

PREVENCE VZNIKU A ŠÍŘENÍ  
**PŘÍRODNÍCH POŽÁRŮ**  
V BEZPROSTŘEDNÍM OKOLÍ  
POVRCHOVÝCH ZDROJŮ

 **PITNÉ VODY** 

VČETNĚ METOD PRO ODHAD DŮSLEDKŮ  
PŘÍPADNÉHO VÝSKYTU

METODIKA



# **Prevence vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody (včetně metod pro odhad důsledků případného výskytu)**

Certifikovaná metodika

**Název projektu:**

Vyhodnocení rizika a návrh opatření pro prevenci vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody včetně zohlednění důsledků změny klimatu.

**Číslo projektu:** VH20202021053

**Koordinátor projektu:**

Prof. Mgr. Ing. Miroslav Trnka, Ph.D., Ústav výzkumu globální změny AV, v.v.i

**Poskytovatel:** Ministerstvo vnitra ČR

**Projektový tým:**

Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.,  
Český hydrometeorologický ústav  
IFER – Ústav pro výzkum lesních ekosystémů, s.r.o.  
Výzkumný ústav vodohospodářský TGM, v.v.i.  
Česká zemědělská univerzita v Praze

**Zpracovali:**

RNDr. Jana Beranová, koordinující autor, IFER – Ústav pro výzkum lesních ekosystémů, s.r.o.

doc. Ing. Petr Čermák, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně, Ústav výzkumu globální změny AV, v.v.i

Ing. et Ing. Jan Albert, IFER – Ústav pro výzkum lesních ekosystémů, s.r.o.

doc. Ing. Emil Cienciala, Ph.D., IFER – Ústav pro výzkum lesních ekosystémů, s.r.o.

Ing. Lucie Kudláčková, Ph.D., Ústav výzkumu globální změny AV, v.v.i

doc. Ing. Michal Kuráž, Ph.D., Česká zemědělská univerzita v Praze

Ing. Magdaléna Nesládková, Výzkumný ústav vodohospodářský, v.v.i.

Ing. Jan Novotný, Ph.D., Ústav výzkumu globální změny AV, v.v.i

Ing. Luděk Strouhal, Ph.D., Výzkumný ústav vodohospodářský, v.v.i.

Ing. Adam Vizina, Ph.D., Výzkumný ústav vodohospodářský, v.v.i.

Ing. Vladimír Zatloukal, IFER – Ústav pro výzkum lesních ekosystémů, s.r.o.

doc. Ing. Evžen Zeman, CSc., Ústav výzkumu globální změny AV, v.v.i

**Recenzenti:**

doc. Ing. Radek Pokorný, Ph.D. Mendelova univerzita v Brně

doc. Ing. Tomáš Dostál, DSc., české vysoké učení technické

Ing. Valéria Longauerová, Ph.D. Národní lesnické centrum Zvolen

Doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D., Technická univerzita v Liberci

**Schváleno k použití Ministerstvem životního prostředí ČR.**

**Osvědčení č.j. MZP/2021/020/709**

ISBN: 978-80-87902-33-2

## Obsah

1. Úvod do problematiky.....	4
2. Cíle, zaměření a uplatnění metodiky.....	5
3. Návaznost na předcházející výzkum.....	7
4. Prevence vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody včetně metod pro odhad důsledků případného výskytu na kvalitu vody.....	8
4.1. Vymezení území a tvorba mapy rizik přírodních požárů v okolí nádrží.....	9
4.1.1. Vstupní data pro tvorbu mapy požárního rizika.....	11
Pilotní studie: Vstupní vrstvy z leteckého snímkování pro okolí nádrže Švihov.....	12
4.1.2. Vytvoření aktuální mapy rizika vzniku přírodních požárů v lesních porostech.....	13
4.1.3. Vytvoření mapy požárního rizika zohledňující změny klimatu.....	14
Pilotní studie: Hodnocení požárního rizika lesních porostů v okolí nádrže Švihov pro aktuální podmínky a pro výhledový stav.....	15
4.2. Stanovení rizika šíření požárů modelem FlamMap.....	16
Pilotní studie: Příprava vstupů do programu FlamMap.....	17
4.2.1. Vymezení rizikových oblastí vzniku a šíření přírodních požárů.....	20
Pilotní studie: Příprava vstupů do programu FlamMap a citlivost programu k nastavení.....	23
4.2.2. Predikce palivových modelů pro lesní stanoviště.....	25
Pilotní studie: Simulace požární situace při změnu klimatu.....	27
4.3. Stanovení rizika sekundárního znečištění nádrží v důsledku změny odtokových poměrů po přírodním požáru.....	29
4.3.1. Změna odtokových poměrů a stanovení rizika (obecný úvod).....	29
4.3.2. Modelování toku látek rozpuštěných v suspenzi voda-popel.....	31
Pilotní studie: Modelování transportu popela na vybrané oblasti povodí.....	32
4.3.3. Erozní riziko a jeho odhady.....	37
Pilotní studie – kvantifikace erozního vnosu do nádrže Švihov.....	38
4.3.4. Modelování dopadů lesního požáru a následné eroze na jakost vody ve vodní nádrži.....	39
Pilotní studie – stavba modelu znečištění pro Sedlickou zátoku nádrže Švihov.....	41
4.3.5. Vliv eroze na kvalitu vody ve vodárenských nádržích.....	43
4.4. Preventivní a operativní opatření pro prevenci vzniku a šíření přírodních požárů a zajištění jakosti pitné vody získávané z vodních zdrojů ovlivněných lesních požárem.....	44
4.4.1. Lesnická protipožární opatření.....	44
4.4.2. Vodohospodářská protipožární a protierozní opatření.....	53
5. Seznam použité literatury.....	60
6. Příloha 1 - Postupové kroky metodického postupu s uvedením vstupních dat a dílčích výstupů.....	63
7. Příloha 2 - Matematický popis modelu transportu.....	64
8. Příloha 3 - Matematický popis hydrodynamického modelu.....	68

# 1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Česká republika tradičně nepatří mezi země, pro které by byl výskyt lesních požárů typický. Změny klimatu pozorované v posledních letech však vedou ke zvýšení pravděpodobnosti výskytu a délky trvání tzv. požárního počasí – tedy meteorologických a hydrologických podmínek, pro které je pravděpodobnost vzniku požárů lesních a zemědělských porostů vysoká (Trnka a kol., 2020a). To se prokazuje i na počtu výskytu lesních požárů v posledních letech. Z dat Hasičského záchranného sboru vyplývá, že v letech 2013–2020 vzrostl počet výjezdů k lesním požárům o více než 50 % (průměrný počet lesních požárů v letech 1995–2012 byl 921 ročně, zatímco v letech 2013–2020 to bylo 1411 ročně). Období 2013–2020 je zároveň považováno za jedno z nejzávažnějších období hydrologického sucha v historii pozorování průtoků v povodí Labe (Kašpárek a Kožíň, 2021).

S rostoucím rizikem lesních požárů je nutné uvážit, do jaké míry požáry ohrožují ekosystémové služby, které lesní společenstva poskytují. Do těchto služeb spadá i hydricko-vodohospodářská funkce lesa, tedy tvorba vodních zdrojů v půdě, ochrana jakosti vody, tvorba bezškodného odtoku a další (např. Vyskot a kol., 2016). Řada významných vodních zdrojů v ČR (např. vodárenské nádrže Josefův důl, Souš, Vír, Přísečnice, Fláje, Šance, Chřibská a další) se nachází v povodích s významným podílem lesních ploch. V souvislosti s rostoucí pravděpodobností výskytu lesních požárů v České republice je tedy na místě uvažovat také o potenciálních dopadech lesních požárů na jakost a množství dostupné surové vody upravované na vodu pitnou pro zásobování obyvatelstva.

## 2. CÍLE, ZAMĚŘENÍ A UPLATNĚNÍ METODIKY

Cílem metodiky je vytvoření pragmatického postupu hodnocení rizik vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody. V metodice jsou navrženy metody pro odhad důsledků výskytu přírodních požárů na jakost povrchové vody, prognózu změny rizika výskytu požárů v důsledku klimatických změn a postup stanovení rizika sekundárního znečištění nádrží v důsledku změny odtokových poměrů po přírodním požáru. Na tomto základě metodika navrhuje a diverzifikuje preventivní a operativní opatření.

Efektivita preventivních opatření se ve značné míře odvíjí od jejich vhodné diferenciaci a dislokace. Mapy rizik přírodních požárů (kapitola 4.1.) jsou relevantním potřebným podkladem pro nastavení preventivních opatření, například režimu hlídkové služby, určení naléhavosti a umístění lesnických a vodohospodářských opatření či stanovení území s omezením některých rizikových aktivit. Pro detailnější specifikaci některých opatření lze efektivně využít modely, které umožňují stanovit riziko šíření požárů, simulovat jejich šíření v konkrétních nejvíce ohrožených lokalitách – takovým modelem je například FlamMap (kapitola 4.2.). Řada preventivních opatření má dlouhodobý charakter či ekonomicky i provozně náročnou realizaci – pro stanovení jejich potřebnosti a umístění je proto potřebné vycházet nejen z aktuálního stavu, ale také ze střednědobé či dlouhodobé predikce změny požárního rizika. Jedním z nejzávažnějších důvodů změn míry požárního rizika a jeho dislokace v zájmovém území je klimatická změna. Přepokládaný vývoj požárního rizika podle modelů změny klimatu a konkrétních lokálních podmínek a požadavků (kapitola 4.2.2.) je tak strategickým podkladem pro plánování protipožární prevence.

Přestože budou navržena a aplikována preventivní protipožární opatření, je stále pravděpodobné, že k lesním požárům docházet bude. Proto je potřeba získat představu o potenciálních dopadech lesního požáru na jakost povrchových vod dotčeného vodního zdroje a následně i na jakost odebírané surové vody, která je určena pro úpravu na vodu pitnou. Tyto výsledky je pak možno srovnávat s možnostmi dostupné technologie na úpravách vody nebo s požadavky na jakost surové vody dané v příloze č. 13 vyhlášky č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích). V metodice jsou uvedeny přístupy, které vedou k vyhodnocení nejhoršího možného scénáře dopadů požáru na jakost povrchových vod (kapitola 4.3). Relevantní adaptační a mitigační opatření se prolínají s opatřeními úžeji zaměřenými na snížení požárního rizika a následných škod. Návrh lesnických opatření v této metodice (kapitola 4.4.1) vychází z datových podkladů získaných metodami dálkového průzkumu Země, z odvození kategorizace rizika vzniku přírodních požárů pro různé typy vegetačního pokryvu a z využití modelových nástrojů, které umožňují predikovat šíření požárů v podmínkách změny klimatu a s tím související změny vegetačního pokryvu, a také odhadovat důsledky smyvu a eroze na kvalitu vody v nádržích včetně dynamiky pohybu znečištění v nádrži.

Katalog lesnických opatření vychází z kategorizace známých opatření a postupů hospodaření, ze současných doporučení a omezení vyplývajících z legislativy, vymezených ochranných pásem vodních zdrojů, kategorizace lesa a z ní vyplývajících rámcových hospodářských doporučení vymezených v rámci OPRL. Vyhodnocení připravenosti a existujících plánů opatření pro zvládnutí důsledků přírodního požáru v okolí vodního zdroje bylo výstupem projektu v roce 2020.<sup>1</sup> Opatření zahrnují jak biotechnická opatření, tak opatření technická spojená do logických celků.

---

<sup>1</sup> „Vyhodnocení rizika a návrh opatření pro prevenci vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody včetně zohlednění důsledků změny klimatu“, VH 20202021053, dále v textu projekt.

Katalog vodohospodářských opatření zahrnuje opatření a postupy, které se ukazují jako potřebné pro zvýšení prevence vzniku lesního požáru a ochranu jakosti povrchové vody v povodí s vysokým rizikem lesního požáru nebo i v případě již proběhlé požární události. Opatření byla navržena v návaznosti na výsledky modelování na pilotní lokalitě Hadce v blízkosti nádrže Švihov (Sedlická zátoka) a rovněž v návaznosti na zkušenosti s nepříznivými dopady rozsáhlého odlesnění na jakost vody v nádržích Vranov a Vír.



### 3. NÁVAZNOST NA PŘEDCHÁZEJÍCÍ VÝZKUM

Předkládaná metodika přímo navazuje na již certifikovaný metodický postup „Doporučená adaptační a mitigační opatření v rizikových oblastech výskytu přírodních požárů s přihlédnutím k měnícímu se klimatu“ (Věstník MŽP č. 4/2022, dále v textu Metodika I), ve které jsou zformulována odstupňovaná adaptační a mitigační opatření ke zmírnění požárního rizika a šíření požáru v krajině (les a zemědělská půda). Zároveň s tím metodika zahrnuje postup variantní kvantifikace/posouzení požárního rizika podle datových možností uživatele.

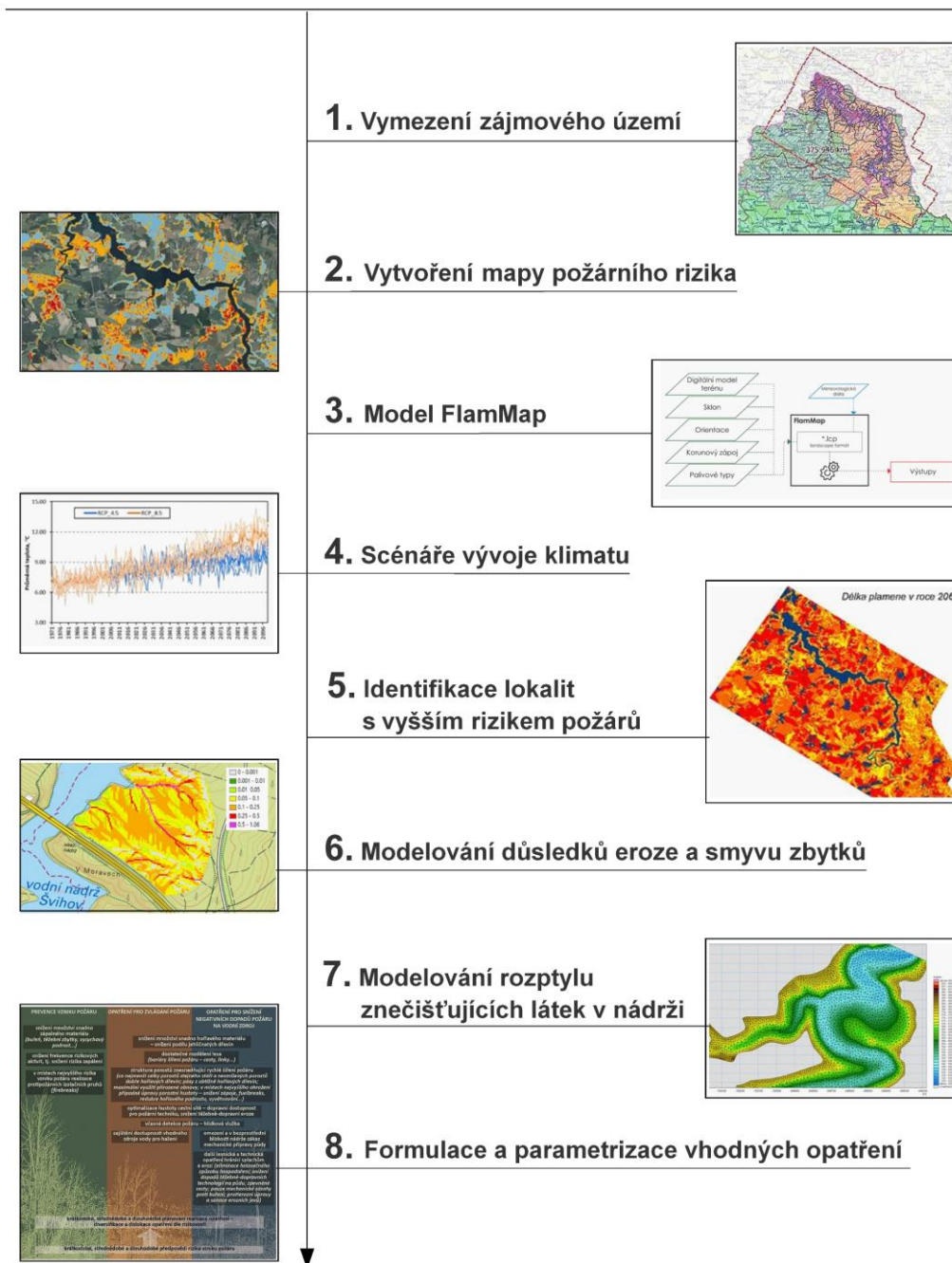
Algoritmizace požárního rizika v lesích vychází z lesnické typologie k posouzení stanoviště, a přidává charakteristiky lesní vegetace. Na zemědělské půdě pak agronomické faktory zahrnují druh plodiny, souvislost pokryvu, vlastnosti stanoviště a vodní režim. Pro obě územní kategorie jsou uvedeny předpokládané dopady změny klimatu na požární riziko stanoviště ve střednědobém horizontu (k roku 2050). Uveden je rovněž postup hodnocení prostorového kontextu krajinného pokryvu. Metodika zároveň na příkladové studii demonstruje možnosti uplatnění modelového nástroje FlamMap k analýze požárních charakteristik.

Předkládaná metodika rozpracovává výše uvedené postupy pro konkrétní situace – okolí nádrží na pitnou vodu, která jsou obvykle zalesněná a u kterých důsledky případného požáru mohou mít dopad na kvalitu vody v těchto nádržích. Metodika v tomto směru zahrnuje také výsledky výzkumné činnosti v oblasti transportu hnojiv na zemědělsky využívaných plochách (Kuráž a kol., 2020).

Citace výše zmíněných projektů a jejich výstupů jsou zvýrazněny v seznamu použité literatury.

# 4. PREVENCE VZNIKU A ŠÍŘENÍ PŘÍRODNÍCH POŽÁRŮ V BEZPROSTŘEDNÍM OKOLÍ POVRCHOVÝCH ZDROJŮ PITNÉ VODY VČETNĚ METOD PRO ODHAD DŮSLEDKŮ PŘÍPADNÉHO VÝSKYTU NA KVALITU VODY

## POSTUPOVÉ KROKY STANOVENÍ RIZIK A PREVENCE POŽÁRŮ



Obr. 1. Schéma metodického postupu ke stanovení rizik a prevence požárů.

Metodický postup zahrnuje několik postupových kroků, kterým předchází vymezení zájmového území a shromáždění souboru potřebných datových vstupů. Následuje vytvoření mapy rizika přírodních požárů v okolí nádrží na základě dat DPZ a dostupných informací o terénu a krajinném pokryvu (kapitola 4.1). Mapu lze využít pro modelování šíření požárů (kapitola 4.2.) v současnosti i při předpokládaném vývoji klimatu (kapitola 4.2.2). V důsledku vzniku požárů je třeba počítat se změnou odtokových poměrů (kapitola 4.3.). Riziková místa je možné identifikovat a odhadnout na nich množství zbytků po požáru ad. Metodický postup doplňují modelové nástroje vhodné pro odhad důsledků smyvu a eroze na kvalitu vody v nádržích včetně dynamiky pohybu znečištění v nádrži (4.3). Shromáždění dat, modelování a interpretace výsledků pak umožňuje formulovat a parametrizovat vhodná technická a biotechnická opatření pro prevenci vzniku a šíření přírodních požárů a pro prevenci znečištění vody v nádržích v důsledku požáru (4.4).

Předkládaný metodický postup byl dříve prakticky ověřen v rámci řešení projektu „Vyhodnocení rizika a návrh opatření pro prevenci vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody včetně zohlednění důsledků změny klimatu“, VH 20202021053, který byl realizován v letech 2020-2021. Výzkumný tým projektu otestoval na třech vodohospodářsky významných nádržích (Švihov, Vranov, Vír) přípravu vstupních vrstev, parametry modelových nástrojů a potenciál jejich využití. Závěrečnou syntézou všech získaných poznatků je formulace a kategorizace adekvátních preventivních opatření.

#### 4.1. Vymezení území a tvorba mapy rizik přírodních požárů v okolí nádrží

##### **KLÍČOVÁ SLOVA:**

*vymezení zájmového území, shromáždění vstupních dat, odvození mapy požární rizika v lesních porostech pro aktuální situaci, odvození požárního rizika zohledňující vývoj klimatu do roku 2050*

Tvorba mapy rizika přírodních požárů pro konkrétní území je východiskem pro formulaci konkrétních preventivních opatření omezujících negativní vliv požárů a jeho důsledky v konkrétních podmínkách. Postupové kroky nutné k tvorbě mapy jsou v následujícím textu rozděleny s ohledem na jejich časovou návaznost.

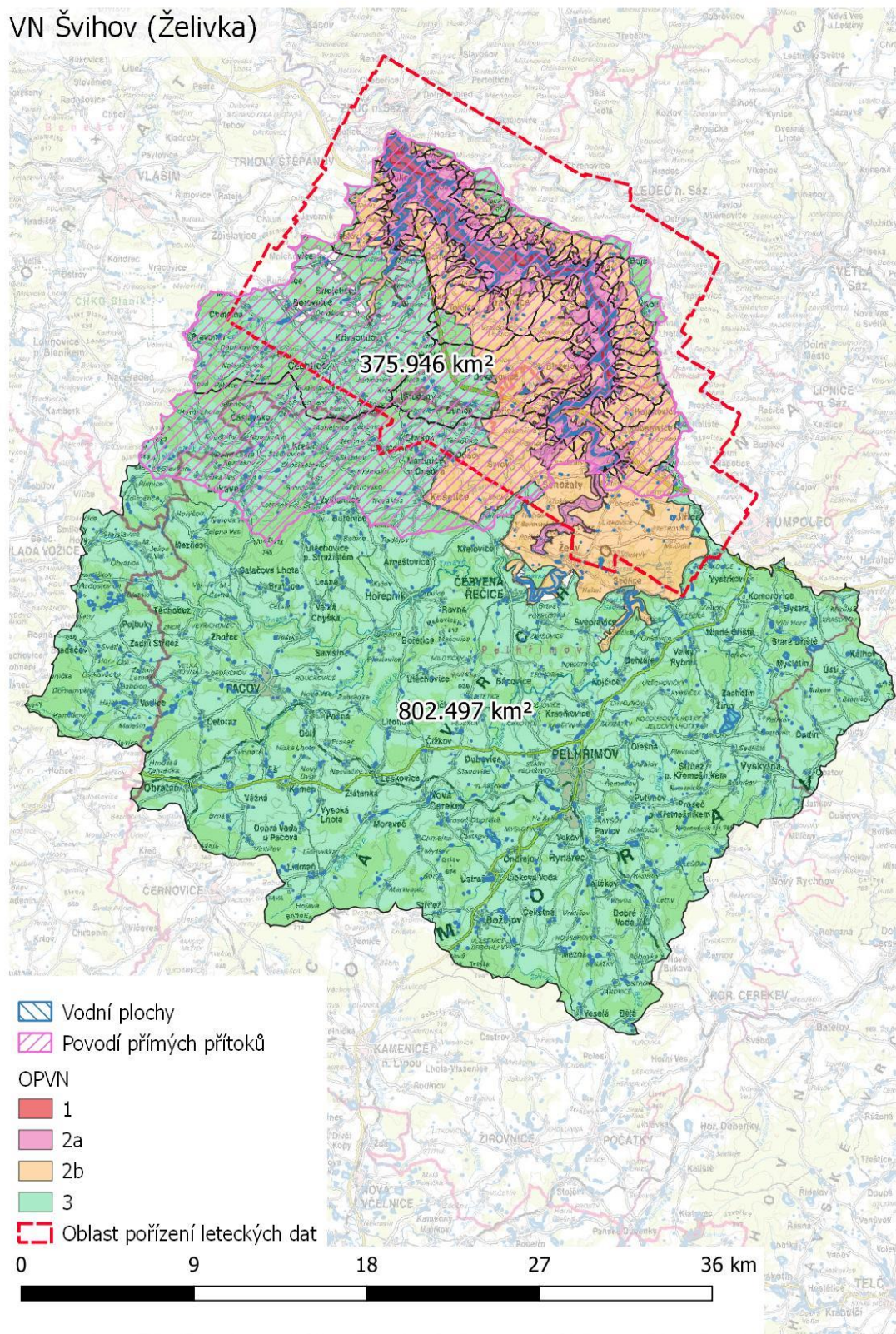
Zásadním východiskem pro tvorbu mapy rizika vzniku přírodních požárů v okolí vodárenských nádrží je vymezení zájmového území. S ohledem na to, že v České republice nehrozí šíření požárů na vzdálenost desítek kilometrů, není třeba reflektovat celé povodí nádrže, ale stačí vymezit bezprostřední okolí nádrže, a to s ohledem na konfiguraci území a rozmístění přítoků do nádrže, případně rozmístění ochranných sedimentačních nádrží.

Vymezení zájmového území v okolí vodárenské nádrže (VH) Švihov v kontextu celého povodí je zobrazeno na Obr. 2.

Pro vymezené území je pak nezbytné připravit vstupní údaje, které umožní vytvořit souvislé mapové zobrazení požárního rizika v lesních porostech a odvození palivových modelů.



## VN Švihov (Želivka)



**Obr. 2.** Příklad vymezení území pro tvorbu mapy rizika přírodních požárů. Zobrazena rozloha povodí přímých přítoků do nádrže a celkové povodí závěrného profilu hráze VN Švihov společně se stupni ochranných pásem vodních nádrží.



#### 4.1.1. Vstupní data pro tvorbu mapy požárního rizika

Pro odvození mapy požárního rizika a modelování důsledků požárů na kvalitu vody je nutné znát aktuální stav lesních ekosystémů a detailní topografii zájmového území, což vyžaduje letecké snímkování vymezeného území laserovým skenerem a hyperspektrálním senzorem. Pro nasnímání kvalitních hyperspektrálních dat je nutná zejména nepřítomnost oblačnosti v celém profilu atmosféry nad zájmovým územím, kvalitu dat z laserového skeneru ovlivňuje pouze oblačnost pod úrovní letové hladiny.

Vstupy z leteckého snímkování umožní vygenerovat tyto vstupní vrstvy (Obr. 3 a Obr. 4):

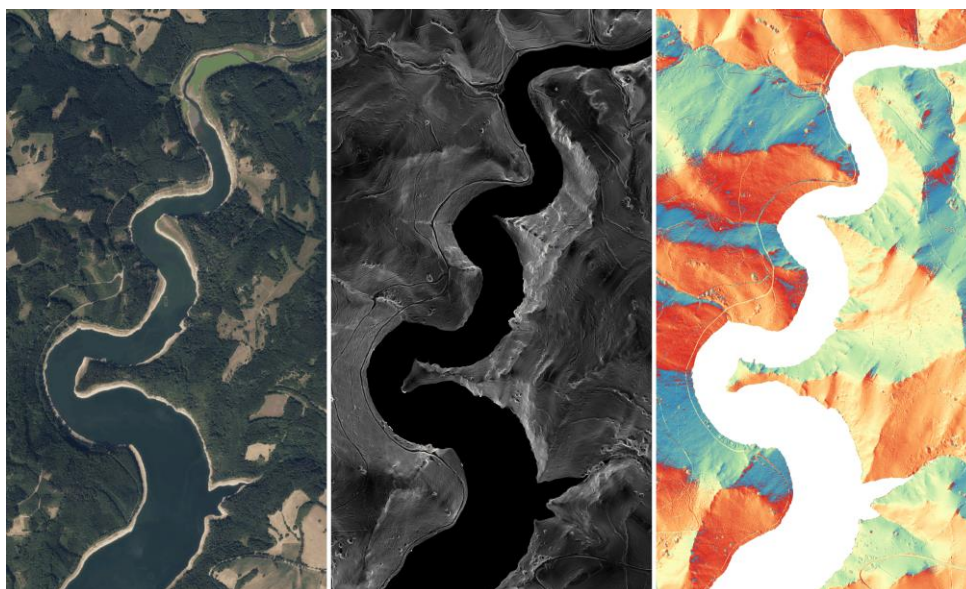
**Digitální model reliéfu holého terénu (DTM)** popisuje nadmořskou výšku v zájmovém území. Počítá se triangulací bodů mračna zařazených jako terén a následnou rasterizací do pravidelné sítě, v našem případě v rozlišení 1 metr. Z DTM jsou odvozeny další veličiny – svažitost a orientace svahů ke světovým stranám (Obr. 3).

**Mapa výšek (nDSM)** popisuje výšku objektů v zájmovém území (Obr. 4). Počítá se triangulací z tzv. prvních odrazů, jejichž třetí souřadnice je naplněna hodnotou výšky nad terénem (DTM).

**Mapa pokryvu (canopy cover)** popisuje míru zakrytí holého terénu dalšími strukturami (les a další). V kruhovém okolí o ploše 500 m<sup>2</sup> je vypočítán podíl prvních odrazů ve výšce nad výčetní výškou (1.3 m) mezi všemi prvními odrazy. Hodnoty se tak pohybují mezi 0 a 1, kde 1 znamená 100% pokrytí lesem (Obr. 4).

**Kategorizace růstové fáze** lesa<sup>2</sup> byla provedena dle definice Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL) a realizována v softwaru eCognition<sup>3</sup> postupem objektivě orientované klasifikace nad vstupní vrstvou mapy výšek.

**Doplňková klasifikace bodového mračna** třídí body s nenulovou výškou nad terénem na budovy, vyšší vegetaci (stromy) a neklasifikované. Algoritmus nástroje lascanopy<sup>4</sup> vychází z prokládání rovin do okolí každého bodu.

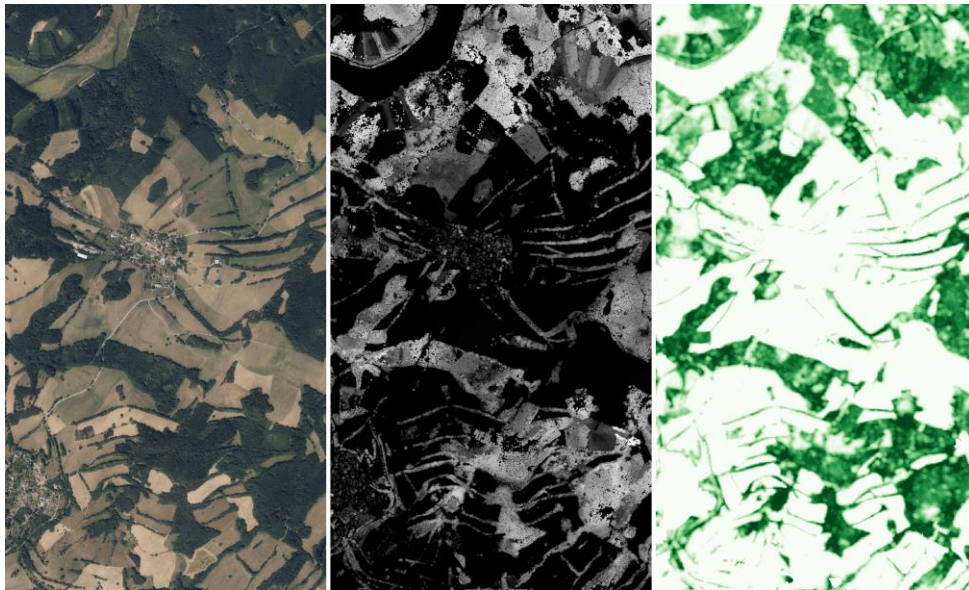


Obr. 3. (zleva): a) ortofoto části přehrady Vír (otočeno severem vpravo);  
b) sklon svahů odvozený z modelu terénu; c) orientace svahů ke světovým stranám.

<sup>2</sup> <http://www.uhul.cz/kdo-jsme/aktuality/703-rustove-faze-lesa-nova-mapova-prezentace>

<sup>3</sup> <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/ecognition>

<sup>4</sup> <https://rapidlasso.com/lastools/>



**Obr. 4.** (zleva): a) ortofoto okolí přehrady Vír (otočeno severem vpravo); b) model nDSM mapující výšky objektů nad terénem (nejen lesa); c) veličina korunový zápoj (canopy cover) popisující hustotu zapojení lesního pokryvu.

Mimo letecká data nasnímaná přímo pro účely tohoto projektu byla dále použita ostatní dostupná data dálkového průzkumu:

**Digitální model reliéfu České republiky<sup>5</sup>**, dále označovaný DMR4g, zpracovaný Českým úřadem zeměměřičským a kartografickým (ČÚZK), poskytuje informace o nadmořské výšce, svažitosti a orientaci svahů v prostorovém rozlišení 5 metrů.

**Základní klasifikace pokryvu zemského povrchu CORINE<sup>6</sup>** byla zpracována ze satelitních dat Landsat a Sentinel v rámci evropského projektu Copernicus a poskytuje informace o krajinném pokryvu (les, zemědělství, sídla, voda, ...) ve vektorové vrstvě s minimální plošnou jednotkou 25 ha.

**Klasifikace druhové skladby lesů v ČR<sup>7</sup>** byla zpracována ÚHÚL na základě satelitních snímků v prostorovém rozlišení 5 metrů. Další vrstvou, kterou k tématu zdravotního stavu lesních porostů modeloval ÚHÚL na základě satelitních snímků, je mapa indexu listové plochy<sup>8</sup>.

Z otevřených dat projektu OpenStreetMap<sup>9</sup> se využívají bodové prvky (např. lokace tábořišť či autobusových zastávek), liniové prvky (např. cestní síť a elektrické sítě) a plošné prvky (např. vymezení sídel a průmyslových areálů). Část těchto dat je volně dostupných, část – z oblasti energetiky – patří k placenému obsahu.

### Pilotní studie: Vstupní vrstvy z leteckého snímkování pro okolí nádrže Švihov

Nádrž Švihov byla nasnímaná s využitím letecké laboratoře FLIS (<https://olc.czechglobe.cz/flis/>) v červenci 2020 a to prostřednictvím 19 letových linií. Primárně byla snímána data laserovým skenerem Riegl Q780 s doprovodným snímáním hyperspektrálních dat senzorem CASI-1500. Základním výstupem laserového skenování je bodové mračno georeferencované do souřadnicového systému ETRS-

<sup>5</sup> [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(1mgkidfbb2wcl34nmnjgvfzg\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=301](https://geoportal.cuzk.cz/(S(1mgkidfbb2wcl34nmnjgvfzg))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR4G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=301)

<sup>6</sup> <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

<sup>7</sup> <http://www.uhul.cz/mapy-a-data/49-katalog-mapovych-informaci/609-popis-vystupu-specializovaneho-pracoviste-uhul-brandys-nad-labem>

<sup>8</sup> [http://www.uhul.cz/images/aktuality\\_doc/Metodika\\_-\\_final.pdf](http://www.uhul.cz/images/aktuality_doc/Metodika_-_final.pdf)

<sup>9</sup> <https://www.openstreetmap.org/>

89/UTM33N s průměrnou bodovou hustotou 4 body/m<sup>2</sup>. Finálním výstupem předzpracování hyperspektrálních dat ze senzoru CASI-1500 je mozaika jednotlivých letových linií s rozlišením 1 m v souřadnicovém systému ETRS-89/UTM33N. Hyperspektrální data jsou korigována do úrovně odrazivosti povrchu.

#### 4.1.2. Vytvoření aktuální mapy rizika vzniku přírodních požárů v lesních porostech

Mapa rizika vzniku přírodních požárů se vytváří na základě dat dálkového průzkumu Země (viz 4.1.1.) DPZ a typologické mapy. Jedná se o rastrovou mapu s rozlišením 5 m, která pro lesní porosty na základě čtyřmístného kódu a údajů o výskytu souší definuje index požárního rizika. Při vyčíslení agregovaného požárního rizika se zohledňují následující parametry: (detailní popis je k dispozici v Metodice I.):

- stanoviště dle souboru lesních typů (SLT)
- lesní vegetace (dřevinná skladba, věk/růstová fáze porostu, zápoj/zakmenění)
- plošný podíl souší

Výsledkem je celkový index rizika (Fire Risk Index) –  $R_{Tot} = (R_{ST} + (R_D + R_V + R_Z)/3 + R_S)/3$

- nízké riziko (do 0.40)
- střední riziko (0.41-0.60)
- vysoké riziko (nad 0.60)

Klasifikaci typů porostu pomocí čtyřmístného kódu blíže vysvětluje Tab. 1. Za rizikové jsou považovány lesní porosty se středním a vysokým stupněm požárního rizika (Fire Risk Index > 0.4).

Mezi rizikové patří všechny plochy lesních porostů

- s podílem souší větším než 20 %
- s nejvyšším stanovištním rizikem rovným 0.9 - jedná se o SLT 0X, 0C, 1X, 1C, 2X, 2C, 3C (převážně výrazné sucho, záhřevné svahy, hřbety, vysychavé substráty, ztížené hašení z hlediska morfologie terénu)

Dalšími výraznými rizikovými faktory jsou:

- holiny (především na sušších stanovištích)
- nárost po holinách (především na sušších stanovištích)
- borovicové porosty na sušších stanovištích – kromě zapojených středněvěkových a dospělých
- řídké jehličnaté porosty na sušších stanovištích

Tab. 1. Klasifikace porostů dle čtyřmístného kódu.

Znak čtyřmístného kódu, zdroj dat	Hodnota	Význam
1. znak (dřevinná skladba), DPZ	0	Neurčeno
	1	Bory
	2	Jehličnaté
	3	Listnaté
2. znak (vlhkostní poměry), typologie	a	Sušší (stanoviště klasifikovaná do 0.5)
	b	Vlhčí (stanoviště klasifikovaná nad 0.51)
3. znak (výšková/věková kategorie), DPZ	0	Holina
	1	Nárost
	3	Mladé porosty
	6	Středněvěké porosty
	9	Dospělé porosty
4. znak (zápoj, DPZ)	4	Řídké porosty
	7	Rozvolněné porosty
	9	Zapojené porosty

### 4.1.3. Vytvoření mapy požárního rizika zohledňující změny klimatu

Mapy zobrazující index požárního rizika jsou k dispozici i pro přepokládaný stav klimatu v roce 2050. Posun klimatu zohledňující změnu teplotních a částečně i srážkových poměrů se odráží ve změnách hodnot stanovištního rizika, které je odvozeno na bázi lesnické typologie. Pravděpodobný posun klimatu je k roku 2050 zohledněn v reklasifikaci Faktoru stanoviště  $R_{ST}$  (Obr. 5), podrobné vysvětlení je k dispozici v Metodice I.

Edafická kategorie	LVS	Charakteristika	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			Napříč LVS píský, hadce, skály aj.	Nižší polohy cca ≤ 400 m n. m. prům. teplota >8°C, srážky < 650 mm/rok	Střední polohy cca 400 - 600 m n. m. prům. teplota 6-8°C, srážky 650-800 mm/rok	Vyšší polohy cca 600-900 m n. m. prům. teplota 5-6°C, srážky 800-1050 mm/rok	Horské polohy nad 900 m n. m. prům. teplota <5°C, srážky > 1050 mm/rok					
X		Převážně výrazné sucho, záhřevné	0,9	0,9	0,9	0,7	0,5	-	-	-	-	-
C		svahy, hřbety, substráty, ztížené hašení	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,5	-	-	-	-
W		Mírné sucho, trávy	-	-	0,7	0,5	0,5	0,3	-	-	-	-
Z		Extrémní terény a svahy	0,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
Y		rychlé šíření ohně,	0,5	-	-	0,5	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	-
J		velmi obtížné hašení	-	0,5	-	0,3	-	0,3	-	-	-	-
A			-	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	-
F		Exponované svahy rychlé šíření ohně,	-	-	-	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	-
N		těžký terén, obtížné hašení	0,6	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	-
M		Chudé a kyselé půdy	0,6	0,7	0,7	0,5	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	-
K		za sucha hořlavá přízemní vegetace	0,6	0,7	0,7	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
I		běžné terény	-	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,1	-	-	-
S			-	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	-
B		Živné půdy	-	0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	-	-
H		převážně bylinná méně hořlavá	-	0,5	0,5	0,3	0,3	0,1	0,1	-	-	-
D		vegetace, obvykle běžné terény	-	0,5	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	-	-
V		Ogļejené půdy (gleje)	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-
O		po část roku zvýšená půdní vlhkost, kromě „V“ zpravidla rovinaté terény – méně úrodné		0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-
P			0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1			
Q			0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-
T		Podmáčené půdy	0,1	0,1	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-
G		trvale zvýšená půdní vlhkost,	0,1	0,1	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-
R		Neodvodněné										
R		Odvodněné rašeliny, riziko podzemních požárů	0,2	-	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
L		Luhy	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	-
U		trvalá vlhkost, listnáče	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	-	-

Nedávný stav po současnost

Stupnice  
(riziko vzestupně)

0,1 nízké
0,3 mírně zvýšené
0,5 střední
0,7 vysoké
0,9 velmi vysoké
- SLT nevyjádřen



Eđaická kategorie	LVS Charakteristika	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9									
		Např. LVS píský, hadce, skály aj.	Nižší polohy cca ≤ 400 m n. m. prům. teplota >8°C, srážky < 650 mm/rok	Střední polohy cca 400 - 600 m n. m. prům. teplota 6-8°C, srážky 650-800 mm/rok		Vyšší polohy cca 600-900 m n. m. prům. teplota 5-6°C, srážky 800-1050 mm/rok		Horské polohy nad 900 m n. m. prům. teplota <5°C, srážky > 1050 mm/rok			
X	Převážně výrazné sucho, záhřevné svahy, hřbety, substráty, ztížené hašení	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9				-	-
C	Mírné sucho, trávy	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7				-
W	Extrémní terény a svahy	0.7	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1
Z	rychlé šíření ohně,	0.7	-	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.3	0.3	-
Y	velmi obtížné hašení	-	0.7	-	0.7	-	0.5	0.3	0.3	-	-
J		-	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.3	-	-
A	Exponované svahy rychlé šíření ohně, těžký terén, obtížné hašení	0.7	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1
F		0.7	0.9	0.9	0.7	0.5	0.5	0.3	0.3	0.1	-
N		-	0.9	0.9	0.7	0.5	0.5	0.3	0.3	0.1	-
LT e		0.7	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.3	0.3	0.1
M	Chudé a kyselé půdy	0.7	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.3	0.3	0.1
K	za sucha hořlavá přizemní vegetace	0.7	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.5	0.3	0.3	0.1
I	běžné terény	-	0.9	0.9	0.7	0.5	0.5	0.3	-	-	-
S		-	0.9	0.9	0.7	0.5	0.5	0.3	0.3	0.1	-
B	Živné půdy	-	0.9	0.7	0.5	0.5	0.3	0.3	-	-	-
H	převážně bylinná méně hořlavá vegetace, obvykle běžné terény	-	0.9	0.7	0.5	0.5	0.3	0.3	-	-	-
D		-	0.9	0.7	0.7	0.5	0.3	0.3	-	-	-
V	Oglené půdy (gleje)	-	0.5	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	-
O	po část roku zvýšená půdní vlhkost, kromě „V“ zpravidla rovinaté terény – méně úrodné	0.3	0.7	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	-
P		0.3	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-
Q		0.3	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-
T	Podmáčené půdy	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-
G	trvale zvýšená půdní vlhkost,	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-
R	Neodvodněné	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-
R	Odvodněné rašeliny, riziko podzemních požárů	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
L	Luhy	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-
U	trvalá vlhkost, listnáče	-		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	-

Situace ca. k roku 2050

Stupnice (riziko vzestupně)

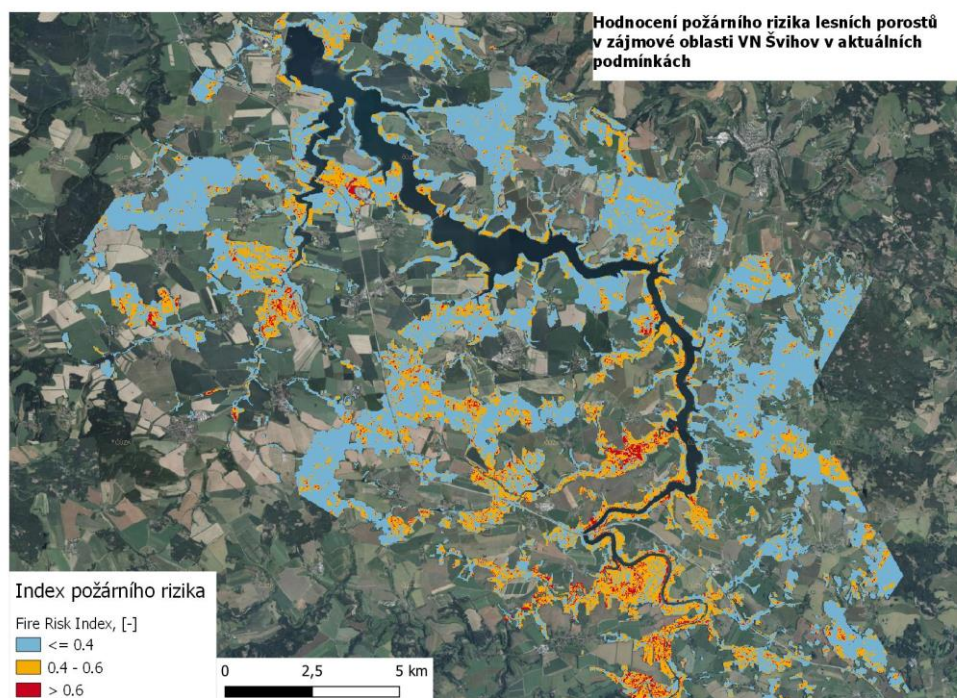
0.1	nizké
0.3	mírně zvýšené
0.5	střední
0.7	vyšší
0.9	velmi vysoké
-	SLT nevylišen

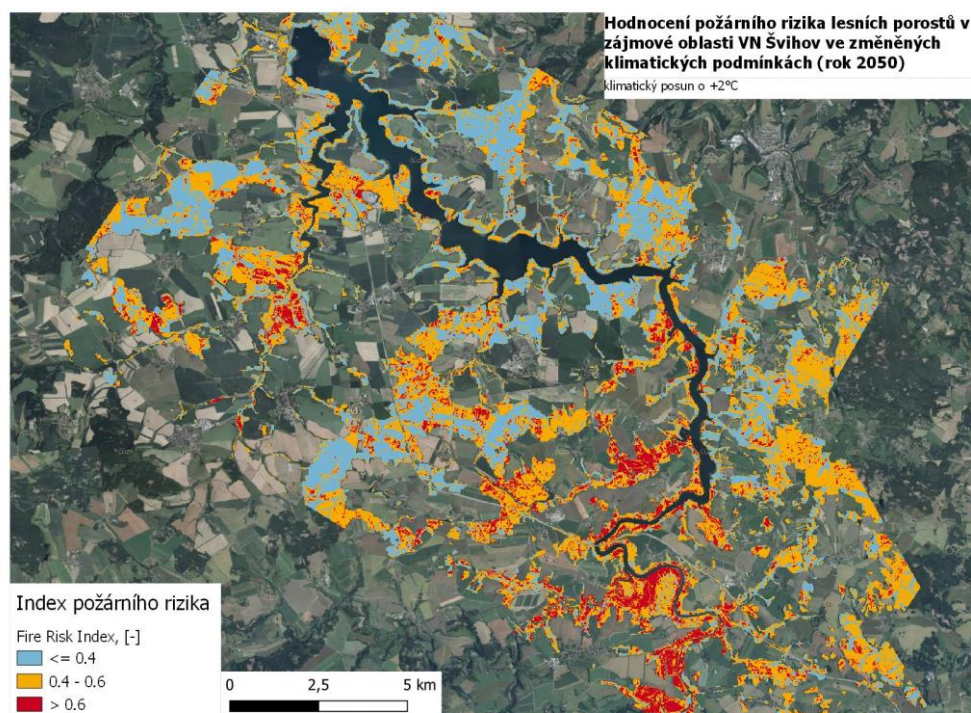
Obr. 5. Riziko požáru vyplývající z charakteru stanoviště, nahoře aktuální stav, dole posun v roce 2050.

### Pilotní studie: Hodnocení požárního rizika lesních porostů v okolí nádrže Švihov pro aktuální podmínky a pro výhledový stav

V aktuálních podmínkách klimatu mezi rizikové (Fire Risk index > 0.4) patřilo cca 30 % plochy hodnocených lesních pozemků (26.8 % spadá do kategorie středního požárního rizika, 3.4 % do kategorie vysokého rizika) zájmového území VN Švihov.

Na následujícím obrázku (Obr. 6) je vidět, jak se změna stanovištního rizika související s vývojem klimatu promítne do prostorového rozložení v reálné porostní situaci (okolí nádrže Švihov, nahoře aktuální situace, dole predikce 2050).





Obr. 6. Porovnání prostorového rozložení indexu požárního rizika nahoře aktuální situace, dole predikce 2050.

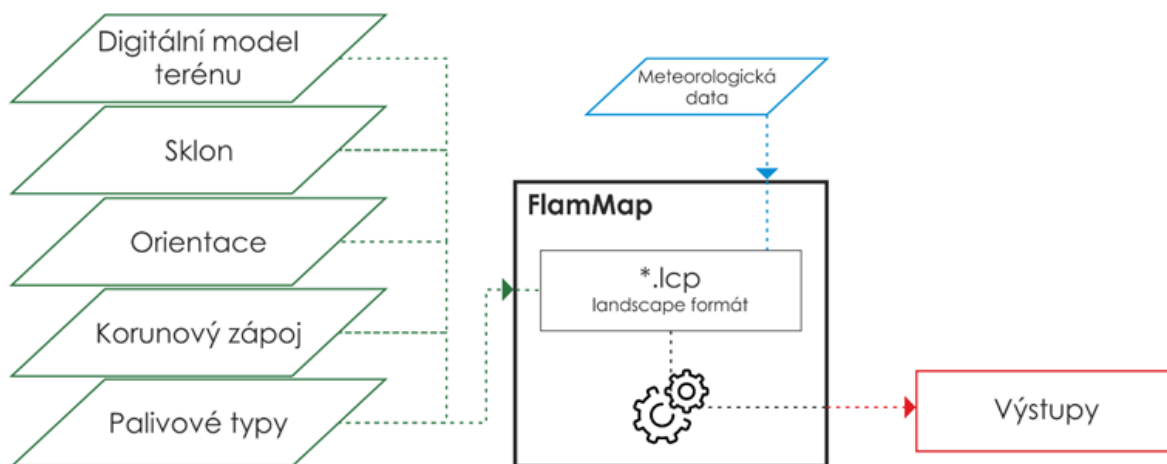
## 4.2. Stanovení rizika šíření požárů modelem FlamMap

### KLÍČOVÁ SLOVA:

*Softwarový nástroj/program FlamMap, palivové modely, nastavení programu, validace modelu, Odvození palivových modelů zohledňující změny klimatu*

Program FlamMap (Finney 2006), vyvinutý U. S. Forest Service, je používán pro mapování a analýzu chování požárů nad konkrétním územím v daných podmínkách. Slouží k analýze požárního rizika, ale je také užíván k plánování řízeného vypalování v krajině, a to např. v USA. Aplikací tohoto modelu je možno získat základní charakteristiky požáru, mezi které patří délka plamene (*Flame length*), míra šíření požáru (*Rate of spread*) a jeho intenzita (*Fireline intensity*). Analýza těchto rizik usnadňuje rozhodnutí, zda je možné požár zastavit lidskou silou anebo je nutné nasadit těžkou hasicí techniku. Program umožňuje simulaci těchto charakteristik pro definované meteorologické a environmentální podmínky. Analýza s odlišnou rychlostí větru a vlhkostí paliva umožňuje predikovat specifické požární chování, následné šíření požáru a ohrožení okolí. Program umožňuje zobrazit jednotlivé základní charakteristiky požáru (výše), modelovat potenciální místa hoření a ukazuje, jak se může požár šířit a kde bude postupovat.

Program je volně dostupný na stránkách [firelab.org](http://firelab.org) a k jeho používání je nutno pracovat s 64-bit operačním systémem Windows. Program pracuje s mnoha daty a v některých případech jsou analýzy náročné na paměť systému. Náročnost operací lze snížit či ovlivnit velikostí analyzovaného území, případně velikostí jednotlivých pixelů u vstupních dat (rastrů). Popis modelu a jeho aplikace v podmínkách České republiky je k dispozici v Metodice I.



**Obr. 7.** Schéma modelu FlamMap – vstupní vrstvy, integrovaná vrstva \*.lcp, vstup meteorologických dat a výstupy.

Pro použití programu musí být k dispozici několik základních vrstev (Obr. 7), především vrstva Landscape, která se skládá z následujících dílčích prvků: palivový model, sklon, orientace, digitální model terénu, korunový zápoj. Pro přípravu jednotných rastrových podkladů se vychází z bodového pole, které v pravidelném odstupu 5 metrů pokrývá celé zájmové území.

Patrně nejdůležitější vrstvou jsou definované palivové modely, dále v textu též palivové typy, (Scott et Burgan, 2005). Sestavení vrstvy palivových modelů závisí na typu pokryvu, liší se pro 1) zemědělské plochy, 2) vodní plochy, 3) lesní plochy, 4) sídla, 5) cestní síť, 6) ostatní plochy.

### Pilotní studie: Příprava vstupů do programu FlamMap

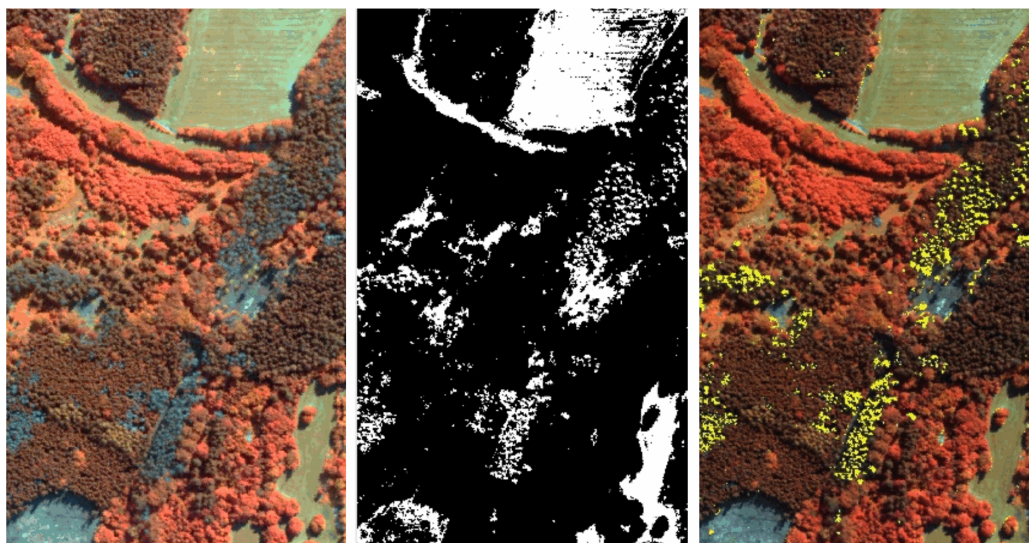
Při přípravě vstupních dat do programu FlamMap jsou jako lesní plocha jsou označeny ty body gridu, k nimž existuje informace o druhu dřeviny dle mapy ÚHÚL. Tyto body je pak možné kategorizovat do palivových modelů na základě následující sady informací odvozených z DPZ dat: a) druh dřeviny dle ÚHÚL, b) typologie stanoviště, c) růstová fáze porostu, d) procentuální pokryv (canopy cover), e) podíl souší, f) výška porostu dle modelu nDSM (z laserového skenování).

Palivové modely pro konkrétní porostní situace a definované scénáře vývoje se pak odvozují s pomocí čtyřmístného kódu použitého pro klasifikaci požárního rizika (kap. 4.1.2, Tab. 1). Klasifikace probíhá v rastru 5×5 m pomocí čtyřmístného kódu, který obsahuje informaci o porostní situaci ve formátu „DSVZ“, kde D= dřevina, S = stanoviště, V= výška, věk, Z = zápoj. Zdrojem dat pro odvození čtyřmístného kódu jsou údaje DPZ (kap. 4.1.2). Přiřazení palivového modelu ke konkrétní porostní situaci popsané čtyřmístným kódem je připraveno na základě expertního odhadu. Viz Přehled často zastoupených palivových modelů a jejich charakteristiky vzhledem k modelování šíření požáru v zájmovém území v okolí nádrže Švihov.

Detekce souší na lesních plochách se prováděla v několika krocích. Za prvé, pro hyperspektrální data byla použita analýza hlavních komponent (Principal component analysis, PCA). Pak, na základě informace z jednoho nebo dvou prvních pásem PCA souboru, byly nastaveny mezní hodnoty pro souše detekované pomocí vizuální a/nebo spektrální analýzy. Dále, z PCA pásma byly vybrány pouze pixely, které měly hodnoty v nastaveném intervalu. Těmto pixelům byla přiřazena hodnota 1, ostatním pixelům hodnota 0. Výsledná maska měla mezi objekty s hodnotou 1 souše, cesty a ornou půdu. V posledním kroku byla tato maska oříznuta dle informace z mapy výšek (nDSM) při nastavení atributu výšky objektů nad 5 m, čímž byly vyloučeny cesty a orná půda. Výsledná vrstva měla hodnoty 1 pro



pixely odpovídající souše, a hodnoty 0 pro všechny zbývající pixely. Podíl souší byl pro každý bod gridu vypočten v okolí o poloměru 5 m vůči počtu všech pixelů zařazených jako les (Obr. 8).



**Obr. 8.** (zleva): a) fragment hyperspektrálních dat v nepravých barvách (syntéza spektrálních pásem VNIR: 850, 550, 450 nm) – suché stromy lze rozlišit podle šedé barvy; b) maska z PCA pásma (1 je bílá, 0 je černá); c) finální automaticky určená vrstva souší (žlutá).

Vrstva Slope (svažitost) byla definována jako svažitost odvozená z DMR4g korigovaná na hodnotu 0 v oblasti vodních ploch. Vrstva Aspect (orientace svahů ke světovým stranám) byla definována jako orientace odvozená z DMR4g korigovaná na hodnotu 0 v oblasti vodních ploch. Také hodnota Elevation (nadmořská výška) byla převzata z modelu terénu DMR4g s korekcí na jednotnou hodnotu výšky v oblasti vodních ploch. Vrstva Canopy Cover obsahuje defaultní nulovou hodnotu mimo les a v ploše lesa přebíráme procento pokryvu vypočtené z bodového mračna leteckého laserového skenování.

Vymezení sídel bylo převzato z vrstev OpenStreetMap (OSM). Polygony označené atributem „residential“ a „industrial“ se považují za zastavěné území, které nepřispívá k šíření lesních požárů, a klasifikují se do nehořlavé třídy (kód 91 ve FlamMap). Analogicky, také významné silnice zanesené v OSM jsou brány jako překážka šíření lesního požáru a klasifikovány do nehořlavé třídy (91).

Po aplikaci prvních pěti kroků zbývalo nezařazeno cca 10 procent zájmového území. Jednalo se o místa, která nespádají do zemědělské plochy zařazené v LPIS, nespádají do vodních ploch, nejsou zaneseny jako lesní plochy v mapě druhů od ÚHÚL a nejsou ani součástí sídel či cestní sítě podle OSM. Reálně se (dle vizuální inspekce obrazových dat) jedná o části zemědělské krajiny mimo evidenci LPIS, části lesa mimo rozlišení satelitně zpracovaných druhů, případně menší, okrajové části sídel.

Pro rozřazení této zbytkové množiny bodů do palivového modelu se opět využily letecká lidarová data. Jejich klasifikací lze označit území, kde se vyskytují budovy; kde se vyskytuje vyšší vegetace; a plochy ostatní. První skupina je přiřazena k nehořlavému typu 91. Druhá skupina je rozdělena dle výšky též určené z lidarových dat na lesní a křovinný palivový typ (vybraný převažující, protože konkrétněji druh není znám). Třetí skupina je opět podle výšky rozdělena na lesní, křovinný a nejčastěji travnatý palivový typ. Spolehlivost určení je v tomto šestém kroku z pochopitelných důvodů nižší než ve fázích předchozích, ale nadále maximální možná s ohledem na dostupné podklady.

**Tab. 2.** Přehled často zastoupených palivových modelů a jejich charakteristiky vzhledem k modelování šíření požáru, dle Scott et Burgan, 2005.

Palivový model	Název palivového modelu	Popis palivového modelu	Odpovídající porostní situace (čtyřmístný kód)	Typ palivového modelu	Hloubka hořlavé vrstvy (m)	Zásoba snadno hořlavého materiálu (t/ha)
GS2	Moderate Load, Dry Climate Grass-Shrub	sušší, holina, nárost/mlazina, řídké,	0a04, 0a14 1a14, 2a14 3a14	Dynamický	0,5	5,2
GS3	Moderate Load, Humid Climate Grass-Shrub	vlhčí, holina, řídké	0b04	Dynamický	0,5	7,4
GS4	High Load, Humid Climate Grass-Shrub	vlhčí, nárost/mlazina, řídké	0b14 1b14 2b14 3b14	Dynamický	0,6	30,6
SH2	Moderate Load Dry Climate Shrub	sušší, nárost/mlazina, rozvolněné	0a17 3a17	N/A	0,3	12,8
SH4	Low Load, Humid Climate, Timber-Shrub	vlhčí, nárost/mlazina, rozvolněné	0b17 1b17 2b17 3b17	N/A	0,9	8,4
SH5	High Load, Dry Climate Shrub	sušší, nárost/mlazina, rozvolněné	1a17 2a17	N/A	1,8	16,1
SH7	Very high Load, Dry Climate Shrub	sušší, nárost/mlazina, zapojené	0a19 1a19 2a19 3a19	N/A	1,8	17,1
SH9	Very High Load, Humid Climate Shrub	vlhčí, nárost/mlazina, zapojené	0b19 1b19 2b19 3b19	Dynamický	1,3	32,2
TU1	Low Load Dry Climate Timber-Grass-Shrub	sušší, dospělé, řídké	0a94 1a94 2a94 3a94	Dynamický	0,2	3,2
TU2	Moderate Load, Humid Climate Timber-Shrub	jehličnaté, vlhčí, dospělé, řídké	1b94 2b94	N/A	0,3	2,8
TU3	Moderate Load, Humid Climate Timber-Grass-Shrub	vlhčí, mladé, středněvěké, řídké	0b34 0b64 0b94 1b34 1b64 2b34 2b64,3b34 3b64 3b94	Dynamický	0,4	7,0
TU5	Very High Load, Dry Climate Timber-Shrub	sušší, mladé, středněvěké, řídké	2a69 0a34 0a64 1a34	N/A	0,3	17,3

			1a64 2a34 2a64 3a34 3a34 3a64			
<b>TL2</b>	Low Load Broadleaf Litter	listnaté, sušší i vlhčí, mladé i dospělé, zapojené i rozvolněné	0a39 0b39 0a97 3a39 3b39 3a97 3a97 3b37 3a37 3b67	N/A	0,1	3,5
<b>TL3</b>	Moderate Load Conifer Litter	jehličnaté, sušší i vlhčí, mladé, dospělé, rozvolněné, zapojené	0b37 0a69 2a39 2b37 2a37 2b39 2b69 2b67 2b97 2a67 3b37	N/A	0,1	1,2
<b>TL4</b>	Small Downed Logs	jehličnaté, sušší, středněvěké, zapojené	2a69	N/A	0,1	1,2
<b>TL5</b>	High Load Conifer Litter	jehličnaté, sušší, středněvěké, dospělé, rozvolněné	0a67 2a97 2a99 2b99	N/A	0,2	2,8
<b>TL6</b>	Moderate Load Broadleaf Litter	listnaté, sušší i vlhčí, středněvěké, zapojené, rozvolněné	0a99 0b67 0b97 0b99 3a67 3a69 3a99 3b67 3b69 3b97 3b99	N/A	0,1	5,9
<b>TL8</b>	Long-Needle Litter	bory, sušší, mladé, středněvěké, dospělé, rozvolněné, zapojené	0a37 1a37 1a39 1a67 1a69 1a97 1a99 1b37 1b39 1b67 1b69 1b97 1b99	N/A	0,1	14,3
<b>TL9</b>	Very High Load Broadleaf Litter	neurčeno, vlhčí, středněvěké, zapojené	0b69	N/A	0,2	16,4
<b>SB2</b>	Moderate Load Activity Fuel or Low Load Blowdown	vyskytuje se odumřelého ležící i stojící dřevo	1a 1b 2a 2b se soušemi	N/A	0,3	11,1

#### 4.2.1. Vymezení rizikových oblastí vzniku a šíření přírodních požárů

Program FlamMap lze využít pro vymezení rizikových oblastí vzniku a šíření přírodních požárů. S výhodou lze v tomto případě využít existující mapy rizika lesních požárů (kapitola 3.1.2.) a informací o průběhu počasí, případně o výskytu extrémních situací v uplynulých letech.

V první fázi modelování a analýz v programu FlamMap se pracuje s funkcí BurnProbability, která v zájmovém území vyznačuje oblasti, kde je větší pravděpodobnost shoření. Výstupní informace z programu FlamMap jsou pak protnuty s výslednou mapou indexu požárního rizika lesních ekosystémů v těchto místech a s plošnou informací o hustotě blesků v oblasti, které pokládáme za typickou přírodní

příčinu vzniku požárů. V poslední fázi došlo k protnutí všech zmíněných analýz s přihlédnutím k lidské činnosti v oblasti, tedy blízkosti frekventovaných silničních komunikací či turistických stezek.

Pro běh simulací v programu je nutné vložit informace o rychlosti a směru větru, chodu počasí a absolutní vlhkost mrtvé organické hmoty (dřeva).

Uživatel pracující s programem má možnost zvolit tři základní způsoby týkající se vstupu větru:

- „ruční zadání“ – je zadán směr a rychlost v příslušných jednotkách (např. km/h)
- WindNinja – program, který je vyvíjen v USA a modeluje masy hmoty (větru) s přihlédnutím k terénu. WindNinja je aplikován přímo do FlamMapu a jeho využití je poměrně snadné. Po zadání vstupních informací o směru a rychlosti větru, dokáže načíst informace ze vstupního souboru Landscape (terén, sklon, svah, palivové typy apod.) a modelovat směr a rychlost větru v závislosti na terénu.
- Raster směru větru a raster rychlosti větru – v našem případě byly rastery získány z programu WAsP<sup>10</sup>. Jedná se o dánský program, který je koncipován k analýzám proudění za účelem výběru umístění větrných elektráren.

Použití WindNinji se jeví jako nejlepší možnost modelace z důvodu schopnosti programu číst již vložené vstupy o terénu. Program je koncipován tak, aby byl schopen reagovat na změny v terénu a dokázal predikovat, jak se změní v důsledku těchto nerovností směr a rychlost větru. Výstupem tohoto modulu je raster směru a rychlosti proudění větru. Program lze také využívat samostatně mimo program Flam-Map.

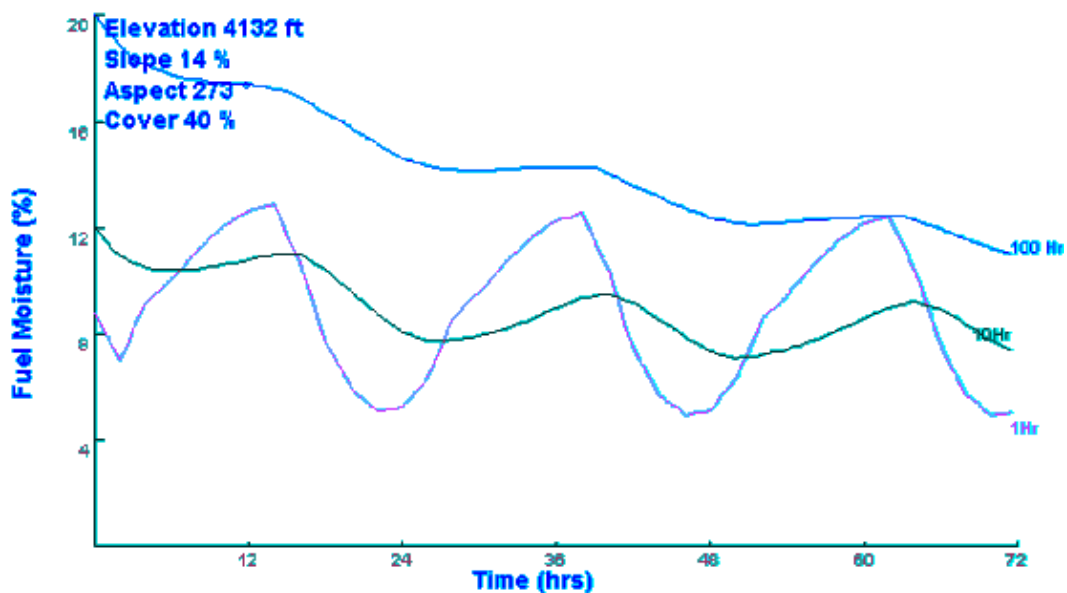
Absolutní vlhkost odumřelé hmoty je jedním z důležitých vstupů do modelu. Aktuální požární riziko je do značné míry závislé na vlhkosti dostupného paliva, které ovlivňuje jak pravděpodobnost zahoření, tak i rychlost šíření požáru. Pro klasifikaci tříd velikosti mrtvého dřeva se používá koncept časové prodlevy vlhkosti paliva (Byram, 1943; Fosberg et Deeming, 1971). Tato časová prodleva odpovídá přibližně času, za jaký je schopno dřevo či jiné přírodní palivo ztratit přibližně 2/3 rozdílu vlhkosti mezi původní hodnotou a rovnovážným stavem při změnách atmosférických podmínkách (teplota a vlhkost vzduchu). Pro změnu vlhkosti odpovídající 95 % rozdílu je nutná přibližně pětinašobná doba. Všeobecně užívaná klasifikace je uvedena v Tab. 3.

**Tab. 3.** Velikostní třídy mrtvého paliva dle jejich nejmenšího rozměru (Deeming et al., 1972)

Třída časové prodlevy	Průměr (palce)	Průměr (cm)
1-hr (hod)	0 - ¼"	0 – 0.6 cm
10-hr	¼ - 1"	0.6 – 2.54 cm
100-hr	1 – 3"	2.54 – 7.6 cm
1000-hr	> 3"	> 7.6 cm

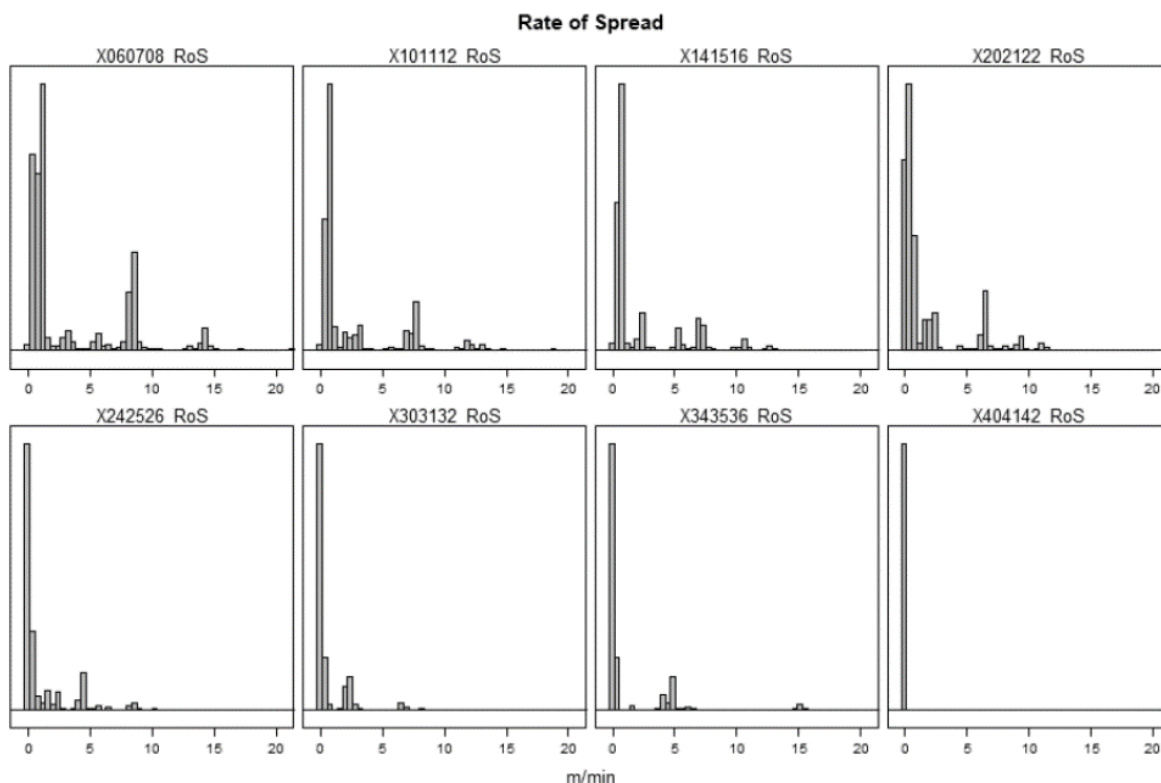
Jemné mrtvé palivo reaguje na změny podmínek, především teploty a vlhkosti vzduchu, velmi rychle, zatímco silné mrtvé dřevo mění svou vlhkost pozvolna. Tyto podmínky se nemění pouze v závislosti na výskytu srážek, ale mají také výraznou denní dynamiku (Obr. 9).

<sup>10</sup> <https://www.wasp.dk/>



Obr. 9. Změny vlhkosti pro 3 třídy paliva (1-, 10-, 100-hr) po dobu tří dnů a různou počáteční vlhkost.<sup>11</sup>

Pro ověření citlivosti modelu na vlhkost paliva bylo zadáno osm různých situací vlhkosti dřeva. Analýzou výsledných celoplošných požárních charakteristik lze pozorovat snižující se riziko v podobě nižší míry šíření s narůstající počáteční vlhkostí paliva. Při vlhkosti dosahující 40 % se potenciální šíření požáru zastaví zcela (Obr. 10).



Obr. 10. Vliv vlhkosti odumřelé dřevní hmoty na rychlost šíření ohně vyjádřen histogramem relativních četností na příkladu zájmového území VN Švihov.

Popisky grafu značí zadané vlhkosti mrtvé biomasy paliva velikostních tříd - X 1-hr, 10-hr, 100-hr RoS, tedy první graf odpovídá vlhkosti 6, 7 a 8 % atd.

<sup>11</sup> [http://flammaphelp.s3-website-us-west-2.amazonaws.com/Tech\\_Topics/Tech\\_Dead\\_Fuel\\_Moisture.htm](http://flammaphelp.s3-website-us-west-2.amazonaws.com/Tech_Topics/Tech_Dead_Fuel_Moisture.htm)



Pro stanovení aktuální vlhkosti paliva lze provést ambulantní měření vlhkosti dřeva gravimetrickou metodou vzorků sebraných při terénním šetření (Pollet et Brown, 2007) nebo pozorováním na stanicích, které standardizovaným způsobem měří vlhkost dřeva.

#### Pilotní studie: Příprava vstupů do programu FlamMap a citlivost programu k nastavení

Vzhledem ke skutečnosti, že rychlost a směr proudění větru je faktor, který nejvíce ovlivňuje vývoj a postup požáru, byly v rámci modelování odzkoušeny všechny typy vstupů proudění větru a porovnány jejich výstupy. Simulace probíhaly pro deset extrémních povětrnostních situací z let 2015–2020 (Tab. 4). V těchto situacích vanul velmi silný vítr a jednalo se o typické „požární“ počasí, kdy bylo velmi teplo, větrno a sucho.

**Tab. 4.** Použité charakteristiky větru z pozorovaných meteorologických situací stanice Hulice, ČHMÚ

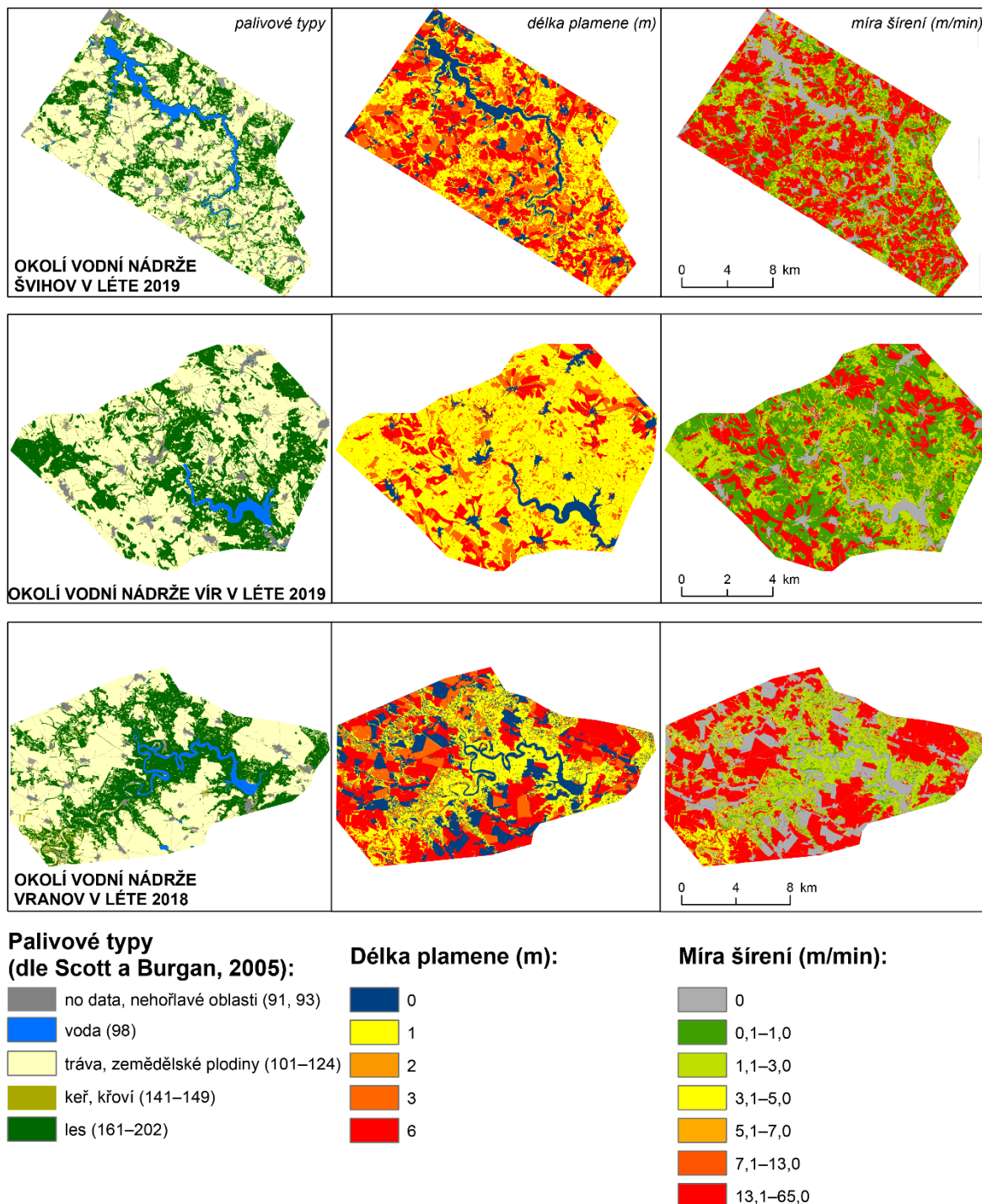
Datum	Rychlost větru (km/h)	Směr větru (azimut, °)
25.07.2015	28	250
08.08.2015	23	110
13.08.2015	29	110
13.09.2015	37	120
11.07.2016	19	230
12.04.2018	39	110
09.08.2018	26	130
14.10.2018	39	120
23.04.2019	52	110
11.06.2019	33	120

Program FlamMap poskytuje uživatelům informace o základních charakteristikách požáru. V okolí vodních nádrží Švihov, Vír a Vranov je zobrazena extrémní požární letní situace z období 2015–2020. Pro zobrazení byly palivové typy sdruženy do skupin dle převládající vegetace (Obr. 11, vlevo). Prostřední část obrázku značí vrstvu délky plamene v této konkrétní situaci. Míra šíření (Obr. 11, vpravo) zobrazuje rychlost postupu čela požáru. Všeobecně se dá říci, že v zemědělské krajině požár postupuje rychleji než v lesní krajině. V lesní krajině je mnohem více hmoty, která hoří pomaleji ale déle, zatímco na zemědělské krajině dojde k rychlému vyhoření zásoby paliva.

Okolí VN Švihov není v porovnání s VN Vír a Vranov tolik zalesněné. Vyskytují se zde menší lesní plochy, na které navazuje zemědělská krajina. Lesy v okolí přehrady Vír jsou nyní silně ovlivněny postupem kůrovcové kalamity, v jejímž důsledku vznikají rozsáhlé holiny převážně na pravém břehu nádrže, což má vliv na množství a druh paliva v okolí nádrže. Svým zalesněním rázem je situace obdobná i kolem VN Vranov, ale oproti předchozím VN se jedná především o lesy listnaté a smíšené. Jako jediná ze tří studovaných nádrží neslouží primárně vodárenským účelům, přičemž je další její funkcí i rekreační. Toto využití může mít významný vliv na pravděpodobnost vzniku přírodního požáru z důvodu nedbalosti návštěvníků.

V závislosti na vlhkosti paliva (biomasy) je sezónně nejrizikovější druh paliva zemědělský porost v období sklizně, kdy mají plodiny před sklizní nízkou vlhkost. Z tohoto hlediska vykazuje nejvyšší potenciální rychlost šíření požárů okolí nádrže Švihov, které má v porovnání s ostatními dvěma nádržemi nejvyšší podíl orné půdy v blízkosti vodní plochy.

V blízkém okolí VN Vír převažuje kromě lesa trvalý travní porost s množstvím mezí a roztroušené porostů dřevin, což snižuje potencionální rychlost šíření. Nádrž Vranov je obklopena hrubší mozaikou větších lesních celků a obhospodařované zemědělské krajiny, převážně orné půdy. V lesích převažují porosty smíšené či listnaté, které mají příznivější požární charakteristiky.



Obr. 11. Extrémní letní situace za období 2015–2020 v okolí vodních nádrží Švihov, Vír a Vranov

V pilotním šetření na 45 lokalitách v okolí VN Vír byl experimentálně ověřen i další vstupní parametr - vlhkost mrtvého dřeva ve čtyřech třídách vlhkosti dřeva podle tloušťky. Šetření proběhlo v první půlce května, který byl teplotně podprůměrný a denní teploty se pohybovaly mezi 2 a 15°C, přičemž sběru

předcházely deštivé dny. Zjištěné průměrné vlhkosti na gradientu velikosti paliva (časové prodlevy) jsou pro 1-hr, 10-hr, 100-hr a 1000-hr 31 %, 34 %, 37 % a 55 % resp. Tyto hodnoty odpovídají velmi malému požárnímu riziku s omezenou až nulovou mírou šíření.

#### 4.2.2. Predikce palivových modelů pro lesní stanoviště

V souvislosti s očekávanými změnami lze predikovat vývoj palivových modelů a využít tak model Flam-Map pro dlouhodobé predikce rizika požárů. Palivový model je definován čtyřmístným kódem a velikostí rastru, který kód definuje. Odvození predikovaných palivových modelů respektuje stávající konkrétní porostní situace a definované scénáře vývoje:

- Při tvorbě alternativního scénáře musí docházet k posunu celých kategorií (smrk→holina) s ohledem na prostorový charakter informace
- Klimatický scénář lze převzít z výstupů projektu Požáry I a Požáry II, oba zohledňují nárůst teploty, střídání sušších a vlhčích několikaletých období a nerovnoměrné rozložení srážek ve vegetačním období.
- Z lesnického hlediska je nárůst teplot a kolísání vlhkosti půdy kritické pro smrk pěstovaný na nepůvodních stanovištích ve středních polohách ČR, proto scénář kalkuluje s postupným snížením jeho zastoupení v porostech.

V rámci čtyřmístného kódu palivového typu se změna klimatu projeví takto:

##### 1. Stanoviště – k hynutí smrkových porostů dochází na stanovištích s nejvyšším rizikem požáru

Index rizika stanoviště pro rok 2050 a následující odpovídá předcházející zpracované metodice „Doporučená adaptační a mitigační opatření v rizikových oblastech výskytu přírodních požárů s přihlédnutím k měnícímu se klimatu (Metodika I., Tab. 1 a 2 dokumentu)“, kde je riziko stanoveno na základě souborů lesních typů (SLT). Riziko nabývá hodnot od 0.1 do 0.9. Nízké riziko mají stanoviště s indexem 0.1, mírně zvýšené s hodnotou indexu 0.2 až 0.3, na nejrizikovějších stanovištích dosahuje hodnot 0.8–0.9. Při odvození čtyřmístného kódu se písmeno „a“ přiřazuje sušším stanovištím s rizikem 0.5 a větším, kód „b“ se přiřazuje vlhčím stanovištím s rizikem menším než 0.49. V navrženém scénáři se předpokládá, že k hynutí smrku dochází na stanovištích nejsušších, tedy s nejvyšším rizikem hynutí smrkových porostů v daném roce predikce. K hynutí dochází postupně tak, že v roce 2030 odumírají porosty s indexem rizika stanoviště 0.8–0.9, v roce 2040 0.6–0.7 atd. Jehličnaté porosty (smrk) se v jednotlivých letech predikce mění postupně v holiny v rozsahu daném rozlohou smrkových porostů, které se nacházejí v roce predikce na stanovišti s nejvyšším indexem rizika (Tab. 5). Podíl smrkových porostů na celkové rozloze zájmového území tak postupně klesá.

**Tab. 5.** Podíl porostů rostoucích na stanovištích s nejvyšším indexem rizika hynutím v jednotlivých letech predikce a podíl smrkových porostů na stanovištích s nejvyšším rizikem hynutí v jednotlivých letech predikce

Rok predikce	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Hodnota stanovištního rizika, pro kterou se předpokládá hynutí smrku	Reálný stav	0.8–0.9	0.6–0.7	0.4–0.5	0.2–0.3	0.1

## 2. Změna druhové skladby

Scénář reflektuje tyto změny (Tab. 6):

- smrk v souladu s měnící se rizikovostí stanoviště hyne a mění se na holinu (smrk→holina, 2→0)
- holina se po deseti letech mění na nárost listnatých dřevin (holina→listnaté, 0→3)

Tab. 6. Posuny v kategorii druhové skladby v souvislosti s hynutím smrkových porostů

Rok predikce	2020	2030	2040	2050	2060	2070
smrk→holina, 2→0	Reálný stav	X	x	x	x	x
holina→listnaté, 0→3		X	x	x	x	x

V souladu s postupným hynutím smrku, které probíhá v daném roce na nejrizikovějších stanovištích, se mění druhové zastoupení, protože holiny po odtěženém smrku jsou zalesňovány listnatými dřevinami.

## 3. Změna ve výškových/věkových kategoriích

Scénář s ohledem na nerovnoměrně vytvořené kategorie reflektuje tento vývoj:

- holina se každých deset let mění na nárosty (0→1), k posunu všech ostatních kategorií dochází jedenkrát za dvacet let (Tab. 7).

Tab. 7. Posun ve výškových/věkových kategoriích v souvislosti s hynutím smrkových porostů

Rok predikce	2020	2030	2040	2050	2060	2070
holina→nárost, 0→1	Reálný stav	X	x	x	x	x
nárost → mladý porost 1→3	Reálný stav		x		x	
Mladý p.→ středněvěký 3→6	Reálný stav		x		x	
Středněvěký →dospělý, 6→9	Reálný stav		x		x	

## 4. Změna zápoje

Zápoj je nejhůře predikovatelnou položkou čtyřmístného kódu. V reálné situaci je obvyklé, že holiny mají zápoj řídký, rozvolněné porosty se vyskytují na cca 15 % rozlohy a většina porostů je zapojených (cca 60 %). Řídké porosty jsou při konstrukci palivových modelů zařazovány do dynamických typů GS (grass-shrub) a TU (timber- grass-shrub). Porosty rozvolněné a zapojené jsou obvykle přiřazeny k palivovým modelům nedynamickým SH (shrub) a TL (timber-litter). S ohledem na to byla predikce do budoucna připravena schematicky tak, že pouze odrůstající řídkce zapojené porosty na holinách byly v následných věkových stádiích pokládány za plně zapojené porosty, rozvolněné porosty si svůj stav zachovávají.

Příklady vývoje palivových modelů reflektující výše uvedený postup

Např. v první řádce tabulky 8 se palivový model SH9 (sušší stanoviště, nárost mlazina, zapojené) odpovídající současné porostní situaci vyjádřené kódem 2b19 (Tab. 2) mění po dvaceti letech na model TL3 (jehličnatý porost, sušší, středního věku, zapojený) – porostní situace 2a39, po dalších 10 letech smrk odumírá a porost se stává sušší holinou s řídkým nárostem (GS2) – porostní situace 0a04 a v roce 2060 je klasifikován jako SH7, s nárostem listnatých dřevin (porostní situace 3a19).

**Tab. 8.** Příklady vývoje čtyřmístného kódu porostu (dle Tab. 2) u palivových typů smrku

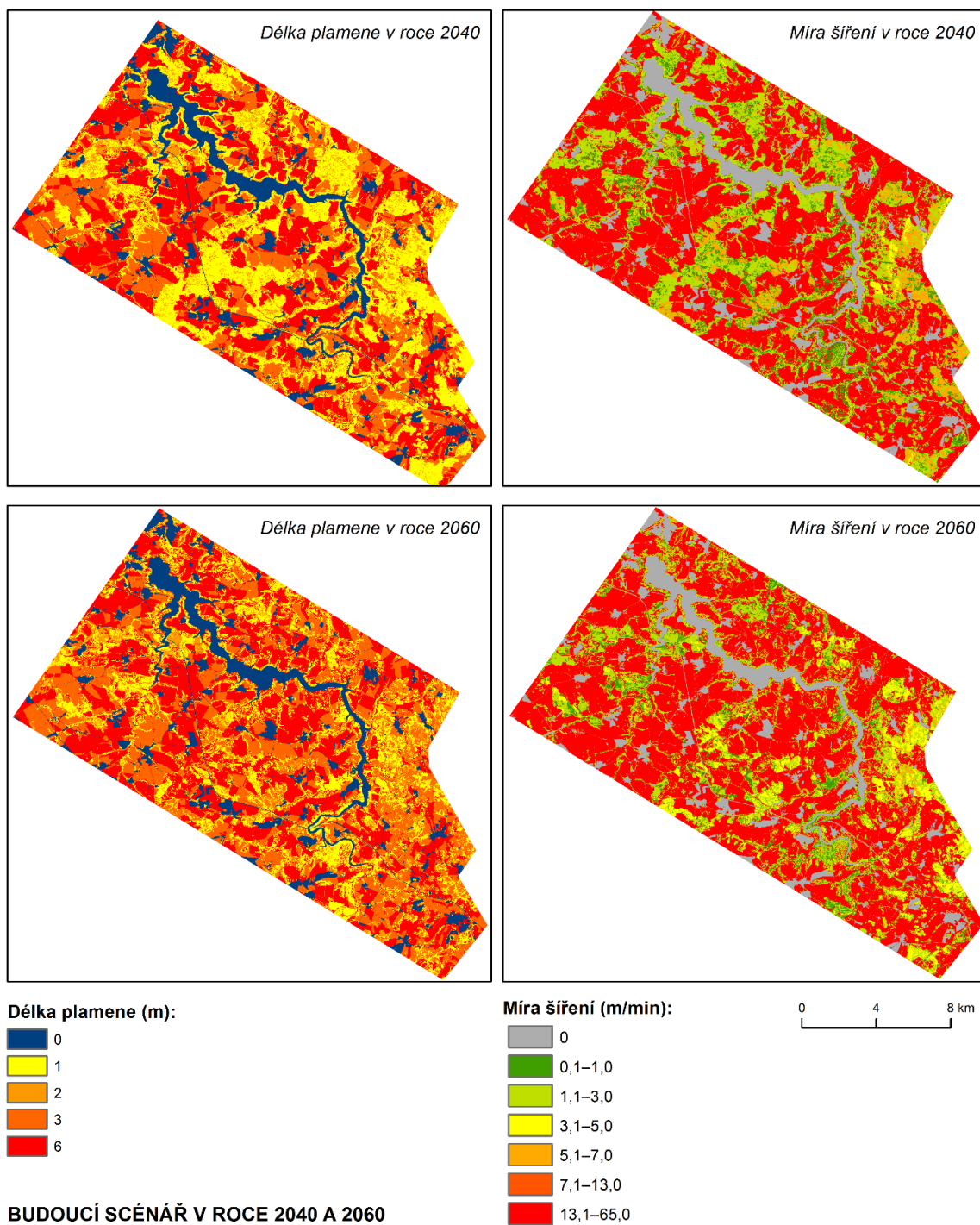
Riziko stan. 2020	Riziko stan. 2050	2020	2030	2040	2050	2060	2070
0.3	0.5	2b19	2b19	2a39	0a04	3a19	3a19
0.4	0.5	2b19	0b04	3a19	3a19	3a39	3a39
0.2	0.6	2b19	2b19	2a39	0a04	3a19	3a19
0.3	0.6	2b19	2b19	2a39	0a04	3a19	3a19
0.4	0.6	2b19	0b04	3a19	3a19	3a39	3a39
0.3	0.7	2b19	2b19	0a04	3a14	3a34	3a34
0.4	0.7	2b19	0b04	3a19	3a19	3a39	3a39
0.4	0.8	2b19	0b04	3a19	3a19	3a39	3a39

#### Pilotní studie: Simulace požární situace při změnu klimatu

Modelované predikce porostních situací byly v podobě mapy palivových typů použity jako vstup do programu FlamMap, přičemž se zjišťovaly požární charakteristiky pro rok 2040 a 2060 (Obr. 12).

Další klíčový parametr vítr – zůstal v obou simulacích stejný, tedy 12 m/s při západním směru. Vlhkost mrtvého paliva byla ve scénářích snížena o 5 % oproti simulacím, které probíhaly pro současný stav. Vlhkost živého paliva byla ponechána stejná. Modelování scénářů ukazuje, že postupem času pravděpodobně dojde ke zrychlování šíření požáru. Rychlost šíření požáru lze ovlivnit řadou lesnických či obecněji krajinářských opatření jako jsou pásy z listnatých hůře hořlavých dřevin atd., blíže v kapitole 4.4.





**Obr. 12.** Náhled na možný budoucí scénář v roce 2040 a 2060 v okolí vodní nádrže Švihov u vrstvy délka plamene a míra šíření

### 4.3. Stanovení rizika sekundárního znečištění nádrží v důsledku změny odtokových poměrů po přírodním požáru

#### KLÍČOVÁ SLOVA:

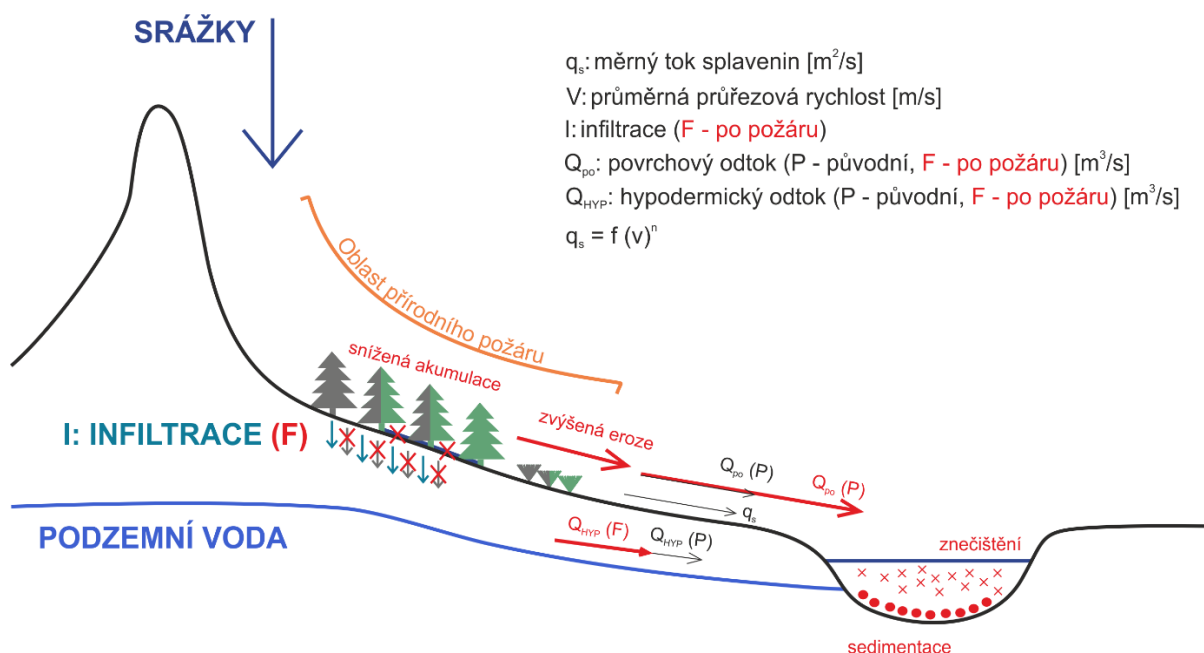
změna odtokových poměrů, modelování koncentračního toku látek, matematický popis transportu, odhad erozního rizika

#### 4.3.1. Změna odtokových poměrů a stanovení rizika (obecný úvod)

Pro odvození vhodných přístupů ke stanovení dopadů lesního požáru na jakost vody v nádrži je nutné vycházet z popsaných hydrologických změn indukovaných lesním požárem. Ty zahrnují zvýšený povrchový odtok související se zmenšením intercepce, infiltrace a povrchové drsnosti vlivem ztráty části nebo celého původního vegetačního krytu. Vlivem požáru dochází dále ke změnám některých fyzikálních parametrů půdy zejména pórovitosti, rozdělení velikosti pórů, makropórovitosti a vodoodpudivosti (Nyman a kol., 2014). S těmito změnami souvisí již zmíněné snížení míry infiltrace vody do půdy po požáru (Nyman a kol., 2014). Změnou viskozity odtékající kapaliny, která unáší podíl popela, půdy a nespálených organických materiálů, se dále zesiluje erozní účinek proudu a roste množství materiálu dopraveného do recipientu a případně následně do vodní nádrže. Pokud v období krátce po požáru, kdy je půdní povrch obnažený, dojde k intenzivním srážkám, hrozí rozvoj vyšších forem eroze jako je rýhová nebo výmolová eroze nebo dokonce k iniciaci stržové eroze s devastujícím tokem splavenin (debris flow).



Obr. 13. Schéma původního stavu okolí nádrže



Obr. 14. Schéma stavu okolí nádrže po požáru

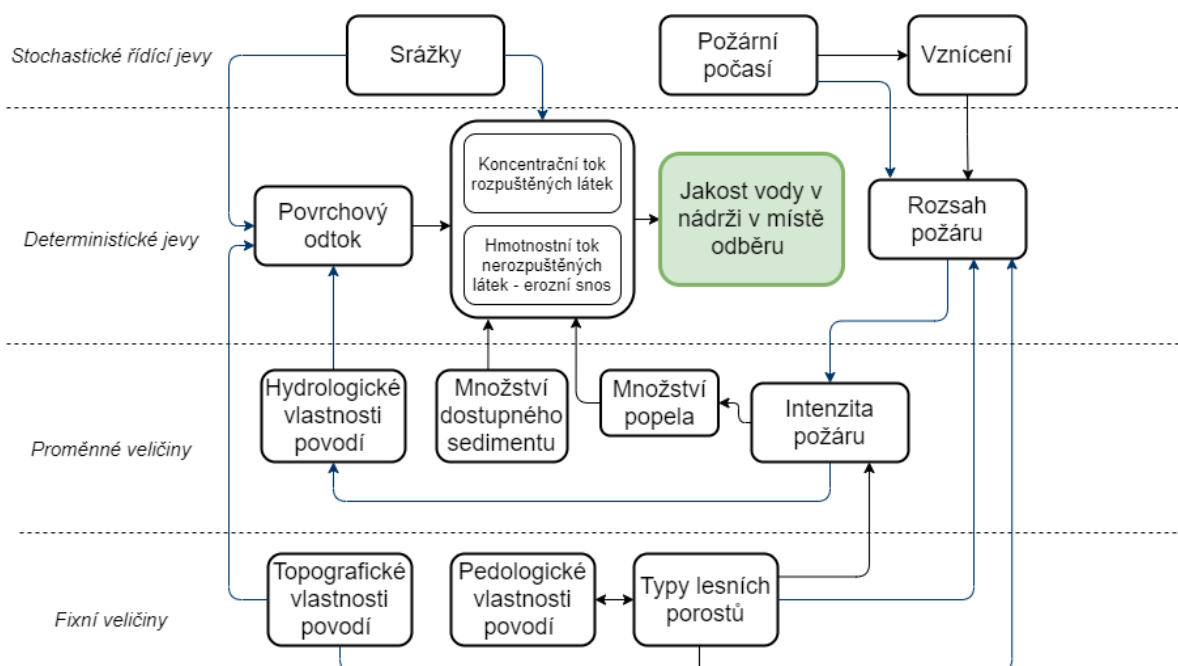
Z erodovaného materiálu, který je dopraven do nádrže, je pro následnou jakost vody v nádrži rozhodující množství jemných suspendovaných částic, které mají výrazně delší dobu zdržení, než sedimentují ke dnu (Langhans a kol., 2016). Suspendovaný materiál může ohrozit jakost odebírané surové vody ze dvou důvodů. Zaprvé ohrožuje jakost surové vody přímo vzhledem ke zvýšenému zákalu vody v nádrži a látkám rozpuštěným ze suspenze voda-popel, za druhé nepřímo vzhledem k množství látek, které jsou na suspendovaný sediment adsorbované. Jedná se zejména o mikroorganické znečištění, živiny a těžké kovy. Tyto látky se ze sedimentu v nádrži následně postupně uvolňují. Živiny takto dopravené do vodní nádrže následně zhoršují míru eutrofizace vody v nádrži (Smith a kol., 2011).

Jak vyplývá z výše uvedeného, pro posouzení rizika nepříznivých dopadů lesních požárů na jakost vody odtékající z takto postižených povodí a následně na jakost surové vody odebírané z vodárenské nádrže je třeba modelovat celou řadu procesů včetně uplatnění parametru pravděpodobnosti dané události. Modelování rizika dopadů lesních požárů na jakost vody navazuje na výsledek modelování parametrů lesního požáru (intenzita požáru, rozsah požáru, množství výsledného popela) včetně stanovení pravděpodobnosti dané události. Tyto výsledky jsou dále uplatněny jako vstupy do modelování rizika dopadů na jakost vody v nádrži (viz schéma na obrázku (Obr. 15)). Jedná se o tři procesy, které jsou popsány jinými fyzikálními vztahy. Prvním procesem je stanovení koncentračního toku popela (respektive látek rozpuštěných ze suspenze voda a popel), druhým procesem je modelování erozního smyvu jemných suspendovaných částic půdy při srážko-odtokové události, která přichází bezprostředně po proběhlém požáru. Třetím procesem je stanovení vývoje koncentrací rozpuštěných látek a rovněž suspendovaných částic v prostoru zátopy vodní nádrže až do místa odběru surové vody.

Výsledné riziko nepříznivých dopadů požáru na fungování vodního zdroje je dáno kombinací pravděpodobnosti výskytu lesního požáru a následného výskytu intenzivních dešťů v období krátce po požáru, kdy je půdní povrch bez vegetačního pokryvu a zranitelnosti zdrojové části vodního zdroje vůči erozním jevům v povodí. Zranitelnost zdrojové části vodního zdroje je výsledkem kombinace zranitelnosti povodí vůči erozním jevům a schopnosti technologie úpravy vody vypořádat se se změnou jakostí su-



rové vody. Modelování procesů tedy doporučujeme provádět pro takové události, které svou pravděpodobností výskytu představují závažné riziko pro daný vodní zdroj, ale zároveň jsou následná navržená opatření finančně únosná a dlouhodobě udržitelná.



**Obr. 15.** Konceptuální model popisující řídicí jevy a vstupní fixní a proměnné veličiny, hledaný výstup je označen zeleně, schema upraveno dle Langhans a kol., 2016.

#### 4.3.2. Modelování toku látek rozpuštěných v suspenzi voda-popel

Z rešerše provedené Smithem a kol. (2014) vyplývá, že chemické složení popela, který vznikl při lesním požáru, se významně liší v závislosti na typu původní vegetace a jejích částech, které shořely (kůra, dřevo, listy nebo jehličí), dále na klimatických podmínkách, půdním typu a podmínkách hoření. Bílý popel, který vzniká hořením dřeva, obsahuje jako jednu z hlavních složek  $\text{CaCO}_3$  spolu s dalšími oxidy kovů a křemíku. Směs bílého a černého popela obsahuje živiny – dusík, fosfor a draslík, uhlík a další prvky – Fe, Mn, Zn, Cu. Byl zaznamenán i obsah Al a Pb (eukalyptové porosty) a rovněž Hg, Cd a As. (Smith a kol., 2011). Jak prokázaly laboratorní rozborů provedené pro suspenzi voda-popel, zůstává většina látek adsorbovaná na povrchu částic popela a jejich transport do prostoru nádrže probíhá společně s částicemi popela.

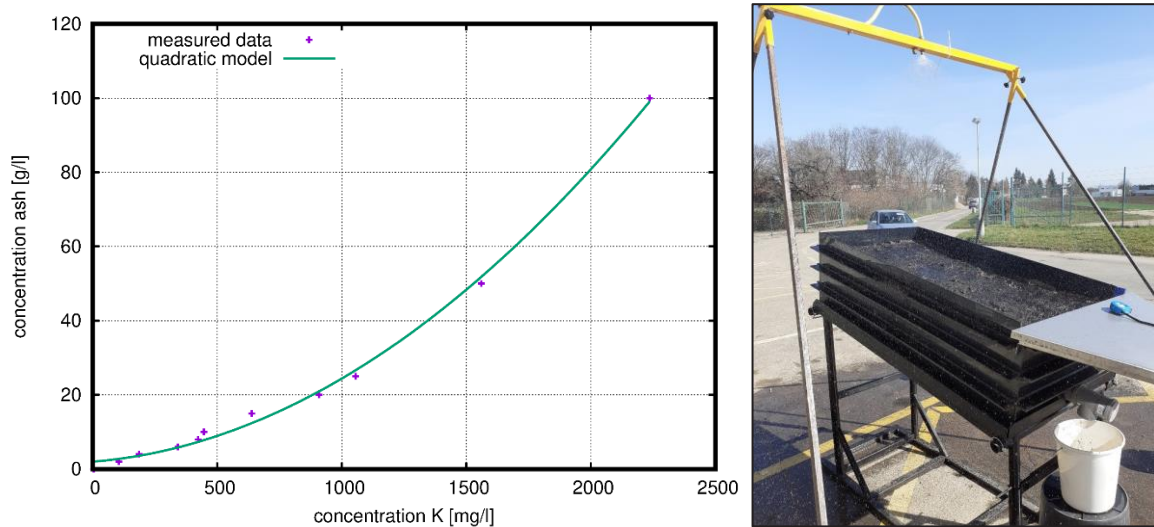
Množství popela, které se přesune z požářiště do nádrže, je závislé na velikosti povrchového odtoku generovaného příčinou srážkou. Pro popis velikosti povrchového odtoku se uplatňuje rovnice kinematické vlny (Smith a kol., 2000). Transport popela je poté řízen advekčně-disperzní rovnicí, kde advekční člen je převzat z řešení rovnice kinematické vlny. Vzhledem k charakteru povrchového odtoku je tedy nezbytné v modelu uvažovat disperzní člen, který popisuje nerovnoměrnost rychlostního pole. Kombinaci rovnic kinematické vlny a advekčně-disperzní rovnice pro daný účel ověřili např. Deng a kol. (2006) při modelování koncentračního toku NaCl při povrchovém odtoku. Vzhledem k tomu, že na počátku se popel na povodí vyskytuje ve formě nánosu, který je postupně při vyšších unášecích silách vyplavován a po ustání povrchového odtoku naopak sedimentuje, byl tento proces matematicky popsán pomocí kinetické Freundlichovy sorpce.

Dynamika smyvu popela povrchem povodí je tedy popsána kombinací rovnice kinematické vlny a rovnice advekčně-disperzní. Je zde nutné zdůraznit, že se nejedná o transport mísitelných látek, ale o transport suspenze, procesy transportu látek jsou ovšem obdobné jako u transportu mísitelných

látek. Implementace rovnice kinematické vlny je předmětem řady softwarových aplikací jako např. Smith et al. (2000), Kavka a Jeřábek (2011) a Kuraz et al. (2018). Odvození a popis těchto řídicích rovnic je uveden v Příloze 1 Metodiky.

Vzhledem k tomu, že uvedené rovnice obsahují některé parametry - konkrétně disperzní koeficient a přestupové koeficienty popisující rozpouštění a vyplavování popela z povrchu půdy do povrchového odtoku a jeho následné usazování – pro jejichž stanovení neexistuje podklad v odborné literatuře, Pro identifikaci těchto parametrů bylo nezbytné navrhnout experiment, který probíhal na umělé mikroparcele reprezentující svah s variabilním náklonem. Mikroparcela byla povrchově částečně kontaminována popelem a poté zadešťována dešťovým simulátorem, viz obrázek 16 - vpravo. V průběhu experimentu byl povrchový odtok kontinuálně vzorkován pomocí směsných vzorků.

Pro detekci množství popela v povrchovém smyvu v průběhu tohoto experimentu byl po sérii experimentů vybrán draslík. Půda obsahuje jen zlomek množství draslíku v porovnání s popelem, draslík na popel nesorbuje, a je takto ideálním indikátorem množství popela ve vzorku povrchového odtoku.



**Obr. 16.** Vlevo - naměřená závislost mezi koncentrací popela a koncentrací draslíku; Vpravo - zadešťovací experiment pro stanovení přestupových a disperzních parametrů transportu popela povodím.

Na (Obr. 16) vlevo je naměřená koncentrace popela vůči koncentraci draslíku. Závislost je popsána kvadratickým modelem, který byl v tomto případě následovně parametrizován jako

$$c_{popel} = 1.7e - 5 c_K^2 + 0.0054c_K + 1.995,$$

kde  $c_{popel}$  je koncentrace popela v [g/l] a  $c_K$  je koncentrace draslíku [mg/l]. Je zde nutné zdůraznit, že v případě použití popela z jiného zdroje bude výsledný vztah pravděpodobně odlišný. Uvedený vztah byl použit pro přepočítání koncentrace draslíku v kontinuálně odebíraných vzorcích na koncentraci popela.

### Pilotní studie: Modelování transportu popela na vybrané oblasti povodí

Pro tuto úlohu byla vymezena oblast Hadce u nádrže Želivka. Jedná se o rizikovou lokalitu z hlediska lesních požárů. Na této lokalitě byl modelován hypotetický požár a byla stanovena oblast kontaminovaná popelem.



Obr. 17. Modelová oblast a oblast zasažená požárem. Mapový podklad získán z [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)

Množství popela a uhlé, které by v modelové oblasti mohlo vzniknout po požáru bylo odhadnuto v návaznosti na klasifikaci typu porostu a palivových modelů (kap. 4.1.2). Stanovení prostorové distribuce popela ihned po lesním požáru je důležitou počáteční podmínkou nezbytnou pro řešení řídicích rovnic transportu popela svahem povodí. Tato data umožňují odhadnout množství biomasy a následně zbytků hoření po požární události. Pro stanovení množství nadzemní biomasy dostupné v porostech se vychází z republikových průměrných hektarových zásob pro skupiny dřeviny (borovice, ostatní jehličnaté, listnaté) agregovaných dle růstové fáze dostupných v datech SLHP.<sup>12</sup> Celkové množství spálené biomasy se liší v závislosti na růstové fázi porostu, přičemž platí čím starší porost, tím menší podíl spálené nadzemní biomasy.

Pro nedostatek poznání o množství mrtvého opadu pro různé typy porostů je uvažováno toto množství stejné pro všechny růstové fáze a dřeviny vycházející z NIL (Kučera et Adolt, 2016). Po průchodu požáru porostem se předpokládá úplné shoření části biomasy a opadu a částečné prohoření s 50% oxidací hmoty a přeměnou na uhlé (Basu, 2018),

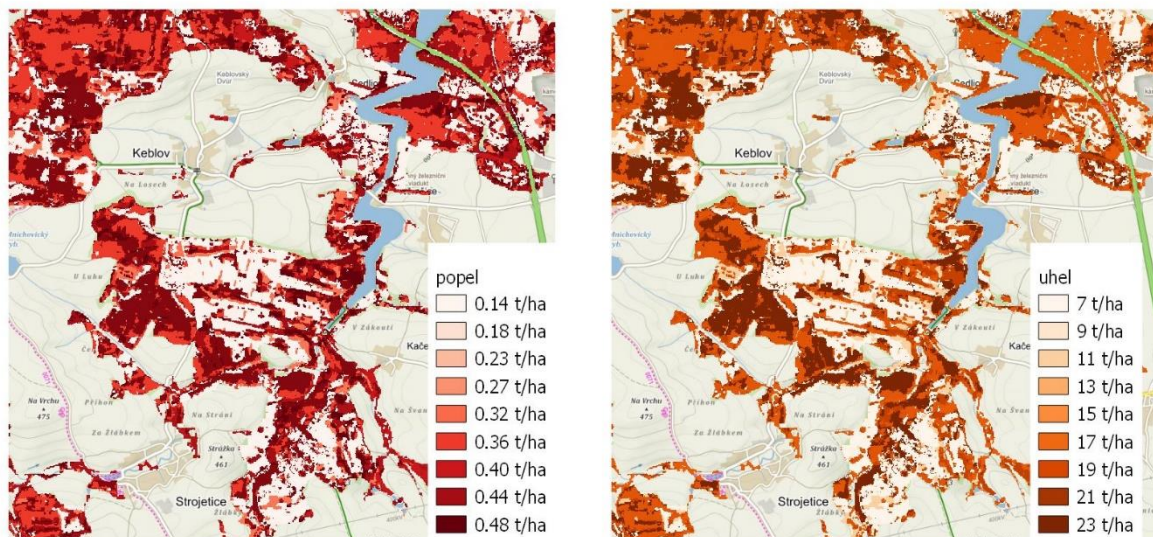
Modelovaná množství požárních reziduí odpovídají empiricky pozorovaným množství v literatuře (Smith et al., 2011).

Tab. 9. Výpočet množství požárních zbytků v lesních porostech

<sup>12</sup> <http://www.uhul.cz/ke-stazeni/informace-o-lese/slhp>

Věk/ Růstová fáze	Nadzemní biomasa	Odum- řelá hmota opad	Podíl opadu →popel	Podíl po- rostu →po- pel	Množství popela, popelna- tosti 2 %	Podíl spá- leného opadu →uhel	Podíl spále- ného po- rostu →uhel	Množství uhle při 50% oxi- daci	Podíl po- rostu zasa- ženého oh- něm
	t sušiny /ha	t sušiny /ha	-	-	t/ha	-	-	t/ha	-
holina	0.00	23.0	0.3	-	0.14	0.6	-	6.89	0
ná- rost/mlazina	2.00	23.0	0.3	0.5	0.16	0.6	0.5	7.39	1
mladé	40.00	23.0	0.3	0.3	0.38	0.6	0.4	14.89	0.7
středněvěké	150.00	23.0	0.3	0.2	0.74	0.6	0.3	29.39	0.5
dospělé	300.00	23.0	0.3	0.1	0.74	0.6	0.2	36.89	0.3

Tato zátěž se zpracuje plošně v rastru na základě dat DPZ tak, aby reprezentovala zájmovou oblast povodí vodní nádrže. Takto lze dále modelovat mobilizaci a smyv popela do nádrže po konkrétní požární události (Obr. 17).

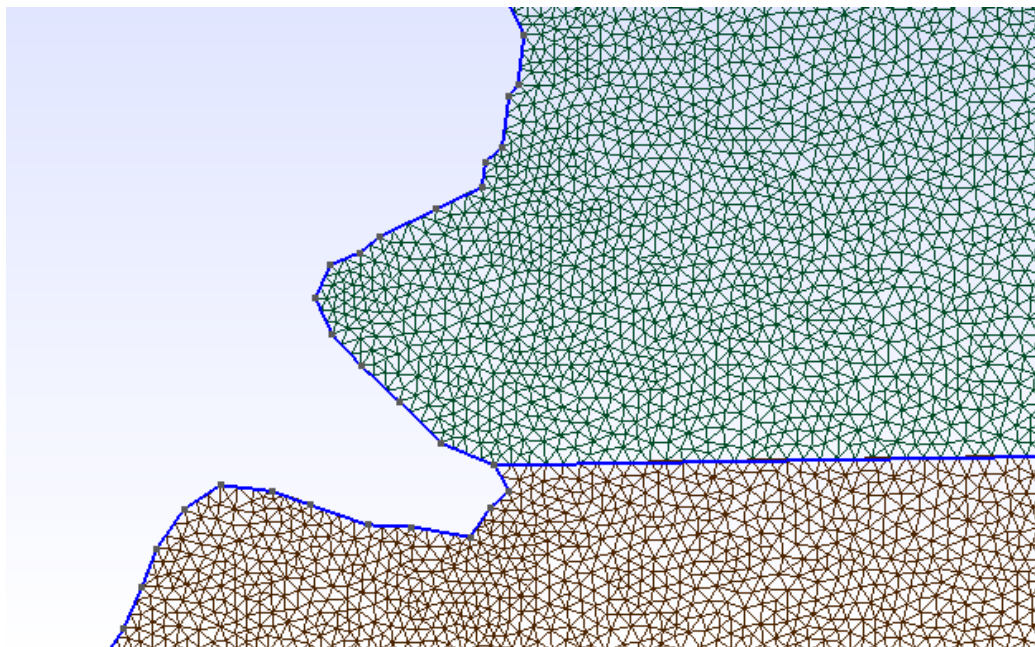


Obr. 18. Příklad množství popela a uhle po hypotetickém vyhoření porostů na příkladu Sedlické zátoky VN Švihov

Výpočetní oblast pro modelování transportu popela a oblast zasažená požárem je znázorněna na (Obr. 17). Na této oblasti byly řešeny řídicí rovnice z Přílohy 1, které byly integrovány tzv. metodou Least-Square-FEM (Jiang, 1998), což je varianta metody konečných prvků. Vzhledem k použité metodě je možné povodí diskretizovat nerovnoměrnou trojúhelníkovou sítí. Triangularizace oblasti byla provedena v prostředí GMSH (<https://gmsh.info>). Oblast byla v rámci GMSH uvažována jako dvourozměrná oblast ohraničená přílehlou silniční sítí (která bude tvořit přirozenou bariéru povrchového odtoku)

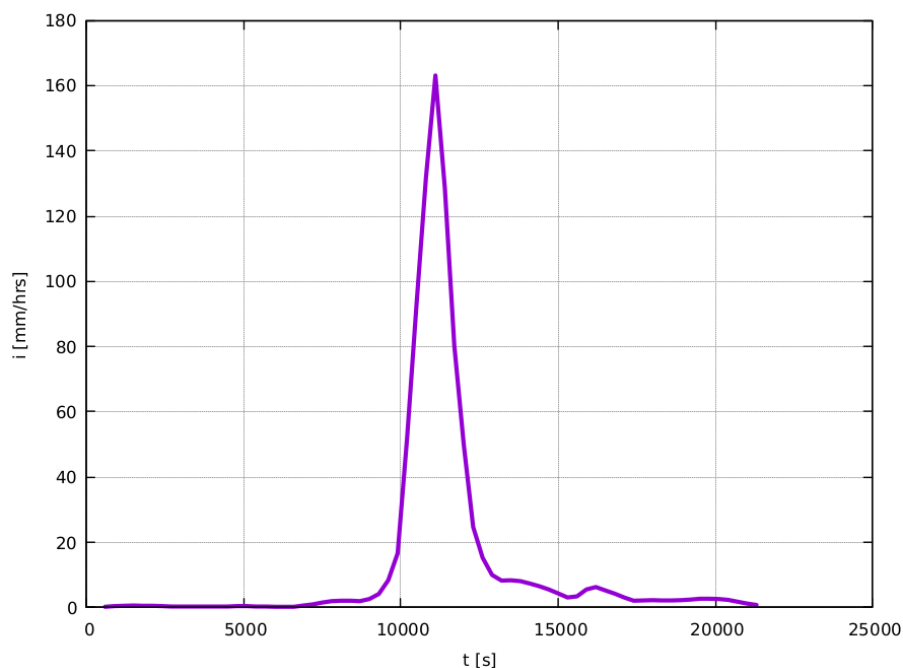


a břehem vodní nádrže. Po vygenerování trojúhelníkové sítě byly pro všechny vnitřní uzly v prostředí ArcGIS interpolovány výškové souřadnice. Průměrný krok sítě (v tomto případě výška trojúhelníků) byl 25 m. Byla vytvořena trojúhelníková síť s 8139 uzly a 15794 elementy. Detail sítě je zobrazen na (Obr. 19).



Obr. 19. Detail triangularizovaného povodí

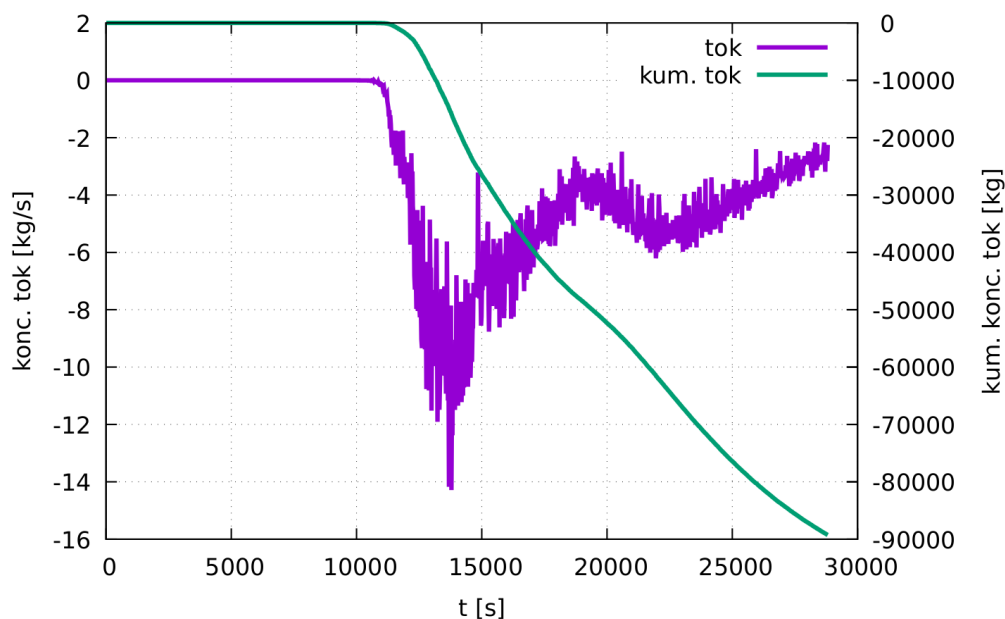
V rámci výpočtu byly okrajové podmínky úlohy ponechány volné, což v případě advekčně-disperzně reakční rovnice představuje nulový disperzní tok. Jednoznačnost řešení řídicích diferenciálních rovnic je zaručena definováním počáteční distribuce popela ihned po požáru, viz text výše. Celková zátěž popelem povodí představovala přibližně 400 t.



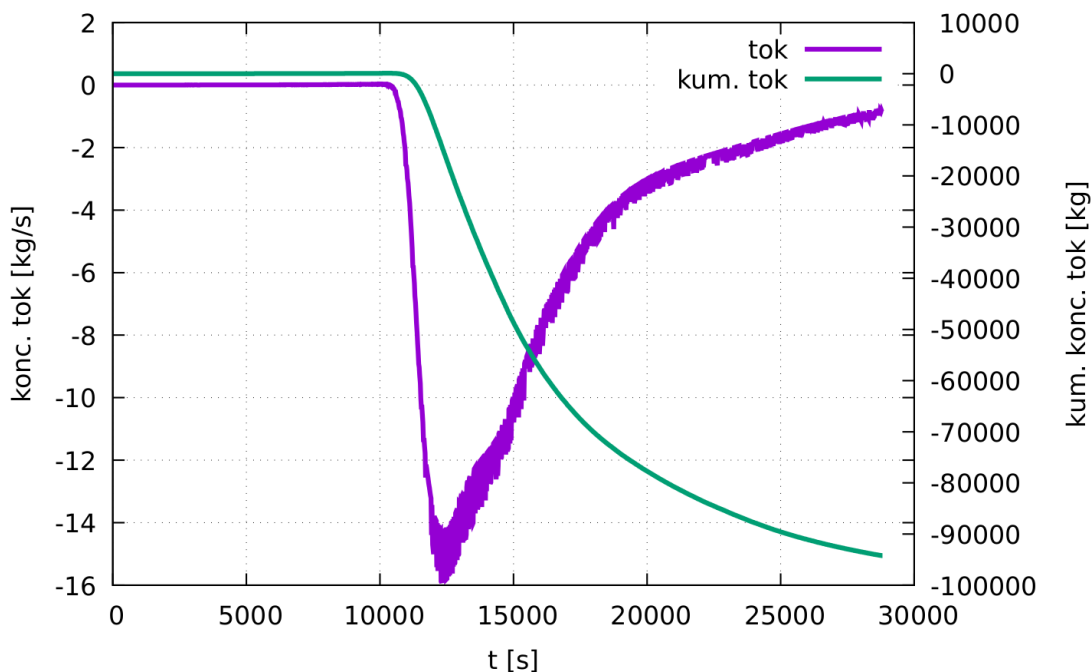
Obr. 20. Průběh intenzity příčinné srážky

Intenzita příčinné srážky je zobrazena na (Obr. 20). Jedná se o extrémní srážku s pravděpodobností periodicitou opakování 100 let. Pro tuto srážku byla provedena simulace. Celková zátěž nádrže je pak definována jako kumulativní koncentrační tok přes hranici reprezentující břehovou čáru nádrže.

Na (Obr. 21) jsou zobrazena data reprezentující koncentrační tok do nádrže. Data mají zápornou hodnotu, protože se jedná o výtok z oblasti. Z výpočtu je patrné, že na konci této extrémní srážky se do nádrže povrchovým odtokem dostalo 90 tun popela z celkového množství 400 tun, které bylo stanoveno jako zátěž po modelovém požáru v oblasti Hadce.



**Obr. 21.** Koncentrační tok popela přes břehovou čáru nádrže. Je zobrazen aktuální koncentrační tok a kumulativní koncentrační tok. Záporné znaménko u dat odpovídá výtoku z modelové oblasti.



**Obr. 22.** Koncentrační toky popela na hranici popisující dálnici D1 na severní části modelové oblasti.

Na (Obr. 22) jsou poté znázorněny koncentrační toky na severní hranici, která popisuje dálnici D1. Dá se tedy očekávat, že přibližně stejné množství popela, které přímo vteče do nádrže, se rovněž usadí podél této komunikace a může se stát později rovněž mobilní a dále kontaminovat vodárenskou nádrž.

### 4.3.3. Erozní riziko a jeho odhady

Kvantifikace erozního procesu na lesních půdách zasažených požárem s sebou nese mimořádně vysokou míru nejistot. Ty jsou dány zejména vysoce proměnlivými charakteristikami půdy i jejího pokryvu, které společně určují míru odolnosti proti eroznímu účinku deště. Krátkodobá vodo-odpudivost, rozpad půdních agregátů a opětovné zarůstání požárem odkrytého povrchu a komplexní mikrotopografie – to jsou podmínky, které vylučují nasazení v ČR běžně využívaných přístupů pro hodnocení eroze na základě empirických dlouhodobých modelů stojících např. na univerzální rovnici ztráty půdy (RUSLE).

Doporučeným přístupem je hodnocení erozního rizika pomocí epizodních fyzikálně založených deterministických modelů po zatížení návrhovou srážkou požadované doby opakování – tu lze pro libovolné místo v ČR odvodit pomocí nástrojů a metodiky projektu RAIN (Kavka et al, 2018). V českém prostředí používaná metodika Ochrany zemědělské půdy (Janeček et al., 2012) zmiňuje např. modely SMODERP-2D nebo EROSION-3D. Pro jejich nasazení je však třeba znát jejich výchozí předpoklady, které se v některých případech značně liší od podmínek požárem zasažených lesních porostů a kvantifikace klíčových parametrů je v současnosti stále předmětem intenzivního výzkumu. Přes nízkou spolehlivost absolutních hodnot modelovaného erozního smyvu lze výsledky těchto modelů použít jako vhodný indikátor intenzity erozního ohrožení v řešeném povodí obdobně, jako byly výsledky modelu WATEM/SE-DEM využity pro určení rizika erozním smyvem v projektu Bezpečnostního výzkumu VG20122015092 (Rosendorf et al. 2015). Pro odhady erozního rizika jsou doporučené fyzikální erozní modely:

**EROSION-3D** je prostorově distribuovaný erozní model, který na základě infiltračních charakteristik půdních druhů vyhodnocuje infiltraci (metodou dle Green & Ampt, (1911)); modelem kinematické vlny řeší plošný povrchový odtok a bilancováním transportní kapacity toku a množství erodovaného materiálu poskytuje v každém bodě rastru predikci množství erodovaného nebo usazeného množství sedimentu včetně jeho zrnitostního složení. Omezením modelu je regionální specifikum odvozených půdních charakteristik (kalibrace probíhala na německých půdních datech) a zjednodušená reprezentace povrchového odtoku, který je uvažován pouze jako plošný a nepočítá s tvorbou rýh. To zejména v komplexní mikrotopografii lesních porostů jistě povede ke značnému podhodnocení odhadovaného množství smyvu. Lokalizace parametrů modelu je v současnosti předmětem řady výzkumných aktivit (Beitlerová a kol., 2020) a klíčová vstupní data zrnitosti jsou nyní nově dostupné odborné veřejnosti (Strouhal a kol, 2021).

Druhým vhodným modelem pro orientační posouzení erozního rizika je **SMODERP-2D**. V současné fázi vývoje nástroj představuje spíše model povrchového odtoku a míru eroze umožňuje kvantifikovat nepřímě přes objem rýh, které jsou odtokovým procesem v modelu generované. Model obsahuje komponentu pro zjednodušený výpočet infiltrace Phillipovou rovnicí (Philip, 1957). Tvorbu povrchového odtoku a jeho následný pohyb po povrchu řeší pomocí rovnice kinematické vlny. Samotné uvolňování, transport a depozice půdních částic zatím není v modelu zakomponován kvůli stále probíhajícímu výzkumu. O vzniku rýh na půdním povrchu rozhoduje překročení jedné ze dvou kritických hodnot – tečného povrchového napětí vlivem proudící vody nebo kritické rychlosti proudění, což jsou veličiny odvozené pro konkrétní půdní druh a typ půdního pokryvu. Nadkritické množství odtoku poté přímo definuje velikost vznikající rýhy, jejíž geometrie je zjednodušeně uvažována jako obdélník o fixním poměru stran. Z celkového objemu rýh na konci simulace srážko-odtokové epizody pak lze usuzovat na

potenciální množství smyvu způsobeného rýhovou erozí. Je zřejmé, že část sedimentu v průběhu odtokové epizody v povodí sedimentuje. Hrozbou pro kvalitu vody ve vodárenských nádržích však je zejména jemnozrnná frakce erozního smyvu, u níž lze předpokládat jen velmi pomalou depozici a velmi efektivní transport až do tělesa nádrže. Provedením korekce objemu erozních rýh právě na podíl jemnozrnné frakce v zasaženém povodí pak lze získat odhad množství látek, které vlivem modelované erozní události pronikne až do nádrže.

#### Pilotní studie: Kvantifikace erozního vnosu do nádrže Švihov

Pro odvození množství jemnozrnné frakce půdy transportované do vodní nádrže byl uplatněn nástroj SMODERP-2D. Modelování eroze navázalo na modelování transportu popela z lokality Hadce v povodí vodárenské nádrže Švihov popsaného v kapitole. Oblast modelu byla definována mírně odlišně, a to jako mikropovodí na východním svahu Sedlické zátoky nádrže Švihov zahrnující pouze část modelovaného požářiště a to konkrétně část přímo odvodněnou do nádrže. Celková rozloha modelovaného území byla 15,8 ha a je znázorněna na (Obr. 23).



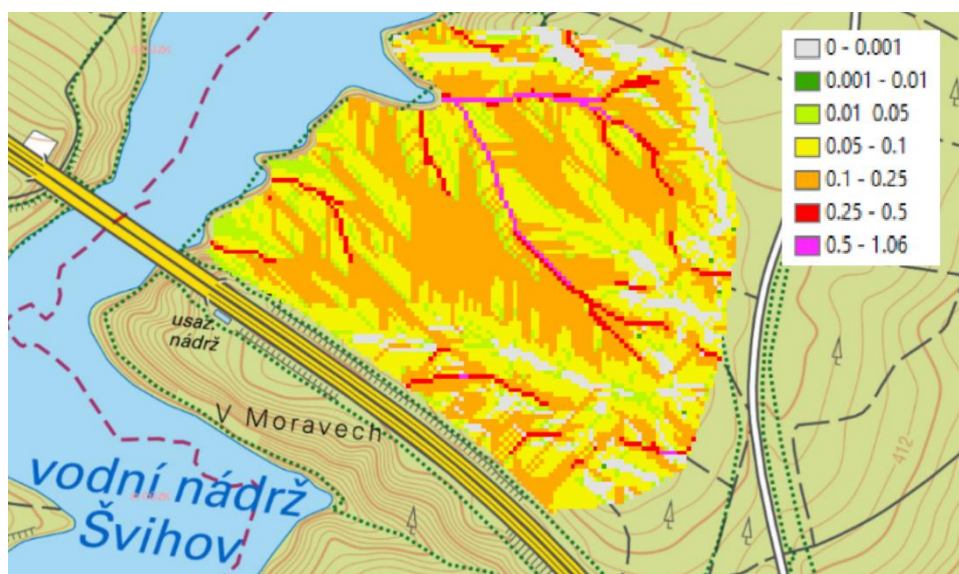
**Obr. 23.** Povodí části spáleniště přímo odvodněné do Sedlické zátoky VN Švihov, na němž bylo posuzováno erozní ohrožení modelem SMODERP-2D.

Třemi hlavními vstupy modelu jsou vrstvy půdního pokryvu, zrnitosti půd a průběh návrhové srážky. Půdní pokryv byl v prostoru požářiště parametrizován zjednodušeně jako orná půda, neboť potřebné fyzikální parametry modelu pro spálenou lesní půdu nebyly v podmínkách ČR dosud uspokojivě odvozeny. Výsledek tedy reprezentuje nejhorší možný scénář. Vrstva zrnitosti ve formě půdních druhů dle



mezinárodní USDA klasifikace byla získána pomocí WPS služby poskytované odborné veřejnosti na serveru rain.fsv.cvut.cz. Návrhová srážka byla zvolena v shodě se studií transportu popela, tedy ve formě 100letého návrhového hyetogramu šestihodinové srážky nejintenzivnějšího typu A.

Hlavním výstupem modelu je šířka erozních rýh v každém pixelu modelované domény. Tento výsledek je znázorněn na obrázku 24. Ze známé geometrie rýh byl vyčíslen jejich celkový objem a pomocí rastru procentuálního zastoupení jílu redukován na objem jemnozrné frakce. Její celková hmotnost byla vyčíslena na 7600 tun. Tato hodnota představuje o dva řády vyšší hodnotu než objem transportovaného popela. Vztaheno k ploše Sedlické zátoky a části Švihova od jejího ústí po profil hráze a k odhadované průměrné hloubce 10 m (konzervativní odhad na straně bezpečnosti) to představuje koncentraci 260 mg/l, což je 26x vyšší hodnota než vyhláškou stanovený limit pro úpravu surové vody. Z toho vyplývá značný potenciál ohrožení jakosti odebírané surové vody.



Obr. 24. Šířka erozních rýh v metrech dle modelu SMODERP-2D.

#### 4.3.4. Modelování dopadů lesního požáru a následné eroze na jakost vody ve vodní nádrži

Proudění v nádrži, šíření a změny koncentrací znečišťujících látek a jejich chemické procesy v nádrži jsou třídídimenzionální problém, při jehož řešení je nutno zohlednit především teplotní stratifikaci v nádrži v různých ročních obdobích, vliv větru na proudění v nádrži a zároveň proměnný vnos znečišťujících látek, jejich transport a chemickou přeměnu a odbourávání. Je zřejmé, že problém je dynamický s řadou proměnných vnitřních vazeb, vyžadující značné množství vstupních dat a zavedení některých předpokladů. Z hydrologických dat ovlivňují charakteristiky proudění a transport znečišťujících látek přítoky a kolísání hladiny v nádrži.

Pro řešení takovýchto událostí doporučujeme sestavit 3D numerický model proudění vody v nádrži, popisující hydrologické, hydraulické, chemické a biologické procesy v nádrži a umožňující simulovat šíření znečištění způsobeného splachem polutantů z požárů a následný možný dopad na kvalitu vody ve vodárenské nádrži.

Problematika vlivu lesních požárů na kvalitu vody ve vodárenských nádržích byla publikována především v USA a Austrálii, kterých se tento problém často a významně týká (např. Struzik, 2018 a Writer, 2012). K řešení je možné přistoupit dvěma způsoby:

1. zabývat se transportem popela, jako pevné složky zplodin hoření – s obsahem především solí kovů (uhličitany, fosforečnany, sírany) a jemných jílových částic – takto je úloha zjednodušena na znalost rychlosti šíření konzervativní znečišťující látky a její koncentrace v nádrži – lze usuzovat, jak rychle a v jakých koncentracích se znečištění dostane k odběrnému objektu a následně, jaký vliv bude mít znečištění na zvýšení nákladů na úpravu vody
2. řešit úlohu jako komplexní biologické znečištění, při kterém dochází k velkému nárůstu živin (popel ze shořelé vegetace je v podstatě kvalitním hnojivem) obsahujícím organické prvky C, N, P, K, následným chemickým procesům, kterým ve vodě podléhají organické sloučeniny těchto látek, což může vést k eutrofizaci nádrže, a tedy dalším problémům při úpravě vody.

Vstupní data pro modelování zahrnují následující:

- Topologická data – batymetrie (tvar dna zátopy), DMT
- Hydrologická data – přítoky, odtoky do nádrže, kolísání hladiny
- Meteorologická data – teplota vzduchu, vlhkost, srážky, směr a rychlost větru, radiace
- Teplotní profily v nádrži, teplota vody v přítocích
- Množství vnesených znečišťujících látek z požárů a následné erozní události

V nádržích se významně mění teplotní stratifikace během roku. Zatímco v letním období se vytváří typická letní stratifikace s velkým rozdílem teplot mezi hladinou a dnem nádrže, v jarním a podzimním období jsou teploty po vertikále relativně vyrovnané. K posouzení charakteristik proudění a šíření znečišťujících látek, je třeba sestavit trojrozměrný hydrodynamický model pohybu vody v nádrži (3D HD model) jako např. MIKE 3 FM (DHI 2021), který umožňuje modelovat stratifikaci teplot v nádrži včetně teplotní výměny mezi vodou v nádrži a proudícím vzduchem nad hladinou<sup>13</sup>. Teplotní stratifikace včetně charakteristik proudění v jednotlivých vrstvách „po hloubce“ je významně ovlivňována větrem nad nádrží. Matematický model simuluje vliv účinku větru – do výpočtu vstupuje směr a rychlost větru (jako proměnná veličina v čase i v prostoru nad nádrží). Model třídy 3D HD zohledňuje i vlhkost vzduchu a intenzitu slunečního záření, resp. i poměrné „zastínění“ vodní hladiny.

Matematický model 3D HD MIKE 3 FM je založen na řešení Navier-Stokesových pohybových rovnic numerickou metodou konečných objemů. Základní řídicí rovnice modelu MIKE 3 FM jsou uvedeny v Příloze 2 této metodiky.

Zásadní význam při použití vícerozměrných matematických modelů hraje použitý „turbulentní model“, který popisuje vnitřní turbulenci proudění a přenos hybností mezi jednotlivými vrstvami (elementy) trojrozměrné výpočetní sítě. Vhodný turbulentní model pro 3D numerický model proudění je výsledkem kalibrace modelu – po zkušenostech s obdobnými úlohami lze předpokládat, že bude použit turbulentní model, popsáný Smagorinského rovnicí. Tento přístup vychází ze zjednodušujícího principu, že turbulentní napětí v kapalině jsou úměrná gradientu rychlosti a vzdálenosti mezi jednotlivými elementy výpočetní sítě.

Šíření znečišťující látky a její koncentrace v nádrži je modelováno pomocí transportního modulu většinou za zjednodušujícího předpokladu konzervativního šíření znečišťujících látek, tj. během doby simulace nedochází k rozpadu či přeměně těchto látek. Transportní modul pracuje na principu AD „advection – dispersion“ (unášení a rozptyl), základními vstupními parametry simulačního modulu jsou

---

<sup>13</sup> MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation. DHI Software Documentation, 2021

způsoby výpočtu součinitele disperze v horizontální i vertikální rovině a koncentrace znečišťují látky v přítocích.

Modelování nekonzervativních biologických procesů představuje komplexní problém mnoha navzájem propojených procesů. Je proto výhodné použít šablonový princip jako např. u univerzálního stavebnicového modul MIKE ECO Lab<sup>14</sup>. Tento modul umožňuje transformovat jakýkoli vodní ekosystém na numerický model, jednoduše definovat proces pomocí standardních šablon pro eutrofizaci, kvalitu vody, jejich chemické přeměny a transport těžkých kovů. Šablona MIKE ECO Lab je nezávislá na diskretizaci výpočetní sítě, umožňuje tedy např. i dodatečnou úpravu schematizace HD, pokud by se po simulacích šíření znečišťujících látek jevila potřebnou. Použití modulu MIKE ECO Lab vyžaduje spolupráci experta na biologické a chemické procesy v nádržích kvůli správnému pochopení a následné správné schematizaci dle vlastních či předpřipravených řídicích rovnic.

#### Pilotní studie: Stavba modelu znečištění pro Sedlickou zátoku nádrže Švihov

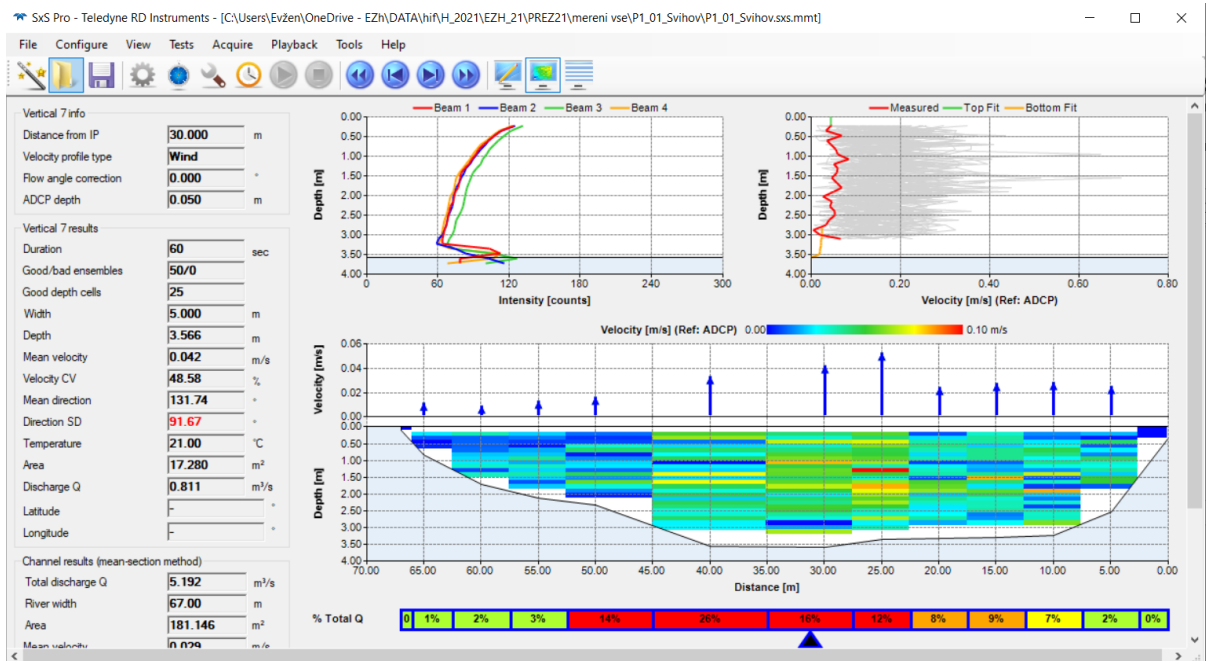
Pro pilotní aplikaci modelu byla vybrána zátoka Sedlického potoka zejména s ohledem na to, že Sedlický potok odvodňuje silně zalesněné povodí. Dále bylo již prokázáno, že Sedlická zátoka vykazuje vysokou pravděpodobnost výskytu požáru v porovnání s ostatními plochami kolem nádrže. V rámci pilotního řešení byl realizován funkční prototyp 3D modelu části nádrže – Sedlické zátoky, na kterém budou ověřeny navržené postupy a použitelnost a dostatečnost podkladových dat.

Z dostupných topologických dat byla vytvořena polohopisná nestrukturovaná výpočetní síť programového prostředku MIKE 3 FM (FM = Flexible Mesh) pro Sedlickou zátoku s celkovým počtem 20 252 horizontálních výpočetních elementů (Obr. 26). Ve vertikální směru se předpokládá prostorové rozlišení 1 až 2 m – v rámci nestrukturované výpočetní sítě MIKE 3 FM rovněž proměnlivé.

Okrajové podmínky modelu je možné stanovit z výsledků monitoringu provozovaného Povodí Vltavy, s.p. na přítoku do nádrže Želivka ze Sedlického potoka (odtok z VD Němčice), stejně tak jako časový průběh úrovně hladiny v nádrži, který je určující pro dolní okrajovou podmínku modelu Sedlické zátoky. Pravidelně sledován je rovněž přítok do VD Němčice. K dispozici jsou jak běžné hydrologické údaje, tak i parametry jakosti vody. Vstupní parametry, které nejsou tímto monitoringem postihnuty je nutné změřit v rámci mimořádné kampaně pro vytvoření a kalibraci modelu. Ukázka výstupu takové kampaně je uvedena na obr. 23. Jde o polní měření průtoku v předem vytyčeném profilu při znalosti okrajové podmínky průtoku, v tomto konkrétním případě pod objektem Němčické zdrže. Na Obr. 25 je uvedeno rozdělení průtoků a svislicových rychlostí v nádrži, při známém přítoku a známém větrném poli (norma rychlosti a směr větru).

---

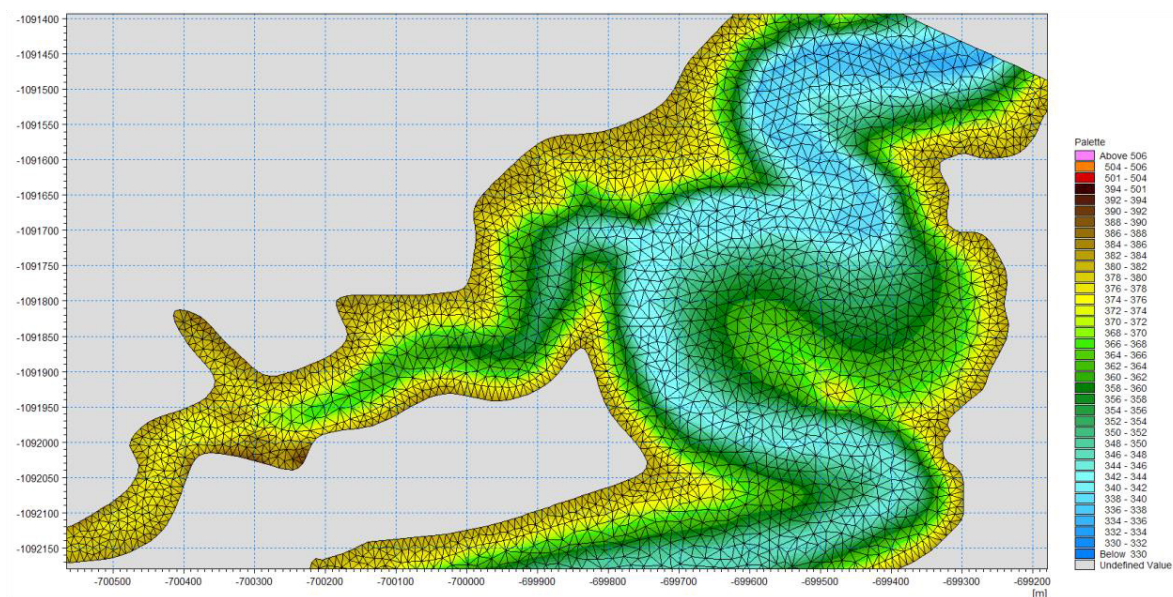
<sup>14</sup> MIKE 3 Flow Model FM, ECO Lab / Oil Spill Module, User Guide. DHI Software Documentation, 2021



**Obr. 25.** Ukázka měření rychlostních a průtokových profilů pro kalibraci a verifikaci 3D HD modelu pomocí dopplerovské technologie ADCP Stream Pro – UVGZ AV CR - v profilu P1 pod Němčickou zdří - výsledný profil bodových rychlostí v měřené svislici 7.

Kalibrace modelu je důležitým krokem při řešení jakéhokoliv úkolu metodou matematického modelování. Kalibrace 3D modelů spočívá především v nastavení odpovídajících materiálových konstant, jako jsou parametry použitého turbulentního modelu a odporové parametry. Tyto hodnoty mohou být upřesněny například hydraulickými modely, nebo měřením in situ.

Výstupy modelování množství popela a jemných jílových částic půdy transportovaných návrhovou srážkou z území postiženého požárem vstupují do modelu jako modelová kontaminace. Výsledkem modelování je vývoj koncentrace sledovaného parametru jakosti surové vody v prostoru modelované zátoky.



**Obr. 26.** Výpočetní síť a batymetrie Sedlitzké zátoky – detail při ústí do celkové nádrže



#### 4.3.5. Vliv eroze na kvalitu vody ve vodárenských nádržích

Výsledky modelování množství popela a jemných suspendovaných částic půdy, které se dopraví do prostoru zátopy nádrže, naznačují, že rozhodující dopady na jakost vody v nádrži bude mít pravděpodobně erozní proces.

Pro obecné hodnocení očekávaných dopadů lesních požárů na jakost vody v nádrži lze tedy do jisté míry vycházet ze zkušeností s dopady kalamitní těžby dřeva v povodí vodních nádrží. Kalamitní těžba, která probíhá v posledních několika letech v souvislosti s odumřením smrkových kultur napadených lýkožroutem smrkovým, vedla v roce 2020 k ohrožení jakosti surové vody v nádrži Vranov a rovněž v nádrži Vír. K ohrožení jakosti surové vody došlo zejména díky malému objemu vody v nádržích po několikaletém suchu v období let 2015 až 2019 a následných intenzivních deštích v létě 2020.

Nejvíce problematickým parametrem jakosti vody z hlediska její následné úpravy pro obě nádrže byl obsah organických látek hodnocený pomocí ukazatelů CHSK-Mn nebo celkový organický uhlík (TOC). Nepříznivý vývoj byl zaznamenán dále pro parametry barva, huminové látky, mangan a měď. Skokově narostly koncentrace hořčíku.

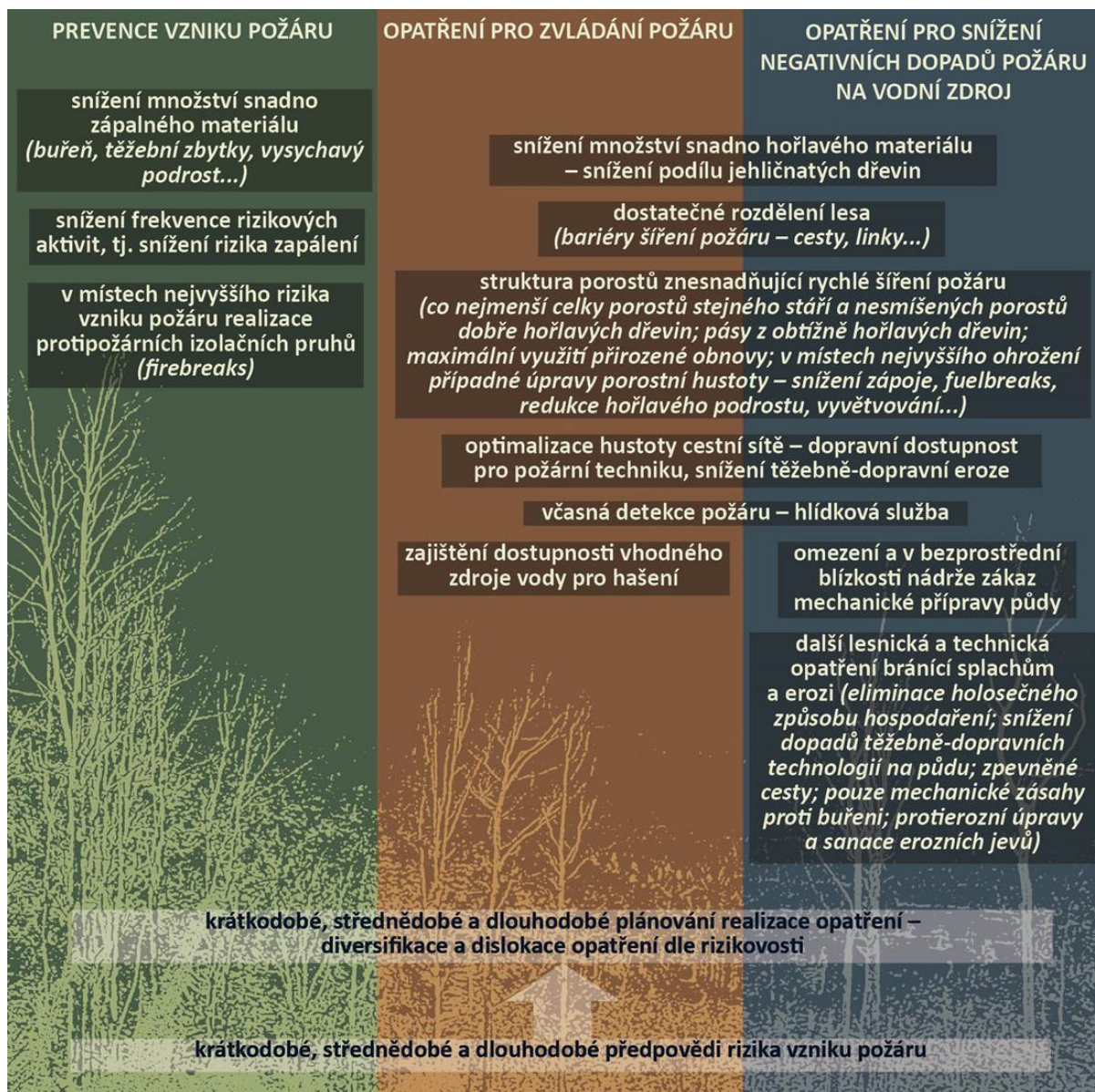
Legislativně jsou limitní hodnoty ukazatelů jakosti surové povrchové vody zakotveny v příloze č. 13 vyhlášky č. 428/2001 Sb. kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích). Uvedené mezní hodnoty ukazatelů v tabulce limitují zařazení do příslušné kategorie jakosti (A1, A2, A3). Kromě ukazatelů uvedených v této příloze nesmí surová voda obsahovat další mikroorganismy, parazity a látky jakéhokoliv druhu, včetně všech ukazatelů uvedených ve vyhlášce č. 252/2004 Sb., v počtu nebo koncentraci, které by mohly po její úpravě na vodu pitnou ohrozit veřejné zdraví.

Tab. 10. Technologické limity vybraných ukazatelů jakosti surové vody na pilotních nádržích

Maximální hodnoty parametrů jakosti surové vody při stávající technologii	úpravna vody Želivka, nádrž Švihov	úpravna vody Švařec, nádrž Vír	úpravna vody Vír, nádrž Vír	úpravna vody Štítary, nádrž Vranov
maximální koncentrace nerozpuštěných látek [mg/l]	10	10	11	5
maximální zákal [ZF(n)]	5 (výsledná pitná voda)	5	7	10 [NTU]
max. TOC (celkový organický uhlík [mg/l])	10	8	10 (CHSK-Mn)	8-9 (CHSK-Mn)
hloubka odběrného profilu	35	10, 30, 50 m pod max. hladinou		nejčastěji 9 m, výjimečně 6 m

## 4.4. Preventivní a operativní opatření pro prevenci vzniku a šíření přírodních požárů a zajištění jakosti pitné vody získávané z vodních zdrojů ovlivněných lesních požárem

### 4.4.1. Lesnická protipožární opatření



### Základní specifikace opatření

Podrobná specifikace možných opatření k omezení vzniku a šíření požárů je uvedena v Katalogu lesnických protipožárních opatření (dále v textu). Naléhavost jejich realizace a jejich umístění se bude do značné míry odvíjet od vývoje klimatických podmínek a s tím souvisejícího vývoje zdravotního stavu a vitality lesních porostů. V krátkodobém či střednědobém horizontu lze předpokládat rozpad dalších smrkových porostů na nevyhovujících stanovištích (zejména klimaticky nevyhovujících), a to především v obdobích s několika suchými a teplými vegetačními sezónami za sebou. Opatření by proto měla být přednostně soustředěna do jehličnatých, zejména smrkových porostů.



## SHRNUTÍ OPATŘENÍ V POROSTECH

### Opatření ve stávajících dosud vitálních jehličnatých porostech:

- rozčlenění na menší celky;
- včasné výchovné zásahy, vyšší redukce hustoty ve srovnání s běžnými modely (podpora individuální mechanické stability stromů);
- snížení množství zápalného materiálu, zejména odstranění těžebních zbytků v blízkosti potenciálních zdrojů zapálení;
- důsledné uplatnění těžebně-dopravních technologií šetrných k půdě;
- při obnově upřednostnit, kde je to možné, obnovní postupy neodkrývajícími půdu; při pasečném hospodářském způsobu uplatnit pouze formu podrostoní maloplošnou a násečnou;
- výsadby pásů a ochranných pláštů z huře hořlavých (listnatých) dřevin v místech se zvýšeným požárním rizikem a přítomností potenciálních zdrojů zapálení;
- v místech s největším rizikem požáru případně realizace protipožárních izolačních pruhů a protipožárních pásů.

### Opatření v rozpadajících se jehličnatých porostech a na holinách po nich:

- snížení množství zápalného materiálu, zejména odstranění těžebních zbytků v blízkosti potenciálních zdrojů zapálení;
- minimalizovat plošnou mechanickou přípravu půdy před výsadbou, případně realizovat další opatření zabraňující erozi a splachům;
- upřednostnit výsadby stanovištně vhodných listnáčů;
- optimalizovat zásahy proti buření – termíny, způsob a intenzitu zásahů volit tak, aby bylo dosaženo snížení zápalnosti a snížení konkurence se sazenicemi, zároveň však bylo podporováno příznivé mikroklima a omezen splach z holin.

### Opatření v listnatých porostech:

- upřednostnit nepasečné způsoby hospodaření (trvalé krytí půdy = omezení splachů); při pasečném hospodářském způsobu uplatnit pouze formu podrostoní maloplošnou a násečnou;
- upřednostnit přirozenou obnovu;
- při umělé obnově minimalizovat plošnou mechanickou přípravu půdy před výsadbou;
- podporovat pestrou dřevinou skladbu (stanovištně původní dřeviny);
- optimalizovat zásahy proti buření – termíny, způsob a intenzitu zásahů volit tak, aby bylo dosaženo snížení zápalnosti a snížení konkurence se sazenicemi, zároveň však bylo podporováno příznivé mikroklima a omezen splach z holin.

## DALŠÍ OPATŘENÍ

Další opatření nevázaná na konkrétní typy porostů, jako jsou optimalizace cestní sítě či zabránění erozi jsou uvedena níže v Katalogu lesnických protipožárních opatření.

<b>ROZČLENĚNÍ VĚTŠÍCH SOUVISLEJŠÍCH JEHLIČNATÝCH POROSTŮ, SNÍŽENÍ PODÍLU JEHLIČNATÝCH POROSTŮ</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Snížit riziko vzniku většího požáru, zpomalení postupu požáru, usnadnění přístupu do porostů při hašení, vytvoření východiska pro realizaci izolačních odseků.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	V částech území, kde jsou rozsáhlé komplexy borových a smrkových porostů.
<i>Popis opatření</i>	<p><b>ROZČLENĚNÍ</b></p> <p>Jde o rozdělení větších souvislých ploch jehličnatého lesa, a to zejména mlazin a tyčkovin, na menší do velikosti maximálně cca 5 ha. Využity jsou stávající lesní cesty, vodoteče, tam kde jich není dostatek, jsou zakládány průseky, z nichž se odstraní hořlavý materiál, a jehličnaté stromy se vyvětví nejméně do výšky 1,5 m. Průseky se udržují čisté, tj. bez snadno zápalného materiálu.</p> <p><b>SNÍŽENÍ PODÍLU JEHLIČNATÝCH DŘEVIN</b></p> <p>Jde o omezení jejich výsadby, a to zejména tam, kde jsou v současnosti souvislé plochy čistě jehličnatých porostů – v případných nových výsadbách použít jehličnany zejména v porostních směsích či malých skupinách. V příbřežním 50 m širokém pásu vodních zdrojů lze z důvodu snížení listnatého opadu do nádrže tolerovat vyšší zastoupení jehličnatých dřevin. V lokalitách, kde stávající jehličnaté porosty odumřely (včetně příbřežního pásma), upřednostnit při obnově listnaté dřeviny.</p> <p>V mladých smíšených porostech případně snížit zastoupení jehličnanů prostřednictvím vhodných výchovných zásahů. Vzhledem k tomu, že cílem je nejen snížení hořlavosti porostů, ale také jejich mechanická a ekologická stabilita měly by být v maximální možné míře zapojovány dřeviny přirozené druhové skladby – kostra porostů s <math>\geq 50\%</math> dřevin přirozené druhové skladby.</p>
<i>Parametry</i>	Šířka rozdělovacích prvků 4–5 m.
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	Účelná je kombinace rozdělovacích prvků s protipožárními pásy zpomalujícími hoření a pásy hůře hořlavých dřevin, a to v místech vysokého rizika vzniku požáru.
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	Po celém území ochranných pásem vodní nádrže je žádoucí plochu jehličnatých porostů co nejvíce snižovat a dostatečně fragmentarizovat. Naléhavost realizace opatření odvozovat od požární rizikovosti dané lokality – postupně ve všech porostech s vysokým rizikem vzniku lesních požárů (dle prvních dvou znaků čtyřmístného kódu, Tab. 1: 0a, 1a, 2a, a to prioritně v rozsáhlých celcích rizikových porostů v bezprostřední blízkosti nádrží.

<b>SNÍŽENÍ MNOŽSTVÍ ZÁPALNÉHO MATERIÁLU V LESE – ODSTRAŇOVÁNÍ TĚŽEBNÍCH ZBYTKŮ A MRTVÉHO DŘEVA, ELIMINACE BUŘENĚ V KULTURÁCH</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Snižit pravděpodobnost vzniku pozemního požáru snížením množství snadno zápalného materiálu v lese.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	<p><u>ODSTRAŇOVÁNÍ TĚŽEBNÍCH ZBYTKŮ A MRTVÉHO DŘEVA</u></p> <p>Tam, kde požární riziko je natolik vysoké, že je nezbytné snížit pravděpodobnost zapálení porostu, zejména v mladších jehličnatých porostech v okolí cest či jiných míst se zvýšeným rizikem zapálení. Vzhledem k důležité roli mrtvé hmoty v koloběhu živin, při zpomalení odtoku vody z porostů a pro udržení druhové diverzity, je při rozhodování, zda mrtvou hmotu odstraňovat či omezovat její množství, důležité posoudit nejen rizika požární, ale také rizika spojená se snížením retence a s nutriční degradací půd (zhoršení produkce, snížení úspěšnosti přirozené obnovy apod.) a riziko splachů do nádrže.</p> <p><u>ELIMINACE BUŘENĚ V KULTURÁCH</u></p> <p>Tam, kde pokryvnost a charakter buřeně výrazně zvyšují riziko vzniku požáru, zejména v jehličnatých kulturách se souvislou travinnou buřeně v okolí cest či jiných míst se zvýšeným rizikem zapálení. Primárně volit mechanické zásahy. Vzhledem k tomu, že z hlediska zajištění příznivého mikroklimatu jsou žádoucí méně intenzivní zásahy proti buřeni, je při rozhodování o míře odstranění buřeně nutné posoudit nejen požární rizika, ale také rizika nezdaru zalesnění, vhodné tak budou zejména zásahy v pruzích. Zohlednit je třeba také schopnost buřeně snížit splachy.</p>
<i>Popis opatření</i>	<p><u>ODSTRAŇOVÁNÍ TĚŽEBNÍCH ZBYTKŮ A MRTVÉHO DŘEVA</u></p> <p>Částečné či úplné odstraňování těžebních zbytků a případně i samovolně vznikajícího mrtvého dřeva z porostů.</p> <p><u>ELIMINACE BUŘENĚ V KULTURÁCH</u></p> <p>Celoplošný nebo pruhový zásah, případně letní opakování zásahu i v případě, že pro růst dřevin již nebude potřebné (cílem zásahu je zabránění vzniku vyššího množství suché trávy v kultuře). Na plochách, z kterých hrozí splach do nádrže volit pouze mechanické zásahy proti buřeni, aby nedocházelo k úplnému obnažení povrchu (a zamezilo se případnému průniku přípravků do vod), a to ošlapáváním nebo vyžínáním při současném zajištění, že rostlinná biomasa nebude splachována do nádrže.</p>
<i>Parametry</i>	–
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	Odstraňování těžebních zbytků a mrtvého dřeva může být aplikováno jako samostatné opatření, kromě toho je však také součástí realizace protipožárních pásů zpomalujících hoření.
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	Zejména v porostech s vysokým rizikem vzniku lesních požárů mladšího věku (dle prvních tří znaků čtyřmístného kódu, Tab. 1: 0a0 až 3, 0a1 až 3, 2a0 až 3, a to prioritně v bezprostřední blízkosti potenciálních zdrojů zapálení (cesty, stavby...).

<b>ZPŮSOB HOSPODAŘENÍ OMEZUJÍCÍ NEŽÁDOUCÍ SPLACHY A EROZI</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Zajistit krytí půdy, omezit narušení povrchu půdy, a tak minimalizovat erozi a splachy anorganické i organické hmoty a nežádoucích látek do nádrže.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	Po celém území ochranných pásem vodní nádrže tam, kde hrozí splach do nádrže (přílehlé svahy, prudké svahy...).
<i>Popis opatření</i>	<p>Udržování nepřetržitosti porostního prostředí obnovními postupy neodkrývajícími půdu, a tím zpomalení odtoku vody – nepasečné způsoby hospodaření; kde to je možné bohatší vertikální i horizontální struktura porostů (věková diferenciacie, maloplošné smíšení, zejména jednotlivé a skupinkové); maximalizace využití přirozené obnovy. Při pasečném hospodářském způsobu lze uplatnit pouze formu podrostní maloplošnou a násečnou.</p> <p>Při umělé obnově využít většího počtu sazenic, než je udávané minimum, minimalizovat plošnou mechanickou přípravu půdy před výsadbou (v bezprostřední blízkosti nádrže pouze jamková či plošková), zákaz klučení pařezů. Optimalizovat zásahy proti buřeni – snížení zápalnosti, snížení konkurence se sazenicemi a zároveň podpora mikroklimatu a omezení splachu.</p> <p>Při výchově smrkových porostů usilovat o jejich stabilitu a o zamezení hromadění humusových horizontů s možným rizikem kontaminace vody huminovými kyselinami – včasné výchovné zásahy, vyšší redukce hustoty ve srovnání s běžnými modely (podpora individuální mechanické stability stromů, snížení celkového množství opadu a zlepšení podmínek k jeho dekompozici).</p> <p>V rámci péče o cestní síť usilovat o maximalizaci rozptylu vody z cesty i příkopů a její infiltraci v porostech. Zamezovat soustředěnému odtoku vody v kolejích a po koruně cest.</p>
<i>Parametry</i>	–
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	–
<i>Diferenciacie a dislokace opatření</i>	Přednostně v PHO 1. Zejména na exponovaných stanovištích, na prudkých svazích o sklonu nad 40 % na bohatých a kyselých SLT. Z hlediska charakteru splachu prioritně v jehličnatých porostech (huminové kyseliny).

<b>SNÍŽENÍ VLIVU TĚŽBNĚ-DOPRAVNÍCH TECHNOLOGIÍ NA PŮDU</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Snížit erozi po těžbě a soustředování dříví.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	Po celém území ochranných pásem vodní nádrže.
<i>Popis opatření</i>	<p>Maximální uplatnění technologií šetrných k půdě, např. lanovky, lanové systémy a koňské potahy. Při použití kolových soustředovacích prostředků omezit narušení povrchu půdy krytím drah pro vlečení kmenů klestem, tvorbou můstků přes toky (i malé). Na vodou ovlivněných stanovištích provádět soustředování dříví pojízdnými mechanizačními prostředky výhradně v suchém nebo zimním období při zamrzlé půdě.</p> <p>Těžební odpad vyklízet, pokud možno, mimo hranice ochranných pásem nebo zabránit jeho odnosu do vodní nádrže. Sanace případných erozních rýh, ploch se strženým nadložním humusem, zhutnělých míst apod. Používat biologicky odbouratelné hydraulické kapaliny a oleje.</p>
<i>Parametry</i>	–
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	Společně s úpravou parametrů lesních cest.
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	V maximálním rozsahu v PHO 1. Celkově zejména na stanovištích silně ohrožených erozí (exponovaná stanoviště, svahy o sklonu nad 40 % na bohatých a kyselých SLT) a na vodou ovlivněných stanovištích.



<b>ÚPRAVA HUSTOTY A TECHNICKÝCH PARAMETRŮ LESNÍCH CEST PRO PRŮJEZD POŽÁRNÍ TECHNIKY A SNÍŽENÍ TĚŽEBNĚ-DOPRAVNÍ EROZE</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Optimalizace hustoty a parametrů lesní sítě, aby jednak byly dostatečně dostupné ohrožené části lesního majetku pro jednotky požární ochrany, jednak byla co nejvíce omezena těžebně-dopravní eroze.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	V částech území, kde parametry lesní sítě nevyhovují výše uvedeným cílům.
<i>Popis opatření</i>	<p><u>OPTIMÁLNÍ HUSTOTA ZPEVNĚNÝCH CEST</u></p> <p>Cílem by mělo být:</p> <p>1) Zajistit obecně dostatečnou hustotu průjezdných, pokud možno zpevněných, cest zajišťujících přístup do klíčových míst pro hašení (zejména ke zdrojům vody) a do míst, kde by případný lesní požár mohl vést s vysokou pravděpodobností ke škodám na zdraví a životech, na majetku nebo významně ohrozit kvalitu vody. Odpovídající hustota zpevněných cest zároveň může snižovat riziko těžebně-dopravní eroze (snížení objemu splavenin z cest).</p> <p>2) Snižit erozi zrušením nepotřebných cest.</p> <p><u>ASANACE NEPOTŘEBNÝCH CEST</u></p> <p>Případné nepotřebné lesní cesty zatravnit či zalesnit a trvale zabezpečit před erozí. U erodovaných cest ve svahu a v zářezu, kde zatravnění může být nedostačující, zvážit úpravu terénu – vytvoření příčných vln („kapes“), v kterých se, po dobu, než asanovaná cesta zaroste, zachycuje voda a splaveniny.</p>
<i>Parametry</i>	<p>Přístupovou komunikací pro požární techniku musí být vozovka šířky minimálně 3 m, mělo by jít o zpevněnou cestu, nejlépe s úplným odvodněním koruny. Bez problémů pro přístup požární techniky parametricky vyhovují lesní cesty třídy 1L, v naprosté většině případů by měly bezproblémový přístup zajistit i lesní cesty třídy 2L (jsou-li parametrizovány v souladu s ČSN 73 6108). Lesní svážnice (3L) přístup požární techniky mohou a nemusí umožnit – mají poměrně velkou variabilitu provedení, jejich průjezdnost pro požární techniku je odlišná úsek od úseku, roli zde hraje počasí i parametry přiléhajících porostů.</p> <p>Kritériem pro zajištění dostatečné eliminace těžebně-dopravní eroze může být mimo jiné hustota odvozních cest (m/ha) v rámci typu transportního segmentu dle metodického postupu „Posuzování erodovatelnosti a hydrických vlastností lesních půd a posuzování a kvantifikace objemu splavenin – hodnocení rizik erozí“ (<a href="https://www.csvts.cz/images/eu/MP_2_2019.pdf">https://www.csvts.cz/images/eu/MP_2_2019.pdf</a>).</p>
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	–
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	V území s nevyhovující cestní sítí a zároveň s vysokým rizikem vzniku lesních požárů (dle prvních dvou znaků čtyřmístného kódu, Tab. 1: 0a, 1a, 2a, a části porostů 1b (s vysokým podílem ploch s Fire Risk Index > 0,4).

<b>PROTIPOŽÁRNÍ PÁSY ZPOMALUJÍCÍ ŠÍŘENÍ POŽÁRU (FUELBREAKS)</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Zpomalení šíření požáru pro jeho včasnou lokalizaci, zabránění vzniku rozsáhlého korunového požáru.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	V místech s velmi vysokým rizikem vzniku požáru daným nepřetržitou či častou přítomností zápalného zdroje zároveň obklopených souvislým víceméně homogenním komplexem porostů s vysokým požárním rizikem. Například v bezprostředním okolí frekventovaných silnic, tábořišť, chatových kolonií v lokalitách s vysokým rizikem vzniku lesního požáru apod.
<i>Popis opatření</i>	Opatření zahrnuje výrazné snížení hustoty stávajícího porostu (nejlépe tak, aby se koruny nedotýkaly), odstranění ležícího mrtvého dřeva, vytěženého dřeva a klestu, odstranění keřového patra a dalšího snadno zápalného a hořlavého podrostu, odstranění případných suchých větví do výšky minimálně 1,5–2 m nad zemí. Výsledný pás pak má podobu připomínající parkový les. Při umístění a parametrizaci pásů musí být brán v úvahu převládající směr větru ve vztahu k celkové topografii terénu. Důležitou je systematická péče o tyto pásy, neudržovaný protipožární pás bude nefunkční. Snížením hustoty porostu naroste riziko vzniku pozemního požáru (snazší vysychání podrostu). Opatření je tedy odůvodnitelné pouze tam, kde zpomalení šíření požáru a snížení rizika přechodu pozemního požáru do korun je prioritním cílem – například tam, kde je riziko zapálení i bez zásahu (v současném stavu) velmi vysoké a zároveň je velmi vysoké riziko rychlého šíření korunového požáru.
<i>Parametry</i>	Šířka minimálně 15–20 m pokud je pás situován mezi dva úzké izolační pruhy s obnaženou půdou. Pro podmínky s velmi vysokým nebezpečím vzniku a šíření požárů je doporučována minimální šířka těchto pásů 90 m. Šířka pásů, míra proředění porostu i výška vyvětvění musí být vždy přizpůsobovány stanovištním podmínkám, zejména geomorfologii území. Ve svahu snáze dojde k zapálení korun – jsou přehřívány unikajícím kouřem, snáze se spodní část korun dostává do kontaktu s plameny pozemního požáru. Na svazích kolem 30 % sklonu a prudších tak výrazně roste riziko vzniku korunového požáru směrem po svahu dolů od zápalného zdroje, narůstá také rychlost jeho šíření. Šíře pruhu směrem dolů po svahu tak musí být navýšena a směrem nahoru po svahu od potencionálního zdroje zapálení může být případně snížena. V úzkých terénních zářezech je vysoké riziko přenosu požáru na protisvah (dopadště jisker a větrem unášeného hořícího materiálu) – může být tak potřebné učinit obdobné opatření i v protisvahu.
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	Kombinace je účelná zejména s izolačními pruhy. V bezprostřední blízkosti zápalného zdroje je užší izolační pruh (1–3 m), na něj navazuje pás zpomalující hoření o minimální šířce 20 m a znovu izolační pruh o šířce 1–3 m. Pro větší efektivitu lze rozdělit pás zpomalující hoření příčnými izolačními pruhy (opět 1–3 m širokými) a to po 25–50 m.
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	Jde o opatření s vysokou provozní i ekonomickou náročností – je odůvodněné pouze výjimečně, a to v místech, kde nelze jinak eliminovat extrémně vysoké riziko rychlého rozhoření požáru na větších plochách. Prioritně v místech s velmi vysokou pravděpodobností zapálení (např. velmi frekventovaná cesta) obklopených souvislým víceméně homogenním komplexem porostů s vysokým požárním rizikem (zejména Fire Risk Index 0,6 a vyšší) a předpokladem rychlého šíření korunového požáru, a to zejména pokud již tam k zapálení porostů v minulosti došlo.

<b>PÁSY Z HŮŘE HOŘLAVÝCH DŘEVIN, OCHRANNÉ POROSTNÍ PLÁŠTĚ Z HŮŘE HOŘLAVÝCH DŘEVIN</b>	
Základní cíl realizace	Zpomalení šíření požáru pro jeho včasnou lokalizaci, zabránění vzniku korunnového požáru, zabránění vzniku velkého lesního požáru.
Obecné vymezení lokace	V místech s vysokým rizikem vzniku požáru daným nepřetržitou či častou přítomností zápalného zdroje, například v bezprostředním okolí frekventované silnice procházející dobře zápalnými porosty, okolí tábořišť, chatových kolonií v lokalitách s vysokým ohrožením lesními požáry apod.
Popis opatření	Jde o nově vysázené pásy, které jsou vysazovány z hůře hořlavých listnatých dřevin. Hustota porostu může být vyšší než u pásů zpomalujících šíření požáru realizovaných ve stávajících lesních porostech (vzhledem k nižšímu riziku zapálení a hoření), porost by však měl být, pokud možno, rozvolněnější než běžný porost – cílem je uvolněný či případně přerušovaný zápoj (tam kde je riziko požáru nejvyšší). Pásy by ideálně měly postupně vytvořit ochranný systém, který by zamezil šíření požáru z místa jeho pravděpodobného vzniku (jako jsou železnice, chatové osady, veřejná tábořiště apod.) a to zejména do lehce zápalných a hořlavých porostů. Ze stejných dřevin je účelné vytvářet ochranné porostní pláště lemující nově zakládané jehličnaté porosty, pokud jsou větší rozlohy (například kalamitní plochy).
Parametry	Tyto pásy a ochranné porostní pláště by měly být v našich podmínkách minimálně 20 m široké, v běžných podmínkách by měly být široké cca 50 m či větší. Šířka se přitom musí odvíjet od reliéfu (širší na svahu), výšky porostů a dalších faktorů ovlivňujících šíření požáru. Vhodnými dřevinami jsou například lípy ( <i>Tilia</i> spp.), javory ( <i>Acer</i> spp.), jasaný ( <i>Fraxinus</i> spp.), olše ( <i>Alnus</i> spp.).
Kombinace s dalšími opatřeními	Je možné kombinovat s izolačními pruhy i protipožárními pásy zpomalujícími hoření ve stávajících porostech.
Diferenciace a dislokace opatření	Postupně dle možností v rámci běžného managementu (při obnově porostů) v místech s velmi vysokou pravděpodobností zapálení (např. velmi frekventovaná cesta) porosty s vysokým požárním rizikem (zejména Fire Risk Index 0,6 a vyšší), a to zejména pokud již tam k zapálení porostů v minulosti došlo.

<b>IZOLAČNÍ ODSEKY</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Zastavit šíření korunového požáru.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	Součást opatření při hašení korunového požáru.
<i>Popis opatření</i>	Jde o pruh, který je vykácen v dostatečné vzdálenosti před čelem požáru, popřípadě po jeho bocích a má zastavit postup požáru. Pro rychlost a efektivitu využíváme pro odseky cest a linií rozdělení lesa, které rozšiřujeme. Stromy kácíme většinou směrem k požáru, tj. tak aby nezůstávaly hořlavé koruny na odseku či za ním, zejména v mladších porostech je třeba stromy také odvětvit či vyklidit. Ve smrkových porostech u odseků založených ve větší vzdálenosti před čelem požáru lze kácet i směrem od požáru. Hoří-li porosty ve věku 20–40 let (vysoká intenzita hoření) zakládá se odsek, je-li to možné, na jejich hranici s mladšími či staršími porosty.
<i>Parametry</i>	Šířka odseku 5 až 20 m (dle intenzity požáru, síly větru, sklonitosti terénu, výšky a struktury porostu), umístění nejméně 100 m před čelo požáru ve směru jeho šíření, při velkých rychle postupujících požárech je potřebné vzdálenost navýšit až na cca 500 m či více.
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	–
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	Kdekoliv bude při hašení požáru potřebné.

#### 4.4.2. Vodohospodářská protipožární a protierozní opatření

##### Opatření v ploše povodí

- Budování systému požárních nádrží v lesích a obnova požárních nádrží v blízkosti sídel
- Obnova mokřadů, management odvodnění v lesích
- Specifické postupy zdolávání požáru na území ochranného pásma vodního zdroje a v bezprostřední blízkosti vodního zdroje
- Po odlesnění zejména v horských oblastech – instalace flexibilních ocelových kruhových sítí ve stržích, které zabraňují rozvoji vyšších forem eroze s devastujícím účinkem (debris flow)
- Realizace sedimentačních předzdrží na významných přítocích do vodních nádrží

##### Opatření na vodárenských technologiích

- Uplatnění filtrace přes aktivní uhlí pro snížení množství organických látek ve vodě

## Katalog vodohospodářských protipožárních a protierozních opatření

<b>BUDOVÁNÍ SYSTÉMU POŽÁRNÍCH NÁDRŽÍ V LESÍCH A OBNOVA POŽÁRNÍCH NÁDRŽÍ V BLÍZKOSTI SÍDEL</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Zabránění rozšíření požárů na velké území, rychlá dostupnost vodního zdroje pro případné uhašení požáru, minimalizace času, který je potřeba pro dopravu vody z jiného vodního zdroje
<i>Obecné vymezení lokace</i>	V lokalitách, kde nejsou dostupné běžné vodní zdroje (rybníky, nádrže, vodní toky) nebo z nich není možné odebírat vodu nebo dostatečné množství vody, které může pomoci s hašením požáru.  Měly by být budovány zejména v rámci větších lesních celků a v obcích, kde není jiný vhodný zdroj pro hašení požárů a dále v místech, kde hrozí vyšší riziko vzniku požáru nebo může mít rozšíření požáru zásadní dopad na okolí.
<i>Popis opatření</i>	Jde o výstavbu nebo obnovu malých nádrží, které se historicky vyskytovaly na venkově. Doporučujeme obnovit tento koncept a zahustit síť vybudovaných požárních nádrží v kombinaci s ostatními vodními zdroji, tak aby bylo v rámci ČR dostupné dostatečné množství vodních zdrojů, které dostatečně pokryjí území.  HZZ ve spolupráci s krajskými a obecními úřady by měl vytvořit generel, z něhož by mělo být jasné, jaká obec (nejen zastavěné území, ale i lesní území) může které vodní zdroje využívat a za jakých podmínek a na jak velké uhašení požáru bude stačit. V případě nedostatečné kapacity navrhnout dobudování nové požární nádrže.
<i>Parametry</i>	Velikost nádrže závisí na vydatnosti vodního zdroje, z něhož bude napájena, z dostupnosti dalších vodních zdrojů a přírodních podmínek v lokalitě, kde bude budována.
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	Zatímco ostatní opatření slouží především jako preventivní před požárem, toto opatření slouží k zamezení rozšíření požárů, resp. likvidaci požáru.
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	Kdekoliv bude při hašení požáru potřebné.




<b>OBNOVA MOKŘADŮ, MANAGEMENT ODVODNĚNÍ V LESÍCH</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Obecným cílem je podpora zadržení vody v krajině. Vytvářením vlhkých, mokřadních a vodních stanovišť se obnovují společenstva rostlin a živočichů, která jsou na tato stanoviště vázána. <b>V kontextu požárů je cílem snížit riziko samovolného vzniku a šíření požáru.</b>
<i>Obecné vymezení lokace</i>	V místech výskytu zjevného zamokření, v místě zazemnění bývalého mokřadu, v blízkosti vodotečí a v místech lesních odvodňovacích příkopů
<i>Popis opatření</i>	<p>Mokřad je prohlubeň v terénu zaplavená vodou nebo klidná a hlubší část jinak dynamického vodního toku. Obnova mokřadů a management v lesích může probíhat více způsoby. Může spočívat v narušení funkčnosti technických odvodňovacích zařízení (zaslepení drenáží) nebo v přehrazení lesních drenážních příkopů. Mokřady se dále vytvářejí hloubením; obecným požadavkem je vytváření mírných sklonů svahů kvůli stabilitě břehů, rozvinutí příbřežní zóny a bezpečnosti. Břehy mokřadů zpravidla není třeba opevňovat. Mokřady lze vytvářet či obnovovat různými způsoby – plošným zahloubením terénu, nízkým hrázováním nebo zahrazením dosud zahloubeného odtoku z území (především při revitalizaci rašelinišť).</p> <p>Obnova mokřadů a management odvodnění v kontextu prevence vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody má význam z hlediska tvorby mikroklimatu v lesních porostech, které přirozeně snižuje teplotu a vlhkost v lese. Tudiž se riziko samovolného vzniku požáru snižuje a taktéž šíření již vzniklého požáru se limituje výskytem a počtem samotných mokřadů v lesním porostu.</p>
<i>Parametry</i>	Parametry mokřadu jsou definovány jeho plochou a hloubkou. Plocha se může pohybovat od cca jednoho metru čtverečního do několika stovek metrů čtverečních, hloubka bývá zpravidla malá – do cca dvou metrů.
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	Lze navázat na opatření “Způsob hospodaření omezující nežádoucí splachy a erozi” kdy vhodným umístěním například v údolnici pozemku s ornou půdou může mokřad sloužit jako uklidňovací a sedimentační nádrž.
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	V povodích, kde existují povrchová nebo podpovrchová liniová odvodnění, která svým technickým stavem, funkčností či charakterem umožňují výstavbu vodní zdrže mokřadního charakteru, která podpoří správnou hydrologickou funkci lesa bez toho, aniž by byl ovlivněn například plaveninový nebo sedimentační režim povodí. V rychle odvodněných a vysychajících povodích, která svou orografií umožňují například tvorbu slepých ramen, tůní či mokřadních niv.

**SPECIFICKÉ POSTUPY PŘI HASENÍ POŽÁRU A LIKVIDACI POŽÁŘIŠTĚ V OCHRANNÉM PÁSMU VODNÍHO ZDROJE**

<i>Základní cíl realizace</i>	Zabránit kontaminaci vodního zdroje potenciálním únikem kapalin z požární techniky, z hasebních látek nebo následně z požářiště v případě požáru lidských sídel a infrastruktury.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	Jedná se o specifická pravidla uplatňovaná při hašení požáru v ochranných pásmech vodních zdrojů nebo v jejich bezprostřední blízkosti.
<i>Popis opatření</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Na základě dosavadních zkušeností ze zásahů u požárů v blízkosti povrchových vodních zdrojů lze doporučit (pokud to situace umožňuje), aby hasební voda nebyla odebírána přímo z vodárenské nádrže, neboť hrozí riziko kontaminace vody v nádrži únikem kapalin z požární techniky (včetně odběrů vody pomocí bambivaků).</li> <li>2) Další pravidlo pro hašení v povodí vodárensky využívaných vodních zdrojů je, aby byla používána pouze voda, nesmí být uplatňovány žádné retardanty hoření, které mohou následně představovat riziko pro vodní zdroj. Retardanty hoření snižují hořlavost materiálů fyzikální či chemickou cestou, nejčastěji jde o kombinaci obou. Mohou snižovat rychlost hoření či plamen uhasit pomocí chemické reakce, která je endotermní (dojde ke snížení teploty), nebo modifikací procesu pyrolýzy mohou snížit množství hořlavé těkavé látky a zvýšit tvorbu méně hořlavé látky, která působí jako bariéra chránící zbývající materiál. Tyto materiály však představují riziko pro následnou jakost odtékající povrchové vody.</li> <li>3) V případě, že požár zasáhne lidská obydlí a infrastrukturu, je třeba zajistit, aby z požářiště byly následně odstraněny všechny potenciální zdroje znečištění odtékající povrchové vody a zajistit odvodňování povrchových vod z požářišť mimo síť vodních toků.</li> </ol>
<i>Parametry</i>	-
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	-
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	-

<b>UPLATNĚNÍ FILTRACE PŘES AKTIVNÍ UHLÍ PRO SNÍŽENÍ MNOŽSTVÍ ORGANICKÝCH LÁTEK VE VODĚ</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Odstranit nečistoty a nežádoucí příměsi z povrchových, podzemních vod s vyšším organickým znečištěním.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	Úpravny vody na vodních tocích.
<i>Popis opatření</i>	<p>Sorpční vlastnosti aktivního uhlí snižují nízkomolekulární organické znečištění, reziduální mikro znečištění, obsah huminových látek, škodlivých stopových prvků a látek, které způsobují nežádoucí sensorické vlastnosti upravené vody.</p> <p>V provozech úpraven povrchové vody na pitnou se aktivní uhlí aplikuje dvojitým způsobem: 1) dávkováním práškového uhlí (PAU) spolu s koagulanty do upravené vody v průtočném profilu úpravny; 2) ve filtru s granulovaným uhlím (GAU) přes které upravovaná voda protéká. Na sorbent (prostředky k zachycení a odstranění kapalin) je přiváděna voda, která je zbavená většiny nečistot. Tento proces je následován hygienizací.</p> <p>V případě sezónní zhoršené jakosti vod se pro odstranění zápachu a příchutě vody používá práškové aktivní uhlí. Naopak při trvalé zhoršené jakosti vody se využívá filtrace přes zrněné aktivní uhlí, kdy již nelze dosáhnout vyhovující jakosti vody pouze dvěma separačními stupni.</p> <p>Metoda se používá v kombinaci s technologickými stupni filtrace vody: písková filtrace, membránová filtrace (ultrafiltraci) a filtrace přes granulované aktivní uhlí (GAU), hygienické zabezpečení UV lampou a chlornanem sodným. Upravená voda je jímána do akumulární nádrže.</p>
<i>Parametry</i>	Závisí na druhu uhlí a velikosti částic (specifický povrch, objem pórů), koeficientu stejnozrnosti, jódovém čísle a výšce filtrační náplně.
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	-

## INSTALACE FLEXIBILNÍCH KRUHOVÝCH SÍTÍ VE STRŽÍCH

<i>Základní cíl realizace</i>	Opatření zajišťuje útlum energie toku splavenin při stržové erozi (směsi vody, bahna, kamení a balvanů – debris flow), jakožto nejzávažnější formy eroze, která se objevuje zejména v horských oblastech s vysokými sklony svahů nebo v intenzivně zemědělsky obhospodařovaných oblastech. Zachycením největších balvanů se snižuje devastáční účinek toku splavenin na síť vodních toků a přilehlé okolí.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	Síť se umísťuje do dráhy soustředěného odtoku v horských oblastech, kde při intenzivních deštích hrozí rozvoj stržové eroze. Lesní požár nebo odlesnění zvyšují pravděpodobnost rozvoje vyšších forem eroze. Po proběhlém lesním požáru je tedy vhodné vytipovat lokality, které v této souvislosti představují potenciální riziko pro infrastrukturu.
<i>Popis opatření</i>	<p>Kruhové síťe jsou zakotvené do podloží vrtanými ocelovými kotvami. Zachycují dynamický i statický tlak materiálu, který je spolu s vodou dopravován strží nebo vodním tokem. Velikost ok sítě odpovídá velikosti kamenů nebo balvanů, které jsou sítí zachyceny, voda s jemnozrnnou složkou erodovaného materiálu protéká dále do údolí. Přestože jemnozrnná frakce je časem transportována sítí vodních toků, rozsah výsledného erozního jevu je do značné míry eliminován a tím rovněž snižené riziko nepříznivých dopadů erozního jevu na jakost vody ve vodní nádrži. Po zaplnění kapacity hráze je možné akumulovaný materiál odtěžit. Síťe je možné instalovat i v obtížném terénu v horních částech horských povodí. Charakter konstrukce umožňuje jeho efektivní transport do obtížně dostupných lokalit a snadnější realizaci než v případě betonových konstrukcí.</p> <p><a href="https://www.youtube.com/watch?v=ODE1OtTwCfI">https://www.youtube.com/watch?v=ODE1OtTwCfI</a></p> 
<i>Parametry</i>	Metodika navrhování parametrů ocelových sítí:

	<a href="https://www.geobruigg.com/file-48897/downloadcenter/level1-level2-level3-research-papers/Research-2016/Debris-Flow-Protection-Systems-for-Mountain-Torrents-2016.pdf">https://www.geobruigg.com/file-48897/downloadcenter/level1-level2-level3-research-papers/Research-2016/Debris-Flow-Protection-Systems-for-Mountain-Torrents-2016.pdf</a>
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	Navazuje na opatření omezující nežádoucí splachy a erozi v oblastech, kde by vhodný management porostů a lesních cest nebyl dostatečně efektivní a nezajistil by obnovení stability povrchu půdy v požadovaném čase.
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	Opatření lze navrhovat s ohledem na předpokládaný charakter erodovaného materiálu a na jeho dynamiku. Lze instalovat kaskádu sítí, jejichž celková kapacita odpovídá odhadovanému objemu erodovaného materiálu.

<b>REALIZACE SEDIMENTAČNÍCH PŘEDZDRŽÍ NA VÝZNAMNÝCH PŘÍTOCÍCH DO VODNÍCH NÁDRŽÍ</b>	
<i>Základní cíl realizace</i>	Zachycení splavenin na přítoku do nádrže, které mohou být rizikovým zdrojem nežádoucích látek snižujících kvalitu vody v nádrži.
<i>Obecné vymezení lokace</i>	V povodích s vyšším předpokladem vodní eroze. V povodí se vyskytují pozemky vykazující znaky erozního smyvu, intenzivně obhospodařované pozemky nebo pozemky s vysokým sklonem. Kromě míry erozní ohroženosti povodí je podstatným ukazatelem riziko přenosu většího množství splavenin s obsahem biologických a chemických znečišťujících látek, které mají tendenci tvořit se či přetrvávat v sedimentu a následně se uvolňovat do vody.
<i>Popis opatření</i>	Opatření lze realizovat jako samostatnou mělkou nádrž na vtoku oddělenou propustí od hlavní nádrže nebo jako vnořená nádrž, potažmo snížený příčný pás ve dně na vtoku, umístěný pod úroveň maximální hladiny v hlavní nádrži. Předzdrž na vtoku a na přepadu do nádrže je opatřena stabilizačními prahy, nejčastěji srubové konstrukce s kamenným záhozem. Prostor sedimentační předzdrže je zpevněný a opatřený vjezdem pro těžkou techniku za účelem odtěžení usazených sedimentů.
<i>Parametry</i>	Hloubka sedimentační předzdrže je doporučena přibližně 1 m. V závislosti na stavebních možnostech je nutné zvolit takovou plochu zdrže, aby došlo k dostatečnému utlumení rychlosti proudění vody a následné sedimentaci. V případě stabilizačního prahu na vtoku zdrže je doporučen nízký sklon svahu mezi prahem a dnem, zaručující pozvolnější snižování unášecí schopnosti vody. Zpevnění dna a sjezdu do nádrže je doporučeno silničními panely usazenými na štěrkovém podsypu. Předzdrž je vhodné doplnit obtokovým zařízením (koryto, potrubí), pro možnost zahrazení přítoku během čištění a odvozu sedimentu.
<i>Kombinace s dalšími opatřeními</i>	V sedimentační předzdrži lze vytvořit litorální pásmo, které může být umístěné po obvodu na svazích s mírným sklonem do maximální hodnoty 1:8, popř. vytvořením mělké části s nižší hloubkou ve dně, a to maximálně do 0,5 m. Rostliny napomáhají zachytávání sedimentů a zároveň spotřebovávají živiny obsažené v přítékající vodě.
<i>Diferenciace a dislokace opatření</i>	Na tocích s vyšší mírou transportu a sedimentace splavenin. V povodích kde hrozí smyv nežádoucích látek potenciálně ohrožujících kvalitu vody při výskytu v sedimentu.



## 5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Basu, P. (2018). Chapter 4—Torrefaction. In P. Basu (Ed.), *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition)* (pp. 93–154). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00004-2>
- Beitlerová, H., J. Lenz, J. Devátý, M. Mistr, J. Kapička, A. Buchholz, I. Gerndtová a A. Routschek, (2020): Improved calibration of Green-Ampt infiltration in the EROSION-2D/3D model using a rainfall-runoff experiment database. *SOIL Discussions* [online]. 2020, 1–19. Dostupné z: doi:10.5194/soil-2020-62
- Belward, A.S. (2007): A new approach to global land covermapping from Earth observation data. *Int. J. Remote Sens.* 2007. 26, 1959–1977.
- Byram, G. M. (1943): Solar radiation and forest fuel moisture. *J. Agr. Res.* 67:149-176.
- Bystrický, R., Sirota, I. (2013): Lesní dopravní síť v ČR stav a budoucnost. *Lesnická práce* 92(1). <http://www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-92-2013/lesnicka-prace-c-1-13/lesni-dopravni-sit-v-cr-stav-a-budoucnost>
- Čermák, P., Zatloukal, V., Cenciala, E., Pokorný, R., Kadavý, J., Kneifl, M., Kadlec, J., Dobrovolný, L., Martiník, A., Mikita, T., Adamec, Z., Kupec, P., Sloup, R., Šišák, L., Pulkrab, K., Trnka, M., Jurečka, F. (2016): Katalog lesnických adaptačních opatření. 152 s. <http://www.frameadapt.cz/vystupy-a-data/>
- ČSN 73 6108 (2016): Lesní cestní síť. <https://csnonline.unmz.cz/Detailnormy.aspx?k=99985>
- ČSN 73 6133 (2010): Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. <https://csnonline.agentura-cas.cz/Detailnormy.aspx?k=84654>
- Deeming, John E., James W. Lancaster, Michael, A. Fosberg, Mark J. Schroeder, and R. William, Furman. (1972): National Fire Danger Rating System. USDA Forest Service Res. Pap. RM-84. 165 p.
- Deng, Zhi-Qiang, et al. (2006): A fractional dispersion model for overland solute transport. *Water resources research*, 42.3.
- Dennis, F. C. (2005): Fuelbreak Guidelines for Forested Subdivisions & Communities. Colorado State Forest Service. 7 s. [https://static.colostate.edu/client-files/.../fuelbreak\\_guidellines.pdf](https://static.colostate.edu/client-files/.../fuelbreak_guidellines.pdf)
- Finney, M. A. An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities. In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. (2006): *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 213-220 2006, 041.
- Fosberg, M.A., Deeming, J.E., 1971. Derivation of the 1- and 10-hour timelag fuel moisture calculations for fire-danger rating. USDA Forest Service Research Note RM-207
- Green, W.H. and G. Ampt. 1911. Studies of soil physics, part I – the flow of air and water through soils. *J. Ag. Sci.* 4:1-24.
- Hrstka, O., Kučerová, A. (2004): Improvements of real coded genetic algorithms based on differential operators preventing premature convergence. *Adv. Eng. Softw.*, 35(3-4):237–246
- Holuša, J.; Berčák, R.; Lukášová, K.; Hanuška, Z.; Agh, P.; Vaněk, J.; Kula, E.; Chromek, I. (2018): LESNÍ POŽÁRY V ČESKÉ REPUBLICE – DEFINICE A ROZDĚLENÍ. *ZPRÁVY LESNICKÉHO VÝZKUMU 2018*, 63 (2), 102–111.
- Hřebačka L., Škoda J. et al. (2016): Metodická pomůcka pro období žňových prací, Ministerstvo vnitra, Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 12 s. (<https://www.hzscr.cz/clanek/metodicka-pomucka-pro-obdobi-znovych-praci.aspx>).
- Janeček, M. (2012): *Ochrana zemědělské půdy před erozí - Metodika: Vol. 1*. Česká zemědělská univerzita Praha.
- Jankovská, Z., Kula, E. (2011): Příčiny lesních požárů v ČR (1992–2004) a jejich vývoj. *Lesnická práce* 90(4): 18–19.
- Jiang, nan B. (1998). *The Least-Squares Finite Element Method*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1 edition
- Kavka, P. a Jeřábek, J. (2011) SMODERP 2D. <http://storm.fsv.cvut.cz/cinnost-katedry/volne-stazitelne-vysledky/smoderp/>
- Kavka, P., Müller, M., Strouhal, L., Kašpar, M., Bližňák, V., Landa, M., Weyskrabová, L., Pavel M., & Dostál, T. (2018). *Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině*. ČVUT v Praze. <http://rain.fsv.cvut.cz>
- Kašpárek, L. a Kožíň, R. (2021) Extrémní víceletá hydrologická sucha v povodí Labe. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, roč. 63, č. 3, str. 28–32. ISSN 0322-8916.
- Kolář, V., Patočka, C. a Bém, J. (1983): *Hydraulika – Vysokošk. učebnice pro stavební fak.* SNTL ; Alfa, Bratislava, 1 edition.

- Kučera, M., & Adolt, R. (Eds.). (2016): Výstupy Národní inventarizace lesů uskutečněné v letech 2011-2015. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů.
- Kuraz, M., Mayer, P. a Blöcher, J. R. (2008): DRUtES – an opensource library for solving coupled nonlinear convection-diffusion-reaction equations. Development version 2018, <http://www.drutes.org>
- Kuráž, M., Kroulík, M., Novák, P. (2020): Hodnocení plošné kontaminace hydrografické sítě z erozního smyvu, detekce a kvantifikace stupně znečištění, lokalizace jeho zdrojů a účinná predikce - certifikovaná metodika. Dostupná online: [https://drutes.org/~miguel/tacr-plos\\_kont/Hodnoceni\\_plosne\\_kontaminace\\_hydrograficke\\_site\\_metodika.pdf](https://drutes.org/~miguel/tacr-plos_kont/Hodnoceni_plosne_kontaminace_hydrograficke_site_metodika.pdf)<sup>15</sup>
- Langhans, Ch., et al. (2016): A model for assessing water quality risk in catchments prone to wildfire. *Journal of Hydrology*, 534: 407-426.
- Lukeš et al., (2018): Certifikovaná metodika „Hodnocení zdravotního stavu lesních porostů v České republice pomocí dat Sentinel-2. [http://www.uhul.cz/images/aktuality\\_doc/Metodika\\_-\\_final.pdf](http://www.uhul.cz/images/aktuality_doc/Metodika_-_final.pdf)
- Maschler, J., Atzberger, C., Immitzer, M. (2018): Individual tree crown segmentation and classification of 13 tree species using airborne hyperspectral data. *Remote Sensing* 10, 1218, doi:10.3390/rs10081218
- Mensíková, O. (2006): Systémy protipožární ochrany lesa v jižní Evropě na příkladu Andalusie. Diplomová práce LDF MZLU v Brně, 105 s.
- NRCS (2011): Fuel and fire Breaks. Small Scale Solution for your Farm. 3 s. <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE.../stelprdb1167385.pdf>
- Nyman, P., et al. (2014): Modeling the effects of surface storage, macropore flow and water repellency on infiltration after wildfire. *Journal of Hydrology*, 513: 301-313.
- Philip, J.R. (1957) The Theory of Infiltration, 1. The Infiltration Equation and Its Solution. *Soil Science*, 83, 345-357. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-195705000-00002>
- Richards, L., A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. *J. Appl. Phys.*, 1(5):318–333
- Rosendorf, P., Dostál, T., Krása, J., Hanel, M., Bauer, M., David, V., Jáchymová, B., Devátý, J., Strouhal L., & Dočkal, M. (2016). *Metodika stanovení území potenciálně ohrožených dopady přívalemých srážek spojených s erozí půdy při zohlednění očekávané změny klimatu* (p. 51). VÚV T. G. Masaryka, v.v.i. <http://heis.vuv.cz/data/web-map/datovesady/projekty/eroznismyv/default.asp>
- Pollet, J. and Brown, A. (2007): 'Fuel Moisture Sampling Guide'. Bureau of Land Management Utah State Office Salt Lake City, Utah.
- Pfeffer, A. et al. (1961): Ochrana lesů. SZN Praha. 838 s.
- Tománek, J. (2016): Nová norma ČSN 73 6108. [www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/.../nova\\_norma\\_-\\_prezentace.pdf](http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/.../nova_norma_-_prezentace.pdf)
- Scott, J. H.; Burgan, R. E. (2005): Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 72 p. 2005, 153.
- Smith, R., Goodrich, D., Woolhiser, D., Unkrich, C. (2000). Kineros2: A kinematic runoff and erosion model, <https://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>
- Smith, Hugh G., et al. (2011) Wildfire effects on water quality in forest catchments: a review with implications for water supply. *Journal of Hydrology*, 2011, 396.1-2: 170-192.
- Swartzendruber, D. (1987): A Quasi-Solution of Richards Equation for the Downward Infiltration of Water into Soil. *Water Resour. Res.*, 23(5):809–817
- Směrnice pro hlídkovou činnost a hašení lesních požárů v rámci systému Letecké hasičské služby. Čj. 32840/2016-MZE-16211; č.j. MV- 81034-2/PO-IZS-2016. 24 s.

<sup>15</sup> Tučně jsou uvedeny citace prací a projektů, v návaznosti na které vznikla metodika „Prevence vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody včetně zohlednění důsledků změny klimatu“.

- Strouhal, L., Beitlerová, H., Kavka, P., Žížala, D., Minařík, R., 2021. Fyzikální a hydrologické vlastnosti půd nejen pro návrh společných zařízení v rámci PÚ. Pozemkové úpravy [online]. 29(2), 3-9. ISSN 1214-5815. Dostupné z: <http://www.cmkpu.cz/archiv-casopisu-pozemkove-upravy/>
- Struzik, E. (2018). How Wildfires Are Polluting Rivers and Threatening Water Supplies Dostupné online: <https://e360.yale.edu/features/how-wildfires-are-polluting-rivers-and-threatening-water-supplies>
- Trnka, M. et al. (2020) - Systém indikátorů rizik přírodních požárů (ověření různých postupů stanovení rizika vzniku přírodních požárů) včetně návodu na použití integrovaného předpovědního systému. Certifikovaná metodika, MŽP, 2020.
- Trnka, M. et al. (2020a) Observed and expected changes in wildfire-conducive weather and fire events in peri-urban zones and key nature reserves of the Czech Republic. *Climate Research*, 2020, 82: 33-54.
- ÚVGZ (2020): Vyhodnocení rizika a návrh opatření pro prevenci vzniku a šíření přírodních požárů v bezprostředním okolí povrchových zdrojů pitné vody včetně zohlednění důsledků změny klimatu“, VH 20202021053. Program Bezpečnostního výzkumu pro potřeby státu. Doba řešení 2020-2021.
- ÚVGZ (2018): Prognóza, indikace rizika a prevence vzniku přírodních požárů v kontextu aktuálního stavu poznání a podmínek změny klimatu, VH20172020025, Program Bezpečnostního výzkumu pro potřeby státu. Doba řešení 2018-2020.
- Trnka, M. et al. (2020): Doporučená adaptační a mitigační opatření v rizikových oblastech výskytu přírodních požárů s přihlédnutím k měnícímu se klimatu. Certifikovaná metodika. *Věstník MŽP č.../2021*.
- Vláda ČR (2017): Národní akční plán adaptace na změnu klimatu. 113 s. [https://www.mzp.cz/cz/narodni\\_akcni\\_plan\\_zmena\\_klimatu](https://www.mzp.cz/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu)
- Vláda ČR (2015): Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR. 130 s. [https://www.mzp.cz/cz/zmena\\_klimatu\\_adaptacni\\_strategie](https://www.mzp.cz/cz/zmena_klimatu_adaptacni_strategie)
- Vyskot, I., Schneider, J. a Kozumplíková, A. (2016) Dynamika funkčních účinků lesních porostů jako součást problematiky ekosystémových služeb. *Zprávy lesnického výzkumu*, 61.2: 81-89.
- Woolhiser, D.A. (1975): Simulation of unsteady overland flow. In: *Unsteady Flow in Open Channels*, K. Mahmood and V. Yevjevich, Eds. V.II, p. 502, Water Resources Publications, Fort Collins, Co.
- Writer, J.H., and Murphy, S.F.(2012), Wildfire effects on source-water quality—Lessons from Fourmile Canyon fire, Colorado, and implications for drinking-water treatment: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012–3095, 4 p.
- Zhao, Y., Wei, F., Yang, H., a Jiang, Y. (2011): Discussion on using antecedent precipitation index to supplement relative soil moisture data series. *Procedia Environmental Sciences*, 10:0 1489 – 1495. 2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology ESIAT 2011.

## 6. PŘÍLOHA 1

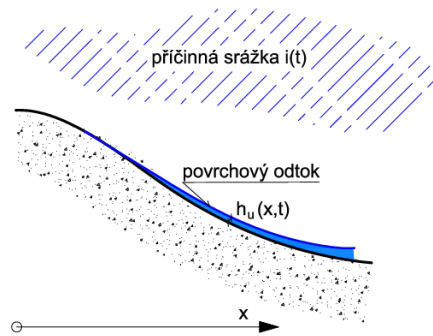
### POSTUPOVÉ KROKY METODICKÉHO POSTUPU S UVEDENÍM VSTUPNÍCH DAT A DÍLČÍCH VÝSTUPŮ

Postupový krok	Vstup	Výstup
Vymezení zájmového území	Hydrologická situace, expertní posouzení	Vymezení okolí nádrže s ohledem na možné ovlivnění vody v nádrži přírodním požárem
Vytvoření mapy požárního rizika (les) a palivových modelů	DPZ (laserové skenování, hyperspektrální data), maska les/nel, ad.	Rastrový výstup 5×5 m, čtyřmístný kód, palivové modely
Model FlamMap	DPZ (model terénu, sklon, expozice), meteorologická data, palivové modely	Mapa šíření přírodního požáru
Scénáře vývoje klimatu a jejich dopad na lesní ekosystémy, resp. riziko požárů	Scénář promítnutý do rastrového výstupu 5×5 m, promítne se do čtyřmístného kód	Mapa šíření přírodního požáru  Palivové modely pro predikce 2030, 2040, 2050, 2060, 2070
Identifikace lokalit s vyšším rizikem požárů	Mapy požárního rizika (les) a palivových modelů Meteorologická data Mapa šíření přírodního požáru	Mapa s vyznačenými rizikovými oblastmi a palivovými drahami v důsledku zapálení a zahoření
Modelování důsledků eroze a smyvu zbytků po požáru z rizikových lokalit	Mapa s vyznačenými rizikovými oblastmi a palivovými drahami v důsledku zapálení a zahoření  Odhad množství biomasy, která shoří zcela a částečně	Množství popela a jemných jílových částic půdy, které budou transportovány do prostoru zátopy nádrže
Modelování rozptylu znečišťujících látek v nádrži	3D model prostoru zátopy Meteorologická a hydrologická data Množství kontaminantu, který se transportuje do nádrže	Odhad vývoje parametrů jakosti surové vody odebírané z určitého místa z nádrže
Formulace a parametrizace vhodných opatření	Předchozí výše definované výstupy, platná legislativa	Katalogy opatření – lesnických a vodohospodářských

## 7. PŘÍLOHA 2

### MATEMATICKÝ POPIS MODELU TRANSPORTU

Dynamika smyvu popela povrchem povodí je popsána kombinací rovnice kinematické vlny a rovnice advekčně-disperzní. Implementace rovnice kinematické vlny je předmětem řady softwarových aplikací jako např. Smith et al. (2000), Kavka a Jeřábek (2011) a Kuraz et al. (2018).

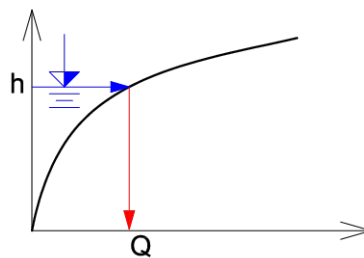


Obr. 27. Schema geneze povrchového odtoku na jednorozměrném reprezentativním svahu.

Pro popis povrchového odtoku pomocí rovnice kinematické vlny vycházíme z následujících veličin

- výška povrchového odtoku  $h_u$  [L],
- rychlost povrchového odtoku  $\vec{v}^*$  [L.T<sup>-1</sup>],
- objemový tok povrchového odtoku  $\vec{q}_s$  [L<sup>3</sup>.T<sup>-1</sup>.L<sup>-2</sup>].

Rovnice kinematické vlny vychází z empirického modelu konzumpční křivky



Obr. 28. Schema konzumpční křivky.

$$Q = \alpha h^m, \quad (1)$$

Kde  $m$  popisuje tvar průtočného profilu  $\alpha$  sklon čáry energie a drsnost povrchu, více detailů viz (Kolář et al., 1983). Tato empirická formulace konzumpční křivky je poté dosazena do rovnice zachování hmoty

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q}_s + S, \quad (2)$$

kde při uvažování jednotkové šířky svahu, která je poté integrována na celé povodí vhodnou numerickou metodou, bude průtočné množství  $Q$  uvažováno jako objemový tok  $\vec{q}_s$  a pro koeficienty  $\alpha$  a  $m$  bude platit následující:



- pro jednotkový profil  $m = 5/3$

- $\alpha = \frac{\sqrt{s_E}}{n}$ , kde  $n$  je Manningův koeficient drsnosti [ $T \cdot L^{-1/3}$ ],  $s_E$  je sklon čáry energie. Sklon čáry energie je často uvažován totožný se sklonem svahu. Je tedy obecně známo, že uvedený přístup neumožňuje modelovat zpětné vzdutí. Pokud ale budeme uvažovat místo sklonu svahu sklon hladiny povrchového odtoku, model je možné použít dokonce i pro popis zpětného vzdutí. Tímto se ovšem zavádí do modelu další nelinearita, která v numerickém schématu vyžaduje přesnější časoprostorovou integraci (menší časový a prostorový krok + lepší integrační schema).

Potom je možné pro více prostorových dimenzí chápat koeficient  $\alpha$  jako vektor a tedy

$$\vec{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \sqrt{\begin{pmatrix} s_{E_x} \\ s_{E_y} \end{pmatrix}} \quad (3)$$

Zdrojový člen  $S$  z (2) je možné interpretovat následujícím způsobem

$$S(\vec{x}, t) = \begin{cases} i(t) - q_{in}(\vec{x}, t), & \text{jestliže } i(t) > q_{in}(\vec{x}, t), \\ 0, & \text{jestliže } i(t) \leq q_{in}(\vec{x}, t), \end{cases} \quad (4)$$

kde  $i(t)$  je časově závislá intenzita srážek a  $q_{in}(\vec{x}, t)$  je maximální infiltrovatelné množství v případě plného nasycení horního okraje půdního horizontu.

Infiltrace srážky vychází z modelu neustálené infiltrace podle Swartzendruber (1987). Rovnice je formulována následujícím způsobem

$$I(t) = \frac{S_0(1 - \exp(-A_0\sqrt{t}))}{A_0} + K_s t, \quad (5)$$

kde  $A_0$  je bezrozměrný půdní parametr charakterizující půdní typ [-],  $S_0$  je sorptivita [ $L \cdot T^{-1/2}$ ], která udává kapacitu vody, kterou porézní materiál je schopen adsorbovat svým kapilárním systémem. Důležité je, že to je hodnota, která je závislá na počátečním stavu nasycení svrchních vrstev půdního profilu. Nakonec parametr  $K_s$  je nasycená hydraulická vodivost [ $L \cdot T^{-1}$ ]. Hodnota  $I(t)$  udává kumulativní infiltraci [L].

Pro vlastní separaci srážky je ovšem nezbytné formulovat rychlost průsaku  $q_{in}$  [ $L \cdot T^{-1}$ ], která by nastala při horní okrajové podmínce plného nasycení. Ta je potom definována jako  $q_{in} = \frac{dI}{dt}$ . A tedy derivováním vztahu (5) obdržíme

$$q_{in} = \frac{S_0}{2\sqrt{t}} \exp(-A_0\sqrt{t}) + K_s \quad (6)$$

Znalost počáteční sorptivity je samozřejmě problematická, pro dané období je ovšem možné počáteční sorptivitu vztáhnout například k API indexu (indexu předchozích srážek). Podobný koncept nedávno publikoval Zhao et al. (2011). Celý problém je při jisté úrovni abstrakce možné zjednodušit na

$$q_{in} = K_s, \quad (7)$$

čímž odpadá nutnost stanovení počáteční sorptivity půdního povrchu, nasycená hydraulická vodivost je pro území České republiky katalogizovaná. Z hlediska kontaminace povrchových toků povrchovým smyvem jsme tímto zjednodušením na straně bezpečnosti.

Dosažením rovnice empirické konzupční křivky (1) spolu s parametrizací (3) a zdrojového členu (4) spolu s definicí aktuální infiltrace (6) (nebo (7)) do rovnice bilance hmoty (2) obdržíme rovnici kinematické vlny

$$\frac{\partial h_u}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{\alpha} m h_u^m) + i(t) - q_{in}(\vec{x}, t). \quad (8)$$

Rovnice obsahuje pro prostorovou derivaci nelineární člen  $h_u^m$ , který může být nahrazen

$$h_u^m = \bar{h}_u^{m-1} h_u, \quad (9)$$

kde člen  $\bar{h}_u$  odpovídá odhadu hodnoty neznámé funkce  $h_u$  (např. v předchozí iterační úrovni). Nelineární rovnici (8) je tedy možné dále linearizovat

$$\frac{\partial h_u}{\partial t} = -m \bar{h}_u^{m-1} \nabla \cdot (\vec{\alpha} h_u) + \overbrace{i(t) - q_{in}(\vec{x}, t)}^{i_r(\vec{x}, t)}. \quad (10)$$

jedná se tedy o kvazilineární rovnici 1. řádu, jejíž řešení je funkce  $h_u(\vec{x}, t)$ . Řešením této rovnice obdržíme časoprostorovou závislost výšky povrchového odtoku. Dosazením výšky povrchového odtoku do rovnice (1) obdržíme časoprostorový odhad rychlosti povrchového odtoku.

Transport látek je poté řešen rovnicí advekčně-disperzní, kde advekční člen vychází z rovnice kinematické vlny (10). Celý problém transportu popela povodím je tedy řešen následující soustavou diferenciálních rovnic

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_u}{\partial t} &= -m \bar{h}_u^{m-1} \nabla \cdot (\vec{\alpha} h_u) + i(t) - q_{in}(\vec{x}, t) \\ \frac{\partial M_{ash}}{\partial t} + \frac{\partial h_u c_{ash}}{\partial t} &= \nabla \cdot \mathbf{D} \|\vec{q}_s\| \|\nabla c_{ash}\| + \nabla \cdot \|\vec{q}_s\| c_{ash} \\ \frac{\partial M_{ash}}{\partial t} &= \lambda_a h_u c_{ash} - \lambda_s M_{ash}, \end{aligned} \quad (11)$$

kde řešení této rovnice jsou tyto tři proměnné

- $M_{ash}$  množství popela [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ] na povodí, jedná se o jedinou proměnnou, pro kterou je definována nenulová počáteční podmínka vycházející z analýzy palivových typů, jedná se o sedimentovanou (imobilní) složku polutantu,
- $c_{ash}$  je koncentrace popela v povrchovém odtoku na povodí [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-2}$ ] (povodí je uvažováno jako dvourozměrná plocha),
- $h_u$  je výška povrchového odtoku [m].

Z uvedeného řešení je poté možné získat další odvozené charakteristiky, konkrétně se jedná o tyto nejdůležitější charakteristiky

- tok povrchového odtoku,
- koncentrační tok popela povrchovým odtokem.

Výsledná řídicí transportní soustava rovnic (11) má tedy následující parametry

- $i(t)$  - časově závislá intenzita srážky [m/s]: Za účelem získání parametrů vstupních srážek byly pořízeny 6-ti hodinové průběhy srážek s dobou opakování 2, 5, 10, 50 a 100 let, které budou sloužit jako vstup do modelu transportu v okolí nádrže. Dále byla provedena extrakce hodinových srážkový řad v okolí pilotních nádrží. Tato data jsou dále využita pro odhad změn hodinových a více-hodinových srážkových extrémů pro příslušné doby opakování pomocí regionální frekvenční analýzy. Odvozené změny jsou dále využity pro modifikaci pozorovaných průběhů srážek.
- $q_{in}(t)$  - časově závislá intenzita vsaku [m/s], viz rovnice (6) nebo (7)
- $n$  - Manningův koeficient drsnosti [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ]: Manningův koeficient drsnosti popisuje drsnost povrchu. Je to standardní koeficient, stanovení jeho hodnoty bylo předmětem řady publikací, viz např. Tab. 11.

**Tab. 11.** Hodnoty Manningova koeficientu drsnosti podle Woolhiser (1975) (v originální práci je koeficient uveden v imperiálních jednotkách).

Typ povrchu	Manningovo $n$ [ $m^{1/3}/s$ ]
beton / asfalt	2.94E-03 - 3.82E-03
Písek	2.94E-03 - 5.00E-02
Štěrk	3.53E-03 - 8.82E-03
jílovito-hlinitá půda bez vegetace	3.53E-03 - 9.70E-03
řídká vegetace	1.56E-02 - 3.82E-02
krátký travní porost	2.94E-02 - 5.88E-02
vysoká tráva	5.00E-02 - 1.41E-01

Pro modelování odtoku po lesním požáru byla použita hodnota Manningova koeficientu drsnosti odpovídající jílovito-hlinité půdě bez vegetace. Jedná se o určité zjednodušení, neboť empiricky stanovená hodnota pro Manningův koeficient drsnosti pro lesní půdu po požáru není pro podmínky ČR zatím známa.

- $h_p$  - tloušťka vrstvy popela [m] - tato hodnota popisuje počáteční zátěž povodí popelem, je prostorově proměnná, platí vztah  $M_{ash} = h_p \rho_p$
- $\rho_p$  - objemová hmotnost popela

Následující tři parametry nejsou jednoznačně definovatelné, k jejich stanovení proběhla série experimentů s umělým zadržováním, viz hlavní text metodiky.

- $D$  - koeficient disperzivity [m] (obecně tenzor druhého řádu, nicméně pro tuto aplikaci je dostačující uvažovat tento koeficient ve skalární veličině)
- $\lambda_d$  - kinetický koeficient popisující vyplavování [ $m^{-1}s^{-1}$ ]
- $\lambda_s$  - kinetický koeficient popisující sedimentaci unášeného popela [ $m^{-3}t^{-1}$ ]

Rovnice kinematické vlny byla v prostoru integrována tzv. metodou Least-Square-FEM (Jiang, 1998). Jedná se o variantu metody konečných prvků a v čase standardní implicitní Rotheho metodou. Rovnice advekčně-disperzní byla v prostoru integrována standardní Galerkinovou metodou konečných prvků, v čase byla rovnice rovněž integrována implicitní Rotheho metodou. Stejně bylo postupováno u třetí rovnice popisující přechod polutantu mezi půdním povrchem a povrchovým odtokem.

## 8. PŘÍLOHA 3

### MATEMATICKÝ POPIS HYDRODYNAMICKÉHO MO- DELU

Deterministický model 3D HD je většinou založen na řešení Navier-Stokesových pohybových rovnic numerickou metodou konečných objemů. Základní řídicí rovnice 3D HD modelu mohou být uvedeny například ve tvaru (MIKE 3 Flow model FM, Hydrodynamic and Transport Module v. 2021. Scientific Documentation. DHI A/S, Hørsholm, Denmark):

rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

a rovnice pohybové:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} \\ = fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t^v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} \\ = -fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_A}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t^v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + F_w + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t^v \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

kde:

t	čas
x, y, z	zeměpisné (kartézské) souřadnice
$\eta$	úroveň hladiny vody
u, v, w	složky rychlosti ve směrech x, y, a z
q	tlak v kapalině
f	Coriolisův parametr (závislý na úhlové odchylce směrů proudění a zeměpisné šířce)
$u_t^v$	vertikální složka turbulentní viskozity
$u_t^h$	horizontální složka turbulentní viskozity
g	gravitační zrychlení

$p_A$	atmosférický tlak na hladině vody
$\rho$	hustota vody
$\rho_0$	referenční hustota vody
$F_u, F_v, F_w$	difuzní členy ve směru $x, y, z$ definované vztahy:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2v_t^h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t^h \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t^h \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2v_t^h \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$F_w = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t^h \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t^h \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$









PREVENCE VZNIKU A ŠÍŘENÍ  
**PŘÍRODNÍCH POŽÁRŮ**  
V BEZPROSTŘEDNÍM OKOLÍ  
POVRCHOVÝCH ZDROJŮ  
🔥 **PITNÉ VODY** 🔥  
VČETNĚ METOD PRO ODHAD DŮSLEDKŮ  
PŘÍPADNÉHO VÝSKYTU

**METODIKA**

ISBN: 978-80-87902-32-5