se zemními tělesy hrází, přispívá metodika ke zvýšení bezpečnosti malých vodních nádrží a snížení škod, které by mohly vzniknout v případě havárie.

Finanční aspekty metodiky nelze hodnotit přímo. Jednou věcí je finanční náročnost představovaných metod, kde se v závislosti na použité technologii mohou náklady pohybovat v desítkách tisíc i výše. Na druhou stranu spočívá přínos metodiky v možném zamezení škod, které by vznikly v důsledku zvláštní povodně při havárii hráze, pokud by byla příčinou porucha, kterou lze prezentovanými metodami identifikovat. Škody vyplývající ze vzniku zvláštní povodně se samozřejmě mohou pohybovat mnohem výše, než náklady na aplikaci uvedených metod, nemluvě o potenciálním ohrožení lidských životů.

2 Běžné metody průzkumu hrází

V běžné praxi se průzkum hrází provádí zpravidla jednoduchými metodami. Důraz je kladen na zjišťování kompaktnosti hrázových těles a identifikaci jejich možných poruch, sledovány jsou i další okolnosti. Tyto činnosti jsou prováděny v rámci obchůzek, které jsou součástí technickobezpečnostního dohledu (TBD). V případě malých vodních nádrží, které jsou většinou zařazeny do IV. kategorie, může být dohled vykonáván přímo vlastníkem vodního díla, u nádrží kategorie I.-III. je nutné tuto činnost svěřit právnické osobě k tomu pověřené. V následujících podkapitolách jsou prezentovány jednotlivé okolnosti, kterým je při průzkumech hrází nutno věnovat pozornost.

2.1 Výskyt nehomogenit

Výskyt trhlin v tělesech hrází je vždy nutno klasifikovat jako problematický, a to hned z několika důvodů. Předně se jedná minimálně o narušení kompaktnosti zemního tělesa. Trhliny mohou být různého charakteru. Jedná se především o následující typy:

- Podélné trhliny (směr převážně rovnoběžný s půdorysnou osou hráze) mohou být důsledkem počínajícího sesuvu svahu, zejména v případě, kdy je patrný pokles tělesa v části bližší k patě vzdušního líce.
- Příčné trhliny (směr převážně kolmý na půdorysnou osu hráze).
- Trhliny podél zdi konstrukcí umístěných v hrázích či na jejich okrajích (stabilizační zdi otevřených odpadů od bezpečnostních přelivů či spodních výpustí apod.).

Zatímco podélné trhliny jsou důležité s ohledem na to, že mohou indikovat sesuv svahu, příčné trhliny a trhliny podél zdi jsou významné z jiného důvodu. Může jimi totiž proudit voda buď v případě, kdy dojde ke zvětšení trhliny až k vodě v nádrži, nebo v případě zvýšení hladiny vody v nádrži. Nebezpečí pak spočívá v tom, že voda proudící trhlinou může erodovat zemní těleso a v důsledku způsobit havárii.

2.2 Deformace koruny hráze

V případě deformací koruny hráze existuje několik odlišných příčin i možných důsledků. Jednou z častých příčin deformace je zhroucení kaverny vytvořené vodou prosakující tělesem hráze či unikající z odpadního potrubí spodní výpusti zejména při zvýšených průtocích odpadem. Specifickým případem jsou v tomto ohledu dřevěná historická potrubí, která pro zachování své funkčnosti potřebují trvalé zatopení zajišťované podtrubní jámou. Díky tomu je ovšem proudění tlakové, díky čemuž je pravděpodobnost úniku vody z potrubí do tělesa hráze

v případě nedostatečného obložení potrubí kvalitním jílem a jejího následného zvýšeného proudění podél potrubí vyšší, zejména pokud již se v blízkosti potrubí vyskytuje preferenční cesta. Případně může docházet v případě porušení takového potrubí s tlakovými podmínkami k tomu, že je materiál z okolí potrubí vysáván a odnášen vodou proudící potrubím. Tlakové podmínky proudění nejsou dle platných předpisů (ČSN 75 2410) přípustné, ovšem u historických rybníků to není výjimkou. Ke vzniku kaveren ovšem může dojít i v případě zvýšeného lokalizovaného průsaku tělesem hráze. K deformacím koruny může dále dojít v důsledku pojezdu těžké techniky či erozních procesů.

V případě propadů koruny hráze v důsledku zhroucení kaveren spočívá nebezpečí už v samotné příčině tohoto jevu, tedy ve zvýšeném lokalizovaném proudění tělesem hráze. Deformace koruny hráze jsou ovšem nebezpečné ještě z jednoho důvodu. Tím je možné soustředění vody přelévající korunu hráze buď v důsledku omezené funkčnosti bezpečnostního přelivu za povodní, nebo při výskytu extrémní povodně s průtoky převyšujícími kapacitu bezpečnostního přelivu. Soustředěné přelévání totiž vede k intenzivnější erozi vzdušního líce v místech, kde k soustředěnému přelévání dochází. Při vyrovnané koruně hráze za takových situací voda přepadá při velmi malé hloubce v celé délce hráze a její erozní působení na vzdušním líci tak není tak významné.

2.3 Vývěry a lokalizované průsaky

Vývěry či lokalizované průsaky jsou indikátorem poruchy filtrační stability zemního tělesa. Mohou se vyskytovat, jak na vzdušním líci, tak v prostoru podhrází. Jsou-li při kontrole či jiným způsobem identifikovány vývěry i malého rozsahu, znamená to zpravidla, že v tělese hráze dochází k preferenčnímu proudění. To je nebezpečné především z toho důvodu, že lokalizované preferenční proudění probíhá při vyšších rychlostech a může při něm docházet k erozi zemního tělesa podél dráhy tohoto proudění. Takovéto působení, je-li dlouhodobé, může vést ke vzniku kaveren a následným propadům v hrázích. Za především nebezpečné je nutno považovat vývěry vody, která je zakalená, protože zákal bývá způsoben právě vnitřní erozí tělesa hráze. Na tomto místě je ovšem nutno podotknout, že jakékoli vývěry jsou známkou významné poruchy a je nutné je okamžitě řešit.

V případě vývěrů na vzdušním líci pak hrozí ještě jedno nebezpečí. Vyvěrající voda totiž při proudění po vzdušním líci může mít poměrně velkou rychlost, která souvisí s velkým sklonem tohoto líce. Ten je u historických rybníků navíc větší, protože historicky byly hráze budovány se strmějšími svahy. Voda proudící po vzdušním líci pak může způsobovat erozi tohoto svahu, a to zejména při jeho patě,

kde je narušování nejnebezpečnější. I v případě, kdy se jedná o malá průtoková množství, je tento jev nebezpečný, protože působí dlouhodobě.

2.4 Množství a kvalita drenážních vod

U malých vodních nádrží nebývá při běžných obchůzkách prováděn monitoring množství drenážních vod či jejich kvalitativní rozbor. Aby toto mohlo být prováděno, musí především existovat patní drén, který mimo to musí být vyveden tak, aby pod něj bylo možné umístit sběrnou nádobu. Zde je nutno podotknout, že řadě historických rybníků patní drén chybí a není tak možné monitoring drenážních vod provádět. Pokud je prováděn monitoring množství drenážních vod, zaměřuje se na identifikaci změn v tomto množství. V čase narůstající množství drenážních vod může indikovat vznik preferenčního proudění v tělese hráze se všemi již výše popsanými dopady. Pokud dochází k poklesu množství drenážních vod, může to naopak indikovat poruchu funkce patního drénu. Porucha funkce patního drénu pak může vést k vývěrům na vzdušném líci s důsledky popsanými v předchozí kapitole. Pro potřeby posouzení změn v množství drenážních vod je ovšem nutno provádět jejich měření při stejné úrovni hladiny vody v nádrži, jelikož ta zásadně ovlivňuje průsak tělesem hráze. Provádění monitoringu složení drenážních vod pak je ještě méně časté. Rozbory jsou pak zpravidla zaměřeny na výskyt minerálních látek, které jsou produktem rozpouštění částic zeminy tělesa hráze.

2.5 Vegetace na hrázích

Vegetace na hrázích je prvkem, který má mnohdy velkou estetickou hodnotu. Na druhou stranu může být zdrojem ohrožení těchto zemních těles. Prvním aspektem, který je v tomto ohledu významný, je snižování přehlednosti těles hrází. Problematická je zejména hustá náletová vegetace, kterou je nutno v rámci pravidelné údržby odstraňovat, jelikož významným způsobem omezuje přehlednost tělesa hráze a tím komplikuje možnost identifikaci deformací či trhlin. Křovinná vegetace by se na hrázích ze stejného důvodu vyskytovat ani vysazovat neměla, stromová vegetace je za určitých podmínek přípustná. Předně je důležité, o jaké dřeviny se jedná. Na hrázích by se neměly vyskytovat dřeviny s mělkými plošnými kořenovými systémy, protože u nich snáze dochází k vývrátům. Jakékoli dřeviny by se dále neměly vyskytovat v blízkosti zděných a betonových konstrukcí, které mohou narušovat svými kořenovými systémy. Norma (ČSN 75 2410) stanovuje minimální vzdálenost dřevin od stavebních konstrukcí na 6 m. V neposlední řadě nesmí dřeviny omezovat možnost pojezdu mechanizace, pokud se s ní na hrázi počítá.

V případě existence stromové vegetace pak je nutné věnovat jí dostatečnou péči, především ji kontrolovat a sledovat její zdravotní stav. V případě, že některý

strom je ve špatném zdravotním stavu, je nutno jej odstranit, a to včetně jeho podzemní části. Pokud by tak totiž nebylo učiněno, bylo by zemní těleso ohroženo preferenčním prouděním v důsledku vyhánění kořenů. Pařez i s kořeny je tedy po odstranění stromu nutno vykopat a vzniklou jámu sanovat vhodnou zeminou při dostatečném hutnění a zajištění provázání s původním zemním tělesem. Stejně tak je zapotřebí řešit případné vývraty, jejichž výskyt na hrázích může být zapříčiněn i absencí překážek pro vítr vanoucí nad hladinou vody v nádrži.

3 Geofyzikální metody průzkumu hrází

3.1 Potenciál geofyzikálních metod pro průzkum zemních hrází

Neinvazivní určení podpovrchové stratifikace půdních nebo zemních vrstev a makroskopických charakteristik půdního prostředí (jako jsou stupeň nasycení vodou, pórovitost, zrnitost nebo objemová hmotnost) v rozumném prostorovém rozlišení je v inženýrské praxi stále poměrně složité. Velmi často nelze, ať už z finančních, časových nebo praktických důvodů, využít pro podpovrchový průzkum invazivní metody, jako jsou vrtané nebo kopané sondy. To je i případ většiny historických hrází rybníků v České republice. Odběry a analýzy půdních vzorků jsou drahé, časově náročné, charakterizují pouze místo odběru a zejména narušují půdní profil (těleso zemní hráze).

Alternativní metodou jsou geofyzikální průzkumy, které spočívají v zjištění podpovrchových charakteristik horninového nebo půdního prostředí pomocí měření prováděných na povrchu. Vzhledem k neinvazivnímu charakteru tak mají tyto metody velký potenciál pro podpovrchovou hydrologii i geotechnickou praxi.

Geofyzikální průzkumné metody se využívají ke stanovení složení a různých vlastností půdního a horninového prostředí. Dle fyzikální podstaty měření veličiny lze tyto metody dělit na (Macháček, 2005):

- gravimetrické – studují změny tíhového pole
- magnetometrické – zkoumají magnetické vlastnosti hornin
- radiometrické – stanovují přirozenou radioaktivitu hornin
- geoelektrické – zkoumají elektrické pole prostředí
- seismické – vyšetřují šíření seismických vln v horninách

Zmiňované metody se využívají zejména v geologii a hydrogeologii pro zkoumání zvrstvení nebo anomálií v hlubších půdních horizontech a horninovém podloží. Některé metody lze využít i pro stanovení polohy hladiny podzemní vody, vyhledávání ropných ložisek, monitoring úniku znečištění ze skládek a potrubí nebo pro potřeby archeologie.

K rozšíření využití geofyzikálních metod i pro mělký půdní horizont, tedy i pro případné monitorování zemních hrází, dochází až v 80. letech a zejména 90. letech 20. století. V současnosti je geofyzikální průzkum i mělkých půdních vrstev prováděn standardně (Guo et al, 2020) a je komerčně dostupnou službou. Zemní hráze a protipovodňové ochranné hráze podél vodních toků se poměrně standardně pomocí geofyzikálních metod sledují (Beneš et al., 2011, Perri et al.,

2014, Sentenac et al., 2017). Geofyzikální metody mají potenciál při detekování průsakových cest podél bočního závázání hrází do terénu, kde často dochází k vývěru vody. Toto jsou kritická místa nově budovaných nádrží (Říha et al., 2014), a to zejména v případě hrází v lesních, kde typicky chybí podrobný geologický průzkum. Typickými využívanými metodami jsou elektrická rezistivní tomografie (např. Lin et al. 2014, Arosio et al. 2017), georadarová metoda (Kim et al., 2007), elektromagnetické metody (Sungkono et al., 2014), nebo výjimečně i seismické metody (Karl et al., 2011).

V této metodice jsou rozebrány pouze metody, které se v obdobných aplikacích, jako jsou průzkumy zemních hrází, běžně používají a byly autory metodiky testovány. Největší prostor je věnován elektrické rezistivní tomografii (ERT), která je pro monitorování hrází dle literatury nejpoužívanější technikou.

3.2 Přehled geofyzikálních metod využitých pro neinvazivní průzkum zemních hrází

3.2.1 ERT – Elektrická rezistivní tomografie

Elektrická rezistivní tomografie (elektrické odporové profilování) je moderní a v posledních letech stále častěji využívaná technika, která je původně vyvinutá pro zjišťování stratifikace půdních a horninových vrstev, zejména používaná v hydrogeologických, důlních, hydrotechnických a environmentálních průzkumech. V oborech půdní fyziky a mechaniky se ERT využívá pro identifikaci fyzikálně chemických vlastností půd a pro určení prostorové variability těchto vlastností (Corwin et al., 2003). ERT je nejčastěji používaná geofyzikální metoda pro monitorování vnitřní struktury zemních hrází, byť aplikace této techniky je stále předmětem výzkumu (Al-Fares 2011, Hasani et al. 2013, Lin et al. 2014).

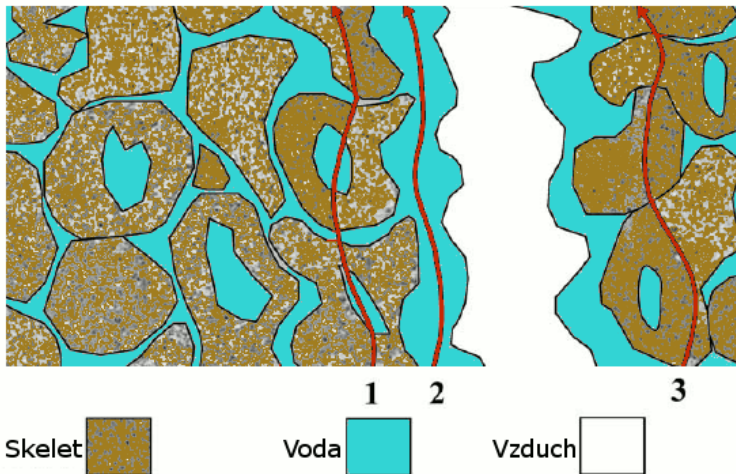
Metoda je založena na zjišťování měrných odporů prostředí z měřených hodnot napětí a proudu stejnosměrného elektrického pole vhlášeného do země. Výhodou i nevýhodou metody je měření přes poměrně velkou oblast, kdy jsou lokální variability prostředí ovlivňující měrný odpor integrovány přes celou měřenou oblast. Díky tomu lze určovat efektivní parametry prostředí, na druhou stranu nelze obvykle pozorovat procesy, které se odehrávají pouze ve velmi malé části půdního profilu, jako je např. detail preferenčního proudění během infiltrace (Zumr 2012). Pokud je vzdálenost mezi sousedními elektrodami malá, lze ERT použít i pro detekci poměrně malých nehomogenit prostředí (Jeřábek et al., 2017).

Měrný odpor je závislý na různých fyzikálních a chemických vlastnostech geologických struktur, jako jsou minerální složení, obsah rozpuštěných látek, pórovitost nebo vlhkost půdy, objemová hmotnost, salinita nebo teplota (Rubin a

Hubbard, 2005, Corwin a Lesch 2005). Historicky vychází většina petrofyzikálních vztahů, což jsou funkce pro převod geoelektrických vlastností na hydrogeologické veličiny, z výzkumů prováděných v souvislosti s průzkumy podzemních úložišť ropy a zemního plynu Loke (2000). Z těchto měření vzešel empirický Archieho vztah pro plně nasycené horninové prostředí a písčité půdy:

$$EC_a = a \sigma_w \Phi^m \quad (1)$$

kde EC_a je zdánlivá elektrická rezistivita, a je empirická konstanta, σ_w je elektrická vodivost půdního roztoku (S^{-1}), Φ je pórovitost a m je cementační exponent vyjadřující obsah jílových částic (Archie, 1942).



Obr. 1: Elektrická konduktivita na mezifázovém rozhraní, ve vodě a ve skeletu (upraveno podle Corwin a Lesch, 2005).

Celková, resp. komplexní, vodivost, odpor a permitivita zahrnují všechny jevy, které se odehrávají jak v pórech, skeletu, tak na mezifázovém rozhraní porézního prostředí. Např. celková konduktivita lze rozdělit na podsložky mezi elektrolytickou EC_w (volné ionty v půdním roztoku ve velkých pórech), na konduktivitu po rozhraní mezi pevnou a kapalnou fází EC_{ws} ovlivněnou zejména výměnou kationtů s jílovými částicemi a na konduktivitu po pevných částicích EC_{ss} , které jsou mezi sebou ve stálém kontaktu (Obr. 1) a jsou vyjádřeny zjednodušeným vztahem dle Rhoadese et al. (1989) :

$$EC_a = \left[\frac{(\theta_{ss} + \theta_{ws})^2 EC_{ws} EC_{ss}}{\theta_{ss} EC_{ws} + \theta_{ws} EC_s} \right] + (\theta_w - \theta_{ws}) EC_w \quad (2)$$

kde θ_w je celková objemová vlhkost ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_{ws} a θ_{ss} jsou objemová vlhkost na mezifázovém rozhraní a objemový podíl mezifázového rozhraní ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), EC_{wc} a EC_{ss} jsou specifické elektrické konduktivity ve vodě a na mezifázových rozhraních.

Pro případný přepočít elektrické konduktivity na objemovou vlhkost lze využít vztah, který popsali a publikovali Schwartz a Schreiber (2009), a který je modifikací Archieho zákona:

$$\rho_b = c \cdot \rho_w \theta^m \quad (3)$$

kde ρ_b (Ohm m) je celková elektrická rezistivita získaná měřením ERT, ρ_w (Ohm m) je elektrická rezistivita vody v pórech, θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) je objemová vlhkost, c a m jsou parametry závislé zejména na obsahu jílových částic v půdě (Shah a Singh 2005).

Pro měření elektrické rezistivity jsou zapotřebí čtyři elektrody, které jsou instalovány v přímce na zemském povrchu nebo ve vrtech. Dvě vnější elektrody (C1, C2) slouží pro přivedení stejnosměrného elektrického proudu do prostředí a dvě vnitřní elektrody (P1, P2) pro měření vyvolaného elektrického napětí. Na základě Ohmova zákona je spočítána celková rezistivita v poloprostoru pod (v případě elektrod ve vrtech mezi) elektrodami.



Obr. 2: Automatický geoelektrický systém ARES sestávající se z centrální řídicí jednotky, multiplexoru, pasivního multielektrodeového kabelu a 12 V baterie. Napravo aktivní (inteligentní) multielektrodeový kabel vhodný pro delší profily.

Nejpoužívanější konfigurace s ekvidistantním rozmístěním čtyř elektrod na povrchu, kdy vnější elektrody slouží jako proudové a vnitřní jako měřicí výsledné napětí, se nazývá Wennerovo schéma. Se vzrůstající vzdáleností vnitřních elektrod P1 a P2 vzrůstá objem (hloubka) měřeného profilu. Pro homogenní půdy

lze odhadnout měřený objem poloprostoru dle vztahu πa^3 , kde a je vzdálenost mezi sousedními elektrodami. Pro různé účely se využívají i jiné konfigurace rozmístění elektrod, pro případ zemních hrází se osvědčily konfigurace dipól-dipól nebo dle Wenner-Schlumberbera (např. Loke, 2000).

Pro odporová profilování uvedená v této metodice byl použit automatický geoelektrický systém ARES (GF Instruments, Brno), který se sestává z centrální řídicí jednotky a aktivních multi-elektrodových kabelů nebo pasivních multi-elektrodových kabelů s přepínacím boxem (Obr. 2).

3.2.2 GPR – georadarová metoda

Princip georadarové metody spočívá v opakovaném vysílání vysokofrekvenčního elektromagnetického impulsu vysílací anténou do zkoumaného prostředí. V místech, kde je změna elektromagnetických vlastností prostředí, dochází k odrazu části energie vyslaného elektromagnetického impulsu a ta se registruje přijímací anténou. Primárním výstupem je časový řez, který se přepočítává na hloubkový řez podle zjednodušeného vztahu pro nemagnetická prostředí:

$$h = \frac{c \cdot t}{2\sqrt{\epsilon_r}}$$

kde c je rychlost světla ve vakuu [$2.997 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$], t je čas příchodu odražené části energie impulsu (ns), ϵ_r je relativní permitivita prostředí (-).

Rychlost šíření elektromagnetického vlnění v (m s^{-1}) je nepřímo úměrná relativní permitivitě prostředí a je dána vztahem:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Charakteristikou prostředí, která výrazný odraz pulzu způsobuje, je vysoký gradient relativní elektrické permitivity. Velikost relativní permitivity prostředí je ovlivněna vodou a elektrickou vodivostí, a je na ní závislá rychlost šíření elektromagnetického vlnění v prostředí a maximální hloubkový dosah metody. Rychlost šíření pulzu (a tak i hloubku detekovaných struktur a anomálií) odhadujeme dle tabelárních hodnot pro daný typ prostředí. Obecně lze říct, že volba použití anténního systému, a tedy frekvenci vysílaných pulzů, je závislá na řešené problematice, požadovaném hloubkovém dosahu a požadovaném prostorovém rozlišení metody.



Obr. 3: Georadar - měření anténním systémem 200 MHz



Obr. 4: DEMP - měření aparaturou CMD – Explorer

3.2.3 DEMP – dipólové elektromagnetické profilování

Princip metody je založen na vyhodnocení sekundárního elektromagnetického pole indukovaného v horninovém prostředí pomocí budícího elektromagnetického pole (Obr. 4). Přijaté sekundární elektromagnetické pole je úměrné elektrické vodivosti horninového prostředí (mS m^{-1}).

Metoda DEMP indikuje přítomnost vodivých těles v místech měřených profilů a dále vymezuje odporové odlišné polohy proměřovaného horninového prostředí. Tyto vodivé nehomogenity odpovídají tektonickým poruchám a porušeným zónám, které mohou indikovat preferenční cesty proudění vody. Hodnoty měrných vodivostí závisí zejména na obsahu vody v prostředí a dále na obsahu jílovitých částic a na mineralogickém složení prostředí.

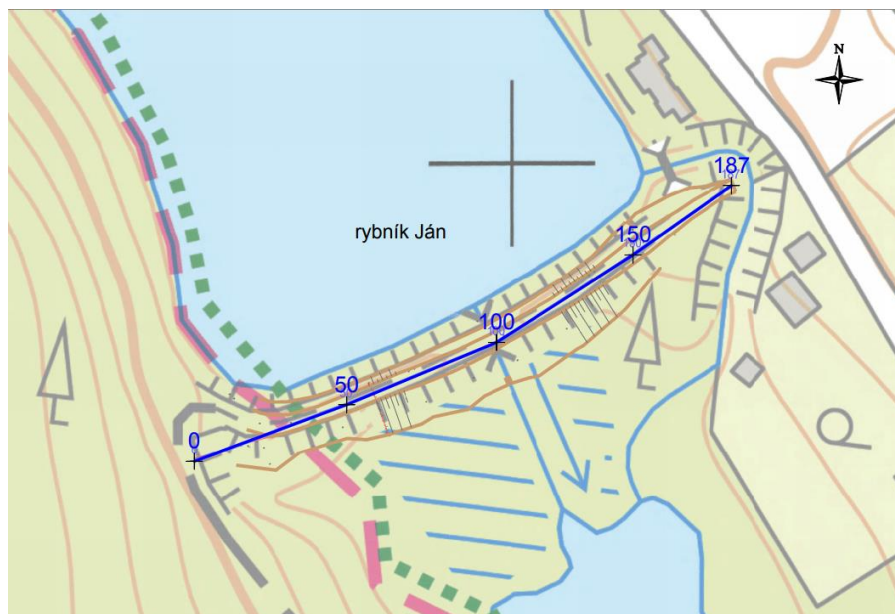
3.3 Postup měření

Geofyzikální průzkumy jsou standardně prováděny z koruny hráze. Měrné profily jsou vedeny podél koruny, typicky v její ose nebo na hraně se vzdušním lícem. Pokud to dispozice hráze umožňuje, vedeme podélný profil přibližně 30 m před a 30 m za hranicí hráze, protože některé metody na krajích profilu neposkytují výsledky v dostatečné hloubce (Obr. 5). Často cílíme na konkrétní místo v hrázi, které hodláme zkoumat detailně. V takové situaci lze využít i příčné profilování (vedení měrného profilu napříč tělesem hráze: od paty vodního líce - přes korunu hráze – za patu vzdušního líce). Takové měření lze provádět: (a) při vypuštění rybníka, kdy lze monitorovat celé těleso hráze a detail na návodním líci, nelze však detekovat aktuální průsak; (b) při plném vodním stavu lze identifikovat depresní křivku hladiny vody, vliv těsnícího jádra a případný výron na vzdušním líci.

Tab. 1: Rámcová charakteristika vybraných geofyzikálních metod

Metoda	ERT	GPR	DEMP
Hloubkový dosah	10 – 30 m	cca 5 - 10 m	cca 10 m
Prostorové rozlišení tomogramu	vysoké	vysoké	střední
Rychlost měření	hráz / den	hráz / 1 h	hráz / 1 h
Praktická omezení	Nutný měkký povrch pro instalaci elektrod, problematické měření za velmi suchých podmínek	Pouze odhad hloubky detekovaných struktur, malý dosah v mokré půdě	Indikativní metoda s nižším rozlišením.

Při vedení profilů často narážíme na problematická místa, která měření komplikují nebo způsobují artefakty na vyhodnocených tomogramech. Jedná se o různé kovové nebo železobetonové prvky v tělese hráze, zpevněná komunikace na koruně, lávky, bezpečnostní přelivy, stromy a podobně. Tyto prvky musí být vzaty v úvahu při samotné volbě geofyzikální metody a při vytyčování měrného profilu. Některé zemní hráze všemi geofyzikálními přístroji monitorovat nelze (zejména monitorování pomocí ERT bývá problematické).



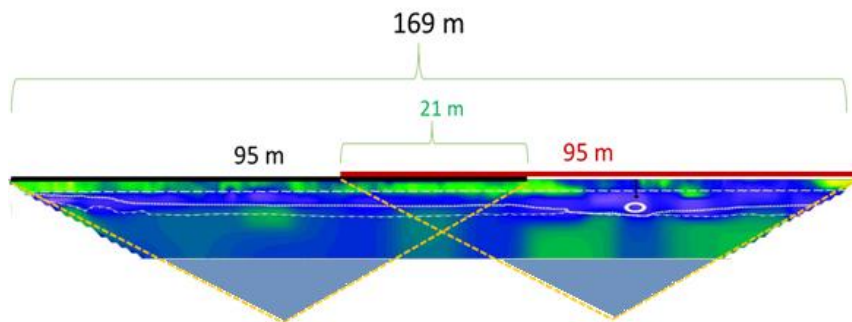
Obr. 5: Vedení podélného profilu po koruně hráze

Je důležité zdůraznit, že všechny zde představované metody vyžadují expertní znalost a zkušenosti, a to jak pro samotné geofyzikální měření, tak především pro vyhodnocení a interpretaci výsledků. Upozorňujeme, že geofyzikální metody obvykle přináší pouze kvalitativní výsledky, jsou tedy schopné odhalit nepravidelnosti nebo materiálovou strukturu zemní hráze. Pro jasné definování složení konkrétního materiálu je nutná kalibrace, pro kterou je třeba invazivního vzorkování (na příklad vrty nebo bodové sondy), případně informace z projektové dokumentace ze stavby hráze (která není v případě historických hrází dostupná) (Zumr et al., 2020).

3.3.1 ERT – Elektrická rezistivní tomografie

Pro monitorování podélného profilu je pro dosažení dostatečného prostorového rozlišení doporučován maximální rozestup mezi jednotlivými elektrodami 1 m. Rozlišení tomogramu s hloubkou klesá, pokud hledáme relativně malé struktury ve velké hloubce, je třeba rozpon mezi elektrodami ještě zmenšit. Přístrojové vybavení často neumožňuje měřit celou délku hráze najednou. Na příklad, jak je naznačeno na Obr. 5, pro hráz o délce 130 m je třeba profil dlouhý ca 190 m (kvůli přesahům po stranách). Při rozponu elektrod 1 m je pro takový profil třeba instalovat 191 elektrod. Takové množství standardně nebývá k dispozici, některé přístroje s tolika elektrodami ani pracovat neumí. Proto probíhá měření po dílčích sekcích, které se přes sebe překládají (Obr. 6).

Doporučené měřicí schéma pro monitoring hrází je uspořádání dle Wenner-Schlumbergera. Tato metoda poskytuje dobrý kompromis mezi rozlišením a detekovatelností lineárních i horizontálních struktur (Loke, 2000). Alternativně lze použít uspořádání dipól – dipól. Požadovaná hloubka monitorování závisí na konkrétní situaci, obvykle je snaha bezpečně dosáhnout do hloubky založení hráze. Hloubka měření je závislá na maximálním rozporu elektrod (tedy na délce měrné sekce) a odpovídá přibližně 2/5 rozponu. Maximální hloubka je dosažena uprostřed profilu. Prakticky je třeba, aby byly jednotlivé sekce dlouhé alespoň 70 m a překrývaly se navzájem alespoň o 20 m, optimálně o 50 m, jak je znázorněno na Obr. 6.



Obr. 6: Překládání jednotlivých ERT sekcí a vizualizace reálně měřené oblasti

V případě příčných profilů, které jsou vzhledem k rozměru hrází kratší, se volí husté rozmístění měřících elektrod. Při délce profilu okolo 20 až 30 m je schůdné měření s rozponem elektrod 20 cm. Pro tyto profily je vhodnější použít tzv. pasivní multi-elektrodový kabel připojený do řídicí jednotky přes multiplexor (switch box). Kovové elektrody se snažíme umisťovat do půdy mělce (2 – 5 cm), ale pevně, aby měly dobrý kontakt s půdou a stabilně držely kabel. Příčný profil je často

problematický poblíž vodního líce, kde může kamenný pohoz komplikovat instalaci elektrod. Obdobná situace je i přímo na koruně hráze, kde případná šterková, nebo dokonce zpevněná, komunikace znemožňuje osazení elektrod.

Zejména v případě příčných profilů je pro pozdější vyhodnocení výsledků důležité kvalitní geodetické zaměření výškového profilu. V rámci zápisu z měření je nutné poznačit všechny významné objekty hráze a jejich pozici (např. výpustní objekt, bezpečnostní přeliv, význačný strom), aktuální počasí, stav povrchu a vegetace. Důležitost kvalitního zápisu a fotodokumentace je společná pro všechny geofyzikální metody, které mohou být na stejné hrázi prováděny v různých dnech a některé rozdíly ve výsledcích lze vysvětlit aktuální teplotou, nadržením vody v nádrži nebo stavem vegetace.

Výsledkem měření je dvourozměrné pole zdánlivé elektrické rezistivity prostředí, které samo o sobě není vypovídající. Zdánlivá elektrická rezistivita je třeba přepočítat na pole skutečných měrných odporů, na jehož základě lze už lokalizovat určité podpovrchové struktury. Přepočet je prováděn numerickou optimalizací za využití pro to určených softwarů. Výrobci ERT jednotek většinou doporučují konkrétní vyhodnocovací program, mezi často používané modely patří Res2Dinv (Geotomo Software, www.geotomosoft.com/), ERTLab Studio (Geostudi Astier, www.geostudiastier.it/) nebo ZondRes2D (Zond Geo, www.zond-geo.com/).

3.3.2 DEMP a GPR

Jak plyne z Tab. 1, hlavní nevýhodou DEMP je vzhledem k horšímu prostorovému rozlišení pouze indikativní informace o stavu hráze. Hodí se tak pro rychlý průzkum základního materiálového složení a vyhodnocení homogenity tělesa hráze (Beneš 2008).

Dipólové elektromagnetické profilování bylo pro potřeby tvorby metodiky provedeno aparaturou CMD – Explorer (Electromagnetic conductivity meter) výrobce GF Instrument, s.r.o. Brno (Obr. 4). Jedná se o přímé měření elektrických vodivostí horninového prostředí. Tři různě vzdálené měřící dipóly (1.48, 2.28 a 4.49 m) umožňují provádět měření ve třech hloubkových úrovních současně. Při vertikální orientaci cívek je dle výrobce efektivní hloubkový dosah 2.2, 4.2 a 6.7 m a při horizontální orientaci je efektivní hloubkový dosah poloviční - 1.1, 2.1 a 3.3 m (tedy celkem šest hloubek).

Georadarů existuje více typů, liší se zejména frekvencí vysílaných pulzů, některé mohou být pro monitorování hrází velmi vhodné. Např. Tayyab et al. (2017) byli schopni pomocí velmi podrobného průzkumu s GSSI SIR-300 radarem, 270MHz

anténou detekovat i zvlnění geotextilie a pod ní zachycenou akumulovanou vodu. Nicméně, i v tomto případě se jednalo o oblast do 3 m pod povrchem.

Anténní systémy se liší centrální vysílací frekvencí, která určuje hloubkový dosah a rozlišovací schopnost metody. Volba anténního systému je kompromisem mezi požadavkem na maximální hloubkový dosah a ještě přijatelnou rozlišovací schopnost. Ukázkové měření, které následuje v další sekci metodiky, bylo provedeno aparaturou SIR-20, která je výrobkem americké firmy GSSI (Obr. 3). Jedná se o plně digitální aparaturu se záznamem na připojený počítač - notebook. Krok měření ve směru profilu byl 1 cm. Zpracování dat bylo zaměřeno na využití informací z co největší hloubky a zvýraznění lokálních změn prostředí

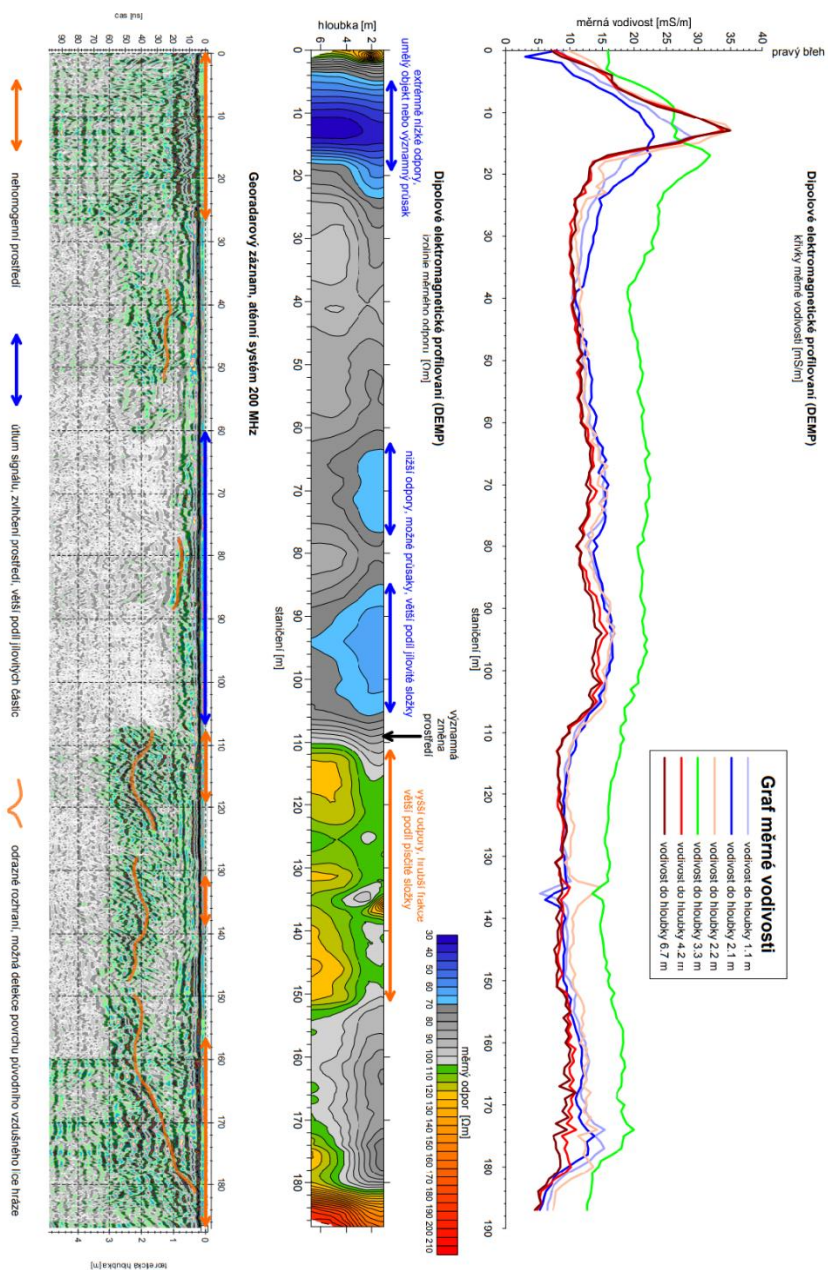
Obě metody jsou v terénu uživatelsky přívětivější a výrazně rychlejší než ERT. Není třeba nic do hráze instalovat, měření probíhá tempem pomalé chůze. Podstatné je, že je lze využít i na hrázích se zpevněnou korunou, profilů je navíc možné udělat v rámci jednoho měření více a vytvořit i kvazi-3D vizualizace.

3.4 Příklad geofyzikálního průzkumu zemní hráze

Využití geofyzikálních metod pro neinvazivní průzkum je demonstrováno na příkladu historické hráze rybníka Ján (k. ú. Jevany u Prahy), na které bylo provedeno šetření pomocí metod DEMP, GPR a ERT. Cílem šetření bylo identifikovat základovou spáru hráze, lokalizovat případné heterogenity v charakteristikách prostředí tělesa, rozlišit původní materiál hráze a zeminu, která byla dosypána a zhutněna v průběhu nedávné rekonstrukce, identifikovat depresní křivku v příčném řezu hrází a lokalizovat pozorovatelná technická zařízení uvnitř tělesa hráze (výpust).

Podélné profily pro všechny použité metody byly vedeny na koruně hráze, jak je naznačeno na Obr. 5. Celková délka měřeného profilu byla 187 m. Z jedné strany byl profil ohraničen betonovým bezpečnostním přelivem, na pravé straně bylo měření protaženo za hráz na přilehlou cestu. V případě ERT byly elektrody rozmístěny v rozestupu 1 m, každá sekce měla délku 96 m, překryv mezi sekcemi byl 46 m. Pro numerické vyhodnocení ERT profilu bylo v prostředí programu Res2Dinv množství elektrod uměle zahuštěno na dvojnásobek.

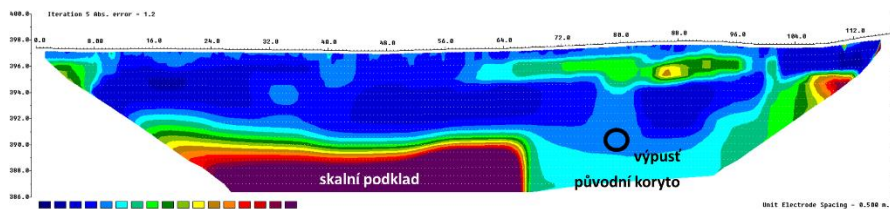
Na Obr. 7 jsou souhrnně uvedeny výsledky z metod DEMP a GPR, tedy křivky elektrické vodivosti, odporový řez a interpretovaný georadarový záznam. Na Obr. 8 jsou výsledky profilování pomocí ERT.



Obr. 7: Výsledky průzkumu hráze rybníku Ján pomocí metod DEMP a GPR

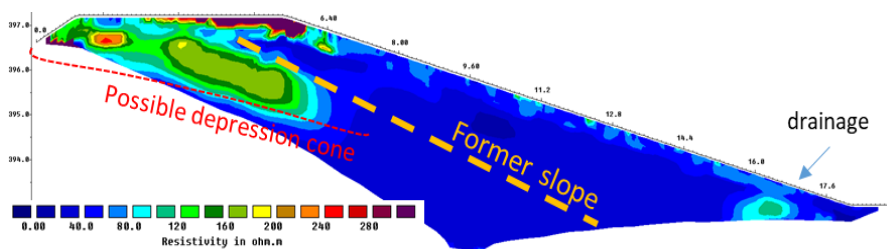
Na horním grafu na Obr. 7 jsou uvedeny naměřené křivky měrné vodivosti prostředí do jednotlivých hloubkových úrovní. Křivka vodivosti do hloubky 3.3 m (zelená) respektuje průběh měrných vodivostí v ostatních hloubkových úrovních, ale je celkově posunuta do vyšších hodnot. Jedná se zřejmě o chybu měření, protože obdobný posun není jinými metodami detekován. Proto nejsou tato data použita při rekonstrukci izolinií měrných odporů (graf uprostřed), které byly vypočteny jako převrácená hodnota naměřené měrné vodivosti. Oba grafy – křivky měrné vodivosti a odporový řez mají obdobnou výpovědní hodnotu a je třeba je posuzovat společně.

Na spodním tomogramu na Obr. 7 je vyobrazen filtrovaný georadarový záznam. V materiálech hráze rybníka Ján byl teoretický hloubkový dosah metody cca 3 m. Rovněž jako v případě metody DEMP lze podle georadarového měření rozdělit těleso hráze na kvazihomogenní úseky takřka se stejnými hranicemi. V georadarovém měření byly dále vymezeny nehomogenní úseky (místa materiálových a fyzikálních změn) a místa s útlumem signálu (zvlhčené prostředí, větší podíl jílovitých částí). V některých částech profilu bylo detekováno odrazné rozhraní v hloubce 1.0 až cca 2.5 m. Nejvýrazněji se toto rozhraní projevilo od staničení profilu cca 108 m do staničení cca 162 m v hloubce cca 2.0 m a má takřka spojitý charakter. Od staničení 162 m z hloubky cca 2.0 m toto rozhraní vychází těsně pod povrch na staničení 182 m. V dalších částech profilu je projev tohoto rozhraní méně výrazný, jedná se o úsek ve staničení 38 m až 53 m (hloubka cca 1.2 m) a úsek 76 m až 88 m (hloubka cca 0.7 m).



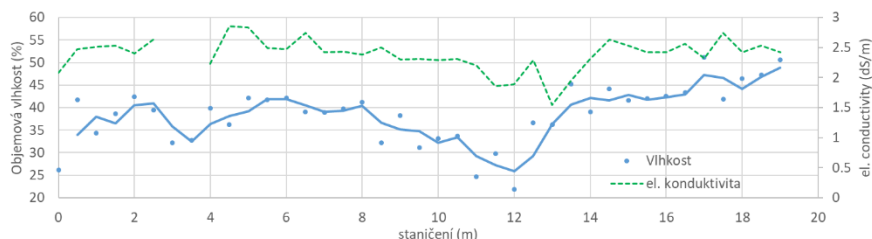
Obr. 8: Výsledné pole měrných odporů pod podélným profilem vedeným po hrázi rybníka Ján (upraveno z Zumr et al., 2018)

Na výsledku ERT (Obr. 8) je vizualizované pole elektrické rezistivity do hloubky cca 6 m pod korunu hráze. Přibližně 4 m pod korunou je zřetelné rozhraní mezi materiálem hráze a skalním podložím, které má výrazně vyšší elektrickou rezistivitu. Styčná plocha je rovná, bez znatelných poruch, zhruba ve 2/3 délky hráze podloží ustupuje vodivějším sedimentům. V tomto místě pravděpodobně dříve vedlo koryto potoka, nyní se v tomto místě nachází výpustní objekt. Méně vodivá oblast nad výpustí a cca 1 m pod korunou značí jinou zeminu, která byla do tělesa hráze dodána při nedávné rekonstrukci.



Obr. 9: Příčný profil hráze s vyznačenými liniemi nově dosypané zeminy a náznaku depresního kužele.

Hrází rybníku Ján byl veden i příčný ERT profil (Obr. 9). Protože profil nemohl být veden i na vodním líci, metoda není schopna monitorovat oblast v těžišti hráze. Tomogram ukazuje vysoké hodnoty elektrické rezistivity pod korunou hráze, což má dvě příčiny. Materiál koruny se od zbytku hráze liší, jedná se o méně vodivou hrubozrnnou zeminu se štěrkovým posypem. Druhým důvodem je nižší vlhkost prostředí, neboť se jedná o oblast nad hladinou podzemní vody, která navíc není zastíněna vegetací. Pod korunou hráze je vidět i náznak rozhraní mezi původním vzdušným lícem hráze a nově dodanou zeminou. Tato hranice odpovídá dostupné projektové dokumentaci. Hladina podzemní vody není s jistotou detekována, protože průzkum nezasahuje do dostatečné hloubky.



Obr. 10: Srovnání objemové vlhkosti a elektrické konduktivity těsně pod povrchem hráze

Ihned po ERT měření byla pomocí vlhkostního čidla v místě příčného profilu monitorována i objemová vlhkost, teplota a el. konduktivita povrchu (do hloubky cca 10 cm). Výsledky měření jsou vyneseny na Obr. 10. Oblasti s vysokou rezistivitou korelují s oblastmi s nízkou objemovou vlhkostí a nízkou elektrickou konduktivitou půdy na povrchu, v souladu se vztahem (1).

Na základě interpretace všech použitých geofyzikálních metod lze těleso hráze rozdělit na kvazihomogenní úseky:

- I. 0 m až 27 m – extrémně vysoká měrná vodivost, resp. nízké měrné odpory (30 až 60 Ωm) od povrchu až ke skalnímu podloží, s georadarovou indicií nehomogenního prostředí a odrazným rozhraním v hloubce cca 0.5 m – může se jednat o projev umělého objektu (inženýrské sítě).
- II. 27 m až 60 m – zjištěny hodnoty měrných odporů (od cca 30 až cca 100 Ωm) blížících se ke středním hodnotám zjištěných na lokalitě bez výrazných georadarových anomálií.
- III. 60 m až 108 m – hodnoty měrných odporů jsou spíše nižší, u georadaru dochází k útlumu signálu – může se jednat větší zastoupení jílovité složky a větší vlhkost materiálu. V úseku 76 až 88 m bylo detekováno odrazné rozhraní v hloubce cca 0.7 m.
- IV. IV. 108 m až 154 m – ve staničení 108 m je náhlá změna prostředí, měrné odpory prostředí dosahují vyšších hodnot (105 až 130 Ωm) zejména ve spodní části pseudo odporového řezu (v hloubkách od cca 3.5 m), georadarem zjištěna nehomogenní místa v úseku 108 m až 119 m a v úseku 131 až 149 m a dále detekováno výrazné odrazné rozhraní v hloubce cca 2.0 m – hrubší frakce nebo větší podíl písčité složky materiálů hráze. V této části se nachází výpustní objekt a bývalé koryto potoka.
- V. 154 m až 187 m – měrné odpory nabývají mírně vyšších hodnot, georadarem detekované odrazné rozhraní pravděpodobně odpovídající původnímu vzdušnému líci stoupá z hloubky cca 2 m až pod povrch ve staničení 182 m, kde bylo rozšíření koruny hráze minimální. Dále byla georadarem zjištěna nehomogennost materiálu hráze v úseku 157 m do konce profilu. V úseku 180 m až do konce profilu na staničení 187 m jsou měření vodivosti ovlivněna terénním skokem daným ukončením levé strany hráze v odtoku bezpečnostního přelivu.

Provedené geofyzikální měření indikuje oblasti, ve kterých je hráz nehomogenní. Nejpodrobnější informace poskytuje průzkum pomocí ERT, který je však ze všech metod nejpracnější.

4 Využití metod dálkového průzkumu Země k průzkumu hrází

4.1 Parametry rybníků a jejich hrází, jež lze monitorovat prostředky dálkového průzkumu Země

V případě historických rybníků se jedná převážně o zemní sypané hráze s vegetačním pokryvem, a často i se stromy na vzdušném líci. Aktivní i pasivní senzory prostředků dálkového průzkumu mohou pomoci k přesné definici tvarových charakteristik hrází i vegetace na jejich povrchu, k tvorbě 3D modelů hrází a celých rybníků, a k následnému sledování případných objemových změn. Dále lze sledovat parametry povrchu hrází – tvar, drsnost, materiál, vegetační pokryv, jeho vývoj nebo případné poškození, teplotní charakteristiky jednotlivých částí hrází a obou jejich líců. Samotný vegetační pokryv a jeho rozdílné se měnící parametry (pokryvnost, objem biomasy, výška vegetace, zdravotní stav, množství chlorofylu, teplotní stres) mohou být indikátorem zamokření částí vzdušného líce, ať již z jakýchkoliv příčin. Změny vlhkosti na vzdušném líci lze nepřímo sledovat i prostřednictvím rozdílné rychlosti změny teplot v období rychlých teplotních změn. V případě hrází již poškozených lze určovat chybějící objemy zeminy, rozsah poškození z hlediska změny tvaru a další jevy. V neposlední řadě se metody dálkového průzkumu uplatňují při hledání, identifikaci i následném zaměření hrází již zaniklých historických rybníků, a to (v případě využití dat laserového skenování) i pod vzrostlou vegetací.

Význam může mít i sledování nejen hrází, ale rovněž samotné zátopy nádrží a plochy pod hrázemi – z hlediska možných průsaků. Monitoring plochy zátopy samotných rybníků závisí na účelu výzkumu. Dálkový průzkum Země (DPZ) může velmi napomoci k efektivnímu sledování aktuální úrovně hladiny i aktuální zatopené plochy, rozvoje litorálního pásma, míry dynamiky zazemnění nádrže v čase – ať již z historického pohledu, nebo v rychlém časovém sledu v případě zvýšené dynamiky tohoto procesu u konkrétních nádrží. Lze monitorovat kvalitu vody v nádrži, zejména zvýšený obsah chlorofylu (eutrofizaci), zvýšený zákal (obsah nerozpuštěných látek), případně rychlost zanášení, nebo konkrétní odezvu na příčinnou srážku – zda dochází nebo nedochází ke vstupu sedimentu do nádrží u konkrétních srážkoodtokových událostí. U vypuštěných nádrží lze DPZ využít k přesnému zaměření 3D modelu dna pro výpočty objemu sedimentu i pro určení případných hloubek a rozloh zátopy v případě obnovy zaniklých historických rybníků.

Konečně mezi metody DPZ patří i blízká fotogrammetrie, s jejíž pomocí lze monitorovat lokální poruchy (např. erozní rýhy nebo kaverny) a tvořit jejich 3D modely s milimetrovým a submilimetrovým rozlišením (Žižala et al. 2016).

4.2 Přehled metod a nástrojů dálkového průzkumu Země využitelných pro průzkum

4.2.1 Satelitní data

V případě hrází historických rybníků (ať již zachovalých, nebo zaniklých) se v převážné většině jedná o objekty s výškou v jednotkách metrů a plošným rozsahem ve stovkách metrů čtverečních. Pro tyto dimenze ve větším rozsahu nejsou využitelná satelitní data běžných družicových systémů, která nedisponují potřebným prostorovým rozlišením pro detailní posouzení hrází. Z toho důvodu většina metod dálkového průzkumu hrází rybníků je závislá na podrobnějším snímkování ať již leteckým, pomocí bezpilotních prostředků, případně pouze snímáním z pevného stanoviště nebo pomocí kamer nesených na teleskopických drzácích.

Přesto je v kontextu rychlého vývoje a existujících dat třeba zmínit i data satelitních nosičů, a to zejména z důvodu dostupnosti dat v pravidelném časovém kroku, v současné době již dokonce s denní frekvencí. Součástí dlouhodobého sledování příslušných rybníků může být rovněž sledování plochy zátopy, kvality vody v nádržích a dalších parametrů samotných nádrží, jež mohou být z dlouhodobého hlediska významné i pro údržbu hrází. A zde se již satelitní data mohou uplatnit, neboť spektrální odezva samotných nádrží může v tomto kontextu poskytnout řadu užitečných informací.

Z hlediska volně dostupných nekomerčně poskytovaných dat se jedná zejména o systémy Landsat (v současné době Landsat 7 a 8) a od roku 2015 o družice Sentinel-2 Evropské kosmické agentury (<https://scihub.copernicus.eu/>). Obecně se jedná o velmi užitečná multispektrální data pro monitorování ploch s velikostí cca 1 ha a více – tedy mohou napomoci i monitorování ploch nádrží větších historických rybníků, v případě monitoringu samotných hrází se však neuplatní. Data Sentinel-2 jsou poskytována s prostorovým rozlišením 10 m a v časovém kroku 5 dní (jedná se o 2 párové družice) a jsou ideální zejména pro sledování vývoje vegetačního krytu. Jsou popsána v dalších metodikách (Kapička et al. 2019) a jejich využitelnost byla prezentována např. Krásou (Krása et al. 2019). Zde se jim proto nebudeme podrobněji věnovat.

Podrobnější prostorové rozlišení poskytují data provozovatelů DigitalGlobe (USA) a AIRBUS Defence and Space (EU). Jedná se o starší družice IKONOS,

QuickBird, WorldView1, novější pak WorldView 2-4, GeoEye-1, Pleiades 1A-1B, a TripleSat (<https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/druzicova-data/multispektralni-druzicova-data>). Uvedené družicové systémy poskytují data s prostorovým rozlišením již od 0,5m, některé v panchromatickém, některé v několika multispektrálních pásmech. Podrobné jevy na plochách jednotek metrů čtverečních nejsou však na základě provedených testů jednoznačně detekovatelné a aktuální (nearchivní) data jsou velmi finančně náročná (Báčová 2018). Nicméně některé z uvedených systémů (např. WorldView 4) mají již dokonce jednodenní frekvenci přeletu identických lokalit a u všech výše zmiňovaných se jedná o jednotky dnů. V případě sledování časových změn proto mohou poskytnout užitečnou informaci.

Relativně novým poskytovatelem družicových dat je pak společnost Planet Labs Inc., která ke snímkování využívá velkého množství malých družic a poskytuje méně finančně náročná data s vysokou časovou frekvencí (1 den) a prostorovým rozlišením 4 m. Dalším produktem této společnosti jsou data SkySat s rozlišením 0,8m (<https://www.planet.com/products/planet-imagery/>). I tato data lze využít k monitoringu ploch historických rybníků a jejich povodí.

Z hlediska parametrů, jež lze odvozovat z výše zmiňovaných dat, s ohledem na jejich rozlišení nemá smysl tato data využívat k detekci lokálních poškození nebo k tvorbám 3D výstupů. Užitečná jsou především k hodnocení změn vegetačního krytu, jeho dynamiky růstu, zdravotního stavu – ať již na hrázích, nebo spíše v přímém okolí nádrží. Druhou sadou odvozovaných vlastností pak může být pozorování hladiny nádrží – z hlediska rozvoje vodního květu a související eutrofizace, případně z hlediska zákalu při epizodním vstupu nerozpuštěných látek. Výhody použití uvedených dat a rizika spojená s interpretací popisuje pro české rybníky kvalitně Vinciková (Vinciková 2015). Těsnější vztahy mezi reflektancí a vlastnostmi povrchových vod lze získat pomocí hyperspektrálních senzorů, zde však již v případě družicových dat nejsou k dispozici nástroje s dostatečným prostorovým rozlišením pro malé vodní nádrže a je třeba sáhnout k využití leteckých nosičů, což předpokládá dosud velmi vysoké náklady na kampaň (řády stovek tis Kč) a řadu omezení z hlediska času náletu i snímané lokality z důvodu restrikcí v řízení letového provozu (Žižala et al. 2016).

4.2.2 Online dostupná geodata v rámci ČR

Základním poskytovatelem geografických dat na území České Republiky, tedy polohopisných a topografických mapových podkladů, historických map, modelů výškopisu (starších i současných) a ortofotomap je Český úřad zeměměřický a katastrální (<https://www.cuzk.cz/>). Řadu užitečných geodat k nádržím a jejich

hrázím lze získat na jeho geoportálu i na dalších veřejných geoportálech, zejména následujících:

- <http://geoportal.cuzk.cz> – geoportál ČÚZK, poskytující data ke stažení i formou WMS přístupu, a to základní mapy (ZABAGED), současné ortofotomapy (RGB) a blízké infračervené (CIR), archivní ortofotomapy (od r. 1998 do současnosti), archiv leteckých měřických snímků (LMS) pro získání od dalších provozovatelů, data výškopisu (viz níže), data KN a RÚIAN, archivní a historické mapy, aj.
- <http://geoportal.gov.cz/> - národní geoportál INSPIRE (CENIA), poskytující WMS přístup k vybraným historickým mapám, a k datům mnoha projektů v oblasti ochrany přírody a krajiny.
- <https://heis.vuv.cz/> - hydroekologický informační systém (HEIS VÚV) je centrálním informačním systémem VÚV TGM, v.v.i., v oblasti vodního hospodářství a ochrany vod a informačním zdrojem pro řešitele ústavu a uživatele z řad veřejné správy a odborné i laické veřejnosti. Poskytuje službou WMS data řady projektů užitečná i pro identifikaci hrází a objektů na vodních nádržích.
- <http://www.dibavod.cz> – geoportál DIBAVOD (VÚV TGM, v.v.i.), poskytující ke stažení základní vodohospodářské mapy, a vektorové objekty na vodních tocích a související základní objekty povrchových vod (např. polygony zátopy nádrží, objekty hrází).
- <http://geoportal.vumop.cz/> - geoportál SOWAC-GIS je tematicky zaměřen na ochranu půdy, vody a krajiny České republiky. Je provozován Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy, v.v.i. Poskytuje řadu mapových podkladů formou WMS i historických informací o půdě, vodě a krajině v podobě map, grafů a tabulek. Do této skupiny je možné zařadit: Půda v mapách, Půda v číslech, eKatalog BPEJ, Informační systém melioračních staveb (ISMS), Zranitelnost podzemních vod, Webový archiv Komplexního průzkumu půd (WAKPP).
- <http://www.mapy.army.cz/> - geografická služba AČR (GeoSI AČR) je součástí ministerstva obrany České republiky, je určena ke geografickému zabezpečení ozbrojených sil České republiky. Nicméně v gesci GeoSI je rovněž archivace a distribuce leteckých měřických snímků z let 1937 až 2002 – ty jsou klíčovým podkladem pro podrobné vyhodnocení vývoje území (dosažitelné pozemní rozlišení je cca 0,5 m) a mohou tak poskytnout detailní informace o stavu hrází i plochy zátopy rybníků během 20. století.



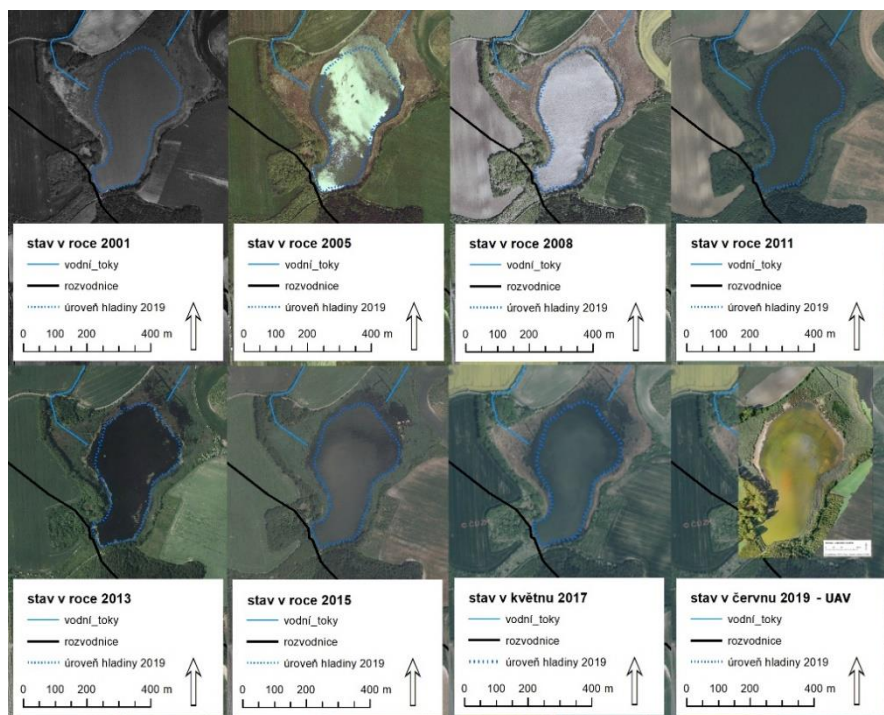
Obr. 11: Historické snímky vývoje plochy zátopy Dobroměřického rybníka – II. vojenské mapování cca 1840 (vlevo nahoře); armádní LMS 1938 (vpravo nahoře), 1952 (vpravo i vlevo dole). Podkladová data © CENIA a národní archiv LMS ČÚZK

Tato historická data (především archivní mapy, ortofotomapy ČÚZK a LMS z archivu AČR) jsou cenným zdrojem pro posouzení využití plochy zátopy (Obr. 11), úrovně hladiny a břehové linie, stavu vegetace na hrázi, případně v zátopě, nebo případného poškození hrází v minulosti. Znalost historie hrází může

významně napomoci identifikaci změn na tělese hráze, které vedou k případným anomáliím v jejím složení, nebo v chování hráze při mimořádných událostech.

Projekt „Obnova a výstavba rybníků v lesních porostech jako součást udržitelného hospodaření s vodními zdroji v ČR“ (2016 – 2019) definoval řadu nástrojů a dat, jak identifikovat hráze a plochy zátopy již neexistujících historických rybníků (Skokanová et al. 2017).

Změnu v ploše zátopy a charakteristiku nárůstu vodního květu v posledních 20 letech na ploše Dobroměřického rybníka ilustrují výřezy z dostupných archivních ortofotomap ČÚZK (Obr. 12).

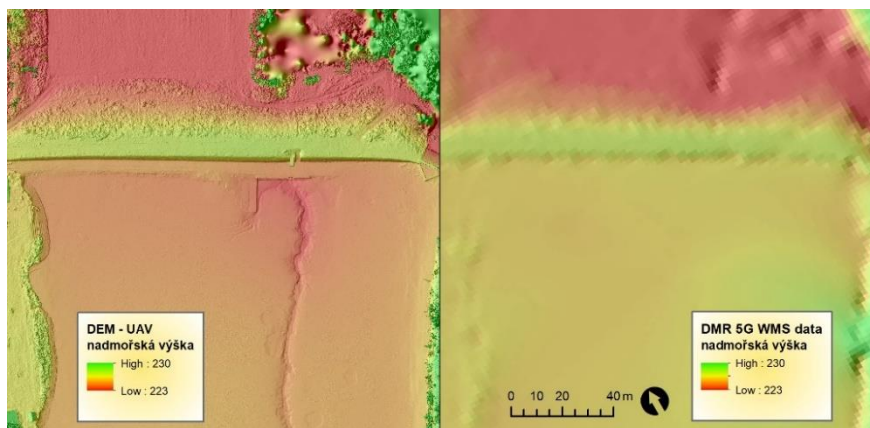


Obr. 12: Archivní ortofotomapy ČÚZK na ploše zátopy Dobroměřického rybníka v období 2000 – 2017, doplněné aktuálním ortofotosnímkiem na základě UAV monitoringu (2019).

Pro identifikaci potenciálu obnovy rybníků byly využity staré topografické mapy z pěti časových období:

- mapy II. rakouského vojenského mapování v měřítku 1:28 800 z období 1836-1852,

- mapy III. rakouského vojenského mapování v měřítku 1:25 000 z období 1876-1880,
- československé topografické mapy v měřítku 1:25 000 z období 1953-1956,
- československé topografické mapy v měřítku 1:25 000 z období 1988-1995,
- základní mapy ČR v měřítku 1:10 000 z období 2002-2006 (ZABAGED).



Obr. 13: Porovnání podrobnosti dat stínovaného reliéfu a nadmořských výšek modelu hráze a dna rybníku Podviňák na základě dat DMR 5G a modelu získaného podrobným UAV snímkováním (vlevo)

Tato data byla pro vyhledání rybníků doplněna o ortofotomapy z roku 2014 sdílená formou WMS. Hráze vyhledané v historických podkladech byly poté prověřovány jak na současné ortofotomapě, tak zejména z hlediska zachování objektu hráze na 3D podkladu – digitálním modelu reliéfu páté generace (DMR 5G). Model vznikl z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování výškopisu (LLS) území České republiky v letech 2009 až 2013. Dokončen byl k 30. 6. 2016 na celém území ČR. Je charakterizován hustou sítí nepravidelných bodů (průměr cca 2 body na 1 m²) a úplnou střední chybou výšky 0,18 m v otevřeném terénu a 0,3 v lesních porostech (ČÚZK 2020). Ačkoliv testování modelu prokázalo i větší výškopisné odchylky, jeho podrobnost je dostatečná pro identifikaci terénních objektů, o velikosti hrází MVN i jejich zachovalých částí.

Model lze proto s výhodou využít pro stanovení základních dimenzí hrází, včetně kubatur, pro určení sklonů návodního i vzdušního líce a určení základní geometrie hráze, včetně nivelety koruny hráze, její šířky a dalších geometrických parametrů. To umožňuje orientační posouzení stability, případného sedání koruny, rizika přelití, apod. Z DMR 5G lze určit dostatečně přesně rovněž reálnou

čáru zatopených objemů až k úrovni koruny hráze a posoudit tak velikost trvale zatopeného objemu, velikost retenčního objemu i šířku případných litorálních pásem při změně úrovně hladiny. Pro předběžné studie jsou tato data dostatečně podrobná, výhodou dat získaných z LLS je tak zajištění dat v úrovni terénu i pod vegetačním krytem, byť se sníženou kvalitou oproti snímkování v otevřeném terénu.

V plném rozlišení pro použití v desktopových GIS SW je třeba data DMR 5G komerčně pořídit, pro orientační posouzení situace a pro základní analýzy typu vykreslení příčného a podélného profilu, přibližného výpočtu objemu, vytvoření pole viditelnosti, lze s výhodou použít přímo online rozhraní „Analýzy výškopisu“, poskytované ČÚZK (<https://ags.cuzk.cz/av/>). Odtud je dokonce možné vypočtené výsledné linie profilů a dalších prvků stahovat ve formátu Shapefile, CAD, nebo jako textové soubory.

Před případnou realizací konkrétních sanačních opatření nebo při plánovaných rekonstrukcích je samozřejmě třeba provést přesnější doměření hráze (Obr. 13). I to lze provést bezkontaktně – geodeticky, stereofotogrammetricky s využitím RTK geolokace zařízení UAV, nebo lépe s využitím přesně zaměřených vřícovacích bodů, případně rovněž s využitím laserového skenování z pevného stanoviště, nebo na nosiči UAV. Na obrázku je patrná řádově vyšší přesnost dosažitelná UAV daty (rozlišení jednotky cm, oproti jednotkám m), na druhou stranu v pravém horním rohu snímku lze vidět problémy spojené s fotogrammetrickým pořizováním dat – kdy data jsou získána včetně vegetačního krytu a je problematické odvození skutečné úrovně terénu.

4.2.3 Data pořizovaná bezpilotními prostředky

Poslední, nicméně v současné době klíčovou, množinu dat tvoří data snímána s využitím UAV (dronů) a s pomocí blízké fotogrammetrie kamerami a fotoaparáty nesenými na teleskopických držácích, případně z pevných stanovišť. Problematika využití dat UAV je v současné době již velmi široká a jejich aplikace je využívána v mnoha oborech, kde je třeba zajišťovat aktuální a velmi detailní monitoring cílových lokalit. Typicky se pořizují data na plochách jednotek km² až jednotek m² a v zásadě lze konstatovat, že rybníční hráze jsou objekty optimálně vyhovující svou velikostí pro snímkování s využitím běžných komerčních dronů.

Přehled možných aplikací při monitorování poškození zemědělských půd je zpracován např. Krásou (Žížala et al. 2016), nebo Báčovou (Báčová 2018; Báčová et al. 2019). Při monitorování hrází rybníků se mohou uplatňovat jak aktivní (laserové skenování, radar), tak pasivní senzory, nicméně v podmínkách ČR

jednoznačně převažuje využití pasivních optických senzorů, které jsou finančně méně náročné.

Pro jednotlivé aplikace lze využívat především následující typy senzorů:

- RGB senzory (klasické fotoaparáty a kamery) – pracují v oblasti vlnových délek viditelného spektra (380 – 780 nm) výsledkem jsou 3D modely a ortofotomapy snímáných hrází, stejně jako ilustrační šikmé snímky a videozáznamy umožňující vzdálenou inspekci i tvorbu audiovizuálních děl pro prezentační účely jednotlivých hrází. Snímky jsou pořizovány za denního světla.
- Multispektrální senzory – pracují obvykle v oblasti vlnových délek viditelného (450 – 700 nm) a blízkého infračerveného spektra (NIR, cca 800 - 860 nm), případně pásma Red Edge (cca 720 nm). Tím umožňují rozlišení především stavu vegetačního pokryvu, díky jeho významné změně odrazivosti právě v oblasti NIR. Mají o něco horší prostorové rozlišení a využívány jsou rovněž ke snímkování během dne.
- IR senzory (termální kamery) – pracují v oblasti vlnových délek tepelného infračerveného záření (7500 – 13500 nm). Tím umožňují (po kalibraci) snímání vyzařovaných teplot snímkaných objektů. Kamery poskytují horší prostorové rozlišení než multispektrální senzory a pro získání termálního signálu neovlivněného příliš materiálem a barvou povrchu je třeba se vyhnout významnému vlivu odraženého slunečního záření – tedy ideálně snímkovat po soumraku nebo před východem slunce.

Se všemi pořízenými daty se pojí termín Ground Sampling Distance (GSD). Jedná se o finální rozlišení pořizovaných dat (velikost pixelu) na úrovni zemského povrchu. GSD výsledných modelů závisí na kvalitě snímače a výšce letu. V současné době je v případě RGB dat u monitoringu hrází relativně snadno bez mimořádných nákladů s běžnými UAV prostředky dosažitelné rozlišení 3D modelů a ortofot na úrovni GSD cca 0,5 – 5 cm, v závislosti na velikosti snímkané části hráze, GSD multispektrálních dat se obvykle jedná o GSD 2 – 8 cm, a v případě termálních dat z IR kamery je obvyklé GSD na úrovni 10 cm a horší. Samozřejmě lze pořizovat i data podrobnější, ale vyžaduje to již relativně nízké letové hladiny a podstatně vyšší hardwarové i časové nároky na pořízení i zpracování dat.

V případě RGB dat kamery z typického dronu používaného v ČR (UAV Phantom 4 s integrovanou DJI kamerou s rozlišením 12 Mpx) bylo provedeno testování polohové přesnosti a podrobnosti výsledného 3D modelu povrchu i ortofota

(Báčová 2018). Z výsledku je patrné, že pro běžné hráze lze provádět snímkování z výšky 20 – 40 m a přitom dosahovat pozemního rozlišení dat na úrovni cca 0,5 až 1 cm a přesnosti ve stanovení polohy a výšky bodů na finálním modelu v úrovni cca 1 – 2 cm. Přesnost v tabulce je uvedena pro vybraný kontrolní bod mezi testovanými zaměřenými terči tvořícími soustavu vřícovacích bodů daného náletu (Tab. 2). Pro finální geometrickou přesnost je samozřejmě klíčový počet využitých vřícovacích bodů a přesnost určení jejich polohy (Obr. 14). K tomu je obvykle využíváno automaticky detekovatelných terčů umístěných na snímkaných hrázích a zaměřených s využitím diferenciální GPS stanice s RTK korekcí.

Tab. 2: Souhrn výsledků testování vlivu výšky snímkování na rozlišení výstupu u UAV Phantom 4

výška snímkování (m)	DMT GSD (mm/pix)	ortofoto GSD (mm/pix)	polohová přesnost (cm)	výšková přesnost (cm)
2 m *	0,65	0,65	0,82	0,15
8 m	1,98	1,98	0,62	0,31
16 m	3,95	3,95	1,20	0,20
31 m	7,65	7,65	1,40	0,70
113 m	28,2	28,2	3,10	1,70

* pro výšku 2m bylo snímkování provedeno z teleskopického držáku kamerou Sony A6000.



Obr. 14: Výřez vřícovacího bodu velikosti 35 cm z ortofotomapy generované ze snímků pořízených v různých letových hladinách

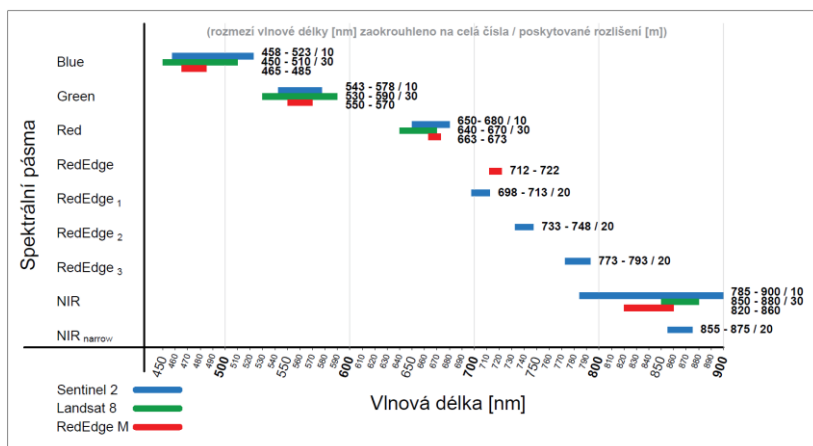
Mesas-Carrascosa (Mesas-Carrascosa et al. 2016), který pomocí UAV MD4-1000 vybaveným fotoaparátem Sony NEX-7 zkoumal archeologické památky v Andalusii, došel ve své publikaci k obdobným závěrům. Přesnost náletu z výšek 30, 40, 50, 60, 70 a 80 m zkoumal na vřícovacích, respektive kontrolních bodech zaměřených pomocí totální stanice. Přesnost pozic kontrolních bodů na ortofotech se zvyšovala téměř úměrně se zvyšováním letové hladiny ($RMSE_{30m}=3,8$ cm, $RMSE_{80m}=9,5$ cm), stejně jako hodnoty GSD ($GSD_{30m}=0,7$ cm, $GSD_{80m}=2,0$ cm).

Pokud se týká multispektrálních senzorů, a UAV nosičích je v současné době využíváno především senzorů Parrot Sequoia and MicaSense RedEdge. Obě zařízení jsou používána především v zemědělských aplikacích. Senzor Sequoia firmy Parrot je lehčí, menší a tedy používaný na malých UAV nosičích, nicméně

disponuje horší kvalitou doprovodných RGB dat (pokud nejsou tato pořizována během náletu druhou kamerou příslušného dronu) a chybějícím modrým pásmem (neposkytuje tedy plná RGB data). Zároveň během provozu více trpí na zahřívání senzoru, což může zkracovat jeho životnost v závislosti na venkovních teplotách a způsobu chlazení senzoru během letu.

Senzor Rededge-M firmy Micasense poskytuje plná RGB data i RedEdge a NIR pásma pro výpočty vegetačních indexů. Data obou senzorů jsou zpracovatelná v komerčních SW, v případě RedEdge-M lze s výhodou využít automatizované implementace do nejčastěji používaného SW, kterým je pro tyto účely Agisoft (v současné verzi Agisoft Metashape). Oba senzory disponují senzorem slunečního záření, který je nezbytné využít, aby mohla být provedena relevantní radiometrická korekce a získána skutečná hodnota reflektance. Nicméně je vhodné snímkovat za neměnných světelných podmínek a je třeba pořídit před zpracováním kontrolní snímky kalibračního panelu pro korekci úrovně dopadajícího záření.

Vzhledem k obvyklému charakteru hrází historických rybníků - tedy snímkování hrází z mnoha úhlů a z důvodu potřeby manipulace s UAV v okolí vyšší stromové vegetace není obvykle vhodné využití UAV typu křídlo, což je v případě multispektrálních senzorů typické u zemědělských aplikací. Jsou proto využívány multirotorové systémy. Z komerčních UAV využitelných pro snímkování hrází lze obě kamery z hlediska jejich velikosti a hmotnosti osadit na drony typu Phantom DJI (libovolné verze), případně na jakékoliv větší zařízení.



Obr. 15: Porovnání rozmezí citlivosti vlnových délek satelitních senzorů (Landsat ETM+ a Sentinel 2) a Rededge-M v jednotlivých spektrálních pásmech.

Finální data umožní s GSD v jednotkách cm charakterizovat pomocí vegetačních indexů stav vegetace na snímkaných hrázích a v okolí zátopy. Z hlediska porovnání s daty satelitních nosičů je zajištěn poměrně dobrý spektrální překryv jak s daty Landsat ETM+, tak s daty Sentinel 2, a multispektrální data získaná s pomocí UAV tak mohou být i kalibračním nástrojem pro vyhodnocení příslušných satelitních dat (Najman 2019). Pro samotné zpracování dat lze využít identické SW nástroje jako u RGB dat i stejný systém vřícovacích bodů.

Fotogrammetrické zpracování dat UAV již v současné době není mimořádně hardwarově a softwarově náročné. Existují i řešení zcela zdarma, nicméně se jedná o programy používané ve výzkumné sféře a uživatelsky značně komplikovaná řešení. Komerční řešení poskytuje řada výrobců a ceny profesionálních software se pohybují od 80 tis. Kč, nicméně jednorázově lze využít i cloudová řešení, kdy zpracování scény výrobcem stojí jednotky tisíc Kč. Hardwarová náročnost pak závisí na požadované podrobnosti a počtu i rozlišení zpracovávaných snímků, nicméně analýzy lze provádět s využitím běžné stolní výpočetní techniky, ovšem výpočty jsou pak časově náročné (desítky hodin i více). Při využití výpočetních stanic s posíleným grafickým výpočetním výkonem je zpracování řádově rychlejší (Báčová 2018).

4.3 Ukázka postupu získání a zpracování RGB dat

Využití UAV fotogrammetrie a snímkování jak ve viditelném, tak v IR spektru pro určení charakteristiky povrchu a 3D tvaru hráze bylo otestováno např. na hrázi rybníka Podviňák (nedaleko Českého Brodu, GPS: 50.06° N, 14.85° E).



Obr. 16: Pohled na rybník Podviňák v 3D náhledu na ortofotomapě (www.mapy.cz)

Hráz rybníka byla snímána dvěma UAV systémy, s využitím nosičů DJI Phantom 4 a Tarot X. V případě hexakoptéry Tarot X je výhodou možné vyšší užité zatížení (až 3kg), nicméně za ceny výrazně kratší letové doby oproti systému DJI Phantom (10 min oproti cca 23 min). Jedno snímkování proběhlo v únoru, na hrázi s minimálním vegetačním pokryvem a se zbytky sněhové pokrývky (Obr. 17), druhé snímkování pak v listopadu, s povrchem více zakrytým neudržovanou vegetací na konci vegetační sezóny (Obr. 18). Charakteristika obou snímacích systémů a podrobnosti výsledných dat je uvedena v tabulce (Tab. 3).

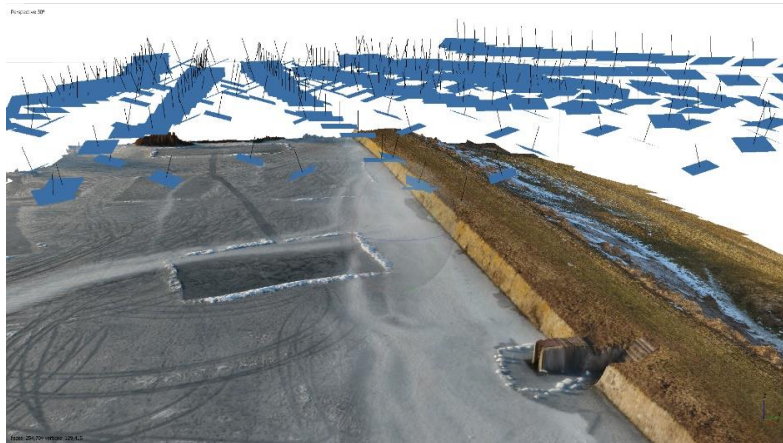
Na hrázi a na ploše pod hrázi bylo rozmístěno 12 vličovacích bodů (Obr. 14) v pravidelných rozstupech. Pozice vličovacích bodů byly zaměřeny diferenciální GPS s RTK korekcí (Trimble GNSS X91), poskytovanou CZEPOS, s horizontální odchylkou HRMS=1,21÷1,56 cm a vertikální odchylkou VRMS=1,67÷2,52 cm. Od této odchylky se pak odvíjí i absolutní přesnost získaných modelů v souřadnicovém systému S-JTSK. Na základě provedených testů na dalších lokalitách (Báčová 2018) lze doporučit využití optimálně osmi a více vličovacích bodů v nepravidelném rozmístění na okrajích i u středu snímkové plochy, nejméně pak pěti vličovacích bodů v rozmístění do kříže. Jinak je u fotogrammetrického zpracování (v závislosti na vnitřních parametrech použité kamery) rizikem vytvoření vypuklé nebo vyduté plochy s vyšší výškovou odchylkou v jejím středu. Při vhodném rozmístění vličovacích bodů je toto riziko minimalizováno a relativní odchylky v geometrii měřeného tělesa hráze se ve všech jejích částech pohybují maximálně v jednotkách cm (Tab. 2).

Tab. 3: Parametry použitých snímacích zařízení na lokalitě Podviňák

	RGB model pro 3D zaměření	IR model koruny hráze	IR model plochy pod hrázi
UAV nosič	Phantom 4	Tarot X	Phantom 4
Snímací zařízení	FC330	Optris TIM 450	Flir Tau2 336
Rozlišení kamery	4000 × 3000 pix	382 × 288 pix	336 × 256 pix
Spektrální rozsah	0.38–0.78 μm	7.5–13 μm	7.5–13.5 μm
Počet snímků	456	142	42
Výška náletu	42 m	23 m	88 m
GSD	0.016 m/pix	0.09 m/pix	0.11 m/pix

K samotnému snímkování lze využít jak manuální navigaci dronu pilotem a kontinuální snímkování s pravidelným časovým odstupem (např. 3 vteřiny), tak příslušné automatizované SW nástroje, které zajistí správnou trajektorii letu pro získání dostatečného počtu snímků s překryvem optimálně cca 70% ve směru i podél směru letu. Neboť hráze jsou trojrozměrné objekty s poměrně významným převýšením koruny hráze oproti její patě v poměru k výšce náletu a vzhledem k poměrně příkrým svahům např. návodních liců, nebo v případě přítomnosti

stromů na hrázích lze doporučit snímkování nejen svisle (tzv. „nadíř“), ale využití i dostatečného počtu šikmých snímků ideálně s úhlem kolmým na jednotlivé snímkované povrchy – svahy hráze (Obr. 17). I takový typ snímkování lze zajistit automatizovaně, pro drony od výrobce DJI např. s pomocí volně dostupného SW Pix4D Capture (<https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>), nebo s využitím otevřeného SW Mission Planner (<https://ardupilot.org/planner/>).



Obr. 17: Fotogrammetricky získaný 3D model hráze rybníka Podviňák (únor) s vyznačením pozice snímků využitých k fotogrammetrickému zpracování.

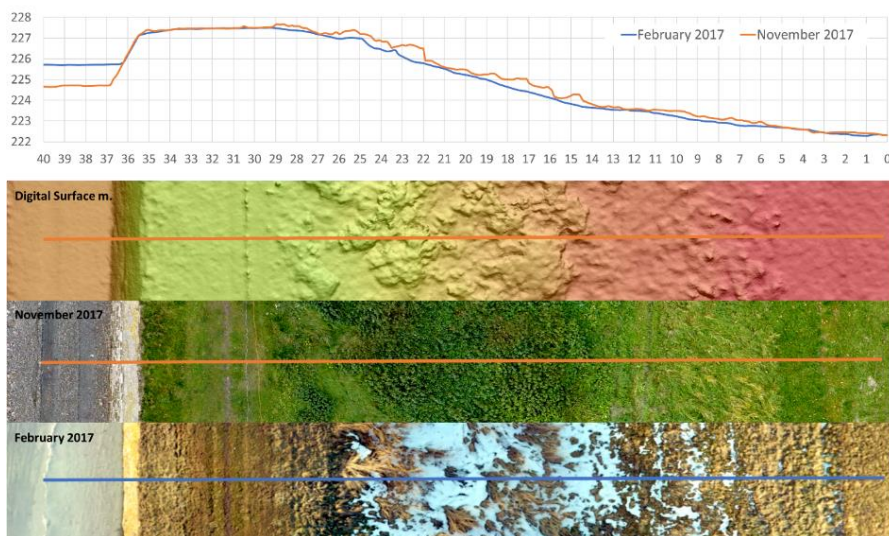


Obr. 18: Fotogrammetricky získaný 3D model hráze rybníka Podviňák (listopad)

Následuje zpracování snímků ve fotogrammetrickém SW. K dispozici je dnes řada nástrojů, a to i volně dostupných, nicméně komerční SW dle provedených testů nabízejí prozatím výrazně vyšší uživatelský komfort a automatizaci a snižují tak zásadně dobu potřebnou pro zpracování dat.

V případě rybníku Podviňák bylo ke zpracování využito SW Agisoft Photoscan (<https://www.agisoft.com/>). Popis zpracování dat v příslušném SW i podrobné tutoriály jsou dostupné v českém (Báčová 2018; Najman 2019) i anglickém jazyce v řadě prací (<https://www.agisoft.com/support/tutorials/beginner-level/>).

Výsledkem zpracování jsou následně produkty ortofotomapy celého snímkaného prostoru a 3D bodového mračka, následně pak rastrový digitální model povrchu. Vše s přesností odpovídající použité technice a výšce náletu (Tab. 3). Získané modely již lze převést do libovolného formátu GIS, případně CAD a využít k potřebným analýzám – ať již se jedná o hodnocení tvaru hrází, objemu, sklonu svahů, vyhodnocení objemových změn, k tvorbě výkresové dokumentace (půdorysy, podélné i příčné řezy) i k dalším úlohám. Vzhledem k výslednému produktu v absolutním souřadnicovém systému (např. S-JTSK) lze nad ortofotomapou i modelem povrchu přímo provádět měření výšek i pozice.

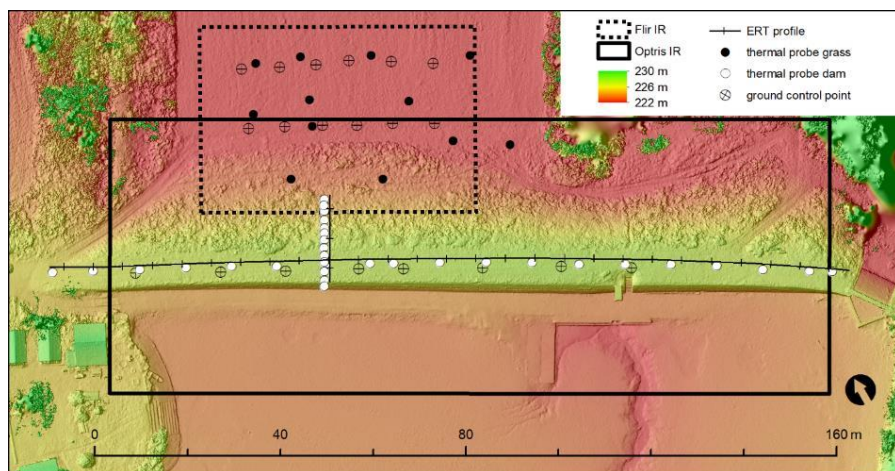


Obr. 19: Příčné řezy hrází na základě fotogrammetrického zpracování náletů provedených ve vegetačním a v nevegetačním období ukazující na změnu úrovně vzdušního líce.

Ukázkou takového zpracování může být tvorba řezů hrází v obou vegetačních obdobích ukázkou změny výšky vegetace na vzdušném líci, nebo úrovně dna a hladiny nádrže (Obr. 19).

4.4 Ukázka postupu získání a zpracování IR dat

Možnosti využití snímání teploty povrchu byly otestovány na stejné lokalitě a během identických náletů na rybníku Podviňák s využitím a porovnáním dvou IR technologií (Tab. 3). Teploty a objemové vlhkosti půdy obou snímkaných částí scény byly měřeny těsně pod povrchem rovněž fyzicky s využitím čidel ML3 Theta Probe (Delta-T Devices, USA) a TRIME-PICO 64 (IMKO, Německo). Čidla stanovují půdní vlhkost na principu FDR (frequency domain reflectometry) a TDR (time domain reflectometry). Půdní vlhkost je vypočítávána z měřené elektrické permitivity půdního prostředí dle dříve publikovaných vztahů (Topp et al., 1980). Měření teplot povrchu pomocí sond bylo provedeno s pěti replikacemi vždy na ploše 0,5 m². Všechna data byla následně zpracována v MS Excel a importována v podobě vektorových bodových záznamů do GIS (ArcGIS Desktop) pro provedení dalších prostorových analýz a srovnání (Obr. 20). Obrázky s anglickým popisem v této kapitole uváděné jako příklad jsou převzaty z publikace (Zumr et al. 2018) a z toho důvodu v následujícím textu uvádíme rovněž anglické značení vybraných míst a parametrů.



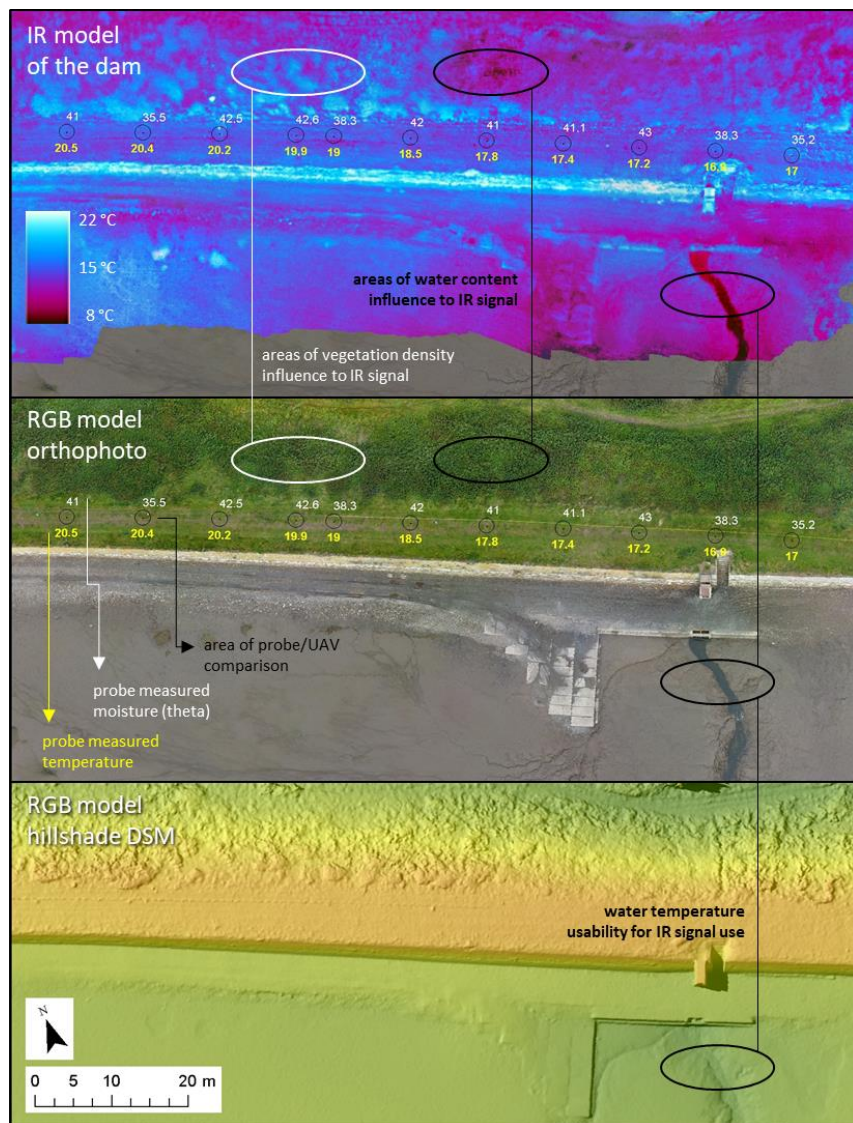
Obr. 20: *Plochy hráze a pod hráží snímkané jednotlivými IR kamerami, pozice vličovacích bodů (GCP) a pozice lokalit měřených teplotními sondami.*

Údaje z vlhkostních čidel a údaje o teplotě profilu hráze (DAM) spolu s údaji plochy pod hráží (GRASS) byly vykresleny společně. Pro porovnání s naměřenými teplotami UAV byly namísto lokálních hodnot, které mají vysokou prostorovou variabilitu a nikoli přesné prostorové polohování, jak je uvedeno výše, použity průměrné teploty v kruhových zónách o průměru 1 m odpovídajících vždy pozicím sondy (Obr. 21). Pro termální snímky je vždy třeba se vyhnout osluněným povrchům.

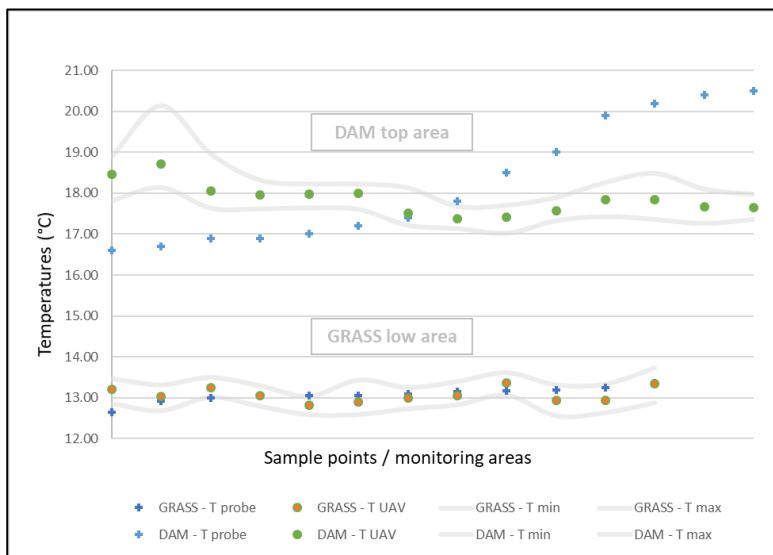
Navzdory monitorování pomocí UAV během soumraku a bez přímého slunečního světla se původní nekalibrovaný signál UAV IR lišil od teplot měřených sondou v průměru o více než 3 °C v oblasti GRASS (údaje Flir Tau2 336) a dokonce o více než 6 °C v oblasti DAM (údaje Optris TIM 450). Problémem oblasti DAM bylo, že teplota klesala během následného měření pomocí sondy, zatímco průzkum UAV byl proveden rychle (během západu slunce). Pro porovnání relativních rozdílů byly proto průměrné teploty UAV v zónách nejprve korigovány (kalibrovány) podle průměrné teploty získané sondami na plochách GRASS a DAM (tedy z časů odpovídajícím náletům). Podle všech provedených testů na řadě hrází i podle dostupné literatury nelze s využitím běžných IR kamer získat bez kalibrace správné absolutní teploty povrchů s přesností vyšší než jednotky °C, často jsou odchylky i v závislosti na výšce náletu a charakteru povrchu i vyšší než 5 °C.

Proto je třeba pro získání přesnějších hodnot teploty s využitím IR kamer na UAV vždy nutné provádět kalibraci, nebo lze data využít pouze k relativnímu porovnání změny teploty ve snímku, což obvykle postačuje pro požadovaný účel, neboť cílem je spíš hledání kontrastních rozdílů v teplotách ve snímkové scéně, než měření konkrétních teplot (Obr. 21).

Prezentovaná metoda použitá pro porovnání sledovaných a naměřených teplot ukázala, že monitorování UAV může poskytnout spolehlivé údaje pro porovnání rozdílů teplot a obsahu vody v půdním povrchu, ale je třeba brát do úvahy vliv vegetace. Vzhledem k tomu, že přehrady s rybníky jsou zřídka holé půdní nebo nízké vegetační povrchy, je třeba pečlivě zvolit klimatické podmínky (bez sluneční aktivity) a upřednostňovat nízký stav vegetace (v ideálním případě nevegetační období). Obrázek (Obr. 21) ukazuje nevýhody a potenciál bezpilotních vzdušných systémů a infračervené snímky při monitorování vlhkosti půdy na rybnících. Vysoce nasycené povrchy, jako je původní koryto ve dně vypuštěné nádrže, jsou snadno zjištělné a mohou být dokonce automaticky klasifikovány. Vyšší zelená a hustá vegetace na povrchu přehrady může skrýt mnoho účinků pronikání vody, zvláště když se teplota mění po relativně teplém dni. Obvykle je vhodné využít kombinaci všech typů dat (RGB ortofoto, digitální model povrchu a IR data) pro identifikaci různých souvisejících jevů, které mohou ovlivňovat monitorované veličiny. Teploty získávané senzory je třeba kalibrovat měřením povrchu, případně využívat pouze vizualizaci relativních hodnot a lokálních rozdílů pro hledání ploch s odlišnou charakteristikou.



Obr. 21: Ukázka porovnání IR a RGB dat, s vyznačením kruhových lokalit vyhodnocení teploty dle UAV, pozice sond a s odkazy na možné jevy pozorovatelné na termálních datech.



Obr. 22: Porovnání měřených a snímkových teplot na koruně hráze (DAM) a pod hrází (GRASS)

Na závěr lze konstatovat, že termokamery a IR snímky jsou vynikajícím nástrojem pro odhalování lokálních poruch technických konstrukcí (poškozené ložisko, solární panel), živých objektů i ve tmě, úniků teplých průmyslových vod a dalších jevů, kdy změna signálu je způsobena skokovou změnou teploty v relativně homogenním teplotním prostředí. Nicméně detekce malých změn v přirozených prostředích, jakými jsou hráze rybníků, kde je teplota povrchů přirozeně vysoce variabilní v měřené scéně, vyžaduje významné expertní znalosti, propojení s dalšími daty před interpretací a proto je využitelnost uvedených dat doposud omezená.

5 Závěr

Tato metodika představuje možnosti využití moderních technologií pro potřeby průzkumu hrází malých vodních nádrží. Zpracována byla především za účelem rozšíření možností při průzkumech historických hrází v případech, kdy běžné metody nepostačují nebo jejich aplikace není možná či vhodná (jedná se například o průzkumné vrty, kopané sondy apod.). Představeny jsou jednak vybrané geofyzikální metody a jednak metody využívající bezpilotních leteckých prostředků s instalovanými snímači různého typu. Vzhledem k tomu, že se jedná o metody náročné na odbornost a vybavení a mající svá omezení, nepředpokládá se jejich masové nasazení v praxi. Těžiště jejich využitelnosti spočívá především ve specifických případech. Praktické použití tak lze očekávat výhradně u specializovaných institucí s odpovídajícím vybavením, znalostí metod a jejich možností však může pomoci především vlastníkům, uživatelům a správcům rybníků a malých vodních nádrží.

6 Použitá literatura a zdroje

6.1 Literatura

- Al-Fares W, 2011. Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria. *J. Appl. Geophys.* 75, 464–471.
- Archie GE, 1942. The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.* 146, 54–62.
- Arosio D, Munda S, Tresoldi G, Papini M, Longoni L, Zanzi L, 2017. A customized resistivity system for monitoring saturation and seepage in earthen levees: installation and validation, *Open Geosci.*, 9, 1.
- Beneš V, 2008. Geofyzikální monitorovací systém pro protipovodňové hráze (GMS), *Inženýrské stavby*, 3, 114–116.
- Báčová M, 2018. Monitoring projevů vodní eroze na zemědělských půdách. ČVUT v Praze
- Báčová M, Krása J, Devátý J, Kavka P, 2019. A GIS method for volumetric assessments of erosion rills from digital surface models. *Eur J Remote Sens* 52:96–107. doi: 10.1080/22797254.2018.1543556
- Beneš V, Tesar M, Boukalová Z, 2011. Repeated geophysical measurement – the basic principle of the GMS methodology used to inspect the condition of flood control dikes. *River Basin Manag VI, Conf* 105–115.
- Corwin DL, Kaffka S., Hopmans JW, Mori Y, Lesch SM, Oster JD, 2003. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. *Geoderma* 114 (3–4), 231–259.
- Corwin DL, Lesch SM, 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. *Survey protocols. Comp. Electron. Agric.* 46, 103–133.
- *ČERNOCHOVÁ, K. a V. DAVID. Hráze historických rybníků z pohledu tvaru a stability. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2020, 62(1), 11–17. ISSN 0322-8916.
- *DAVID, V. Analysing the shape of historical fishpond dams using detail elevation data. In: *Hydrology and water resources, forest ecosystems. 17th International multidisciplinary scientific conference SGEM 2017, Vienna, 2017-11-27/2017-11-30. SGEM WORLD SCIENCE, 2017. s. 27-34. Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems. sv. 17. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-27-0.*
- *DAVID, V., K. ČERNOCHOVÁ a T. DAVIDOVÁ. Shape of historical fishponds as a source of dam breach risk. In: *Proceedings of the 38th IAHR*

- World Congress. 38th IAHR World Congress, Panama, 2019-09-01/2019-09-06. Madrid: IAHR - International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2019. s. 1437-1445. Proceedings of the IAHR World Congress. ISSN 2521-7119.
- *DAVID, V., K. ČERNOCHOVÁ a T. DAVIDOVÁ. Hráze historických rybníků z pohledu tvaru příčného profilu na vybraných příkladech v okresech Praha–východ, Kolín a Kutná Hora. *Vodní hospodářství*. 2018, 68 12-14. ISSN 1211-0760.
 - *DAVID, V. et al. Elevation data for morphometric analysis of historical ponds dams. In: 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, Conference Proceedings Volume 17, Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing Issue 22, Geodesy and Mine Surveying. 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017, Albena, 2017-06-27/2017-07-06. Sofia: International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2017. s. 481-488. sv. 17. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-02-7.
 - *DAVID, V. a S. ŽATECKÝ. Hráze historických rybníků. In: DAVID, V. a T. DAVIDOVÁ, eds. *Rybníky 2016*. Praha, 2016-06-23/2016-09-24. Praha: Česká společnost krajinných inženýrů - ČSKI, 2016. s. 31-40. ISBN 978-80-01-05978-4.
 - Guo L, Mount GJ, Hudson S, 2020. Pairing geophysical techniques improves understanding of the near-surface Critical Zone: Visualization of preferential routing of stemflow along coarse roots. *Geoderma* 357:113953. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113953
 - Hasani H, Mamizadeh J, Karimi H, 2013. Stability of slope and seepage analysis in earth fills dams using numerical models (Case Study: Ilam DAM-Iran). *World Appl. Sci. J.* 21, 1398–1402.
 - Jeřábek J, Zumr D, Dostál T, 2017. Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance, *Soil Tillage Res.*, 174, 231–240.
 - Kapička J, Žížala D, Krása J, Munster P, 2019. *Nástroje pro monitoring eroze zemědělské půdy*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Praha
 - Karl L, Fechner T, Schevenels M, François S, Degrande G, 2011. Geotechnical characterization of a river dyke by surface waves surface waves, *Near Surf. Geophys.*, 9, no. 1806.
 - Kim JH, Yi MJ, Song Y, Jee Seol S, Kim KS, 2007. Application of Geophysical Methods to the Safety Analysis of an Earth Dam, *J. Environ. Eng. Geophys.*, 12, 2, 221–235.
 - *KRÁSA, J. a V. DAVID. Close Range Photogrammetry and Thermal Imagery in Monitoring of Soil Moisture in Dam Structures of Historical

- Fishponds. In: Proceedings. International Conference on Insights on the Water-Energy-Food Nexus, Lefkada, 2018-06-27/2018-06-30. Basel: MDPI AG, 2018. s. 1-7. sv. 2. ISSN 2504-3900.
- Krása J, Tejkl A, Stašek J, 2019. Určení rozsahu půdy nechráněné vegetací v období příválových srážek za účelem posouzení erozního rizika. VTEI 39–45
 - Lin CP, Hung YC, Wu PL, Yu ZH, 2014. Performance of 2-D ERT in Investigation of Abnormal Seepage: A Case Study at the Hsin-Shan Earth Dam in Taiwan, J. Environ. Eng. Geophys., 19, 2, 101–112.
 - Loke M.H., 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. GEOTOMO software guide.
 - Macháček J, 2005. Geofyzikální průzkumné metody, Fakulta stavební, ČVUT v Praze, online:
<http://departments.fsv.cvut.cz/k135/wwwold/ge10/gfvsript.pdf>, (cit. 08/2020).
 - Mesas-Carrascosa FJ, García MDN, De Larriva JEM, García-Ferrer A, 2016. An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaics to survey archaeological areas. Sensors (Switzerland) 16:. doi: 10.3390/s16111838
 - Najman T, 2019. Analýza plošného zastoupení vegetace na zemědělském pozemku s využitím družicových dat a dat RPAS. ČVUT v Praze, Fakulta stavební
 - Perri MT, Boaga J, Bersan S, Cassiani G, Cola S, Deiana R, Simonini P, Patti S, 2014. River embankment characterization: The joint use of geophysical and geotechnical techniques, J. Appl. Geophys., 110, 5–22.
 - Rhoades JD, Manteghi NA, Shouse PJ, Alves WJ, 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity. new formulations and calibrations. Soil Sci. Soc. Am. J. 53, 433–439.
 - Rubin Y., Hubbard S.S. (Eds.), 2005. Hydrogeophysics, Springer, Netherland, p 129-156.
 - Říha J., Sedláček M., Smrž P., Veselý R., Žatecký S., 2014. Návrh a realizace suchých nádrží z pohledu technickobezpečnostního dohledu, Ministerstvo životního prostředí, Obor ochrany vod, Praha.
 - Sentenac P, Benes V, Budinsky V, Keenan H, Baron R, 2017. Post flooding damage assessment of earth dams and historical reservoirs using non-invasive geophysical techniques, J. Appl. Geophys., 146, 138–148.
 - Shah PH, Singh DN, 2005. Generalized Archie's Law for estimation of soil electrical conductivity. Journal od ASTM International, 2, 5, 1–20.

- Schwarz BF, Schreiber ME, 2009. Quantifying Potential Recharge in Mantled Sinkholes Using ERT, *Ground Water*, 47, 3, 370–381.
- Skokanová H, Havlíček M, David V, Pavelková R, 2017. Identifikace zaniklých rybníků na starých mapách pro posouzení možností jejich obnovy. In: *Rybníky 2017*. ČSKI, ISBN 978-80-01-06166-4, Praha, pp 25–33
- Sungkono A, Husein H, Prasetyo AS, Bahri F A, 2014. Monteiro Santos, and B. J. Santosa, 2014. The VLF-EM imaging of potential collapse on the LUSI embankment, *J. Appl. Geophys.*, 109, 218–232.
- Tayyab M, Morelli G, Kaka S., 2017. Investigating of seepage through embankment dam in Makkah, KSA using 3D electrical resistivity tomography and 3D ground penetrating radar imaging, In: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2017*, 272-273.
- Topp GC, Davis JL, Annan AP, 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines, *Water Resource Research*, 16, 574-582. <http://dx.doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Vinciková H, 2015. Krajinné struktury, využití území a kvalita povrchových vod - Studium vzájemných vztahů nástroji DPŽ. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
- Zumr D, 2012. Aplikace simulačních modelů na popis preferenčního proudění v půdním profilu. Praha. Doktorská práce (Ph.D.). České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- *Zumr D, David V, Krása J, Nedvěd J, 2018. Geophysical Evaluation of the Inner Structure of a Historical Earth-Filled Dam. *Proceedings*, 2, 664.
- *Zumr D, David V, Jeřábek J, Noreika N, Krasa J, 2020. Monitoring of the soil moisture regime of an earth-filled dam by means of electrical resistance tomography, close range photogrammetry, and thermal imaging. *Environ Earth Sci* 79, 299. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09052-w>
- Žížala D, Krása J, Báčová M, et al., 2016. Monitoring erozního poškození půd v ČR nástroji dálkového průzkumu Země. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Praha, CZ

Pozn.: Zdroje označené hvězdičkou () jsou publikacemi vytvořenými v rámci řešení projektu a pro jeho potřeby.*

6.2 Normy a předpisy (použité a související)

- ČÚZK (2020) Technická zpráva - DMR5G
- ČSN 75 2310 Sypané hráze. 2006.
- ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže. 2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 48 s. Praha: Hydroprojekt CZ a.s. ve spolupráci s ČVUT v Praze a VODNÍ DÍLA TBD, a.s., 38 s.
- ČSN 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních. 2014. Sweco Hydroprojekt a.s. ve spolupráci se společností VODNÍ DÍLA – TBD, 16 s.
- Metodický pokyn k ošetřování, údržbě a ochraně vegetace na sypaných hrázích malých vodních nádrží při jejich výstavbě, stavebních změnách, opravách a provozu. 2003. Věstník Ministerstva zemědělství České republiky, částka 2, 5 s.
- Metodický pokyn OOV MŽP k zabezpečení technickobezpečnostního dohledu na hrázích malých vodních nádrží IV. Kategorie. 1998. Věstník Ministerstva životního prostředí, částka 5.
- Zákon České národní rady č. 114/1992 Sb. o ochraně přírody a krajiny
- Zákon č. 254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) ve znění pozdějších předpisů

7 Seznamy

7.1 Použité zkratky

ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
BPEJ	Bonitační půdně-ekologické jednotky
CIR	Blízké infračervené záření (Close Infrared)
DEMP	Dipólové elektromagnetické profilování
DIBAVOD	Digitální báze vodohospodářských dat
DMR5G	Digitální model reliéfu 5. generace
DMT	Digitální model terénu
DPZ	Dálkový průzkum Země
ERT	Elektrická rezistivní tomografie
FSv	Fakulta stavební
GF	Geofyzika, geofyzikální metody
GIS	Geografický informační systém
GPR	Georadar (Ground Penetration Radar)
GSD	Rozlišení na povrchu (Ground Sampling Distance)
HEIS VÚV	Hydro-ekologický informační systém Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. M.
IR	Infračervené záření (Infrared)
KN	Katastr nemovitostí
LMS	Letecké měřické snímky
MVN	Malá vodní nádrž
RGB	Červeno-zeleno-modrý barevný model (Red-Green-Blue)
RTK	Kinematika v reálném čase (Real-time Kinematics)
RÚIAN	Registr územní identifikace, adres a nemovitostí
SOWAC-GIS	Geografický informační systém ochrany půdy a vody (Geographic Information System for Soil and Water Conservation)
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální
TBD	Technickobezpečnostní dohled
UAV	Bezpilotní letecké prostředky (Unmanned Aerial Vehicles)
WAKPP	Webový archiv komplexního průzkumu půd
WMS	Webová mapová služba (Web Map Service)
ZABAGED	Základní báze geografických dat
3D	Trojrozměrný(á/é)

7.2 Seznam obrázků

Obr. 1: Elektrická konduktivita na mezifázovém rozhraní, ve vodě a ve skeletu (upraveno podle Corwin a Lesch, 2005).....	15
Obr. 2: Automatický geoelektrický systém ARES sestávající se z centrální řídicí jednotky, multiplexoru, pasivního multielektrodového kabelu a 12 V baterie. Napravo aktivní (inteligentní) multielektrodový kabel vhodný pro delší profily.	16
Obr. 3: Georadar - měření anténním systémem 200 MHz.....	18
Obr. 4: DEMP -měření aparaturou CMD – Explorer.....	18
Obr. 5: Vedení podélného profilu po koruně hráze.....	20
Obr. 6: Překládání jednotlivých ERT sekcí a vizualizace reálně měřené oblasti.....	21
Obr. 7: Výsledky průzkumu hráze rybníku Ján pomocí metod DEMP a GPR ...	24
Obr. 8: Výsledné pole měrných odporů pod podélným profilem vedeným po hrázi rybníka Ján (upraveno z Zumr et al., 2018)	25
Obr. 9: Příčný profil hrází s vyznačenými liniemi nově dosypané zeminy a náznaku depresního kužele.....	26
Obr. 10: Srovnání objemové vlhkosti a elektrické konduktivity těsně pod povrchem hráze.....	26
Obr. 11: Historické snímky vývoje plochy zátopy Dobroměřického rybníka – II. vojenské mapování cca 1840 (vlevo nahoře); armádní LMS 1938 (vpravo nahoře), 1952 (vpravo i vlevo dole). Podkladová data © CENIA a národní archiv LMS ČÚZK.....	33
Obr. 12: Archivní ortofotomapy ČÚZK na ploše zátopy Dobroměřického rybníka v období 2000 – 2017, doplněné aktuálním ortofotosnímkiem na základě UAV monitoringu (2019).	34
Obr. 13: Porovnání podrobnosti dat stínovaného reliéfu a nadmořských výšek modelu hráze a dna rybníku Podviňák na základě dat DMR 5G a modelu získaného podrobným UAV snímkováním (vlevo).....	35
Obr. 14: Výřez vřícovacího bodu velikosti 35 cm z ortofotomapy generované ze snímků pořízených v různých letových hladinách	38
Obr. 15: Porovnání rozmezí citlivosti vlnových délek satelitních senzorů (Landsat ETM+ a Sentinel 2) a Rededge-M v jednotlivých spektrálních pásmech.....	39
Obr. 16: Pohled na rybník Podviňák v 3D náhledu na ortofotomapě (www.mapy.cz)	40
Obr. 17: Fotogrammetricky získaný 3D model hráze rybníka Podviňák (únor) s vyznačením pozice snímků využitých k fotogrammetrickému zpracování.....	42
Obr. 18: Fotogrammetricky získaný 3D model hráze rybníka Podviňák (listopad)	42

Obr. 19: Příčné řezy hrází na základě fotogrammetrického zpracování náletů provedených ve vegetačním a v nevegetačním období ukazující na změnu úrovně vzdušního líce.	43
Obr. 20: Plochy hráze a pod hrází snímkové jednotlivými IR kamerami, pozice vlíčovacích bodů (GCP) a pozice lokalit měřených teplotními sondami.	44
Obr. 21: Ukázka porovnání IR a RGB dat, s vyznačením kruhových lokalit vyhodnocení teploty dle UAV, pozice sond a s odkazy na možné jevy pozorovatelné na termálních datech.	46
Obr. 22: Porovnání měřených a snímkových teplot na koruně hráze (DAM) a pod hrází (GRASS)	47

7.3 Seznam tabulek

Tab. 1: Rámcová charakteristika vybraných geofyzikálních metod	19
Tab. 2: Souhrn výsledků testování vlivu výšky snímkování na rozlišení výstupu u UAV Phantom 4	38
Tab. 3: Parametry použitých snímacích zařízení na lokalitě Podviňák	41

Titul: Vybrané neinvazivní metody průzkumu rybníčních hrází

Autoři: Ing. Václav David, Ph.D., doc. Ing. Josef Krása, Ph.D., Ing. David Zumr, Ph.D., Ing. Kateřina Černochová

Vydalo: České vysoké učení technické v Praze v roce 2020

Zpracovala: Fakulta stavební ČVUT

Vydání: první

Tisk: Tomáš Brož – AREA reklama

ISBN: 978-80-01-06803-8

