

VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

AUTOMATIZACE PROCESU VYJÁDŘENÍ
POVODŇOVÉHO OHROŽENÍ
V PROSTŘEDÍ GIS

Libor Chlubna, Igor Konvit

Klíčová slova

GIS – povodňové ohrožení – tvorba nástroje – automatizace

Souhrn

Povinnosti vyplývající z povodňové směrnice 2007/60/ES a s tím související aktivity vedly v rámci projektu SP/1c2/121/04 mj. k vývoji nástroje automatické kalkulace povodňového ohrožení v prostředí geografického informačního systému ArcGIS. Nástroj byl koncipován tak, aby datová a časová náročnost byla uživatelsky přijatelná. Automatizace části procesu semikvantitativního vyjádření povodňového rizika probíhala v kombinovaném prostředí programovacího jazyka Python s využitím nástrojů prostředí ArcGIS. Součástí nástroje je grafické uživatelské rozhraní ve formě *toolboxu*, které optimalizuje zadávání vstupních dat a jiných parametrů potřebných pro správné fungování nástroje. Součástí tvorby nástroje bylo ověření jeho funkčnosti na vybrané pilotní oblasti a následné porovnání výstupů s již dříve zpracovanými analýzami povodňových rizik. Nástroj lze využít i při tvorbě a úpravě územních, povodňových a krizových plánů.

Úvod

Směrnice Evropského parlamentu a Rady o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik 2007/60/ES (dále povodňová směrnice) ukládá členským státům pevnými časovými termíny povinnost postupně na jejich území vyhodnotit povodňová nebezpečí a rizika a tato vyhodnocení zpracovat do formy příslušného mapového vyjádření. Do konce roku 2013 je nutné zpracovat tyto mapy pro oblasti s významným povodňovým rizikem. Analýze povodňového rizika předchází hydrodynamický výpočet v zájmovém území s různou mírou podrobnosti řešení a s různými požadavky na rozměrovost, popř. diskretizaci úlohy. Na základě stanovení teoretických rozlivů s dobami opakování 5, 20, 100 a 500 let dojde k vymezení záplavových území. Výstupy z hydrodynamických modelů jsou dále zaneseny do map povodňového nebezpečí, které představují mapy hloubek vody a dále mapy rychlostí proudění vody pro povodňové scénáře s různou dobou opakování. Při řešení jednodimenzionálních hydrodynamických modelů, kdy se uvažuje převládající směr proudění ve směru osy toku, nejsou výstupem složky vektoru svislicových rychlostí, ale pouze rychlosti průřezové. V tomto případě do analýzy povodňového rizika vstupují mapy nebezpečí pouze v podobě hloubek vody pro příslušné scénáře. Uvedené informace o nebezpečí jsou prvotním podkladem pro nástroj vyjadřující semikvantitativní metodou povodňové ohrožení. Podrobný popis nástroje, včetně metodického postupu obsahuje následující kapitola. Využití nástroje lze tedy uplatnit jak při plnění požadavků povodňové směrnice, tak například při tvorbě či úpravě

územních, povodňových a krizových plánů. Ve druhém případě mohou informace o povodňovém ohrožení, popřípadě o objektech s překročenou mírou přijatelného rizika výrazně snížit nejen škody materiální, ale také ztráty na lidských životech.

Metodika tvorby map povodňového nebezpečí
a povodňového rizika

Sledovaný nástroj byl realizován na základě metodiky (Drbal aj., 2012). Níže uvedené informace jsou z velké části jejím obsahem. Aktuální znění metodického pokynu je součástí *POVIS* (www.povis.cz).

Vstupní data, potřebná pro tvorbu map povodňového ohrožení, musí být v rastrovém formátu. Jedná se o rastry hloubek vody a rastry rychlostí proudění vody pro průtoky s dobami opakování 5, 20, 100 a 500 let.

Součástí podkladových dat je základní rastrová mapa (RZM 1 : 10 000), která slouží pro prostorovou orientaci při grafické interpretaci výsledků. Současně lze pro informace o aktuálním stavu řešeného území využít ortofotomapy. Další z možností jak zpřesnit výstupní informace o povodňovém ohrožení je místní šetření v zájmových oblastech, jehož závěry se promítnou do podkladových dat analýzy povodňového ohrožení, resp. rizika.

Semikvantitativní vyjádření povodňového rizika

K hodnocení rizika, resp. ohrožení se využívá vhodně zvolené číselné, popř. barevné stupnice. Riziko se vyjadřuje jako bezrozměrná veličina nebo v jednotkách příslušných veličin charakterizujících ohrožení, popř. dopady. Pro potřeby tvorby nástroje byla využita metoda matice rizika.

Metoda matice rizika

Tato metoda je jedním z nejjednodušších postupů pro hodnocení potenciálního ohrožení a rizika v záplavových územích. Metoda vyjadřuje povodňové riziko pomocí škálování a současně umožní splnění požadavků povodňové směrnice v kap. III, čl. 6, odst. 5 k termínu 22. 12. 2013.

Postup metody spočívá ve čtyřech krocích:

- kvantifikace povodňového nebezpečí – výpočet intenzity povodně,
- stanovení povodňového ohrožení pomocí matice rizika,
- stanovení zranitelnosti území na základě informací o využití území,
- určení ploch s nepřijatelným rizikem.

Pro tvorbu nástroje byly využity úvodní dva kroky metody. Současně se pracuje na doplnění nástroje o zbylé dva kroky, jejichž zakomponování je závislé na dostupnosti rozsáhlých podkladových dat.

Ohrožení R_i pro i -tý povodňový scénář graficky znázorňuje matice rizika uvedená na obr. 1.

Stanovení míry ohrožení R_i vychází z hodnot intenzity povodně IP pro jednotlivé scénáře povodňového nebezpečí. Pro každou buňku rastru vyjadřujícího intenzitu povodně IP je třeba stanovit ohrožení vyjádřené hodnotou v rozmezí 4 (vysoké) až 1 (reziduální). Přesná specifikace ohrožení pro jednotlivé oblasti je uvedena v tabulce 1. Tento postup (obr. 1) je třeba opakovat pro všechny posuzované scénáře (N -leté kulminační průtoky).

V dalším kroku se provádí vyhodnocení maximální hodnoty ohrožení R pro jednotlivé dílčí ohrožení R_i odpovídající i -tým scénářům nebezpečí (průchodu N -letého kulminačního průtoky)

podle vztahu:

$$R_{(x,y)} = \max_{i=1}^n R_i, \quad (1)$$

kde n značí počet hodnocených (vstupujících) scénářů povodňového nebezpečí (Drbal aj., 2005). Výsledkem je jedna rastrová vrstva obsahující maximální hodnoty ohrožení R ve studovaném území.

Mapy ohrožení

Výsledné maximální hodnoty ohrožení se zobrazují pomocí barevné škály do mapy ohrožení (viz obr. 5). Záplavové území je tak rozčleněno z hlediska povodňového ohrožení a umožňuje posouzení vhodnosti stávajícího nebo budoucího funkčního využití ploch a doporučení na omezení případných aktivit na plochách v záplavovém území s vyšší mírou ohrožení (tabulka 1).

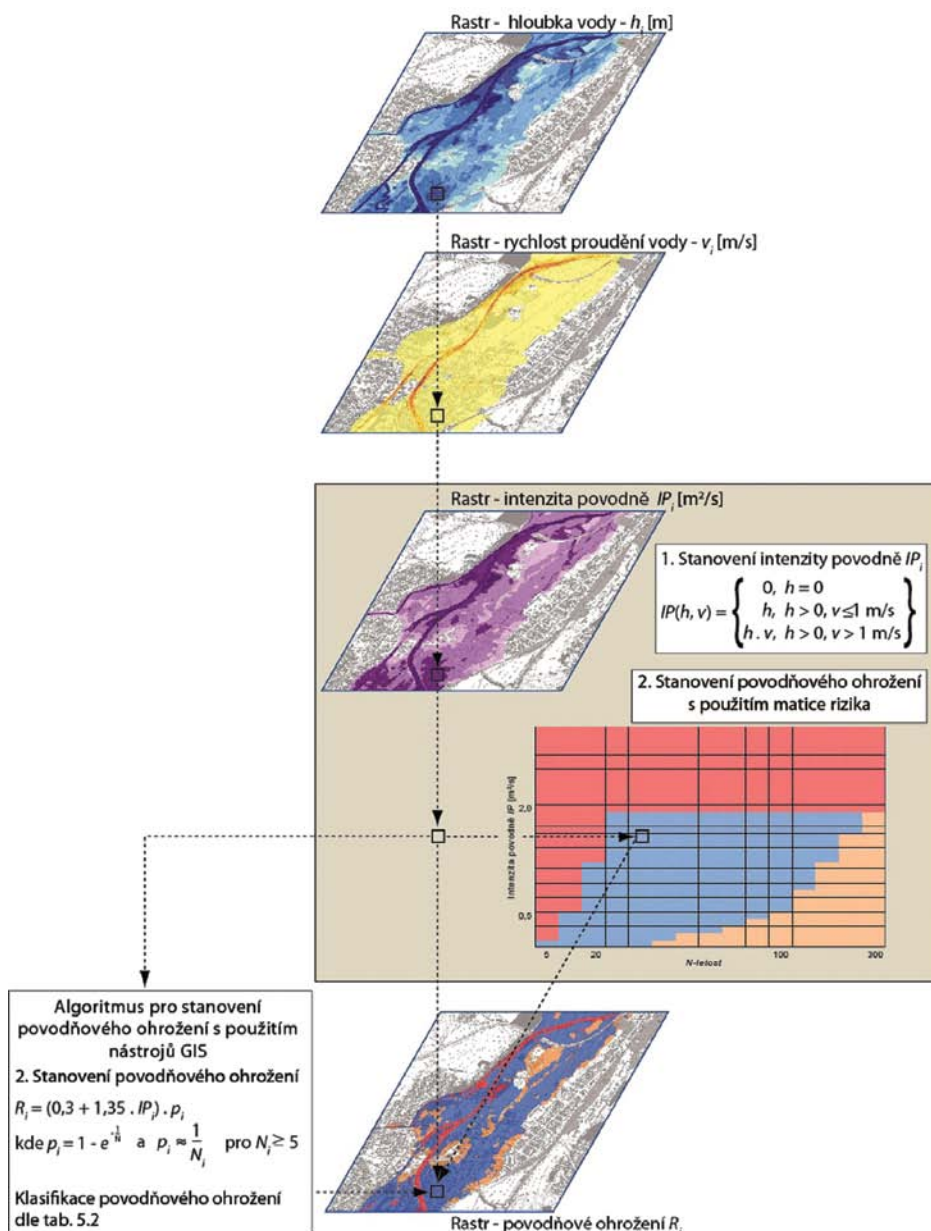
Nástroj pro stanovení povodňového ohrožení v prostředí ArcGIS

Pro efektivnější způsob určení povodňového ohrožení byl v rámci brněnské pobočky VÚV T. G. Masaryka, v.v.i., sestaven nástroj pro automatickou kalkulaci v prostředí geografického informačního systému ArcGIS (licence ArcView).

Nástroj je postaven na vzájemné komunikaci s připojeným skriptem, ve kterém je obsažen algoritmus celého výpočtu (obr. 2). Skript byl naprogramován v objektově orientovaném jazyce Python. Psaní kódu a ladění skriptu proběhlo ve vývojovém prostředí aplikace PythonWin.

Veškerá vstupní data jsou v rastrovém formátu, proto je k výpočtu nutné rozšíření produktu ArcGIS extenzí Spatial Analyst. K výpočtu jsou nutné pouze informace o hloubkách vody v řešeném území. Rychlosti proudění vody nejsou nezbytností, ale jejich začlenění zpřesní výsledky výpočtu. Před zadáním dat do nástroje je nutné nejprve vhodně upravit názvy samotných rastrů tak, aby v sobě obsahovaly informaci o pravděpodobnosti výskytu průtoku, ke kterému se vztahují hodnoty hloubek, resp. rychlosti proudění vody. Vhodným názvem rastru hloubek vody může být např. „h100“ (kromě doby opakování nesmí název obsahovat žádné jiné číselné znaky). Výstup v podobě rastru maximálního povodňového ohrožení se po úspěšném ukončení výpočtu objeví jak v pracovním prostředí (seznamu vrstev) ArcGIS, tak v zadaném výstupním adresáři.

Prvním krokem v rámci skriptu, po kontrole dostupnosti extenze Spatial Analyst, je extrahování číselného údaje o době opakování povodňového scénáře z názvu rastrů pomocí definované funkce. Dále následuje automatická úprava hodnot rastrů, kde se nulové a záporné hodnoty převádějí na hodnotu *NoData*, která vyjadřuje, že v dané buňce rastru se nenachází žádná hodnota, tedy nebude zahrnuta do výpočtu. Popsaná operace a další navazující kroky se provedou v rámci cyklu pro všechny zadané vstupní rastry s různými dobami opakování v počtu iterací, odpovídajícím součtu jednotlivých scé-



Obr. 1. Schéma postupu metody matice rizika pro daný scénář nebezpečí (Drbal aj., 2012)

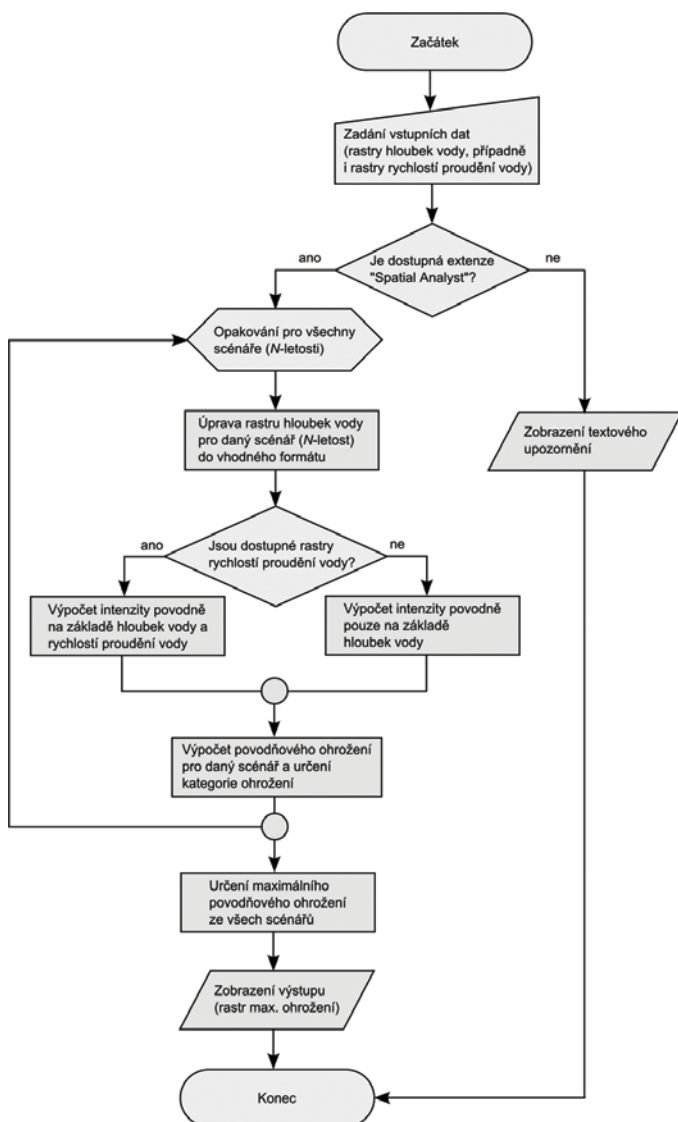
Fig. 1. Diagram of risk matrix method for flood scenarios (Drbal et al., 2012)

Tabulka 1. Klasifikace ohrožení R v souladu s obr. 1 (Drbal aj., 2012)

Table 1. Classification of flood danger R (Drbal et al., 2012)

Ohrožení R	Kategorie ohrožení*	Doporučení
$R \geq 0,1$ nebo $IP \geq 2$	(4) Vysoké (červená barva)	Doporučuje se nepovolovat novou ani nerozšiřovat stávající zástavbu, ve které se zdržují lidé nebo umísťují zvířata. Pro současnou zástavbu je třeba provést návrh povodňových opatření, která zajistí odpovídající snížení rizika, nebo zpracovat program vymístění této zástavby.
$0,01 \leq R < 0,1$	(3) Střední (modrá barva)	Výstavba je možná s omezeními vycházejícími z podrobného posouzení nezbytnosti funkce objektů v ohroženém území. Nedoporučuje se rozšiřovat stávající plochy určené pro výstavbu.
$R < 0,01$	(2) Nízké (oranžová barva)	Výstavba je možná , přičemž vlastníci dotčených pozemků a objektů musí být upozorněni na potenciální ohrožení povodňovým nebezpečím.
$P < 0,0033$ (tj. $N > 300$)	(1) Reziduální (žlutá barva)	Otázky spojené s povodňovou ochranou se zpravidla doporučuje řešit prostřednictvím dlouhodobého územního plánování.

*Kategorie povodňového ohrožení ve vazbě na příslušný typ využití území a přijatá doporučení dle tabulky 1 vyjadřuje hodnotu přijatelného povodňového rizika.



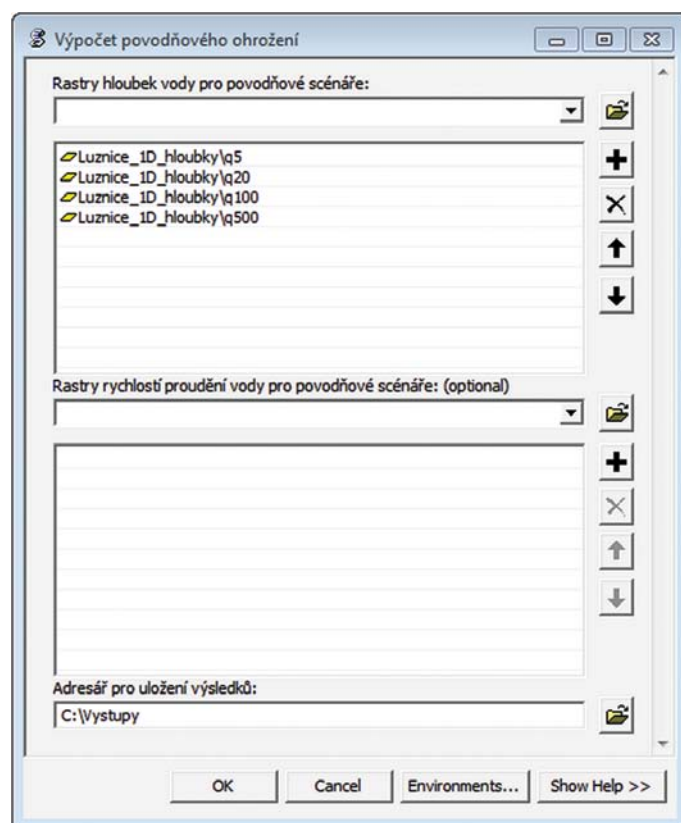
Obr. 2. Zjednodušené schéma algoritmu určení povodňového ohrožení v rámci použitého skriptu

Fig. 2. Schematic diagram of algorithm for calculation of flood danger

nářů. Skript také přiřadí upravenému rastru vyhovující projekci a souřadnicový systém, kterým je systém JTSK s greenwichským poledníkem jako hlavním meridiánem s navzájem zaměněnými zápornými osami.

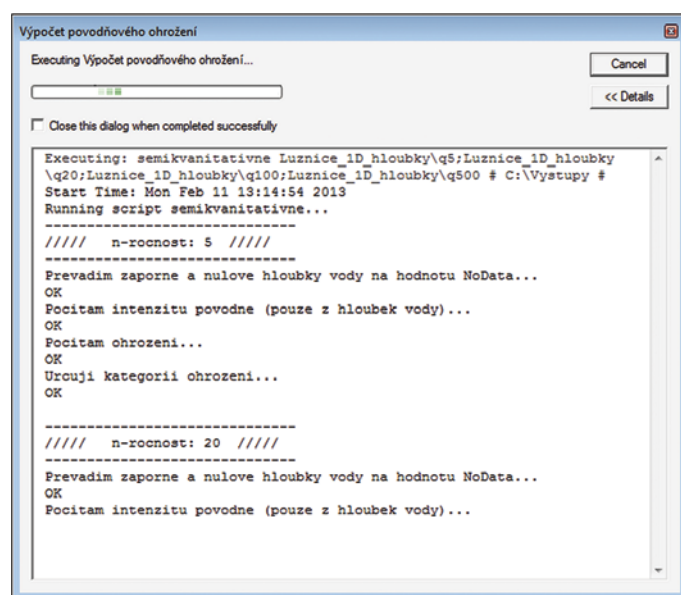
Dále probíhá pomocí struktury řízení programu *if-else* kontrola identifikující zadaná vstupní data. Nástroj tak uživatele upozorní, že hodnoty intenzity povodně, jakožto nutný mezikrok pro kalkulaci povodňového ohrožení (viz *obr. 1*), budou stanoveny pouze z rastrů hloubek vody nebo kombinací rastrů hloubek vody a rychlostí proudění vody. Následně je pomocí podmíněného výrazu mapové algebry počítána intenzita povodně pro každý scénář. Hodnoty ohrožení (reálná čísla s plovoucí desetinnou čárkou) jsou pak překlaskifikovány do čtyř kategorií ohrožení (celá čísla v rozsahu 1 až 4, viz *tabulku 1*). Po tomto kroku skript opouští strukturu cyklu a stanovuje maximální hodnotu kategorie ohrožení v rámci všech scénářů prostřednictvím tzv. mozaikování, kde jsou rastry ohrožení (ve formátu ESRI grid) sloučeny do jednoho rastru, a to na základě zadané podmínky (1), v tomto případě maximální hodnoty ohrožení ze všech dostupných rastrů (Drbal aj., 2011). Následně je výsledek vykreslen v okně programu se správnou symbolikou (viz barevné rozlišení v *tabulce 1*, *obr. 5*).

Grafické uživatelské rozhraní je koncipováno jako samostatný nástroj (tzv. *toolbox*), který slouží pro snadnější zadávání vstupních dat a jiných parametrů, potřebných pro správné fungování nástroje (*obr. 3*).



Obr. 3. Grafické uživatelské rozhraní nástroje pro výpočet povodňového ohrožení v prostředí programu ArcGIS 9.3.1

Fig. 3. Toolbox GUI for flood danger calculation in ArcGIS 9.3.1



Obr. 4. Okno v prostředí programu ArcGIS 9.3.1 sloužící k informování uživatele o průběhu výpočtu po spuštění nástroje

Fig. 4. Window with informations about processes of calculation in ArcGIS 9.3.1

Vstupními daty jsou hydraulické charakteristiky (rastry hloubek vody a rastry rychlostí proudění vody). V rámci zadávání vstupních dat uživatel určí cestu v adresářové struktuře disku pro ukládání dočasných a finálních výstupů. Nástroj obsahuje navíc skrytý parametr sloužící pro finální interpretaci výsledku v prostředí ArcGIS (barevné podání výsledných kategorií ohrožení). Během výpočtu je uživatel stále informován prostřednictvím textových upozornění, ve které části výpočtu se nástroj právě nachází, resp. kde došlo k selhání výpočtu (*obr. 4*).

Verifikace výstupů nástroje

Funkčnost nástroje byla ověřena na vybraném území města Planá nad Lužnicí, jež bylo současně jednou z pilotních oblastí projektu SP/1c2/121/04. Na této oblasti byl řešitelským týmem projektu aplikován postup vyjádření povodňového rizika semikvantitativní metodou. Jedním z výstupů byla i mapa povodňového ohrožení stanovená pouze na základě známých hloubek vody pro povodňové scénáře s dobami opakování: 5, 20, 100 a 500 let.

Z totožných vstupních dat jako v případě projektu bylo povodňové ohrožení stanoveno i pomocí nově tvořeného nástroje. Výstupy jsou patrné z obr. 5.

Rozdíly ve stanovení povodňového ohrožení nástrojem VÚV TGM, v.v.i., oproti výstupu projektu jsou minimální. Lokální rozdíly jsou způsobeny metodou výpočtu zvolenou v prostředí ArcGIS a prostorovým rozlišením jednotlivých rastrů. Tyto rozdíly ovšem neovlivní komplexní interpretaci výstupů. Obdobným způsobem dopadly testy nástroje v porovnání s lokalitami města Kyjov a povodí horní Opavy, které byly taktéž předmětem řešení projektu. Na základě ověření funkčnosti a správnosti výsledků stanovených nástrojem VÚV TGM, v.v.i., lze konstatovat, že pro potřeby určení povodňového ohrožení je vhodné tento nástroj využít.

Závěr

První verze nástroje je momentálně testována a používána v rámci projektu DF12P01OVV035 Identifikace významných území s kulturně historickými hodnotami ohrožených přírodními a antropogenními vlivy, kde se shromažďují od uživatelů informace o chybách nebo možných vylepšeních. Do další verze se plánuje zakomponovat možnost automatického ořezávání vstupních rastrů na základě uživatelem zadané oblasti, kontrola prostorového překrývání vstupních dat pro všechny zadané scénáře (rastry hloubek vody, popř. rastry rychlostí proudění vody), kterou v této verzi musí provést uživatel opticky v programu ArcGIS před samotným zadáním dat do nástroje. Taktéž se připravuje úprava vzhledu grafického uživatelského rozhraní, která by vyhovovala vizuální identitě organizace a nápověda dostupná přímo v nástroji.

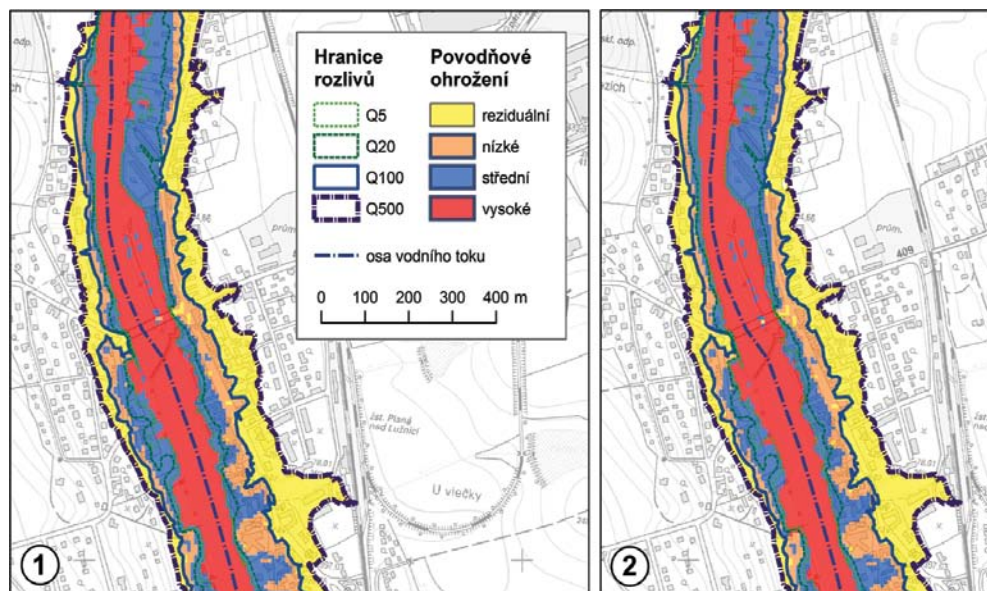
V praktickém provozu se ukázalo, že nástroj výrazným způsobem urychluje a zjednodušuje proces vyjádření povodňového ohrožení v prostředí GIS. Obsluhu programu tímto odpadá např. nutnost vícenásobného zadávání rozsáhlých výrazů mapové algebry do tzv. rastrové kalkulačky a je eliminována možná chybovost operátora (lidský faktor).

V současné době také probíhá rozšíření verze nástroje o vyjádření povodňového rizika na základě informací o funkčním využití ploch a dále se připravuje nástroj pro vyjádření povodňového rizika kvantitativní metodou, který je momentálně ve fázi testování.

Aktuální verze nástroje slouží výhradně pro řešení analýzy povodňového ohrožení v rámci brněnské pobočky VÚV TGM, v.v.i., její rozšíření mezi odbornou veřejnost je plánováno po zapracování výše uvedených námětů.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory projektů SP/1c2/121/04 s názvem Mapy rizik vyplývajících z povodňového nebezpečí v ČR, jehož zadavatelem je MŽP ČR a DF12P01OVV035 s názvem Identifikace významných území s kulturně historickými hodnotami ohrožených přírodními a antropogenními vlivy, jehož zadavatelem je MK ČR.



Obr. 5. Výsledky stanovení povodňového ohrožení v lokalitě Planá nad Lužnicí: 1 – projekt SP/1c2/121/04, 2 – nástroj VÚV TGM, v.v.i., Brno

Fig. 5. Results of flood danger calculation in Planá nad Lužnicí: 1 – project SP/1c2/121/04, 2 – toolbox T. G. Masaryk Water Research Institute, p.r.i., Brno

Literatura

- Drbal, K. aj. (2005) Návrh metodiky stanovování povodňových rizik a škod v záplavovém území a jeho ověření v povodí Labe. Zpráva řešení za rok 2005. Číslo projektu VaV/650/5/02. Brno: VÚV TGM, 144 s., 43 s. příl.
- Drbal, K. aj. (2011) Mapy rizik vyplývajících z povodňového nebezpečí v ČR, SP/1c2/121/04, závěrečná zpráva. Brno, 2011.
- Drbal, K. aj. (2012) Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik. Brno: VÚV TGM a Praha: MŽP, 92 s.
- Directive 2007/60/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks (směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES ze dne 23. října 2007 o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik „povodňová směrnice“).
- HYDROSOFT Veleslavín, s.r.o. (2006, 2013) Povodňový informační systém [online]. [cit. 2013-02-07]. Dostupné z: <http://www.povis.cz/html/>

Ing. Libor Chlubna, Mgr. Igor Konvit
VÚV TGM, v.v.i., Brno
libor_chlubna@vuv.cz, igor_konvit@vuv.cz
tel.: +420 541 126 306, 8
Příspěvek prošel lektorským řízením.

Automatic calculation of flood danger using GIS (Chlubna, L.; Konvit, I.)

Keywords

GIS – flood hazard – toolbox creation – automatization

In ArcGIS desktop application, tool for automatic calculation of flood danger was developed, due to the obligations arising from the Flood Directive (2007/60/EC) and related activities within the project SP/1c2/121/04. The tool is designed to meet the user requirements for easy data handling and time saving. Graphical user interface is in the form of ArcGIS toolbox that optimizes process of entering input data. Attached script is written in Python object-oriented programming language. Verification of functionality was realised on selected sites, where the results from previous survey can be compared with tool's output. The tool can be used in landscape management or flood and emergency planning.

VYUŽITÍ METODY QuEChERS PŘI PŘÍPRAVĚ VZORKŮ PLAVENIN A SEDIMENTŮ PRO STANOVENÍ POLYCYKlickÝCH AROMATICKÝCH UHLOVODÍKŮ

Alena Svobodová, Petra Sudová

Klíčová slova

polycyklické aromatické uhlovodíky – QuEChERS – pevné vzorky hydrosféry – vysokoúčinná kapalinová chromatografie – fluorescenční detekce

Souhrn

V první fázi se předložená práce věnuje optimalizaci a validaci extrakční metody QuEChERS pro stanovení 15 polycyklických aromatických uhlovodíků v pevných vzorcích ze životního prostředí. Analýzy byly prováděny na vysokoúčinném kapalinovém chromatografu s fluorescenčním detektorem. K validaci byl použit certifikovaný referenční materiál s deklarovanými vztažnými hodnotami stanovovaných PAU.

Dále byla vybraná metoda QuEChERS aplikována na reálné vzorky plavenin a sedimentů a naměřené výsledky byly porovnány s hodnotami získanými dvěma běžně používanými metodami, tj. extrakcí za zvýšeného tlaku v kombinaci s gelovou permeační chromatografií (ASE/GPC) a ultrazvukovou extrakcí s čištěním na pevné fázi (UZ/SPE). Bylo ověřeno, že metoda QuEChERS poskytuje srovnatelné výsledky včetně validačních parametrů.

Závěrem byly uvedené metody porovnány z hlediska časové náročnosti a ceny za přípravu série vzorků.

Úvod

Cílem předložené práce bylo navrhnout, optimalizovat a validovat metodu QuEChERS pro stanovení polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) v pevných vzorcích ze životního prostředí, aplikovat ji na stanovení PAU v reálných vzorcích a porovnat naměřené výsledky, časovou náročnost a materiálové náklady této metody s běžně používanými metodami.

Název metody QuEChERS je odvozen ze šesti anglických slov, která mají vystihovat její vlastnosti: quick (rychlá), easy (jednoduchá), cheap (levná), effective (efektivní), rugged (robustní) a safe (bezpečná). Výslovnost je stejná jako u slova catchers.

Metoda QuEChERS byla původně vyvinuta pro stanovení veterinárních drog v živočišných tkáních. Následně bylo její použití rozšířeno na stanovení reziduálních pesticidů v rostlinných materiálech, potravinách, zemědělských výrobcích i v pevných environmentálních vzorcích. Metoda QuEChERS zahrnuje tři základní kroky: extrakci rozpouštědlem (používá se např. acetonitril, ethylacetát nebo propanon), rozdělení organické a vodné fáze vysolením bezvodým síranem hořečnatým v kombinaci s dalšími solemi (např. chlorid sodný, octan sodný) a vyčištění extraktu disperzní extrakcí na pevné fázi (d-SPE), kterou lze modifikovat podle konkrétních požadavků na čištění [1–4]. Na obr. 1 jsou zachyceny tři odlišné pracovní postupy pro stanovení reziduálních pesticidů v potravinách a zemědělských výrobcích: originální metoda Lehotay a Anastassiades, oficiální metoda AOAC International 2007.01 (Lehotay) a standardní metoda CEN EN 15662 (Anastassiades) [2].

V literatuře byly též nalezeny odkazy na aplikaci metody QuEChERS na stanovení PAU, především ve vzorcích ryb [5–7] a mořských plodů [8–9]. Odkazů na stanovení PAU v pevných vzorcích ze životního prostředí bylo zjištěno velmi málo, nalezeny byly především v aplikačních listech [10–11].

Materiál, přístrojové vybavení, metody

K optimalizaci podmínek postupu a validaci metody QuEChERS pro stanovení PAU v pevných matricích byl použit certifikovaný referenční materiál firmy (CRM) Analytika Metranal 7.

Výběr sledovaných PAU, jejich deklarované koncentrace a nejistoty stanovení jsou uvedeny v tabulce 1. Jako vztažné hodnoty pro naftalen, acenaften a fluoren, které nejsou pro uvedený materiál certifikovány, byly použity dlouhodobé průměrné hodnoty vypočtené z regulačních diagramů vedených pro tyto látky v laboratoři speciální organické analýzy VÚV TGM, v.v.i.

Tabulka 1. CRM Metranal 7 – vztažné hodnoty a nejistoty PAU (mg/kg)

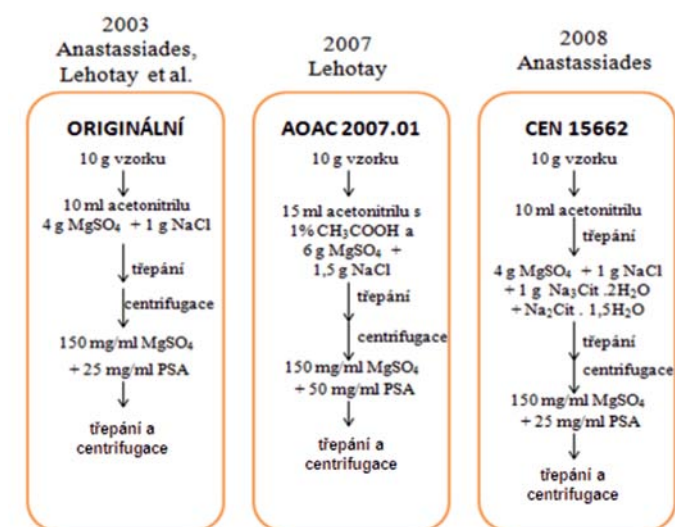
Table 1. CRM Metranal 7 – PAH certified reference values and uncertainties (mg/kg)

PAU	Vztažná hodnota mg/kg	Nejistota mg/kg
naftalen	0,268	–
acenaften	0,349	–
fluoren	0,107	–
fenanthren	1,000	0,348
anthracen	0,091	0,044
fluoranthren	1,615	0,548
pyren	1,542	0,480
benzo[a]anthracen	0,716	0,196
chrysen	0,815	0,134
benzo[b]fluoranthren	0,747	0,234
benzo[k]fluoranthren	0,351	0,088
benzo[a]pyren	0,588	0,160
dibenzo[a,h]anthracen	0,627	0,176
benzo[g,h,i]perylene	0,083	0,021
indeno[1,2,3-c,d]pyren	0,582	0,212

Jako reálné vzorky pro srovnání metody QuEChERS s běžně používanými metodami byly vybrány sedimenty a plaveniny popsané v tabulce 2. Po dodání byly vzorky zmrazeny, vysušeny v lyofilizeru a rozemlety v kulovém mlýnu. Do zpracování byly uchovávány při laboratorní teplotě ve skleněných zábrusových prachovnicích.

Mezi studované vzorky byly zařazeny jak materiály s relativně nízkými nálezy PAU kolem 0,5 mg/kg, tak i vzorky, u kterých se koncentrace PAU pohybovaly mezi hodnotami 5 a 7 mg/kg.

Všechny vzorky byly změřeny na kapalinovém chromatografu Waters Alliance 2695 s fluorescenčním detektorem Waters 2475 (HPLC/FD). Jako analytická kolona byla použita kolona Waters C18 pro PAU. Při měření jsme postupovali podle standardního operačního postupu zavedeného v laboratoři speciální organické analýzy VÚV TGM, v.v.i., pro stanovení PAU v pevných vzorcích.



Poznámka: PSA – materiál na bázi primárních a sekundárních aminů

Obr. 1. Příprava vzorků metodami QuEChERS, upraveno podle [2]
Fig. 1. The QuEChERS sample preparation workflow, according to [2]

Pro porovnání výsledků stanovení PAU v pevných maticích získaných pomocí QuEChERS byly vybrány tyto dvě běžně používané metody: vysokoúčinná kapalinová chromatografie (HPLC) s použitím extrakce za zvýšeného tlaku (ASE) a gelové permeační chromatografie (GPC) a dále HPLC v kombinaci s ultrazvukovou extrakcí (UZ) a extrakcí na pevné fázi (SPE). V dalším textu bude podrobněji popsána pouze metoda QuEChERS.

Modelový postup přípravy vzorků metodou QuEChERS je následující: do skleněné vialky byly naváženy 2,0 g vzorku a bylo přidáno 5 ml destilované vody. Po jejím zasáknutí byl přidán ethylacetát (10 ml) a směs bezvodého síranu hořečnatého (6 g) s chloridem sodným (1,5 g). Vialka byla třepána na horizontální třepačce při rychlosti 300 min⁻¹ po dobu 10 minut a poté odstředěna v odstředivce při 2 500 min⁻¹ rovněž po dobu 10 minut. Získaný surový extrakt byl převeden do zkumavky s naváženou směsí na čištění pomocí d-SPE (1,2 g bezvodého síranu hořečnatého a 400 mg florisilu). Vyčištěný extrakt byl zakonzentrován a převeden do vialky k měření na HPLC/FD.

Pro modifikaci postupu byly testovány tyto parametry: účinnost extrakčního činidla, složení směsi solí, způsob provedení extrakce a typ složky pro d-SPE.

V extrakčním kroku byl porovnáván acetonitril a ethylacetát. Obě rozpouštědla mají podobné toxikologické vlastnosti, z finančního hlediska je výhodnější ethylacetát.

Pro odstranění vody z extraktu se vždy k navážce vzorku přidává bezvodý síran hořečnatý, který zároveň spolu s další přidávanou solí zlepšuje dělení fází. Jako další sůl se může použít chlorid sodný nebo octan sodný.

Dále byly testovány dva způsoby extrakce: třepání na horizontální třepačce a extrakce v ultrazvukové lázni s dobou expozice 10, 20 a 40 minut.

V následném čistícím kroku byl opět vždy použit bezvodý síran hořečnatý. Jako další přídatné složky byly z hlediska účinnosti čištění a vlivu na celkovou výtěžnost testovány materiály C18, florisil, silikagel, PSA a aktivní uhlí.

Výsledky a diskuse

Výsledky stanovení PAU metodou QuEChERS za různě modifikovaných podmínek, přepočtené na výtěžnost, jsou uvedeny v *tabulce 3*.

Z *tabulky 3* je patrné, že při použití aktivního uhlí došlo ke ztrátám, tj. výraznému snížení výtěžnosti PAU s pěti benzenovými jádry (15–31 %), což lze vysvětlit silnějšími sorpčními vlastnostmi těchto analytů oproti 2–4jaderným PAU (50–99 %). U ostatních způsobů čištění extraktů jsou dosažené výsledky srovnatelné a pohybují se u 2–4jaderných PAU v rozmezí 62–110 %.

U pětijaderných PAU jsou celkově dosažené hodnoty nižší a leží v intervalu 55–95 %. Na výtěžnosti se neprojevovalo ani prodloužení doby expozice v ultrazvukové lázni, protože všechny získané výsledky dosahují výtěžnosti 62–101 % bez ohledu na dobu extrakce. V *tabulce 3* nejsou do výsledků pro 2–4jaderné PAU zahrnuty hodnoty pro naftalen, protože nalezené výtěžnosti (38–70 %) mohou být ovlivněny ztrátami tohoto analytu během přípravy vzorků, zejména při zakonzentrování extraktů.

Vzhledem k uvedeným výsledkům bylo pro výběr optimálních podmínek zvoleno ekonomické hledisko. Jako nejlevnější se jeví varianta: organické rozpouštědlo – ethylacetát, druhá přidávaná sůl – chlorid sodný,

Tabulka 2. Seznam vzorků

Table 2. Sample list

Místo odběru		Matrice
Troubky	Bečva	plavenina
Otrokovice	Dřevnice	plavenina
Hrádek nad Nisou	Lužická Nisa	sediment
Dolní Olešnice-Vestřev	Labe	sediment
Otrokovice	Dřevnice	sediment
Zelčín-Horín	Vltava	sediment
Dolní Olešnice-Vestřev	Labe	plavenina
Hrádek nad Nisou	Lužická Nisa	plavenina
Zelčín-Horín	Vltava	plavenina
Bohumín	Odra	plavenina

Tabulka 3. Výtěžnosti stanovení PAU v závislosti na počtu benzenových jader v molekule a zvolených podmínkách metody QuEChERS

Table 3. Recovery of PAHs depending on the QuEChERS method conditions

Extrakce			Čištění		Výtěžnost (%)		
Rozpouštědlo	Soli		Sůl	Čistící složka	2–4 benzenová jádra	5 benzenových jader	
acetonitril	MgSO ₄ +	NaCl	MgSO ₄ +	bez čištění	76–110	70–80	
				C ₁₈	80–103	55–90	
				PSA	77–107	67–95	
				C ₁₈ + PSA	74–100	55–74	
				aktivní uhlí	50–99	15–31	
				silikagel	87–100	63–77	
				florisil	79–96	60–84	
		CH ₃ COONa		bez čištění	89–106	72–78	
				C ₁₈	74–102	62–78	
				PSA	74–110	75–87	
				C ₁₈ + PSA	75–100	57–90	
				NaCl (UZ 10 min)	florisil	69–101	67–92
						63–101	66–95
						62–100	67–78
		NaCl (UZ 20 min)					
NaCl (UZ 40 min)							
ethylacetát	MgSO ₄ +	NaCl	MgSO ₄ +	bez čištění	79–97	65–79	
				C ₁₈	84–108	54–90	
				PSA	90–108	70–91	
				C ₁₈ + PSA	85–104	68–87	
				silikagel	84–99	65–83	
				florisil	83–97	65–83	

Tabulka 4. Validační parametry pro metodu QuEChERS

Table 4. The QuEChERS method validation parameters

PAU	Relativní opakovatelnost	Pravdivost	Linearita	Citlivost	LOD	LOQ
	%	%		μV μl/ng	mg/kg	mg/kg
naftalen	9,60	48,8	1,0000	4,46 × 10 ⁶	0,0001	0,0004
acenaften	5,03	81,2	1,0000	1,72 × 10 ⁶	0,0009	0,0029
fluoren	5,03	78,3	1,0000	3,13 × 10 ⁶	0,0004	0,0014
fenanthren	3,95	79,3	0,9999	3,86 × 10 ⁶	0,0004	0,0013
anthracen	6,36	81,2	0,9997	3,61 × 10 ⁶	0,0004	0,0012
fluoranthren	4,28	90,7	0,9999	1,91 × 10 ⁶	0,0002	0,0008
pyren	4,38	94,5	0,9999	1,39 × 10 ⁶	0,0003	0,0011
benzo[a]anthracen	4,37	92,6	0,9999	2,82 × 10 ⁶	0,0003	0,0009
chrysen	4,57	88,6	0,9998	2,51 × 10 ⁶	0,0003	0,0009
benzo[b]fluoranthren	4,18	85,9	0,9999	2,23 × 10 ⁶	0,0004	0,0013
benzo[k]fluoranthren	4,08	92,0	0,9999	6,29 × 10 ⁶	0,0002	0,0006
benzo[a]pyren	3,94	64,1	0,9999	4,63 × 10 ⁶	0,0002	0,0008
dibenzo[a,h]anthracen	12,79	77,8	0,9999	1,66 × 10 ⁶	0,0004	0,0013
benzo[g,h,i]perylene	4,24	83,2	0,9999	1,36 × 10 ⁶	0,0003	0,0010
indeno[1,2,3-c,d]pyren	5,83	76,8	0,9999	2,41 × 10 ⁶	0,0002	0,0008

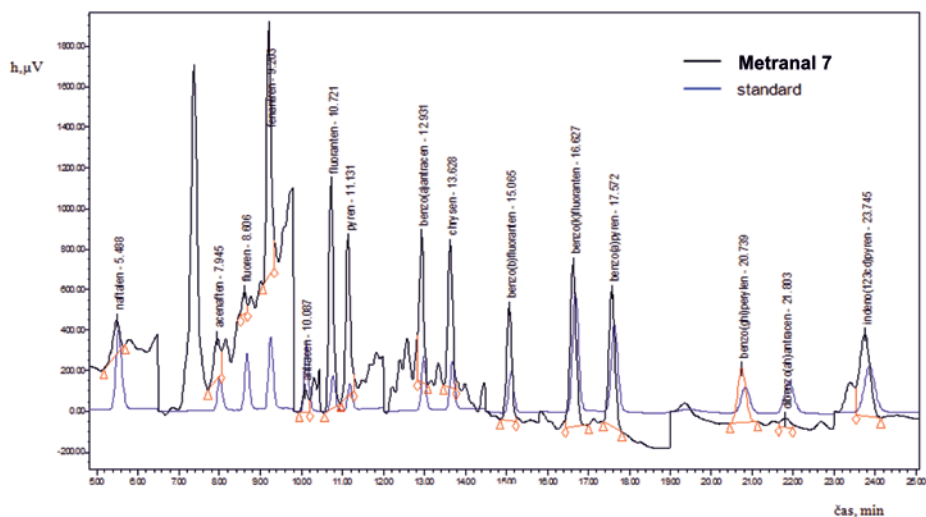
extrakce – třepání po dobu 10 minut a čistící složka – florisil.

Při následných analýzách reálných vzorků za použití optimalizované metody s florisilem v prvním čistícím kroku bylo zjištěno, že u silně znečištěných extraktů nebylo vsádkové čištění pomocí d-SPE účinné, extrakty zůstávaly zbarvené. K dočištění byl na základě srovnání chromatografických záznamů vybrán PSA, protože u vzorků čištěných PSA byl patrný úbytek polárních látek.

Validace metody QuEChERS pro stanovení PAU byla provedena podle normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2005. Pro účely validace bylo provedeno deset nezávislých stanovení CRM Metranal 7 celým postupem. K výpočtům validačních parametrů byl použit program EffiValidation 3.0 fy EffiChem. Byly vyhodnoceny tyto validační parametry: opakovatelnost, pravdivost, citlivost, linearita, mez detekce (LOD) a mez stanovitelnosti (LOQ). Získané výsledky jsou zaznamenány v tabulce 4, chromatogram analýzy CRM Metranal 7 je uveden na obr. 2.

Koncentrace PAU v reálných vzorcích získané pomocí všech testovaných metod jsou uvedeny v tabulce 5. Jako vztažné hodnoty pro vzájemné porovnávání metod byly zvoleny koncentrace získané metodou ASE/GPC.

Rozdíly koncentrací PAU získaných metodami QuEChERS a UZ/SPE od hodnot získaných metodou ASE/GPC se u většiny analýz pohybují v rozmezí 0–20 %. Protože nejistota stanovení kolem hodnoty 20 % se v oblasti chromatografických analýz organických látek považuje za přijatelnou, lze konstatovat, že všechny tři metody poskytují s několika výjimkami srovnatelné výsledky. Srovnatelné jsou rovněž meze stanovitelnosti všech metod.



Obr. 2. Záznam analýzy CRM Metranal 7 a standardního roztoku 15 PAU

Fig. 2. Chromatographic overlay of CRM Metranal 7 and 15 PAHs standard mixture

Přehled cen přípravy vzorků všemi testovanými metodami, vztažený na sérii deseti vzorků, je uveden v tabulce 6. V ceně jsou zahrnuty pouze materiálové náklady na extrakci a čištění vzorků. Nejnižší náklady pro přípravu série poskytuje metoda QuEChERS, ale jen za předpokladu, že surové extrakty těchto deseti vzorků budou málo znečištěné a budou se čistit pouze jednodrokově. Jinak pro každý vzorek, který bude nutné dočistit přidáním PSA, cena analýzy vzroste přibližně o 65 Kč. Celkové náklady pro sérii deseti silně znečištěných vzorků tedy stoupnou k 1 200 Kč.

Doba nutná k provedení extrakce a čištění série deseti vzorků metodami QuEChERS, ASE/GPC a UZ/SPE je graficky porovnána na obr. 3.

Tabulka 5. Koncentrace PAU v reálných vzorcích získané metodami ASE/GPC, UZ/SPE a QuEChERS (mg/kg)

Table 5. PAH concentrations of natural samples after extraction and cleanup by ASE/GPC, US/SPE and QuEChERS methods (mg/kg)

Vzorek	Technika	Koncentrace PAU (mg/kg)														
		NAP	ACE	FLE	PHE	ANT	FLU	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	BghiP	DBahA	IP
Troubky plavenina	ASE	0,035	0,211	0,076	0,649	0,072	3,393	2,916	1,694	1,537	1,865	0,976	1,435	1,011	0,285	1,474
	UZ	0,063	0,272	0,077	0,740	0,061	3,411	2,904	1,672	1,461	1,873	0,988	1,455	1,324	0,261	1,500
	QuE	0,041	0,360	0,079	0,836	0,088	3,532	2,803	1,646	1,461	1,848	1,013	1,447	1,225	0,291	1,486
Otrokovice plavenina	ASE	0,034	0,290	0,092	0,821	0,138	4,085	3,649	2,125	1,832	2,264	1,185	1,810	1,531	0,283	1,786
	UZ	0,050	0,310	0,092	0,825	0,128	4,006	3,516	2,037	1,716	2,219	1,179	1,777	1,610	0,297	1,805
	QuE	0,049	0,361	0,085	0,848	0,133	3,774	3,106	1,870	1,604	2,048	1,087	1,669	1,432	0,277	1,615
Hrádek n Nisou sediment	ASE	0,059	0,271	0,081	1,107	0,141	2,305	1,839	1,059	1,062	1,059	0,515	0,764	0,572	0,091	0,713
	UZ	0,079	0,256	0,079	1,153	0,124	2,404	1,973	1,097	1,085	1,089	0,564	0,829	0,686	0,095	0,780
	QuE	0,062	0,266	0,087	1,113	0,126	2,222	1,673	0,975	0,963	0,967	0,524	0,760	0,601	0,096	0,727
Vestřev sediment	ASE	*	*	*	*	*	0,736	0,505	0,268	0,301	0,327	0,129	0,146	0,247	0,009	0,178
	UZ	0,033	0,069	0,020	0,351	0,024	0,744	0,565	0,295	0,316	0,248	0,136	0,163	0,184	0,014	0,186
	QuE	0,024	0,092	0,028	0,478	0,038	0,844	0,600	0,311	0,328	0,362	0,160	0,221	0,214	0,027	0,195
Otrokovice sediment	ASE	0,015	0,113	0,044	0,445	0,055	1,528	1,200	0,729	0,639	0,676	0,341	0,477	0,329	0,071	0,497
	UZ	0,026	0,116	0,041	0,472	0,056	1,492	1,174	0,654	0,579	0,558	0,302	0,412	0,358	0,063	0,407
	QuE	0,017	0,130	0,044	0,488	0,064	1,438	1,049	0,618	0,509	0,538	0,296	0,423	0,331	0,073	0,409
Zelčín sediment	ASE	0,007	0,016	0,003	0,080	0,020	0,397	0,297	0,214	0,190	0,164	0,085	0,143	0,090	0,013	0,120
	UZ	0,030	0,045	0,012	0,145	0,022	0,379	0,319	0,185	0,171	0,146	0,087	0,125	0,094	0,031	0,116
	QuE	0,011	0,088	0,011	0,123	0,027	0,351	0,269	0,187	0,156	0,149	0,088	0,140	0,092	0,015	0,115
Vestřev plavenina	ASE	0,070	0,333	0,115	1,513	0,163	3,800	3,264	1,840	1,763	1,515	0,863	1,152	0,906	0,192	1,132
	UZ	0,114	0,340	0,124	1,790	0,194	4,322	3,531	2,010	1,889	1,703	0,947	1,293	1,077	0,204	1,273
	QuE	0,100	0,389	0,115	1,791	0,186	3,957	2,971	1,781	1,660	1,548	0,884	1,221	0,962	0,193	1,155
Hrádek n Nisou plavenina	ASE	0,053	0,279	0,064	0,985	0,141	2,538	2,246	1,221	1,233	1,331	0,665	1,001	0,858	0,135	0,933
	UZ	0,080	0,208	0,062	0,905	0,122	2,298	1,933	1,079	1,060	1,141	0,587	0,910	0,827	0,134	0,869
	QuE	0,062	0,229	0,065	0,962	0,138	2,295	1,767	1,042	1,034	1,119	0,578	0,895	0,837	0,136	0,861
Zelčín plavenina	ASE	0,030	0,129	0,036	0,314	0,057	0,856	0,763	0,458	0,427	0,419	0,224	0,345	0,226	0,047	0,300
	UZ	0,038	0,070	0,022	0,238	0,037	0,692	0,578	0,358	0,331	0,376	0,218	0,301	0,234	0,045	0,267
	QuE	0,034	0,144	0,020	0,251	0,039	0,676	0,519	0,351	0,297	0,317	0,184	0,310	0,278	0,044	0,256
Bohumín plavenina	ASE	0,299	6,317	0,920	2,430	0,428	5,963	4,832	3,457	2,858	3,562	1,888	2,627	1,811	0,454	2,532
	UZ	0,663	7,321	1,005	2,423	0,383	5,462	4,214	3,328	2,753	3,437	1,840	2,563	2,216	0,447	2,434
	QuE	0,610	9,169	1,170	2,937	0,441	6,911	4,741	3,582	3,090	3,872	2,133	2,684	2,280	0,461	2,695

* nevyhodnoceno z důvodu posunu retenčních časů

Tabulka 6. Náklady na přípravu série 10 vzorků metodami ASE/GPC, UZ/SPE a QuEChERS (Kč)

Table 6. Costs of 10 samples batch prepared by ASE/GPC, US/SPE and QuEChERS methods (Czech crowns)

Metoda	Cena (Kč)
ASE/GPC	2 700
UZ/SPE	930
QuEChERS	520 + 650

Z grafu vyplývá, že extrakce i čištění série vzorků probíhá nejrychleji u metody QuEChERS. V případě dočištění extraktů přidavkem PSA se doba oproti základnímu čištění prodlouží přibližně o 10 minut. Z grafu rovněž vyplývá, že časově nejnáročnější je metoda ASE/GPC. K tomu je však nutné poznamenat, že tato metoda je plně automatizovaná a po spuštění přístrojů neklade časové nároky na obsluhu. Naopak u metod UZ/SPE a QuEChERS je vyžadován značný podíl manuální práce.

Závěr

V průběhu prací byla v naší laboratoři navržena, optimalizována a validována metoda QuEChERS pro stanovení PAU v pevných vzorcích ze životního prostředí. Metoda byla následně aplikována na stanovení PAU v reálných vzorcích. Na základě vyhodnocení dosažených výsledků lze konstatovat, že metoda QuEChERS je pro uvedenou aplikaci vhodná, poskytuje výsledky srovnatelné s metodami ASE/GPC a UZ/SPE. Z hlediska časové náročnosti i materiálových nákladů umožňuje metoda QuEChERS relativně rychlou a levnou přípravu vzorků pro stanovení PAU v pevných vzorcích. Lze tedy říci, že v případě stanovení PAU název metody QuEChERS vystihuje její vlastnosti – je rychlá, jednoduchá, levná, efektivní, robustní a bezpečná.

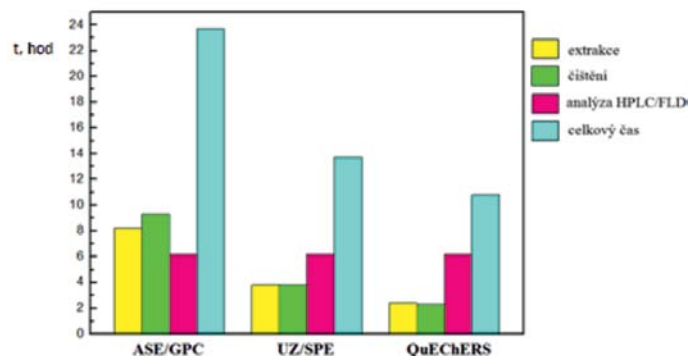
Literatura

- [1] QuEChERS. History. Dostupné na: <<http://quechers.cvuu-stuttgart.de/index.php?nav1o=2&nav2o=1&nav3o=0>> [cit. 9. 9. 2011].
- [2] Lehotay, J.S., Anastassiades, M., and Majors, E.R. The QuEChERS revolution. *LC-GC Europe*, 23:8, 418–429 (2010).
- [3] Majors, E.R. QuEChERS – A new technique for multiresidue analysis of pesticides in foods and agricultural samples. *LC-GC Europe*, 20:11, 574–581 (2007).
- [4] Díez, C., Traag, W.A., Zommer, P., Marinero, P., and Atienza, J. Comparison of an acetonitrile extraction/partitioning and “dispersive solid-phase extraction” method with classical multi-residue methods for the extraction of herbicides residues in barley samples. *Journal of chromatography A*, 1131, 11–23 (2006).
- [5] Ramalhosa, J.M., Paíga, P., Morais, S., Delerue-Matos, C., and Oliveira, M.B. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in fish: evaluation of a quick, easy, cheap, effective, rugged, and safe extraction method. *Journal of Separation Science*, 32:20, 3529–3538 (2009).
- [6] Smith, D. and Lynam, K. Polycyclic aromatic hydrocarbon analysis in fish by GC/MS using QuEChERS d/SPE sample preparation and a high efficiency DB-5ms ultra inert GC column. *Application note 5990–6668E Agilent Technologies* (2012).
- [7] Pule, B.O., Mmualafe, L.C., and Torto, N. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in fish with Agilent SampliQ QuEChERS AOAC kit and HPLC/FLD. *Application note 5990–5441 Agilent Technologies* (2012).
- [8] Steven, J. and Szelewski, M. Meeting the surge in demand for seafood screening on the gulf coast. *Current Trends in Mass Spectrometry* (2010).
- [9] Cochran, J. QuEChERS extraction of oil contaminated seafood PAHs. Dostupné na: <<http://blog.restek.com/?p=1014>> (2010).

Vodohospodářské dispečerské simulace: efektivní nástroj pro integrovaný režim řízení ve vodním hospodářství

Povodně jsou jevem, který provází lidstvo po celou jeho historii, a dalo by se tedy předpokládat, že přirozená adaptabilita lidí na tento přírodní jev bude relativně vysoká. Bohužel není fyzikálně možné se na katastrofální povodeň připravit takovým způsobem, aby nedošlo k žádným škodám.

Publikace Simulation Games on Flood Operational Management: a Tool for the Integrated Strategy of Flood Control se zabývá možnostmi využití simulačních her ve vodním hospodářství. Dispečerské simulační hry představují progresivní formu přípravy na povodňovou situaci, kde se skupiny složené z účastníků povodňové situace s různými



Obr. 3. Časová náročnost přípravy vzorků metodou ASE/GPC, UZ/SPE a QuEChERS

Fig. 3. Time demands of samples preparation by ASE/GPC, US/SPE and QuEChERS methods

- [10] Zhao, S. and Zhai, A. Screening PAHs in soil using RTL database with SampliQ QuEChERS extraction kits and Agilent 5975T LTM GC/MS. *Application note 5990–6324 Agilent Technologies* (2012).
- [11] Pule, B.O., Mmualafe, L.C., and Torto, N. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil with Agilent SampliQ QuEChERS AOAC kit and HPLC/FLD. *Application note 5990–5452 Agilent Technologies* (2012).

Ing. Alena Svobodová
VÚV TGM, v.v.i.

tel.: +420 220 197 448, e-mail: alena_svobodova@vuv.cz

Bc. Petra Sudová

Přírodovědecká fakulta UK v Praze

e-mail: psudova@centrum.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

Application the QuEChERS extraction method for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in solid samples of hydrosphere (Svobodová, A.; Sudová, P.)

Key words

polycyclic aromatic hydrocarbons – QuEChERS – solid samples of hydrosphere – high liquid chromatography – fluorescence detection

The QuEChERS method for extraction of 15 polycyclic aromatic hydrocarbons from solid samples of hydrosphere was evaluated. Extracts were analyzed by liquid chromatography with fluorescence detection. The overall analytical procedure was validated by systematic recovery experiments using standard reference material. The optimized QuEChERS conditions were applied to natural sample preparation and the obtained results were compared with two routinely used methods: accelerated solvent extraction with gel permeation chromatography and ultrasonic extraction with solid phase extraction for cleanup. The study shows that the optimized QuEChERS technique provides results comparable to routine methods, with similar validation parameters. Its main advantages are low material and operating costs as it is demonstrated.

norodým zázemím snaží co nejlépe manipulovat s vodohospodářskou soustavou za podmínek, které jsou nastaveny tak, aby se co nejvíce podobaly možné reálné situaci.

Katastrofální povodně, způsobující velké škody, vyvolávají požadavek na vytváření ochranných opatření. Ale lidé mají tendenci podceňovat význam katastrof, které se vyskytují jednou za 70 a více let. Povodně jsou přírodním jevem stochastického charakteru, tzn. průtoky určité velikosti jsou v dlouhé řadě let v průměru překračovány, k tomuto překročení dochází ovšem náhodně.

Mezivládní panel pro klimatickou změnu ve svých zprávách uvádí, že se dá v budoucnu globálně předpokládat častější výskyt extrémních klimatických jevů, včetně povodní s katastrofickými následky. Na druhou stranu jsou scénáře budoucího vývoje klimatu spíše projekcemi vývoje, který by mohl nastat, když se bude lidská společnost chovat určitým způsobem, a jsou zatíženy velkou nejistotou. Přesto je nutné se z hlediska principu předběžné opatření připravit na horší alternativu.

Povodně jsou výsledkem konkrétních meteorologických a hydrologických podmínek, které nemůžeme ovlivnit. Nicméně ničivé důsledky a škody, které povodně mohou způsobit, jsou ovlivněny mnoha socio-ekonomickými faktory, které je možno částečně ovlivnit. Je tedy žádoucí učinit co nejvíce pro zmírnění důsledků potenciální povodňové situace. Zkušenosti z předchozích povodní (především z povodně v roce 2002) potvrdily, že integrace a spolupráce mezi všemi účastníky povodňové situace může výrazně snížit negativní dopady povodně.

Jedním z prostředků jak zlepšit integraci a spolupráci mezi účastníky povodňové situace je tzv. kooperativní učení, což je učení ve skupině, která spolupracuje na dosažení určitého cíle, v tomto případě na maximálním snížení následků povodně.

Jako nejvhodnější konkrétní forma se jeví tzv. dispečerská simulační hra.

Efektivita simulačních her, a tedy všeobecný prospěch a účinnost je mnohem vyšší než u pasivních metod učení. Dispečerských simulačních her se účastní konkrétní lidé s danými vlastnostmi, schopnostmi, zvyky i předsudky a také s různými zájmy v rámci řešené problematiky. Setkávají se zde formalizované a neformalizované podmínky, přístupy a reakce. Jako ve skutečném životě jsou v dispečerské simulaci cíle a informace definovány omezeně jak co do rozsahu, tak i kvality. Základem je dialog při přípravě rozhodnutí, která bývají i s maximálním využitím technických prostředků zatížena vysokou mírou nejistoty.

Jde o aplikaci principů Integrovaného řízení ve vodním hospodářství (Integrated Water Resource Management, IWRM), které může být definováno z různých hledisek. Podle nezávislé informační sítě Global Water Partnership je IWRM charakterizováno takto: „Integrované řízení je proces, který zavádí do vodního hospodářství koordinovaný rozvoj a hospodaření s vodou, půdou a souvisejícími zdroji tak, aby bylo dosaženo maximálního možného ekonomického a sociálního prospěchu, aniž by byla negativně ovlivněna udržitelnost ekosystémů. IWRM je proces založený na výsledcích výzkumu, na kterém mají podíl všichni, kterých se týká vodní hospodářství v širokém slova smyslu. IWRM tedy dává dohromady vodohospodáře, zainteresované osoby ze státní správy a samosprávy a akademické sféry tak, aby všichni tito účastníci společně zjistili, jak naplnit dlouhodobé potřeby v oblasti vodního hospodářství při zachování udržitelnosti a ekonomického prospěchu.“

Publikace v úvodní části přehledně shrnuje teorii týkající se simulačních her se zaměřením na jejich využití ve vodním hospodářství. Dále jsou probrány možnosti klasifikace simulačních her a též jsou uvedeny příklady simulačních her, které byly vytvořeny pro potřeby vodního hospodářství.

Následuje přehled simulačních her ve vodním hospodářství, jež byly vytvořeny

a použity v ČR. Všechny dosavadní realizace simulačních her ve vodním hospodářství ČR jsou podrobně zhodnoceny a jsou uvedeny hlavní poznatky a zkušenosti z těchto her. Dále jsou popsány možnosti přístupu k hodnocení simulačních her.

Hlavním tématem publikace je hodnocení dispečerské simulační hry, která se odehrála 11. listopadu 2008 na půdě státního podniku Povodí Ohře. Celá akce byla realizována v rámci projektu EU NeWater v případě studií Labe. Hlavními organizátory byly Povodí Ohře, státní podnik, VÚV TGM v Praze a ČHMÚ Praha a Ústí nad Labem.

Tato dispečerská simulační hra byla hodnocena z vodohospodářského a sociologického hlediska. Vodohospodářské hodnocení spočívalo v porovnání výsledků všech týmů, včetně ukázky reakce na dostupné hydrologické předpovědi ve vybraných profilech a nádržích.

Hlavním cílem sociologického hodnocení bylo především získat zpětnou vazbu od účastníků hry i pozorovatelů v centru řízení hry, zjistit postoje a očekávání členů hráčských skupin, zhodnotit přínosy dispečerské simulace a poskytnout doporučení pro příští opakování dispečerské simulační hry.

Tato realizace dispečerské simulační hry měla ukázat značné nejistoty a někdy neúplnosti vstupních informací pro rozhodování často v časové tísní a zdůraznit potřebu vzájemného porozumění a úzké spolupráce všech zúčastněných odborníků a institucí během skutečné povodňové situace. Z výsledků sociologického hodnocení vyplynulo, že tohoto cíle bylo dosaženo.

Obecně je příprava pro dané účely vhodné dispečerské simulace náročná na finanční i lidské zdroje. Řešená problematika, struktura rolí a interakce mezi jednotlivými složkami hry musí být předem podrobně definovány. Například v případě, kdy tématem je řízení povodně, je nutné správně uvážit rozložení a objem srážek. Dále je velmi důležitý časový rámec (celková doba, počet rozhodovacích kroků, v případě simulace operativního řízení čas poskytnutý pro rozhodování).

Pojetí a návrh struktury dispečerské simulace vyplývají z jejího účelu. Simulační hry navržené povšečně bez ohledu na zázemí, schopnosti a dovednosti jejich předpokládaných účastníků mají omezené šance na úspěch.

Simulation Games on Flood Operational Management: a Tool for the Integrated Strategy of Flood Control (M. Martínková, P. Eger, V. Klečka, V. Blažek, Š. D. Blažková, V. Krysanova)

Praha, VÚV TGM, 2012, 70 s. ISBN 978-80-87402-18-4.

Mgr. Marta Martínková

VÝZKUM TEORETICKÝCH POVODŇOVÝCH VLN PRO VODNÍ DÍLO SKALKA S DLOUHOU PRŮMĚRNOU DOBOU OPAKOVÁNÍ

Šárka Blažková

Klíčová slova

povodně o dlouhé průměrné době opakování – bezpečnost přehrad – frekvenční TOPMODEL – meze přijatelnosti v metodě GLUE

Souhrn

Výzkum teoretických povodňových vln s pravděpodobností průměrné doby opakování 10 tisíc let byl proveden na příkladu vodního díla Skalka (povodí o rozloze 600 km² ležící převážně v Německu na Ohři a Reslavě) s využitím nové generace metody GLUE (Generalizovaná metoda odhadu věrohodností; Beven, 2006).

Úvod

Příspěvek se zabývá výzkumem odvození teoretických povodňových vln (kulminace, objemu, průběhu, tj. hydrologických návrhových dat) vodního díla Skalka s pravděpodobností, která odpovídá průměrné době opakování 10 tisíc let. Pro odvození je použita nová generace metody Generalised Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) – v překladu Generalizovaná metoda odhadu věrohodností (Beven, 2006), která používá deterministický model v rámci generalizované metody odhadu nejistot (řada statistických prvků). Ve výsledcích zemích se už i v praxi pracuje s odhadem nejistot.

Původní představení GLUE je v článku Bevena a Binleyho (1992). Podstatou je výpočet mnoha simulací (tisíců až milionů) s různými sadami parametrů modelu. Pro výpočet frekvence povodní použí-

váme srážkoodtokový model TOPMODEL v kontinuální verzi, kdy vstupem jsou srážky modelované v hodinovém kroku simulátorem (modelem) srážek. Srážkový a hydrologický model byly popsány v několika pracích Bevena (1986a, b, 1987), Camerona et al. (1999, 2000, 2001) a Blažkové a Bevena (1995, 2002, 2004, 2009).

Nová generace GLUE pracuje kromě nejistot v parametrech modelu také s nejistotami v hodnotách, s nimiž modelované hydrogramy a čáry překročení srovnáváme, v našem případě s průtoky, charakteristikami sněhu a sezonnosti.

Na vodním díle Skalka jsme pracovali asi sedm let (současně s prací na jiných projektech, viz poděkování) a v roce 2009 jsme v časopise Water Resources Research uveřejnili článek (Blažková a Beven), který ukazuje využití nové generace GLUE na povodí nádrže Skalka – tj. predikční meze čáry maximálních ročních průtoků do doby opakování 1 000 let (na základě modelování více než 4 000 řad o délce trvání 10 tisíc let v hodinovém kroku).

Prezentované výsledky byly tedy využity v několika projektech. Popisujeme odvození z 19 řad o délce 100 tisíc let, které splnily všech 114 kritérií stanovených v článku Blažková a Beven (2009) a dvou řad, které byly vypočteny už v roce 2007 původní metodikou GLUE.

Použitá data

Na rozdíl od projektu „Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní“, kdy jsme pracovali jen se dvěma dílčími povodními Ohře a Reslavy (data prostřednictvím komise pro přeshraniční toky) a malým mezipovodím na našem území a srážkami a teplotami pouze z ČR (ČHMÚ), měli jsme pro studii uveřejněnou v roce 2009 k dispozici šest řad kulminačních průtoků a data pro srážky, teploty, sníh a též hydrometrická data z Landesamt für Wasserwirtschaft a řadu ze stanice Cheb před výstavbou (ČHMÚ Plzeň). Pro výpočet parametrů srážkového modelu byla použita řada Ing. Soboty (2000) v minutovém kroku ze stanice Cheb a dále denní a měsíční data z několika stanic v povodí nebo jeho blízkosti z Deutscher Wetterdienst München. Kromě toho bylo nezbytné pro některé podrobné vstupy použít analogie s experimentálními povodními v Jizerských horách.

Jedná se např. o řadu teplot v hodinovém kroku pro odvození parametrů Fourierovy transformace a parametrů autokorelace v průběhu teplot během dne, dále odhadu příspěvku horizontálních srážek k celkovému množství (Tesař, nepublikovaná data) a o poznatky o zákonitostech tvorby odtoku v povodí, které nelze získat z rutinních dat. Přehled rozdělení povodí na šest dílčích podpovodí je v *tabulce 1*.

Metoda

Modely jsou podrobně popsány v elektronické příloze na serveru časopisu Water Resources Research (Electronic supplement k článku Blazkova a Beven, 2009) a v češtině v článku Blazkové a Bevena (1995; jen frekvenční TOPMODEL). Zde tedy jen stručně: TOPMODEL je založen na principu proměnlivých nasycených ploch, které se rozšiřují v průběhu srážkové epizody. Obvykle jsou nasyceny nebo skoro nasyceny pouze plochy v bezprostřední blízkosti toků. Při extrémních srážkách (např. nad 70 mm/h) může být (krátkodobě, tj. několik hodin) nasyceno „celé povodí“ včetně svahů dále od toku. Na nasycených plochách se tvoří povrchový odtok, protože hladina vody je v úrovni terénu nebo nad ní, a voda se tedy nemůže vsakovat. V přírodě však pozorujeme velkou variabilitu a heterogenitu – chování povodí může být jiné o půl metru dál. TOPMODEL jsme ve spolupráci s Lancaster Environment Centre doplnili o model pro ukládání sněhu a tání. Srážkový simulátor jsme doplnili o přesun srážky přes velké povodí, původně pro Želivku (Blazkova a Beven, 2004).

TOPMODEL, simulátor srážek a model tání sněhu mají řadu parametrů, které je třeba určit. Při použití metody odhadu nejistoty GLUE vzorkujeme parametry z fyzikálně rozumných mezí. Tím dostaneme mnoho (desetitisíce) sad parametrů. S těmito sadami modelujeme řady o stejné délce, jako je délka pozorované průtokové řady. Mnoho sad parametrů produkuje neakceptovatelné výsledky. Takové řady vyloučíme z dalšího zpracování.

Na povodí nádrže Skalka jsme se několikrát vraceli k použitému modelu a upravovali ho. To lze v hydrologii očekávat vždycky, když pracujeme s vnitřními proměnnými, nejen s průtoky v závěrovém profilu, protože každé povodí je unikát (viz článek Bevena, 2000). Museli jsme doplnit závislost srážek a teplot na výškovém gradientu – čili počítat akumulaci a tání sněhu v několika zónách (na rozdíl od Želivky, kde jsme měli jen horní a dolní povodí). Největší potíže nám dělalo mezipovodí č. 2 (*tabulka 1*), tj. Eger od stanice Marktleuthen ke stanici Hohenberg, což může být způsobeno geologií a/nebo malými elektrárnami, popř. rybníčky. Tento efekt asi neovlivní velké povodně, potíž byla v čáře trvání průtoků. Kvůli tomu jsme upravili výpočet čáry poklesu průtoků (nyní je ze dvou úseků). Při hledání vhodných vln ovšem vyšlo najevo, že metoda zřejmě vybírá takové vlny v profilu Marktleuthen, které mají delší trvání – jsou podobné vlnám v profilu Hohenberg, protože přitom vycházejí lépe čáry trvání v profilu Hohenberg. Několik vln z obou profilů jsme dostali od pracoviště dispečinku Povodí Ohře, s. p., před několika lety a byly mezi nimi vlny delší i kratší a špičatější, ale je vidět, že by bylo vhodné i toto kritérium použít a model ještě upravit. Samozřejmě přitom také záleží na tom, zda je srážkou zasaženo celé dílčí povodí.

Kritéria pro akceptovatelné výsledky (limits of acceptability v článku Blazkova a Beven, 2009)

V nové generaci metody GLUE stanovíme kritéria před začátkem simulací. V případě průtoků požadujeme, aby modelované kvantily průtoků byly uvnitř nejistot měření.

Tabulka 1. Přehled dílčích povodí v povodí horní Ohře
Table 1. Overview of subcatchments in the upper Eger basin

Č. dílčího povodí	Název	Plocha dílčího povodí [km ²]	Měření průtoků	Délka pozorování roky	Průměrná povodeň [m ³ /s]	Odhad 100leté povodně [m ³ /s]
1	upper Eger	114,420	Marktleuthen	67	20,28	50,37
2	lower Eger	209,376	Hohenberg	37	29,94	74,38
3	upper Roeslau	130,65	Lorenzreuth	39	22,64	56,25
4	Kossein	94,82	Marktrechwitz	34	15,91	39,52
5	lower Roeslau	91,11	Arzberg	28	53,86	133,80
6	Ohře	31,3240	Cheb	60	89,98	223,52

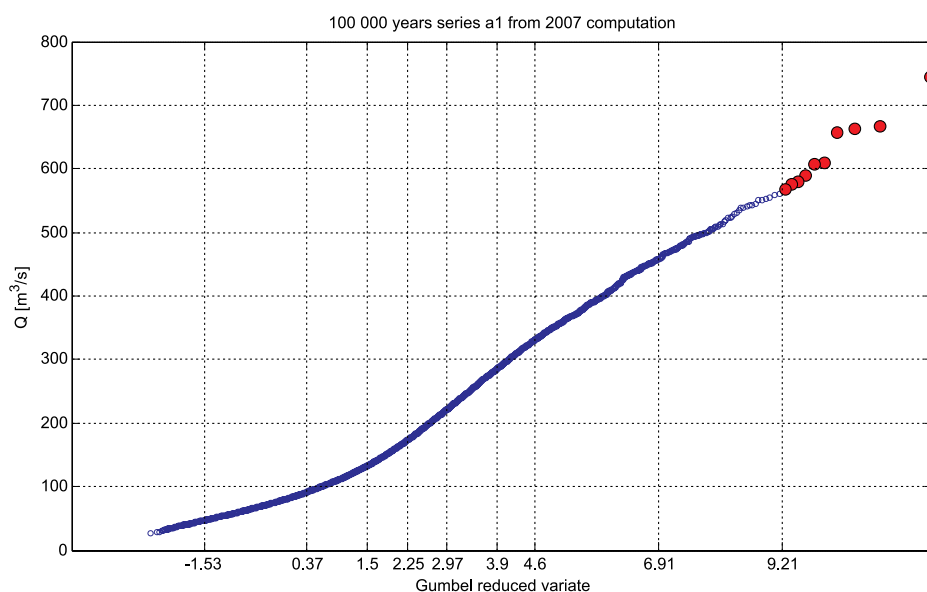
1st column: num of subcatchment, 2nd name of river, 3rd area of subcatchment, 4th site of flow gauge, 5th length of observation in years, 6th mean flood, 7th estimate of 100-year flood

Srovnáváme zvlášť odchylky kladné a záporné. Pracovali jsme s prvními čtyřmi kvantily čáry překročení, tj. do 10leté povodně, protože u větší N-letosti se už výrazně projevuje nejistota z extrapolace. Měřeními i modelovanými řadami jsme metodou L-momentů podle Hoskinga (1997) proložili Wakebyho rozdělení (pětiparametrické).

Dalšími kritérii jsou shoda na devíti kvantilech čáry trvání průtoků – rovněž musí modelované čáry ležet uvnitř nejistoty měření vypočtené z dat pro hydrometrování. U sněhu hodnotíme čtyři první kvantily čáry překročení maximálních ročních vodních hodnot sněhu. Z měřených dat byly vypočteny meze nejistoty fuzzy regresí v závislosti na nadmořské výšce stanice. Poslední skupinou kritérií je sezonnost maximálních ročních průtoků. Zhruba 80 % z nich se vyskytuje v zimním období. Meze nejistoty byly stanoveny zhruba tak, aby obsahovaly údaje ze všech dílčích povodí s mírným přesahem. S čarou překročení v profilu Cheb před výstavbou nádrže jsme nepracovali – ponechali jsme ji jako kontrolní. Celkem jsme měli 114 kritérií. Tato kritéria splnilo 39 simulací, některé však byly velmi podobné, proto jsme nakonec dál pracovali s 19 z nich.

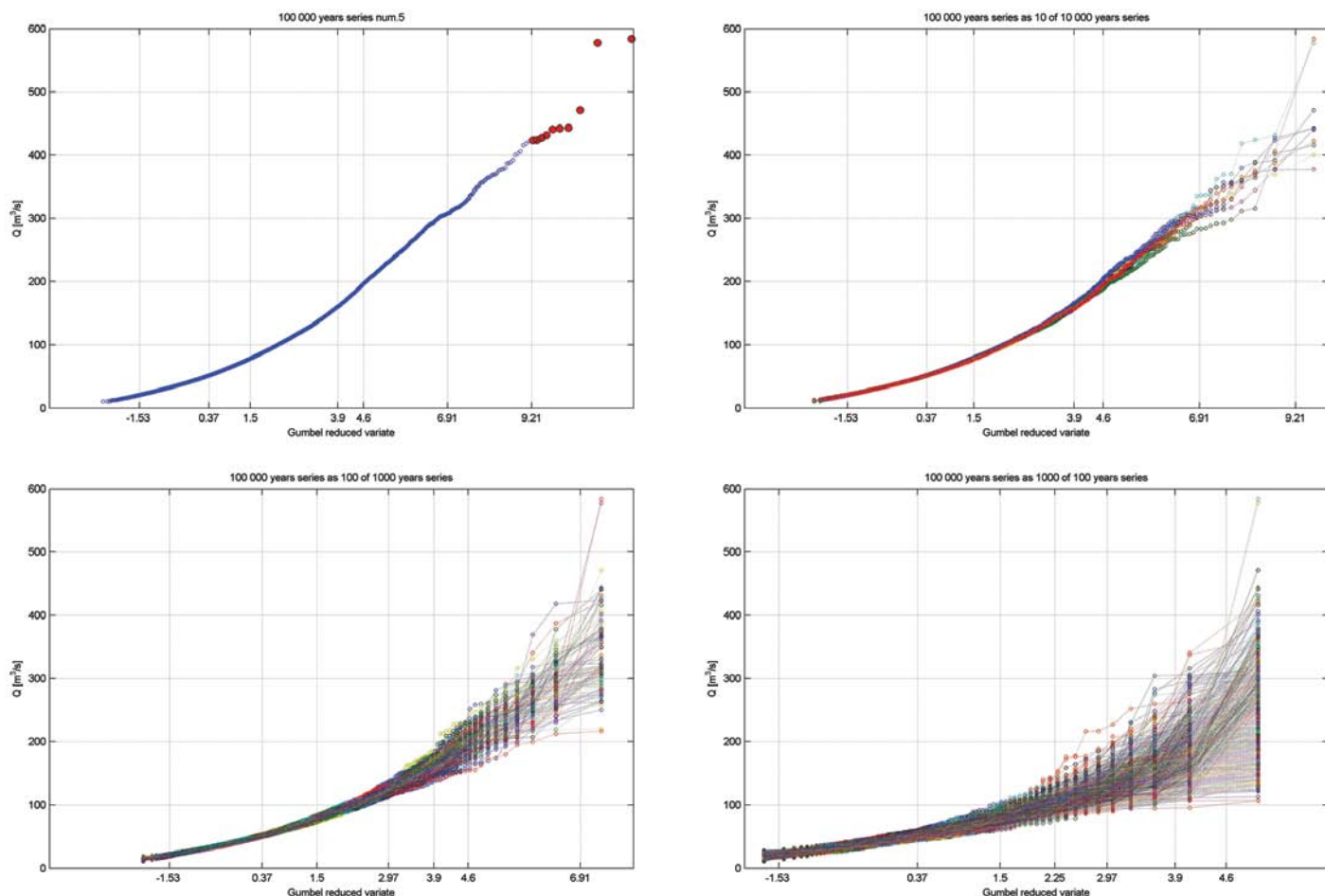
Meze nejistoty a dlouhé simulace

Meze nejistoty se sestavují z kumulativních čar na každém kvantilu (nasčítávají se hodnoty setříděných simulací). Protože jsme měli málo simulací, které splňovaly všechny podmínky, rozhodli jsme se meze kritérií trochu rozšířit, a to pro všechna kritéria ve stejném poměru. K tomu jsme využili Pareto optimalizaci, čímž jsme získali víc než 4 000 simulací, a s nimi jsme vypočetli predikční meze čáry překročení maximálních ročních průtoků (Blazkova a Beven, 2009).



Obr. 1. Řada a1 s pravděpodobností odpovídající době opakování 100 tisíc let (červené kroužky jsou povodně s pravděpodobností nižší) vypočtená v roce 2007 s použitím původní metody GLUE; vyneseny jsou jednotlivé roční maximální (hodinové) průtoky

Fig. 1. Annual maxima of 100 thousand years series; red circles are floods with exceedence probability less than that corresponding to 10 thousand year return period



Obr. 2. Rozbor prvku náhodnosti realizací v řadách maximálních ročních průtoků

Fig. 2. Analysis of the randomness in realisations of flood series of various lengths (this is a single 100 thousand years series subdivided in several ways)

Výpočet řad dlouhých 100 tisíc let

Modernizace paralelního systému nám umožnila pro projekt COST, WATCH a pro Povodí Ohře, s.p., pracovat již se 100tisíciletými řadami, takže nad požadovanou hodnotou s průměrnou dobou opakování 10 tisíc let máme v každé simulaci devět nebo deset povodní vyšších. V *obr. 1* (řada a1 z roku 2007) jsou tyto vyšší povodně vyneseny červeně, nižší povodně jsou vyznačeny jako menší modrý kroužek). Na vybrané řadě č. 5 ukazujeme názorně nejistotu, která vzniká náhodnými realizacemi téhož procesu. Kromě 100tisícileté řady (*obr. 2*, graf vlevo nahoře) jsme v tomto obrázku vynesli tutíž 100tisíciletou řadu jako 10 desetitisíciletých řad, 100 tisíciletých řad a 1 000 stoletých řad. Zde je vidět ohromné rozpětí na 100leté povodni (hodnota 4,6 na vodorovné ose grafu vpravo dole), čili 100 až 590 m³/s. Na kvantilu 1 000leté povodně (graf vlevo dole) vidíme rozpětí asi 210 až 590 m³/s (hodnota na ose x je 6,91) a na kvantilu 9,21 (10tisíciletá povodeň) od 390 do 590 m³/s (graf vpravo nahoře). To znamená, že povodně, které ve skutečnosti mají pravděpodobnost nižší, než jaká odpovídá 10tisícileté povodni, se dostaly do některých kratších realizací.

Predikční meze kulminačních průtoků

V souboru vypočtených řad je průtok s 10tisíciletou průměrnou dobou opakování nejčastěji mírně nad hodnotou 400 m³/s. Upozorňujeme, že pro výpočet nebyla použita hodnota PMP (pravděpodobná maximální srážka), nýbrž hodnoty modelované z měřených hodnot s použitím exponenciálního nebo gamma rozdělení. PMP bylo použito pouze k vyřazení simulací, které příliš překračují PMP po redukci na plochu povodí.

Dvě řady však modelují hodnoty podstatně vyšší než 400 m³/s. Návrhovou hodnotu můžeme proto uvažovat v rozmezí 400 až 800 m³/s.

Výběr povodňových hydrogramů

Model pracuje v hodinovém kroku, takže není možné ukládat celé průběhy všech hydrogramů. Zároveň se předem neví, která N-letost

bude patřit ke které velikosti, takže dat z povodní nad určitým prahem by také bylo velmi mnoho (kromě průtoků, srážek a sněhu se ukládají ještě další proměnné). Proto počítáme s každou vybranou sadou parametrů nejdříve 20 pětitisíciletých řad a ukládáme roční maximum v každé sezoně a číslo povodně. Rozdělení na kratší úseky je výhodné i vzhledem k nebezpečí výpadku proudu (záložní baterie udrží systém jen na několik minut). Z uložených dat vybereme podle zvolených kritérií čísla vln a ta zadáme do opakovaného výpočtu jako další vstup, aby se u nich uložil celý průběh průtoků, srážek, vodní hodnoty sněhu a dalších proměnných.

Ze zkušenosti dispečinku Povodí Ohře i z německých dat je zřejmé, že nejvíce povodňových vln vzniká v zimním období, většinou s příspěvkem tání ze sněhu. Model reprodukuje tento fakt a také to, že se jedná obvykle o vlny do 250 m³/s. Vlny z tání mohou mít prakticky libovolný tvar, což je způsobeno nejen chodem teplot, ale i skládáním vln z jednotlivých dílčích povodí. Tyto povodně se však nepřibližují k hodnotě kapacity přelivů, a proto by nebyly pro posouzení rozhodující.

Měřená data zároveň ukazují, že povodňová vlna (bez příspěvku tání) může vzniknout v kterémkoliv období, ale v létě a zejména na podzim je jich méně. Největší vlny vznikají z deště (často s vysokou intenzitou, tj. přes 40 mm/h po dobu několika hodin, s různým kolísáním) na nasycené povodí – tedy nejčastěji na jaře. Často bývá vysokou intenzitou zasažena jen část povodí. I u některých letních vln se ukazuje skládání příspěvků z dílčích povodí, a vzniká tedy trochu delší vlna s podružným vrcholem.

Závěr

Z dosavadního výzkumu vyplynulo, že za rozumné rozmezí návrhových kulminačních průtoků považujeme 400 až 800 m³/s, jež nám vyšlo ze simulací, které považujeme za přijatelné.

Prvek náhodnosti v realizacích hydrologických procesů je velmi významný, a to jak u pozorovaných, tak u modelovaných realizací, sady parametrů jen málo odlišné od akceptovaných mohou dávat vyšší kulminace.

Pro další dokreslení uvádíme, že čáry překročení modelované jako 10 tisíc různých realizací s jednou sadou parametrů splňují úplně všechna kritéria jen pro několik realizací. To považujeme za hlavní důvod proč zahrnout do výpočtu i simulace, které nemají všechna kritéria splněna (ale liší se velmi málo).

Otázkou zůstává, jaká pravděpodobnost by se měla zvolit pro predikční mez (95% znamená, že 5 % povodní může být vyšších). Odpověď na tuto otázku by měla být hledána důkladným zvažováním rizik v diskusi mezi zúčastněnými z praxe a z výzkumu (včetně meteorologů) a s uvážením vyšší variability a případného zvýšení teplot způsobených klimatickou změnou.

Poděkování

Práce jsme zahájili v grantu MŽP Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní a pokračovali jsme v grantech MŽP Labe IV a Labe V (Antropogenní tlaky na stav půd, vodní zdroje a vodní ekosystémy v české části mezinárodního povodí Labe). V nedávné době byl výzkum podpořen nejvíce z grantu MŠMT (OC10024) vztahujícímu se k projektu EU COST FloodFreq, projektu EU a MŠMT WATCH a spolupráce s Povodím Ohře, s.p. Za data děkujeme ČHMÚ, Landesamt für Wasserwirtschaft a Deutscher Wetterdienst München. Dále děkujeme Ing. Josefu Hladnému, CSc., za založení experimentálních povodí v Jizerských horách a ČHMÚ za jejich udržování v chodu, odkud stále čerpáme experimentální data a poznatky použitelné k práci na dalších případových studiích.

Literatura

- Beven, K.J. (1986a) Hillslope runoff processes and flood frequency characteristics. In: Abrahams, A.D. (ed.) *Hillslope Processes*. Boston: Allen and Unwin, 187–202.
- Beven, K.J. (1986b) Runoff production and flood frequency in catchments of order n: an alternative approach. In: Gupta, V.K., Rodriguez-Iturbe, I., and Wood, E.F. (eds) *Scale Problems in Hydrology*. Dordrecht: Reidel, 107–131.
- Beven, K.J. (1987) Towards the use of catchment geomorphology in flood frequency predictions. *Earth Surf. Process. Landf.* V12(1), 69–82.
- Beven, K.J. (2000) Uniqueness of place and the representation of hydrological processes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 203–213.
- Beven, K.J. (2006) A manifesto for the equifinality thesis. *J. Hydrology*, 320, 18–36.
- Beven, K.J. (2009) *Environmental Modelling: An Uncertain Future?* London: Routledge.
- Beven, K.J. and Binley, A.M. (1992) The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6, 279–298.
- Beven, K.J. and Freer, J. (2001) Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems. *J. Hydrology*, 249, 11–29.
- Blažková, Š. a Beven, K.J. (1995) Modelování čar překročení maximálních průtoků frekvenční verzí TOPMODELu. *J. Hydrol. Hydromech.*, 43, 3, 148–172.
- Blazkova, S. and Beven, K.J. (1995) Frequency version of TOPMODEL as a tool for assessing the impact of climate variability on flow sources and flood peaks. *J. Hydrol. Hydromech.*, 43, 392–411.
- Blažková, Š. aj. (1997) Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní. Zpráva VÚV TGM v projektu VaV 510/3/97. Praha, listopad 1997.
- Blazkova, S. and Beven, K.J. (1997) Flood Frequency Prediction for data limited catchments in the Czech Republic using a stochastic rainfall model and TOPMODEL. *J. Hydrol.*, 195, 256–278.

- Blazkova, S. and Beven, K.J. (2002) Flood Frequency Estimation by Continuous Simulation for a Catchment treated as Ungauged (with Uncertainty). *Water Resources Research* 38(8), 10.1029/2001WR000500.
- Blazkova, S. and Beven, K.J. (2004) Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic. *J. Hydrology*, 292, 153–172.
- Blazkova, S., Beven, K., Tacheci, P., and Kulasova, A. (2002) Testing the distributed water table predictions of TOPMODEL (allowing for uncertainty in model calibration): the death of TOPMODEL? *Water Resources Research*, 38(11), W01257, 10.1029/2001WR000912.
- Calver, A., Lamb, R., and Morris, S.E. (1999) River flood frequency estimation using continuous runoff modelling. *Proc. Instn. Civ. Engrs., Water, Maritime, Energy*, 136, 225–234.
- Cameron, D., Beven, K.J., Tawn, J., Blazkova, S., and Naden, P. (1999) Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty). *J. Hydrology*, 219, 169–187.
- Cameron, D., Beven, K., and Naden, P. (2000) Flood frequency estimation under climate change (with uncertainty). *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(3), 393–405.
- Cameron, D., Beven, K.J., and Tawn, J. (2001) Modelling extreme rainfalls using a modified random pulse Bartlett-Lewis stochastic rainfall model (with uncertainty). *Adv. Water Resour.*, 24, 203–211.
- Cameron, D. (2006) An application of the UKCIP02 climate change scenarios to flood estimation by continuous simulation for a gauged catchment in the northeast of Scotland, UK (with uncertainty). *J. Hydrol.*, 328 (1), 212–226.
- Hosking, J.R.M. (1997) Fortran routines for use with the method of L-moments, Version 3.02. IBM Res. Rep. RC 20525 (90933), IBM Research Division, Almaden.
- Hosking, J.R.M. and Wallis, J.R. (1997) *Regional Frequency Analysis*. Cambridge University Press, 224 p.
- Sobota, J. (2000) Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní. Zpráva výzkumného úkolu. Datová příloha. VÚV TGM.

Ing. Šárka Blažková, DrSc.

VÚV TGM, v.v.i., Praha

Sarka_Blazkova@vuv.cz

Příspěvek prošel lektorským řízením.

Research into theoretical flood hydrographs for the Skalka dam with a long average return period (Blazkova, S.)

Key words

floods with long return periods – safety of dams – frequency TOPMODEL – limits of acceptability in GLUE

The contribution deals with theoretical flood waves (peak, volume, shape of hydrograph) on the example of the Skalka dam (catchment about 600 km², most of it lying in Germany on Eger – Ohře and Roeslau – Reslava). The research has been done for events with the probability corresponding to 10 thousand years return period. For this series of precipitation, temperature, runoff and snow water equivalent of the length of 100 thousand years have been modelled in hourly timestep. The computation was carried out within the framework of the new generation of Prof. Keith Beven's Generalised Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE).



VODOHOSPODÁŘSKÉ
TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

Water Management Technical and Economical Information

Odborný dvouměsíčník specializovaný na výzkum v oblasti
vodního hospodářství

Redakční rada: RNDr. D. Baudišová, Ph.D., Ing. Š. Blažková, DrSc.,
Ing. P. Bouška, Ph.D., prof. Ing. A. Grünwald, CSc., doc. Ing. A. Havlík, CSc.,
prof. Ing. P. Pitter, DrSc., prof. RNDr. A. Sládečková, CSc.,
prof. Ing. J. Zezulák, DrSc.

Ročník 55

ISSN 0322 - 8916
MK ČR 6365



Výzkumný ústav vodohospodářský
T. G. Masaryka, v.v.i.
Podbabská 30
160 00 Praha 6
IČO 00020711

Kontakt: Mgr. S. Garciova
tel.: 220 197 282, e-mail: garciova@vuv.cz