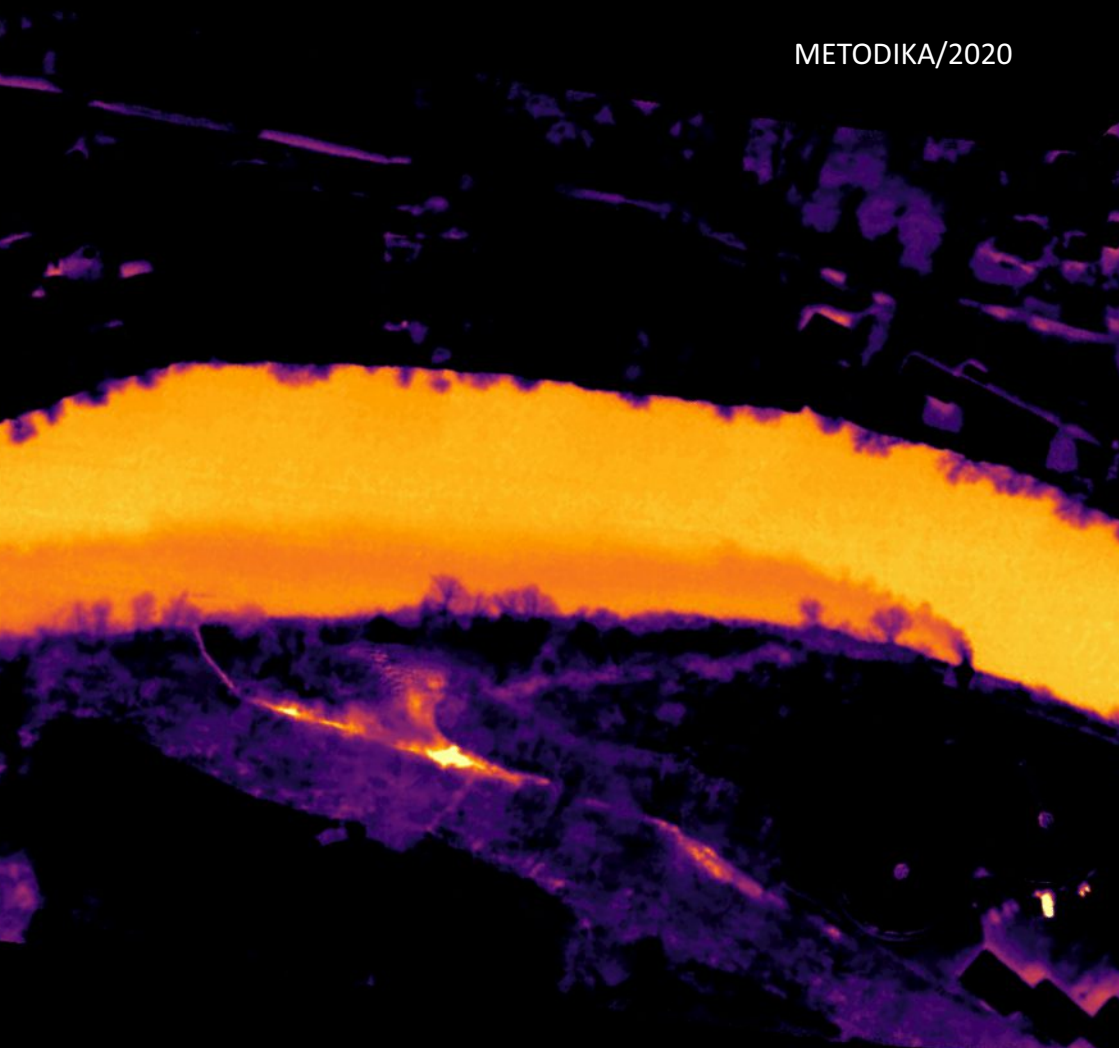


TERMOGRAFICKÉ SNÍMKOVÁNÍ PRO ÚČELY IDENTIFIKACE DRENÁŽNÍCH VÝUSTÍ A ZNEČIŠTĚNÍ POVRCHOVÝCH VOD

METODIKA/2020

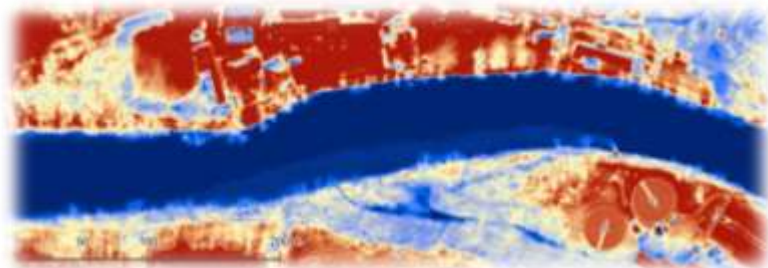


Výzkumný ústav meliorací
a ochrany půdy, v.v.i.

GEOREAL

Termografické snímkování pro účely identifikace drenážních výustí a znečištění povrchových vod

Certifikovaná metodika



T A

Č R

Technologická
agentura
České republiky

2020



Autoři:

Ing. Štěpán Marval ^{1,2} (marval.stepan@vumop.cz)

Ing. Tomáš Hejduk, Ph.D. ²

Ing. Tomáš Vybíral, Ph.D. ³ (tomas.vybiral@georeal.cz)

Mgr. Antonín Zajíček, Ph.D. ²

Ing. Petr Fučík, Ph.D. ²

Ing. Martin Vacek ³

Ing. Luboš Hübsch ³

Ing. Veronika Sítková ²

Ing. Petr Mikuláš ³

¹ Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 961/129, 165 00 Praha 6 - Suchbátka

² Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Žabovřeská 250, 156 27 Praha 5

³ GEOREAL spol. s r.o., Hálkova 12, 301 00 Plzeň

Recenzovali:

Ing. Irena Šupíková, Ph.D. - AQUATEST a.s. - Úsek Věda a výzkum - ředitel, Geologická 988/4, 152 00 Praha – Hlubočepy

Ing. Marek Batysta, Ph.D. - Ministerstvo zemědělství ČR - Odbor zemědělských registrů - Oddělení prostorových informací, Těšnov 65/17, 110 00 Praha 1

Poděkování:

Certifikovaná metodika vznikla za finanční podpory Technologické agentury ČR, programu EPSILON jako plánovaný výstup projektu č. TH02030396 „Využití letecké termografie jako nového přístupu pro identifikaci znečištění vod z bodových a nebodových zdrojů“.

Metodiku schválil pro využití v praxi Státní pozemkový úřad - Husinecká 1024/11a, 130 00 Praha 3 - Žižkov osvědčením č. 1/2021-SPU/O ze dne 27.1.2021.

V roce 2020 v nákladu 50 ks vydal VÚMOP, v.v.i.

Tisk: Rhodos spol. s r.o., Vyšehradská 51, 128 00 Praha 2

Vydání: první, 2020

ISBN 978-80-88323-28-0 (tištěná verze), 978-80-88323-29-7 (online pdf)

© Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Žabovřeská 250, 156 27 Praha 5

prof. Ing. Radim Vácha, Ph.D., ředitel

www.vumop.cz



Obsah

I. Cíle metodiky	8
II. Vlastní popis metodiky	9
1. Úvod - potřebnost a využití metodiky	9
2. Základní principy – teoretické minimum	11
2.1. Zemědělské odvodnění a plošné znečištění	11
2.2. Zdroje znečištění vod a monitoring jakosti vod	14
2.3. Komplexní pozemkové úpravy	18
2.4. Termografie a vodní hospodářství	20
2.5. Plánování v oblasti vod	23
3. Fyzikální základ - úvod do principů termografie	24
3.1. Tepelné záření	24
3.2. Termokamery a jejich parametry	25
3.2.1. Rozlišení obrazového senzoru	26
3.2.2. Teplotní citlivost	26
3.2.3. Přesnost měřicího přístroje	26
3.2.4. Výpočet teploty z radiometrických dat	27
3.3. Rovnice termografie	27
3.4. Parametry měření a jejich stanovení	29
3.4.1. Emisivita	29
3.4.2. Odražená zdánlivá teplota	30
3.5. Parametry atmosféry	30
4. Metody termografického snímkování	31
4.1. Metody dálkového průzkumu Země (DPZ)	32
4.1.1. Družicové termografické snímkování	33
4.1.2. Letecké termografické snímkování	34
4.1.3. Termografické snímkování bezpilotními letouny	35
4.2. Pozemní metody – statické a dynamické	36
5. Tepelný režim ve vodách	37
5.1. Teploty povrchových, drenážních a podzemních vod	39
5.2. Využití měření teploty drenážní vody jako stopovače	42



6. Odtokový režim povrchových a drenážních vod	43
7. Prezentace výsledků z termografických kampaní	47
7.1. Výsledky leteckého termografického snímkování	47
7.2. Výsledky termografického snímkování bezpilotními letouny	49
7.3. Výsledky termografického snímkování pozemní statickou metodou	51
8. Metodická doporučení k provádění termografických kampaní	53
9. Výhody a omezení.....	56
III. Srovnání novosti postupů	58
IV. Popis uplatnění Certifikované metodiky	59
V. Ekonomické aspekty	61
A. Pořizovací náklady testovaných termografických metod.....	62
B. Náklady na realizaci termografického snímkování	63
VI. Závěr	65



Vymezení základních pojmů

Vodní toky

- povrchové vody tekoucí vlastním spádem v korytě trvale nebo po převažující část roku, a to včetně vod v nich uměle vzdutých,

hlavní odvodňovací zařízení (HOZ)

- soubor objektů, které tvoří otevřené kanály (svodné odvodňovací příkopy, záchytné příkopy a suché nádrže k zachycení vnějších vod, přehrážky a objekty sloužící k regulaci), krytá potrubí (od světlosti 300 mm včetně), včetně objektů na nich (stupně, skluzy) a odvodňovací čerpací stanice,

podrobné odvodňovací zařízení (POZ)

- soubor objektů, které slouží k bezprostřední úpravě vodního režimu půdy tak, aby stav pozemku odpovídal vláhové potřebě plodin a předpokládané činnosti na něm; POZ pro podzemní odvodnění je tvořeno sběrnými drény, svodnými drény, výustěmi, drenážními šachticemi a pro povrchové odvodnění je tvořeno sběrnými příkopy a objekty na nich,

drenážní výust'

- zajišťuje odtok vody do recipientu tak, aby nedocházelo k erozi svahu či dna recipientu, zaústění kolmo na osu recipientu, min. 20 cm (30 cm) nade dnem betonová trubka, opevnění kamennou dlažbou, u větších profilů - betonové prefabrikáty (typové podklady),

termografie

- vědní obor, který se zabývá analýzou rozložení teplotního pole na povrchu tělesa, a to bezkontaktním způsobem,

bodový zdroj znečištění

- je zdroj znečištění vycházející z jediného bodu – výust' ČOV, výust' z průmyslového areálu, atp.,

*plošný zdroj znečištění*

- zemědělské drenážní odvodnění, průsaky ze zemědělsky využívaných pozemků, infiltrace znečištěné srážkové vody, aj.

Seznam použitých zkratk

ASTER	- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ČHMÚ	- Český hydrometeorologický ústav
ČOV	- čistírna odpadních vod
ČR	- Česká republika
ČSN	- Česká státní norma
ČÚZK	- Český úřad zeměměřický a katastrální
ČZU	- Česká zemědělská univerzita
DIBAVOD	- Digitální báze vodohospodářských dat
DVT	- drobný vodní tok
ETM +	- Enhanced Thematic Mapper Plus
GIS	- Geografické informační systémy
GNSS	- Globální družicový polohový systém z anglického Global Navigation Satellite System
HOZ	- hlavní odvodňovací zařízení
HR	- hydrologický rok
HS	- srážkový úhrn
KPÚ	- komplexní pozemkové úpravy
k.ú.	- katastrální území
MODIS	- Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
MVN	- malá vodní nádrž
MZe	- Ministerstvo zemědělství
ORP	- Obec s rozšířenou působností
POZ	- podrobné odvodňovací zařízení



PÚ	- pozemkové úpravy
SPÚ	- Státní pozemkový úřad
TAČR	- Technologická agentura České republiky
TIRS	- Thermal Infrared Sensor
TM	- Thematic Mapper
UAV	- Bezpilotní letadlo z anglického Unmanned Aerial Vehicle
VN	- vodní nádrž
VÚMOP	- Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
ZABAGED	- Základní báze geografických dat
ZPF	- zemědělský půdní fond
ZVHS	- Zemědělská vodohospodářská správa



I. Cíle metodiky

Cílem certifikované metodiky je poskytnout ucelený metodický návod jakým způsobem, v jakém období a za pomoci jakého vybavení využívat termografické snímkování pro účely identifikace drenážních výustí a zdrojů tepelného znečištění povrchových vod.

Účelem je přenést poznatky získané a ověřené v rámci termografických kampaní do praktického metodického návodu pro potřeby identifikace drenážních výustí a lokalizace vstupů znečištění do povrchových vod. Informace takto získané poslouží pro přesnou lokalizaci efektivních opatření přispívajících ke snížení znečištění z plošných podpovrchových a povrchových zdrojů. Dalším účelem certifikované metodiky je poskytnout relevantní podklady pro návrh opatření ke zpomalení podpovrchového odtoku ze zemědělsky využívaného území (mokřady, biofiltry, regulační prvky na navazujícím plošném odvodnění, aj.).

Implementace daného metodického přístupu umožní zpřesnit dochované situační výkresy projektových dokumentací staveb zemědělského odvodnění a poskytne podklady o skutečném fyzickém stavu těchto staveb v terénu.

Tato certifikovaná metodika nalezne uplatnění zejména v procesu komplexních pozemkových úprav, ale také při projektové přípravě technických i přírodě blízkých opatření v zemědělské krajině.



II. Vlastní popis metodiky

1. Úvod - potřeba a využití metodiky

Sledování jakosti vody v České republice (ČR) nemá tak dlouhou tradici jako sledování jejího množství, a to i přesto, že pro společnost, průmysl i zemědělství je kvalita vodních zdrojů strategická.

Významným zdrojem transportu plošného zemědělské znečištění je podpovrchový odtok. S podpovrchovým (drenážním) odtokem je spojováno především vyplavování dusičnanů, pesticidů a dalších ve vodě rozpustných látek (fosforečnanů) aplikovaných na zemědělskou půdu.

Stavby zemědělského odvodnění byly v minulosti budovány za účelem podpory a rozvoje zemědělství. Jejich tradice v ČR sahají do konce 19. století, nejintenzivněji však byly realizovány v období do 2. světové války, později pak v letech 1960 – 1990. Odvodňovací stavby na zemědělských pozemcích byly navrhovány jako jednoúčelové, tedy k odvádění přebytku vody z pozemku.

Se zvyšujícím se výskytem hydrologických extrémů (zejména sucha, ale i přívalových dešťů) je tato funkce v některých obdobích kontraproduktivní. V současné době jsou tak navrhována opatření, která mohou v kombinaci s drenážními systémy efektivně reagovat na dynamiku klimatu a zmírnit důsledky hydrologických extrémů. Pro návrh opatření, která stávající jednoúčelovou funkci odvodňovacích systémů rozšíří či jejich negativní efekty minimalizují (drenážní biofiltry, umělé mokřady a tůňe na drenážních výustích, aj.), je však nutná znalost umístění dílčích prvků plošného zemědělského odvodnění a to především drenážních výustí.

Tuto znalost lze získat nalezením, naskenováním a následnou rektifikací podrobných situací drenážních staveb. Omezením daného přístupu je však skutečnost, že v období majetkových transformací v devadesátých letech 20. století byla značná část těchto podkladů ztracena nebo zničena.

Z těchto důvodů byly testovány nové metody pro identifikaci drenážních výustí, a to pozemní a letecká termografie. Předpokladem pro její užití je skutečnost, že teplota drenážní vody a teplota vody v povrchovém toku jsou odlišné, zejména v létě a v zimě. Měřením teploty vody po délce vodního toku (hlavního odvodňovacího zařízení – HOZ, vodní nádrže, apod.) lze



identifikovat místa s náhle změněnou teplotou, která indikují místa přítoku vody do vodního toku, zejména drenážní výusti.

Identifikace a přesná lokalizace těchto výustí je nutnou podmínkou pro návrh účinného opatření směřujícího ke zlepšení jakosti vod či přímé eliminaci plošného zdroje znečištění. Jako efektivní nástroj identifikace těchto výustí se nabízí využití poznatků z oboru termografického snímkování. Princip spočívá ve využití rozdílných teplot mezi hlavním vodním zdrojem (vodní tok, vodní nádrž či hlavní odvodňovací zařízení) a navazujícím přítokem, jako potenciálním zdrojem znečištění.

Na základě získaných výsledků lze tvrdit, že termografie představuje možnou alternativu identifikace drenážních výustí (*obr. 1*) a tím i samotných staveb plošného zemědělského odvodnění.



Obr. 1: Dotace vody z drenážního systému.

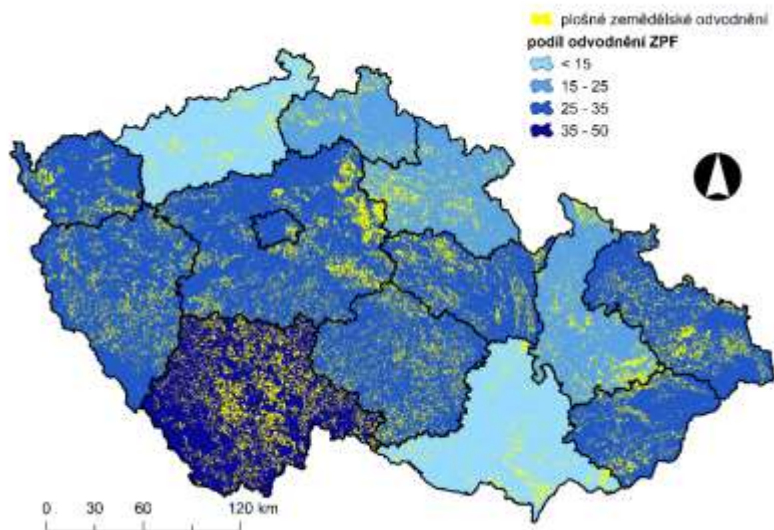


2. Základní principy – teoretické minimum

2.1. Zemědělské odvodnění a plošné znečištění

Plocha provedených odvodnění dosahuje na celém světě dle dostupných zdrojů více než 200 milionů hektarů zemědělské půdy [1]. V České republice bylo odvodněno celkem 1 016 500 ha, což představuje více než 25 % zemědělské půdy [2], viz *obr. 2*. Zemědělské odvodnění na území ČR bylo obvykle koncipováno jako kombinace podrobného drenážního systému (sběrné a svodné drény), které je zaústěno do hlavního odvodňovacího zařízení v podobě povrchových i zatrubněných odvodňovacích kanálů nebo drobných vodních toků.

Z pohledu klasifikace plošného zemědělského znečištění jsou největšími zdroji povrchový odtok spojený s erozí půdy (sedimenty a na ně navázané látky) a odtok podpovrchový, tj. většinou drenážní (obsahující zejména pesticidy, jejich metabolity, dusičnany, resp. potenciálně i další látky rozpustné ve vodě). Velikost odnosu půdy vodní erozí i vyplavování látek z půdy drenážními systémy jsou silně vázány na velikost a dynamiku odtoku vody [3].



Obr. 2: Zastoupení staveb plošného zemědělského odvodnění.



Drenážní systémy obecně urychlují odtok a zvyšují odnos živin a dalších polutantů z povodí. Dynamika koncentrací většiny látek je v drenážních vodách velmi proměnlivá. Drenážní vody mohou mít pro jednotlivé složky odtoku značnou časovou variabilitu ve vazbě na průběh počasí, půdní a hydrogeologické podmínky povodí, nasycenost půdního profilu, dobu a intenzitu aplikace hnojiv, biochemické reakce v půdním prostředí, způsob využití území a jeho morfologii. Klíčový je tedy původ vody a cesty jejího odtoku do odvodňovacího systému [4, 5, 6].

V poslední době je téma plošného zemědělského odvodnění hodně diskutované a zemědělci jsou napadáni, že takto zbytečně odvodňují naši krajinu. Tam, kde už odvodňovací systémy existují, je proto nutné nejprve prověřit jejich funkčnost a upravit je tak, abychom snížili nežádoucí příliš intenzivní odvodňování krajiny.

Kvalita a přínos navrhovaných opatření vychází z detailní znalosti řešeného území, jehož součástí je mj. znalost umístění dílčích prvků plošného odvodnění, především drenážních výustí. V drenážních soustavách se běžně vyskytují drenážní výusti zakládané v místech vyústění svodných drénů do odpadových příkopů, kanálů či vodních toků [1]. Odtok ze sběrných drénů se soustřeďuje do drénů svodných, kterými je sváděn k drenážním výustím, jejichž prostřednictvím vyúsťuje do recipientu (HOZ, nádrž nebo drobné vodní toky). Historicky znamenala realizace zvýšeného počtu drenážních výustí rovněž zvýšení stavebních nákladů. Z tohoto důvodu bylo realizováno drenážních výustí co nejméně, a sice zpravidla jedna pro každou drenážní skupinu [1].

Obecně jsou na drenážní výusti kladeny požadavky v podobě zajištění volného odtoku drenážní vody, odpovídající nákladovosti, trvanlivosti a jasného označení. Právě jasná identifikace v terénu s ohledem na stáří a zejména fyzický stav staveb odvodnění představuje zásadní problém pro návrhy opatření na drenážních systémech a samotných drenážních výustí. Dochované projektové dokumentace jednotlivých staveb odvodnění vyžadují navazující pokročilé zpracování pro přibližnou lokalizaci drenážní výusti (navazujících prvků odvodnění). Jedná se především o nutné skenování dochovaných situací staveb odvodnění, jejich následnou rektifikaci a navazující digitalizaci. Výše popsané činnosti však často nevedou k úspěšné identifikaci drenážní výusti v terénu, kdy realizace nebyla často prováděna v souladu s projektovou dokumentací (*obr. 3.*) či drenážní výusť byla



poškozena. Část situací také není dochována. V tomto případě se ukazuje jako jedna z užitečných variant identifikace drenážních výustí za pomoci termografického snímkování.



Obr. 3: Projektová dokumentace zemědělského odvodnění (černé linie) x skutečný stav realizace drenážní stavby (červené linie)



2.2. Zdroje znečištění vod a monitoring jakosti vod

Kvalitně nastavený monitoring stavu povrchových a podzemních vod je rozhodující nejen pro hodnocení jakosti vod, ale také pro identifikaci zdroje znečištění. Na základě zjištěných výsledků a jejich vyhodnocení jsou v případě potřeby navrhována opatření s cílem dosáhnout dobrého stavu vod, popř. dobrého ekologického potenciálu. Přestože je možné zaznamenat aktivity směřované k dosažení dobrého ekologického a chemického stavu v jednotlivých vodních útvarech, není tohoto cíle v mnoha případech doposud dosaženo. Neustále se potýkáme s problémem eutrofizace ve stojatých i tekoucích vodách (*obr. 4*). Je pravděpodobné, že účinky eutrofizace vzhledem k měnícím se klimatickým podmínkám (zvyšování teploty povrchových vod) budou nadále intenzivnější. Nelze tedy úspěchy z minulých období přeceňovat a je stále potřeba pokračovat v úsilí za zvyšování kvality našich vodních zdrojů.



Obr. 4: Projev vysoké koncentrace živin v povrchových vodách – eutrofizace.

Největší podíl na znečištění vod je tradičně přičítán bodovým zdrojům znečištění (*obr. 5 a 6*). V nedávné době však došlo k zastavení nebo omezení některých velkých průmyslových výroby, které znamenalo významné snížení znečištění vypouštěného z bodových zdrojů. Např. mimořádně rychlé snížení znečištění ropnými látkami jde na vrub omezení provozů, které v 80. letech měly výjimky z dodržování parametrů tehdejšího zákona o vodách. Rovněž



významně se na zlepšení jakosti vod podílely samotné modernizace průmyslových výrobníků, novelizace související legislativy (zákon o vodách, zákon o vodovodech a kanalizacích) či přijetí legislativních požadavků souvisejících se vstupem ČR do Evropské unie.



Obr. 5: Bodový zdroj znečištění - výust' ze špatně fungující ČOV.



Obr. 6: Bodový zdroj znečištění – přítok nedostatečně čištěných technologických vod.



Přestože v mnoha sledovaných ukazatelích došlo ke snížení imisních limitů, v souvislosti s produkcí stále širší škály škodlivých látek je třeba jakosti vod trvale věnovat značnou pozornost. Rizikové látky, které se dostávají do vodního prostředí, negativně ovlivňují vodní ekosystémy i zdraví člověka. Ve většině případů jde o syntetické organické látky různorodého původu. Je zřejmé, že kvalita povrchových vod se od počátku devadesátých let zásadně zlepšila. Přesto se ve vybraných vodních tocích vyskytují znečišťující látky v nebezpečných koncentracích. Zjištěné koncentrace řadí tyto vodní toky do páté třídy, tedy nehorší třídy jakosti vod dle ČSN 757221 (Česká státní norma). Stále máme na našem území nespočet obcí, které nemají svou ČOV a vypouštějí znečištěné vody přímo do vodních toků či jsou odpadní vody do vodních toků svedeny prostřednictvím příkopů, dešťové kanalizace či přes malé vodní nádrže.

Ustavičně se potýkáme s problémem eutrofizace ve stojatých i tekoucích vodách. Nelze tedy úspěchy z minulých období přeceňovat a je stále potřeba pokračovat v úsilí za zvyšování kvality našich vodních zdrojů.

S úbytkem znečištění z bodových zdrojů se do popředí zájmu dostávají také zdroje plošné. Plošné znečištění v našich podmínkách pochází zejména ze zemědělské činnosti. Do vodních recipientů se může dostávat cestou povrchového odtoku (produkty eroze, partikulární fosfor, pesticidy) i odtoku podpovrchového (převážně dusík, pesticidní látky a rozpuštěné formy fosforu). Právě díky zlepšeným možnostem monitoringu (kontinuální monitoring, automatické vzorkovače, on-line přenos dat) byla rozpoznána důležitost plošných podpovrchových zdrojů znečištění pro celkovou jakost povrchových vod. Podpovrchový odtok je v podmínkách České republiky představován především odtokem drenážním, jehož vstup do recipientu probíhá prostřednictvím drenážních výustí.

Monitorování jakosti povrchových a podzemních vod je nejdůležitějším nástrojem k získání informací potřebných k hodnocení stavu a vývoje hydrosféry a ochrany zdrojů pitné vody. Na základě zjištěných výsledků a jejich vyhodnocení jsou v případě potřeby navrhována opatření s cílem dosáhnout dobrého stavu vod, popř. dobrého ekologického potenciálu. V dalším kroku slouží monitoring jako kontrola účinnosti provedených opatření. Většina vod je monitorována v souladu se Směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky (dále jen Rámcová směrnice). V případě povrchových



vod se sleduje chemický stav (tzv. prioritní látky) a stav ekologický (biologické složky, hydromorfologie a některé fyzikálně chemické a chemické parametry) [7].

Výhodou monitoringu jakosti vod provozovaného v podmínkách České republiky je celorepublikové pojetí této problematiky. Veškeré informace dílčích programů monitoringu jsou sloučeny do jediného programu v podobě Informačního systému veřejné správy - VODA České republiky (ISVS VODA). Informační systém, jehož provoz byl zahájen oficiálně v roce 2005, schraňuje jedinečné časové řady vývoje jakosti vody v tocích a jakosti podzemních vod a navazující informace z oblasti vod v gesci všech ústředních vodoprávních orgánů České republiky. Evidence ISVS VODA představují detailní soubor tzv. povinných informací, které vycházejí z vodního zákona. Ten ukládá v ustanoveních § 21 a 22 povinnost Ministerstvu zemědělství a Ministerstvu životního prostředí vést evidence v rámci informačního systému veřejné správy podle náležitostí vyplývajících ze zákona č. 365/2000 Sb., o informačních systémech veřejné správy, ve znění pozdějších předpisů [8]. V ISVS VODA je vedena a aktualizována evidence odběrů povrchových a podzemních vod, vypouštění odpadních a důlních vod a akumulace povrchových vod ve vodních nádržích, a to v rozsahu údajů, na které se vztahuje ohlašovací povinnost pro vodní bilanci podle ustanovení § 22 odst. 2 vodního zákona [9].

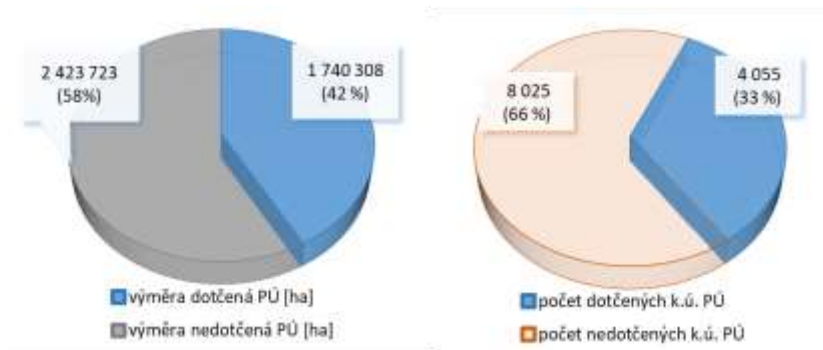


2.3. Komplexní pozemkové úpravy

Prostřednictvím pozemkových úprav je možné řešit retenci, akumulaci, jakost povrchových vod v krajině, protierozní opatření a zvyšování biodiverzity, ale i problematiku hydromeliorací. Pro jejich komplexní řešení je nutné zejména zajistit jejich digitální podobu a vytvořit tak evidenci hydromeliorací, která není nebo neodpovídá skutečnosti, a posoudit vodní bilanci na konkrétní pozemky a lokality.

Oproti předchozím obdobím, kdy byla prioritou retence vody, bude pro následující období prioritou akumulace vody, tedy její dlouhodobé zadržení, a její další efektivní využití v krajině. Součástí řešení pozemkových úprav bude i návrh zabezpečení zdrojů závlahové vody. Jedním z plánovaných inovativních postupů v pozemkových úpravách je zahrnutí systémů zemědělského odvodnění do jejich řešení. Je předpoklad, že se proces pozemkových úprav rozšíří o zajištění dostupné projektové dokumentace a prostřednictvím dálkového průzkumu země se zmapuje skutečný rozsah a umístění odvodňovacích zařízení, posoudí technický stav, vyhodnotí potřebnost a v případě potřeby se navrhne opatření.

V ČR je celkem 13 076 katastrálních území (k. ú.), z tohoto počtu je k řešení v rámci pozemkových úprav klasifikováno 12 080 k. ú. (vyjmuté z řešení jsou horské oblasti a velká města). V současné době je PÚ dotčeno (rozpracovaná, ukončená) 4 055 katastrálních území. Grafické zpracování výše popsanych skutečností je zpracováno na *obr. 7 a 8* [10, 11].



Obr. 7 a 8: Podíl výměry dotčené PÚ a počet k. ú. dotčených pozemkovými úpravami [10, 11].



Finanční prostředky do jednotlivých regionů jsou rozloženy na základě stávajícího personálního zajištění v jednotlivých krajích a s ohledem na zachování kontinuity provádění pozemkových úprav v jednotlivých regionech [10,11].

organizační jednotka	počet plánovaných PÚ	plánované finanční prostředky na PÚ (mil. Kč)
Středočeský kraj a hl. m. Praha	240	960
Jihočeský kraj	162	648
Plzeňský kraj	93	372
Karlovarský kraj	47	188
Ústecký kraj	120	480
Liberecký kraj	69	276
Královhradecký kraj	117	468
Pardubický kraj	95	380
Kraj Vysočina	116	464
Jihomoravský kraj	145	580
Olomoucký kraj	114	456
Moravskoslezský kraj	93	372
Zlínský kraj	89	356
Celkem	1 500	6 000

Tab. 1: Přehled plánovaných pozemkových úprav dle krajů včetně plánovaných výdajů [10,11].



2.4. Termografie a vodní hospodářství

Termografie je vědní obor, který se zabývá analýzou rozložení teplotního pole na povrchu tělesa, a to bezkontaktním způsobem. Úkolem termografie je analýza a zobrazení infračervené energie vyzařované tělesem. Jedná se o typ infračerveného zobrazování, které detekuje intenzitu tepelného záření v rozsahu elektromagnetického spektra pro vytvoření obrazu – termogramu [12]. V současné době je v termografii využívána zejména termografická diagnostika, která měří charakteristiku vyzařování tepla za účelem zjištění výskytu poruchy, znečištění nebo nemoci. V oblasti vodního hospodářství lze termografii využít pro identifikaci vtoku vody s odlišnou teplotou do recipientu. Tato místa mohou představovat exfiltraci podzemních vod, ale také místa, kudy do recipientu vstupuje znečištění, ať už původem z průmyslové výroby, komunální, anebo z drenážních výústí. Právě na identifikaci vtoku drenážních vod přinášejících zemědělské znečištění je zaměřena tato certifikovaná metodika. Pomocí termovizní kamery byly snímkovány oblasti předpokládaných drenážních výústí do vodních toků a hlavních odvodňovacích zařízení. Na základě rozdílných teplot drenážních vod a vod v toku byla identifikována konkrétní místa drenážních výústí. Přesná lokalizace drenážní výusti byla geodeticky zaměřena a posléze porovnána s podklady z projektových dokumentací odvodňovací stavby. V zahraničí se již podobný výzkum uskutečnil, byl však zaměřen primárně na identifikaci dalších potenciálních zdrojů znečištění. Příkladnými studiemi jsou [13, 14, 15], kde se autoři věnovali možnostem aplikace nových metod pro odhalování a vyhodnocování kontaminace pobřežních vod s využitím leteckých platforem termografie, řady pokročilých termovizních kamer a nového detekčního softwaru.

Hydrografická síť (vodní toky, vč. hlavních odvodňovacích zařízení) je považována za hlavní proměnnou, která ovlivňuje rozmanitost (hydrologickou, biologickou či produkční – zemědělskou složku) v samotném vodním toku, ale i v celé navazující ploše povodí. V současnosti je jen málo známo o tepelné heterogenitě včetně jejích účincích na jakostní ukazatele vody či vodní biotu. Dynamikou a vlivem tepelného znečištění na vodní ekosystém se pomocí technik dálkového průzkumu Země příkladně zabýval ve své studii autor [16]. Složení, uspořádání a stupeň hydrologické



propojenosti těchto biotopů určuje stabilitu vodního prostředí a ekosystémové procesy [17, 18].

V oboru vodního hospodářství lze s využitím metod termografického snímkování diagnostikovat místa ve vodních tocích či nádržích se zvýšenou teplotou, která mohou mít negativní dopad na ekologickou stabilitu lokality [19], případně kompletně modelovat teplotní režim vodních toků [20]. Na základě rozdílné teploty mezi povrchovou a podpovrchovou vodou je také možné identifikovat teplotní stopovače či vyvěrající prameny vody [21].

Velký potenciál má zejména letecké snímkování pomocí bezpilotních prostředků (*obr. 9*), především díky rychlému získávání dat na velké ploše a širokým úhlem záběru (žádná hluchá místa, kde by mohly být neznámé teplotní změny).



Obr. 9: Termogram ve škále odstínu šedi nad výstří z AČOV Tábor z výšky 50 m nad povrchem.



U kapalin probíhá přenos tepla pomocí tepelného proudění, které nastává při přenosu tepla mezi teplejšími a chladnějšími oblastmi. Přírozené tepelné proudění probíhá, když teplejší kapaliny stoupají a chladnější klesají. Schopnost materiálu absorbovat a uchovávat teplo se nazývá tepelná kapacitance, která zároveň určuje, kolik energie je nutné přidat či odebrat ke změně teploty. Pro změnu teploty vody je potřeba více energie v porovnání např. se změnou teploty vzduchu. Pomocí tepelné kapacitance lze např. určit hladinu kapaliny v nádrži na základě rozdílných hodnot pro kapalinu a vzduch.

Pokud je infračervené záření absorbováno povrchem, na který dopadá, probíhá změna teploty a emitování (uvolňování energie vyzařováním) energie z povrchu objektu. Pro vodu je hodnota emisivity 0,98 [22].

Voda má vysokou tepelnou setrvačnost, díky níž se její teplota mění pomalu v závislosti na zvyšování tepelné energie, dále má voda nízkou tepelnou vodivost, což znamená, že tepelná energie proniká skrz kapalinu velmi pomalu. Voda má zároveň vysokou tepelnou kapacitu, která napomáhá velmi dobrému uchování tepla. Je mnoho faktorů, které mohou ovlivňovat skutečnou emisivitu vody. Emisivita se může měnit v závislosti na množství sedimentů a rozpuštěných minerálů (např. v mořské vodě) [23].

Při snímání teploty má voda v porovnání s pevninou, obvykle tmavé až střední tóny barev ve dne a světlé tóny při snímání v noci. Lze tak identifikovat např. zdroje znečištění, které jsou napojeny na vodní tok, nádrže, atd. Následně lze sledovat chování/pohyb znečištěné kapaliny termokamerou ve vodním toku na základě rozdílných teplot proudících kapalin [13].



2.5. Plánování v oblasti vod

Plošné zemědělské zdroje znečištění vod nebyly v rámci předchozích dvou plánovacích období v oblasti vod analyzovány ani hodnoceny. Problematika hodnocení stavu vodních útvarů z hlediska vlivu plošných zemědělských zdrojů znečištění zůstala v procesu plánování v oblasti vod dosud téměř neřešena [24].

Plánování v oblasti vod vychází ze směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000, ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky. Hlavním smyslem Rámcové směrnice je zamezení dalšímu zhoršování stavu povrchových i podzemních vod a zlepšení jejich kvalitativního i kvantitativního stavu. Plánování v oblasti vod je rozděleno do tří šestiletých období. Třetí plánovací období probíhá od počátku roku 2016 do roku 2021 a realizace opatření třetího plánovacího období bude probíhat v letech 2022 až 2027.

Efektivní návrhy opatření, které bude možné promítnout do třetího plánovacího období, musí mít multifunkční přínos. Navržená opatření musí nejen zajistit funkčnost staveb odvodnění zamokřených zemědělských pozemků, ale zároveň také vytvářet zásoby vody pro letní období a tím snižovat rizika i dopady výskytu sucha agronomického, případně hydrologického [25]. Navržená opatření rovněž kromě aspektů optimalizace vodního režimu zemědělských pozemků, tj. eliminace hydrologických extrémů musí přispět ke zlepšení samotné jakosti drenážních vod. Opatření musí být zaměřena především na snížení odnosu živin a dalších polutantů z povodí prostřednictvím zemědělského odvodnění [26, 27, 28].

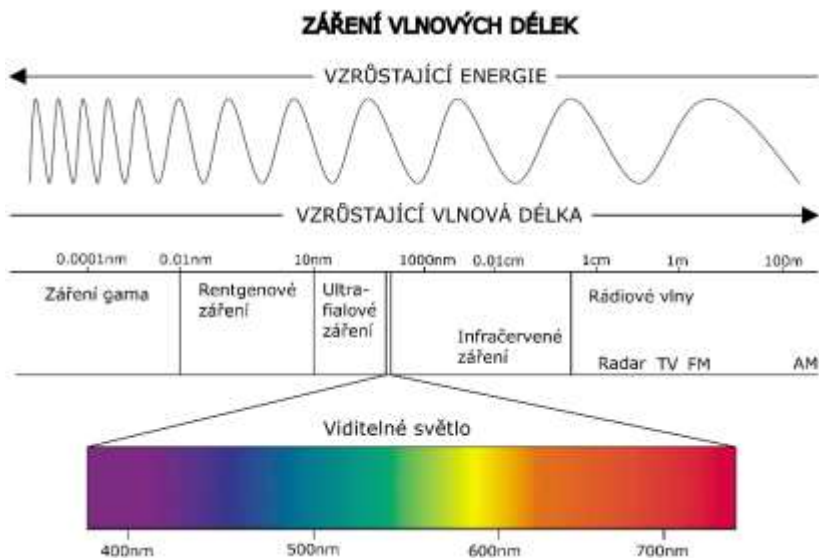


3. Fyzikální základ - úvod do principů termografie

3.1. Tepelné záření

Pokud je teplota fyzikálního tělesa vyšší než absolutní nula, vyzařuje elektromagnetické záření, které je emitováno v důsledku tepelného pohybu částic hmoty a označuje se jako tepelné záření. Pro bezdotykové měření teploty se využívá elektromagnetické záření, které se nazývá infračervené záření a nejčastěji se využívá ve vlnových délkách od 0,4 až 15 μm , viz *obr. 10*.

Pro identifikaci drenážních výustí a znečištění povrchových vod lze použít LWIR (Long-Wave Infrared) termokamery, které pracují v pásmu 7 až 14 μm . Naproti tomu MWIR (Mid-Wave Infrared) přístroje jsou v současné době, vzhledem k jejich váze a vysoké ceně (chlazené systémy s kvantovými detektory), používány především v laboratořích či při experimentálním výzkumu.



Obr. 10 Elektromagnetické spektrum zahrnuje elektromagnetické záření všech možných vlnových délek.



Hodnota povrchové teploty těles je důležitá pro určení intenzity emitovaného záření z povrchu těles. Vztahy mezi intenzitou záření, teplotou, vlnovou délkou a dalšími fyzikálními veličinami jsou popsány následujícími fyzikálními zákony: Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon a Stefan-Boltzmannův zákon. Dále Kirchhoffovy zákony, které pak popisují interakci infračerveného záření s pevnou látkou a dávají definici pojům odrazivost, pohltivost, propustnost a emisivita.

3.2. Termokamery a jejich parametry

Termokamera zaznamenává intenzitu tepelného záření vyzařovaného z povrchu snímaných objektů. Následně pak na základě naměřené intenzity vyzařování a zadaných parametrů je možné výpočtem stanovit rozložení povrchové teploty. Výsledkem, výstupem ze snímání termokamerou je tzv. termogram, jehož pixely sdělují informaci o povrchové teplotě snímaných objektů. Pokud jsou parametry měření zadány správně, jedná se o skutečnou teplotu, v opačném případě se jedná o zdánlivou teplotu.

Z hlediska principu konstrukce jsou termokamery velmi podobné klasickým fotoaparátům. Hlavním rozdílem je optický senzor, resp. obrazový detektor (nejčastěji je na tomto místě použito tzv. mikrobolometrické pole v případě LWIR termokamer nebo alternativně některý z kvantových detektorů jako např. InGaAs, QWIP, InSb apod. v případě MWIR termokamer) a použitá optika, která musí být z materiálu propustného pro daný rozsah vlnových délek, v němž termokamera pracuje. Dopadající tepelné záření je pomocí detektoru infračerveného záření převáděno na elektrický signál, který je pak digitalizován a zpracován mikroprocesory termokamery. Vznikne tzv. radiometrický signál, který obsahuje informaci o povrchové teplotě měřených objektů. Tato část termokamery je velmi důležitá a to z důvodu, že konstrukce a princip funkce ovlivňuje parametry termokamery.

Nejčastější vlnové pásmo, ve kterém je snímáno tepelné záření termokamerou, je přibližně 8 až 14 μm . Optický senzor záření je tvořen tzv. mikrobolometrickým polem a materiálem použitým na konstrukci optiky je germanium s nanesenou antireflexní vrstvou. V tomto vlnovém pásmu pracují LWIR termokamery.



3.2.1. Rozlišení obrazového senzoru

Termokamery v současné době mohou změřit povrchovou teplotu v rozlišení senzoru o 640x512 bodech (existují již vyšší rozlišení), což je pak rozlišení výsledného termogramu. Čím větší je rozlišení termokamery, tím je jedním termogramem zmapována větší oblast při zachování geometrického rozlišení. Mezi další používaná rozlišení mikrobolometrického senzoru patří 320x240 a 160x120.

3.2.2. Teplotní citlivost

Moderní termokamery jsou schopny změřit nejmenší teplotní rozdíly hodnot 0.03 °C až 0.015 °C, tj. 30 mK až 150 mK (menší hodnota je vždy lepší). Problematika identifikace drenážních výustí a znečištění povrchových vod vyžaduje teplotní citlivost termokamery alespoň 50 mK, lépe však 30 mK. Těmto požadavkům plně dostačují moderní mikrobolometrické LWIR senzory. Údaj bývá výrobcem vyjádřen prostřednictvím parametru NETD (tj. Noise Equivalent Temperature Difference).

3.2.3. Přesnost měřicího přístroje

Většina fyzikálních měření je zatížena určitou nepřesností, která je způsobena různými negativními vlivy. Tato nepřesnost se tedy projeví jako odchylka mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledek se pak tedy pohybuje v určitém chybovém intervalu, o který se může skutečná hodnota veličiny lišit od naměřené hodnoty.

Nepřesnost měření teploty je ovlivňována konstrukcí a vlastnostmi termokamery a zároveň metodou, která je použita (měření nepřímé). Výrobci přístroje udávají hodnotu $2\text{ °C} \pm 2\%$ z rozsahu (přičemž platí horší z obou údajů) nebo $1\text{ °C} \pm 1\%$. Nižší hodnota nejistoty měřicího přístroje je pro účely identifikace drenážních výustí a znečištění povrchových vod. V současné době ale nejsou přístroje s udávanou nejistotou $1\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ pro tyto účely příliš dostupné, neboť jde o údaj typický pro MWIR termokamery s vysokými pořizovacími náklady, velkou váhou, obtížnou manipulovatelností apod.



3.2.4. Výpočet teploty z radiometrických dat

Pro výpočet absolutní teploty termokamerou je nutné zadat parametry měření, které vyplývají z rovnice termografie a těmi jsou:

- **emisivita** materiálová (optická) vlastnost snímaného povrchu, je funkcí především vlnové délky a povrchové teploty objektu,
- **odražená zdánlivá teplota** - vliv vyzařování okolních objektů, jejichž záření se odráží ze snímaného povrchu do objektivu termokamery, a lze ho tak vydávat za vlastní záření pocházejícího z povrchu objektu,
- **vzdálenost, atmosférická vlhkost a atmosférická teplota** - jedná se o parametry atmosféry, které modelují vliv vlastního vyzařování atmosféry a útlumové vlastnosti atmosféry, kdy atmosféra utlumuje tepelné záření z povrchu snímaného objektu (a to jak vlastní záření snímaného objektu, tak záření, které snímáný objekt odráží a které pochází z okolních těles).

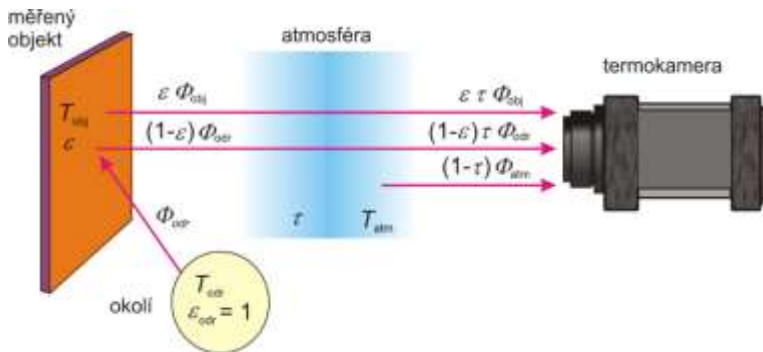
Při měření těles, které se nachází blízko termokamery tj. několik metrů je vliv atmosféry poměrně malý, hlavní je především vhodné nastavení emisivity a odražené zdánlivé teploty. Se zvyšující se vzdáleností termokamery od měřeného objektu se zároveň zvyšuje vliv vzdálenosti, což znamená, že při leteckém snímání je tento parametr velmi významný. Zanedbání vzdálenosti se v praxi nastavuje na hodnotu 0.

Důležitou závislostí jednotlivých parametrů je rovnice termografie, která je potřebná pro pochopení vyhodnocení naměřených údajů a stanovení odhadu možné chyby měření. Tato rovnice je softwarem v termokameře automaticky počítána po zadání jednotlivých parametrů.

3.3. Rovnice termografie

Tepelné záření dopadající na detektor termokamery je součtem 1) záření vyzářeného povrchem měřeného objektu (námi požadovaný údaj), 2) záření odraženého od povrchu měřeného objektu (záření, které pochází z okolních předmětů a jeho vliv chceme eliminovat), 3) tepelného záření, které pochází z atmosféry mezi termokamerou a měřeným objektem (musí být odečteno od

výsledné hodnoty). Je důležité zahrnout vliv útlumu atmosféry, která utlumuje tepelné záření vyzářené povrchem měřeného předmětu a tepelného záření okolních těles tímto povrchem do termokamery odražené (obr. 11).



Obr. 11 Princip určení teploty pomocí termografického snímování.

Jednotlivé složky zářivého toku přijaté detektorem termokamery jsou:

- zářivý tok z objektu zeslabený průchodem atmosférou: $\varepsilon \tau \Phi_{obj}$ (teplota objektu je T_{obj}).
- odražený zářivý tok z okolních zdrojů je $(1-\varepsilon)\tau \Phi_{odr}$, kde $(1-\varepsilon)$ vyjadřuje odrazivost objektu. (Předpokládáme, že záření přicházející z okolí představuje záření z povrchů v myšlené polokouli, které mají emisivitu = 1 a stejnou teplotou T_{odr}). Odražená zdánlivá teplota T_{odr} je zdánlivá teplota jiných objektů, jejichž záření se odráží od povrchu měřeného objektu do termokamery.
- zářivý tok emitovaný atmosférou: $(1-\tau) \Phi_{atm}$, kde $(1-\tau)$ vyjadřuje emisivitu atmosféry, jejíž teplota je T_{atm} .

Uvažuje se plná transparentnost optiky termokamery a zářivý tok optických komponent se považuje za zanedbatelný.

Nyní lze sestavit rovnici pro celkový zářivý tok, který dopadá na detektor termokamery. Tato rovnice se někdy označuje jako rovnice měření termokamerou nebo také rovnice termografie:

$$\Phi_{celk} = \varepsilon \tau \Phi_{obj} + (1-\varepsilon)\tau \Phi_{odr} + (1-\tau) \Phi_{atm} \quad (1)$$



Pokud by byl aplikován Stefannův-Bolzmannův zákon pro šedé těleso, bylo by možné odvodit vztah, dle kterého by mikroprocesor termokamery vypočítával teplotu jednotlivých částí měřeného povrchu a to na základě signálů ze senzorů maticového detektoru.

Při zanedbání vyzařování atmosféry dostaneme zjednodušený vztah:

$$\Phi_{\text{celk}} = \varepsilon\tau\Phi_{\text{obj}} + (1-\varepsilon)\tau\Phi_{\text{odr}} \quad (2)$$

Pro korigování odraženého zářivého toku z okolních zdrojů musí uživatel termokamery nastavit parametry měření: emisivitu objektu ε , zdánlivou odraženou teplotu T_{odr} , teplotu atmosféry T_{atm} a propustnost atmosféry τ (místo tohoto parametru se obvykle zadává relativní vlhkost a vzdálenost termokamery od objektu).

Rovnice termografie je v termokameře již implementována. V praxi je pak nezbytné jen zadání parametrů měření. Způsob jejich stanovení je popsán v následující kapitole 3.4.

3.4. Parametry měření a jejich stanovení

3.4.1. Emisivita

Emisivitu lze stanovit dle ISO 18434-1 dvěma metodami I) kontaktní metoda a II) metoda využívající materiál s referenční emisivitou. Pro stanovení emisivity je nutné znát hodnotu skutečné teploty povrchu v určitém okamžiku. U metody I je stanovena dotykovým teploměrem, u metody II je pro stanovení využíván referenční materiál (nátěr, vhodná lepicí páska) a pomocí termokamery je stanovena jeho teplota. Stanovení probíhá za těchto podmínek: poloha termokamery se nemění, ale mění se nastavení hodnoty emisivity v termokameře, a to na hodnotu teploty změřené kontaktně či na materiálu s referenční emisivitou. Předtím je potřeba korigovat vliv odražené zdánlivé teploty.

Podmínkou pro použití metod I a II je, že teplota povrchu musí být vyšší alespoň o 20°C než je teplota okolních předmětů. Jelikož v terénu není splnění této podmínky jednoduché, přistupuje spíše ke stanovení emisivity laboratorně.



3.4.2. Odražená zdánlivá teplota

Zdánlivá teplota atmosféry se pohybuje cca od -40°C a méně pro jasnou oblohu až po teplotu blízké atmosférické teplotě v blízkosti povrchu a to také v závislosti na typu a hustotě oblačnosti. Dle technické normy ČSN ISO 18434-1 lze stanovit odraženou zdánlivou teplotu dvěma metodami: I) metoda odrazu, II) nepřímou metodou.

Metoda odrazu využívá infračervený odražeč (např. „zmačkaná“ a opětovně narovnaná lesklá fólie), který se připevní na rovnou desku, lesklou stranou nahoru a následně se umístí rovnoběžně před měřený povrch. Infračervený odražeč má díky konstrukci vysokou odrazivost a proto na něm lze pozorovat odraz tepelného záření, které by dopadalo na povrch měřeného předmětu. Emisivita v termokameře je při tomto měření nastavena na hodnotu 1 a vzdálenost na hodnotu 0. Zdánlivá teplota, která je naměřena na povrchu odražeče, je korektní pro měření.

Při metodě nepřímé je termokamera v blízkosti snímaného povrchu namířena objektivem přímo na zdroj záření dopadajícího na snímaný povrch. Při této metodě je emisivita rovněž nastavena na hodnotu 1 a vzdálenost na hodnotu 0. Hledanou hodnotou zdánlivé odražené teploty je tedy průměrná hodnota v předem stanovené oblasti.

3.5. Parametry atmosféry

Pro stanovení atmosférické teploty, atmosférické vlhkosti a vzdálenosti mezi měřeným objektem a termokamerou jsou dnes běžně dostupné měřicí přístroje. U těchto parametrů je většinou používána atmosféra za normálních podmínek (homogenní teplota, normální atmosférický tlak, běžné chemické složení bez přítomnosti dalších příměsí, apod.). Toto však nemusí být vždy splněno, a proto při požadavcích na vysokou opakovatelnost měření je třeba vycházet z matematického modelu, při kterém je nutné sledovat vliv vlastního vyzařování atmosféry, vliv útlumu atmosféry na záření, které je vyzařováno ze snímaného povrchu.



4. Metody termografického snímkování

Aplikované metody termografického snímkování jsou založeny na využití infračerveného záření, které je součástí elektromagnetického spektra. Jedná se o záření neviditelné pro lidské oči, ale jeho přítomnost je možné vnímat jako teplo. Toto záření je základem pro termografii, která využívá elektrooptické systémy k detekci a měření tepelné radiace. Radiace je pohyb tepla, který nastává při emitaci energie (elektromagnetických vln) do prostoru bez žádného přímého média k jejímu přenosu. Moderní infračervená termografie využívá elektrooptických zařízení k detekci i měření intenzity radiace a její následné transformace na ekvivalentní elektrické signály. Ty jsou převedeny na luminiscenční obrazovku monitoru, kde je zobrazena teplota dané snímané oblasti (objektu), tzv. termogram.

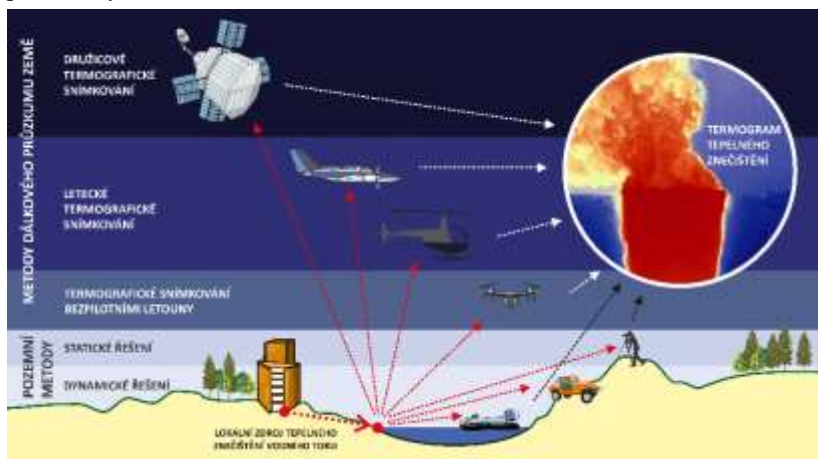
Obor termografického snímkování poskytuje v současnosti inovativní přístup pro identifikaci znečištění vod z bodových a nebodových zdrojů na základě teplotních rozdílů. Pořizování leteckých fotografických, filmových a termografických záznamů profesionální termokamerou představuje na současném trhu jeden z nejvíce expandujících oborů především v oblastech: úniků tepla z obytných nebo průmyslových budov, přehřívání zařízení, úniky z produktovodů, mapování elektrických vedení, atd. Termovizní měření ze země i ze vzduchu však nabízí široký potenciál i v oblasti vodního hospodářství, např. při stanovení či kalibraci teplotního modelu toku, identifikaci podzemních zdrojů vody nebo při identifikaci zdrojů znečištění povrchových vod. Letecká termovize nabízí efektivní nástroj pro preventivní diagnostiku z pohledu identifikace zdroje znečištění vod.

V současné době tato technologie zažívá nebývalý rozvoj a můžeme tedy očekávat nové cesty vývoje leteckých infrakamer pro pilotní či bezpilotní letecké prostředky a jejich využití. Mohli bychom asi oprávněně říci, že termografie pro civilní účely byla ještě nedávno záležitostí spíše bohatších zemí a regionů, nicméně stále větší dostupnost a jejich rostoucí efektivita tyto statistiky rychle mění. Užitek z nasazení bezpilotních prostředků už mohli poznat i lidé v třeba Indii, Indonésii či afrických státech.

Obor termografie se v širším měřítku rozvinul společně s rozšířením infračervených kamer, pro které se obecně vžilo slovo termovizní kamera, resp. termovize. V současnosti se termovizní kamery využívají především v průmyslu, stavebnictví nebo medicíně. Využití napříč spektrem různých

oborů jen dokazuje potenciál termografického snímkování, který lze uplatnit i v oboru vodního hospodářství.

Stále rozšiřující se uplatnění termografie souvisí s technickým zdokonalováním samotných termografických kamer, neustálým rozvojem informačních technologií a s tím spojeným růstem možností získávání stále relevantnějších dat. Rozdělení termálního snímkování na základě řešení sběru termálních dat je uvedeno na *obr. 12*. Termografické snímkování je dynamicky se rozvíjející obor, který v oblasti vodního hospodářství nabízí efektivní nástroj pro identifikaci teplotní změny na hladině vodního toku či nádrže. Významné teplotní změny na vodní hladině značí přítok s rozdílnou teplotou (zdroj znečištění, pramen). Termální snímkování má velký potenciál i z pohledu preventivní diagnostiky identifikace zdroje znečištění povrchových vod.



Obr. 12: Metodická řešení sběru dat: metody dálkového průzkumu Země a metody pozemní.

4.1. Metody dálkového průzkumu Země (DPZ)

Sběr termografických dat pomocí DPZ je moderní metodou získávání informací o plošném rozložení teplot na povrchu planety Země bez nutnosti fyzického kontaktu. Nejen v oblasti termografie lze metody DPZ rozdělit do tří základních kategorií v návaznosti na rozlišení poskytovaných termografických snímků a tím spojené možnosti využití.



4.1.1. Družicové termografické snímkování

Tepelné senzory neboli skenery instalované na satelitech detekují vyzařovanou energii těles a samotného povrchu zemského. Kvůli atmosférickým vlivům nejčastěji takové systémy fungují ve vlnových délkách v rozsahu 8 až 14 μm . To vychází z Wienova zákona, který stanovuje, že nejvyšší emise se pro objekty či tělesa o teplotě 27 ° C vyskytuje při vlnových délkách 9,7 μm .

Některé termální snímače určené pro umístění na satelitní platformy lze také umístit na palubu letadel nebo na pozemní systémy. Další skupinou zařízení jsou multispektrální systémy, které shromažďují údaje o emitovaném záření v různých vlnových délkách.

Mezi nejrozšířenější satelity vybavené technologií termálního snímkování se řadí skupina satelitů z programu Landsat, ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) a MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer).

Prvním satelitem ze skupiny Landsat, který sbíral termální data, byl Landsat 3, avšak jeho tepelný senzor selhal krátce po vypuštění satelitu na oběžnou dráhu. Satelity Landsat 4 a 5 měly speciální kanál pouze pro tepelné pásmo 6 (band 6) na senzoru Thematic Mapper (TM) s prostorovým rozlišením 120 m, které bylo následně převzorkováno na rozlišení 30 m. Podobné pásmo bylo zahrnuto do Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) na Landsatu 7. Landsat 8 obsahuje samostatný tepelný senzor známý jako Thermal Infrared Sensor (TIRS), který má dvě tepelná pásma, pásmo 10 (10,60 - 11,19 μm) a pásmo 11 (11,50 - 12,51 μm). Pásma TIRS jsou získávána v prostorovém rozlišení 100 m, ale v dodaných datových produktech jsou převzorkována na 30 m. Data Landsat 8, včetně viditelných, blízkých infračervených, středních infračervených a tepelných dat, jsou vedena do propracovaného modelu energetické bilance, který vytváří mapy aktuální evapotranspirace. Pojem evapotranspirace označuje souhrnně celkový výpar ze zemského povrchu do atmosféry, který se vztahuje k určitému území.

Tepelný senzor ASTER senzor umístěný na satelitu TERRA má pět tepelných pásem v rozmezí od 8,1 do 11,6 μm s prostorovým rozlišením 90 m. Data ASTER se používají k vytváření podrobných map povrchové



teploty půdy, emisivity, odrazivosti a nadmořské výšky. Data ASTER jsou k dispozici ke stažení prostřednictvím EarthExplorer.

Satelit MODIS disponuje vysokým spektrálním rozlišením a shromažďuje reflexní data a emitovaná tepelná data v různých vlnových délkách s prostorovým rozlišením 1000 m. MODIS má vysoké časové rozlišení s návratností jeden až dva dny. Díky tomu je vynikajícím zařízením pro detekci a monitorování požárů. Jedním z výsledků generovaných z dat MODIS je produkt Thermal Anomalies / Fire, který detekuje aktivní požáry na planetě Zemi.

4.1.2. Letecké termografické snímkování

Letecké řešení sběru termálních dat probíhá ve speciálně upraveném letadle pro dálkový průzkum Země. Daná metoda je nevhodnější pro snímkování územních celků nadregionálního charakteru. Samotný termální snímač je standardně upevněn v podlaze letadla ve speciálně vytvořeném otvoru tak, aby samotnému senzoru nic nebránilo snímat povrch Země. Sběr termálních dat pilotovaným letadlem má výraznou výhodu při vyhledávání teplotních změn v místech, kde není jisté, že se tyto jevy vyskytují. To je umožněno především širokým úhlem záběru termálních snímačů (žádná hluchá místa, kde by mohly být neznámé teplotní změny) a rychlým získáváním dat na velké ploše (km²).

Každá termografická kamera má svou technickou specifikaci. U termografických kamer využívaných pro snímkování z pilotovaného letadla se uvádí odchylka teplotní přesnosti ve stupních celsia ($\pm 1^\circ\text{C}$) či procentech ($\pm 1\%$). Dále je nutné při zpracování termálních snímků počítat s působením atmosférických jevů (kumulovitá oblačnost, mlha) a vzdálenosti od snímaného objektu, které mohou významně ovlivnit výsledky i vzhledem k faktu, že letecké snímkování pilotovanými letadly se provádí od 150 m nad povrchem mimo urbánní území a od 300 m nad povrchem Země v urbánním území. Při testování termografického snímkování pilotovaným letadlem z výšky 400 m nad povrchem Země bylo dosaženo pomocí kamery *DigiTHERM-1280-C* rozlišení výsledného rastru menší než 1 m. Testované přístrojové vybavení letecké metody sběru dat je uvedeno na *obr. 13*.



Obr. 13: Využitá aparatura leteckého termografického snímkování (kamera - DigiTHERM-1280-C, letadlo - Cessna T4206H Stationar, OK-VON)

4.1.3. Termografické snímkování bezpilotními letouny

Termografické snímkování bezpilotními letouny je v současnosti velmi rychle rozvíjející se alternativa termálního snímkování pro malá území regionálního charakteru (mikropovodí odvodňovacích staveb, délka vodních toků do 10 km). Samotný sběr dat probíhá za pomoci sestavy bezpilotního letounu osazeného termálními snímači. Sestava je zpravidla také osazována optickou kamerou zaznamenávající snímky ve viditelném RGB spektru, pro možnost detailní analýzy identifikovaných teplotních změn.

Jedná se o vysoce operabilní metodu, s jejímž využitím lze nasnímat např. přibližně 5 ha (a více) území za den v závislosti na využitých technologiích a potřeby velikosti rozlišení (výška náletu). Z výšky 50 m nad zemským povrchem lze dnes již standardními technologiemi dosáhnout rozlišení menší než 10 x 10 cm. Metoda snímkování bezpilotními letouny je velmi účinná zejména v oblastech nejistoty hledaných teplotních změn či detailní analýzy rozložení teplot na vodní hladině. V rámci prováděného výzkumu byl využit bezpilotní letoun DJI Matrice 210 – RTK se snímači, viz obr. 14.



Obr. 14: Využitá aparatura pro termografické snímkování bezpilotním letounem (DJI Matrice 210 – RTK, termografická kamera DJI Zenmuse XT a stabilizovaná optická kamera DJI X5S).



4.2. Pozemní metody – statické a dynamické

Pozemní metody sběru termografických dat lze dělit na statické a dynamické. Statická metoda je principiálně založena na získání lokálního termálního obrazu z bodu pořízení snímku. Ruční termografické kamery neboli termální zobrazovače (*obr. 15*) prezentují termogram na digitálním displeji v reálném čase. To umožňuje detailní analýzu tepelné změny i díky možnostem podrobného nastavení zobrazovaného barevného spektra, odfiltrování teplot nad nastavenou hodnotu, zobrazování hran objektu, aj.

Pozemní termografické snímkování v oboru vodního hospodářství je velmi flexibilní a operabilní metodou a je nejlépe využitelné při identifikaci teplotních změn malého rozsahu či při identifikaci přítoků o nízkém průtoku (prameny, drenážní výusti). Jedná se o metodu, která se uplatňuje také v kombinaci s řešením leteckým či bezpilotním letounem pro získání relevantnějším poznatků o identifikované teplotní změně.

Dynamické řešení pozemního sběru dat lze realizovat z dopravního prostředku v podobě automobilu, lodi, atp. Pro dynamické termografické snímkování se využívají snímače, které zaznamenávají snímky v časovém intervalu (stejně jako u leteckého snímkování či snímkování bezpilotními letouny) a následným spojením v rámci následného zpracování vznikají termogramy zachycující snímané oblasti. Dynamický pozemní sběr termografických dat je postupně nahrazován řešením bezpilotními letouny v závislosti na jejich rozvoji, dostupnosti a vyšší stabilitě instalovaných snímačů.



Obr. 15: V levé části obrázku jsou testované termální snímače FLUKE - TiS20 a FLIR E6. V Pravé části obrázku fotografie termální snímače při měření na výusti AČOV Tábora.

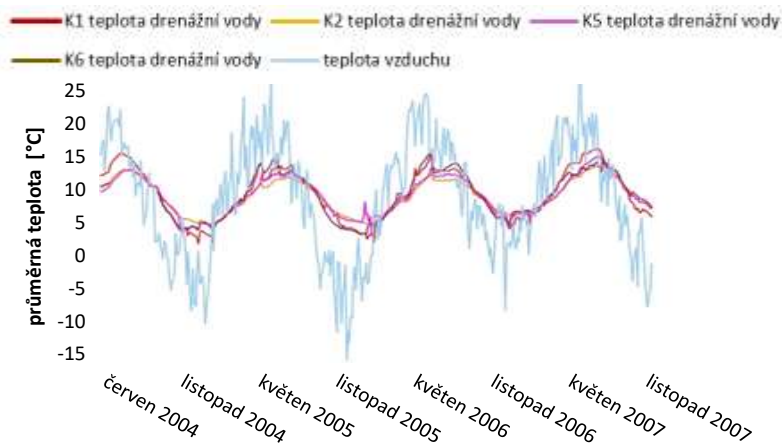


5. Tepelný režim ve vodách

Metodický přístup je založen na využití charakteristického ročního chodu teploty drenážní vody a teploty vody povrchových vod, tj. vod, do kterých je drenážní voda zaústěna.

Chod teploty drenážní vody vykazuje pravidelný sinusoidní tvar. Období maximálních teplot nastává mezi 3. dekadou června a koncem srpna, kdy teplota kolísá okolo 13 °C. Poté následuje pozvolný pokles teploty až do počátku ledna, kdy nastává období minimálních teplot, ve kterém teploty vody kolísají kolem 4°C. Toto období trvá zpravidla do konce února a poté nastává pozvolný nárůst teploty až k dalšímu období maxim.

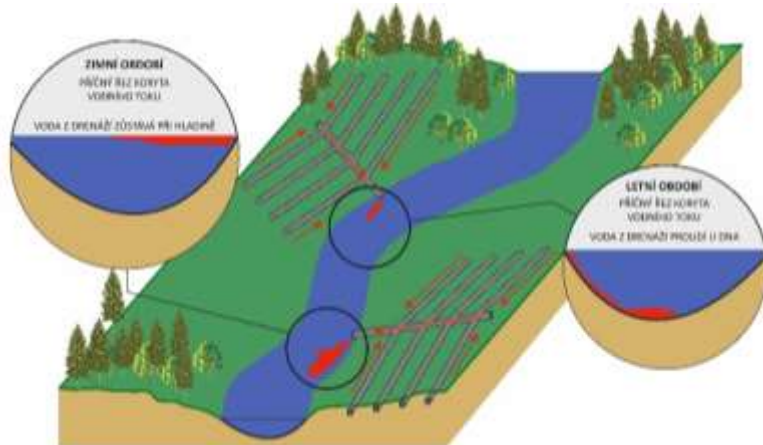
Dlouhodobý průběh teploty drenážní vody koreluje s průběhem teploty vzduchu (hodnota korelačního koeficientu $r=0,9$), přičemž trend teploty vody lze dle statistické analýzy vysvětlit ze 79 % průběhem teploty vzduchu s jednoměsíčním zpožděním. Drenážní vody v průběhu roku vykazují poměrně malou variabilitu teploty (přibližně 10 °C) – viz obr. 16. V případě variability teploty povrchových vod lze zaznamenat v průběhu roku znatelně větší interval v případě zimního minima a letního maxima, který představuje až 30 °C.



Obr. 16: Dlouhodobý trend teplot drenážní vody v porovnání s teplotou vzduchu [29, 30].

Na pilotních lokalitách tak bylo testováno termografické měření v obdobích, kdy je možné zaznamenat nejprogressivnější rozdíly mezi teplotou drenážní vody a teplotou recipientu, do kterého jsou drenážní vody zaústěny (HOZ, DVT, MVN, atd.).

Přestože je možné v letním období provádět termografické kampaně, kdy lze získat rozdíly teplot až v intervalu 6 – 10 °C (v případě, kdy je recipientem rybník či MVN), tak se kampaně z daného období příliš neosvědčily. Daný fakt je způsoben skutečností, že v letním období, kdy je přítok drenážní vody výrazně studenější, má přitékající drenážní voda tendenci se koncentrovat u dna recipientu. S ohledem na charakter sběru termografických dat není možné tudíž konkrétní drenážní výusti progresivně identifikovat, protože nedochází k vytváření teplotního kuželu na hladině recipientu. Tvorba teplotního kuželu na hladině recipientu je průkazná pro zimní kampaně, kdy drenážní voda dosahuje vyšších teplot než voda v recipientu, tudíž má tendenci se koncentrovat na hladině a vytvářet tak uváděný teplotní kužel (teplotní mrak), viz *obr. 17*.



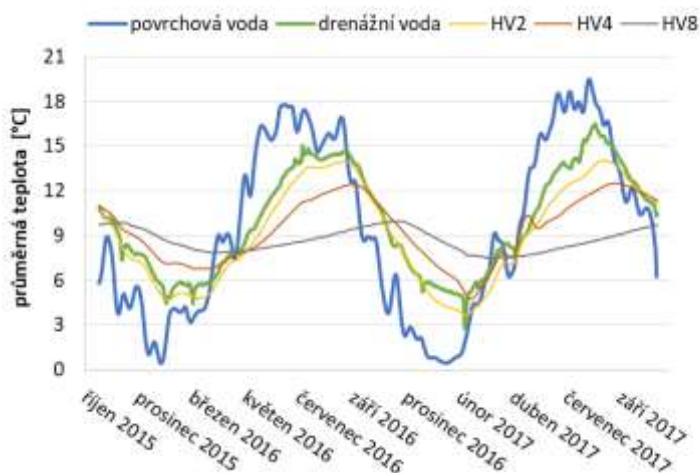
Obr. 17: Chování vstupu drenážní vody v letním a zimním režimu.

Uvedené zjištění vychází z fyzikálních vlastností vody a vzájemného vztahu hustoty a teploty. Z daného vyplývá, že využitelnost je vázána především na zimní termografické kampaně, které jsou z pohledu identifikace drenážní výusti v terénu průkaznější a poskytují větší uplatnitelnost v uživatelské praxi.



5.1. Teploty povrchových, drenážních a podzemních vod

Využití termografie pro identifikaci vtoku vod do recipientu je založeno na využití rozdílu mezi teplotou sledovaných vod a teplotou vod recipientu. Úspěšné využití termografické metody závisí na dostatečném teplotním rozdílu sledovaných vod v době provádění měření. Teplota různých typů vod je závislá na ročním období a hloubce jejich původu. Obecně lze říci, že teplota vod v průběhu sezóny má pravidelný průběh sinusového tvaru, přičemž amplituda křivky klesá s rostoucí hloubkou původu sledované vody. Dále lze předpokládat, že voda mělkého původu bude mít vyšší teplotu v letním období a nižší teplotu v zimním období než voda hlubšího původu. Výše zmíněné skutečnosti jsou prezentovány na *obr. 18*. V tomto grafu je zobrazen průběh průměrných denních teplot vod povrchových (Kopaninský potok), mělkých podpovrchových (drenážní odtok na povodí Dehtáře) a podzemních vod (Dehtáře) měřených ve vrtech hlubokých 2 m, 4 m a 8 m.



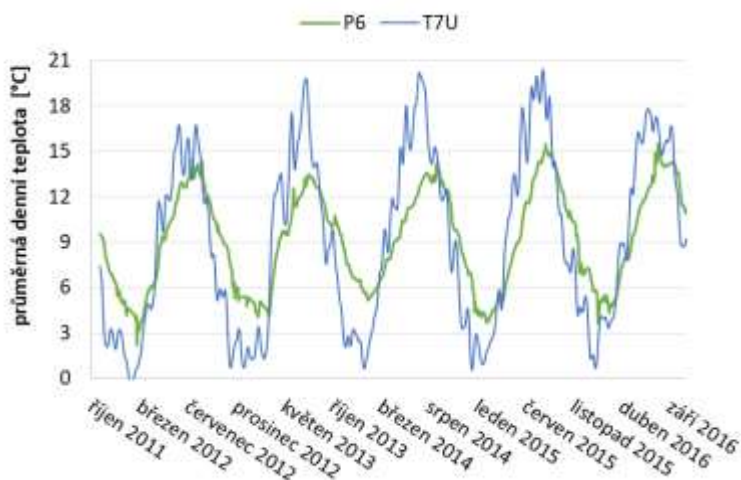
Obr. 18: Průběh denních teplot povrchových, drenážních a podzemních vod na experimentálních lokalitách VÚMOP, v.v.i. v hydrologických letech 2016 a 2017.

V případě identifikace drenážních výstů je proto nutné sledovat průběh teploty drenážní vody a vody povrchové v drobném vodním toku či hlavním odvodňovacím zařízení, které v našich podmínkách reprezentují typický recipient pro drenážní vody. Teplota drenážních vod v průběhu roku



vykazuje pravidelný sinusoidní průběh, který je občas narušován prudkými výkyvy v průběhu srážko-odtokových epizod. Nejvyšší teploty se vyskytují v letních měsících od července do poloviny září. Hodnoty teploty drenážních vod se v tomto období pohybují mezi 13 °C - 15 °C, s úplným maximem většinou v průběhu srpna. Poté následuje pozvolný pokles teplot až do počátku ledna, kdy nastává období minimálních teplot, které trvá většinou od ledna do března. Teploty drenážních vod v tomto období oscilují mezi 2–5 °C s minimem nastávajícím většinou v průběhu února. Poté nastává pozvolný nárůst teploty až k dalšímu období vysokých teplot.

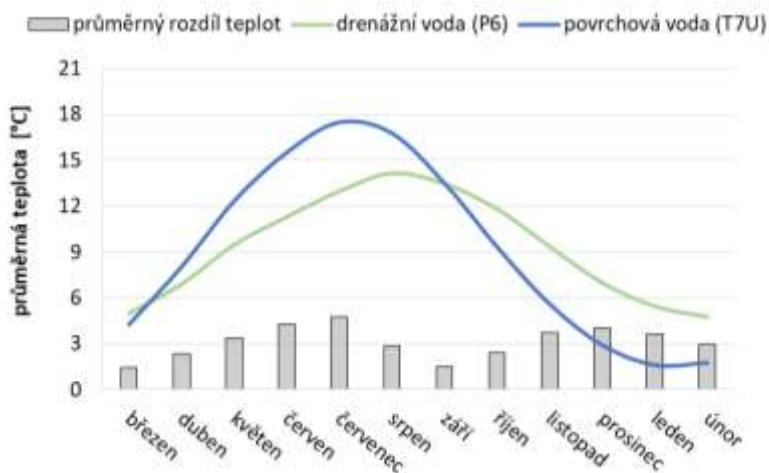
Oproti značně rozkolísaným teplotám vody v typických recipientech drenážích, kterými jsou drobné vodní toky či hlavní odvodňovací zařízení vykazují teploty drenážních vod v průběhu sezóny poměrně malou variabilitu (většinou do 10° C). Tento rozdíl je dobře patrný na příkladu jedné drenážní skupiny P6 a povrchového toku (T7U) v dlouhodobě sledovaném experimentálním povodí Kopaninského potoka. Průběh průměrných teplot na těchto dvou profilech je zobrazen na *obr. 19*. Z tohoto grafu je též dobře patrná větší stabilita teploty drenážní vody a mírný časový posun výskytu maximálních a minimálních hodnot.



Obr. 19 Dlouhodobý průběh průměrných denních teplot vod povrchových (T7U) a drenážních (P6) v experimentálním povodí Kopaninský potok v hydrologických letech 2011 až 2016



Pro úspěšné zjištění míst vtoku drenážních vod je vhodné načasovat monitorovací kampaně do období, kdy jsou rozdíly mezi teplotami drenážních a povrchových vod nejvyšší. Tato analýza byla opět provedena na příkladu toku a drenáže v povodí Kopaninského potoka. Na těchto sledovaných profilech byla průměrná dlouhodobá diference teplot 3,1 °C. V průběhu sezóny se rozdíl mezi teplotami vod mění a pohybuje se od 0,0 do 7,7 °C. Teplota drenážní vody, teplota recipientu (povrchová voda) a průměrný rozdíl v jednotlivých měsících za období hydrologických roků 2011 – 2016 jsou prezentovány na obr. 20. Nejmenší rozdíly v teplotách povrchových a drenážních vod se vyskytují v březnu a v září. V těchto měsících se průměrná denní teplota těchto dvou médií liší pouze o 1,5 °C. V od začátku října rozdíly teplot rostou přibližně až k 4 °C v prosinci, poté opět klesají až do konce března. V průběhu jarního období nastává další růst teplotních rozdílů drenážních a povrchových vod, který trvá až do července, kdy je dosaženo nejvyšších rozdílů téměř 5 °C. Poté následuje jejich prudký pokles a v září jsou opět rozdíly minimální. Z tohoto porovnání vyplývá, že z pohledu teplotních rozdílů v průběhu sezóny existuje jedno vhodné období k provádění termografických kampaní. Uvedené období nastává od konce podzimu, konkrétně od listopadu a trvá do konce února.



Obr. 20 Průměrný rozdíl mezi teplotou drenážní vody a vody v povrchovém odtoku v jednotlivých měsících.



Obě období největších teplotních rozdílů mezi drenážní vodou a recipientem jsou dána opožděním maxim a minim teplot drenážních vod oproti teplotám vod povrchových, když v daném měsíci je již dosažena nejvyšší resp. nejnižší sezónní teplota povrchové vody, avšak teplota drenážních vod dosáhne těchto extrémních hodnot až o několik týdnů později.

Nejvyšší rozdíly teplot se sice vyskytují v průběhu července, tento termín provedení termografické kampaně je sice možný, ale ne vždy je letní kampaň zcela úspěšná. Problémem v tomto termínu může být nestabilita a pokles drenážních průtoků v letním období, kdy průtok v některých drenážních skupinách může být velmi nízký popř. nulový. Navíc relativně nižší teplota drenážní vody oproti teplejší vodě povrchové způsobí rychlé klesání drenážní vody směrem ke dnu toku, což dále snižuje možnost úspěšné detekce teplotního rozdílu termografickou kamerou.

Jako nejvhodnější období provedení termografických kampaní proto lze považovat listopad, popř. prosinec. V tomto období jsou rozdíly v teplotě drenážní a povrchové vody dostačující a drenážní průtok relativně stabilní. Navíc vyšší teplota drenážní vody způsobí, že v místě vtoku do recipientu zůstává při povrchu a teplotní rozdíly lze lépe zachytit.

5.2. Využití měření teploty drenážní vody jako stopovače

Teplota vody je dlouhodobě a široce využívána v hydrologii jako stopovač již od šedesátých let 20. století. Nevýhoda nekonzervativního chování teploty jako stopovače (její hodnota se mění při průchodu prostředím s rozdílnou teplotou) je vysoce převážena její ekonomickou a technickou dostupností [31]. Díky těmto výhodám lze aplikací měření teploty vod získat celou řadu znalostí o hydrologii zkoumaného povodí [32].

Náhlych a krátkodobých změn v teplotě drenážní vody využili [29] k identifikaci průniku srážkové vody do rychlé složky drenážního odtoku, což bylo potvrzeno porovnáním s metodou využití stabilních izotopů ^{18}O a ^2H [33]. Dlouhodobým průběhem teplot vody se zabýval [34], který tímto způsobem stanovoval hloubku podzemního oběhu vyvěrající vody. [35] rozlišoval měřením teploty ve vrtech vodu rychle infiltrovanou ze srážek od hlubší teplotně stabilní podzemní vody. Další typické využití teploty vody jako stopovače je popsáno např. v pracích [36, 37, 38], ve kterých byla



prokázána možnost identifikace přítoku podzemní vody do povrchového toku pomocí měření teploty vody. Tyto výsledky již přímo implikují možnost využití termografie také pro zjištění míst vtoku drenážních vod do recipientu (drenážních výustí).

6. Odtokový režim povrchových a drenážních vod

Odtokový režim povrchových vod závisí na působení mnoha činitelů, uplatňujících se v celém povodí a ovlivňujících jak odtok z plochy, tak i odtok přímo v korytě. Odtokové poměry vodního toku jsou v těsné vazbě na podnebí a na zdroji vody - dešťové srážky, tající sníh, podpovrchová voda, tající ledovec. V podmínkách vztahených na zemědělské oblasti ČR lze za hlavní zdroj vody považovat dešťové srážky. Ty jsou zejména v posledních letech v průběhu roku nepravidelné, přesto z dlouhodobých měřených dat lze stanovit období s dlouhodobě vyššími průtoky.

Rychlost reakce drenážního odtoku je závislá na vícero faktorech. Jedním z nich je intenzita srážky, když přívalové deště v letním období souvisí s rychlou reakcí drenážního odtoku a naopak povětšinou mírné a dlouhodobé srážky v zimním období působí pomalejší reakci drenážního odtoku. Nicméně značnou roli hrají také charakteristiky jako množství přechozích srážek, vlhkost půdy v povodí, množství makropórů v půdě a také využití půdy ve zdrojové oblasti drenážního systému.

Pro plošné zdroje znečištění (odvodňovací stavby) je situace s definováním nadstandardně vysokého průtoku na výusti komplikovanější. Přítomnost drenáže v povodí zásadně mění jeho hydrologii v závislosti na půdních a geologických podmínkách, průběhu srážek, topografií území a způsobu jeho využití, ať již se jedná o drenáž v rovinných [39] či svažitých polohách [40, 41].

Ve středně těžkých a těžkých půdách hraje - ve vztahu k proudění vody v půdě a následně drenáži - podstatnou roli přítomnost a časoprostorová proměnlivost makropórů různého původu a velikosti a jimi vedené preferenční proudění [42, 43, 44] a rovněž tak dynamika mělké, nesouvislé a dočasné hladiny podzemní vody nebo pramenných vývěřů z hlubších zvodní, zejména během srážko – odtokových epizod [41, 29, 45].

Srážko-odtokové epizody mají (v souvislosti se změnami v rozložení srážek v průběhu sezóny) stále větší úlohu v dynamice drenážního odtoku.



Reakce drenážního odtoku na příčinnou srážku může být značně rychlá. V průběhu letních, intenzivních srážko-odtokových epizod dochází k prudkému nárůstu drenážního odtoku v řádově desítkách minut a ke kulminaci drenážního průtoku v řádu jednotek hodin. Naopak zimní srážko-odtokové epizody se vyznačují pomalejším průběhem, když reakce průtoku na příčinnou srážku nastává v řádu hodin a kulminace průtoku v řádu desítek hodin až dnů.

Všechny tyto faktory ovlivňují složení drenážního odtoku, zejména podíl jeho rychlejších složek. Rapidní nárůst velikosti odtoku na příčinnou srážku je způsoben především následujícím mechanismem. Srážková voda, která intenzivně zasakuje ve zdrojové oblasti s mělkým a kamenitým půdním pokryvem, rychle putuje sítí puklin a dalších preferenčních cest k pramenům, které jsou podchyceny drenáží. Tímto způsobem se do drenážního odtoku dostává velmi rychle značné množství vody pocházející přímo z příčinné srážky [33].

Srážko-odtokové charakteristiky a teplotní charakteristiky byly sledovány na několika pokusných lokalitách VÚMOP, v.v.i, které jsou dlouhodobě sledovány. Jejich společnou charakteristikou je drenážní systém vybudovaný ve svahu. Geologickým podkladem jsou krystalické horniny, místy přeměněné, v různém stadiu rozpadu. V dolních partiích svahů se vyskytují kvartérní sedimenty v podobě svahových písků a hlín s různou mocností. Půdní pokryv je velmi variabilní zejména ve výtokových oblastech, kde se vyskytují kambizemě oglejené, pseugogleje, gleje modální a místy organozemě. Ve zdrojových oblastech (horní části svahů, poblíž rozvodnic) se vyskytují zejména kambizemě modální až arenické, místy rankery. Srážkové úhrny byly ve sledovaném období velmi variabilní a pohybovaly se od 450 do 750 mm za rok. Základní charakteristiky jsou uvedeny v *tabulce 2*. Průměrný specifický odtok je zde uveden na jednotku plochy celého mikropovodí.

Na malém povodí Dehtáře byly sledovány v HR 2013 – 2016 dva profily KP – závěrový profil drenážní skupiny a K5 drenážní souřad o ploše drenáže 1 ha a o ploše mikropovodí 5,6 ha. Na závěrovém profilu se za dobu sledování pohyboval průtok v rozmezí 0,1 – 13,1 l/s. Na drenážním souřadu K5 byl průtok v rozmezí 0,28 – 3,3 l/s.

Černíčí – sledována byla drenážní skupina Š2 na malém zemědělském povodí poblíž Čechtíc. Průtok se v hydrologických letech 2013 – 2016

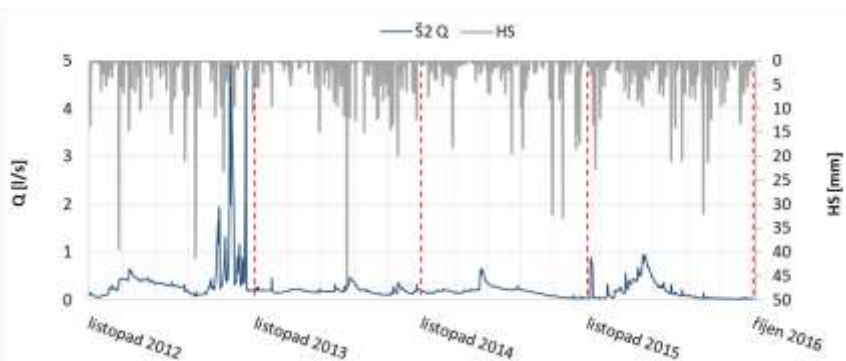
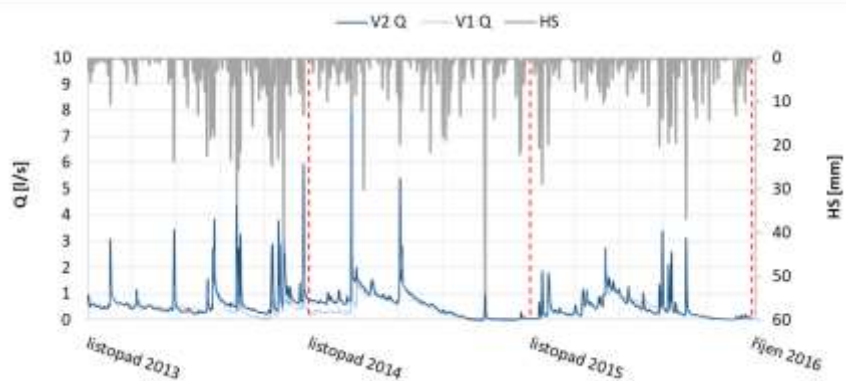
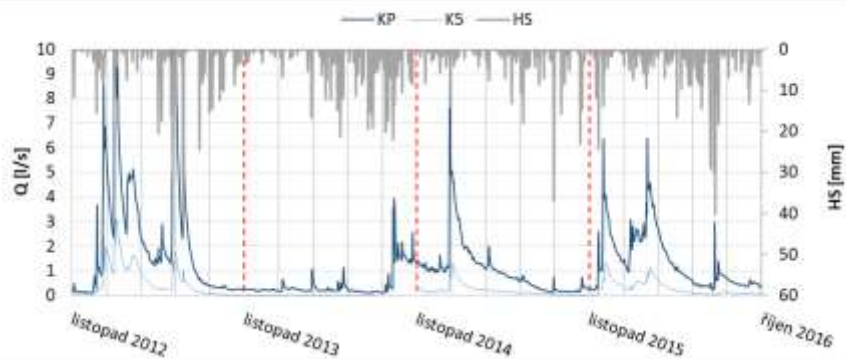


lokality	drenážní skupina	plocha odvodnění [ha]	plocha mikropovodí [ha]	průměrný roční průtok [l/s]	specifický odtok [l/s/ha]	průměrné srážky ve sledovaném období [mm/rok]	sledované období
Dehtáře	K5	1,0	5,6	0,279	0,047	540	2013-2016
Dehtáře	KP	9,5	28,3	1,265	0,044	540	2013-2016
Černičí	Š2	1,2	3,82	0,256	0,067	590	2013-2016
Vepříkov	VP1	8,6	19,95	0,570	0,028	700	2014-2016
Vepříkov	VP2	21,3	28,25	0,705	0,025	700	2014-2016

Tab. 2: Specifikace měřených průtoků na výusti odvodňovacích staveb.

pohyboval od 0,02 po 7,2 l/s. Vepříkov experimentální lokality představuje odvodněný půdní blok ve svahu v katastru obce Vepříkov poblíž Chotěboře. Sledovány byly dvě drenážní skupiny v hydrologických letech 2014 – 2016. Drenážní průtok se pohyboval v rozmezí 0,005 l/s po 26,0 l/s.

Drenážní odtoky jsou v průběhu sezóny velice variabilní a pohybují se od 0,005 po desítky litrů za sekundu. Obecně jsou průtoky vyšší v zimním období, kdy jsou také stabilnější. Období zvýšených průtoků pozvolna nastupuje od října a končí v dubnu. Je to dáno zejména plynulejšími srážkami (mírnější a déle trávající), absencí vegetačního pokryvu a nízkou až nulovou evapotranspirací. Jarní období je charakteristické značným rozkolísáním průtoků, zejména pokud je spojeno s táním sněhové pokrývky. V letním období, zejména od června do září nastává období velmi nízkých průtoků, často přerušovaných prudkými, ale časově omezenými nárůsty v průběhu letních srážko-odtokových epizod (bouřky, přívalové deště). Grafické zpracování průtoků na drenážních výustích mezi lety 2013 - 2016 je prezentováno na *obr. 21, 22, 23*.



Obr. 21, 22, 23: Monitoring velikosti prútokú na výusti odvodňovacích staveb.

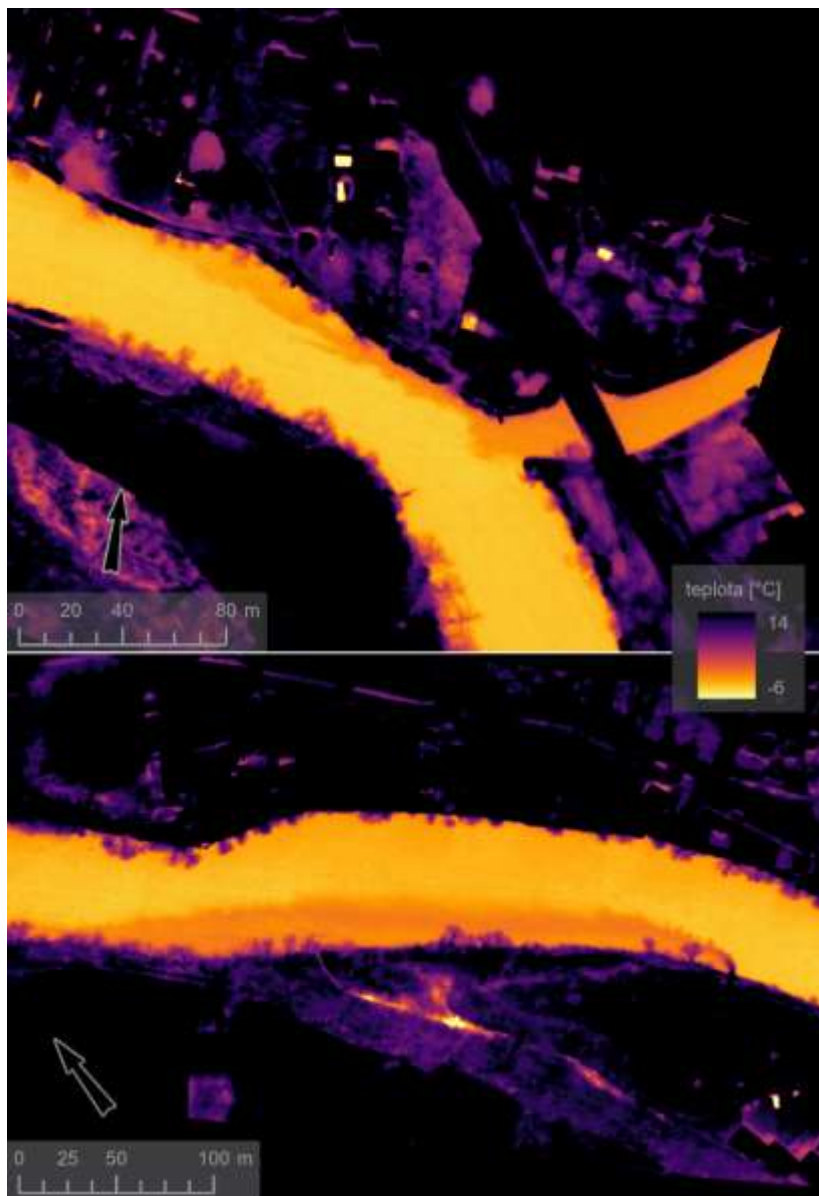


7. Prezentace výsledků z termografických kampaní

V průběhu řešení výzkumného projektu byly prováděny termografické kampaně za účelem ověření aplikovatelnosti jednotlivých metod, přičemž pozornost byla zaměřena na tři nejvyužitelnější v oboru vodního hospodářství – letecké termografické snímkování, termografické snímkování bezpilotními letouny a pozemní metoda statická. Ověřování probíhalo na různých lokalitách v závislosti na charakteru vstupu tepelného znečištění. Hlavní pozornost byla však zaměřena na tři oblasti – dolní tok Lužnice, povodí Litavky, povodí Rakovnického potoka.

7.1. Výsledky leteckého termografické snímkování

Ověření leteckého termografického snímkování bylo provedeno v oblasti dolního toku Lužnice. Konkrétně bylo snímkování uskutečněno na jaře roku 2018 od Soběslavi k Bechyni. V době náletu teplota vody dosahovala 1,8 °C, což představovalo vhodné podmínky pro identifikaci tepelného znečištění, kdy z vypouštěcích objektů ČOV byla vypouštěna voda o teplotě až 14°C. Na snímkovaném území se nacházelo deset lokalit s předpokládanou teplotní změnou. Lokalizovatelné s využitím leteckého termografického snímkování byly dvě, soutok s Černovickým potokem (*horní část obr. 24*) a výust' z AČOV Tábor (*spodní část obr. 24*). Detailní analýza termogramu v oblasti AČOV Tábor se stala hlavním předmětem specializovaných map s odborným obsahem [46].



Obr. 24: Letecké termografické snímky z výšky 300 m nad povrchem země. Horní část – pravostranný přítok Lužnice – Černovický potok. Dolní část – výust' z AČOV Tábor.

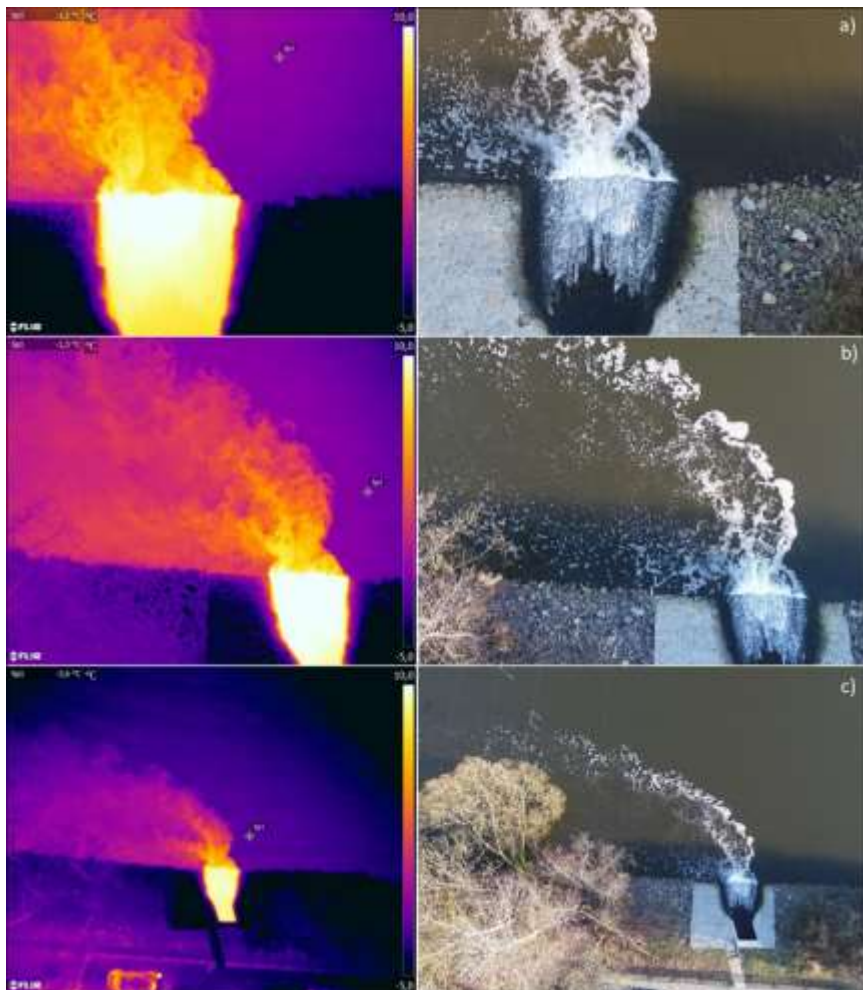


7.2. Výsledky termografické snímkování bezpilotními letouny

Pro ověření metody termografického snímkování bezpilotním letounem byly vybrány konkrétní výusti v povodí dolního toku Lužnice. Snímkování probíhalo v různých výškách (10, 20, 50 m) pro možné porovnání viditelnosti tepelných změn, velikosti snímané plochy či velikosti pixelů výsledných snímků, viz *obr. 26*. Metoda termografického snímkování bezpilotním letounem byla velmi úspěšná, kdy z výšky 50 m byl pro identifikaci dostačující teplotní rozdíl (5°C). Na *obr. 25* je prezentována ukázka snímku a termogramu z bezpilotního letounu u výusti z průmyslového areálu.



Obr. 25: Termogram výusti z průmyslového areálu.

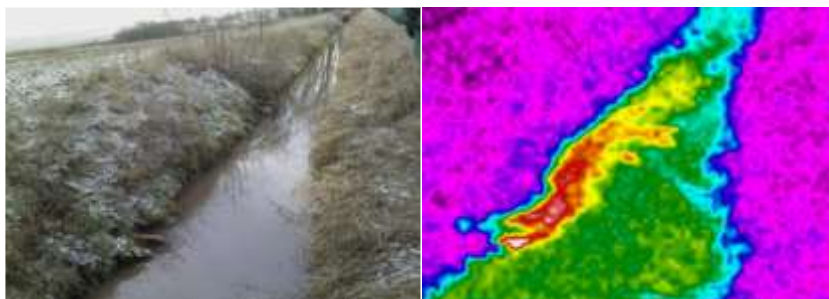


Obr. 26: Porovnání termografických snímků pořízených bezpilotním letounem z odlišných výšek 10, 20, 50 m. Zatímco rozdíl teplot mezi body sp1 ze snímku z 10 a 20 m je $0,1^{\circ}\text{C}$, mezi snímky z 20 a 50 m výšky je již rozdíl $1,3^{\circ}\text{C}$. Při porovnání teploty určené z termogramu s teplotou vody fakticky naměřenou v době leteckého snímkování se teploty povrchu vody v bodě sp1 liší o $3,03$ (termogram z výšky 10 m) až $4,43^{\circ}\text{C}$ (termogram z výšky 50 m), kdy byly zaznamenány vždy hodnoty nižší, než byly fakticky změřeny.



7.3. Výsledky termografické snímkování pozemní statickou metodou

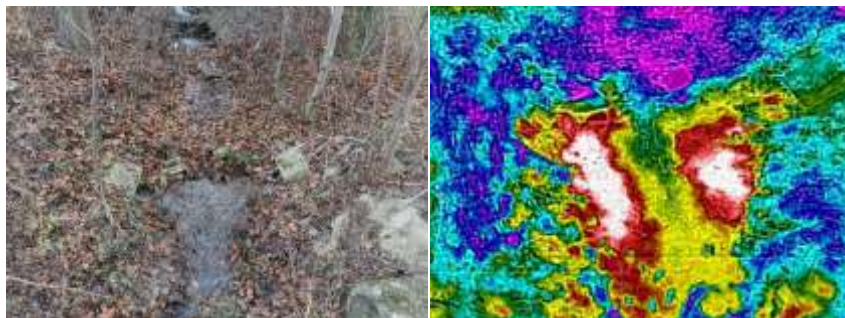
Termografické snímkování pozemní statickou metodou bylo ověřováno z pohledu identifikace bodového zdroje znečištění (výúst ČOV) a plošného zdroje znečištění (drenážní výúst) na několika desítkách lokalit. Ověřování na bodových zdrojích probíhalo v zimních obdobích zejména v pilotních oblastech dolního toku Lužnice, povodí Litavky a povodí Rakovnického potoka. Z pohledu identifikace plošného zdroje znečištění proběhly kampaně v několika krajích, kdy na základě dosažených výsledků byla publikována ověřená technologie [47]. Pro obě možnosti se pozemní metoda statická osvědčila, kdy pro identifikaci teplotní změny ze vzdálenosti 5 m bylo zapotřebí teplotního rozdílu cca 3° C. Následující prezentované termogramy (*pravá část obr. 27 – 31*) byly vyhodnoceny v barevné paletě rainbow HC. Nejvyšší teploty jsou zobrazeny bílou barvou, nejnižší teploty barvou černou.



Obr. 27: Fotografie a termogram drenážní výusti – Kněževs u Rakovníka.



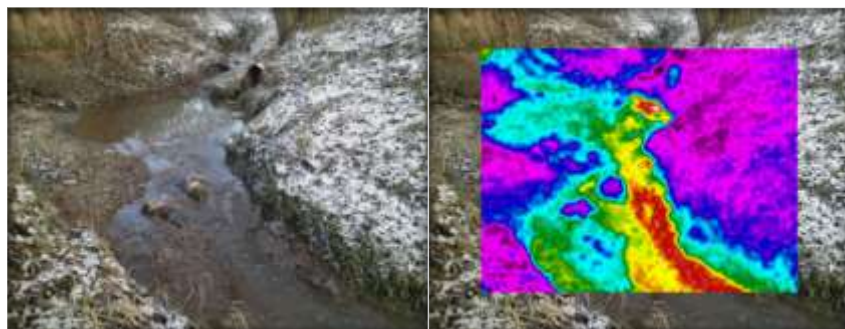
Obr. 28: Fotografie a termogram drenážní výusti – Sobiňov.



Obr. 29: Fotografie a termogram drenážní výusti – Vojtěchov u Hlinska.



Obr. 30: Fotografie a termogram výusti ČOV Jince – povodí Litavky.



Obr. 31: Fotografie a termogram výusti ČOV Lužná - povodí Rakovnického.



8. Metodická doporučení k provádění termografických kampaní

Při sběru termografických dat pro potřeby oboru vodního hospodářství za účelem detekce teplotních změn je vhodné dodržovat níže uvedená doporučení. Doporučená využití jednotlivých metod vychází z provedeného testování termografických kampaní, kdy hlavní proměnnou je charakter hledaného jevu či prováděné analýzy, viz tab. 3.

charakter hledaného jevu či prováděné analýzy	pozemní metody statické	termografické snímkování bezpilotními letouny	letecké termografické snímkování	družicové termografické snímkování
pramenný vývěr, detekce tepelného stopovače	X			
drenážní výúst' do průtoku 0,2 l/s	X			
drenážní výúst' od průtoku 0,2 l/s	X	X		
objekt vypouštění do průtoku 0,2 l/s	X			
objekt vypouštění do průtoku 10 l/s	X	X		
objekt vypouštění od průtoku 10 l/s		X	X	
analýza tepelného znečištění na ploše do 10 ha		X		
analýza tepelného znečištění na ploše od 10 ha do 10 km ²			X	
analýza tepelného znečištění na ploše nad 10 km ²				X

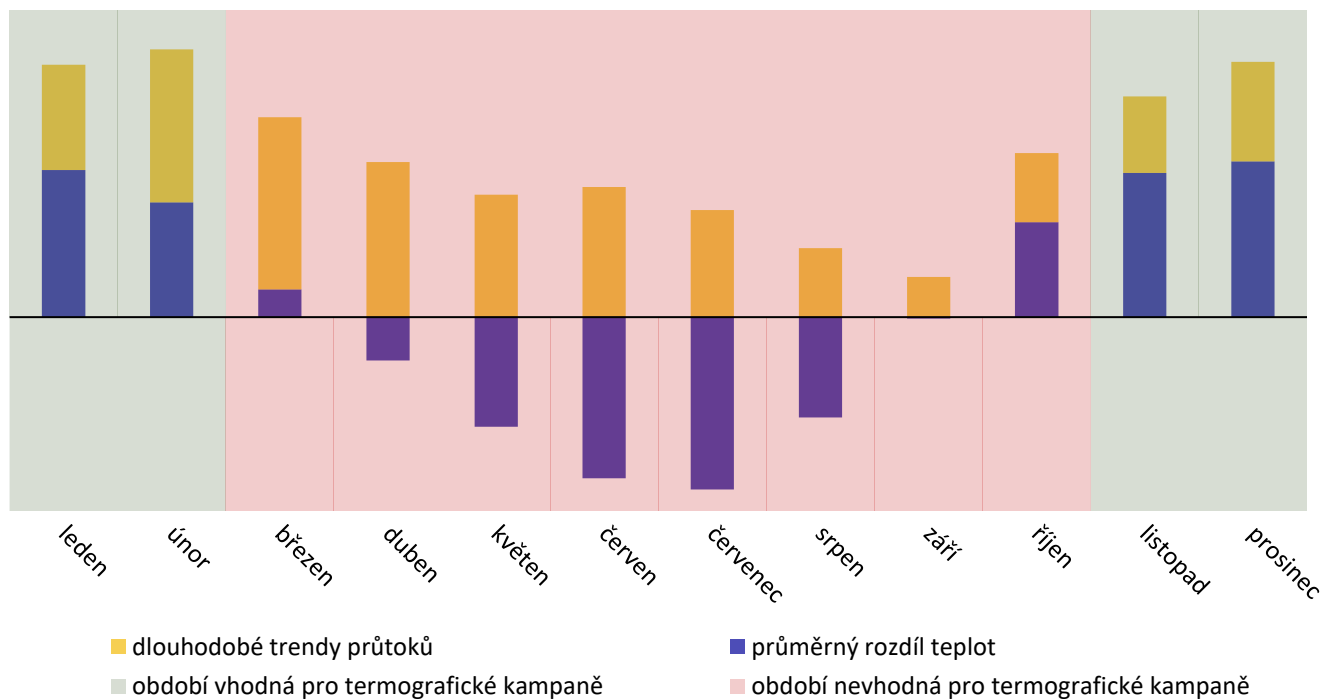
Tab. 3: Doporučení pro získání relevantních podkladů při využití metod termografického snímkování v návaznosti na charakteru hledaného jevu či prováděné analýzy.



Metodická doporučení využívání metod termografického snímkování vychází ze dvou základních parametrů. Prvním z nich je velikost teplotního rozdílu mezi přítokem a recipientem. Z velkého detailu lze statickou pozemní metodou detekovat teplotní změnu o velikost 1,5 °C, avšak pro širší záběr (ze vzdálenosti 2 m) tepelného šíření je zapotřebí tepelná změna aspoň 3 °C. Z daného vyplývá, čím bližší vzdálenost k teplotní změně, tím získáme detailnější termogram na úkor zobrazené plochy. Druhým faktorem ovlivňujícím vzdálenost viditelnosti teplotní změny, je objem přitékající vody. Čím větší objem vody s rozdílnou teplotou, tím lépe (z větší vzdálenosti) je možné zdroj tepelného znečištění identifikovat. Oba faktory spolu úzce souvisí a definují vhodné podmínky pro termografické snímkování.

Na základě dlouhodobě měřených dat, prezentovaných v kapitole 5 a 6, bylo odvozeno období, které je nejvhodnější k provedení termografického snímkování za účelem identifikace drenážních výustí. Jedná se o termín od začátku do konce února. Ke vhodným podmínkám pro termografické snímkování z pohledu teplotních rozdílů a průtoků na drenážních výustích, dochází periodicky od začátku listopadu do konce února, avšak toto období může být dále omezeno nepříznivými podmínkami v zimě, tedy nízkými teplotami či sněhovou pokrývkou. Schéma přístupu pro definici nejvhodnějších podmínek pro termografické snímkování za účelem identifikace tepelné změny vycházející z měřených dat je prezentováno na *obr. 32*.

Identifikaci významných teplotních změn na vodních plochách s využitím letecké metody je nejvhodnější provádět podobně jako u identifikace plošných zdrojů, od 1. listopadu do konce února, v případě zamrznutí vodní plochy nejsou tepelné rozdíly patrné a provádění termografického snímkování se nedoporučuje.



Obr. 32: Definice vhodného období pro identifikaci drenážních výústí v závislosti na dlouhodobých trendech průtoků a dlouhodobém průměrném teplotním rozdílu drenážní a povrchové vody. Data dlouhodobých trendů průtoků v jednotlivých měsících jsou převzata od [48]. Data rozdílů teploty vody jsou dlouhodobě měřená na pracovišti VÚMOP, viz kapitola 5.1.



9. Výhody a omezení

V současné době jsou základní principy termografického snímkování již dobře popsány a termografie je již dlouhodobě využívána v řadě dílčích oborů. Jedná se o obory jako je stavebnictví, kdy slouží k odhalování vad či poruch stavebních prvků v budovách, v energetice a telekomunikacích slouží k identifikaci přetěžovaných, tedy přehřívajících se prvků jednotlivých sítí či k určení tepelných ztrát z potrubní sítě dálkového vytápění.

Do oblasti přírodních věd (přírodních ekosystémů) proniká termografie zatím velmi pozvolna. První poznatky jsou vázány především na aplikaci v procesu precizního zemědělství, které se řídí zásadou provést pěstební zásah v pravý čas na správném místě a se správnou intenzitou. Pro efektivní nastavení precizního zemědělství je rozhodující získání relevantních informací (výnosové mapy, NDVI index, vodní stres, výskyt škůdců atd.). Právě pro potřeby stanovení vodního stresu v rostlině nalézá termografie stále větší uplatnění. Do oblasti vodního hospodářství proniká termografie prostřednictvím možností kvantifikace tepelného znečištění. Tepelné znečištění ze stacionárních zdrojů podél vodních toků a ploch je závažným problémem s významnými ekologickými důsledky pro místní společenstva.

Z tohoto důvodu byla vytvořena komplexní metodika, která poskytuje ucelené metodické přístupy a teoretické pozadí problému pro identifikaci zdrojů tepelného (jakostního) znečištění. Pro ochranu vodního ekosystému je stěžejní právě lokalizace těchto vstupů do hydrografické sítě a kvantifikace jejich vlivu. Souvisejícím problémem je i potenciální možnost průniku znečištění nejen v podobě tepelného znečištění, ale prostřednictvím vázaných rizikových látek na vodní zdroj, pro který je takto potenciální zdroj znečištění termograficky stanoven. Daná problematika vazby tepelně určeného zdroje znečištění s jakostními ukazateli nebyla dosud provázaně řešena a je proto potřebné se dané oblasti v budoucnu věnovat.

Stále se zpřísnující limity jakosti povrchových a podzemních vod obsažené zejména v Rámcové směrnici o vodách 2000/60/ES, potažmo v jiných významných právních předpisech, vyvolávají potřebu dalších informačních zdrojů pro management ochrany zdrojů povrchových a podzemních vod.

Obor termografie je využíván rovněž pro identifikaci pramenních vývěřů, přičemž v rámci prováděného výzkumu byla sledována i použitelnost



pro identifikaci drenážních výustí a lokalizaci souvisejícího plošného zemědělského odvodnění. Identifikace drenážní výusti může představovat potenciální zdroj znečištění (především z pohledu zvýšených koncentrací dusičnanů). Nicméně identifikace drenážních výustí je přínosná rovněž z pohledu současné absence uceleného evidenčního systému hydromeliorací, tj. chybějící informace o přesné poloze odvodňovacích staveb v terénu.

Na základě dosavadního stavu poznání a provedených termografických kampaní je možné kvantifikovat následující výhody a nevýhody, které jsou pro obor termografie v oblasti identifikace zdrojů znečištění povrchových vod či lokalizace drenážních výustí charakteristické.

Výhody:

- **Přímá lokalizace vstupu / zdroje znečištění** – přímá identifikace vstupu zdroje znečištění do hydrografické sítě.
- **Konkrétní lokalizace drenážní výusti v terénu** – v současnosti není k dispozici ucelená databáze drenážních výustí, které by byly konkrétně lokalizovány v terénu.
- **Možné konkrétní návrhy opatření** – identifikovaná drenážní výust' či zdroj znečištění umožňuje návrh cíleného opatření na stavbě odvodnění.
- **Cenová dostupnost** – v případě pozemního sběru termografických dat se nejedná o nákladnou metodu.
- **Samostatný způsob měření termografických dat** – termografickou kampaň dokáže v průběhu měření obsluhovat jedna osoba (v případě pozemního sběru dat).
- **Vysoká operabilita** - je možné provádět měření na několika lokalitách v průběhu jednoho dne.

Nevýhody:

- **Časová omezenost sběru dat** – omezení na příznivé teplotní podmínky v interakci zdroj znečištění / drenážní voda – recipient (HOZ, DVT, MVN).
- **Závislost na vhodných hydrologických podmínkách** – pro uplatnění dané technologie je nutná odpovídající vydatnost jak zdroje znečištění / drenážního systému, tak je nutná přítomnost vody v recipientu.



III. Srovnání novosti postupů

V současné době se v popředí zájmu nachází témata spojená s klimatickou změnou a se zvyšující se extremitou srážkových úhrnů (dochází ke střídání období s vysokými úhrny v krátkém čase, s obdobími bez srážkových úhrnů). S takto narůstající extremitou dochází i k četnějším výskytům povodní a suchých epizod. Právě stále početnější období dlouhotrvajícího sucha se projevuje i dopady na jakostní ukazatele povrchových vod. Konstantní dotace zdrojů znečištění do hydrografické sítě zapříčiňují zvýšené koncentrace rizikových látek v povrchových vodách. Za tímto účelem je nutné hledat další efektivní nástroje pro identifikaci těchto zdrojů znečištění, aby bylo možné jejich negativní dopad na vodní prostředí včas eliminovat.

Novost řešení je založena na kombinaci metodických přístupů vycházejících z využití ověřených poznatků oboru termografie a fyzikálních principů vázaných na tepelný režim vod a odtokové charakteristiky hydrografické sítě. Na základě uvedeného je zpracován inovativní metodický postup pro sběr, analýzu a zpracování relevantních dat pro identifikaci zdroje znečištění, resp. identifikaci drenážní výusti.

V současné době je k dispozici několik alternativ, jak dospět k identifikaci zdroje znečištění povrchových vod. Dané přístupy jsou však založeny na detailních monitorovacích kampaních, které jsou časově a především finančně velice nákladné. Uvedený způsob nabízí efektivní způsob identifikace zdroje znečištění, vč. konkrétní lokalizace místa vstupu do hydrografické sítě. Pro tento účel byly dílčí metody na získání požadovaných dat sjednoceny, metodicky popsány a vytvořeny jednoduché návody, jak tato data pořizovat.

Znalost těchto nových poznatků poskytne nové možnosti, jak identifikovat kritická místa, jaká nápravná opatření učinit a především jaká preventivní opatření navrhnout, aby došlo k eliminaci identifikovaného zdroje znečištění.



IV. Popis uplatnění Certifikované metodiky

Uplatnitelnost metodiky lze předpokládat jak v komerční sféře, tak ve veřejném sektoru. V případě komerčních subjektů se jedná o podniky působící v oborech vodního hospodářství, geodzie, projekčních firem apod. U veřejného sektoru je uplatnění očekáváno především v procesu komplexních pozemkových úprav, tj. v gesci Státního pozemkového úřadu. Vyjma přímého uplatnění v procesu komplexních pozemkových úprav je deklarováno uplatnění i při výkonu dozoru nad respektováním právních předpisů v oblasti životního prostředí, tj. při výkonu činnosti České inspekce životního prostředí. V neposlední řadě lze využití definovaných metodických přístupů čekat i u správců vodních toků v působnosti Ministerstva zemědělství a ostatních subjektů, mezi které patří Ministerstvo obrany, správy Národních parků a ostatní fyzické a právnické osoby.

Vyjma uvedeného dělení (komerční x veřejná sféra) je možné uplatnitelnost klasifikovat i z pohledu přínosů, které zpracovaná metodika poskytuje. Zde je možné přínosy rozdělit na dvě samostatné oblasti.

První oblastí, kde nalezne metodika široké uplatnění, je detailně popsáný přínos pro lokalizaci zdrojů znečištění vstupujících do hydrografické sítě (bodové zdroje znečištění, plošné zdroje znečištění – drenážní výusti). V daném případě uvedená lokalizace zdroje znečištění umožní přijetí konkrétního opatření, které další dotaci znečištění do hydrografické sítě zamezí.

Druhá oblast má pozitivní dopad na evidenci systémů zemědělského odvodnění, které jsou vodními díly, resp. stavbami k vodohospodářským melioracím pozemků podle zákona č. 254/2001Sb., o vodách (Vodní zákon) i podle zákona č.183/2006 Sb. (Stavební zákon). Evidence bývalé ZVHS (Zemědělská vodohospodářská správa) existuje v podobě digitální vrstvy, která obsahuje vektorizované zákresy obvodů (polygonů) staveb zemědělského odvodnění, převážně z map 1:10 000. Přestože je tato vrstva (ČR a SR) v kontextu jiných zemí se zemědělským odvodněním unikátní, tak není přesná. Existují regionálně různé nepřesnosti o skutečné poloze a rozsahu staveb odvodnění. Míru shody reálného rozsahu a polohy staveb s vrstvou ZVHS lze pro ČR přibližně odhadnout mezi 65-85%. Některé realizované stavby v této vrstvě dokonce nejsou. Ještě větší nejistota existuje



ohledně funkčního stavu staveb podrobného odvodnění, který není plošně zjišťován.

Poruchy staveb odvodnění jsou spíše lokální, přičemž většina staveb je alespoň z části funkční, byť v době sucha často bez průtoku. Drenážní odtoky se potom vyskytují v zimním období jako reakce na vydatnější srážky. Projektová dokumentace staveb odvodnění počítá s oficiální dobou životnosti staveb 30 let. Fyzická životnost bývá však vyšší. Je velice potřebné projektovou dokumentaci staveb odvodnění uvést do digitální, a tudíž operativně použitelné podoby, ať již pro identifikaci rozsahu a stavu staveb odvodnění (i jako podkladu pro DPZ) nebo pro efektivní návrhy opatření na těchto stavbách či v jejich návaznosti.

Zpracovaná metodika cíleně reaguje na zmíněné skutečnosti. Prostřednictvím definovaných a v praxi ověřených metodických přístupů umožňuje konkrétní lokalizaci drenážních výustí na základě detekce teplotních rozdílů mezi vodou v drenáži a vodou v recipientu. Identifikace drenážní výusti zvyšuje šance na dohledání celé stavby zemědělského odvodnění, a to v kombinaci s dalšími podklady a přístupy (DPZ, zachovaná projektová dokumentace atd.).

Uvedená aplikovatelnost rozšiřuje portfolio potenciálních uživatelů i o vlastníky či uživatele zemědělské půdy, vodoprávní úřady (při hodnocení přítomnosti x nepřítomnosti staveb k vodohospodářským melioracím pozemků) a další subjekty. Z daného pohledu je vytvořen adekvátní základ pro širokou uplatnitelnost daného zpracovaného metodického přístupu v praxi.



V. Ekonomické aspekty

Vyčíslení ekonomických přínosů v daném případě není možné konkrétně kvantifikovat – přínosy ve vazbě na zlepšení jakostních ukazatelů povrchových vod, posílení biodiverzity, zvýšení pobytové funkce recipientů, pozitivní dopady na podzemní zdroje vod, identifikace drenážní výusti (stavby zemědělského odvodnění) atd.

Pro hodnocení jakosti vod a identifikaci zdroje znečištění je rozhodující jejich kvalitativní a kvantitativní monitoring, který slouží ke sledování stavu povrchových a podzemních vod. Již v minulosti byly zpracovány studie, které se věnovaly diagnostice míst ve vodních tocích či nádržích se zvýšenou teplotou a to z pohledu možného negativní dopadu na ekologickou stabilitu lokality. Doposud však nebyla cíleně sledována možná identifikace potenciálních zdrojů znečištění – drenážních výustí na základě termografického snímkování. Skutečnost, že stále není dosaženo v podmínkách ČR požadovaného stavu vodních útvarů z pohledu jakostních ukazatelů, dokládá řada autorů, přičemž zdůrazňují především nakládání s odpadními vodami a vliv plošného znečištění.

V současné době jsou vynakládány desítky milionů pro studie odtokových poměrů, studie pro návrhy efektivních opatření pro snížení znečištění vod na zemědělském půdním fondu (ZPF), atd. V daných případech je velice důležitá znalost uspořádání stavby odvodnění v terénu a především konkrétní lokalizace drenážní výusti. Prezentovaná, v terénu a praxí ověřená metodika nabízí efektivní způsob, jak zdroj znečištění či drenážní výust' v terénu lokalizovat a poskytnout tak adekvátní podklad pro cílené opatření, které přispěje jak z pohledu zadržení vody v krajině, tak k eliminaci vstupu znečištění do hydrografické sítě.

Obdobný stav je i v případě staveb zemědělského odvodnění. V současné době klimatických změn jsou často zmiňovány funkce staveb odvodnění a to ať již v negativním či pozitivním smyslu. V případě sucha mají stavby odvodnění vysoký potenciál při aplikaci tzv. regulační drenáže. V současné době však nejsou k dispozici ucelené podklady pro jednotlivé stavby odvodnění, natož aby byla k dispozici ucelená databáze drenážních výustí pro sledování vlivu drenážních vod na jakostní ukazatele navazující hydrografické sítě.



Ekonomické aspekty byly vyčísleny ve dvou kategoriích v závislosti na testovaných metodách. První kategorií jsou vyčíslené pořizovací náklady vybavení umožňující měření zvolenou termografickou metodou. Druhou kategorií jsou vyčíslené náklady na realizaci termografického snímkování. Ekonomické zhodnocení je stanovené jako průměrné na základě zkušeností odborníků a s přihlédnutím ke znalosti místních podmínek.

A. Pořizovací náklady testovaných termografických metod

Ceny na pořízení vybavení jsou orientační a mohou se lišit v závislosti na technologickém vybavení daných aparatur.

Pozemní metody – statické a dynamické (ruční měření)

- Ruční termokamera do: 50 000,- Kč
- Vstupní náklady:** **50 000,- Kč**

Termografické snímkování bezpilotními letouny

- Bepilotní letoun: 350 000,- Kč
- Termokamera: 350 000,- Kč
- Vstupní náklady:** **700 000,- Kč**

Letecké termografické snímkování

- nosný letoun – pilotovaný: 12,0 mil. Kč
- GNSS/IMU jednotka pro použití v letadle: 4,0 mil. Kč
- termokamera: 25,0 mil. Kč
- sady specializovaných PC a SW:
 - o SW (+ PC) pro preprocessing dat: 1,0 mil. Kč
 - o SW pro zpracování a úpravu dat: 0,5 mil. Kč
 - o Další PC a obslužný software: 0,1 mil. Kč
- Vstupní náklady:** **42,6 mil. Kč**



B. Náklady na realizaci termografického snímkování

Stanovení nákladů na realizaci termografického snímkování bylo provedeno s ohledem na základní časovou měřicí jednotku (1 den). Pro jednotlivé metody byly stanoveny ceny na den měření, ceny za zaměření jednoho km říčního toku. Nejlépe vypovídající hodnotou o cenách termografického snímkování za předmětným účelem jsou stanovené náklady na jeden den měření, ze kterého byly následně generovány ceny za zaměření 1 km říčního toku.

Pozemní metody – statické a dynamické (ruční měření)

- velikost zaměřeného území za 1 den: < 10 km toku
- doba zpracování a klasifikace dat: < 2 dny
- cena zpracování a klasifikace dat: 8 000,- Kč/den
- personální zabezpečení měření: 2 osoby
- náklady na osobu personálního zabezpečení měření: 5 000,- Kč/den
- náklady na technické zabezpečení: 2 000,- Kč/den

- náklady na den měření metodou: **28 000,- Kč**
- náklady na zaměření 1 km říčního toku: **2 800,- Kč**

Termografické snímkování bezpilotními letouny

- velikost zaměřeného území za 1 den: < 20 km toku
- doba zpracování a klasifikace dat: < 2 dny
- cena zpracování a klasifikace dat: 8 000,- Kč/den
- personální zabezpečení měření: 2 osoby
- náklady na osobu personálního zabezpečení měření: 5 000,- Kč/den
- náklady na technické zabezpečení: 30 000,- Kč/den

- náklady na den měření metodou: **56 000,- Kč**
- náklady na zaměření 1 km říčního toku: **5 600,- Kč**

Letecké termografické snímkování



-
- velikost zaměřeného území za 1 den: < 200 km toků
 - doba zpracování a klasifikace dat: < 10 dnů
 - cena zpracování a klasifikace dat: 45 000,- Kč/den
 - personální zabezpečení měření: 5 osob
 - náklady na osobu personálního zabezpečení měření: 12 000 Kč/den
 - náklady na technické zabezpečení: 10 000,- Kč/den
-
- náklady na den termografického snímkování: **115 000,- Kč**
 - náklady na zaměření 1 km říčního toku **575,- Kč**

Pro vhodnou volbu termografické metody je určující účel, za kterým je termografické snímkování prováděno a jaká přesnost zaměření bude vyžadována. S tím úzce souvisí i následné zpracování dat.

Z prováděných kampaní vychází jako nejefektivnější přístup s největším potenciálem pro pořizování termografických dat termografické snímkování bezpilotními letouny (rozlišení, časová flexibilita, ekonomická náročnost atd.). Pro širší zavedení metody leteckého termografického snímkování do uživatelské praxe v podmínkách ČR je rozhodující především adekvátní vybavení (termokamera, letoun, SW, atd.).



VI. Závěr

Metodický přístup nabízí inovativní přístup k určení místa vyústění drenážních vod do recipientu (vodního toku, vodní nádrže či hlavního odvodňovacího zařízení).

Aplikací získaných poznatků implementovaných do certifikované metodiky bude možné efektivně lokalizovat drenážní výusti v terénu a provést jejich hodnocení z pohledu potenciálního zdroje znečištění.

Motivací zavedení moderního přístupu identifikace drenážní výusti v terénu je především snížení znečištění vod z nebudových zdrojů a zároveň zajištění udržitelného hospodaření s vodními zdroji. Metodický přístup bude poskytovat relevantní podklady o tom, kde se drenážní výusti v terénu konkrétně nachází.

Ve snaze o eliminaci zdrojů znečištění hraje jednu z hlavních rolí aplikace pokročilých technologií, ať již s ohledem na čištění vod (komunální odpadní vody, provozní vody), tak pokročilé technologie pro potřeby identifikace a určení samotného zdroje znečištění. Právě jednou z nejmodernějších technologií za účelem identifikace zdrojů znečištění je letecké termografické mapování. Infračervené záření (IR) je část elektromagnetického spektra, které lidé potkávají v každodenním životě nejvíce, i když v podstatě bez povšimnutí.

Letecká termografie má bezesporu potenciál pro širší uplatnění v uživatelské praxi, přičemž její plné možnosti ale dosud nebyly plně prozkoumány a doceněny. Použití infračervené kamery je relativně levné a flexibilní. Kameru lze snadno kdykoliv odpojit od nosiče a použít k ručnímu měření a poté jednoduše připojit zpět. Efektivita takové detekce je skutečně vysoká, letadla mohou operovat jak v poměrně vysokých výškách, tak nízko nad zemí. S tím, jak se stávají kamery dostupnější širší uživatelské skupině, je možno do zkoumání životního prostředí zapojit stále více výzkumných i nestátních organizací a jednotlivců, takže fakta předkládaná experty či ekology a podložená tímto výzkumem budou moci zákonodárci a politici jen těžko ignorovat při svém rozhodování.



Literatura

- [1] Jůva, K. (1957): Odvodňování půdy. Praha, 526 s.
- [2] Kulhavý, Z.; Doležal, F., Fučík, P., Kulhavý, F., Kvítek, T., Muzikář, R., Soukup, M., Švihla, V. (2007): Management of agricultural drainage systems in the Czech Republic. *Irrigation and Drainage*, 56, USA, s. 141 – 149, ISSN 1531-0353.
- [3] Novák, P.; Fučík P.; Kulhavý, Z.; Zajíček, A.; Pelíšek, I.; Ptáčníková, L.; Dostál, T.; Krása, J.; Bauer, M.; Pavel, M.; Rosendorf, P.; Krátký, M.; Kvítek, T. (2016): Příprava listů opatření typu A lokalit plošného zemědělského znečištění pro plány dílčích povodí. Metodický návod – identifikace kritických bodů a kategorizace lokalit ohrožených znečištěním z povrchových a podpovrchových plošných zemědělských zdrojů pro celé území České republiky v podrobnosti sloužící k tvorbě listů opatření typu A. Certifikovaná metodika. VÚMOP, v.v.i., 69 s.
- [4] Zajíček, A., Kaplická, M., Fučík, P., Peterková, J., Duffková, R., Maxová, J. (2017): Vyhodnocení podílů srážko-odtokových epizod na celkovém odnosu dusíku a fosforu z odvodněné zemědělské půdy. *Vodní hospodářství* 10(67): 1-6. ISSN 1211-0760.
- [5] Zajíček, A., Fučík, P., Kaplická, M., Maxová, J. (2017): Vyplavování pesticidních látek zemědělskou drenáží. *Rostlinolékař* 4, 24 – 28. ISSN 1211-3565
- [6] Zajíček, A., Fučík, P., Kaplická, M., Liška, M., Maxová, J. M., Dobiáš, J. (2018): Pesticide leaching by agricultural drainage in sloping, mid-textured soil conditions – the role of runoff components. *Water Science and Technology*, 77(7-8): 1879-1890. doi: 10.2166/wst.2018.068.
- [7] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000, kterou se stanoví rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky.
- [8] Informační systém VODA České republiky, Průvodce aplikacemi v gesci Ministerstva zemědělství, ISBN 978-80-7084-667-4, vydalo Ministerstvo zemědělství, Praha 2008.
- [9] Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů.
- [10] Kolektiv autorů Státního pozemkového úřadu (2016): Koncepce pozemkových úprav na období let 2016–2020. Státní pozemkový úřad – Praha.
- [11] MZe, SPÚ, VÚMOP (2020): Plán opatření pro řešení sucha prostřednictvím pozemkových úprav a adaptací hydromeliorací v horizontu 2030. online 12. 10. 2020, dostupné z http://eagri.cz/public/web/file/654543/Plan_opatreni_pro_reseni_sucha_prostrednictvim_pozemkovych_uprav_a_adaptaci_hydromelioraci_v_horizontu_2030.pdf
- [12] Marval, Š., Hejduk, T., Roub, R., Vybíral, T., Kaplická, M., Bureš, L. (2018): Využití letecké termografie jako nového přístupu pro identifikaci znečištění vod z bodových a nebodových zdrojů. *Vodní hospodářství* 9 (68):8-13. ISSN 1211-0760.
- [13] Lega, M., Napoli, R. M. A. (2010): Aerial infrared thermography in the surface waters contamination monitoring. *Desalination and Water Treatment*, 23:1-3, strana 141-151.
- [14] Lega, M., Kosmatka, J., Ferrara, C., Russo, F., Napoli, R. M. A., Persechino, G., (2012): Using Advanced Aerial Platforms and Infrared Thermography to Track Environmental Contamination. *Environmental Forensics*, 13:4, strana 332-338.



- [15] Lega, M., Ferrara, C., Persechino, G., Bishop, P. (2014): Remote sensing in environmental police investigations: aerial platforms and an innovative application of thermography to detect several illegal activities. Springer International Publishing Switzerland.
- [16] Tonolla, D., Wolter, C., Ruhtz, T. & Tockner, K. (2012) Linking fish assemblages and spatiotemporal thermal heterogeneity in a river-floodplain landscape using high-resolution airborne thermal infrared remote sensing and in-situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 125, 134–146.
- [17] Tockner, K. and Stanford, J. A. (2002). Riverine floodplains: Present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29, 308–330.
- [18] Ward, J. V. (1998). Riverine landscapes: Biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation. *Biological Conservation*, 83, 269–278.
- [19] Šimko, M., Chupáč, M. (2006): Aplikace možnosti termovízie v praxi. FCC Public 2006, [online: cit. 16-02-2017]
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/aplikacne-moznosti-termovizie-v-praxi--13327>
- [20] Ahley, S. E., Beechie, T. J., Torgersen, Ch. E., Fullerton, A. H. (2017): Envisioning, Quantifying, and Managing Thermal Regimes on River Networks. *BioScience* [online]. 2017, 67(6), 506-522 [cit. 2018-10-22]. DOI: 10.1093/biosci/bix047. ISSN 0006-3568. Dostupné z: <https://academic.oup.com/bioscience/article-lookup/doi/10.1093/biosci/bix047>
- [21] Schuety, T., Weiler, M. (2011): Quantification of localized groundwater inflow into streams using ground-based infrared thermography. *Geophysical research letters*, vol. 38.
- [22] FLUKE. Úvod do principu termografie [online]. 2016 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65_646
- [23] Handcock, R., Cherkauer, K., Gillespie, A. & Torgersen E., Ch. (2012): Thermal Infrared Remote Sensing of Water Temperature in Riverine Landscapes, in book: *Fluvial Remote Sensing for Science and Management* (strana 85-113), DOI: 10.1002/9781119940791.ch5
- [24] Kvítek, T., Krátký, M. (2018): Listy opatření typu A v Plánech dílčích povodí Vltavy - opatření ke zlepšení retence a kumulace vody v krajině společně s ochranou jakosti povrchových a podzemních vod.
- [25] Kulhavý, Z., Čmelík, M., Štibinger, J., Šripko, J. (2015): Rekonstrukce staveb odvodnění s uplatněním principu regulace drenážního odtoku, certifikovaná metodika, ISBN 978-80-87361-47-4
- [26] Fučík, P., Bystřický, V., Doležal, F., Lechner, P., Kvítek, T., Váchal, J., Žlábek, P. (2010): Posuzování vlivu odvodňovacích systémů a ochranných opatření na jakost vody v zemědělsky obhospodařovaných povodích drobných vodních toků. *Metodika*. Praha 6, VÚMOP, v.v.i., 90s., ISBN 978-80-87361-00-9.
- [27] Duffková, R.; Zajíček, A.; Fučík, P. (2014): Vyplavení dusíku a fosforu z malých zemědělských odvodňovacích povodí s aplikací různých hnojiv. *Vodní Hospodářství*, 12, 1-5



- [28] Doležal, F.; Kvítek, T. (2004): The role of recharge zones, discharge zones, springs and tile drainage systems in penplains of Central European highlands with regard to water quality generation processes. *Phys. Chem. Earth.*, 29, 775–785, DOI:10.1016/j.pce.2004.05.005.
- [29] Zajíček, A., Kvítek T., Kaplická M., Doležal F., Kulhavý Z., Bystřický V., Žlábek, P. (2011): Drainage water temperature as a basis for verifying drainage runoff composition on slopes. *Hydrological Processes*. 25, Issue:20, 3204-3215 DOI: 10.1002/hyp.8039.
- [30] Zajíček, A., Šanda, M., Tachecí, P., Kvítek, T. (2017): „Doba zdržení vody v systému půda- hornina“. in *Retence a jakost vody v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce*, Kvítek, T. (Ed.) a kol. *Povodí Vltavy, státní podnik, 1. vydání*, s. 272, ISBN: 978-80-270-2488-9.
- [31] Birkinshaw SJ, Webb B (2010) Flow pathways in the Slapton Wood catchment using temperature as a tracer. *J Hydrol* 383:269-279.doi:10.1016/j.jhydrol.2009.12.
- [32] Anderson MP (2005). Heat as a groundwater tracer. *Ground Water* 43(6): 951–968.
- [33] Zajíček A., Pomije T., Kvítek T. (2016): Event water detection in tile drainage runoff using stable isotopes and a water temperature in small agricultural catchment in Bohemian-Moravian Highlands, Czech Republic. *Environmental earth sciences*: 75:1-13. DOI 10.1007/s12665-016-5561-1.
- [34] Pelikán V. et al, (1988) *Hydrogeology measurements (In Czech.) SNTL/ALFA, Prague.*
- [35] Lacas JL (1976) *Introduction à la méthodologie d'étude et d'utilisation des champs hydrothermiques des aquifères karstiques: d'après l'exemple du site de l'exsurgence de la source du Lez (Hérault, France)*Ladouche B, Probst A, Viville D, Idir S, Baqué D, Loubet M, Probst JL, Bariac T (2001) Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *J Hydrol* 242 (3-4): 255-274.
- [36] Constantz J (1998) Interaction between stream temperature, streamflow, and groundwater exchanges in alpine streams. *Water Resour Res* 34:1609–1615.
- [37] Westhoff MC, Savenije HHG, Luxemburg WMJ, Stelling GS, van de Giesen NC, Selker JS, Pfister L, Uhlenbrook S (2007) A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations. *Hydrol Earth Sys Sci* 11:1469-1480.
- [38] Pelikán L, Herber V (2011) An application of stream thermometry in small drainage basins. *Morav Geogr Rep* 19 (3): 29-35.
- [39] Vidon P, Cuadra PE (2010) Impact of precipitation characteristics on soil hydrology in tile-drained landscapes. *Hydrol Process* 24: 1821-1833. doi: 10.1002/hyp.7627.
- [40] Doležal F, Kvítek T (2004) The role of recharge zones, discharge zones, springs and tile drainage systems in penplains of Central European highlands with regard to water quality generation processes. *Phys Chem Earth* 29 (11-12 SPEC. ISS): 775-785. doi: 10.1016/j.pce.2004.05.005
- [41] Herrmann A, Duncker D (2008) Runoff formation in a tile-drained agricultural basin of the Harz Mountain Foreland, Northern Germany. *Soil Water Res* 3 (3): 83 – 97.



-
- [42] Carlier, J.P.; Kao, C; Ginzburg, I. Field-scale modeling of subsurface tile-drained soils using an equivalent-medium approach. *Journal of Hydrology*, 2007, no. 341, p. 105–115.
- [43] Doležal et al. (2006): Posouzení vlivu preferenčního proudění v půdě na vyplavování dusičnanů v podmínkách krystalinika českých a moravských vrchovin. *Metodika Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha*, 90 s
- [44] Øyngarden, L., Kvaerner, J., Jenssen, P. D. (1997): Soil erosion via preferential flow to drainage systems in clay soils. *Geoderma* 76 (1-2), 65-86.
- [45] Ocampo, C. J.; Sivapalan, M.; Oldham, C. (2005). Hydrological connectivity of upland-riparian zones in agricultural catchment: Implications for runoff generation and nitrate transport. *Journal of Hydrology*, 331 (3-4): 643-658.
- [46] Marval, Š., Hejduk, T., Kaplická, M., Maxová, J., Vybíral, T., Vacek, M. (2018): Letecké termografické snímkování pro účely identifikace znečištění povrchových vod z bodových a nebodových zdrojů - pilotní studie Lužnice. *Specializovaná mapa s odborným obsahem*. 33 s. ISBN 978-80-87361-88-7. Číslo osvědčení 61079/2018-MZE-15122
- [47] Marval, Š., Hejduk, T., Vybíral, T., Fučík, P., Zajíček, A., Kaplická, M., Vacek, M. (2019): Identifikace drenážních výústí s využitím termografického snímkování. *Ověřená technologie*. 56 s. ISBN 978-80-88323-08-2 (tištěná verze), 978-80-88323-09-9 (online pdf).
- [48] Trizna, M. (2004): *Klimageografie a hydrogeografie*, 1. vydání. Bratislava: Geografika, 2004. 154 s.



Seznam publikací, které předcházely zpracování certifikované metodiky

V průběhu řešení, které předcházelo dosažení certifikované metodiky, byla pozornost soustředěna na dosažení odborných publikací. Cílem publikování dílčích výsledků bylo získání zpětné vazby odborné veřejnosti k prezentovaným dílčím poznatkům. Provedená odborná diskuse v rámci recenzního řízení přispívá nejen ke kvalitě samotného publikačního výstupu, ale rovněž k samotnému směřování prováděnému výzkumu a především možné využitelnosti získaných poznatků v praxi.

V průběhu dosavadního řešení (2017 – 2020) tak byly dosaženy následující publikace a výsledky aplikovaného výzkumu:

Postery

MARVAL, Š., HEJDUK, T., VYBÍRAL, T., ROUB, R. (2018): Letecké termografické snímkování pro účely identifikace znečištění povrchových vod, Konference GIS Esri 2018

Příspěvky ve sborníku

MARVAL, Š. (2018): Termografické snímkování říčních ekosystémů. Sborník z odborné konference Hydrologie, GIS a životní prostředí, konané 11.-12. 6. 2018 v Kubově Huti, s. 23. ISBN 978-80-01-06432-0

MARVAL Š., HEJDUK T., HRADILEK V., VEVERKA M., FUČÍK P., ROUB R., ZAJÍČEK A., VYBÍRAL T. (2019): Thermographic imaging of water bodies to identify pollution. Poster na konferenci 5th International Congress Water, Waste and Energy Management, 22 – 24 July 2019 Paris, France.

Odborné články

NOVÁK, P., ROUB, R., VYBÍRAL, T., MARVAL, Š., HEJDUK, T., BUREŠ, L. (2017): Letecké batymetrické laserové skenování. Geodetický a kartografický obzor, 63/105(10):197-209. ISSN 1805-7446



MARVAL, Š., HEJDUK, T., ROUB, R., VYBÍRAL, T., KAPLICKÁ, M., BUREŠ, L. (2018): Využití letecké termografie jako nového přístupu pro identifikaci znečištění vod z bodových a nebodových zdrojů. Vodní hospodářství 68(9): 8-13. ISSN 1211-0760.

MARVAL, Š., HEJDUK, T., ZAJÍČEK, A., VYBÍRAL, T., FUČÍK, P., ROUB, R., KAPLICKÁ, M. (2019): Využití termografie jako nového přístupu pro identifikaci znečištění vod z bodových zdrojů – pozemní termografické snímkování. Vodní hospodářství 69(6): 8-13. ISSN 1211-0760.

Specializována mapa s odborným obsahem

MARVAL, Š., HEJDUK, T., KAPLICKÁ, M., MAXOVÁ, J., VYBÍRAL, T., VACEK, M. (2018): Letecké termografické snímkování pro účely identifikace znečištění povrchových vod z bodových a nebodových zdrojů - pilotní studie Lužnice. Specializovaná mapa s odborným obsahem. 33 s. ISBN 978-80-87361-88-7. Číslo osvědčení 61079/2018-MZE-15122

Software

MARVAL, Š., HEJDUK, T., VYBÍRAL, T., FUČÍK, P., ZAJÍČEK, A., KAPLICKÁ, M., VACEK, M. (2019): TermoSoft. Software. www.georeal.cz. VÚMOP, v.v.i., GEOREAL spol. s r.o.

Odborné semináře

HEJDUK T., MARVAL Š. (2018): Seminář/Workshop Aplikace letecké termografie ve vodním hospodářství. 14. 11. 2018 Obec Dehtáře. Projekt TH02030396

HEJDUK T., MARVAL Š. (2019): Seminář/Workshop Aplikace letecké termografie ve vodním hospodářství. 13. 11. 2019 Obec Dehtáře. Projekt TH02030396

**Ověřená technologie**

MARVAL, Š., HEJDUK, T., VYBÍRAL, T., FUČÍK, P., ZAJÍČEK, A., KAPLICKÁ, M., VACEK, M. (2019): Identifikace drenážních výustí s využitím termografického snímkování. Ověřená technologie. 56 s. ISBN 978-80-88323-08-2 (tištěná verze), 978-80-88323-09-9 (online pdf).



Dedikace

Certifikovaná metodika vznikla za finanční podpory TAČR - Technologické agentury ČR, programu EPSILON a jako plánovaný výstup projektu č. TH02030396 „Využití letecké termografie jako nového přístupu pro identifikaci znečištění vod z bodových a nebodových zdrojů“.

Jména oponentů

Odborník z daného oboru:

Ing. Irena Šupíková, Ph.D.

ředitelka

Úsek Věda a výzkum

telefon +420 604 221 888

supikova@aquatest.cz

AQUATEST a.s.

Geologická 988/4, 152 00 Praha – Hlubočepy

www.aquatest.cz

Odborník ze státní správy:

Ing. Marek Batysta, Ph.D.

Ministerstvo zemědělství ČR

Odbor zemědělských registrů

Těšnov 65/17, 110 00 Praha 1

Tel.: +420 221 812 687

E-mail: marek.batysta@mze.cz

www.eagri.cz



Kontakty na osoby předkladatele certifikované metodiky**Ing. Štěpán Marval**

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.

Žabovřeská 250

156 27 Praha 5 – Zbraslav

Mobil: + 420 724 396 312

marval.stepan@vumop.cz

www.vumop.cz

Prohlášení předkladatele certifikované metodiky

Předkladatel prohlašuje, že zpracovaná certifikovaná metodika nezasahuje do práv jiných osob z průmyslového nebo jiného duševního vlastnictví. Ze strany zpracovatele (v zastoupení Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy, v.v.i.) byla uzavřena smlouva o využití výsledku (typu NmetC – certifikovaná metodika) s konkrétním uživatelem z komerční sféry v podobě subjektu PRIMIS spol. s r. o., Slavíčková 827/1a, 638 00 Brno, Česká republika, IČO: 02402718, DIČ: CZ02402718.

Citace

Marval, Š., Hejduk, T., Vybíral, T., Zajíček, A., Fučík, P., Vacek, M., Hübsch, L., Sítková, V., Mikuláš, P. (2020): Termografické snímkování pro účely identifikace drenážních výustí a znečištění povrchových vod. Certifikovaná metodika. 74 s. ISBN 978-80-88323-28-0 (tištěná verze), 978-80-88323-29-7 (online pdf), osvědčení č. 1/2021-SPU/O.

Summary

This Certified Technology introduces Thermography as new and useful tool for drainage outlets identification. Precise knowledge about tiles and outlets placement is crucial for designing proper measures for mitigation the negative effect of drainage systems (drainage biofilters, constructed wetlands, pools placed on outlets). Another benefit of this technology is the possibility to recognise discrepancies between digital data of drainage systems and their real placement.

T A Č R

Technologická
agentura
České republiky

Název	Termografické snímkování pro účely identifikace drenážních výústí a znečištění povrchových vod
Autoři	Ing. Štěpán Marval, Ing. Tomáš Hejduk, Ph.D., Ing. Tomáš Vybíral, Ph.D., Mgr. Antonín Zajíček, Ph.D., Ing. Petr Fučík, Ph.D., Ing. Martin Vacek, Ing. Luboš Hübsch, Ing. Veronika Sítková, Ing. Petr Mikuláš
Vydal	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
Vydání	První vydání, 2020
Počet stran	74
Náklad	50
Tisk	Rhodos spol. s r.o., Vyšehradská 51, 128 00 Praha 2
Distribuce	Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. Žabovřeská 250, 156 27, Praha 5
ISBN	Tištěné: 978-80-88323-28-0 PDF: 978-80-88323-29-7