

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

**SIMULAČNÍ MODEL ŠÍŘENÍ KAPALNÉ LÁTKY
PO ZEMSKÉM POVRCHU**

**THE OVERLAND SPILL SPREADING SIMULATION
MODEL**

Autoreferát disertační práce

Studijní program: P 2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3901V025 Přírodovědné inženýrství

Autor práce:

Ing. Michal Balatka

Vedoucí práce:

Ing. Hana Čermáková, CSc.

Liberec 2013



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména §60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se školitelem, Ing. Hanou Čermákovou, CSc.

Datum:

Podpis:



Poděkování

Děkuji své školitelce Ing. Haně Čermákové, CSc. za celkové vedení disertační práce včetně množství konzultací a výrazné pomoci při korektuře textů.

Dále děkuji RNDr. Janu Novákovi, Ph.D. za konzultace, nápady a množství podnětných připomínek.

Dále děkuji Ing. Jiřímu Havlíčkovi za pomoc při tvorbě obrázků obsažených v této práci.

Děkuji také doc. Ing. Pavlu Fuchsovi, CSc. a celému jeho kolektivu zabývajícím se hodnocením spolehlivosti a rizik působícímu na Technické univerzitě v Liberci za ochotnou podporu při řešení dílčích záležitostí a podnětné připomínky.

Za podporu a pomoc děkuji také všem ostatním, kteří přispěli ke zkvalitnění výsledků této disertační práce.



Abstrakt

Tato disertační práce se zabývá vývojem simulačního modelu určeného pro predikci šíření kapalných látek po zemském povrchu. Problematika je zaměřena především na krátkodobé úniky kapalných látek z technických zařízení následkem potenciálních havárií. Může se například jednat o únik ropných látek z porušeného produktovodu nebo únik přepravovaných pohonných hmot z havarované cisterny. Simulační model je navržen tak, aby bylo při výpočtech možné vycházet z běžně dostupných geografických dat bez nutnosti bližšího průzkumu lokality. Díky tomuto přístupu je možné simulaci provádět pohotově pro libovolnou pozici potenciálního zdroje kapaliny pro velký plošný celek na úrovni kraje nebo celého státu.

Největší důraz byl při vývoji modelu kladen na zpracování nejistot ve vstupních datech popisujících zasaženou lokalitu společně s kapalnou látkou a jejím zdrojem. Princip modelu je založen na stochastickém přístupu. Pomocí metody Monte Carlo je generováno množství různých variant deterministického popisu lokality a zdroje kapaliny. Pro tyto varianty se dále provádějí deterministické výpočty šíření kapaliny, na základě kterých se určují výsledné statistické odhady. Generování variant deterministického popisu lokality a výpočet šíření kapaliny jsou zajišťovány pomocí specializovaných algoritmů, které představují nedílnou součást disertační práce.

Výsledky modelu již byly využity při řešení několika výzkumných projektů zaměřených na prevenci při ochraně životního prostředí.

Klíčová slova:

Simulační model, kapalná látka, šíření kapaliny po zemském povrchu, nejistoty, statistické metody, digitální model povrchu.



Abstract

This thesis deals with the solution of the simulation model for the overland spill spreading prediction. The solution is focussed on the potential short-time leaks of liquids from damaged technical devices. It may be for example the oil leak from damaged pipeline or the leak of transported oil from damaged oil tank. The simulation model is designed for use of the common accessible input geographical data. There is not necessary the next detailed exploration of the affected zone. This enables to perform a fast calculation with various liquid source position for the large zone area. This area may mean for example a region of whole state.

The simulation model includes the input data uncertainties processing, which is very important part of whole designed solution. Uncertainties are contained in the terrain description and in the liquid source description. The principle of the model is based on a stochastic approach. Using the Monte Carlo method we generate a number of different variants of a deterministic description of the location and a liquid source. For these variants we perform a deterministic calculation of the liquid spreading on the basis of which we determine the resulting statistical estimates. The algorithm of area and source variants and algorithm of spill spreading calculation are important parts of this work.

The results of simulation model were used as a part of research projects, focused on the evaluation of environmental risk.

Keywords:

Simulation model, liquid, overland spill spreading, uncertainty analysis, statistical estimation, digital terrain model.



Obsah

Obsah	6
Seznam obrázků	7
1. ÚVOD.....	8
2. VYMEZENÍ PROBLEMATIKY A SOUČASNÝ STAV	9
3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	12
4. MODEL ŠÍŘENÍ KAPALINY	14
4.1 PRINCIP ŘEŠENÍ.....	14
4.2 VSTUPNÍ DATA.....	16
4.3 NEJISTOTY VE VSTUPNÍCH DATECH	17
4.4 VARIANTA DETERMINISTICKÉHO POPISU LOKALITY	18
4.5 ALGORITMUS GENEROVÁNÍ VARIANTY LOKALITY	19
4.6 ALGORITMUS PRO VÝPOČET ŠÍŘENÍ KAPALITNY	20
4.7 STATISTICKÉ ODHADY	21
5. VYUŽITÍ MODELU V RÁMCI ŘEŠENÝCH PROJEKTŮ	24
6. ZÁVĚR	27
LITERATURA.....	29
Použitá literatura.....	29
Publikace autora - Diplomová práce	31
Publikace autora - Články ve sbornících konferencí.....	32
Publikace autora - Články v časopisech.....	33
Publikace autora - Technické zprávy	33



Seznam obrázků

Obrázek 1: Fotografie dokumentující havárii ropovodu Družba u Čáslavi	9
Obrázek 2: Schéma funkce výpočtového modelu	15
Obrázek 3: Příklad varianty lokality - 3D pohled na část silnice č. 10 (černě) blízko obce Plavy od jihu	19
Obrázek 4: Příklad variant šíření kapaliny	21
Obrázek 5: Odhady pravděpodobností zasažení plochy lokality	22
Obrázek 6: Příklad odhadu distribuční funkce a pravděpodobností zasažení vodního toku s různými rozsahy objemů uniklé kapaliny.....	23
Obrázek 7: Frekvence zasažení bodů uniklou kapalinou – detail pro potok	25
Obrázek 8: Graf závislosti frekvence na objemech kapaliny proniklých do potoka.....	25



1. ÚVOD

Vývoj výpočtových modelů určených k simulaci přírodních procesů na počítačích zažívá od přelomu 20. a 21. století velký rozmach. Ten je umožněn především rozvojem výpočetní techniky. Mezi modely přírodních procesů patří také modely určené pro predikci pohybu kapalných látek v životním prostředí.

V naprosté většině případů se jedná o modelování pohybu vody. Existují modely pro predikci pohybu podzemní vody, modely pro simulaci pohybu vody v půdách, meteorologické modely pro předpovídání srážek, modely pro simulaci pohybu vody v říčních korytech, modely pro předpovídání povodní aj.

V průmyslové praxi je však nutno řešit také rizika z nakládání s nebezpečnými kapalnými látkami. K tomuto účelu je potřebná predikce šíření různých typů kapalin po zemském povrchu při jejich potenciálním úniku z technických zařízení následkem možných havárií. Jedná se o zařízení určená pro výrobu, přepravu, skladování a zpracování těchto kapalin, jako jsou produktovody, skladovací zásobníky nebo cisternová vozidla. Mezi nejčastěji využívané kapaliny přitom patří ropné produkty a zejména pak pohonné hmoty.

V minulých letech byly řešeny na TUL dva projekty zaměřené na posouzení rizik souvisejících s únikem nebezpečných látek do životního prostředí. Cílem řešení jednoho z projektů bylo vytvoření hodnotících postupů pro zjišťování vlivu dopravních havárií s následným únikem přepravovaných chemických látek na pozemních komunikacích na biodiverzitu v okolí komunikace. V rámci druhého projektu byla formulována úloha oceňování rizik ohrožení vodních toků při úniku nebezpečné kapaliny z potenciálního zdroje.

Součástí řešení těchto projektů bylo nalezení způsobu predikce šíření kapaliny po reálném zemském povrchu. Tato úloha směřovala k vytvoření modelu s požadavkem na minimalizaci potřeby obtížně dostupných dat. Dalším požadavkem na model bylo dodržování bilance kapaliny.

Ukázalo se, že problematika hodnocení dopadů úniků nebezpečných kapalin na životní prostředí není dosud uspokojivě vyřešena. Cílem předkládané disertační práce je nalezení vhodného postupu a sestavení simulačního modelu pro dosud chybějící popis šíření kapalin po reálném zemském povrchu.



2. VYMEZENÍ PROBLEMATIKY A SOUČASNÝ STAV

Představme si situaci, kdy dojde k porušení produktovodu, ve kterém je přepravována kapalná látka. Příkladem takové havárie může být havárie ropovodu Družba. K úniku ropy došlo v zimním období dne 27. ledna 2005 na zoraném poli mezi městem Čáslav a obcí Žáky. Na zemský povrch uniklo přes 120 m³ ropy.

Ropa se po členitém povrchu pole šířila velmi nahodilým způsobem. Vytvářela různé proudy s různě vysokými výškami hladin od několika milimetrů po několik centimetrů. Důležitým faktorem ovlivňujícím směry šíření ropy nebyl pouze sklon svahu, na kterém se pole nacházelo, ale brázdy vzniklé podzimní orbou přibližně kolmé ke směru klesání svahu. Tuto skutečnost dokumentuje obrázek 1.



Obrázek 1: Fotografie dokumentující havárii ropovodu Družba u Čáslavi

Několik desítek metrů od místa úniku na konci svahu se nachází rybník Měděnice. I přes rozsah úniku a současně krátkou vzdálenost od zdroje úniku k přímé kontaminaci vod do příjezdu HZS prakticky nedošlo. O tuto skutečnost se zasloužila především členitost povrchu tvořená zmíněnými brázdami. Nejen že se ropa po povrchu pole rozptýlila do šířky ve směru brázd, ale velká část objemu tyto brázdy vyplnila. Významný objem ropy byl také zachycen kolejiemi v cestě, která vede při břehu rybníka. Výrazná kaluž se tak vytvořila v místě, odkud není povrchová voda ohrožena. Kromě toho se nemalé procento kapaliny váže k povrchu vlivem adhezních sil (dochází ke smáčení povrchu). Vzhledem k mrazivému počasí a vysoké viskozitě ropy nedocházelo k tak intenzivní infiltraci, než by tomu bylo v případě méně viskózní látky a nepromrzlé půdy v letních měsících. Přehled dalších havárií



spojených s únikem kapalné látky na území České republiky uvádí například webové stránky ČIŽP (www.cizp.cz).

Uvedený příklad charakterizuje způsob šíření kapalných látek po reálném zemském povrchu při jejich úniku z různých technických zařízení. Zpravidla se po úniku kapaliny na zemském povrchu vytvoří kaluž, která se dále šíří terénem. Výška hladiny kaluže se v takových případech obvykle může pohybovat od několika milimetrů do několika centimetrů, výjimečně až desítek centimetrů.

Směr šíření je ovlivňován tvarem terénu. Dominantní směr klesání terénu nemusí být určující pro směr šíření kapaliny. Zásadní roli zde velmi často hrají drobné terénní nerovnosti v řádech centimetrů, jako tomu bylo například i v případě brázd v poli při výše zmíněné havárii ropovodu. Pokud se kapalina šíří travnatým porostem, může narazit například na koleje vyježděné od zemědělských strojů, drobné výmoly a hrboly, vyšlapané stezky apod. V lesních porostech je povrch terénu ještě členitější. Všechny tyto detaily ve členitosti povrchu mívají na směr šíření kaluže kapaliny značný vliv. Často se také stává, že proud šíření kapaliny se vlivem členitosti povrchu rozdělí do několika směrů. Členitost povrchu terénu na úrovni jednotek centimetrů je vlivem působení přírodních činitelů (voda, vítr, gravitace) a člověka časově velmi proměnlivá.

Jak se kaluž kapalné látky šíří po zemském povrchu, může docházet k zachytávání kapaliny na povrchu vlivem smáčení nebo jiných interakcí mezi kapalinou a povrchem, infiltraci (vsakování) nebo vypařování. Intenzita těchto dějů závisí jak na typu kapalné látky, tak i na typu povrchu a aktuální meteorologické situaci. Tyto charakteristiky se přitom mohou v čase i prostoru velmi rychle měnit.

Simulace zmíněného charakteru šíření kapalné látky představuje velmi složitý komplexní problém a to zejména díky velkým nejistotám v popisu dat vstupujících do výpočtového modelu. Pro simulaci šíření kapalných látek se přitom obecně nabízí v současné době různé přístupy, jejichž využití je pro uvedený typ úloh velmi problematické.

Jednou z možností, jak modelovat pohyb kapalné látky, je využití obecně známých pohybových rovnic proudění ideální kapaliny. Jedná se o parciální diferenciální rovnice, jejichž princip je vysvětlen například v [8,9,10]. Využití těchto rovnic je však v této situaci prakticky vyloučeno, protože nelze v tomto případě zanedbávat vlastnosti reálné kapaliny. Využít však nelze ani rovnice podobného typu se započtením viskózního proudění. Numerické řešení těchto rovnic je výpočetně náročné, platnost rovnic má značná omezení a pro jejich řešení není v praxi možné získat relevantní vstupní data. Matematickým aparátem pro popis viskózního proudění se opět zabývá [8,9,10].

Další možností modelování povrchového šíření kapalné látky je přístup zaměřený přímo na pohyb tenké vrstvy kapaliny [16,26,27,28]. Tento model je reprezentován parciální diferenciální rovnicí. Na rozdíl od výše popsaných principů se do výpočtu zahrnuje také



smáčení povrchu, po kterém se kapalina pohybuje, a infiltrace. Použití tohoto přístupu může sloužit pro predikci šíření kaluže ve specifických případech, kdy jsou přesně známy vlastnosti kapaliny a povrchu, které lze považovat za homogenní. Plocha, po které se kapalina šíří, musí být rovina se stálým sklonem. Tato omezení však nelze v případě kaluže šířící se obecným přírodním terénem v naprosté většině případů akceptovat. Proto není ani tato rovnice pro řešení naší úlohy vhodná.

Další způsoby řešení predikce šíření kapalných látek po zemském povrchu vycházejí z předpokladu, že se kapalina bude šířit ve směru největšího klesání terénu po jediné trajektorii. Tento přístup je velmi jednoduchý a výpočetně nenáročný. Výsledky takových přístupů mohou být však velmi nepřesné. To způsobuje skutečnost, že se zde využívají běžně dostupná data s popisem nadmořských výšek, která jsou vzhledem k řešené problematice málo podrobná a zatížená značnými nejistotami. Jeden takový přístup je popsán v [8]. Postupy tohoto typu jsou většinou implementovány jako nástroje používané v rámci geografických informačních systémů (GIS).

Modelování procesu šíření kapalně látky po povrchu reálného terénu za výše popsaných podmínek představuje velmi složitý problém. Existují přitom typy úloh, v kterých je uvedená problematika řešena buď nedostatečně, nebo je snahou se jí pro přílišnou složitost vyhnout.

Příkladem mohou být různé metodické pokyny pro analýzu a hodnocení environmentálních rizik doporučené Ministerstvem životního prostředí ČR, jako jsou například H&V Index [31] a ENVITech03 [22] nebo přístupy podle [13,15]. K dispozici nejsou ani vhodné nástroje, pomocí kterých by bylo možné rozsah úniku kapalných látek odhadovat pro různé typy havárií s rychlou odezvou a které by byly účinně použitelné pro operační střediska HZS. Diskusí nad omezenými možnostmi využití některých přístupů k modelování šíření kapalných látek po jejich potenciálním úniku z produktovodu se zabývá článek [5].



3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem této disertační práce je vytvoření výpočtového modelu, pomocí kterého by bylo možné predikovat vývoj šíření kapalně látky po reálném zemském povrchu následkem havárií technických zařízení. Tyto situace představuje například únik kapaliny z produktovodu (např. ropa z ropovodu), únik pohonných hmot z havarované cisterny nebo úniky různých chemikálií ze zásobníků v provozech chemického průmyslu.

Specifickým požadavkem na model je popis roztékání kapaliny v tenké vrstvě, kde se kromě gravitačního efektu výrazně projevuje morfologie terénu včetně drobných nerovností. Šíření zahrnuje i infiltraci, odpařování a ulpívání kapaliny na terénu a vegetačním pokryvu.

V rámci vymezeného úkolu bylo třeba vytvořit koncepci modelu, který by zahrnoval a zohledňoval tyto dílčí okruhy problematiky:

- 1) model šíření kapaliny (infiltrace, odpařování, ulpívání),
- 2) model terénu,
- 3) dostupnost relevantních údajů,
- 4) nejistoty ve vstupních datech,
- 5) rychlost a robustnost vytvořených algoritmů.

Model by měl být zaměřen především na simulaci šíření kapalných látek při jejich úniku do životního prostředí. Vstupní podklady pro tento model by měly tvořit běžně dostupná geografická data s různě velkou přesností a hustotou bez nutnosti dalšího podrobného terénního průzkumu lokality, pro kterou jsou simulace pomocí modelu prováděny. Výpočet šíření kapaliny by tak mohl být pohotově prováděn pro libovolný potenciální zdroj úniku v rámci velkého území, jakým je například kraj nebo území celé České republiky.

Pro zvládnutí hlavního cíle byly stanoveny tři dílčí cíle:

Prvním dílčím cílem je nalezení způsobu zpracování nejistot ve vstupních datech pomocí stochastického přístupu. Zemský povrch se co do vlastností vyznačuje značnou variabilitou, která se v praxi nedá popsat zcela přesně. Šíření libovolné kapaliny s nízkou výškou hladiny kaluže je přitom povrchem značně ovlivňováno i v detailních charakteristikách.

Druhým dílčím cílem je vytvoření algoritmu, pomocí kterého by z běžně dostupných relativně málo podrobných vstupních dat bylo možné pro účely simulace šíření kapaliny získat co nejvíce informací o zemském povrchu lokality, pro niž by se výpočet prováděl. V rámci tohoto dílčího cíle je třeba vytvořit rychlý interpolační algoritmus pro tvorbu modelu terénu, který by byl nezávislý na hustotě a způsobu rozložení vstupních výškopisných dat. Je



také nezbytné vyřešit způsob modelování morfologie terénu tak, aby byly zahrnuty vertikální profily povrchových objektů, které často šíření kapaliny ovlivňují značným způsobem, ale nejsou zahrnuty ve výškopisných datech.

Třetím dílčím cílem je vytvoření rychlého a robustního algoritmu pro predikci samotného šíření kapaliny po obecném zemském povrchu. Přitom je žádoucí omezit počet vstupních fyzikálních charakteristik povrchu i kapaliny při zachování věrohodnosti získaných výsledků.



4. MODEL ŠÍŘENÍ KAPALINY

4.1 PRINCIP ŘEŠENÍ

Vytvořený model šíření kapaliny představuje virtuální realitu, která umožňuje simulovat chování kapaliny v prostoru a čase na reálném zemském povrchu. S pomocí tohoto modelu lze simulovat šíření kapalných látek z potenciálního zdroje jejího úniku a tím predikovat možné ohrožení okolního životního prostředí. Úloha řešená výpočtovým modelem zahrnuje řešení následujících dílčích oblastí:

- Zpracování vstupních dat
- Algoritmus výpočtu šíření kapaliny
- Zpracování nejistot ve vstupních datech
- Zpracování výsledků s ohledem na nejistoty
- Softwarová implementace

Vstupní data obsahují popis potenciálně ohrožené lokality, popis zdroje kapaliny a parametry určené pro řízení výpočtu. Zpracování těchto dat zahrnuje výběr jejich vhodného a současně dostupného zdroje a jejich úpravu do formy vhodné pro simulaci prováděnou výpočtem algoritmem.

Úkolem výpočetního algoritmu je podat na základě vstupních dat pro zasažené území v každém místě a čase odpovědi na následující otázky:

- Jaký objem kapaliny se nyní nachází na povrchu.
- Jaký objem kapaliny se od počátku simulace vsáknul pod povrch.
- Jaký objem kapaliny se od počátku simulace vypařil.
- Jaký objem kapaliny od počátku simulace kontaminoval povrchovou vodu, pokud se příslušné místo nachází v jejím těsném sousedství.

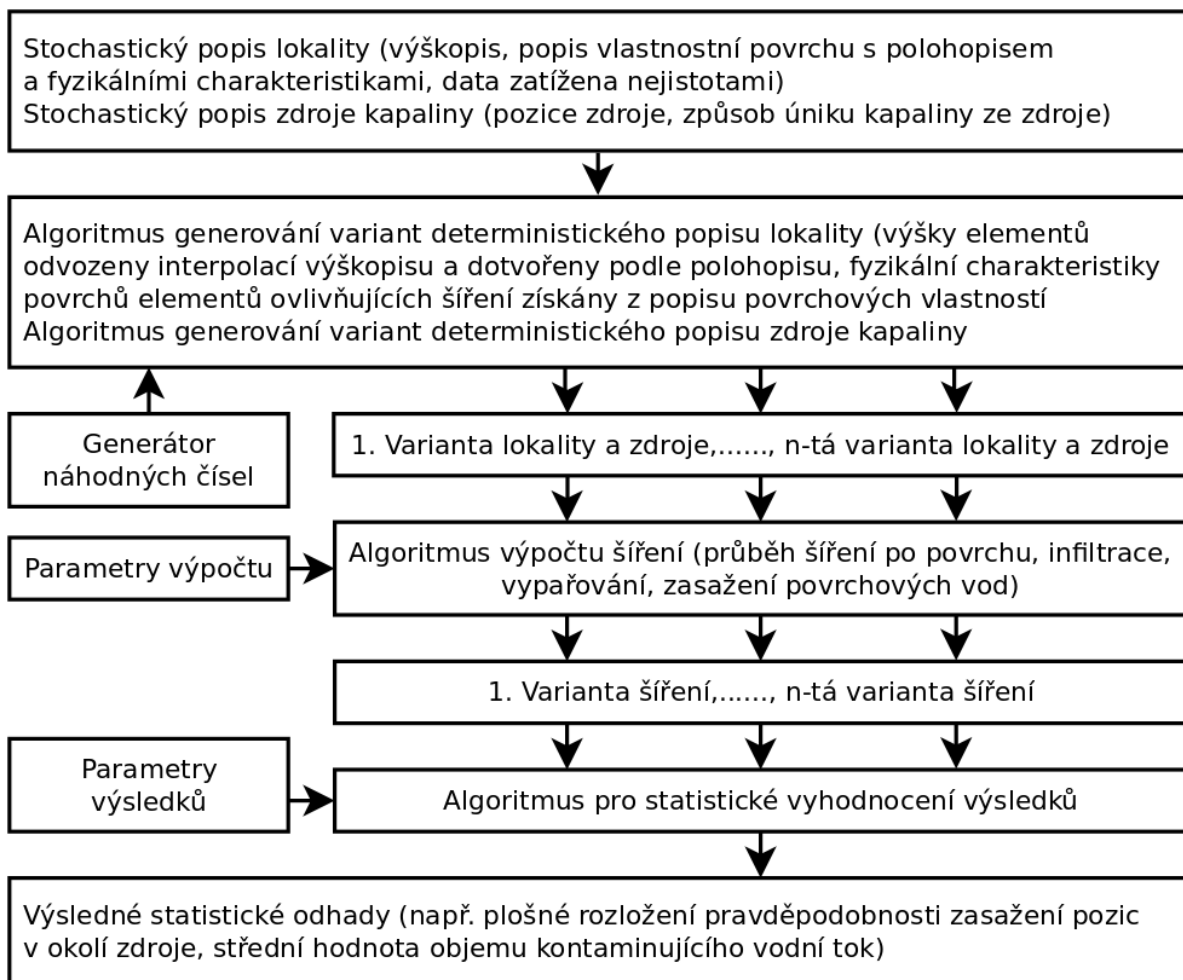
Při vývoji modelu šíření kapaliny byl kladen důraz na stochastický přístup, který umožňuje zadávat potřebná vstupní data se zahrnutím jejich nejistot. Nejistoty v popisu lokality vznikají zejména díky nedostatečné hustotě, přesnosti a aktuálnosti dat, která je možné mít k dispozici. Nejistoty v popisu zdroje kapaliny zase zohledňují skutečnost, že způsob možného úniku kapaliny při havárii technického zařízení lze dopředu odhadovat jen přibližně. Se zahrnutím nejistot vzniká nejednoznačnost v popisu lokality i zdroje, která generuje velké množství deterministických variant popisu lokality a zdroje kapaliny. Každé dvojici deterministického popisu varianty lokality a varianty zdroje pak odpovídá právě jedna varianta šíření kapaliny získaná výpočtovým algoritmem pro predikci šíření kapaliny.



Pro jednotlivá místa a časy nakonec dostaneme skupiny hodnot, na základě kterých jsou prováděny odhady různých statistik v závislosti na typech výsledků, které nás zajímají. Příklady statistických výsledků mohou být následující:

- Jaký objem kapaliny se nyní nachází na povrchu.
- Jaký objem kapaliny se od počátku simulace vsáknul pod povrch.
- Jaký objem kapaliny se od počátku simulace vypařil.
- Jaký objem kapaliny od počátku simulace kontaminoval povrchovou vodu, pokud se příslušné místo nachází v jejím těsném sousedství.

Princip celého mechanismu práce modelu naznačuje schéma na obrázku 2.



Obrázek 2: Schéma funkce výpočtového modelu



4.2 VSTUPNÍ DATA

Každá úloha řešená výpočtovým modelem pracuje se třemi kategoriemi vstupních dat. Jedná se o popis lokality, popis zdroje kapalné látky a řídicí parametry výpočtu.

Popis lokality obsahuje data charakterizující povrch území, po kterém se simulovaný pohyb kapaliny odehrává. Data se dělí na výškopis a popis vlastností povrchu. Pro popis lokality je nejprve třeba zvolit vhodný systém souřadnic. Model obecně může pracovat s libovolným geografickým souřadným systémem s kartézskými souřadnicemi. Jednotkou na osách těchto souřadnic musí být jeden metr. Například pro popis území České republiky se používá převážně systém JTSK (Jednotná trigonometrická síť katastrální). Pro popis pozice v rámci globálního měřítka je využíván například geografický systém UTM (Univerzální transversální Mercatorův systém souřadnic).

Výškopis charakterizuje morfologii terénu lokality, která šíření kapaliny výrazně ovlivňuje. Realizuje se pomocí tří typů výškopisných objektů, kterými mohou být výškové body, vrstevnice nebo prostorové linie. Tyto objekty jsou organizovány ve skupinách, které označujeme jako vrstvy, stejně jako v geografických informačních systémech (GIS).

Popis vlastností povrchu charakterizuje fyzikální vlastnosti povrchu lokality, které mají dopad na šíření kapaliny. Jedná se o parametry ovlivňující pohyb kapaliny po povrchu, interakce mezi kapalinou a povrchem, infiltraci (vsakování) a vypařování. Tyto vlastnosti závisí na typech povrchů v daném místě, jako jsou pole, louka, lesní půda nebo asfaltová plocha. Výskyt typů povrchů je určován na základě polohopisu, který udává prostorové rozmístění jednotlivých povrchových objektů. Zdrojem polohopisu jsou stejně jako u výškopisu geoprostorové vektorové formáty kompatibilní s GIS.

Povrchové objekty tvořící jeden typ povrchu jsou organizovány v jedné společné skupině, kterou stejně jako u výškopisu označujeme jako vrstva. Povrchové objekty jsou v polohopisu vyjádřeny pomocí tří typů geometrických útvarů, kterými jsou body, linie a polygony. Objekty popsané v jedné vrstvě představují nejen jednotný typ povrchů, ale v polohopisu jsou popsány také jednotným typem geometrického útvaru. Vhodným zdrojem dat výškopisu i polohopisu pro území České republiky může být například Základní Báze Geografických Dat (ZABEGED), která je spravována Českým zeměměřickým úřadem.

Další skupinu vstupních dat potřebných pro výpočet tvoří popis zdroje kapaliny. Popis je tvořen pomocí několika parametrů, které udávají pozici zdroje, objem unikající kapaliny a charakter úniku, který šíření kapalné látky také často značným způsobem ovlivňuje.

Může se jednat například o únik přepravované nafty při havárii cisternového vozidla. Rychlost úniku může být různá v závislosti na rozsahu poškození pláště cisterny. Rychlost úniku však bude vlivem snižující se hladiny kapaliny postupně klesat. Jiná situace nastane, když dojde například k porušení ropovodu. Úniky tohoto typu mívají z hlediska času i uniklého objemu mnohonásobně větší rozsah. Rychlost úniku se v těchto případech až do



detekce havárie a následného uzavření potrubí prakticky nemění.

Parametry řízení výpočtu slouží k ovlivnění průběhu simulačního výpočtu. Jsou rozděleny do dvou skupin. První skupina popisuje prostorové vymezení lokality, pro kterou se výpočet bude vykonávat. Druhá skupina obsahuje simulovanou dobu šíření kapaliny a parametry ovlivňující časový krok výpočtu. Tyto parametry ovlivňují jak dobu trvání simulačního výpočtu, tak i přesnost dosažených výsledků.

4.3 NEJISTOTY VE VSTUPNÍCH DATECH

Výškopis, popis vlastností povrchu a popis zdroje kapaliny jsou zatíženy nejistotami.

U výškopisu jsou nejistoty dány omezenou přesností hodnot nadmořských výšek jednotlivých výškopisných objektů. Nejistoty výškopisu jsou rovněž dány omezenou hustotou těchto dat.

U popisu vlastností povrchu jsou nejistoty obsaženy v mnohem větším počtu parametrů. Nejistota je obsažena už v polohopisu. Souřadnice bodů popisujících bodové objekty, linie nebo polygony mívají obvykle omezenou přesnost. Tato přesnost se u běžně dostupných dat může pohybovat od několika desítek centimetrů až po několik desítek metrů.

Stanovit na základě dostupných podkladů nelze přesně ani parametry společné se skupinou objektů stejného typu pro celou vrstvu. Jedná se například o šířku polní cesty nebo hloubku jejích vyježděných kolejí. Tyto parametry se navíc mohou v čase velmi rychle a nahodile měnit v závislosti na působení všech možných přírodních činitelů, které zemský povrch přetvářejí (voda, vítr, gravitace ad.). Velmi podstatným přetvářejícím činitelem v podmínkách našeho území je člověk. Přesnost u plošných charakteristik se může pohybovat od několika centimetrů do několika metrů, ojediněle až po desítky metrů. U vertikálních profilů se přesnost nejčastěji může pohybovat od několika milimetrů až po desítky centimetrů, někdy až po celé metry.

U fyzikálních charakteristik povrchu může být situace ještě méně přehledná. Například objem kapaliny, která se zachytí vlivem smáčivých sil a drsnosti povrchu na travnatém porostu, může záviset nejen na typu kapalně látky a venkovní teplotě, ale také na hustotě a druhu travin, nebo přítomnosti sněhové pokrývky v zimním období. Nejistotami jsou rovněž ovlivněny také parametry popisující vsakování nebo případné vypařování kapaliny. Rozmezí hodnot těchto koeficientů se v závislosti na typu povrchu, vlastnostech kapalně látky a meteorologické situaci může pohybovat v rámci několika řádů.

Nejistotami ve svém popisu je rovněž zatížen také zdroj kapalně látky. Například rychlost úniku nafty z havarované cisterny závisí především na charakteru poškození jejího pláště, které se dá předvídat jen velmi těžko.

Nejistoty v popisu lokality i zdroje je tedy pro získání korektních výsledků třeba brát



v úvahu a odpovídajícím způsobem je zahrnout do řešení konkrétní úlohy. Znamená to, že každý parametr zatížený nejistotou se zadává nikoliv pomocí jedné hodnoty, ale pomocí rozmezí možných hodnot, doplněným případně nejvíce očekávanou hodnotou.

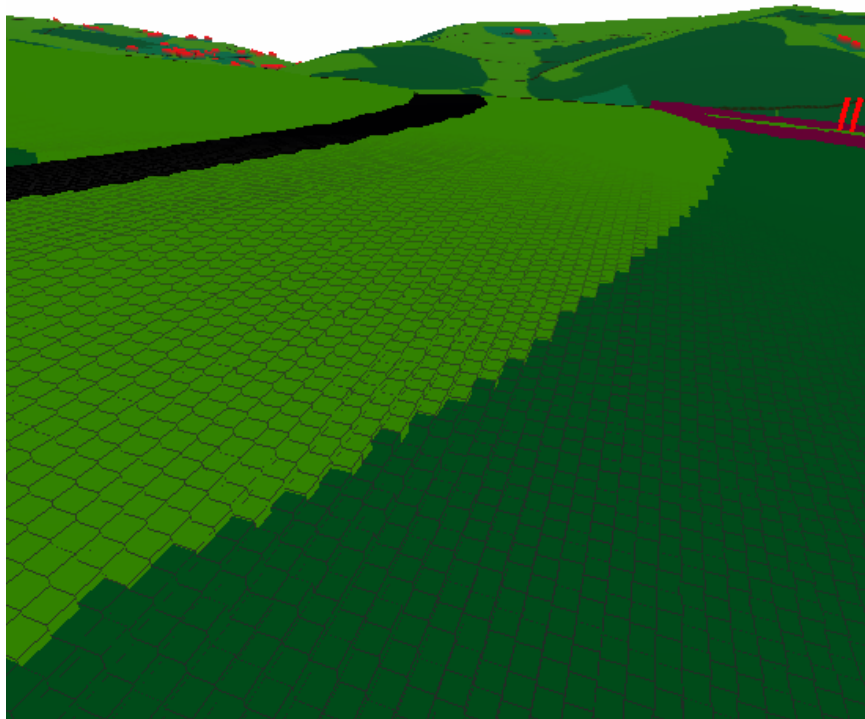
Z matematického hlediska se každý parametr s nejistotou považuje za náhodnou veličinu. Nejistota vstupního parametru je popsána jako funkce hustoty rozdělení pravděpodobnosti této náhodné veličiny. Popis lokality je tak vyjádřen stochastickým způsobem.

4. 4 VARIANTA DETERMINISTICKÉHO POPISU LOKALITY

Varianta deterministického popisu lokality (dále jen varianta lokality) představuje datovou strukturu, která obsahuje jeden z mnoha možných deterministických popisů lokality, který vyplývá ze stochastického popisu lokality. Čím mají nejistoty v popisu lokality větší rozsah, tím více se jednotlivé varianty lokality mohou odlišovat. Naopak, pokud by se teoreticky v popisu lokality žádná nejistota nevyskytovala, existovala by pouze jediná varianta lokality.

Varianta lokality popisuje obdélníkový výřez území, který má dānu svoji geografickou polohu a rozměry. Tyto údaje tvoří součást parametrů řízení výpočtu a jsou pro všechny varianty lokality v rámci konkrétní řešené úlohy stejné. Plocha varianty lokality je rozdělena na čtvercové elementy. Každý z těchto elementů reprezentuje část plochy lokality s charakteristikami potřebnými k výpočtu šíření kapalné látky. Tyto charakteristiky se v rámci celé plochy elementu považují za konstantní.

Každý element obsahuje dvě skupiny parametrů. První skupinu tvoří geografické údaje s popisem nadmořské výšky a identifikátorem typu objektu, který se v pozici elementu nachází. Druhá skupina parametrů obsahuje fyzikální charakteristiky povrchu potřebné pro simulaci. Tyto charakteristiky se vztahují ke konkrétní kapalině a popisují vliv povrchu na roztékání kapaliny nebo infiltraci. Ukázku 3D pohledu na variantu lokality dokumentuje obrázek 3.



Obrázek 3: Příklad varianty lokality - 3D pohled na část silnice č. 10 (černě) blízko obce Plavy od jihu

4.5 ALGORITMUS GENEROVÁNÍ VARIANTY LOKALITY

K sestavení varianty lokality slouží algoritmus, jehož účelem je výpočet konkrétních deterministických geografických údajů a fyzikálních vlastností povrchů pro všechny elementy, kterými je povrch varianty lokality tvořen. Sestavení varianty lokality probíhá na základě dat obsažených v popisu lokality.

V první fázi tohoto algoritmu je zpracováván výškopis, pomocí kterého je sestaven výškový model terénu, kdy jsou jednotlivým elementům varianty lokality přiděleny nadmořské výšky. Tato fáze se dělí do dvou hlavních kroků. V prvním kroku jsou do varianty lokality načteny nadmořské výšky přímo získané z výškopisných objektů. V druhém kroku jsou potom na základě těchto výšek určeny pomocí interpolace hodnoty výšek zbývajících elementů. Pro interpolaci nadmořských výšek byl vyvinut speciální algoritmus tvořící součást této disertační práce. Jeho hlavní výhodou je jeho velká nezávislost na způsobu rozložení výškových dat a rychlost jeho výpočtu.

V druhé fázi jsou zpracovávána data popisující vlastnosti povrchových objektů. Toto zpracování spočívá v načítání jednotlivých povrchových objektů do varianty lokality, které probíhá v několika krocích.



Prvním krokem je stanovení elementů, které plochu příslušného objektu tvoří. V druhém kroku je na základě typu daného objektu provedena korekce nadmořských výšek elementů získaných v předchozí fázi. Jedná se o důležitý krok, díky kterému jsou v terénu zohledněny útvary, které obvykle ze samotného výškopisu nevyplývají. Může se jednat například o násypy, příkopy a další bariéry související s pozemními komunikacemi. Tyto bariéry mívají často zásadní vliv na směr šíření kapaliny. Ve třetím kroku jsou pak pro jednotlivé elementy tvořící povrch objektu určeny fyzikální vlastnosti povrchu potřebné pro provedení výpočtu šíření kapaliny.

4.6 ALGORITMUS PRO VÝPOČET ŠÍŘENÍ KAPALINY

Výpočtový algoritmus je určen k simulaci šíření kapalné látky po deterministicky popsaném zemském povrchu. Jako datový podklad pro výpočet slouží varianta lokality, varianta zdroje a řídicí parametry. Každé kombinaci těchto vstupních dat potom odpovídá jedna varianta šíření kapalné látky.

Model uvažuje celkem se čtyřmi fyzikálními ději, které při pohybu kapaliny probíhají. Jedná se o pohyb kapaliny po zemském povrchu směrem od zdroje do okolí, záchyt části kapaliny na povrchu vlivem smáčivých sil, infiltraci a vypařování. Elementární jednotkou plochy pro popis šíření kapaliny je plocha jednoho elementu varianty lokality.

Každý element varianty lokality je pro účely výpočtu predikce šíření kapalné látky popsán čtyřmi stavovými veličinami. Tyto veličiny popisují okamžitý stav objemu kapaliny vyskytujícího se na povrchu, infiltrovaného pod povrch, vypařeného a přitéklého do povrchových vod.

Algoritmus postupuje v časové smyčce jednotlivými časovými okamžiky, jejichž odstup je dán proměnlivým časovým krokem výpočtu. V rámci každého cyklu časové smyčky se pomocí dalších smyček algoritmu provádějí výpočty stavových veličin pro jednotlivé elementy. Tyto výpočty vycházejí z povrchových vlastností elementů a hodnot stavových veličin v předešlém časovém okamžiku.

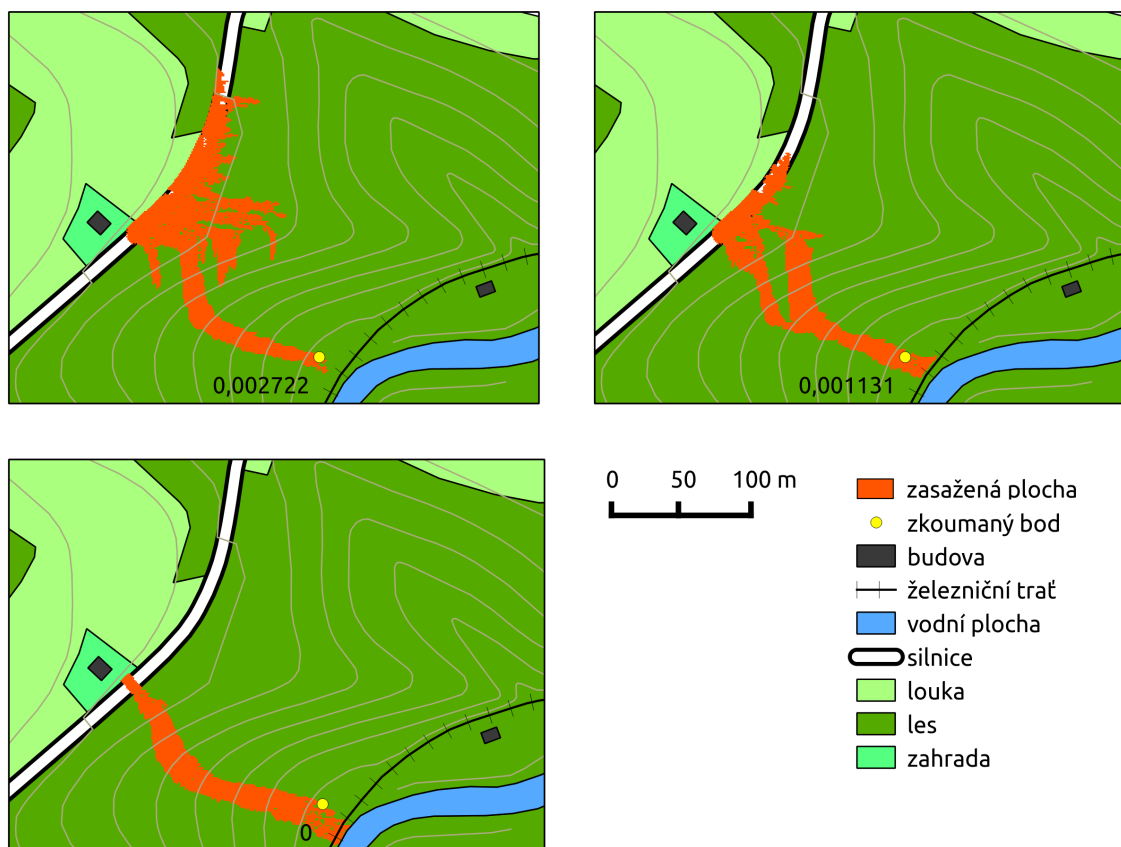
Varianta zdroje kapaliny se realizuje jako okrajová podmínka předepsaná pro elementy, v jejichž pozici se zdroj úniku nachází. Na povrchu každého z elementů v pozici zdroje kapaliny je simulován přítok kapalné látky s definovaným časovým vývojem průtoku.

Výsledkem algoritmu pro výpočet šíření kapalné látky je varianta šíření kapaliny (dále jen varianta šíření). Varianta šíření je popsána hodnotami stavových veličin popisujících stav kapaliny v pozicích jednotlivých elementů varianty lokality. Tento stav se vztahuje ke konkrétním zvoleným časovým okamžikům, které jsou předmětem našeho zájmu.



4.7 STATISTICKÉ ODHADY

Každé dvojici varianty lokality a varianty zdroje odpovídá právě jedna varianta šíření kapaliny. Při výpočtu většího množství variant šíření je tak každá stavová veličina pro jednotlivé elementy popsána nikoliv jednou hodnotou, ale celou skupinou hodnot. Na obrázku 4 je uveden příklad tří variant rozšíření kaluže v rámci jedné úlohy. V zobrazených variantách je také vyznačen příklad pozice elementu s různými hodnotami stavové veličiny popisující výšku hladiny kapaliny vyskytující se na povrchu.



Obrázek 4: Příklad variant šíření kapaliny

Skupinu takto získaných hodnot, která stavovou veličinu pro každý element popisuje, považujeme z hlediska matematické statistiky za statistický soubor. Ke zpracování statistických souborů jednotlivých stavových veličin a interpretace celkových výsledků modelu šíření kapaliny je určen algoritmus pro odhad statistik.

Zpracováním získaných statistických souborů se u tohoto modelu rozumí provádění odhadů statistik [24], [25], jako je zejména střední hodnota, distribuční funkce, pravděpodobnost překročení stanovených limitních hodnot, směrodatná odchylka nebo hodnoty různých kvantilů.

Simulace náhodných výběrů se obecně označuje jako metoda Monte Carlo. V tomto

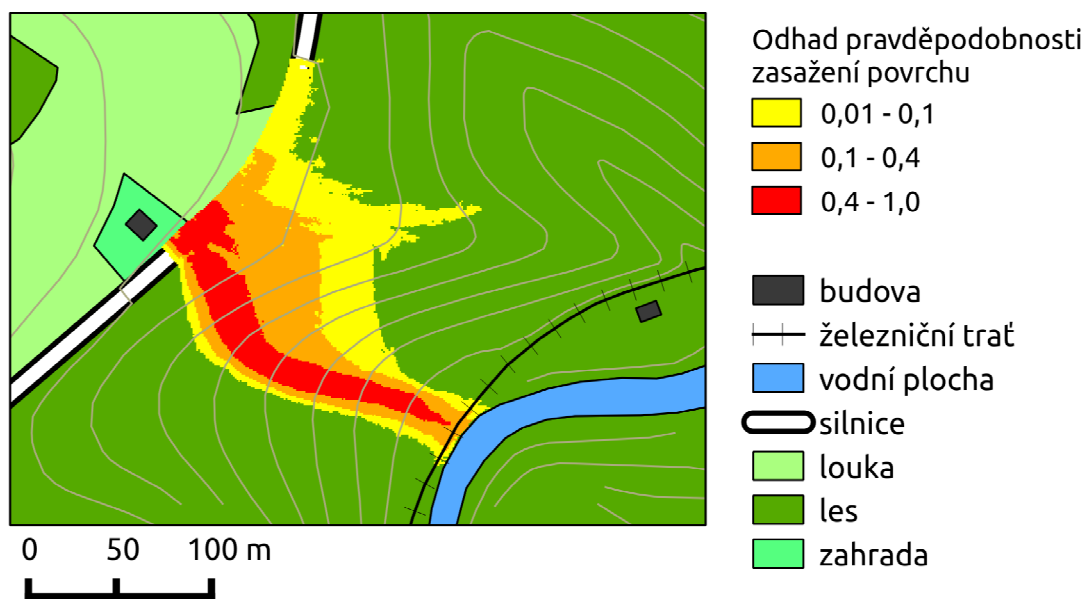


případě se jedná o náhodné výběry variant lokality a variant zdroje kapaliny. Počet výběrů musí být dostatečně velký a závisí na tom, jaké typy výsledků nás zajímají a jaká je míra nejistot ve vstupních datech. Na základě řešení praktických úloh se jeví jako dostačující počet kolem tisíce výběrů.

Výsledkem každého takového výběru je potom právě jedna varianta šíření kapaliny. Rozdílnost těchto variant závisí hlavně na míře nejistot, kterými jsou popsány vstupní parametry

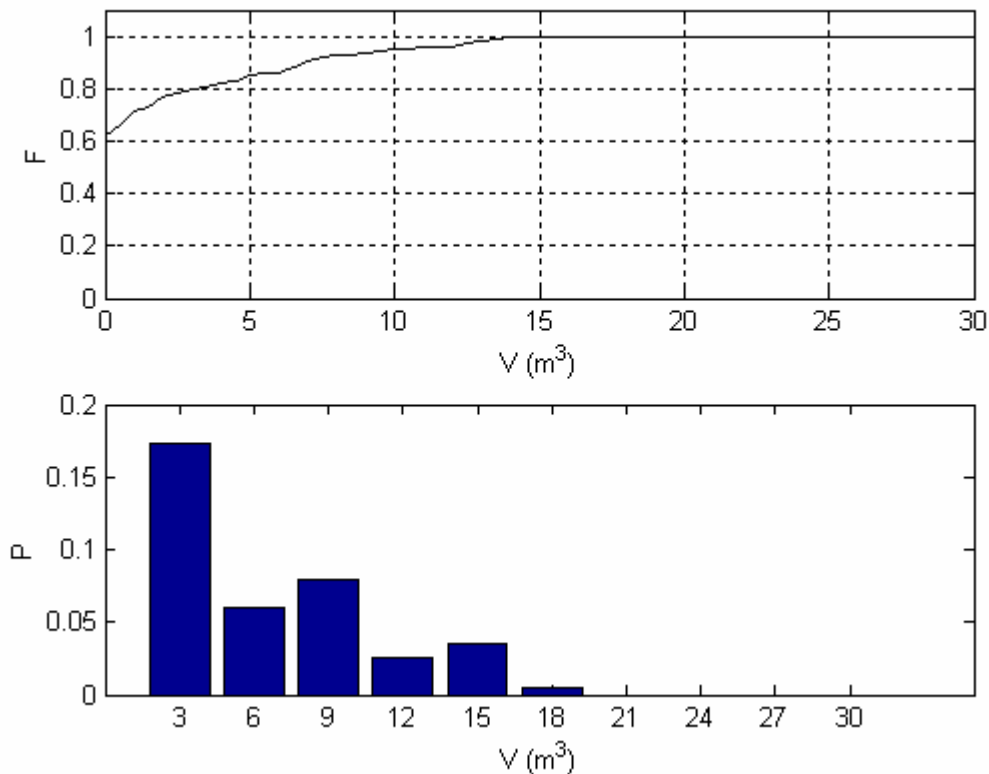
Stanovení odhadů statistik se může provádět pro několik úrovní. Statistiky se mohou vztahovat k plochám jednotlivých elementů, plochám jednotlivých objektů, k plochám skupiny objektů tvořících stejný typ povrchu nebo k ploše celého území.

Obrázek 5 znázorňuje příklad odhadu pravděpodobnosti zasažení plochy lokality na úrovni ploch jednotlivých elementů.



Obrázek 5: Odhady pravděpodobností zasažení plochy lokality

Graf na obrázku 6 obsahuje odhad distribuční funkce a pravděpodobností zasažení vodního toku s různými rozsahy objemů kapaliny uniklé ze silniční cisterny pro přepravu pohonných hmot s objemem 30 m^3 . V tomto případě se již nejedná o odhady statistik na úrovni jednotlivých elementů, ale jedná se o statistiku na úrovni plochy celého objektu daného v tomto případě plochou vodního toku.



Obrázek 6: Příklad odhadu distribuční funkce a pravděpodobností zasažení vodního toku s různými rozsahy objemů uniklé kapaliny

Kromě statistických souborů vstupují do algoritmu pro odhadování statistik také řídicí parametry. Ty obsahují informace o tom, jaké typy výsledků nás zajímají. Je zde uvedeno, jaká stavová veličina a pro jaký čas se má zpracovávat, jaké statistiky se mají odhadovat a pro jaké plošné celky se mají statistiky odhadovat.

Po teoretické stránce je algoritmus odhadování statistik oproti algoritmům sestavení varianty lokality nebo výpočtům šíření výrazně jednodušší. Jeho náplní je realizace výpočtů podle níže uvedených vztahů. Jeho softwarová implementace je však výrazně složitější z důvodu množství dat, která se pomocí algoritmu zpracovávají.



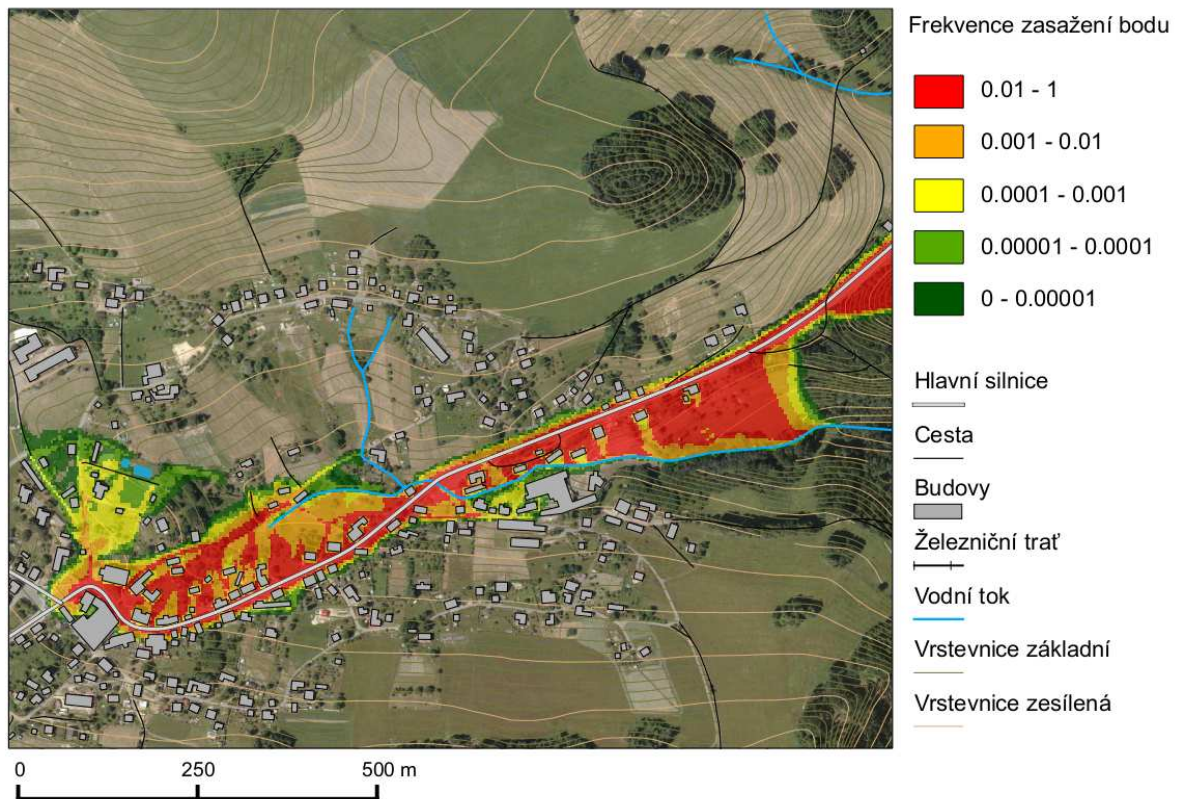
5. VYUŽITÍ MODELU V RÁMCI ŘEŠENÝCH PROJEKTŮ

Simulační model šíření kapaliny po obecném zemském povrchu byl využit v rámci dílčích úkolů několika vědecko-výzkumných projektů.

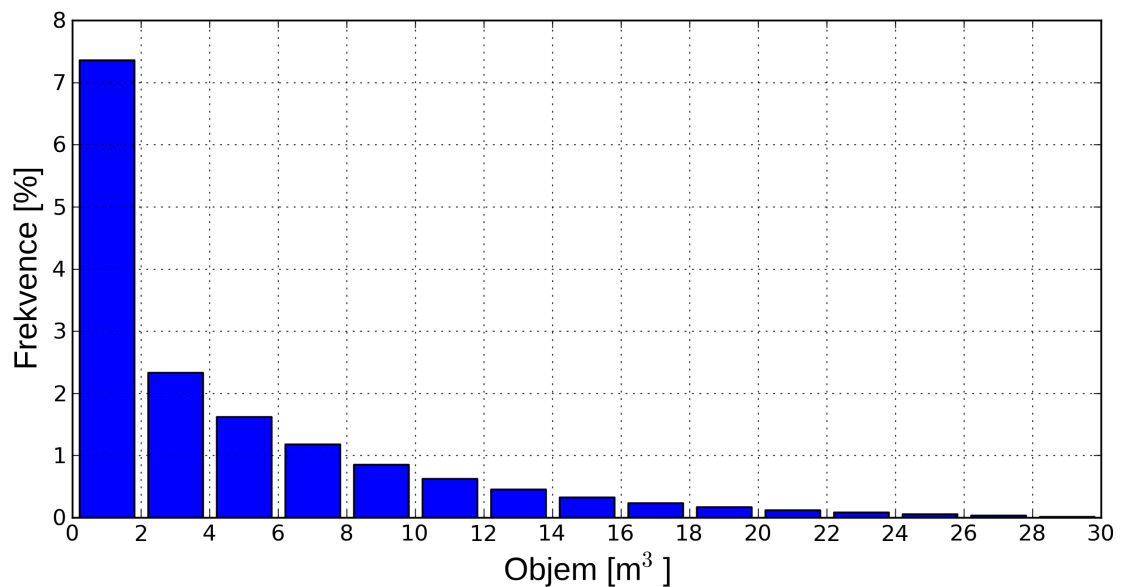
Jedním z nich byl projekt č. SPII 1a10 45/07 (Komplexní interakce mezi přírodními ději a průmyslem s ohledem na prevenci závažných havárií a krizové řízení) řešený v letech 2007 - 2011 v rámci programu VaV vyhlášeného MŽP. Projekt byl rozdělen do několika dílčích úkolů. Jedním z nich byl dílčí úkol s označením 3d, jehož náplní bylo vytvoření zásad modelování pohybu uniklé nebezpečné látky při závažné havárii a odhad množství této látky, která se dostane do povrchových vod.

Řešení tohoto dílčího úkolu vycházelo z výsledků modelu, popsaného v této práci. V závěrečné zprávě projektu [62] jsou uvedeny ukázky časového postupu šíření kapaliny, odhady pravděpodobnosti zasažení dílčích ploch i histogram pravděpodobného rozložení objemu kapaliny uniklé z jednoho místa a vnikající do vodního toku.

Vytvořena byla také modelová nadstavba, pomocí které je možné řešit úniky kapalných látek pro liniové zdroje. Na obrázku 7 je vykreslena frekvence zasažení bodů v okolí potoka protékajícího obcí Držkovem uniklou kapalinou při havárii cisterny o objemu 30 m³ na silnici I/10 (E65) v úseku Držkov – Plavy. Na jeden km trasy připadá v tomto případě 300 bodů úniku, které jsou rozmístěny po třech bodech (oba okraje a střed vozovky) na profilech v rozestupech 10 m.



Obrázek 7: Frekvence zasažení bodů uniklou kapalinou – detail pro potok



Obrázek 8: Graf závislosti frekvence na objemech kapaliny proniklých do potoka

Graf na obrázku 8 ukazuje závislost frekvence zasažení potoka různými objemy, které by do něj pronikly. Tento výsledek byl jedním z hlavních výsledků celého projektu.



Další projekt č. 2B08011 (Metodika posuzování vlivu dopravních tras na biodiverzitu a složky životního prostředí) byl řešen v letech 2008 - 2011 v rámci Národního programu výzkumu II vyhlášeného MŠMT.

Tento projekt [63] byl zaměřen na kvantifikaci rizika ekologické újmy na biotopech ohrožených přepravou nebezpečných látek. Pro kapaliny bylo třeba určit nejen celkovou rozlohu zasažené plochy, ale také její členění z hlediska pravděpodobnosti, že dojde k infiltraci kapaliny překračující různé limitní objemy. V rámci práce na projektu byla dořešena teoretická stránka přechodu od jednotlivých kaluží s bodovými zdroji k pásnu ohrožení při stochastických výpočtech. Vyřešení přenosu výstupů do prostředí GIS umožňuje zobrazit pásma ohrožení na topografických mapách a konfrontovat je s mapami rozložení biotopů.

Simulační model byl také využit při řešení dílčích úkolů v projektu Č. TA01030833 (Integrovaný informační systém pro silniční přepravu nebezpečných chemických látek) v letech 2011 - 2013 v rámci programu Alfa vyhlášeného Technologickou agenturou ČR. Tento projekt [61] byl zaměřen na stanovení rizika přepravy plyných i kapalných látek po silnici. Jednalo se zejména o hodnocení rizik pro člověka.



6. ZÁVĚR

Cílem této disertační práce bylo vytvoření výpočtového modelu, pomocí kterého by bylo možné simulovat šíření kapalných látek uniklých z technických zařízení po obecném reálném zemském povrchu. Splnění tohoto cíle bylo rozděleno do několika kroků.

V první řadě bylo třeba seznámit se se současnými přístupy predikce šíření kapalných látek. Ukázalo se, že existuje mnoho rozdílných přístupů pro predikci šíření kapalin, které jsou však úzce zaměřeny na řešení konkrétních situací. Vhodný způsob pro predikci šíření kapaliny na obecném zemském povrchu s ohledem na reálné možnosti vstupních dat v tuzemské ani zahraniční literatuře nalezen nebyl.

Na základě posouzení současných přístupů a potřeb řešení praktických úloh spojených s kvantifikací ekologických rizik byl hlavní cíl disertační práce zaměřen na vývoj vlastního simulačního modelu, pomocí kterého by bylo možné predikovat šíření kapalných látek po obecném zemském povrchu. Hlavním požadavkem na model byla jeho schopnost postihnout všechny děje ovlivňující šíření kapaliny po zemském povrchu, ale také infiltraci, odpařování a přestup do povrchových vod. Dalším požadavkem byla minimální náročnost na vstupní data s ohledem na jejich dostupnost a omezenou přesnost. Kromě toho bylo třeba, aby práce s modelem byla časově nenáročná s využitím běžně dostupné výpočetní techniky. Na základě těchto požadavků byly vymezeny tři dílčí cíle. Bylo třeba vyřešit zpracování nejistot ve vstupních datech a vytvořit algoritmus, pomocí kterého by bylo možné generovat digitální model zemského povrchu na základě běžně dostupných dat s ohledem na specifické požadavky celkového řešení. Třetím dílčím cílem bylo vytvoření robustního algoritmu pro výpočet predikce šíření kapalných látek, který by vyžadoval co nejméně vstupních dat.

Splnění formulovaných cílů vyžadovalo nejprve navrhnout celkové koncepční řešení s využitím vytvořených datových struktur a algoritmů, které s těmito datovými strukturami pracují. Zpracování nejistot je řešeno stochastickým přístupem založeným na metodě Monte Carlo. Pomocí algoritmu generování digitálního modelu povrchu jsou generovány jednotlivé varianty, které následně slouží jako vstupní data pro algoritmus určený k výpočtům variant šíření kapaliny. Z nich jsou následně prováděny odhady zvolených statistik, které slouží jako výsledky.

Navržené řešení bylo průběžně implementováno do softwarové podoby a ověřováno mimo jiné pomocí terénních experimentů. Vytvořený simulační model byl využit k řešení některých dílčích úkolů v rámci výzkumných projektů č. SPII 1a10 45/07, 2B08011 a TA01030833.

Stanovený cíl disertační práce byl splněn. Navrhované řešení pro predikci šíření kapaliny po zemském povrchu je zcela unikátní a to zejména s ohledem na jeho obecnost a univerzálnost jeho použití. Jeho softwarová implementace může být použita například jako



součástí různých výpočetních nástrojů pro hodnocení environmentálních rizik nebo při tvorbě krizových plánů pro případné havárie technických zařízení, jakými jsou například produktovody nebo výrobní areály chemického průmyslu. Vytvořené řešení by mohlo také sloužit jako rychlý a pohotový výpočetní nástroj pro získávání doplňujících informací v operačních střediscích HZS.

Jednotlivé součásti navrhovaného simulačního modelu je v budoucnu možné dále rozvíjet. Rozvíjeny mohou být jednotlivé dílčí algoritmy nebo softwarové implementace zajišťující vyšší výpočetní výkon.



LITERATURA

Použitá literatura

[1] Acton, J. M., Huppert H. E., Worster M. G. [2001] Two-dimensional viscous gravity currents flowing over a deep porous medium. In: Journal of Fluid Mechanics 440:359-380.

[2] Babinec, F. [2005] Management rizika. Učební text. Slezská Univerzita v Opavě. Ústav matematiky.

<http://www.slu.cz/math/cz/knihovna/ucebni-texty/Analyza-rizik/Analyza-rizik-1.pdf>

[3] Bernatík, A., Nevrlá, P. [2005] Vliv havárií na životní prostředí. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. ISBN: 80-86634-46-9.

[4] Brandner, M., Egermaier, J., Kopincová, H. [2011] Numerické modelování v hydrologii. Západočeská univerzita v Plzni.

<http://mi21.vsb.cz/modul/numericke-modelovani-v-hydrologii>

[5] Denby, A., Jason Humber, J. [2004] Owerland flow – Comparison of modeling methods.

http://www.gisdevelopment.net/proceedings/gita/oil_gas2004/papers/06gos2004.pdf

[6] Drábková, S. a kol. [2007] Mechanika tekutin. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1508-4

[7] Farrar, W., Galagan, Ch., Isaji, T., Knee, K. [2005] GIS technology applied to modeling oil spills on land. ESRI international user conference.

http://www.google.cz/#bav=on.2.or.r_qf.&fp=9dc53d42764ff2b4&q=GIS+Technology+Applied+to+Modeling+Oil+Spills+on+Land

[8] Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M. [2000] Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady. Fragment. Havlíčkův Brod. ISBN 80-7200-405-0.

[9] Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M. [2001] Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady. Fragment. Havlíčkův Brod. ISBN 80-7200-405-4.

[10] Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M. [2002] Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady. Fragment. Havlíčkův Brod. ISBN 80-7200-421-2.

[11] Galagan, CH., Cohn, N., Shmookler, R. [2011] Hebron project. Comprehensive Study Report. Nearshore Bull Arm Spill Trajectory

http://www.hebronproject.com/media/2736/spill_trajectory_modelling.pdf

[12] Grimaz S., Allen S., Stewart J., Dolcetti G. [2007] Predictive evaluation of the extent of the surface spreading for the case of accidental spillage of oil on ground. SelectedPaper IcheaP8. AIDIC Conference series Vol. 8, 2007. pp. 151-160.



<http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/icheap8-pres07/icheap8webpapers/37%20Grimaz.pdf>

[13] Guidelines for Quantitative Risk Assessment, (Purple book). Committee for the Prevention of Disasters (CPR). Directorate - General of Labour of the Ministry of Social Affairs. The Hague 1999. CPR 18E.

[14] Houška, R. [2004] Globální digitální modely terénu ČR.

http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/06_Geodezie%20a%20kartografie/6_01_Prakticke%20aspekty%20geodezie%20a%20kartografie/Houska_Radek.pdf

[15] Chollet, T., Tixier, J., Dusserre, D., Mangin, J.F. [2013] Development of a spatial risk assessment tool for the transportation of hydrocarbons. Environmental Modelling and Software. Volume 46. August 2013. P.61-74.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815213000509>

[16] Keller, J. M., Simmons, C. S. [2005] The Influence of Selected Liquid and Soil Properties on the Propagation of Spills over Flat Permeable Surfaces. PNNL-15058. Pacific Northwest National Laboratory. Richland. WA.

[17] Kováč, P., Kanta J., Popl, I., Pokorný, J. [2005] Havárie ropovodu Družba u Čáslavi. HZS Středočeského kraje.

[18] Křikavová, L., [2009] Interpolace bodových dat v GIS. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Bakalářská práce. Praha.

[19] Kutílek, M., Kuráž, V., Císlarová, M. [2004] Hydropedologie 10. Skripta ČVUT Praha. ISBN 80-01-02237-4.

[20] Maryška, J., Šembera, J. [2001] Mechanika tekutin. Skripta Technické univerzity v Liberci.

<http://www.scribd.com/doc/6853643/skripta-Mechanika-tekutin-TUL-Marykaembera>

[21] Methods for the calculation of physical effects resulting from releases of hazardous materials (liquids and gases), (Yellow Book). Third Edition, second print. Committee for the Prevention of Disasters (CPR). Directorate - General of Labour of the Ministry of Social Affairs. The Hague 2005. CPR 14E.

[22] Metodika stanovení zranitelnosti životního prostředí ENVITech03. EnviTech, s.r.o. 2003.

<http://www.enviprofi.cz/33/stanoveni-zranitelnosti-zivotniho-prostredi-metodou-envitech-03-a-analyza-dopadu-havarii-s-ucasti-nebezpecne-latky>

[23] Pitt, R., Lantrip, J., and O'Connor, T. [2000] Infiltration Through Disturbed Urban Soils and Compost-Amended Soil Effects on Runoff Quality and Quantity

<http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1000OBH.pdf>

[24] Rényi, A. [1972] Teorie pravděpodobnosti. Academia Praha.

[25] Rogalewicz, V. [2000] Pravděpodobnost a statistika pro inženýry. Skripta ČVUT Praha.



ISBN 80-01-01740-0.

[26] Simmons, C. S., Keller, J. M., Hylden J. L. [2004] Spills on Flat Inclined Pavements. PNNL-14577. Pacific Northwest National Laboratory. Richland. WA.

[27] Simmons, C. S., Keller, J. M. [2003] Status of Models for Land Surface Spills of Nonaqueous Liquids. PNNL-14350. Pacific Northwest National Laboratory. Richland. WA.

[28] Simmons, C. S., Keller, J. M. [2005] Liquid Spills on Permeable Soil Surfaces. Experimental Confirmations. PNNL-15408. Pacific Northwest National Laboratory. Richland. WA.

[29] Stephens, D. B. [1996] Vadose Zone Hydrology. Lewis publishers USA. ISBN 0-87371-432-6.

[30] Streeter, V. L., Wylie, E. B., Bedford, K. W. [1998] Fluid Mechanics. WCB/McGraw-Hill Companies. ISBN 0-07-062537-9.

[31] Vojkovská, K., Danihelka, P. [2002] Metodika pro analýzu dopadů havárií s účastí nebezpečné látky na životní prostředí „H&V index“. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodicke_pokyny_odboru_enviro_rizik/\\$FILE/er-HaV_index-2002.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodicke_pokyny_odboru_enviro_rizik/$FILE/er-HaV_index-2002.pdf)

[32] Youdeowei, P.O. [2012] Fate of Subsurface Migration of Crude Oil Spill. A Review. Crude Oil Exploration in.the World. Prof. Mohamed Younes (Ed.). ISBN: 978-953-51-0379-0.

<http://www.intechopen.com/books/crude-oil-exploration-in-the-world/fate-of-subsurface-migration-of-crude-oilspill-a-review>

[33] Wallender, W.W. [2009] GREEN-AMPT INFILTRATION MODEL. HYD 151. Courses in Hydrologic Science, Fluid Mechanics Fundamentals. University ofCalifornia. Davis, USA.

http://www.google.cz/#bav=on.2,or.r_qf.&fp=9dc53d42764ff2b4&q=green_ampt

[34] ZABAGED. Digitální geografický model území České republiky

<http://www.cuzk.cz>

[35] Zhiming Chen, Qiang Du. [2006] Comparison of Finite Difference Method. Philip's Method and Green-Ampt Model in Infiltration Simulation. Final project report.

<http://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/S0036142998349977>

Publikace autora - Diplomová práce

[36] Balatka, M. [2005] Nalezení efektivního způsobu čištění fukoidových pískovců. Technická univerzita v Liberci.



Publikace autora - Články ve sbornících konferencí

[37] Balatka M. [2005] The Method of Evaluation and Management of Environmental Risk for Cleanup of Long Term Environmental Impacts. In: Sborník Konference mladých vědeckých pracovníků - Věda a krizové situace, VŠB – TU Ostrava. ISBN 80-248-0944-3.

[38] Balatka M., Čermáková H., Novák J. [2005] The optimal strategy of cleaning of fucoid sandstone. In: 4th International Conference on Uranium Mining and Hydrogeology Location. Freiberg, Germany.

[39] Balatka M. [2006] Nalezení efektivního způsobu čištění vrstev s nízkou propustností. In: Konference Sanační technologie IX. Vodní zdroje EKOMONITOR spol. s.r.o. Luhačovice. ISBN 80-86832-20-1.

[40] Balatka M. [2006] Vliv nejistot přírodních parametrů na výběr optimálních sanačních postupů. Seminář Výzkumného centra pro jakost a spolehlivost výroby. Projekt MŠMT ČR č. 1M06047. Hejnice, květen 2006.

[41] Balatka M. [2006] The design of uncertainty models. ICPM '06 - International Conference Presentation of Mathematics, Liberec, Czech Republic. September 2006. ISBN 80-7372-055-8.

[42] Balatka M. [2006] The Assessment of the Maximal Ground Water Pollution. Medzinárodná konferencie mladých vedeckých pracovníkov Veda a krizové situácie Žilina. ISBN 80-8070-601-8.

[43] Balatka M. [2006] The Liquid Outflow Simulation. 1st International Scientific Conference Safety Engineering 2006. PP 229-232. Ostrava. ISBN 80-248-1185-5.

[44] Balatka M. [2007] Stanovení nejistot při výpočtu kontaminace zasaženého území. REQUEST - konference Výzkumného centra pro jakost a spolehlivost výroby. projekt MŠMT ČR č. 1M06047. Praha. ISBN 978-80-01-03709-6.

[45] Balatka M. [2007] The probability of the groundwater concentration limit exceeding. konference Věda a krizové řízení. VSB – TU Ostrava. ISBN 978-80-7385-011-1.

[46] Balatka M. [2008] Softwarová podpora pro optimalizaci údržby. REQUEST '08 - konference Výzkumného centra pro jakost a spolehlivost výroby. projekt MŠMT ČR č. 1M06047. VUT Brno. ISBN 978-80-214-3774-6.

[47] Balatka M [2008] Software pro plánování a optimalizaci údržby, Sborník konference Národní fórum údržby 2008. ISBN 978-80-8070-851-1.

[48] Balatka M. [2008] The risk assessment probability approach of the polluted groundwater. In Sborník 2. mezinárodní vědecké konference Bezpečnostní Inženýrství 2008. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava 2008. ISBN 978-80-248-1848-1.

[49] Balatka M. [2009] Pravděpodobnostní model rozlévání unikající kapaliny. In Sborník přednášek z konference mladých vědeckých pracovníků Věda a krizové situace. Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-528-0.



- [50] Balatka. M. [2009] Hodnocení rozlévané kapaliny pomocí pravděpodobnostního přístupu. In: Sborník přednášek z konference REQUEST 09 - konference Výzkumného centra pro jakost a spolehlivost výroby. Technická univerzita v Liberci.
- [51] Balatka M. [2010] The spill flow simulation next to road. In: Sborník konference Transport, health and environment. Centrem Dopravního Výzkumu. ISBN 978-80-7399-141-8.
- [52] Balatka. M. [2010] Model šíření kaluže. In: Sborník přednášek konference Mlodzi Naukowcy 2010. Jelenia Góra 2010. ISBN 978-83-61719-86-1.
- [53] Balatka. M. [2011] Simulace šíření nebezpečné kapaliny v životním prostředí. Mezinárodní konference mladých vědeckých pracovníků - Hodnocení a zvládání přírodních a technologických rizik, Ostrava 2011.
- [54] Balatka M., Fuchs P., Kamenický J., Soušek R., Kelemen M. [2011] Exposure of the Environment and Surface Water by Dangerous Liquids - The Slop Outflow Model in Risk Management and Cyber-Informatics: RMCI 2011. Orlando, Florida, 19. - 22. 7. 2011. ISBN 978-1-936338-42-9.
- [55] Balatka M. [2012] Odhady rizik při přepravě nebezpečných kapalin. In: Sborník konference Doprava, Zdraví a Životní Prostředí. Centrum Dopravního Výzkumu.
- [56] Balatka M., Havlíček J. [2012] Stochastical approach to spread modeling of the leaked contaminant spil. In: The 1st Virtual International Conference on Advanced Research in Scientific Areas (ARSA), Slovakia 2012.

Publikace autora - Články v časopisech

- [57] Balatka M. [2008] Optimální strategie čištění fukoidových pískovců, 7. číslo měsíčníku Stavební obzor, 17. ročník, Fakulta Stavební ČVUT Praha 2008 (ISSN 1210-4027).
- [58] Balatka M., Havlíček J. [2013] The risk estimation of dangerous liquid transport, Transactions on Transport Sciences, CDV, Transport Research Centre, ISSN 1802-971X.

Publikace autora - Technické zprávy

- [59] Šembera, J., Hokr, M., Novák, J., Balatka, M., Tomek, P. [2004] Prošetření mechanismů uvolňování kontaminace z fukoidových pískovců. Technická zpráva k řešení zakázky Vývoj, realizace a testování numerických modelů proudění podzemních vod a transportu kontaminantů pro sanaci ložiska Stráž pod Ralskem, Diamo, s.p. a Technická univerzita v Liberci.
- [60] Balatka M. [2006] Softwarová podpora pro hodnocení kontaminace podzemních vod a půd, ev.č. FM/RSS/F/Z/06.
- [61] Fuchs, P., Zajíček, J., Volfová, J., Balatka, M. [2007] Metodika optimalizace údržby jaderných elektráren společnosti ČEZ, ev.č. FM/RSS/F/Z/07/19.



[62] Balatka, M., Havlíček, J., Kratochvíl, F., Novák, J., Saska, T., Zajíček, J. [2011] Zpráva k projektu Integrovaný informační systém pro silniční přepravu nebezpečných chemických látek - kapitoly 3 a 4, ev.č. FM/RSS/F/Z/11/07.

[63] Fuchs, P., Novák, J., Balatka, M., Čermáková, H., Saska, T., Havlíček, J. [2011] Zpráva o řešení projektu VaV ev. č. SPII 1a10 45/07 "Komplexní interakce mezi přírodními ději a průmyslem s ohledem na prevenci závažných havárií a krizové řízení", ev.č. FM/RSS/F/Z/11/19.

[64] Novák J., Čermáková H., Balatka M., Kratochvíl F., Saska T., Jirsák Č., Havlíček J. [2011] Závěrečná zpráva projektu MŠMT 2B08011 "Metodika posuzování vlivu dopravních tras na biodiverzitu a složky životního prostředí", ev.č. FM/RSS/F/Z/12/04.