

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí
Katedra biotechnických úprav krajiny
Obor: Úpravy vodního režimu krajiny



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta životního
prostředí**

Studie vodního režimu malého povodí
Study of a small catchment water regime

DISERTAČNÍ PRÁCE

Doktorand: **Mgr. Tereza Bažatová**

Školitel: **prof. Ing. Pavel Kovář, DrSc.**

2016

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracovala samostatně, pod vedením prof. Ing. Pavla Kováře, DrSc. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala“.

Mgr. Tereza Bažatová

V Londýně dne 14.8. 2016

Poděkování

Tímto bych chtěla velmi poděkovat prof. Ing. Pavlu Kováři, DrSc. za odborné vedení během celého studia, za cenné rady, trpělivost, ochotu, vstřícnost a čas 😊 Dále mé díky patří rodině, příteli, kamarádům a kolegům za podporu a dodávání kuráže.

Abstrakt

Disertační práce *Studie vodního režimu malého povodí* je souborem čtyř studií publikovaných nebo přijatých k publikaci ve vědeckých časopisech s různým IF (*impact factor*). Tematicky se práce věnuje problematice vodního režimu za pomoci využití hydrologického modelování.

První část práce rešeršní formou pokrývá téma srážko-odtokového (s-o) procesu, což je velmi složitý mechanismus, který závisí na mnoha faktorech. Jednotlivé fáze s-o procesu jsou ve všech fyzickogeografických podmínkách podobné, význam dílčích faktorů je však rozdílný. Rozdílnosti podstatně ovlivňují výběr, počet a pořadí důležitosti parametrů volitelných pro sestavení vztahu mezi srážkou a odtokem. Dále disertační práce představuje srážko-odtokové modelování jako velmi účinný nástroj simulace chování vody v krajině za různých podmínek. Tato kapitola popisuje vznik disciplíny, současný trend a stav. Jelikož s-o modely se liší svým využitím a postupy řešení, je stručně popsána i klasifikace s-o modelů s důrazem na charakteristiku modelů, které byly použity pro tuto práci.

Druhá část práce se podrobně věnuje konkrétním studiím odtokových režimů, jež jsou logicky provázány. Je rozdělena do čtyř podkapitol, kde jsou představeny dílčí výstupy. V práci je využita široká škála hydrologických modelů – jedná se o modely HEC-RAS, HEC-HMS, KINFIL, BILAN, WBCM a SRH-2D. Antropogenní změny a vliv člověka na odtokový režim jsou demonstrovány na několika malých povodí v České republice. Jedná se o povodí, kde je vliv člověka více než patrný (vybraná povodí: Jindřichovický potok, Lomnice, Radovesická a Loketská výsypka, jezero Chabařovice). Výsledky studií potvrzují komplexní využití hydrologického modelování pro řešení této problematiky.

Klíčová slova: srážko-odtokový proces, antropogenní vliv, vodní režim, hydrologické modelování

Abstract

This dissertation thesis, *Study of a small catchment water regime*, is a compilation of four studies published (or accepted to be published) in scientific journals of varying impact factors. Thematically, the thesis focuses on the question of water regimes with regards to hydrological modelling.

The first part explores the rainfall-runoff relationship via a detailed literature search. The rainfall-runoff relationship is an extremely complex mechanism that depends on many factors; although individual stages of this process are always similar regardless of different geophysical conditions, the significance of individual factors can vary. When we attempt to determine the exact nature of a given rainfall-runoff relationship, these differences play a major role in terms of selection, quantity and relative significance of optional parameters. The thesis also presents the rainfall-runoff modelling as a very powerful tool for hydrological simulations for various environments. This chapter explains the origins of this field of study, as well as its current state and modern trends. Due to the fact that the rainfall-runoff models vary in their possible uses and structures of their solutions, the thesis also briefly explores a classification of these models (with particular focus on those models that were used in this thesis).

The second part of the thesis focuses on the individual studies of runoff regimes; there are overlaps and ties between these studies. This part is divided into four subchapters, each presenting a given set of results. The thesis incorporates a wide variety of hydrologic models, specifically the HEC-RAS, HEC-HMS, KINFIL, BILAN, WBCM and SRH-2D models. Anthropogenic modifications and the human impact on runoff regimes are demonstrated on several small water catchments in the Czech Republic. These particular water catchments (the Jindrichovicky brook, the Lomnice catchment, the Radovesicka and Loketska dump catchments and the Chabarovice lake catchment) have all been impacted quite noticeably. The results of the studies confirm the complexity of possible uses of hydrological modelling in solving these issues.

Keywords: rainfall-runoff relationship, anthropogenic modification, water system, hydrologic mode

Obsah

1 Úvod.....	7
2 Srážko-odtokový proces	8
2.1 Faktory ovlivňující odtok.....	12
2.1.1 Klimatické faktory.....	13
2.1.2 Fyzickogeografické faktory.....	15
2.1.3 Atropogenní faktory	20
3 Hydrologické modely	23
3.1 Klasifikace hydrologických modelů	25
3.2 Vybrané modely (HEC-HMS, HEC-RAS, KINFIL, BILAN, WBCM, SRH-2D).....	30
4 Cíle práce	36
5 Studie	37
5.1 <i>STUDIE 1: An appraisal of the effectiveness of nature-close torrent control methods – Jindřichovický Brook case study</i>	39
5.2 <i>STUDIE 2: Changes in Runoff regime. The Lomnice catchment case study</i>	58
5.3 <i>STUDIE 3: A Comparison of Water Regimes using the Hydrological Balance of Two Dump Catchments in Dry Years in the Krusne Mountains</i>	80
5.4 <i>STUDIE 4: Hydrological regime of the Chabařovice Lake</i>	95
6 Celkové shrnutí a doporučení pro další výzkum.....	111
7 Seznam uvedených tabulek, grafů, obrázků a map.....	114
8 Použitá literatura a ostatní zdroje	115

1 Úvod

Srážko-odtokový proces je jednou z významných složek podílejících se na oběhu vody v krajině. Mechanismus tvorby odtoku je velice složitý proces, na kterém se podílí mnoho faktorů. Neopomenutelný je vliv přímé či nepřímé činnosti člověka na odtokový režim, který prokázala řada experimentálních výzkumů z různých částí světa včetně České republiky.

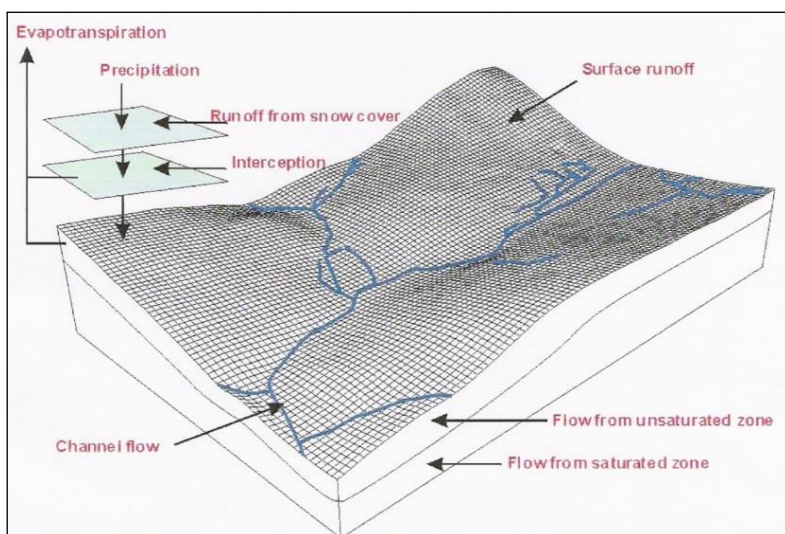
Otázka ovlivňování přírodních procesů člověkem je v současné době velmi aktuální a význam porozumění přírodním procesům vzrůstá spolu s rostoucí intenzitou antropogenního ovlivnění. Lidská společnost je odedávna limitována fyzickogeografickou sférou, ovšem člověk ji svým působením neustále upravuje a pozměňuje. Tak tomu je i v případě vodních toků a krajiny obecně. Příkladem je modifikace hydrografické sítě, změny ve struktuře a charakteru krajinného pokryvu, rostoucí urbanizace krajiny, tvorba umělých nádrží. Význam vlivu antropogenních zásahů do prostředí vodních toků a údolní nivy se zcela jistě projevil při extrémních hydrologických situacích ve 20. a 21. století, ať už ve formě povodní či naopak při hydrologickém suchu, a proto se tato problematika dostala do popředí zájmů četné skupiny odborníků.

Velmi účinným a komplexním nástrojem simulace chování vody v krajině za různých podmínek je hydrologické modelování. Začátek historie hydrologického modelování spadá do 40.-50. let 20. století. Využívání a vývoj matematických modelů stále roste, jelikož roste potřeba nacházet nové technologie, které by napomohly lepší predikci, analýze i hodnocení větších srážkových epizod či naopak sucha. S-o modely zahrnují širokou oblast využití. Do dnešní doby byla vyvinuta řada modelů, které využívají různé postupy řešení. Potřeba nalezení přesných modelů ke konkrétním vodohospodářským situacím si vyžádala klasifikaci s-o modelů.

2 Srážko-odtokový proces

Srážko-odtokový proces, nebo-li přeměna srážek na odtok, je předmětem zájmu značného počtu světových hydrologů. Nedílnou součástí tohoto procesu je odtok vody z krajiny, což je komplikovaný mechanismus, který podléhá mnohým přírodním zákonitostem (Blažková 1993). Jednotlivé fáze s-o procesu jsou ve všech fyzikogeografických podmínkách podobné, význam dílčích faktorů je však rozdílný. Rozdílnosti podstatně ovlivňují výběr, počet a pořadí důležitosti parametrů volitelných pro sestavení vztahu mezi srážkou a odtokem.

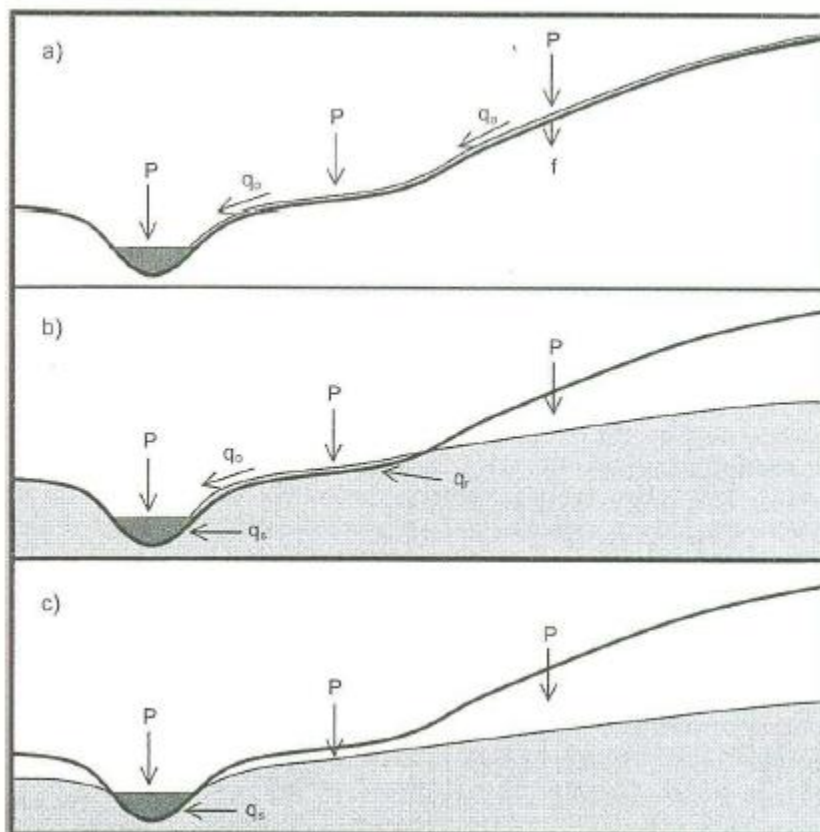
Prvním krokem tvorby odtoku ze srážek je intercepce, tzn. že část spadlých srážek je nejprve zachycena a akumulována na povrchu vegetace, kde zůstávají a nedopadají na povrch. Na vlastním povrchovém odtoku se však nepodílí všechny spadlé srážky. Kromě intercepce hraje významnou roli retence v mikrodepresích zemského povrchu (tzv. detence) či evaporace a transpirace, které též nepřispívají k odtoku. Efektivní srážky jsou tedy srážky, které vytvářejí povrchový odtok.



Obr.č.1: Obecná struktura srážko-odtokového modelu (Jeníček 2007b)

Většina srážek je infiltrována do půdy. Infiltrace příčinného deště probíhá v nenasyceném půdním prostředí a její velikost i časový průběh výrazně ovlivňují proces povrchového odtoku (Kovář 1990). Srážky nejprve infiltrují do půdy tzv. preferenčními cestami, což jsou drobné struktury narušení půdní kompaktnosti, které umožňují snadnější a rychlejší proudění vody do půdy. Při větší intenzitě deště dochází zároveň k infiltraci do

půdy. V půdě se voda gravitačně pohybuje do hlubších horizontů až k hladině podzemní vody (Daňhelka 2007). V okamžiku, kdy intenzita deště překročí infiltrační či retenční kapacitu půdy, přebývající dešť se začne hromadit a vyplňuje deprese na povrchu terénu. Po překročení infiltrační kapacity, rychlosti nebo v případě, že srážka dopadá na nepropustný povrch je generován povrchový odtok (*surface runoff*). Vznik povrchového odtoku podléhá třem základním teoriím. Překročením infiltrační rychlosti (*infiltration excess*) vzniká nejznámější koncepce povrchového odtoku tzv. hortonovský odtok. Překročením retenční kapacity (*saturation excess*) vzniká tzv. dunneho odtok. Základní rozdíl mezi hortonovským a dunneho odtokem je, že při hortonovském odtoku se půda nasycuje srážkami shora, zatímco při „*saturation excess*“ podpovrchovou vodou zdola. Ovšem např. Naef 2002 míní pod pojmem hortonovský odtok jak vznik odtoku po překročení infiltrační kapacity, tak i povrchové retence. Třetí teorie uvažuje opětovnou „exfiltraci“ vody (*return flow*) v nižších částech svahu, kdy se již jednou infiltrovaná voda vrací zpět na povrch a dále odtéká povrchově (Beven 2006). Všechny tři situace názorně ilustruje obr. č. 2.



Obr. č.2: Vznik povrchového odtoku, a) *infiltration excess*, b) *saturation excess*, c) *return flow*; P – srážky, q_o – povrchový odtok, q_r – vratný odtok, q_s – podpovrchový odtok (Beven, 2006)

Odtok vody z povodí lze dělit na povrchový a podpovrchový odtok. Do uzávěrového profilu povodí se voda dostává oběma způsoby (Šulcová 2008). Rozlišuje se povodí povrchových vod, které je ohraničeno orografickou rozvodnicí a povodí podpovrchových vod ohraničené rozvodnicí hydrogeologickou (Hrádek, Kuřík 2002). Režim odtoku je analyzován z hledisek svých složek – přímého a základního odtoku, které se liší svou genezí. Přímá složka odtoku je odezvou na srážku nebo tání, zatímco základní složka je výslednicí dlouhodobé redistribuce podzemních vod (Kulhavý, Kovář 2000). Povrchový odtok je tedy odtok přímý a tvoří tzv. rychlou část odtoku. Podpovrchový odtok je dělen na hypodermický a podzemní. Hypodermický odtok zahrnuje složku rychlou a zpožděnou podle rychlosti nasycení půdního profilu způsobené intenzitou srážek. Podzemní odtok spolu se zpožděnou složkou hypodermického odtoku tvoří základní odtok. V podpovrchové nenasycené půdní zóně aerace dochází k hypodermickému odtoku (*interflow*), který vzniká prouděním v mikro a makropórech. V zóně aerace dochází k infiltraci a na svazích k laterálnímu proudění infiltrované vody. Hypodermický odtok nastane v situaci, kdy do půdy infiltrovaná voda stéká po mělce uložené a málo propustné vrstvě a vyvěrá opět na povrch (Janeček et al. 2002). Spolu s povrchovým odtokem tvoří rychlá část *interflow* přímý odtok (*direct runoff*), který se formuje zpočátku deště (Beven 2006). Podle Daňhelky (2007) (u propustných povrchů povodí) představuje hypodermický odtok největší složku odtoku při intenzivních srážkových událostech.

Během trvajících dešť postupně dochází vlivem retenčního účinku terénu ke zvyšování akumulace vody na povrchu povodí. Retence v korytech stoupá až do okamžiku maxima odtoku. Po dosažení kulminace pokračuje odtok z povrchové i korytové říční retence až do vyčerpání zásob, přičemž dochází ke kulminaci podpovrchového odtoku (Beven 2006). Součástí podpovrchového odtoku je podzemní odtok v nasycené zóně saturace (*groundwater flow*). Tento odtok je realizován z podzemních vod, kdy perkolace (hluboká infiltrace) doplňuje zásobu podzemních vod, a může probíhat i v suchém období. Základní odtok (*base flow*) je tvořen opožděným hypodermickým odtokem a podzemním odtokem. Základní odtok není konstantní v čase, mění se s intenzitou deště a jeho průběh je spojen s procesem infiltrace (Beven 2006).

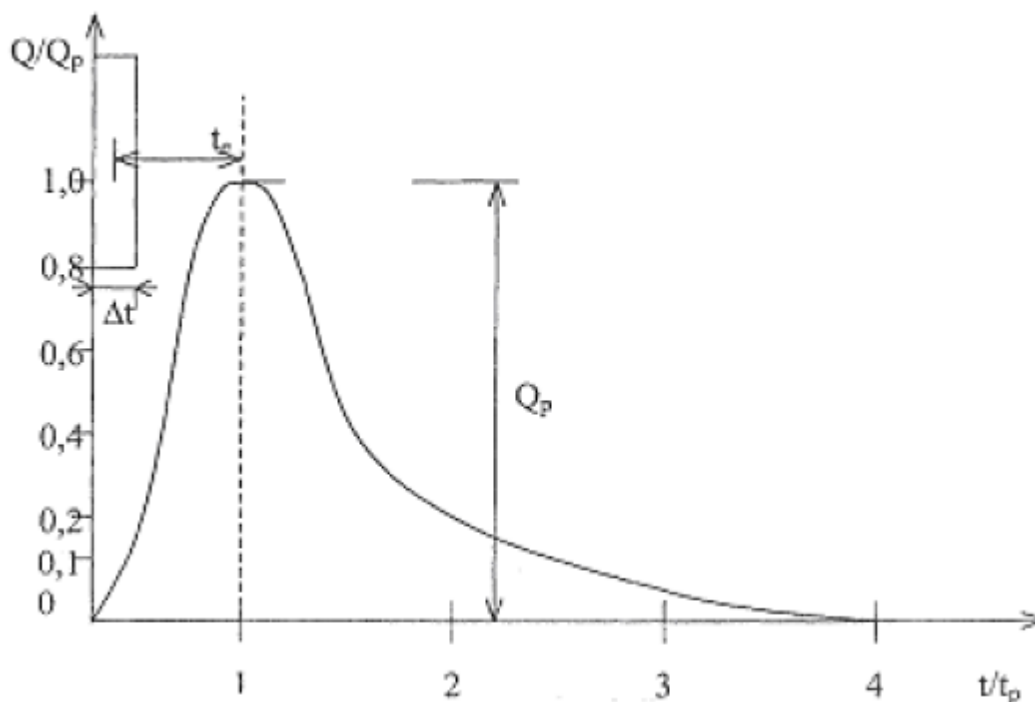
Základní teorii řešící transformaci srážky odtokem popisuje Teorie jednotkového hydrogramu, jejíž základ byl poprvé publikován v roce 1932 Shermanem (Bedient, Huber, 1989). Teorie jednotkového hydrogramu vyjadřuje princip unikátní superpozice ve formě časové rozložení odtoku z jednotky příčné srážky (Daňhelka 2007). Jednotkový

hydrogram (UH – Unit Hydrograph) je unikátní pro každé povodí, což je dáno spolupůsobením fyzicko-geografických faktorů v odtokovém procesu.

Teorie jednotkového hydrogramu v různých modifikacích a ve spojení s dalšími hydrologickými postupy je jednou z nejužívanějších metod pro určení povodňového odtoku. Metoda jednotkového hydrogramu patří mezi metody, ve kterých se povodí schematizuje na systém popsany transformační funkcí. Ta zprostředkuje transformaci vstupu (časového průběhu srážek) na výstup (časový průběh odtoku). Jednotkový hydrogram je odezvou povodí na efektivní dešť jednotkového objemu. Jedná se o průtokovou vlnu přímého odtoku v závěrovém profilu, která je způsobená jednotkovou srážkou s jednotkovým objemem (Blažková 1993). Matematicky je tato metoda vyjádřena Konvolučním integrálem, který se v diskrétní formě blíží k sumaci přírůstků. Je základem řady matematických modelů, známých jako „black box“.

Teorie UH podléhá několika kritériím (Feldman 2000):

- **Princip linearity** (*assumption of linearity*) – přímý odtok v určitém časovém intervalu je přímo úměrný odpovídající vstupní příčinné srážce.
- **Princip časové invariance** (*assumption of time-invariance*) – velikost přímého odtoku není závislá na době výskytu srážky, která způsobila odtok.
- Příčinná srážka je s konstantní intenzitou uniformně prostorově distribuována během daného časového intervalu.
- Příčinná srážka určitého trvání způsobí vždy stejně dlouhou odtokovou odezvu neohledě na intenzitu srážky.
- **Princip superpozice** – průtoky způsobené po sobě následujícími dešti mohou být vypočteny sečtením průtoků vyvolaných jednotlivými dešti, s uvážením časů jejich výskytu (Blažková 1993).



Obr.č. 3: Bezrozměrný jednotkový hydrogram (Kovář 2010)

2.1 Faktory ovlivňující odtok (klimatické, fyzickogeografické a antropogenní)

Odtok z krajiny ovlivňují různé faktory, které se uplatňují za konkrétní situace a za konkrétních podmínek, a tak je celkově složité vybrat z nich ty nejdůležitější.

Obecně můžeme činitele, které ovlivňují odtokový proces, rozdělit na předběžné a příčinné. Předběžné charakterizují stav podmínek před výskytem příčinného deště jako např. nasycenost půdy, teplota vzduchu, vlhkost ovzduší atd. Příčinnými parametry jsou srážky, resp. jejich velikost, doba trvání a intenzita (Hladný 2008; Matějčík, Hladný 1999; Langhammer 2009).

Perlman (2005) rozděluje faktory ovlivňující odtok do tří kategorií: meteorologické (druh srážky, její intenzita, velikost, délka trvání a ostatní meteorologické a klimatické prvky), fyzickogeografické (velikost, tvar a sklon povodí, nadmožská výška, délka toku, typ půd, hydraulické parametry aj.) a antropogenní (např. zástavba, změny land use, antropogenní úpravy v korytech a nivách řek). Netopil (1984) zdůrazňuje tyto faktory ovlivňující odtok: fyzickogeografické poměry povodí (poloha každého povodí – hydrografická poloha, tzn. poloha vůči ostatním povodím, vlastnosti reliéfu – výškové, sklonové poměry), klimatické poměry, vliv půdy, vliv vegetace a samozřejmě

neopominutelný vliv člověka. Souhrnně mezi nejvýznamnější faktory patří podle Hrádka (1990):

- Faktory klimatické (srážky, evapotranspirace);
- Orografické poměry povodí (výškové a sklonové poměry);
- Geologické a půdní poměry povodí;
- Vegetační kryt a způsob využívání krajiny v povodí;
- Akumulace vody v povrchových depresích, nádržích, bažinách;
- Antropogenní činnost v povodí.

Rozdělení atmosférických srážek spadlých na zem na jednotlivé funkční složky a vsakování vody z povrchu do země záleží na 4 hlavních činitelích (Hynie, 1961):

- a. na vlivech podnebních
- b. na tvárnosti zemského povrchu
- c. na rostlinném porostu
- d. na geologickém složení a utváření reliéfu

Na vytváření odtoku má vliv více činitelů, Čermák (1968) ve své studii uvádí celkem 11 faktorů: velikost povodí, tvar povodí, sklon povodí, průměrná nadmořská výška, délka toku, vegetace (především lesnatost), retenční prostory, průměrný roční úhrn srážek, průměrný součinitel odtoku (zastupuje propustnost půd), hydraulické parametry (součinitel tvaru povodňové vlny, střední nebo maximální rychlost toku).

V našich podmínkách jsou převládajícím zdrojem povrchového odtoku atmosférické srážky (déšť a sníh). Jejich množství, plošné a časové rozdělení předurčuje i režim našich toků.

2.1.1 Klimatické faktory

V přírodním prostředí České republiky jsou hlavním zdrojem vody atmosférické srážky. Lze je považovat za nejdůležitější klimatický faktor, který ovlivňuje velikost odtoku a jeho rozložení v čase. Závislost odtoku na srážkách je vázána na druh srážky, její intenzitu, velikost, dobu trvání a na její časové a prostorové rozložení.

Významný vliv na odtokový proces má směr postupu srážkového jádra. Postupuje-li ve směru toku, vznikají nebezpečnější situace, neboť dochází k postupnému nasycení povodí (Němečková 2005). V České republice nejvíce srážek přichází západním prouděním, proto

např. v roce 2002 byla povodeň rozsáhlejší na Berounce než na Sázavě, kde srážky postupovaly proti směru toku.

Deště o největších intenzitách se u nás vyskytují převážně v letním období a jsou schopny vytvořit katastrofální povodně hlavně na tocích, které tvoří malá povodí. Krátkodobé intenzivní srážky se v povodňovém hydrogramu projevují rychlým nárůstem průtoku a pak jeho rychlým návratem na původní hodnoty základního odtoku. Tato srážka ale zpravidla nedoplní zásoby podzemní vody. Naopak méně intenzivní srážky se projevují pozvolnějším nárůstem vodních stavů a dosažení kulminačního průtoku trvá delší dobu. Zde má hlavní vliv na velikost odtoku délka trvání srážky a nasycenost povodí. Pokud spadne srážka s velkým objemem do povodí saturovaného vodou z předchozích dešťů, kulminační průtok dosahuje mnohonásobně vyšších hodnot. Tyto déletrvající regionální deště se v našich zeměpisných šířkách vyskytují nejčastěji v létě a na podzim a mohou způsobit rozvodnění celého říčního systému větších toků (Kemel 1980).

V zimním období se srážky zpravidla akumulují v podobě sněhu, který pokrývá povrch povodí a neúčastní se odtoku. Vodní toky jsou dotovány převážně ze zásob podzemních vod. Na průběh vodnosti v zimním a jarním období s dostatkem sněhu má zásadní vliv časový průběh teplot vzduchu. Tání sněhu a spontánnost povrchového odtoku může být značně zvýrazněna vypadáváním relativně teplého deště do sněhové pokrývky (Královec 2006). Teplotní stratifikace v tomto období, příslušející různým nadmořským výškám, způsobuje dřívější tání v níže položených povodích, kde poté pozorujeme vyšší hodnoty specifického odtoku než za normálních okolností.

Dalším faktorem, který zásadně ovlivňuje proces odtoku a jeho velikost, je výpar. Výpar je přímým důsledkem rozdílu napětí vodních par vypařující se vody a přilehlého ovzduší. Závisí tedy bezprostředně na vlhkosti vzduchu, která bývá nejčastěji vyjadřována sytostním doplňkem. Výpar je v přímé závislosti s teplotou vzduchu. Všeobecně se dá říci, že s růstem nadmořské výšky vzrůstá srážkový úhrn a klesá (v důsledku poklesu teploty vzduchu) i velikost výparu. Znamená to, že se vzrůstem nadmořské výšky budeme za normálních okolností pozorovat zákonitý vzrůst odtoku.

2.1.2 Fyzickogeografické faktory

Fyzickogeografické faktory jsou rozhodujícím činitelem při časové i prostorové distribuci srážek spadlých v daném povodí a při jejich přeměně na určitou formu odtoku. Mezi nejdůležitější činitele patří vlastnosti povodí, vliv reliéfu, geologické a půdní poměry a vegetační kryt. Tyto faktory jsou určující pro to, jaký podíl srážek odteče po povrchu nebo bude infiltrovat do půdy, a jak rychle se voda dostane do koryt vodních toků nebo bude plnit zásoby podzemních vod.

Podrobněji se analýzou chování odtoku a jeho následné odezvy na příčinnou srážku zabýval v první polovině 20. století americký hydrolog R. E. Horton. Po mnoho let byla jeho infiltrační teorie (nebo teorie povrchového odtoku) vysvětlením projevů odtoku v krajině. Nicméně postupem doby, s vývojem dalších zkoumání a poznání, byly nad jeho teorií vzneseny pochybnosti a došlo se k závěrům, že tento model je použitelný jen za specifických okolností. V roce 1967 přišel Hewlett s modelem proměnlivých zdrojových ploch – variable source areas. Tento model souvisí s nasycováním půdních vrstev vodou a poskytuje přesnější reprezentaci odtokového procesu v širších podmínkách. Touto problematikou se dále zabývají např. Hlavčová 2001, Asce 2003, Stomph 2002, Cantón 2001 a Laganathan 1989.

Charakteristika	Hortonovský povrchový odtok	Nasycený povrchový odtok
Srážky	silně závislý na intenzitě srážky	více závislý na trvání srážky
Infiltrace	důležitost infiltrační kapacity povrchu	důležitost propustnosti hlubších půdních horizontů
Časové rozmístění	začíná brzy po začátku deště, když je jeho intenzita dostatečně velká	začíná pouze, pokud je půda nasycena vodou
Prostorové rozmístění	semiaridní oblasti s řídkou vegetací a mělkými půdami; výskyt na celé ploše povodí	humidní oblasti s hustou vegetací a dobře vyvinutými půdami; omezen jen na oblasti s vodou nasycenou půdou
Změny na svahu	lineární nárůst odtoku dolů po svahu	složitější změny odtoku na svazích

Obr. č. 4: Srovnání vlastností Hortonovského povrchového odtoku a nasyceného povrchového odtoku (Fluviální geomorfologie 2003)

Některé z fyzicko-geografických činitelů odtoku jsou neměnné (geologické poměry, reliéf), jiné faktory naopak mohou být více či méně měněny lidskou činností, což se podle druhu a velikosti změny projeví i v odtoku vody (vegetace).

Vlastnosti povodí

Mezi vlastnosti povodí ovlivňující odtok patří velikost, tvar povodí a hustota říční sítě. Velikost a tvar povodí jsou charakteristiky, které rozhodují o čase potřebném k tomu, aby voda z různých dílčích ploch povodí dotekla do závěrového profilu. Povodí, která jsou úzká a protáhlá, mají obecně nižší parametry kulminací odtoku ve srovnání s vějířovitými povodími stejné velikosti. Je to dané tím, že u nich existuje delší doba odtoku vody z nejbudálenějších částí povodí do závěrového profilu, tj. doba koncentrace (Kemel 1980).

Je logické, že se zvětšující plochou povodí bude růst doba koncentrace. Vinou delšího zdržení srážkové vody v povodí dochází k tomu, že voda má možnost po delší dobu infiltrovat do půdy a vypařovat se. To má za následek, že s rostoucí velikostí povodí se bude snižovat specifický odtok (runoff efficiency) (Dub 1969). Z toho vyplývá, že velikost povodí je přímo závislá na době koncentrace, ale nepřímá závislá na specifickém odtoku (Kemel 1980). Hustota říční sítě je proměnlivý faktor, který vyjadřuje podíl úhrnné délky toku a plochy povodí. V oblastech s větší sklonitostí a vyššími srážkovými úhrny (za jinak stejných podmínek) vzniká erozní činností členitější terén s podélnými rýhami, kterými buď permanentně nebo občas protéká srážková voda. V těchto oblastech je tedy zpravidla větší hustota říční sítě a oblast je lépe povrchově odvodňována. Malá hustota říční sítě je nepřímým ukazatelem určitých geologických a půdních poměrů (dále malá hustota říční sítě poukazuje na srážkovou dotaci oblasti). Svědčí to o propustnějším území, ve kterém srážková voda lehce infiltruje a povrchový odtok není tak výrazný (Kemel 1980).

Vliv reliéfu

Z vlastností reliéfu je jednou z nejdůležitějších sklonitost. Čím je sklon území větší, tím jsou rychlosti stékání vyšší a možnost vsaku menší. V místech, kde je reliéf terénu plošší, voda zůstává po určitou dobu v prohlubních a může se značnou měrou uplatnit vsak i výpar. Kromě sklonitostních poměrů hraje v procesu odtoku vody z povodí velkou roli i horizontální a vertikální členitost povodí. Pokud nejsou strmé a delší svahy chráněny odolným vegetačním pokryvem, způsobí tangenciální napětí proudící vody rozrušování a odnos horních vrstev půdy (plošnou a rýhovou erozi).

Vliv uvedených vlastností reliéfu povodí na odtok vody nemusí být vždy jednoznačný v tom smyslu, že na hustěji rozčleněném a sklonitějším povrchu musí být větší a rychlejší odtok. V horských oblastech bývá jeho velikost i rychlost daleko více

ovlivňována drsností povrchu svahů, výskytem drobných depresí, ve kterých se může voda akumulovat. Pokud nejsou strmé svahy pokryty vegetací, stékající voda v horách má značnou rychlost (Kemel 1980).

K intenzivnímu vsakování vody do podzemí přispívá i humus a lesní hrabanka, které mají v místech s vyšší vlhkostí a propustností větší schopnost vodu rychle převádět pod zemský povrch. Takové svahy mají i vysokou akumulaci a retenční schopnost. Naopak na svazích s hladkým povrchem bez četnějších depresí dochází k velkému povrchovému odtoku i na plochách zalesněných.

V České republice přibývá ve zvětralinovém plášti s rostoucí nadmořskou výškou hrubých úlomků a suti, které spolu s balvanovými moři pokrývají z velké části svahy nejvyšších horských pásem. Značný průměrný odtok v našich horách nesouvisí s velikostí povrchového odtoku, ale spíše s vyšším podílem podzemních vod, které se při intenzivnějších a častějších srážkách neustále obnovují (Netopil 1984).

Geologické a půdní poměry

Geologické poměry mohou ovlivňovat infiltraci vody pod zemský povrch. Míra jejich účinku závisí na stupni propustnosti a pórovitosti horninového podloží. Toky odvodňující povodí složená z nepropustných vrstev se vyznačují zvýšenou extremitou odtoku a nízkou zásobou podzemní vody. Značně vyrovnanější charakter odtoku existuje v povodích propustných, kde bohaté zásoby podzemních vod jsou významným regulátorem odtoku.

S charakterem geologického podloží úzce souvisí i půdní poměry, jež rozhodují o možnosti vsaku vody a tím o velikosti a rozložení odtoku. Intenzita vsaku vody do půdy závisí na jejich fyzikálních vlastnostech. S množstvím nekapilárních pórů intenzita vsaku roste. Změna struktury půdy vyvolává změnu intenzity vsaku a zákonitostí pohybu vody v půdě. V místech, kde je povodí tvořeno propustnými půdami, se srážková voda vsakuje do nižších horizontů, obohacuje zásoby podzemních vod, které jsou pak hlavním zdrojem vodnosti toků v uvedených oblastech. I propustné půdy se ale po zaplnění vzdušných prostor vodou stávají nepropustnými, zvláště zamrzne-li voda v pórech. Za těchto podmínek mohou vznikat velmi nebezpečné a extrémní odtokové situace (Kemel 1980).

Srážko-odtokový vztah postihuje i tzv. „metoda čísel odtokových křivek – CN“, kterou zavedla Služba na ochranu půdy (SCS) v USA. Jedná se o jednoduchý model, jež se používá pro výpočet charakteristik povrchového (resp. přímého) odtoku způsobeného

přívalovým deštěm z povodí o ploše od 5 do 10 km². Metoda CN křivek je použitelná k posuzování vlivu způsobu využívání povodí, protierozních opatření a dalších změn na velikost povrchového odtoku a k navrhování a posuzování technických protierozních opatření. Metodu nelze použít pro výpočet odtoku z tání sněhu. Základním vstupem je srážkový úhrn (ovšem předpokládá se jeho homogenní rozložení po ploše povodí). Výška srážek je transformován na výšku odtoku. Hodnoty CN křivek jsou závislé na hydrologických vlastnostech půd (infiltraci, obsahu vody v půdě, vegetačním pokryvu, velikosti nepropustných ploch, retenci – resp. intercepci a povrchovou akumulaci). A proto jsou odvozeny 4 hydrologické skupiny půd (A – D). Čísla odtokových křivek CN jsou tudíž určována dle hydrologických skupin půd (na základě minimální rychlosti infiltrace vody do půdy bez pokryvu po dlouhodobém nasycení), vlhkosti půdy (na základě indexu předchozích srážek) a využití půdy (Janeček 2002, 2008).

Charakteristika hydrologických vlastností	Skupina
Půdy s vysokou rychlostí infiltrace ($> 0,12 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) i při úplném vysycení, zahrnující převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo štěrky.	A
Půdy se střední rychlostí infiltrace ($0,06 - 0,12 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité.	B
Půdy s nízkou rychlostí infiltrace ($0,02 - 0,06 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité	C
Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace ($< 0,02 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy nad téměř nepropustným podložím.	D

Obr. č. 5: Hydrologické skupiny půd (VÚMOP 2011)

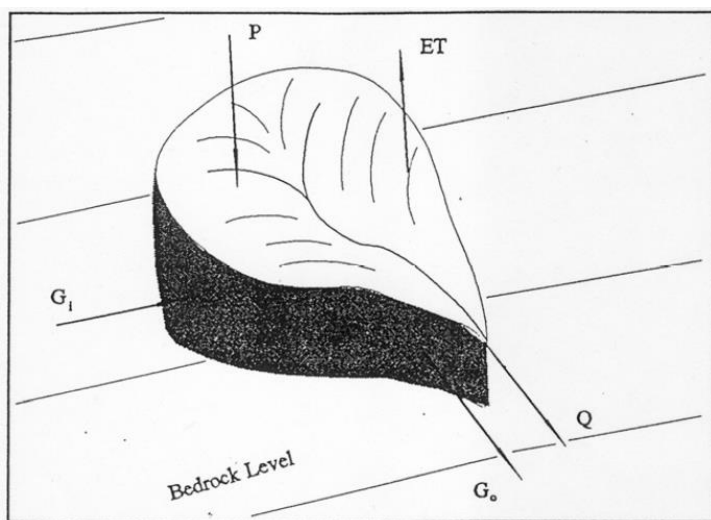
Vegetační kryt

Dalším faktorem, který bezesporu ovlivňuje srážkoodtokové procesy v povodí je vegetační kryt, a to nejen kvůli částečnému zachycení srážek, ale také kvůli časovému rozdělení odtoku. Zatímco na půdu bez vegetace působí srážky bezprostředně, rostlinný kryt odtok modifikuje (má do jisté míry tlumící vliv). Zde je potřeba zdůraznit funkci lesa. Stromy svojí korunou mohou část srážek zachytit, umožnit výpar a případně odvést vodu po kmeni přímo pod zem. Travniny a polní rostliny tuto schopnost do jisté míry postrádají. Vegetační kryt může také brzdit proudění povrchové vody, což ale závisí na hustotě a druhu rostlinných jedinců. To znamená, že se celková doba odtoku prodlužuje, a tím pádem dochází ke snížení kulminačních odtoků a splachu z povodí.

Vliv lesa na srážko-odtokový proces je předmětem mnoha výzkumů, které se provádějí na různých experimentálních povodí po celém světě. Základním činitelem srážko-odtokových procesů v lesích pro vznik odtoku jsou atmosférické srážky, jejich intenzita, doba trvání, skupenství a plošný rozsah. Ve vodní bilanci lesních ekosystémů hraje významnou roli několik procesů. Prvním procesem je intercepce, to znamená zachycení srážky vegetací. Srážky se na rostliny váží povrchovými silami, takže voda nemůže stékat ani odkapávat k půdě a podléhá výparu. Část vody je v korunách stromů zadržována jen dočasně, může odkapávat, být setřásána větrem nebo stékat po kmenech k povrchu (což také závisí na druhu vegetace).

Vegetační kryt tedy také ovlivňuje hydrologickou bilanci povodí. „Hydrologická bilance je obecně porovnání přírůstků a úbytků vody a vyhodnocení změn vodních zásob v povodí, v hydrogeologickém rajonu, v území nebo ve vodním útvaru za daný časový interval z hlediska množství a jakosti vody, které charakterizuje prostorové a časové rozdělení vody v přírodním prostředí“ (Neruda, Slavík 2004). Hydrologická bilance vyjadřuje celkovou změnu zásob vody na ploše povodí za časový interval a je vyjádřena vztahem:

$$P = ET + Q \pm \Delta S$$



Obr.č. 6: Hydrologická bilance (Serrano 1997)

Vysvětlivky: P - srážky, Q - celkový odtok, G_i - přítok podzemní vody, G_o - odtok podzemní vody, ET - evapotranspirace, ΔS - množství vody, které zvýšilo nebo snížilo zásoby povrchové a podzemní vody.

Ve vodní bilanci lesních ekosystémů se zpravidla vydělují tři základní ztrátové položky – kromě intercepce ještě evaporace (fyzikální výpar z povrchu půdy) a transpirace (fyziologický výpar dřevin a bylinné vegetace), souhrnný název – evapotranspirace (Černohous 2002). Podle Kantora (2003) je evapotranspirace dřevin ovlivňována vedle vlastních vnitřních charakteristik vegetačního krytu (strukturou dřevin, věkem, zdravotním stavem porostů) zejména nabídkou vody v půdě a povětrnostními činiteli.

Lesní půdy jsou typické kvůli uspořádání svrchních vrstev půdy a také specifickou infiltrací. Na povrchu půd se nachází hrabanka a pod ní je vrstva nahromadění humusu, tyto vrstvy se vyznačují vysokou infiltrační kapacitou pro atmosférické srážky. Celkově je v lesní půdě snazší retence srážkové vody a tvorba mělkého hypodermického odtoku vody aerační vrstvou půdy. Tento podpovrchový odtok tvoří u lesních půd významnou složku celkového odtoku z lesního povodí (Kantor 2003). Proces infiltrace je ovlivněn jednak intenzitou a časovým trváním srážek a jednak charakterem půdního prostředí (zrnitost, počáteční nasycení).

Klimatické změny i změny ve využívání pozemků a charakteru vegetace mají bezesporu vliv na hydrologickou bilanci povodí. Tento režim je možné dobře prezentovat jednotlivými komponenty hydrologické bilance. Tato bilance v časových krocích kvantifikuje hydrologický cyklus (Kovář, Křovák 2011). Existuje několik modelů hydrologické bilance. Pro stanovení hydrologické bilance pro Českou republiku používá ČHMÚ model SimBa, který hydrologickou bilanci povodí počítá v konstantním časovém kroku jeden měsíc. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí, v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí a v zóně podzemní vody (Vlnas 2011). VÚV TGM vyvíjí model hydrologické bilance BILAN ($\Delta t = 1$ měsíc, nebo 1 den), na ČZU se používá např. model WBCM-5 ($\Delta t = 1$ den).

2.1.3 Antropogenní faktory

Antropogenní vliv na odtok vody v krajině je velmi různorodý a může nabývat mnoha podob. Z tohoto hlediska je proto obtížné vyčlenit veškeré lidské aktivity, které by se na ovlivňování odtoku výrazně podílely. Při zjišťování faktorů, které hrají ve srážko-odtokovém procesu nejvýznamnější roli, se klade důraz na sledování jejich vlivu na velikost a rozložení odtoku, případně na množství unášeného materiálu a kvalitu vody. Langhammer (2004c) uvádí, že mezi tyto faktory patří zejména:

- změny ve využití území (land use), ve struktuře a kvalitě krajinného krytu (růst a vývoj vegetace);
- plošné odvodnění krajiny;
- zkrácení říční sítě;
- úpravy koryt toků;
- charakter využití údolní nivy (Langhammer 2004c).

Další neopominutelné faktory:

- krom plošného odvodnění krajiny také vliv závlah;
- hospodaření na zemědělských půdách;
- hospodaření v lesních ekosystémech.

Další rozdělení faktorů plynoucí pouze ze změn využití land-use:

- odlesnění krajiny;
- intenzivní zemědělství;
- urbanizace a industrializace krajiny;
- výstavba vodních nádrží (Královec 2006).

Konkrétnější rozdělení faktorů (Smolová 2011): ztráta retenčních schopností krajiny (např. zvyšování rozlohy zastavěných ploch); regulace odtoku (např. napřimování říční sítě, narovnání toku řek); likvidace slepých ramen toků; znečištění koryt řek; hluboká orba a zaorání (rozorání) mezí; neodborná výsadba zemědělských plodin; odlesňování.

Pro hodnocení fluvialních systémů Kopp (2003) zdůrazňuje potřebu rozlišovat vlastnosti (přírodního) fluvialního systému od vlastností získaných antropogenní změnou. Takové rozlišení je žádoucí vzhledem k potřebám revitalizačních studií (Kern 1994, Rosgen 2001, Bohn, Kershner 2002).

Úroveň	Předmět hodnocení	Přírodní stav	Antropogenní změny
		→ Cíle	→ Cíle
povodí	hydrografie povodí morfometrie pov. říční síť	potenciální přirozená eroze náchyllost k extremitě odtoku retenční schopnost	antropogenní eroze změny extremity odtoku změny retenční schopnosti
koryto	podélný profil příčné profily erozně- akumulační procesy režim splavenin	geomorfologický typ ekomorfologický typ	změny geomorfologického, resp. ekomorfologického typu

Obr. č. 7: Návrh schématu účelového hodnocení fluviálních systémů (Kopp 2003)

Vliv jednotlivých faktorů se liší podle extremity dané odtokové události, podle velikosti zasaženého území i podle geografické polohy v hlavních funkčních oblastech vývoje povrchového odtoku. Změny ve funkčním využití land use jsou spojovány především s hodnocením míry přírodního charakteru jednotlivých typů krajinného pokryvu. Vliv funkčního land use na odtokový proces je zásadní a výrazné změny v land use mohou mít při extrémních událostech významný vliv.

V současné době se setkáváme i s modely, které jsou schopné určit, do jaké míry antropogenní zásahy ovlivnily velikost a průběh povodně. Hodnocena je mimo jiné řada příkladů změn využití území (Ashagrie 2006, Ranzi 2002, Švihla 1997, Kříž 2004, Kender 2004, Uhlířová a Vrána 2005, KBÚK ČZU a jiní) ale i tak je podle O'Connell et al. (2007) stále hodnocení nedůsledné a nedokonalé, neboť modely nedokáží plně simulovat změny v krajině.

3 Hydrologické modely

Srážko-odtokové (s-o) modelování představuje velmi účinný nástroj simulace chování vody v krajině za různých podmínek, díky kterému se predikce průběhu a následků ničivých povodní stává kvalitnější.

Začátek historie hydrologického modelování spadá do 40.-50. let 20. století. V prvních letech došlo k podrobným popisům komponent hydrologického cyklu, což vyvrcholilo Shermanovou teorií jednotkového hydrogramu v roce 1932 a Hortonovým popisem infiltračního procesu v roce 1939 (Boughton, Droop, 2002). Následný rozvoj informační technologie přivedl hydrologii do nové dimenze. Hydrologické modelování umožnilo hodnotit území komplexněji a ve větším měřítku v průběhu odlišných časových intervalů. Tehdejší i současné praktické nároky na charakter hydrologických modelů spočívají v jejich uživatelské jednoduchosti, implementaci dostupných dat a zajištění vysoké míry přesnosti výstupních dat (Dawdy et al. 1972). Předními výzkumnými pracovišti, kde probíhal vývoj simulací chování povodí pomocí výpočetní techniky, byly Harvard University, Stanford University a U.S. Army Corps of Engineers. Zlomem bylo vytvoření prvního dostupného hydrologického simulačního programu The Stanford Watershed Model, který položil základ dnešním matematickým simulačním modelům hydrologických jevů (Bedient, Huber 1989).

Využívání a vývoj matematických modelů stále roste, jelikož roste potřeba nacházet nové technologie, které by napomohly lepší predikci, analýze i hodnocení větších srážkových epizod.

Matematický model hydrologického procesu vyjadřuje kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami. Konkrétně jde o transformaci příčinných srážek do výsledného odtoku v daném čase (Maidment, Djokic 2000). Provoz modelů v podmínkách reálných aplikací je možný za použití výpočetní procedury. Procedura představuje soustavu vzájemně souvisejících postupů, které neřeší jen hydrologické procesy. Zároveň je nezbytná pro provoz modelu v různých podmínkách a určuje využitelnost modelu. Hydrologický model oproti výpočetní proceduře popisuje definovaný proces. Matematický model numericky reprezentuje odtokový proces a tvoří nejdůležitější komponentu procedury (Daňhelka et al. 2003).

Použití s-o modelů má široký rozsah působnosti. Převážně jsou modely uplatňovány v operativní hydrologii, ve výzkumu, ale i při řešení různých návrhů a plánování ve vodním hospodářství. V konkrétné rovině jde o aplikace např. při navrhování objektů ochrany

v protipovodňové problematice, stanovení hydrologické bilance, modelování šíření znečištění ve vodních systémech, simulace průchodu povodňových průtoků v libovolné časové epizodě v různých typech krajín nebo modelování dlouhodobých předpovědí na základě klimatické změny (Taufmannová 2009).

Procedura hydrologického modelování se skládá z několika kroků. Obecně lze konstatovat, že předpovědní proces u hydrologických modelů sestává ze tří postupů. První část zahrnuje přípravu a zpracování dat, která mají být do modelu vložena. Druhou částí hydrologického modelování je vlastní zpracování hydrologické předpovědi pro časové období. Poslední stěžejní částí je interpretace výstupů pro potřeby dalších zpracování a aplikací (Daňhelka 2007). Tento postup je dodržován např. pro řízení vodohospodářských systémů, protipovodňovou ochranu, ale i pro posouzení rizika bleskových povodní na menších území apod.

S-o modely jsou tedy modely založené na matematickém základu. Obecný matematický model tedy představuje algoritmus řešení soustavy diferenciálních a algebraických rovnic, kterými je pomocí vztahů mezi proměnnými (hydrologickými) veličinami popsána struktura, nebo chování (či obojí) modelovaného systému (povodí) při fyzikálním (srážko-odtokovém) procesu (Gabriel 1982). Jestliže označíme $x(t, h)$ jako vstupní a $y(t, h)$ jako výstupní časoprostorové veličiny, pak v modelu vystoupí vedle proměnných, jejich derivace v čase a poloze, ale také vnitřní proměnné modelovaného systému, které charakterizují jeho strukturu. Matematický model celistvého systému, tj. systémů, kde zanedbáváme prostorovou závislost veličin a uvažujeme pouze závislost časovou, můžeme obecně popsat následující rovnicí (Kovář 1990). Protože většinu diferenciálních rovnic v hydraulice nelze integrovat, je tento numerický princip základem pro různé metodiky včetně složitějších, nejen explicitních, ale i implicitních.

$$f(x(t), y(t), \frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \dots; \Theta_1, \Theta_2, \dots) = 0$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} \quad \dots \text{can be replaced by } (x_{t+1} - x_{t-1}) / 2\Delta t$$

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (x_{t+1} - 2x_t + x_{t-1}) / \Delta t^2$$

which is the **"FINITE DIFFERENCE APPROXIMATION"**

Differential eqs. are replaced by difference eqs.:

$$f(x_t, y_t, x_{t-1}, y_{t-1}, x_{t-2}, y_{t-2}; \dots \Theta_1, \Theta_2, \dots) = 0$$

Sometimes:

$$f(x_t, y_t, x_{t-1}, y_{t-1}, x_{t-2}, y_{t-2}; \dots \Theta_1, \Theta_2, \dots) + E_t = 0$$

29.9.2011

Obr. č. 8: Matematické řešení diferenciálních rovnic převodem přes numerické úpravy do diferenčních (algebraických) rovnic (Kovář 2011)

3.1 Klasifikace hydrologických modelů

S-o modely zahrnují širokou oblast využití a do dnešní doby byla vyvinuta řada modelů, které využívají různé postupy řešení. Potřeba nalezení přesných modelů ke konkrétním vodohospodářským situacím si vyžádala přehlednou klasifikaci s-o modelů.

Klasifikace je založena na rozdělení do několika kategorií a zpřehledňuje orientaci v této problematice. Klasifikací s-o modelů se zabývala řada autorů, např. Daňhelka (2003, 2007), Buchtele (2002), Hrádek (1990), Kovář (1990) ze zahraničních např. Beven (2006), Maidment (1993) či Feldman (2000). Stěžejní publikací je klasifikace podle WMO (World Meteorological Organization) od Beckera a Serbana (1990), uvedená metodika je používána dodnes. Klasifikace uvedená v publikaci Daňhelky et al. (2003) zcela vychází z klasifikace WMO uvedené v Becker a Serban (1990) a rozděluje modely do kategorií dle:

- Účelu aplikace (purpose of model application).
- Typu simulovaného systému (type of system to be modeled)
- Typu a míry komplexnosti hydrologického procesu (hydrological proces or related variable to be considered).

- Stupně kauzality simulovaného procesu (degree of causality of the process).
- Požadovaného rozsahu časové a prostorové diskretizace (required time and space discretization).

Klasifikace dle účelu aplikace

Podle tohoto hlediska se s-o modely dělí na modely pro potřebu operativní hydrologie, kde model slouží k předpovědi odtoku vody z povodí, pro potřebu plánování ve vodním hospodářství a pro výzkum.

Klasifikace dle typu simulovaného systému

Toto kritérium je určující pro vodohospodářskou praxi. Podle typu systému jsou modely děleny na elementární a komplexní. Použití modelu znázorňuje obr.č. 9 podle WMO.

číslo	typ simulovaného systému	ID (dle WMO)
1.	Elementární prvky modelovaných systémů	
1.1	Hydrotopy	HU
1.2	Méně až středně velké odtokové plochy	SA
1.3	Zvodnělé vrstvy	AQ
1.4	Říční sítě	RR
1.5	Nádrže nebo jezera	RL
2	Komplexní systémy	
2.1	Komplexní systém říčních sítí, kanálů a nádrží	CS
2.2	Povodí nebo velké odtokové plochy	CB

Obr.č. 9: Klasifikace dle typu simulovaného systému (podle Becker, Serban v Daňhelka et al., 2003)

Klasifikace dle typu a míry komplexnosti hydrologického procesu

Rozdělení podle hydrologických procesů a parametrů uvedených v Becker a Serban (1990) uvádí obr. č. 10.

číslo	hydrologické procesy a parametry	ID (dle WMO)
1.	Půdní vlhkost a evapotranspirace	ES
2.	Objemy podzemní vody, hladina, průtok	SG
3.	Průtoky a vodní stavy v říční síti	
3.1	s časovým krokem < 1 den	QF
3.2	s časovým krokem > 1 den	QM
4.	Teplota, ledový režim	TW
5.	Splaveniny a související parametry	QS
6.	Parametry kvality vody	WQ

Obr.č. 10: Klasifikace dle hydrologických procesů a parametrů (podle Becker, Serban v Daňhelka et al., 2003)

Klasifikace dle stupně kauzality simulovaného procesu

Kauzalita je vyjádřena ve vztahu příčina – důsledek (*cause – effect*). V rámci této kategorie jsou dále základně děleny modely na deterministické a stochastické (viz obr. 12). Hydrologické procesy vždy obsahují deterministické i stochastické prvky, přesto jsou většinou modely založeny jen na jednom principu. Výstupy modelů jsou pak obvykle zatíženy chybami, které by byly vyjádřitelné stochastickými prostředky, jde-li o deterministický model a naopak. Většina hydrologických modelů jsou deterministické se stochastickými prvky (Daňhelka et al., 2003).

Deterministické modely pracují na principu příčina – důsledek, tzn. vstup určuje jednoznačný výstup, např. vstupní srážka způsobí odtokovou odezvu. Veškeré komponenty v modelu HEC-HMS zahrnují deterministický přístup. Podle obtížnosti vnitřních vazeb jsou děleny na tzv. *white-box*, *grey-box* a *black-box* modely (Becker, Serban, 1990):

- *White-box* – hydrodynamické modely, založené na základních fyzikálních zákonech
- *Grey-box* – konceptuální, reflektují základní fyzikální zákony, ale ve zjednodušené podobě a jsou obohaceny o určitý stupeň empirizmu
- *Black-box* – nezahrnují explicitně fyzikální zákony, zohledňují vztahy, které empiricky popisují příčiny a důsledky, procesy probíhající uvnitř zůstávají skryty.

Stochastické modely neuvažují vztah příčiny a důsledku. Jsou založeny na pravděpodobnostním prvku, který ovlivňuje výstup. Je-li model spuštěn několikrát za sebou a vstupní data nejsou pozměněna, výsledek se vždy bude mírně lišit právě díky měnícímu se pravděpodobnostnímu prvku. Modely lze dělit na modely pravděpodobnostní a modely pro generování časových řad (Becker, Serban, 1990):

- *Stochastic Probabilistic Models* – modely jsou charakterizovány hydrologickými funkcemi s daným pravděpodobnostním rozdělením, což ovlivňuje výstupní hodnoty.
- *Stochastic Time series generation* – modely využívají extrapolaci časových řad nebo jiných hydrologických parametrů, přičemž dochází k zachování základních statistických charakteristik.

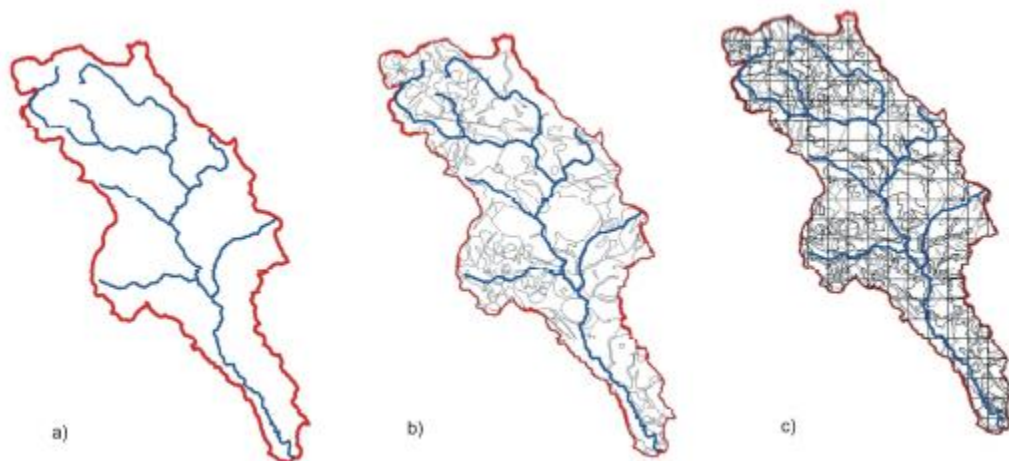
Klasifikace dle požadovaného rozsahu časové a prostorové diskretizace

Míra časové diskretizace je používána podle způsobu použití modelu. Volba časového kroku jedna hodina až jeden den je vhodná pro situace operativního charakteru, studie protipovodňové ochrany, erozních jevů, modelování šíření znečištění či posouzení

jakosti povrchových vod. Časový krok jeden týden až měsíc vyhovuje bilančním simulacím. Z hlediska délky časového intervalu rozlišujeme modely na kontinuální a epizodní (událostní). Kontinuální modely jsou častěji využívány k simulacím na větších plochách, které bývají postiženy regionálními dešti. Kontinuální modely simulují i víceletá období. Naproti tomu událostní modely jsou aplikovatelnější na menší území, která jsou náchylná k tvorbě bleskových povodní. Událostní (*event models*) mohou zanedbávat podzemní složku odtoku (Daňhelka et al., 2003). Epizodní modely lépe vystihují přívalové srážky. Událostní model je např. model HEC-HMS.

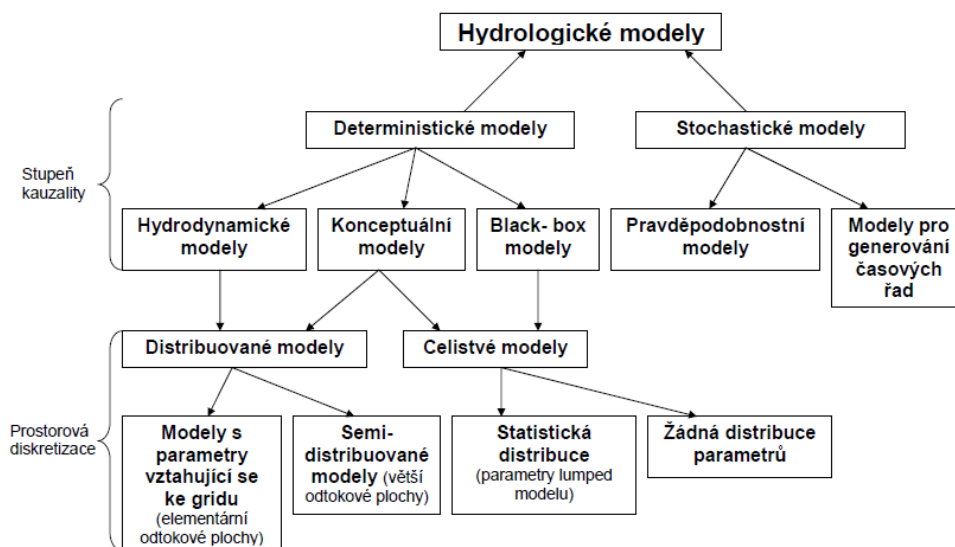
Míra prostorové diskretizace představuje technicky složitější klasifikaci, neboť dochází k dělení podle schematizace hodnoceného území (obr. 11). Na základě prostorové diskretizace rozlišujeme celistvé, semi-distribované a distribuované modely (Becker, Serban, 1990):

- *Celistvé (lumped)* – někdy označované za modely soustředěných parametrů. Zvolenému prostoru odpovídají celistvé vlastnosti pro celé povodí, není zohledněna prostorová distribuce určitých charakteristik. Modely jsou více využívány díky své jednoduchosti. Struktura je založena na fyzikální koncepci podpořené experimentálními výsledky. Může se jednat o *blackbox* či konceptuální modely. Do této kategorie patří HEC-HMS, který již však ve své nové verzi podporuje i distribuované přístupy formou gridů (např. funkce *ModClark*).
- *Semi-distribované* – princip modelu je založen na rozdělení území na menší celky na základě zvolených kritérií. Model představuje ideální kombinaci různých deterministických modelů, který lépe vystihuje parametry hydrologického systému a fyzickogeografických charakteristik, které zdatelně ovlivňují odtok.
- *Distribované* – modely člení území na síť pravidelných segmentů, především do čtvercové sítě (grid), popř. trojúhelníkové. Modelované procesy jsou pak řešeny pro každý grid samostatně. Gridy tvoří elementární odtokové plochy a jejich velikost závisí na mnoha faktorech tak, aby byla zaručena platnost řídicích rovnic. Příkladem je model AquaLog v předpovědní službě ČHMÚ.



Obr.č.11: Zjednodušené schéma odlišné reprezentace prostorových dat, a) celistvý model, b) semidistribuovaný model, c) distribuovaný model (DIBAVOD, CORINE - Land cover 2000, <http://geoportal.cenia.cz>)

Koncepční celistvé modely mají delší historii než distribuované. Často se v praxi naráží na problém neúplnosti dat pro větší území. V takových případech jsou upřednostňovány lumped modely, jelikož při přípravě vstupních dat dochází ke generalizaci. Výsledky jsou uspokojivé a použitelné. Distribuované modely přesněji vystihují chování systému, pokud mají dostatečně homogenní data, proto se využívají zejména v operativních předpovědích. Intenzita výzkumu i aplikací distribuovaných modelů vzrostla za posledních 20 let (Daňhelka et al., 2003). Rostoucí význam získávají semidistribuované modely, které umožňují zohlednit různé fyzickogeografické vlivy na odtok z povodí.



Obr.č. 12: Schéma základního dělení hydrologických modelů (upraveno podle Becker, Serban, 1990)

3.2 Vybrané modely (HEC-HMS, HEC-RAS, KINFIL, BILAN, WBCM, SRH-2D)

Tato kapitola stručně představuje modely použité pro disertační práci, a to modely rodiny HEC (HEC-HMS a HEC-RAS), dále model KINFIL, BILAN, model WBCM a SRH-2D.

HEC-RAS a HEC-HMS

Programy rodiny HEC byly vyvinuty inženýry armády Spojených států (U.S. ArmyCorps of Engineering – USACE), v jejich hydrologickém inženýrském centru (Hydrologic Engineering Center – HEC), které bylo založeno v roce 1964.

HEC-RAS

Samotná zkratka HEC-RAS pochází z anglického názvu „Hydrologic Engineering Center’s River Analysis System“. Z názvu lze již určit, co dané programy umožňují a pro jaký účel byly vyvinuty. Jedná se tedy o soubor nástrojů, které slouží k analýze hydrologických dat.

HEC-RAS je program vyvinutý pro jednorozměrný hydraulický výpočet celé říční sítě. Program obsahuje čtyři jednorozměrné říční analýzy.

1. Analýza ustáleného proudění (*Steady Flow Water Surface Profiles*)
 - Tato složka modelovaného systému je určena pro výpočet profilů povrchových vod pro ustálené proudění. Ustálené proudění je možné modelovat v bystřinném, říčním ale i smíšeném režimu proudění v říčním profilu.
2. Simulace neustáleného proudění (*Unsteady Flow Simulation*)
 - Tento nástroj simuluje neustálené proudění v síti otevřených kanálů. Tento způsob byl vyvinut z UNET (*Unsteady Network model*) (HEC USACE 2016). Primárně byl vytvořen pro výpočet říčního proudění, ale už s vydáním verze 3.1 model umí počítat se smíšeným typem proudění. Veškeré hydraulické výpočty týkající se průřezů mostů, propustků a dalších objektů na toku, které byly vyvinuty pro ustálené proudění, byly začleněny i do tohoto modelu. Mezi speciální vlastnosti tohoto nástroje patří – analýza průlomu hráze, přelití a průrva ochranných břehových hrází, čerpací stanice, provozy přehrad a proudění tlakovým potrubím (HEC USACE 2016).

3. Transport sedimentu (*Sediment transport or Movable Boundary Computations*)

- Složka transport sedimentu slouží k simulaci jednorozměrného transportu sedimentů za středně dlouhé časové období (nejčastěji rok, ale lze jej aplikovat taktéž u jednotlivých záplav). Transport sedimentu je počítán dle zrnitostních frakcí. Mezi vlastní funkce patří schopnost vymodelovat celou síť toku, narušené dno toku, různé zásahy na hrázích. Model je navržen tak, aby simuloval dlouhodobé trendy vyplavování a usazování sedimentů v korytě. Tento systém může být použit pro vyhodnocení usazování nádrží, předvídání vlivu odbahnění na rychlost usazování, odhad maximální možné čistící schopnosti toku během velkých povodní a výpočet možné sedimentace v opevněných korytech (HEC USACE 2016).

4. Analýza kvality vody (*Water Quality Analysis*)

- Slouží k posouzení kvality říční vody pomocí explicitního numerického schématu řešeného prostřednictvím jednorozměrné konvekčně-difuzní rovnice.

Výhodou programu je, že všechny zmíněné analýzy používají společná geometrická a hydrologická data. Výstupem modelu jsou X-Y grafy a reporty v podobě tabulek (Divín 2013).

HEC-HMS

HEC-HMS (nejnovější verze – 4.1) byl vytvořen tak, aby dokázal simulovat s-o procesy v rozvětvených vodních systémech. Model je použitelný v širokém spektru geografických procesů. Konkrétně umí řešit problematiku povodňové hydrologie, zásoby vody z velkých povodí, ale i odtok vody z malých či městských území. Výstupem z HEC-HMS jsou hydrogramy znázorňující průběh odtoku vody v čase v závislosti na srážkách a dalších charakteristikách povodí. Výsledné hydrogramy jsou použitelné ihned k hydrologickým analýzám nebo spolu s dalšími softwary přispívají k řešení hydrologických předpovědí, povodňových škod, regulace vody v nivě, operativních předpovědí, dostupnosti vodních zdrojů, odvodnění měst atd. (HEC USACE 2016).

Program HEC-HMS je generalizovaný modelovací systém, který je schopný hodnotit odlišná povodí a území (HEC USACE 2016).

HEC-HMS je flexibilní program, který dovoluje uživateli zvolit mezi různými přístupy výpočtu odtokové ztráty, modely základního odtoku, proudění vody v jednotlivých úsecích toků apod. tak, aby došlo k co nejpřesnějším výsledkům (Maidment, Djokic 2000).

Podle klasifikace se model řadí mezi deterministické a konceptuální modely, neboť části hydrologického procesu jsou v programu počítány matematickými vztahy. Jde o semi-distribovaný model.

Většinou je HEC-HMS používán jako událostní model, jelikož umí dobře simulovat přívalové srážky, má-li k dispozici vhodná data. Kontinuální přístup může být aplikován na metody stanovení objemu odtoku jako SMA (Soil moisture accounting), apod. (Feldman 2000).

Zpracování prostorových dat jako vstupních podkladů pro modelování v HEC-HMS probíhá v geografických informačních systémech, které dovolují export dat z GIS do HEC-HMS a následný import výsledků zpět do GIS. Software, který dobře splňuje tento požadavek je ArcGIS (resp. jeho extenze ArcHydro Tools). Pro potřeby HEC-HMS byly vyvinuty extenze HEC-GeoHMs a HEC-GeoRas (pro hydraulické modelování) (Jedlička, Štych 2006). Další software, který je možný použít pro zpracování prostorových dat je na příklad volně dostupný software SAGA GIS (<http://www.saga-gis.org/>) a QGIS (<http://www.qgis.org/en/site/>).

Struktura modelu. Pro srážko-odtokové modelování v HEC-HMS jsou modelem vyžadovány tři základní vstupní komponenty

1. parametry povodí (*Basin Model Manager*),
2. komponenta srážek (*Meteorologic Model Manager*),
3. kontrolní komponenta (*Control Specifications Manager*).

První dvě uvedené komponenty jsou silně závislé na prostorových faktorech, vstupní data jsou generována pomocí geografických informačních systémů (Maidment, Oliver 1999). Potřeba vstupních dat se odvíjí od použitého modelu výpočtu jednotlivých komponent, časového a prostorového kroku výpočtu (Jeníček 2009).

S popisem povodí a jeho vlastností pracuje Basin Model Manager. Tento model představuje fyzickou reprezentaci povodí. Basin Model Manager zahrnuje popis elementů hydrologického systému (subpovodí, charakteristiky koryt, nádrže, pramenné oblastí atd.). Model povodí je vytvořen pomocí vzájemně propojených hydrologických elementů, k nimž se vztahují metody, které určují jednotlivé složky s-o procesu. Pouze správné propojení jednotlivých elementů v povodí umožňuje modelovat odtokové události. Model zahrnuje metody stanovení objemu odtoku, přímého odtoku, základního odtoku, proudění vody v korytě a charakteristiky nádrží. V modelu je nejprve potřeba správně prostorově vytvořit

stromové schéma povodí. Postupně jsou propojovány nástroji Subbasin (dílčí povodí), Reach (úsek toku) a Junction (soutok) všechna subpovodí, čímž je odtok směřován do závěrového profilu. Zároveň můžou být do povodí implementovány nádrže.

Dobře definovat meteorologická vstupní data podle dílčích povodí je potřeba i v meteorologickém modelu (Maidment, Djokic 2000). Meteorologický model kromě analýzy srážek nabízí metody určení evapotranspirace či hodnocení tání sněhové pokrývky. Vlastní simulace je kombinací dat z meteorologického modelu a modelu povodí ve specifikovaném časovém intervalu a určeném časovém období.

V modelu kontroly neboli kontrolní specifikaci se definuje počátek, konec a časový krok simulace. Pouze správné propojení jednotlivých elementů v povodí umožňuje modelovat odtokové události.

Program HEC-HMS používá v modelu povodí k vyjádření jednotlivých složek s-o procesu čtyři základní modely (Feldman 2000):

- model přímého odtoku,
- model výpočtu objemu odtoku,
- model podzemního odtoku,
- model říčního koryta.

KINFIL

Fyzikální model KINFIL je určen k simulaci významných srážko-odtokových událostí, případně k výpočtu návrhových průtoků ovlivněných antropogenní činností (jako je změna land use, odlesnění, urbanizace, výstavba cestní sítě, technická protierozní opatření aj.) (Kulhavý, Kovář 2000, Kovář 2011). Tento model je velmi vhodný například pro výpočet charakteristik povrchového odtoku, čímž se zabývali např. Koivusalo et Karvonen (1995), Kovář (1992) a další. Výhodou modelu KINFIL je fakt, že vychází z fyzikálně-geometrických, hydraulických a klimatických charakteristik povodí, které lze při absenci přímých pozorování určit z mapových a jiných podkladů (Kovář 1992). Současná verze modelu KINFIL je založena na kombinaci teorie infiltrace a transformace přímého odtoku kinematickou vlnou. Podrobný popis modelu je uveden v práci Kováře et al. (2011), příp. Kováře et Vaššové (2011).

BILAN

Model Bilan se řadí mezi deterministické, koncepční, celistvé (lumped) modely. Byl vyvinut Výzkumným ústavem vodohospodářským T.G. Masaryka v Praze k simulaci komponentů hydrologické bilance povodí. Je využíván především k řešení dopadů klimatických změn na vodní režim krajiny a zásoby povrchové či podzemní vody (Vizina et al. 2010, Horáček et al. 2008, Šimková 2012). Pro podrobný popis modelu lze odkázat na manuál vytvořený VÚV T.G.M. v Praze (VÚV 2011).

Model simuluje denní nebo měsíční řady komponentů hydrologické bilance. Vstupními veličinami jsou srážky P (mm), odtok měřený v uzavěrovém profilu R (mm), teplota vzduchu T ($^{\circ}\text{C}$) a relativní vzdušná vlhkost H (%) v denním, příp. měsíčním kroku. K určení parametrů modelu slouží optimalizační algoritmus, který minimalizuje hodnoty zvoleného kritéria shody výstupu modelu s pozorovanými daty. Jako optimalizační kritérium se používá průměr absolutních hodnot odchylek modelovaného a pozorovaného odtoku (Vaculín et Soukalová 2003).

WBCM

Model WBCM je klasifikován jako model deterministický, koncepční, celistvý, nelineární. Jeho parametry jsou pravděpodobnostně rozděleny po ploše povodí tak, aby mohla být zachována jejich plošná variabilita. Každý kapacitní element modelu reprezentuje přirozenou zásobu vody v jednotlivých vertikálních subsystémech hydrologického profilu. Model byl navržen pro studium jednotlivých komponent hydrologické bilance v závislosti na změnách hospodářského využití povodí. Simuluje denní bilanční hodnoty ve vegetačním období – kritickém období pro vznik vláhových deficitů – a uvažuje všechny podstatné interakce mezi jednotlivými zónami, tj. vegetační, nenasycenou a nasycenou zónou. Kapacity všech zón respektují různorodost přirozených hydrologických podmínek povodí. Model ve většině zón uvažuje lineární rozdělení těchto kapacit kolem jejich průměrných hodnot. Struktura modelu respektuje fyzikální principy, podle nichž dochází k interaktivním hydrologickým procesům (evapotranspiraci, intercepci, infiltraci a tvorbě přímého a základního odtoku). Nedílnou součástí modelu je automatická optimalizace parametrů v jeho identifikační fázi (Kovář et al. 2010).

Model pracuje s denními hydrometeorologickými daty a ve vzájemné interakci řeší následující dílčí hydrologické procesy:

- potenciální evapotranspiraci,
- intercepci,
- tvorbu povrchového odtoku a jeho transformaci,
- dynamiku nenasycené zóny a skutečnou evapotranspiraci,
- dynamiku nasycené zóny a celkový odtok.

Model je podrobně popsán v literatuře (Kovář, Hrádek 1994; Kulhavý, Kovář 2000). Cílem modelu je zejména simulace dynamiky půdní vlhkosti v aktivní a nenasycené zóně, územního výparu a denních odtoků. Změny zásob podzemních vod jsou simulovány pouze koncepčně, zejména s ohledem na tvorbu základního odtoku.

SRH-2D

Model SRH-2D neboli *Sedimentation and River Hydraulics* je hydrologický model, který řeší hydraulické jevy v režimu neustáleného porudění. Tento model byl vyvinut *US Bureau of Reclamation* (SRH 2016). Model SRH-2D je srovnatelný s jinými dvoudimenzionálními modely, ale jeho předností je možnost využití flexibilní sítě výpočtových prvků a celková robustnost modelu.

Dvoudimenzionální modely jsou zvláště užitečné v situacích, kdy nelze očekávat prizmatické proudění vody v korytě, při složité fyzické struktuře řešeného území jako jsou paralelní koryta, objekty v toku, složitá interakce s inundačním územím a obecně u přirozených koryt toků. Jejich nevýhodou oproti 1D modelům je vysoká náročnost na data charakterizující terén a velká výpočetní náročnost. Výstupem programu SRH-2D je datový textový soubor, který obsahuje údaje pro všechny prvky výpočtové domény. Výstupními údaji jsou kóty hladiny vody, hloubky vod, velikosti rychlosti vody, vektory rychlosti vody, Froudova čísla a tangenciální napětí (Kovář a kol. 2012).

Zvláště důležitým výstupem 2D modelu jsou vektory rychlosti, které nám mohou zobrazit vzorce pohybu vody okolo překážek v korytě, v depresích, zákrutách a na dalších morfologických prvcích. Změny ve směřování vektorů průtoku vody tak indikují zvýšenou geomorfologickou diverzitu, která je důležitou podmínkou pro ekologickou kvalitu toku.

4 Cíle práce

Disertační práce předkládá aktuální otázky a přístupy spojené s problematikou vodního režimu malých povodí s využitím hydrologického modelování.

Cílem této práce je objasnění srážko-odtokových režimů povodí. Povodí reprezentují rozdílně využívaná území s různou mírou antropogenních zásahů do odtokového režimu.

Cíle práce lze definovat následovně:

1. Analýza vodního režimu povodí
 - především vzhledem k extremitám jako jsou povodně či sucha.
2. Výběr vhodného povodí
 - vybraná povodí: Jindřichovický potok, Lomnice, Radovesická a Loketská výsypka, jezero Chabařovice;
 - povodí s rozdílnými hydrologickými vlastnostmi;
 - z terénních měření analyzovat hydraulické půdní vlastnosti;
 - z mapových podkladů sestavit a využít GIS soubory.
3. Výběr vhodného hydrologického modelu
 - vybrané modely: HEC-RAS, HEC-HMS, KINFIL, BILAN, WBCM, SRH-2D;
 - využít statistická kritéria shody měřených a vypočtených výstupních dat (k výpočtům „goodness of fit“).
4. Navrhnout vhodná opatření ke snížení vlivu hydrologických extrémů a revitalizačních úprav.

5 Studie

Předkládaná disertační práce prezentuje soubor studií zaměřených tedy na změny vodního režimu malých povodí. V práci je využita široká škála hydrologických modelů, jedná se o modely HEC-RAS, HEC-HMS, KINFIL, BILAN, WBCM, SRH-2D. Klíčová slova, která charakterizují tuto disertační práci jsou antropogenní ovlivnění krajiny a toku, revitalizace, rekultivace. Antropogenní změny a vliv člověka na odtokový režim jsou demonstrovány na několika malých povodí v České republice. Jedná se o povodí, kde je vliv člověka více než patrný.

Studie 1. Povodí Jindřichovického potoka je situované v severozápadních Čechách v oblasti Krušnohoří. Tento potok s průměrným skolem 4% má charakter bystřiny. Jindřichovický potok byl ovlivněn především tím, že zde převládal „technický způsob hrazení bystřin“, což znemožňovalo přežití a průchod určitého typu živočichů (především se jednalo o bezobratlé). Revitalizační návrh řeší omezení bystřinné eroze při respektování zásady využití všech možností pro průchod bioty. Tento moderní postup „skluz – tůň“ splňuje revitalizační předpoklady a současně řeší transport splavenin tím, že redukuje podmínky jejich vzniku.

Studie 2. Podobu povodí jihočeské Lomnice přeměnilo především rybníkářství, zemědělství, vodní hospodářství a samozřejmě vznik a rozvoj obcí. Hustá rybníční síť je ovšem z hlediska hydrologického modelování značný problém, především díky obrovské náročnosti na vstupní data. V povodí Lomnice došlo v minulosti ke změně odtokového režimu. Otázka tedy byla do jaké míry byla tato změna způsobena právě antropogenní činností?

Studie 3. Pro tuto studii byla vybrána povodí Radovesické a Loketské výsypky. Tyto výsypky se nacházejí v oblasti Krušných hor. Jeden ze základních rekultivačních procesů po povrchové těžbě hnědého uhlí je optimalizace vodního režimu. Povodí Radovesické výsypky spadá do srážkového stínu Krušných hor, dlouhodobý srážkový deficit v tomto povodí je značný. Tato práce srovnává hydrologickou bilanci výsypek ve vegetačním období srážkově chudého roku se srážkově průměrným rokem kvůli posouzení vhodnosti návrhů biotechnického opatření.

Studie 4. Území jezera Chabařovice se nachází na místě bývalého povrchového hnědouhelného lomu v nejvýchodnější části severočeské hnědouhelné pánve v těsné blízkosti města Ústí nad Labem, Chabařovice a Trmice. Základní hypotézou této studie bylo,

že jezero Chabařovice je v současném stavu z hydrologického pohledu dlouhodobě nestabilní a potýká se s problémy udržení určité úrovně hladiny vody v tzv. sušších letech.

Formát citací a jednotky v jednotlivých studiích jsou vždy na základě instrukcí pro autory daného časopisu.

5.1 STUDIE 1: *An appraisal of the effectiveness of nature-close torrent control methods – Jindřichovický Brook case study*

Pavel Kovar, Frantisek Krovak, Vit Rous, Michal Bily, Miroslav Salek, Darina Vassova, Michaela Hrabalikova, Vaclav Tejnecky, Ondrej Drabek, Tereza Bazatova and Jitka Peskova

ECOHYDROLOGY, 2013. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com)

DOI:10.1002/eco.1453

(vlastní podíl 15%)

Příspěvek se zabývá hydrotechnickým posouzením koryta bystřinného toku a jeho inundační zóny pro variantní způsoby opevnění při různých návrhových průtocích se zaměřením na vybrané hydraulické charakteristiky toku. Zejména je zohledněna vhodnost úprav toku pro společenstva bezobratlých živočichů.

Pro ověření hydrologických a hydraulických parametrů byl využit hydrologický model KINFIL (pro návrhové průtoky) a hydraulické modely HEC-RAS a SRH-2D. Data a výpočty k návrhu přírodě blízkých revitalizačních úprav byly demonstrovány na případové studii Jindřichovického potoka, horské bystřiny Krušných hor. Modelové výpočty byly využity pro revitalizační úpravu v systému kamenný skluz nebo nízký stupeň – tůň.

Pro bystřinné toky je charakteristická vysoká rozkolísanost průtoků a zejména extrémní splaveninový režim, tj. vymílání a sedimentace i na krátkých úsecích toku. Přírodě blízká úprava bystřin či revitalizační opatření obvykle podstatně mění původní návrhové parametry koryta.

Nový návrh hydraulických charakteristik by měl být zaměřen zejména na:

- kapacitu koryta s ohledem na návrhové průtoky, zejména v intravilánu,
- stabilitu dna a břehů koryta proti erozivním účinkům proudící vody,
- omezením bystřinné eroze úpravu splaveninového režimu
- migrační prostupnost bioty v obou směrech na toku,
- hloubky, rychlosti, objemy vody, možnosti změn morfologie koryta při nízkých průtocích důležitých pro biotu,
- vliv biotechnických opatření na proudění v korytě a příbřežní zóně.

Naprosto zásadní návrhová data a z nich odvozené parametry jsou především návrhové průtoky, vybrané s ohledem na otevřené nebo zastavěné trati a jejich infrastrukturu

a na hospodářské využití pozemků (land use). Obvykle se používají N-leté průtoky, stanovené ČHMÚ, u malých povodí s odtokovými podmínkami změněnými antropogenní činností je možné aplikovat srážkoodtokový model, např. KINFIL.

Z uvedených hydraulických výpočtů vyplývá, že uvedené změny v parametrech koryta (podélný sklon, objekty, drsnost) mají vliv především u průtoku nižšího než Q_{50} , potom už se příliš nemění. V návrhu byla ponechána hloubka a rozměry původního koryta, objekty byly voleny tak, aby umožňovaly migraci bioty.

Úpravou se hloubka vody zvyšuje, což je dáno menším podélným sklonem a vyšší drsností. Rychlost proudění a tangenciální napětí se snížilo. Objem vody se zvýšil díky členitějšímu podélnému profilu a větší hloubce. V podélném profilu se střídají peřeje a tůně, které vytvářejí za nízkých vodních stavů refugia pro živočichy. Samočistící funkci toku podporuje i provzdušňování vody na balvanitých skluzech a přepadech. Migrační schopnost toku je zachována. Vzorkování makrozoobentosu poukázalo na podstatně vyšší vhodnost nového typu úpravy koryta oproti úpravě staré.

An appraisal of the effectiveness of nature-close torrent control methods – Jindrichovicky Brook case study

Pavel Kovar,^{1*} Frantisek Krovak,¹ Vit Rous,¹ Michal Bily,¹ Miroslav Salek,¹ Darina Vassova,¹ Michaela Hrabalikova,¹ Vaclav Tejnecky,² Ondrej Drabek,² Tereza Bazatova¹ and Jitka Peskova¹

¹ Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic

² Faculty of Agrobiological Sciences, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic

ABSTRACT

Discharge fluctuation and extreme bed load movement, i.e. erosion and sedimentation occurring on short upper reaches of the river, are characteristic features of torrential rivers. This paper presents a biotechnical appraisal of a torrent catchment for implementing revetments methods, focusing on selected hydraulic characteristics of the flow. The Infiltration and Kinematic wave hydrological model (KINFIL) hydrological model (for design discharges) is used to verify these variables and also the Hydrologic Engineering Centre's River Analysis System and Sedimentation and River Hydraulics Two-Dimensional hydraulic models for channel flow. Data and computation for proposing nature-close remedial measures are demonstrated in a case study of the Jindrichovicky Brook, a mountain torrent located in the Ore Mountains (Czech Republic).

Particular attention is given to appropriate adaptation of the river for the invertebrate community. The hydraulic analysis is carried out in two sections of the river (section A: 'nature-close', restored in 2008, and section B: 'old style', regulated in the 1970s). The aim is to compute the major hydraulic characteristics (depths, velocities, shear stress values etc.). Then, a hydrobiological investigation is carried out in both sections to find how much the invertebrate communities extended their diversity and abundance as a consequence of better geomorphological diversity after restoration. It was found that, from the hydraulic point of view, the old section B is sufficiently robust and stable. However, it is clearly evident that this section can hardly be populated by fauna and if so, then only very sparsely and impermanently. Section A meets both priorities, hydraulic stability and an acceptable living environment for the benthic community. Copyright © 2013 John Wiley & Sons, Ltd.

KEY WORDS torrent control; hydro-technical appraisal; shear stress; migration permeability; diversity and abundance of invertebrates

Received 12 February 2013; Revised 24 October 2013; Accepted 24 October 2013

INTRODUCTION

Restoring small rivers and thereby also improving environmental conditions for the biota have been a trend over the past several decades. Instead of keeping a robust engineering works, in close to nature revitalization measures, we prefer to reconstruct natural obstacles in the river channels, even in the torrent reaches, in order that the river remains open to biota migration. The main objective of this work is to give examples of how traditional torrent control structures, usually insurmountable for fish and the benthic community, can be replaced by more biota-friendly constructions that allow migration. This paper supports an objective comparison of hydraulic properties between old style bed drops and the system of step/chute-pools open to biota.

Sudden changes in discharge occurring during rainstorms are characteristic for torrential rivers. The increase in the discharge is abrupt and of short duration, and after reaching its maxima, it quickly diminishes. This is due to the small catchment area, often impacted by heavy rains, and also the high gradient of the catchment and the flow (Beven, 2006). Another important consideration is that the greatest damage is caused not by large volumes of water overflowing the banks and subsequent flooding of large tracts of land, as is common in lowland catchments, but rather by devastation of specific sections of the catchment and of structures situated in the vicinity of the catchment, due to the significant shear stress that impacts the river bed and the banks through the masses of flowing water. This research on

* Correspondence to: Pavel Kovar, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamycka 129, 165 21 Praha 6, Suchbátka - Prague, Czech Republic. E-mail: kovar@fzp.czu.cz

changes in shear stress values fluctuation has recently provided good practical results in the USA (e.g. Chin et al., 2009). The accumulation of moving bed loads in the lower sections of the catchment is another important factor. On the basis of this experience (Kovar and Krovak, 1998, 2002), it is necessary to propose torrent control measures that can not only meet purposeful requirements, influencing the river basin capacity and its resilience to stress, but also fulfil ecological requirements concerning the environmental character of the torrent and biotechnical revetment methods.

Today, the traditional alpine approach to torrent control (reaching back almost 150 years) raises many issues, particularly concerning the utility of allegedly superfluous and excessively large structures. For years, classical torrent control lay within the domain of forestry engineering. However, because of present-day purpose-oriented ecological requirements, specifically migration permeability of the flow for fish, and nature-close remedial measures, the natural character of the bottom substrate and the planting of riparian vegetation have become a part of torrent control methodology (Novak et al., 1986; Just et al., 2005). In contrast to lowland waterways, torrents are closely connected with their catchment, both morphologically and from the hydrological point of view. This is corroborated by the means for identifying them, i.e. setting the index of torrential character, where the characteristics of the torrent catchment are applied for determining its discharge (e.g. Wilcox et al., 2008). Management of torrent catchments, i.e. implementation of erosion control measures, should include measures for safeguarding environmental biodiversity, i.e. fauna and flora. Today, this has become a very important issue (Lange and Lecher, 1993; Chin and Gregory, 2001). The trend is requiring the removal of obstacles that block fish and invertebrate migration, as seen in classical (old-style) torrent control structures. This is also stipulated in the European Union (EU) Water Directives (COUNCIL DIRECTIVE 98/83/EC, 1998; WFD EC 2000/60/ES, 2000) and has been recommended by several authors in journals of ecology and hydrobiology (Brookes and Shields, 1996; Gordon et al., 1996; Waal et al., 2000). The EU Water Framework Directive (WFD EC 2000/60/ES, 2000) generally defines fish, macroinvertebrates and phytoplankton as target organisms for improvement in aquatic environments. Improvements are not only important for the survival of these species: hydraulic structures must be made in a way that allows them to migrate in the torrent environment. These target groups of invertebrates thrive even in the source area of the torrent. Therefore, from the very first hundred metres of concentrated flow, biotic migration and its revival must be taken into account. The construction of elevated steps and obstacles should be avoided. The same holds for the bottom pavement. Stabilizing structures have been built in the past for erosion

control purposes. The question may be raised whether today's society would approve structures of that kind, which restrict the development of biotic communities, whereas modern structures offer feasible alternative measures that support biotic diversity and abundance. This is the issue that is specifically dealt with in our paper.

The restoration of a classical in-line torrent control structure was practically tested in a case study carried out on the Jidrichovický Brook, in the Ore Mountains, Czech Republic. The KINFIL hydrological model (Kovar et al., 2002; Vrana et al., 2012) was used for determining the N-year run-off. Two hydraulic models were used for designing the new structures: first, the Hydrologic Engineering Centre's River Analysis System (HEC-RAS computer program, 2001; Cook, 2008; Brunner, 2010), and parallel to it, the more recent Sedimentation and River Hydraulics Two-Dimensional (SRH-2D) model (Lai, 2008; Aquaveo, 2010). The idea behind our study was to explore the possibilities of applying integrated modelling, hydrological and hydraulic models in a geographic information system (GIS) environment, with the aim of determining core restoration measures. Two experimental sections were selected on the Jidrichovický Brook (Figure 1). The lower section B is situated downstream the outlet of the catchment at the uppermost bottom drop (1.8 m high). This was built in 'old-style' torrent control during the 1970s in a stable slope with all robust drops, and the river bottom was paved with flat stones (granite). Section A is above section B, and it was fully restored from the 'old-style' torrent control technology in 2008. Hydraulic model computations were used for implementing the restoration measures with a system of hydraulic structures combining chute-pools or step-pools with a free river bottom between them. The differences in benthic population in A and B reaches indicate connectivity and habitat conditions characterized by reduction of flow velocities and heterogeneity of bed material. However, we have to admit that these differences could be even larger when the longitudinal river continuum would be re-established (which should occur in the near future). In addition, an assessment of the impact of the newly formed channel on stream macroinvertebrates (benthic animals larger than 0.5 mm, Wetzel, 2001) was tested by making a comparison with the former torrent control regulated channel. Macroinvertebrates were chosen for the analysis, because this group is known to be strongly influenced by the substrate of the stream bottom; also, benthic communities of streams and rivers are classified according to the nature of the flow bottom (Lellak and Kubicek, 1991). A number of recent studies have described the effect of stream or river restoration on macroinvertebrate communities (e.g. Jahring and Lorenz, 2008; Sundermann et al., 2011). However, there is still a deficiency of such studies on small torrential brooks.

METHODS

Nature-close torrent control or revitalization measures usually dramatically alter the initial design variables of the torrent basin. A new design of hydraulic variables should therefore focus on

- stability of the river bottom and banks against the impact of erosion caused by flowing water shear stress;
- the impact of biotechnical measures on the water flow type in the channel and in the riparian zone;

Structure of the KINFIL hydrological model

The KINFIL hydrological model (Kovar, 1992; Kovar et al., 2002) is based on a combination of the theory of infiltration and transformation of direct run-off by a kinematic wave, which proved to be useful in small experimental catchments in model simulations of historical flood events. The model uses physiographic and hydraulic parameters of the catchment, which can easily be determined from maps in the absence of direct observation, taking

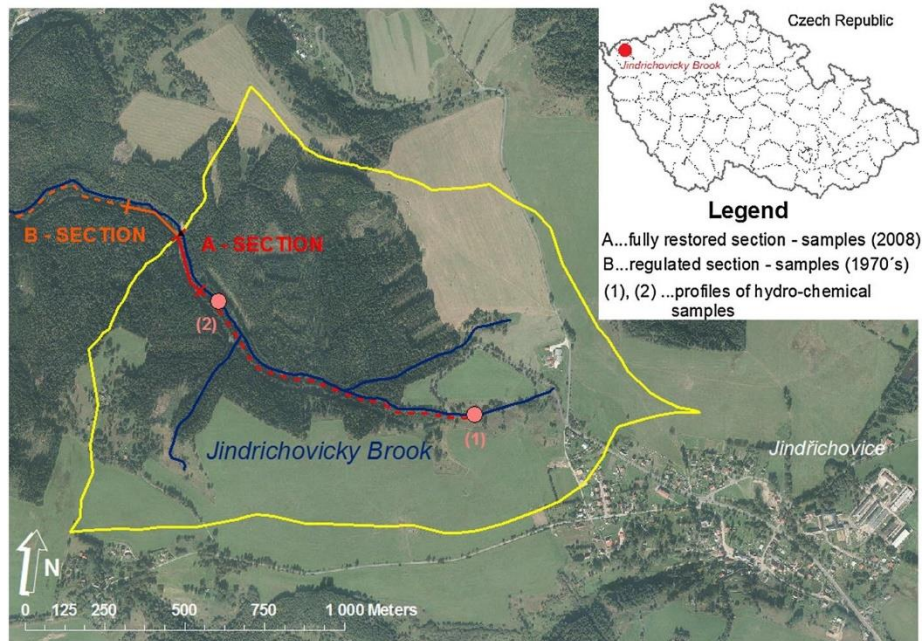


Figure 1: Location of the study area.

- the nature-close character of the bottom substrate (sediments);
- depth, velocity, water volume and possibilities of a change in the morphology of the torrent basin during low discharge that will have an important effect on the biotic population;
- reduction of torrential erosion by adapting the sediment regime; and
- torrent basin capacity, with reference to the design capacity discharge, particularly in urban areas.

The most important design data and derived variables concern design discharges. These are selected with regard to open landscape or urbanized sections and their infrastructure.

N-year discharges, as set up by the Czech Hydrometeorologic Institute (CHMI), are usually used; in the case of small catchments, with run-off conditions altered because of anthropogenic activities, rainfall-run-off models can be applied, e.g. MIKE SHE (Abbott and Refsgaard, 1996), US Army Corps of Engineers' Hydrologic Modeling System HEC-HMS (USACE, 2000) or others. In our study, the KINFIL model (Kovar, 1992; Kovar et al., 2002; Vrana et al., 2012) was used.

into account the impacts of anthropogenic activities in the catchment. The model is particularly useful in determining the design discharges in various scenarios and land use changes, e.g. deforestation and urbanization. The current version of the KINFIL model is based on the infiltration theory of Green and Ampt, with regard to the Morel-Seytoux (Morel-Seytoux and Verdin, 1981) flooding concept. Soil saturated hydraulic conductivity and the sorptivity parameter (at field capacity) are the major parameters for solving problems related to infiltration. Their correlation with run-off curve numbers (CN) (USDA SCS, 1972; U.S. SCS, 1986; Morgan and Nearing, 2011) can also be used.

The second component of the KINFIL model is a direct run-off transformation. The equation describes the unsteady flow of water approximated by the kinematic wave on a cascade of planes. The differential kinematic wave equation is transferred to the final differences and solved through the explicit numerical scheme of Lax and Wendroff (Singh, 1996). For practical solutions, the catchment is usually fragmented by components, cascades of plane segments, of rectangular planes and/or of river reaches, in order to simulate the natural topographic

configuration. The use of the KINFIL model has been described in several studies (e.g. Vrana et al., 2012).

For this hydrological model, it is necessary to analyse the geography of the catchment, using GIS for the geometry of the morphological variables, determining the hydraulic properties of the soil, land use and data for setting the run-off CN.

Structure of the HEC-RAS and SRH-2D hydraulic models The mathematical HEC-RAS hydraulic model (Brunner, 2010), version 4.1, was selected for calculating the required output data for the Jindrichovicky Brook. HEC-RAS uses the integrated MS Windows environment with an excellent graphic user interface, with detailed representation of the flow hydraulics in open river channels in artificial and natural streams.

The system contains a one-dimensional river analysis for (1) stable flow; (2) unstable flow; (3) sediment movement; and (4) water quality analysis.

The calculation requires the assignment of three main categories of data: geometry of the basin and structures, hydraulic loss coefficients and boundary conditions. It is possible to use the connection to computer-aided design and GIS in 3D presentation. Two principles can be applied for a hydraulic assessment of the capacity of open channel systems and their hydraulic structures for maximum run-off:

1. Deal with the passage of the design flood wave by means of a hydraulic model based on a numerical solution of the unstable flow. This method requires knowledge of the form of the entry design wave in the upper closing profile of the assessed section of the flow and, similar to the next principle, a detailed description of the geometric and hydraulic variables of the basin. This approach is demanding from the computational point of view, and it is usually not applied to streams of local significance.
2. Use the stable hydraulic flow method for determining the longitudinal profiles of the water table, with reference to each design of N-year discharges. This method does not function in unstable conditions; however, it has the advantage that a more detailed expression can be made of the flow through hydraulic structures situated in the stream.

The program deals separately with hydraulic regimes of sub-critical and/or super-critical flow. The flow over hydraulic structures can be analysed in detail and solved for various hydraulic regimes. It guarantees reliable assessment, mainly in locations where the hydraulic regime of the structures is influenced by the flow in the river basin. This is the case for the Jindrichovicky Brook. The stable model offers higher values for solving the water table regime; its results are on the side of a safety design.

The system allows stable non-uniform flows in natural open channels to be dealt with, and it is also possible to describe widely used hydraulic structures in the catchment. A big advantage is the cost-free use of the model, its large scope of application and the number of analogue situations and examples. For these reasons, the program application of HEC-RAS was used in this study to assess the capacity of the river basin and the structures.

In this study, HEC-RAS was first used to assess the capacity of the basin and the structures; subsequently, the results of the calculations of depths, velocity and shear stress were compared with the results from the more up-to-date SRH-2D model, which deals with hydraulic events in the stable flow regime.

A digital elevation model was created in accordance with the restoration plan for the Jindrichovicky Brook and was used for testing the two-dimensional SRH-2D model, developed by the US Bureau of Reclamation (Lai, 2008), and for verifying the hydraulic character of the basin. The SRH-2D model is comparable with other two-dimensional models, but it has the advantage that it can be applied in a flexible network of calculation elements and that it is an overall robust model.

A calculation domain in the AQUAVEO Surface-Water Modeling System (SMS), counting over a hundred thousand elements, was created for restoring the Jindrichovicky Brook. The size of the rectangular computational elements was 0.5×0.4 m, and when inundated, this amount was

1.0×0.8 m. A digital elevation model of the terrain was

created in the AUTOCAD Civil 3D 2012 program (Autodesk, 2012) from surveying land measurements and design cross-section profiles from the HEC-RAS program.

Hydrobiological and hydrochemical methods

Sections A and B were studied and compared (Figure 1). These two sections were selected because of similar flow rate and space proximity. It can be assumed that the differences in the composition of the benthic fauna in the two sections are determined mainly by the different torrent control concepts. The most evident difference between the styles of torrent control on Sections A and B is that the old-style (B) has a stone-paved bottom, which provides reliable protection against scouring but makes it hard for benthic communities to survive. In addition, the system of robust bottom drops (1.5–2.5 m in height) in this section can form a bottleneck for biota. Section A, which is as nature-close as possible, provides conditions for full restoration with free bottom almost natural revetments (a stone chute-pool), local riparian vegetation, geomorphological diversity in situation, longitudinal and cross-section profiles and so on. Hydraulic parameters (Doledec et al., 2007) as well the type of bottom substrate (Allan, 1995; Wetzel, 2001) can play a role in the occurrence of stream

macroinvertebrates. The type of bottom substrate was chosen as the parameter characterizing the different types of restoration in our study sites. Macroinvertebrates were sampled in October 2011. There were 15 sampling sites located in section A and 15 sampling sites in section B. One sample was taken at each sampling site.

The sites were situated within the longitudinal direction of the stream. In section A, the position of the sampling sites was primarily chosen to represent all three main types of bottom substrate present in this section of the channel. These were

1. stretches that are close to the natural character of the
2. flow, named for this purpose as 'natural' substrate;
3. sandy deposits, occurring principally in the pools under the chute/steps ('sand' substrate); and
4. bottom composed of stone slab compounds ('stone' substrate).

Each of these three types of environment was represented five times in the series of 15 samples in section A. Each two sampling sites were approximately 10 m apart.

In section B, the prevalent type of bottom is composed of consistent stone pavement, covered in some places by sand and gravel deposit. Only in some specific locations (several metres beneath the stone steps), we can find sand deposits similar to 2 in section A. The 15 sample sites in section B were placed regularly on the flow, within a distance of 10 m. In section B, a total of 13 sites are of stone pavement type, and two are of sandy deposit type.

The sampling was done according to the standard methodology with a Surber sampler (Peckarsky, 1984), with mesh size 0.5 mm and a 30 × 33.5 cm frame. Each sample represented 0.1 m² of bottom. The sample was transferred in the net of the sampler: (1) loose substrate (sand and gravel) was collected at a depth of approximately 5 cm (where such a layer existed); (2) stones smaller than the sampler area were collected directly; and (3) the surface of big stones, solid stone pavements, if present (i.e. in test section B), were swept into the net with brushes. The procedure allowed us also to collect substrate samples under the freely disposed, removable stone slabs. By using this combination of three methods, quantitative sampling of relevant benthic fauna was ensured in all habitats in the sampled areas. All collected materials were washed in the net in running brook water and transported in bowls. The macroinvertebrates were extracted from each sample, fixed in a 70% ethanol fluid and further processed in the laboratory. Abundance (number of individuals) was counted for each sample. Individuals were identified at family level, except higher taxa of Nematomorpha (one specimen) and Hydracarina (15 specimens). Some Trichoptera pupas also remained without family

determination. Two abundance categories were therefore distinguished: (1) numbers without Trichoptera pupas in the analysis, which paired each individual to the relevant family, and (2) the total count in the remaining analysis.

For an assessment of the effect of the torrent control type on benthic fauna, we evaluated the taxonomic richness (represented by the number of identified families) and the faunal abundance (the number of specimens) in the samples. Firstly, we tested the strength of the relationship between taxonomic richness and faunal abundance in the samples within sections A and B, by using linear regression; prior to this procedure, we checked the two variables for normality (Kolmogorov–Smirnov test, both $d < 0.15$, $P > 0.05$). Student's t-test was used to assess the difference in taxonomic richness between sections A and B. These procedures were performed using R 2.9.2 software (R Development Core Team, 2009). The effects of torrent control (new restoration or old regulation type) and substrate (natural, sand, stones and paving) on the composition of the benthic communities were explored using direct gradient analysis (canonical correspondence analysis) to summarize the relationships between occurrences of the taxonomic groups and the variables. Using detrended correspondence analysis, we checked that the groups responded unimodally to the predictors and that the use of a weighted averaging method was appropriate (ter Braak and Smilauer, 2002). A Monte Carlo permutation test with 4999 unrestricted permutations was applied to test the importance of the predictors and the canonical ordination axes. A manual forward selection procedure was utilized from an empty model to a more complex model, with stepwise ranking of the variables by their importance computed by CANOCO (Software for Canonical Community Ordination) for Windows 4.5 (ter Braak and Smilauer, 2002). In all analyses, we adopted significance level $P = 0.05$ for hypothesis rejection.

Water samples [taken from profiles (1) and (2), see Figure 1] were analysed for their anion and cation contents. Before chemical analysis, each sample was filtered through a nylon membrane filter with 0.45 µm pore diameter. The main inorganic anions (F⁻, Cl⁻, Br⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ and SO₄²⁻) were identified by means of IonPac AS 11-HC ion chromatography (Dionex, USA). A pre-column and

analytic column IonPac AS11-HC (Dionex, USA) was used for separating the analysed samples. For the mobile phase, a 28.8 mm solution KOH and discharge mobile phase in 1 ml min⁻¹. An ASRS 300 4 mm self-regenerating suppressor (Dionex, USA) was used to reduce the conductivity of the mobile phase. Detection of the analysed samples was operated by means of conductivity. Prevalent free cations (Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺)

were identified by means of ICS CS16 ion chromatography (Dionex, USA). A pre-column and analytic column IonPac AS11-HC (Dionex, USA)

was used for separating the analysed samples. A 35 mm solution of methansulfonic acid and discharge mobile phase in 1 ml min 1 for the mobile phase. A CMMS 300 mobile phase suppressor (Dionex, USA) was used to reduce the conductivity. A 100 mm solution of hydroxide tetrabutylammonium was used as a suppressing agent. Detection of the analysed samples was operated by means of conductometry. The total quantity of dissolved Fe and Mn in the water samples was determined by

AA80FS atomic absorption (Varian, Australia) in standard analytic conditions. Quality control and quality assurance were carried out according to Tejnecky et al. (2013).

Catchment characteristics

The Jindrichovicky Brook, situated in north-west Bohemia, in the Ore mountains region, is a left-side tributary of the river Rotava, at 2.0 km downstream. The brook, with an average slope of 4%, has the character of a torrent, with the following conditions: catchment area $<35 \text{ km}^2$, elevation $H > 200 \text{ m}$ above sea level, slope gradient $J > 3\%$ varies

Table I. Hydrological characteristics of the Jindrichovicky Brook catchment.

Hydrological catchment number	1-13-01-114
Total catchment area	5.964 km ²
Length of river reach A	0.290 km
Length of river reach B	0.180 km
Forested catchment area	47%
Length of catchment	1.62 km
Length of water divide	4.35 km
Catchment shape coefficient	A = 0.653
Catchment shape	Fan-shaped without developed hydrographic network
Torrent index	$K_T = 0.118$
Slope of catchment	0.044 ()
Slope of river reach A	0.023–0.038 ()
Slope of river reach B	0.040 ()

considerably, with supercritical flow, enormous erosion, transport and sedimentation of solid deposits, rock boulder bed, current shadows and hideaways, and populated mostly by trout in the lower parts of the torrent. Table I and Figure 2 indicate the catchment characteristics. Average monthly temperatures and precipitation are indicated in Table II.

As far as the relief of the terrain is concerned, it is part of an area of interest in the Ore Mountains, with deep-cut valley waterways. The slopes mostly face the north-west. The stream source of the brook is situated below the village of Jindrichovice, and after about 2 km, it flows into the Rotava river. The Jindrichovicky Brook does not have any significant tributaries. Forested areas make up 47% of the catchment. The valley flood plain is overgrown with mixed forest, with mainly pine and spruce trees. The

undergrowth is composed of herb vegetation, with plenty of shallow puddles and ruderal vegetation.

Transmissivity is the basic quantitative characteristic of the hydro-geological environment. This designates the capacity of the aquifer to transmit a certain quantity of groundwater and approximately determines its hydrological use. The transmissivity value for the given locality is $T = 10^{-3} - 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, which represents a medium level. The prevalent soil genetic groups are podzolic soil and podzols of mountainous regions, with prevalent clay-loamy soils and clays.

Table III presents data from the CHMI, concerning N- year and M-day discharges to the closing profile of the Jindrichovicky Brook (catchment area = 5.964 km²).

The present design quantities (in Table III) do not differ significantly from those used in the traditional methods. Because of the slightly changed land use in the catchment (permanent grassland instead of arable land), the present design discharges were computed as the lesser values (reduction 5–7%).

Initially, the improved river reach was devastated by extensive bank and bottom ruptures, with many stone outcrops, exposed by bed erosion. In certain sites, 2.5–3.0 m deep gulches appeared, which endangered the adjacent road. The bottom of the channel was stony with upper sediment layer granularity of 5–10 cm and with boulder lower layer granularity of 20–30 cm. Where ruptures appeared, the bed was exposed up to the bedrock; where the velocity of the flow was smaller, extensive sandy ripples appeared.

In the design for mitigating torrent erosion, the rule of using all options including biota transfer possibilities was applied (Chin, 2003; Chin et al., 2009). This modern 'chute/step-pool' procedure meets the restoration requirements and, at the same time, solves the sediment transport problems by reducing the causes of their occurrence. The cascade of combined double hydraulic structures of this kind (with positive or even negative inclination of the pool bed) reduces the occurrence of extreme local velocity and high shear stress values in the regressive process of bottom scour, including bank foots (Figures 7 and 8). The already restored reach of the Jindrichovicky brook followed up its old regulated reach with cross-section barriers impermeable for migrating organisms built in the 1970s in the form of high-drop structures and river bed pavement. Future restoration of this reach (section B) is under discussion.

slope, does not meander. The total length of the

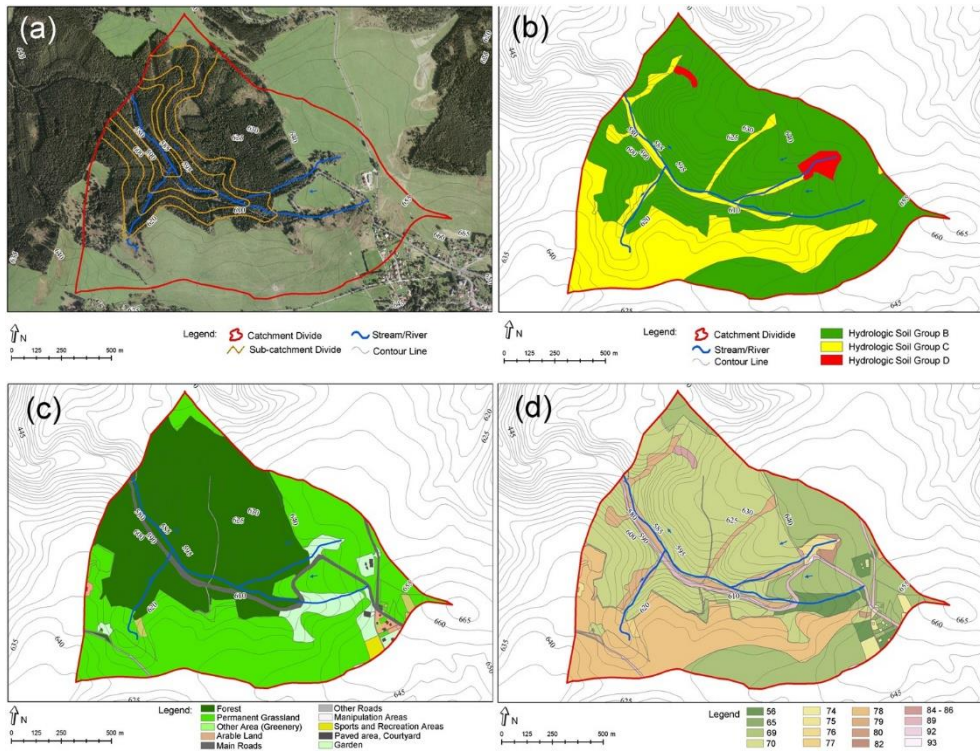


Figure 2: The Jindrichovicky Brook catchment: (a) orthophotomap, (b) hydrological soil groups, (c) land use, and (d) curve numbers

Table II. Average monthly temperature and precipitation on the Jindrichovicky Brook catchment.

Month	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I–XII
Temperature (°C)	2.5	1.6	2.2	6.4	11.6	14.6	16.4	15.4	12.0	7.1	2.0	1.4	6.8
Precipitations (mm)	63	54	46	52	60	68	84	80	52	54	55	60	728

Table III. N-year and M-day discharges of the Jindrichovicky Brook catchment (restored reach beginning profile).

N (years)	1	2	5	10	20	50	100
QN (m ³ s ⁻¹)	0.9	1.2	2.2	2.9	3.7	5.4	6.9
M (days)	30	90	210	330	364	—	—
Q _{Md} (l s ⁻¹)	40	25	12	6	3	—	—

restored reach is 1.055 km, of which 0.078–0.166 km, 0.206–0.221 km and 0.805–0.815 km are sharp erosive irregularities that have been replaced by free standing arches. The bank ruptures and bottom scours were used to create pools beneath the chutes

The cross-section profile has a saucer-shaped form; the bottom width is 1.0–2.0 m, with bank slopes about 1 : 1.5–1 : 2 up to the bank edges, with the exception of the pool section. The bank foot of this reach is built from stones reinforced with rock fill, and the remaining part of the slope above the abutment is overgrown with grassland. Because of a major longitudinal slope and thus greater shear stress,

it was necessary to design the slope lines. A number of basic chute/step-pool gradient structures (U.S. SCS, 1986), as well as cross-section sills, in wood and stone, were built. The construction work and the adaptation of the hydraulic structures were done in such a way as to enable migration in both directions. They do not exceed 0.4 m in height, and the transversal section of the chute table ensures run-off in a consistent water jet. These structures are designed to be hydraulically effective for capacity discharge – the material being stone, which copies the natural gradient drops in the torrents. To minimize the reinforcement between the transversal structures, these sections were designed with a stable slope,

which corresponds to the given granulation of the deposits, based on the critical shear stress. The nature- close construction was finished in 2008.

In the restored section A, there are a few short sections with boulders placed on the bottom, where the slope is very steep. However, there are much longer reaches with a free bottom covered by a gravel-sandy surface, mostly formed by sediment. For a closer assessment of the design restoration elements in contrast to the original situation, the computation domain was reduced in a way that corresponds to the surfaces (sections A and B) for the withdrawal of hydrobiological samples. The computation of the hydraulic characteristics was made more precise by condensing computation of the elements from 0.5×0.4 m to 0.15×0.1 m. This hydraulic computation and the benthos sampling have been carried out in 2011 to 2012.

Design rains and water discharges For computing

Table IV. Depths of design rainfalls $P_{t,N}$ (mm) for various return periods $N=2-100$ years and duration $t=10-300$ min for the Jachymov station (648 m a. s. l.).

Return periods N (years)	Depths of design rainfalls $P_{t,N}$ (mm)*	Duration t (min)				
		10	20	30	60	90
2	40.8	13.48	16.59	18.73	21.66	23.46
5	53.5	18.77	23.30	26.44	31.76	34.40
10	61.6	22.17	28.14	32.35	38.64	41.85
20	70.1	26.64	34.01	39.22	47.11	51.03
50	80.5	32.24	41.43	47.98	58.25	63.09
100	88.6	36.35	47.14	54.88	66.49	72.02

*Taken from Samaj et al (1983).

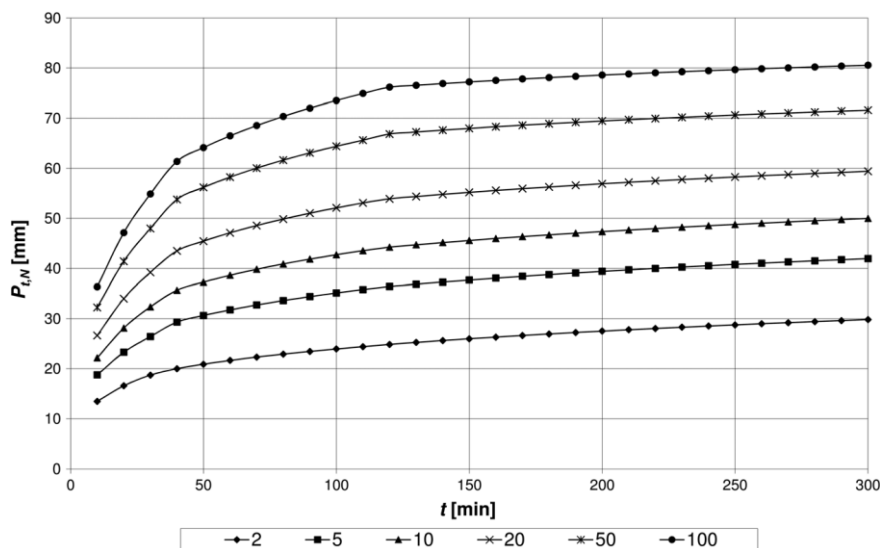


Figure 3: Depths of design rainfalls for duration $t = 10-300$ min and return period $N = 2-100$ years for the Jachymov station.

Table V. Design discharges at the outlet of the Jindrichovicky Brook catchment (restored reach beginning profile).

N (years)	1	2	5	10	20	50	100
Q_N CHMU ($m^3 s^{-1}$)	0.9	1.2	2.2	2.9	3.7	5.4	6.9
Q_N KINFIL ($m^3 s^{-1}$)	0.98	1.3	2.39	3.15	4.02	5.85	6.51

the N -year discharge, it is necessary to know the depths of the design rains. The depths of short-term rains for the Jindrichovicky Brook catchment (Table IV and Figure 3) were determined from the data collected at the Jachymov raingauge station, using the DES_RAIN program (Vassova and Kovar, 2011), which is based on the one-day maximum rainfall reduction method (Hradek and Kovar, 1994):

$$P_{t,N} = P_{1d,N} a t^{1/c}$$

where $P_{t,N}$ represents the rainfall for duration t and average occurrence N , $P_{1d,N}$ is one-day maximum rainfall for occurrence once within N years, t is duration of the design rain, and a and c represent regional parameters.

The KINFIL model computed the N -year design discharges from the design rainfalls applied to the Jindrichovicky Brook catchment. The model is

particularly intended to determine the discharge after various human interventions, e.g. change of land use, clear cut and urbanization. It has several options for ungauged catchments, such as this case study of the Jindrichovicky Brook. Various run-off CN data, widely used throughout the world, were applied (U.S. SCS, 1986; Ponce and Hawkins, 1996). The

transformation of direct run-off was solved by a kinematic wave according to the geometric and hydraulic properties of each sub-catchment (Kovar and Krovak, 2011). The results are presented in Table V, where the results from the KINFIL model can be compared with the N-year discharge data, supplied by CHMI. The N-year discharge hydrographs acquired through the KINFIL model are indicated in Figure 4.

Hydraulic computations using the HEC-RAS model

The channel capacity and its shear stress were assessed for two scenarios: for section B, old-style regulation measures (B-OLD) and for section A, new 'restoration style' measures (A-NEW), using the HEC-RAS hydraulic model. The difference between them is the paved bottom and the high bottom drops in Section B. In both scenarios, the computation was made for a 30-day discharge, while some of the project-relevant N-year discharges (i.e. from Q30d to Q100) were determined by the KINFIL model. Geomorphological data

input concerning the geometry of the channel and the hydraulic structures, based on detailed measurements of the longitudinal and cross-section profiles, was included in the computation. These structures have a decisive influence on the water level regime and on the channel shear stress. The basic hydraulic characteristic of the channel is the Manning roughness coefficient n . Because of the material composition of the original channel and the structures, various values were selected and determined, in accordance with the HEC-RAS manual and on the basis of local investigations, which were made individually for each cross-section profile.

Computations in the non-uniform steady flow regime were made for the downstream regulated reach of the old regulated channel (B-OLD) and also for the restored upstream new channel (A-NEW). From these computations, it appears that, with regard to the channel capacity for the design

discharge, no significant changes were assessed. Flooding events of design discharges take place only in a few specific solitaire locations, and harmless flooding spills in the floodplain. However, there is a clearly observable impact of changes in the longitudinal bottom slope and cross-section structures (chute/step-pool) in the channel on the change in shear stress. The proposed measures will definitely reduce the velocity and the shear stress. The proposed measures, by using a number of cross-section hydraulic structures, can be expected to have a major influence on the retention capacity of the channel. The volume of retained water during lower discharge is much greater. Because of the limited scope of this paper, only selected outcomes (hydraulic depths) are indicated, as summarized in Figures 5 and 6.

Hydraulic computations with the SRH-2D model

Two-dimensional models are particularly useful in situations where prismatic water flow in the channel is not expected and where the physical structure of the land is complex, e.g. a parallel channel with hydraulic structures in it, complex interactions with the flooded area and generally, in a natural river bed. In comparison with 1D models, a disadvantage of 2D models is that they have high demands on data characterizing the terrain and high computation complexity. For the Jindrichovicky Brook, a computation domain was created in the AQUAVEO Surface-Water Modeling System, comprising more than 100 000 elements.

The outcomes of the SRH-2D program are a data text file containing data for all elements in the computation domain. The outcome data consists of water levels, water depths, velocities and their vectors, Froude's numbers and shear stress (Lai, 2008). The flow was assessed at the levels of $Q_{30d} = 0.04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, which is known as 'channel formation discharge'. In lower flows, i.e. Q_{330d} , known as 'ecological discharge', computation errors occurred,

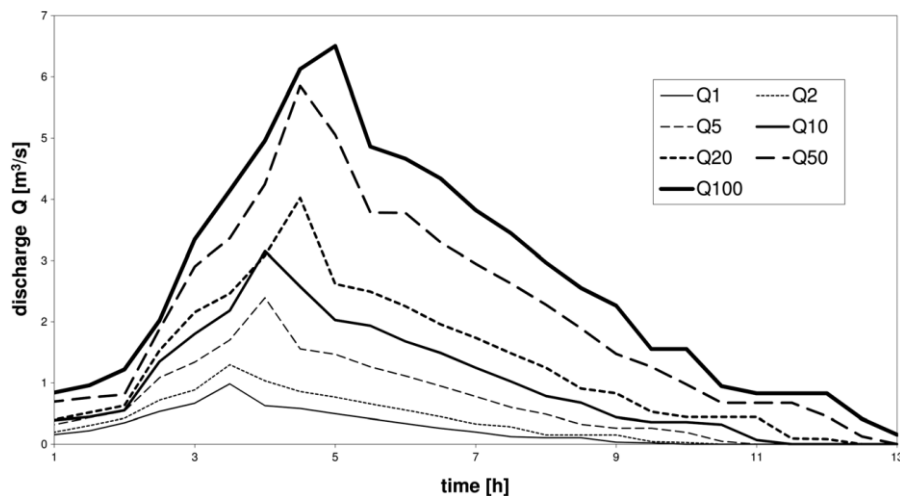


Figure 4: Design hydrographs Q1–Q100 computed by the KINFIL model.

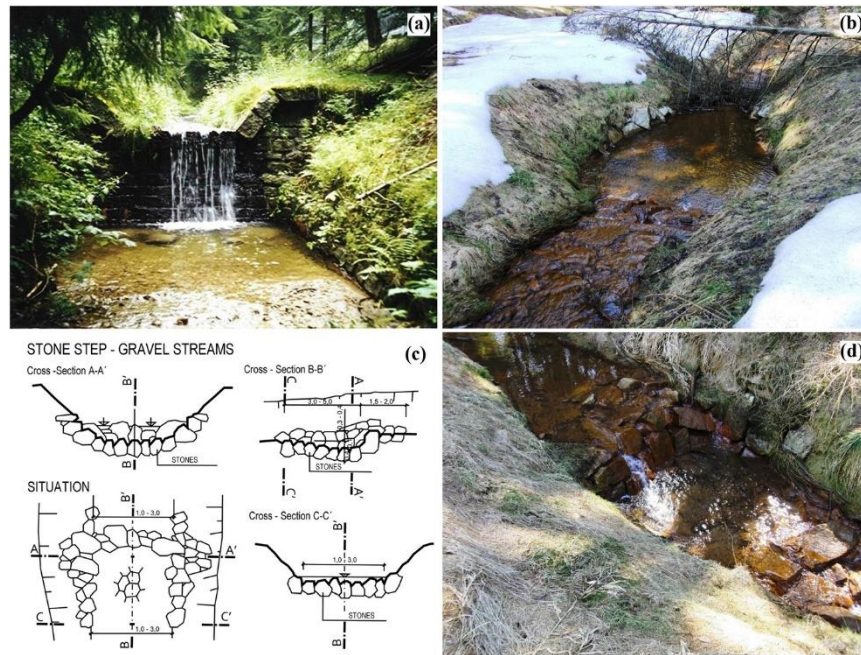


Figure 5: (a) The 'old-style' bottom drop (1.8 m high) from the 1970s, (b) the recently nature-close restored 'chute-pool' structure, 2008, (c) the design proposal for the 'chute-pool' structure, 2008 and (d) combination of 'step-pool', 2008.)

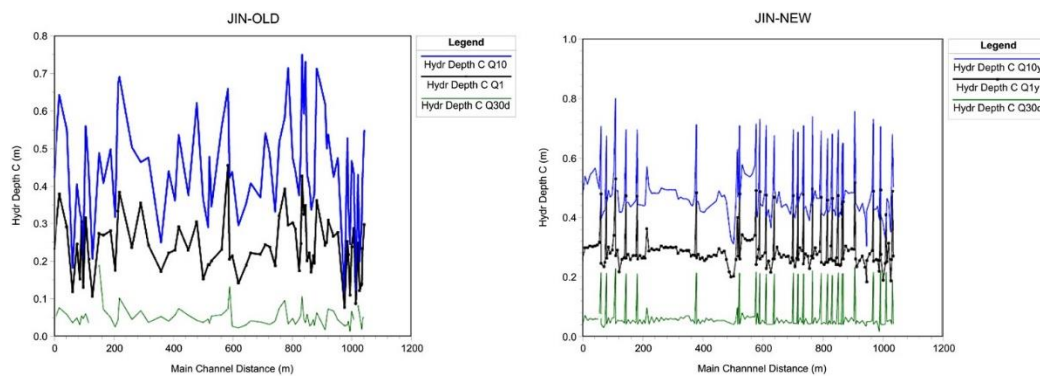


Figure 6: Hydraulic depths of flow simulated by the Hydrologic Engineering Centre's River Analysis System model (a) for Q30d, Q1 and Q10 for the

and these flows were therefore not assessed.

The velocity vectors are important outcomes of the 2D model. They can illustrate the formulae for water movements in the channel. Changes in the direction of the flow vectors indicate increased geomorphological diversity, which is an important condition for the ecological quality of the flow (Comiti et al., 2007). In the case of the Jindrichovicky Brook, it appears that the standard discharge (Q30d) has a quasi-laminar character in most sections of the channel, and changes in the direction of the vectors are observable only at specific individual steps or chutes.

For increasing morphological diversity of the flow and thus for its ecological potential, it would therefore be useful to create even more nature-close steps in the flow, preferably based on criteria derived from assessments of the natural torrent morphology (Lenzi, 2002; Comiti et al., 2007; Chin et al., 2009).

These artificial yet nature-close steps stabilize the

longitudinal profile of the flow and retain bed loads in the same way as hard measures in the field of torrent control but simultaneously create a potential habitat for water organisms appearing in the natural surroundings of unregulated torrents (Roni et al., 2006; Comiti et al., 2009; Yu et al., 2010). A good solution is to set up stop planks within the flow from dead wood. This not only changes the morphology of the flow but may also provide a nutrition receptacle for many water invertebrates.

Another important characteristic, from the point of view of the ecological quality of the flow, is the depths of the water. Because of the relatively large distance between the individual steps (approximately 50 m and more), the larger part of the flow has uniform depths, longitudinally and also in the cross-section profiles. The water depths at Q30d vary between 0.05 and 0.10 m and can reach as much as 0.3 m only in the pools beneath the steps. Water depth is one of the main characteristics for assessing the

quality of the habitat for most organisms living in water, and thus, its flatness limits the ecological potential of the flow (Diez-Hernandez, 2008; Pasternack et al., 2008; Hauer et al., 2009; Kozarek et al., 2010). Small water depth diversity in the longitudinal profile is illustrated in Figure 9. Restoration measures, as described in the preceding text, can also be used to improve this flow characteristic. Only selected outcomes are indicated in the graphs (Figures 7, 8 and 9).

A closer analysis of sections A and B shows that the resultant variance value of section A was 0.0015 m and in Section B, the value was 0.0005 m. This again indicates much smaller dispersion of values in the given surface and also major uniformity in the environment of this channel. Because of the relatively low depth of the water column in the discharge under investigation Q30d – average depth 0.05 m – the values in each section would most probably increase if the calculation points were condensed, and a much more precise model of the river bed would be created, reflecting even small unevenness (mini ripples) on the

channel bottom.

Results of hydrochemical and hydrobiological analysis

Hydrochemical analysis. Table VI presents the results of a hydrochemical analysis of water samples to illustrate the quality of the aquatic biota environment.

The values clearly exhibit the chemical parameters of the water samples collected in the studied environment of the Jindrichovicky Brook; the samples originate from the upper and lower parts of the brook. The main negative influence on biota in the studied ecosystem could be attributed to elevated values of Mn determined in the upper part of the brook. These values apparently exceed the guideline limits for drinking water and also for surface waters (Czech acts No. 252/2004 Sb. and No. 428/2001 Sb. and also EU Council directive No. 98/83/ES).

The amounts of Cl, SO₄ and also cations are significantly higher than the amounts found in the streams located in the near vicinity of the Jindrichovicky Brook (Kram et al., 2012). However,

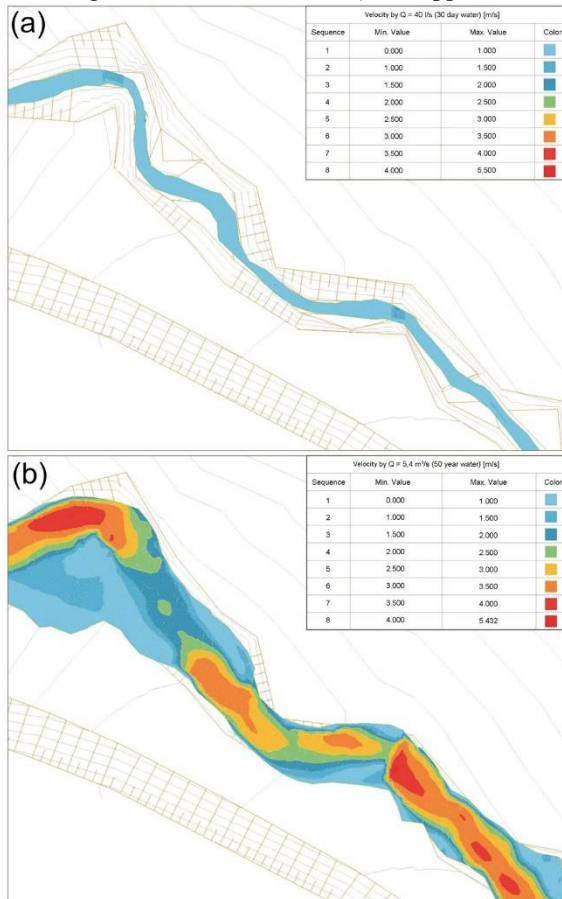


Figure 7: Flow velocities in the restored channel simulated by the Sedimentation and River Hydraulics Two-Dimensional model (a) for Q_{30d} and (b) for Q_{50d}.

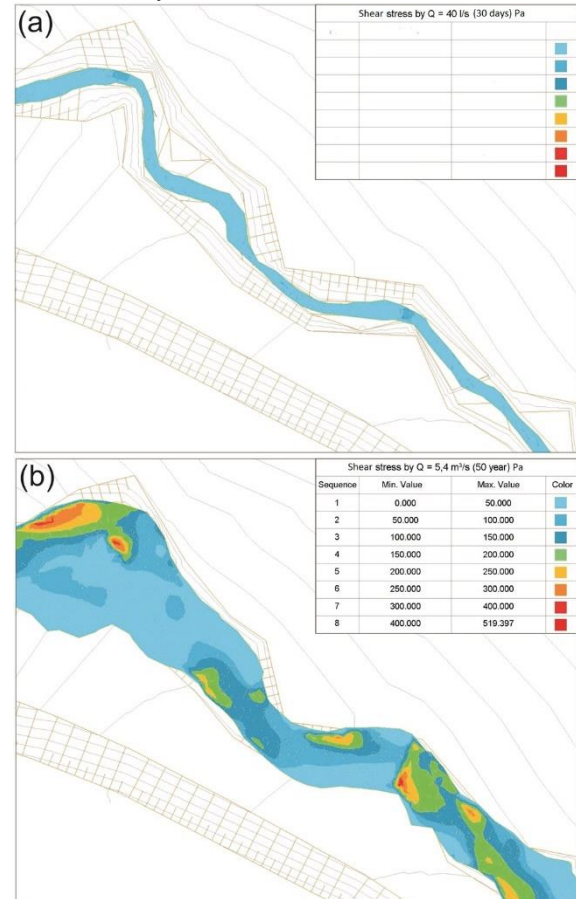


Figure 8: Shear stress in the restored channel, simulated by the Sedimentation and River Hydraulics Two-Dimensional model (a) for Q_{30d} and (b) for Q_{50d}.

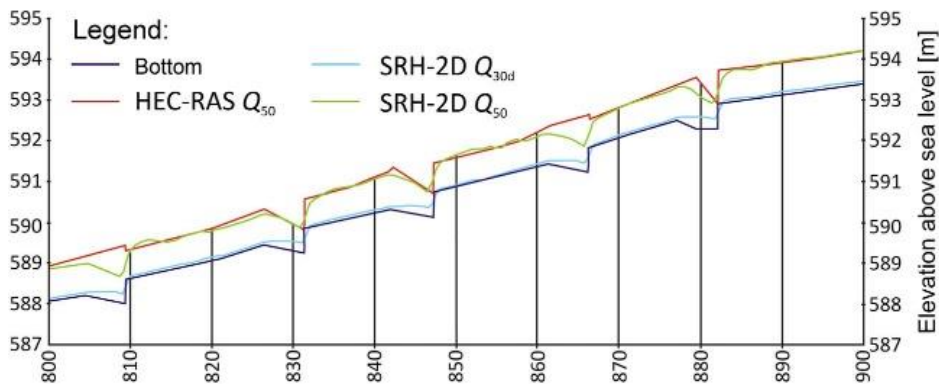


Figure 9: The longitudinal profiles 0:800–0:900 km Hydrologic Engineering Centre’s River Analysis System (HEC-RAS) and Sedimentation and River

Table VI. Mean and standard deviation of chemical parameters of stream-water samples (three replicates).

Compound	Unit	1		2	
		Mean	SD	Mean	SD
pH		6.12	0.02	6.76	0.02
Conductivity	$\mu\text{S cm}^{-1}$	444	46.3	239	26.7
NO_2^-	mg l^{-1}	<0.01		<0.01	
F	mg l^{-1}	0.09	0.00	0.10	0.00
Cl	mg l^{-1}	156	0.65	64.0	0.08
Br	mg l^{-1}	0.03	0.00	0.02	0.00
NO_3^-	mg l^{-1}	0.99	0.01	1.15	0.01
PO_4^{3-}	mg l^{-1}	0.01	0.00	0.01	0.00
SO_4^{2-}	mg l^{-1}	75.3	0.16	35.3	0.04
Na^+	mg l^{-1}	46.7	0.04	28.8	0.01
NH_4^+	mg l^{-1}	0.09	0.02	0.04	0.00
Mg^{2+}	mg l^{-1}	15.6	0.24	7.92	0.06
K	mg l^{-1}	4.39	0.24	2.63	0.08
Ca^{2+}	mg l^{-1}	24.0	0.18	12.7	0.03
Al	mg l^{-1}	0.18	0.05	0.10	0.04
Mn	mg l^{-1}	0.54	0.00	0.05	0.02
Fe	mg l^{-1}	0.21	0.06	0.10	0.00

SD, standard deviation.

it should be mentioned that the streams described by Kram et al. (2012) are located in an area less affected by human activities. Thus, we can assume that the elevated values are caused by the nearby road and human settlement. The excessive amount of Cl is most likely caused by the extensive use of antifreeze salt (used to keep the road surface clear in winter months), as has also been reported, e.g. by Ramakrishna and Viraraghavan (2005).

Hydrobiological analysis. A total of 30 samples from four substrate types were collected. The total number of samples of each substrate type, irrespective of section (A or B), were pavement (n = 13), sand (7), natural (5) and compound stones (5).

A significant relationship between taxonomic richness and faunal abundance was revealed in section B (Pearson correlation coefficient $r = 0.85$, $P < 0.0001$, $R^2 = 70.8\%$, $n = 15$), whereas no such pattern was found in the new section A (Pearson correlation coefficient $r = 0.13$, $P = 0.64$, $R^2 = 5.9\%$, $n = 15$). This difference is due to the fact that several common taxa such as Trichoptera (Sericostomatidae

and Hydropsychidae) and Oligochaeta (Tubificidae) varied highly in abundances among the samples in the A section. In contrast, these taxa almost absented in the B section. As at least one of the aforementioned relationships was statistically significant, we used only taxonomic richness for statistical testing of the effect of a type of channel restoration on benthic fauna richness. This approach based on a more conservative parameter reduces the effects of microhabitat proportions on particular sites where the animals preferring appropriate habitat could concentrate. On the other hand, the approach with emphasis on abundance could mask the species richness. The effect of channel type on taxonomic richness was found significant (t-test: $t = 3.73$, $df = 27.9$, $P < 0.001$) as the mean taxonomic richness achieved $12.5 \pm$ standard error (SE) 0.76 in section A but only $6.8 \pm$ (SE) 0.93 in section B. Similarly, skewed differences were obtained for faunal abundances [$60.7 \pm$ (SE) 5.62 in section A vs $23.9 \pm$ (SE) 5.81 in section B], all suggesting much richer and more abundant invertebrate benthic communities in the stream revitalized by the new method (Figure 10). The mean values (bars) and SEs (whiskers) are indicated.

In addition, an analysis was made of the effects of substrate type (paving, natural, stones and sand) on taxonomic richness and faunal abundance. The richest was the ‘natural’ habitat, as $14.8 \pm$ (SE) 1.48 families were found in this environment, followed by stones [$12.6 \pm$ (SE) 0.36] and sandy habitats [the same number of 13 families was found in the two sites available in section B and $10.2 \pm$ (SE) 0.87 in section A]. The poorest pavement was inhabited by only $5.8 \pm$ (SE) 0.81 (Figure 11). The only sandy habitat was present in both the newly restored section A (‘sand new’) and the old-style treated section B (‘sand old’) in Figure 11. In the natural habitat, the most represented (numerous) group was Plecoptera, with more than one half of all collected specimens. Similarly, Chironomidae dominated in the sandy habitat. However, Plecoptera and Ephemeroptera

rarely appeared in the sand habitat. Trichoptera occurred across all the habitats.

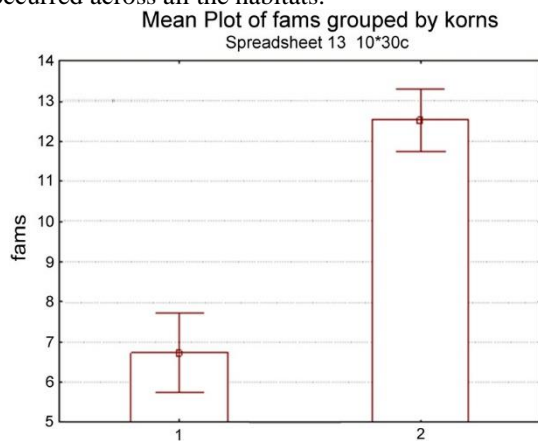


Figure 10: Numbers of detected families of benthic invertebrates at 15 sampling sites on the 'old-style' treated reach (1) and on the newly revitalized reach (2) in the Jindrichovicky Brook, October 2011.

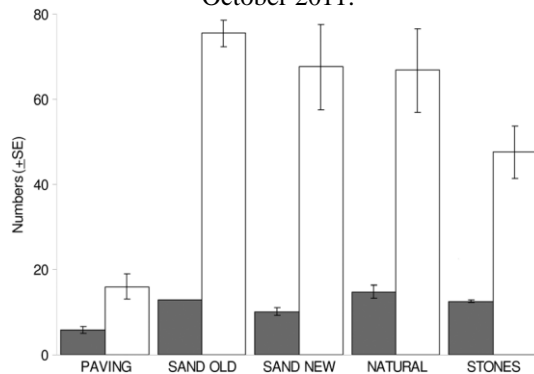


Figure 11: Numbers of families (dark bars) and specimen abundances (white bars) found in the samples collected in the Jindrichovicky Brook, October 2011.

The habitats also differed in abundance numbers. While the average total abundance value was 65–75 specimens, one sample 0.1 m² in the natural and sand habitats containing around 48 specimens on 0.1 m² was found in the stone habitat and only about 16 specimens on 0.1 m² in the pavement habitat (Figure 11).

Finally, we tested the effects of restoration type (new or old) and also substrate type (natural, sand, stones and paving) on the composition of the benthic communities. In this analysis, restoration type and sand substrate were found to be key factors explaining the variation in family occurrence (Table VIII). The compounded stones, paving and natural, played a minor role in our data. The importance of sand is due to the high occurrence of some Diptera larvae (Chiromiidae and Limoniidae) and Oligochaeta (Tubificidae) in this habitat.

Some less abundant taxa (Odontoceridae and Sphaeriidae) also showed an affinity with the sand substrate. Baetidae, Limnephilidae and Perlidae

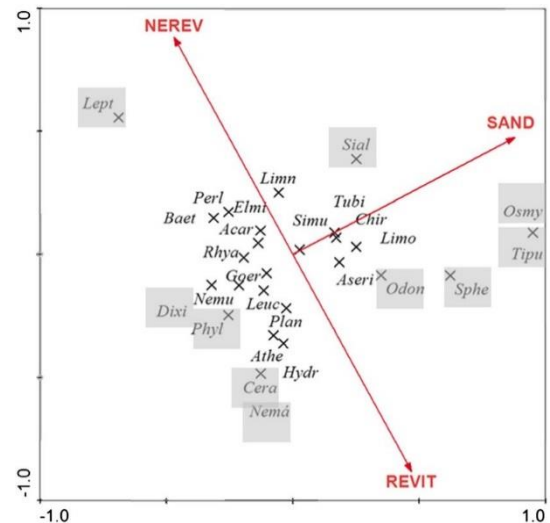


Figure 12: Ordination diagram of canonical correspondence analysis describing associations between the composition of benthic invertebrate communities, restoration type and habitat in the Jindrichovicky Brook, October 2011.

showed an association with the not fully restored type B (Figure 12). The centroids of the animal taxa positions in Figure 12 are indicated using abbreviations (full names available in Table VII). The groups marked in bold type had dominance >1%. The directions of significant variables (sandy habitat 'SAND' and restoration type 'NEW' vs 'OLD') in the framework of the first two ordination axes are visualized. A global permutation test for all canonical axes showed a significant result (for the statistical output, see Table VIII).

DISCUSSION

This paper has two interconnecting parts: hydraulic and ecological. The hydrological and hydraulic conditions form environmental conditions for benthic communities. We do not speak about living conditions for fish, as the study area is the head water of the Jindrichovicky Brook, where its upper part is still cut off by the lower edge of section B. This section is not yet open for fish, because of the insuperable bottom drop system. Therefore, the relations between sections A and B concerning the hydraulics and the hydrobiology of macrozoobenthos can be discussed. The depiction of the course of the water table in longitudinal profile (Figure 9) offered an interesting comparison of the simulation results for the two applied models. Figure 9 shows some differences in the computation of the water table, which appear in each step (steps 1 and 4 in the direction opposite to the water flow). In this profile, we may also identify the difference in computed water table height, where it is shown that the HEC-RAS model indicates mostly higher values (though the difference is very small). We may also identify wave undulation computed by means of the SRH-2D

Table VII. A list of the macroinvertebrate taxa identified in the samples.

Order/*higher taxonomical unit	Family	Number of individuals	
Plecoptera	Perlodidae	15	
	Nemouridae	45	
	Leuctridae	118	
Ephemeroptera	Baetidae	126	
	Leptophlebiidae	1	
Diptera	Chironomidae	293	
	Tipulidae	1	
	Simuliidae	26	
	Dixidae	5	
	Ceratopogonidae	1	
	Limoniidae	71	
	Athericidae	19	
	Sericostomatidae	170	
	Odontoceridae	11	
Goeridae	21		
Trichoptera	Limnephilidae	50	
	Hydropsychidae	28	
	Rhyacophylidae	18	
	Phylopotamidae	10	
	unidentified pupas	76	
	Megaloptera	Sialidae	6
	Neuroptera	Osmyliidae	1
	Tricladida/*Turbellaria	Planariidae	42
Veneroida/*Bivalvia	Sphaeriidae	8	
*Oligochaeta	Tubificidae	63	
*Hydracarina	—	15	
*Nematomorpha	—	1	
Total		1269	

model beneath each step, which of course could not be assessed in the 1D model. From the distance between each of the steps, it may be assessed that the HEC-RAS model records the course of the water table development adequately. An advantage of the SRH-2D model, despite its complexity in calculation, is only seen when the flow manifests higher morphological diversity (e.g. steps in close succession with pools of different depths and obstacles to flow directly in the channel) or in a detailed study of the hydraulic structure of each cross section. Hence, a complicated unsteady flow can be solved much better by a 2D (SRH) model, when a

wide spectrum of flow (from Q330d to Q100) can be simulated and nature-close hydraulic structures can be designed adequately for local conditions. Concluding, HEC-RAS as a 1D model is neither able to simulate reliably flow velocities, water depth and shear stress in complex cross sections nor in sections with hydraulic jumps downstream of weirs or drops. SRH-2D would definitely yield more profound results.

The differences in the composition and the quantity of benthic fauna between the two channel types are evident. Both the metrics are positively skewed towards higher values in new, semi-natural torrent improvement, although the torrent control was implemented less than 5 years ago there, whereas the interventions in the old section were carried out much earlier (in the 1970s). As far as the presence of microhabitats is concerned (sand deposits and heterogeneity of the bottom caused by disturbances), these should theoretically be much more developed in the old channel than in the new channel. This could be the reason why some groups (Baetidae and Limnephilidae) occupy the paving substrate in the old channel with relative high density. A thin sand layer, locally established on the surface of the paving in the old channel, is a particularly attractive habitat. It can be assumed that the newly modified channel will also continue to develop and that the differences in the composition of the macrozoobenthos will increase in years to come.

Sites with different bottom substrates showed different compositions of benthic fauna. Especially, the sandy deposits differed from the other habitats. This is in harmony with Wetzel (Wetzel, 2001), who characterized porous sediments as an environment where the maximum macroinvertebrate density is commonly found. Thus, the presence of sandy pools under the embankments proved to be favourable for the variety and complexity of the benthic community. Stones contributed less to the faunal richness of a new

Table VIII. Summary results of the forward selection procedure in canonical correspondence analysis of the effect of the predictors on the taxonomic composition of benthic communities in the studied system.

Ordination axis			1	2	3	4
Variance explained by species data			0.151	0.078	0.185	0.149
Predictor	F ^a	P ^a	Predictor – axes correlation matrix			
Non/revitalized section	1.98	0.0050	0.357	0.733	0.167	0.070
Sand	3.03	0.0020	0.733	0.282	0.265	0.042
Natural	1.20	0.2378	0.336	0.603	0.271	0.214
Paving	0.92	0.5144	0.492	0.635	0.187	0.093
Stone	0.69	0.8332	0.062	0.291	0.391	0.369
Test of model			Axis 1		All axes	
F-value			3.354		1.841	
P			0.001		0.0008	

^a Results of a Monte Carlo permutation test.

channel, and their contribution to the whole fauna variability is similar to the contribution of a natural bottom. However, this habitat is substantially better for fauna than 'old paving'. We recommend this way of stabilizing the channel, when necessary.

The differences among fauna from separate habitats are caused not only by the bottom substratum. Other abiotic factors (e.g. Froude number, water velocity and water depths) can also play an important role (Doledec et al., 2007; Pastuchova et al., 2010), but they have not been analysed here because of their close connection with the habitats. In conclusion, the presence of different stretch types in a restored stream channel proved to be important for increasing the taxonomical richness of the benthic community, and each of the habitats contributed to its beta diversity. Our study has shown that suitable improvement of the bottom structure during restoration is important not only in bigger rivers and streams but also in small low-order streams such as the Jindrichovicky Brook.

The hydrobiological analysis results fully reflect the assumption from the hydraulic simulation of the flow conditions in sections A and B, computed by the SRH-2D model. More uniform geomorphological conditions in section B expressed by hydraulic properties, i.e. depths, velocities and shear stress values, undoubtedly diminish a biodiversity of water organisms.

CONCLUSIONS

The initial aim of the nature-close adaptation measures when restoring a torrential river was to maintain the biota in the water environment of the Jindrichovicky Brook and also to stabilize the water direction and the water level of the channel. From our hydraulic computations, we deduced that the changes in the channel variables (longitudinal slope, hydraulic structures and roughness) have an impact on discharges that are less than Q_{50} . There are no further changes. In the proposed design, the depth and dimensions of the former channel were maintained, and hydraulic structures were selected in a way that would ensure biota migration and achieve higher biodiversity.

The depth of the water increases, because of the smaller longitudinal slope and the higher level of roughness. This will be demonstrable mainly in M -day discharges, which are the most important for biota. The flow velocity and the shear stress were decreased with regard to these changes. The volume of water increased because of the more articulated longitudinal profile and the deeper water level. The longitudinal profile followed the natural 'wavelike' longitudinal profile more closely, with alternating chutes and pools (step-pool profile). The pools above and below the cross-section structures create refuges for species during low level water situations.

Water aeration in frequent overfalls and particularly on boulder chutes, to some extent, increases the self-purifying capacity of the flow. The migration

mobility is maintained thanks to the low hydraulic structures and their structural arrangement. The aesthetic character of the landscape is a significant factor in a hydro-ecological assessment of the state of the water flow.

The macroinvertebrate sampling showed that the new type of channel adaptation is much more effective than the old type. The taxonomic composition and also the quantity of benthic fauna in the newly adapted river bed decisively outnumbers the same variables in the river bed with old improvements, mainly due to the occurrence of nature-close sections on the bottom, composed of a rich variety of habitats (sand, gravel and smaller and bigger stones). In addition, the presence of sandy deposits in this type of channel, particularly under the embankments, has proved to be favourable for the variety and complexity of the benthic families. Sections on the basin bottom composed of compounded stones were the least inhabited, from the point of view of the occurrence of macrozoobenthos, but they offer a far more favourable environment than the sequential stone pavement built in the old-style channel regulation.

Our study makes evidence available for decision makers dealing with nature-close torrent control.

ACKNOWLEDGEMENTS

The paper was supported by the Czech Ministry of Agriculture, National Agency for Agricultural Research (NAZV), Projects QI91 C008 Optimisation of technical erosion control measures and QJ1220033 Water regimes optimisation on the Morava river valley. The team of authors fully acknowledges this support.

REFERENCES

- Abbott MB, Refsgaard JC. 1996. Distributed Hydrological Modelling. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht.
- Allan JD. 1995. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. Springer: Dordrecht; 388.
- Aquaveo. 2010. Aquaveo SMS. Aquaveo: Provo, Utah, United States. <http://www.xmswiki.com/xms/SMS:SMS>.
- Beven KJ. 2006. Rainfall-Runoff Modelling. The Primer. John Wiley & Sons: Chichester.
- ter Braak CJF, Smilauer P. 2002. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5). Microcomputer Power: Ithaca.
- Brookes A, Shields FD, Jr. 1996. River Channel Restoration. J. Wiley & Sons: Chichester. ISBN 0-471-96139-6, 433 s.
- Brunner GW. 2010. HEC-RAS computer program (2010): version 5.1.v. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA95616-4687, USA.
- Chin A. 2003. The geomorphologic significance of

- step-pools in mountain streams. *Geomorphology* 55: 125–137.
- Chin A, Gregory KJ. 2001. Urbanization and adjustment of ephemeral stream channels. *Annals of the Association of American Geographers* 91: 595–608.
- Chin A, Anderson S, Collison A, Ellis-Sugai BJ, Hlatiner JP, Hogervorst JB, Kondolf GM, O'Hirok LS, Purcell AH, Riley AL, Wohl E. 2009. Linking theory and practice for restoration of step-pool streams. *Environmental Management* 43: 645–661.
- Comiti F, Mao L, Wilcox A, Wohl E, Lenzi M. 2007. Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology* 340(1–2): 48–62.
- Comiti F, Mao L, Lenzi MA, Siligardi M. 2009. Artificial steps to stabilize mountain rivers: a post project ecological assessment. *River Research and Applications* 25: 639–659.
- Computer Aided Design. 2012. AutoCAD Civil 3D, 2012 Manual. San Rafael: USA.
- Computer program. 2001. HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), version 3.0.1, III 2001.
- Cook AC. 2008. Comparison of One-dimensional HEC-RAS with Two-dimensional FESWMS Model in Flood Inundation Mapping. Purdue University: West Lafayette, Indiana.
- COUNCIL DIRECTIVE 98/83/EC. 3 November 1998. On the quality of water intended for human consumption.
- Diez-Hernandez JM. 2008. Hydrodynamic ecohydraulic habitat assessment aimed at conserving and restoring fluvial hydrosystems. *Revista Ingenieria E Investigacion* 28(2): 97–107.
- Doledec S, Lamoroux N, Fuchs U, Merigoux S. 2007. Modelling the hydraulic preferences of benthic macroinvertebrates in small European streams. *Freshwater Biology* 52: 145–164.
- Gordon ND, McMahon TA, Finlayson BL. 1996. *Stream Hydrology – An Introduction for Ecologists*. J. Wiley & Sons: W. Sussex, England, 526 s. Hauer C, Mandlbürger G, Habersack H. 2009. Hydraulically related hydro-morphological units: description based on a new conceptual mesohabitat evaluation model (MEM) using lidar data as geometric input. *River Research and Applications* 25: 29–47.
- Hradek F, Kovar P. 1994. Computation of design rainfall intensity. *Vodni hospodarstvi (Water resources)* 11: 49–53.
- Jahring SC, Lorenz AW. 2008. Substrate-specific macroinvertebrate diversity patterns following stream restoration. *Aquatic Sciences* 70: 292–303.
- Just T, Matousek V, Fischer D, Karlik P. 2005. Water restorations and their role in flood control. 3. ZO ČSOP Horovice region, 359 p.
- Kovar P. 1992. Possibilities of determining design discharges and small catchments using KINFIL model. *Vodohospodarsky casopis (Water Resources Journal)* 40: 197–220.
- Kovar P, Krovak F. 1998. DOS-T 04.02.01. Recommended Technical Standard. Riverengineering, CKAIT, 13 pp.
- Kovar P, Krovak F. 2002. Torrent control, teaching materials FLD CULS. ISBN 80-213-0888-5, 45 pp.
- Kovar P, Krovak F. 2011. Nature close torrent control in Ore Mountains. IAHS Conference HydroEco, Proceedings, Vienna, 1.–5. 5. 2011, s. 386.
- Kovar P, Cudlin P, Herman M, Zemek F, Korytar M. 2002. Analysis of flood events on small river catchments using the KINFIL model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics SAV SR, Bratislava* 50(2): 157–171.
- Kozarek JL, Hession WC, Dolloff CA, Diplas P. 2010. Hydraulic complexity metrics for evaluating in-stream brook trout habitat. *Journal of Hydraulic Engineering-asce* 136(12): 1067–1076.
- Kram P, Hruska J, Shanley JB. 2012. Streamwater chemistry in three contrasting monolithologic Czech catchments. *Applied Geochemistry* 27: 1854–1863.
- Lai YG. 2008. SRH-2D Version 2: Theory and User's Manual. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation: Denver.
- Lange G, Lecher K. 1993. *Gewässerregulung, Gewässerpflege*. Paul Parey: Hamburg und Berlin, ISBN 3-490-17916-1.
- Lellak J, Kubicek F. 1991. *Hydrobiology*. Karolinum, Praha, 260 s. Lenzi MA. 2002. Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in northern Italy. *Geomorphology* 45(3–4): 243–260.
- Morel-Seytoux HJ, Verdin JP. 1981. Extension of the SCS rainfall runoff methodology for ungaged watersheds. Report FHWA/RD-81/060, U. S. National Technical Information Service, Springfield, Virginia.
- Morgan RPC, Nearing MA. 2011. *Handbook of Erosion Modelling*. NSERL, Wiley-Blackwell: Chichester.
- Novak L, Iblova M, Skopek V. 1986. *Riparian Vegetation*. SNTL: Praha. Pasternack GB, Bounrisavong MK, Parikh KK. 2008. Backwater control on riffle-pool hydraulics, fish habitat quality, and sediment transport regime in gravel-bed rivers. *Journal of Hydrology* 357(1–2): 125–139.
- Pastuchova Z, Greskova A, Lehotsky M. 2010. Spatial distribution pattern of macroinvertebrates in relation to morphohydraulic habitat structure: perspectives for ecological stream assessment. *Polish journal of Ecology* 58: 347–360.
- Peckarsky BL. 1984. Sampling the stream benthos. In *A Manual on Methods for Assessing Secondary Productivity in Freshwaters*, 2nd edn, Downing JA, Rigler FH (eds). IBP Handbook #17. Blackwell Scientific Publications: Oxford; 131–160.
- Ponce VM, Hawkins RH. 1996. Runoff curve

- number: has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering* 1(1): 11–19.
- R Development Core Team. 2009. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing: Vienna.
- Ramakrishna DM, Viraraghavan T. 2005. Environmental impact of chemical deicers – a review. *Water, Air, and Soil Pollution* 166: 49–63.
- Roni P, Bennett T, Morley S, Pess GR, Hanson K, Van Slyke D, Olmstead P. 2006. Rehabilitation of bedrock stream channels: the effects of boulder weir placement on aquatic habitat and biota. *River Research and Applications* 22(9): 967–980.
- Samaj F, Valovic J, Brazdil R. 1983. Daily depths of extreme rainfalls in 1901–1980. *Sbor. prac SHMU, Alfa, Bratislava*.
- Singh VP. 1996. *Kinematic Wave Modeling in Water Resources: Surface- water Hydrology*. John Wiley & Sons, Inc.: New York; 1399. ISBN 0-471-10945-2.
- Sundermann A, Antons C, Cron N, Lozenz AW, Hering D, Haase P. 2011. Hydromorphological restoration of running waters: effect on benthic invertebrate assemblages. *Freshwater biology* 56: 1689–1702
- Tejnecky V, Bradova M, Boruvka L, Nemecek K, Sebek O, Nikodem A, Zenahlikova J, Rejzek J, Drabek O. 2013. Profile distribution and temporal changes of sulphate and nitrate contents and related soil properties under beech and spruce forests. *Science of the Total Environment* 442: 165–171.
- U.S. SCS. 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. U.S. Soil Conservation Service, Technical Release 55(13), USDA, Washington, D.C.
- US Army Corps of Engineers. 2000. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS – Technical Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center – US Army Corps of Engineers: Davis, CA.
- USDA SCS. 1972. *National engineering handbook – section 4: hydrology*. Washington DC. ISBN 9787368433.
- Vassova D, Kovar P. 2011. Program DES_RAIN. Available on <http://fzp.czu.cz/vyzkum/>.
- Vrana I, Vanicek J, Kovar P, Brozek J, Aly S. 2012. A group agreement- based approach for decision making in environmental issues. *Environmental Modelling & Software* 36(2012): 99–110.
- Waal LC, Large ARG, Wade PM. 2000. *Rehabilitation of Rivers*. J. Wiley & Sons. ISBN 0-471-95753-4, 331 s.
- Wetzel RG. 2001. *Limnology*. 3th edition. Academic Press: San Diego; 1006 pp.
- WFD EC 2000/60/ES. 2000. Directive of the European Parliament and the council establishing a framework for community action in the field of water policy, 2000/60/ES.
- Wilcox AC, Peckarsky BL, Taylor BW, Encalada AC. 2008. Hydraulic and geomorphic effects on mayfly drift in high-gradient streams at moderate discharges. *Ecohydrology* 1: 176–186
- Yu G, Wang Z, Zhang K, Duan X, Chang T. 2010. Restoration of an incised mountain stream using artificial step-pool system. *Journal of Hydraulic Research* 48(2): 178–187.

5.2 STUDIE 2: *Changes in Runoff regime. The Lomnice catchment case study*

Tereza Bažatová, Jana Šimková

Soil & Water Res., 2014 (10): 40–48.

(vlastní podíl 50%)

Charakter srážko-odtokového procesu povodí zásadně ovlivňuje distribuci vody v krajině. Tato práce předkládá analýzu trendů srážko-odtokového režimu povodí řeky Lomnice (Česká republika, Jihočeský kraj) metodou jednoduchých a podvojných součtových čar, doplněnou o analýzu vývoje teplotních a sněhových poměrů. Součástí rozboru byla i analýza bilance povodí ve vybraných letech pomocí hydrologického modelu Bilan.

Cílem práce bylo zjištění, zda v daném povodí došlo od 70. let 20. století ke změnám trendu srážko-odtokového režimu a zda mohou být příčinou těchto změn antropogenní zásahy v povodí.

Použité metody jednoduchých a podvojných součtových čar (doplněné o analýzu sněhových a teplotních poměrů) potvrdily existenci určitých změn trendů odtoku v modelovém povodí Lomnice. Metoda jednoduchých a podvojných součtových čar poměrně jednoduše umožňuje stanovit časový okamžik, ve kterém došlo k případnému narušení homogenity řady. Ovšem touto metodou nelze zjistit příčinu tohoto porušení. Tato problematika je námětem pro další studii. K diskuzi nabádá rovněž otázka, zda je 36letá řada průtoků a srážek dostatečně dlouhá pro stanovení závěrů. Delší řada by měla větší vypovídající hodnotu, ovšem zkoumání dřívějších historických řad průtoků a srážek by bylo problematické kvůli větší absenci dat. S výběrem dat souvisí i další námět pro výzkum, a sice analýza více klimatických stanic ve vztahu ke změně odtoku, výšce sněhové pokrývky a vývoje počtu dní se sněhovou pokrývkou.

Dosažené závěry však přináší více prostoru pro diskuzi. Do jaké míry jsou zaznamenané změny výsledkem dlouhodobého vývoje a do jaké míry jsou příčinou změn antropogenní zásahy do povodí v podobě změny land use? V minulém století prošlo území České republiky násilnou restrukturalizací krajinných složek, což se podle výsledků projevilo i v povodí Lomnice. Na význam lidských aktivit v povodí poukazují především rozdíly v bilanci povodí horní Vltavy a jeho dílčího povodí Lomnice. V extrémních letech srážkový režim malého povodí kopíruje povodí velké a drobné výkyvy se v celkovém

pohledu ztrácejí. Znatelnými se stávají v případě normálních let (viz zde rok 2004), kdy jsou více patrné odchylky od průměru. Toto nabádá k závěru, že čím menší povodí, tím více je srážko-odtokový režim ovlivněn antropogenními zásahy a samozřejmě i lokálními podmínkami (geografická poloha, členitost, místní atmosférická situace apod.). Námětem pro další výzkum je potvrzení této teorie na dalších případových studiích.

Z výsledků analýzy povodí Lomnice je jasně patrných několik změn režimu odtoku, které nesouvisí se srážkovými úhrny. Společně s výsledky srovnání hydrologické bilance dílčího povodí Lomnice s bilancí povodí vyššího řádu horní Vltavy pak tato data vedou k následujícím závěrům:

- 1) V povodí Lomnice došlo ke změně trendu odtokového režimu.
- 2) Charakter odtokového režimu povodí Lomnice je odlišný od režimu povodí vyššího řádu (Otavy, horní Vltavy).
- 3) Hlavní příčinou změn odtokového režimu v povodí Lomnice byla zřejmě antropogenní činnost, jejíž vliv se v rámci větších povodí (povodí vyššího řádu) vytrácí. Při plánování trvale udržitelného využívání vodních zdrojů je tudíž nutné zvažovat vliv lidského působení v podobě změny land use nejen v globálním, ale také v lokálním měřítku.

Changes in Runoff regime. The Lomnice catchment case study

Tereza Bažatová, Jana Šimková

Česká zemědělská univerzita v Praze, FŽP, KBÚK

Kamýcká 1176, Praha 6, 165 21

Soil & Water Res., 2014 (10): 40–48.

Abstract

The distribution of water in the landscape is essentially influenced by the nature of the catchment rainfall-runoff process. Firstly, this paper presents an analysis of trends in the rainfall-runoff regime of the basin of the River Lomnice (South Bohemia, Czech Republic), using a single nad double mass curve method. Secondly, the analysis of the rainfall-runoff regime is supplemented by an analysis of the evolution of temperature and snow conditions. Finally, a water balance analysis is performed for three selected years, using the Bilan hydrological model.

The aim of this paper was to find out 1) whether any changes have occurred in the trend of the rainfall-runoff regime of the catchment since 1970, and 2) to what extent any changes may have been caused by anthropogenic activities in the catchment.

The results show several changes in the runoff scheme that are not related to the amount of precipitation. This statement follows from the comparison of single mass curves of precipitation and discharges. A comparison of data for the hydrological balance of the Lomnice River basin, the River Otava and the Upper Vltava – a higher order stream – led to the following conclusions: 1) There has been a change in the trend of the Lomnice River runoff regime. 2) The runoff regime of the Lomnice basin differs from the regime of a higher order basin (the Otava, the Upper Vltava). 3) The changes in the runoff regime in the Lomnice basin were probably caused mainly by anthropogenic activities, the influence of which disappears within the larger basin (a higher order catchment area). Therefore, when planning sustainable water resources management, it is necessary to consider the impact of human activities not only globally but also at the local scale.

Keywords: the Bilan model, mass curve method, hydrological regime, water balance

INTRODUCTION

The catchment rainfall-runoff process has fundamental effects on the distribution of water in the landscape. This complex mechanism is influenced by many factors (climate, physical

geographical, and anthropogenic). Studies of the development of rainfall-runoff processes in the catchment play a pivotal role in planning the sustainable use of water resources.

Changes in runoff regime due to anthropogenic changes have been mentioned by many authors (LANGHAMMER 2010; BAE (2008); JUCKEM (2008); KAŇOK 1997; etc.)

This paper builds on the co-author's study of runoff in the Lomnice basin (BAŽATOVÁ 2009), and supplements the findings of scientific studies carried out on the Otava basin (KLIMENT *et al.* 2011; VÁŇOVÁ and LANGHAMMER 2011). Most rivers in the Czech Republic have been anthropogenically modified, particularly during the 20th century. In the Lomnice basin, the most extensive river training interventions were carried out in the 1980s, and many considerable drawbacks of these treatments revealed themselves in the course of the next few years or decades. The natural hydrological regime in the country was disrupted by river training, as has now become apparent particularly from overbanking during floods. The intensity of anthropogenic activities has grown hand-in-hand with the overall intensification of land use, from the headwaters towards the lowland areas, where there are larger settlements and the land use is predominantly agricultural (BAŽATOVÁ 2009).

The aim of this paper is 1) to estimate the trends in the Lomnice rainfall-runoff processes using single and double mass curves and the Bilan model, 2) to prove whether anthropogenic activities (particularly changes in land use) play a key role in the catchment.

The hydrological and climatic data were provided by the České Budějovice branch of the Czech Hydrometeorological Institute (see the next section).

MATERIAL AND METHODS

Studied area. The Lomnice is an important stream, in terms of water management, and diverts a significant amount of water to the Otava. The Lomnice basin seems to be very diverse from a geographical point of view, and the nature of the discharge is influenced by many factors.

The Lomnice springs on the slopes of Třemšín (the Brdy Mountains) at an elevation of 733 m, and flows from the left into the Otava, not far from the Zvíkov Castle at an elevation of 346 m. (ZÍDEK 1965).

There have been numerous anthropogenic interventions in the history of this basin. Its character has been transformed by fish farming, agriculture, water management, and the emergence and development of settlements. Historically, floods posed no special threat in

the Lomnice basin. However, there were no flood records of significant value from a hydrological point of view until the second half of the 19th century, when regular water level measurements began.

The mass curves method. The data series of average annual discharges and precipitation in the Lomnice catchment were used to create single and double mass curves. The corresponding pairs of successive sums of the data series represent the coordinates of points in a rectangular coordinate system, where a straight line drawn through determines the relationship between the rows. Where there are significant deviations from the linear shape, or where there are breaks, changes of runoff regime can be assumed (BEVEN 2011).

In addition, an analysis of the runoff trends was carried out for the period covered by water level records - i.e. 1975-2011. We then observed the evolution of the percentage of runoff and rainfall, and also the timing of the average discharge in each month and in each season. The runoff development in the basin was further supplemented by an analysis of the evolution of the air temperature and snow conditions. Variations in the development of air temperature and snow conditions are natural factors affecting the hydrological balance of the catchment. Nowadays, they are often discussed in the context of global warming (KLIMENT et al. 2011).

Land use data of the Lomnice basin from the Charles University in Prague (LUCC 2013), map data of water flow regulation from the Ministry of Agriculture of the Czech Republic (2012), CORINE 1990 and 2000 (CENIA 2013) were used for an assessment of the management interventions in the Lomnice basin.

Estimation of the water balance. Computation of the water balance in the catchment provides an essential tool for evaluating the occurrence and distribution of water in the basin. The water from atmospheric precipitation is distributed quantitatively into particular components of the balance (VACULÍN and SOUKALOVÁ 2003). This process is significantly affected by the climate conditions in the basin, and vice versa.

The Bilan hydrological model (KAŠPÁREK and NOVICKÝ 2004) was used to assess the water balance in the Lomnice basin for three selected characteristic years (2002, 2003 and 2004). These years were chosen to describe extreme behaviour of the basin in response to a very wet year (2002, high precipitation), a dry year (2003, low precipitation), and a normal year (2004, average precipitation). The results were compared with the outputs of the hydrological balance of the Czech Republic covering the same years (CHMI 2003, 2004, 2005) and long-term data on average precipitation amounts and discharges. The previous

25-year time series for each year were used for the long-term average values of the data: i.e. for 2002 the data from 1977 to 2001 were averaged, for 2003 the data from 1978 to 2002 were averaged, and for 2004 the data from 1979 to 2003 were averaged. The results were later compared with the long-term discharge at the Lower Ostrovec gauging station (Figure 7) and the percentage portion for each month in the total annual runoff (Figure 8).

The Bilan model can be classified as a deterministic, conceptual, lumped model. It was developed by the T. G. Masaryk Water Research Institute in Prague (WRI) to simulate components of the water balance of the catchment. It is primarily used for assessing the impacts of climate change on the water regime and on supplies of surface and groundwater (VIZINA et al. 2010; HORÁČEK et al. 2008; ŠIMKOVÁ 2012). A detailed description of the model is provided by the Bilan model manual, compiled by WRI (WRI 2011).

The model simulates the daily or monthly series components of the hydrological balance. The input variables are the data series for rainfall P (mm), discharge measured at the outlet closure station R (mm), air temperature T ($^{\circ}\text{C}$), and relative air humidity H (%) in daily or monthly steps. To determine the parameters of the model (for a detailed list, see the manual – KAŠPÁREK and NOVICKÝ 2004) an optimization algorithm is used, which minimizes the value of the selected compliance criterion of the model output and observed data. The average absolute deviation of modelled and observed runoff data is used for the optimization criterion (VACULÍN and SOUKALOVÁ 2003). The values of the parameters for the Lomnice basin are: soil moisture storage capacity $S_{pa}=147.7$ mm; snow melting factor $D_{gm} = 15.2$

(-); factor for calculating the quantity of liquid water available on the land surface under winter conditions $D_{gw} = 13.8$ (-); parameter for the rainfall-surface runoff equation (direct runoff) $A_{lf} = 0.000779$ (-); recharge under summer conditions $S_{oc} = 0.699$ (-); recharge under conditions of snow melting $M_{ec} = 0.799$ (-), parameter for recharge under winter conditions, controlling the outflow from the groundwater storage (base flow) $W_{ic} = 0.342$ (-); $G_{rd} = 0.499$ (-).

The daily flow values, precipitation, snow depth, air temperature, sunshine duration, relative air humidity and wind speed were used as input data for the analyses. The hydrological data for the period from 1975-2011 come from the Lower Ostrovec gauging station (on the Lomnice) and the climatic data (1976-2011) come from the Kocelovice climate station (Figure 1). The data were provided by the Czech Hydrometeorological Institute, České Budějovice.

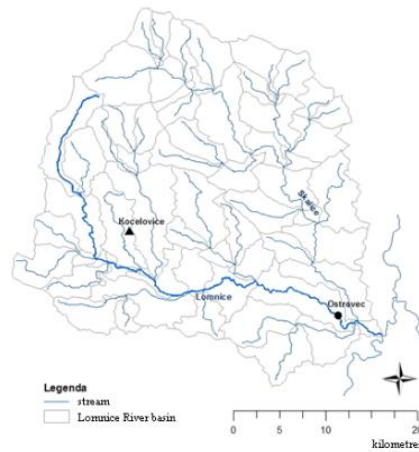


Figure 5: Location of the Kocelovice climate station and the Lower Ostrovec gauging station

RESULTS

Analysis of changes in the runoff regime by single and double mass curves. The method of single and double mass curves was used for detecting significant changes in the runoff regime. The curves were created on the basis of the average annual precipitation and discharge values. The cumulative precipitation (Hr) series was created to identify potential climate changes in the basin that could affect runoff conditions.

The progress of the mass curve of discharges (Lower Ostrovec gauging station) is captured in Figure 2. A deflection of the line from linear shape indicates a change in the development of the runoff. Figure 2 shows that in the period 1979-1982 there was an increase in the discharge, and subsequently a decline in 1985. The same pattern characterizes the period from 1985 until 1992, where 1988 is considered a breakthrough year (since there was again a decrease in the discharge in that year). The growing and decreasing tendencies of the slopes are comparable.

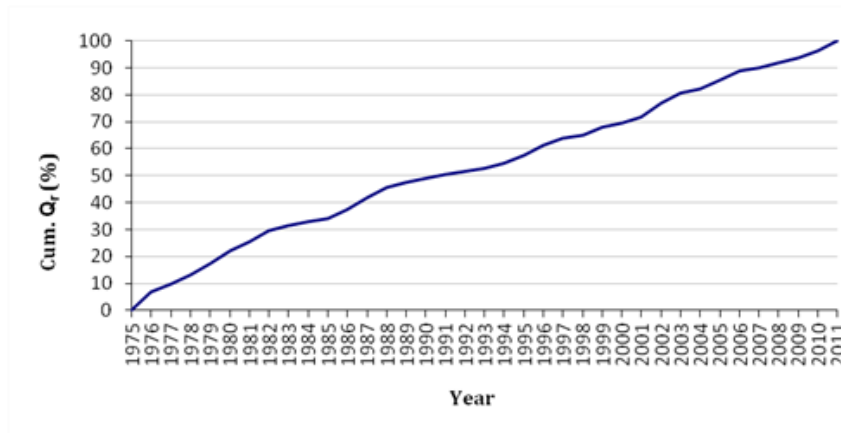


Figure 6: Single mass curve of the annual discharges Q_r (%) (Lower Ostrovec gauging station)

When comparing the mass curve of discharges and precipitation (Figure 3), it is clear that the observed increase in the flow is not closely related with precipitation, i.e. the period from 1985 until 1992 cannot be considered extremely rich in rainfall. The single mass curve for H_r is almost linear, with hardly any significant deviations.

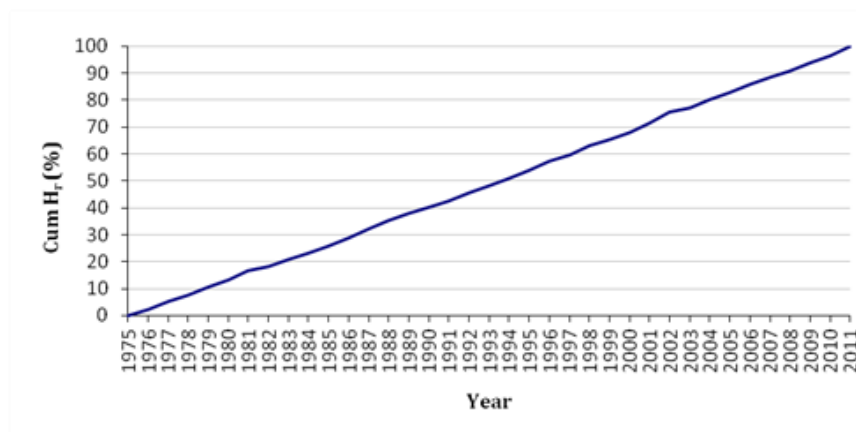


Figure 7: Single mass curve of annual precipitation H_r (%) (Kocelovice climate station)

To clarify the situation and specify the results, a double mass curve of annual discharges and precipitation for the Lower Ostrovec station was compiled (Figure 4). The years in which there was a change in runoff (1979, 1982, 1985, 1988, 1992) have been graphically highlighted (with a square).

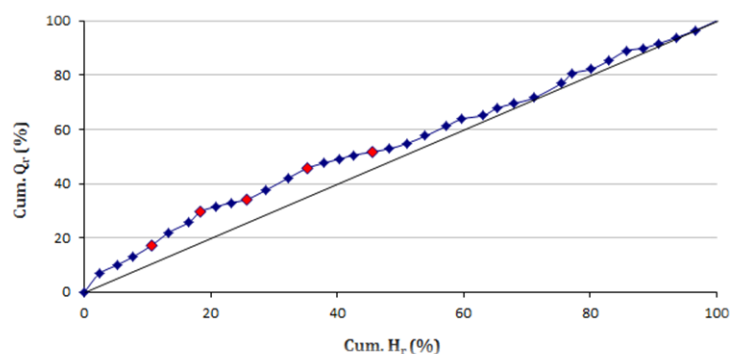


Figure 8: Double mass curve of annual discharges Q_r (%) and precipitation H_r (%) (Lomnice River)

Seasonal changes in runoff distribution. Changes in the distribution of runoff during the year were assessed on the basis of the percentage of discharge distribution and average flow rates in each month and season. The trend in the Lomnice basin (Lower Ostrovec station) is characterized by a decreasing discharge in winter and in summer, while increasing discharges are typical for spring and autumn (Figure 5). The largest increase in the year-round runoff in the Lomnice basin was recorded in March, and the largest decline was recorded in December (Figure 6).

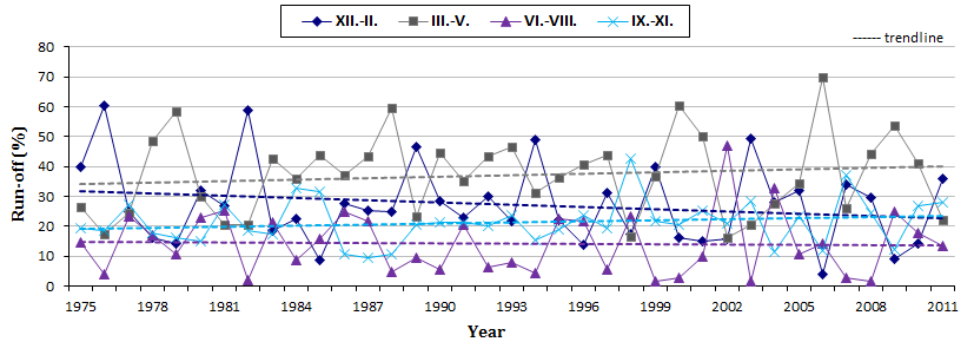


Figure 9: Seasonal trend in runoff development (1975 – 2011), (Lomnice River, Lower Ostrovec gauging station)

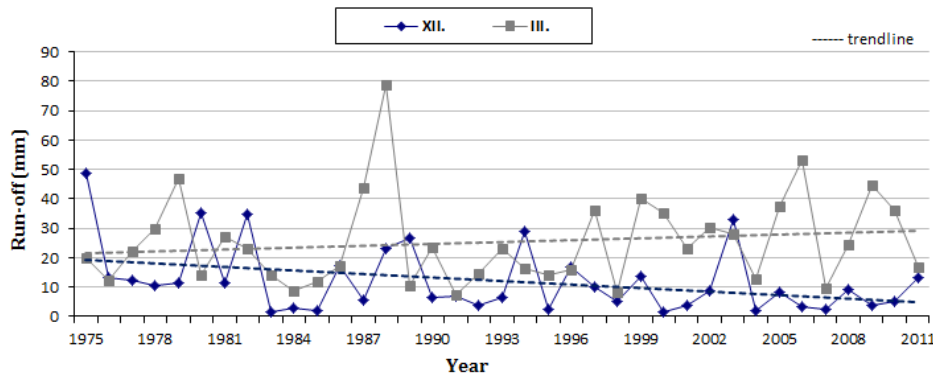


Figure 10: Trends in runoff development in March and December (1975-2011), (Lomice River, Lower Ostrovec gauging station)

The runoff distribution in the course of each year can also be assessed in terms of the chronology of monthly flows. These average monthly flows (Q_m) characterize the distribution in the course of the year (BENSON and MATALAS 1967). The regularity of this distribution can be expressed in long-term monthly flows. For the Lomnice station, these are calculated from 37 hydrological years. Monthly flows are influenced by climatic characteristics (particularly rainfall and temperature), which have a regular and long-term coverage. The monthly flow also cause gradual accumulation of snow and snowmelt, which influences the flow mostly in spring. Figures 7 and 8 clearly show the highest flow in the Lomnice in spring.

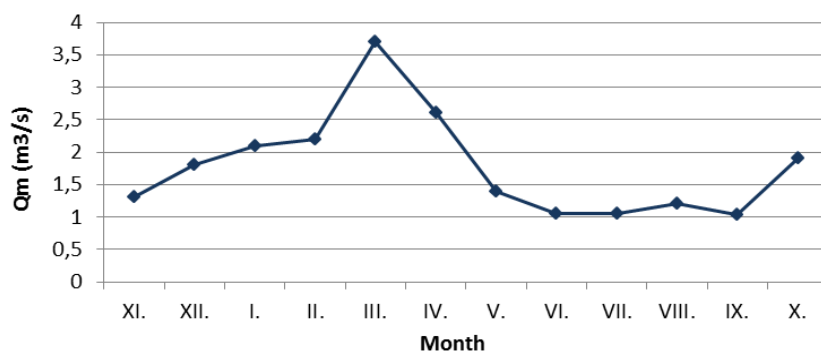


Figure 11: Long-term average flow for each month (1975-2011), (Lower Ostrovec gauging station)

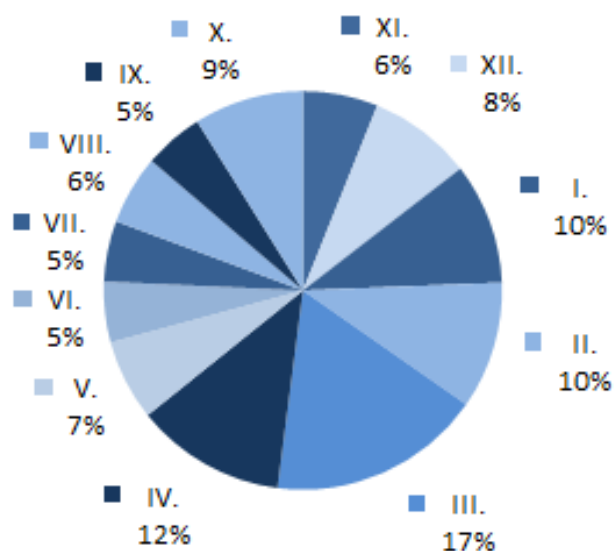


Figure 12: The proportion of the annual runoff for each month (1975-2011), (Lower Ostrovec gauging station)

At the same time, the proportion of monthly and seasonal precipitation totals remains at approximately the same level. The average annual precipitation from the Kocelovice station for the period 1976-2011 amounts to 554.9 mm. The wettest year by far was 2002 (905 mm), due to the extreme total precipitation in August of that year (209 mm).

Development of the air temperature and snow conditions.

Snow and thermal characteristics were calculated for the Kocelovice climate station. A 36-year data series (1976-2011) of air temperatures was analysed. A comparison of the average air temperatures for the period 1976-1993 and for 1994-2011 revealed an increase

from 7.3°C to 8.0°C. The most significant temperature increase occurred between 1996 and 2000, when the values rose from 6.2°C to 8.8°C (i.e. an increase of 2.6°C). The greatest increase in temperature was observed in January, February, April and May. The situation in terms of seasonal temperature variation is shown in Figure 9.

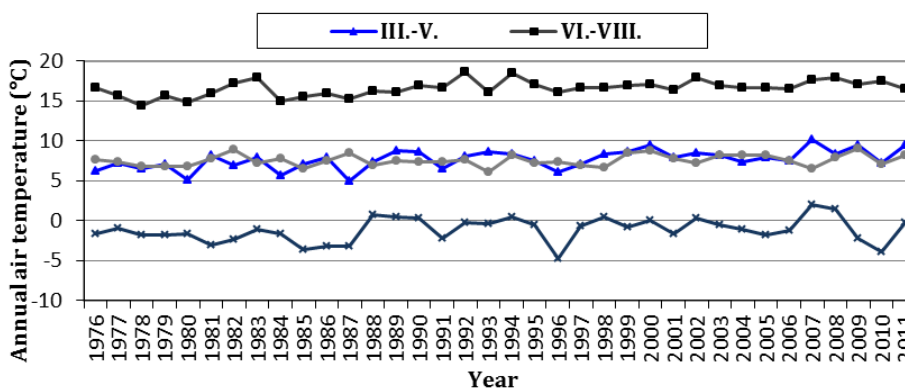


Figure 13: Development of average annual air temperature in each season (Kocelovice climate station)

In the period from 1976 to 2011, there was snow cover on an average of 65 days. When we compare the periods from 1976 to 1993 and from 1994 to 2011, as in the analysis of temperature conditions, it is found that the average number of days with snow cover is almost equal (65 and 66 days). However, there is an apparent fluctuation in the number of days with snow cover throughout the whole analysed period (Figure 10), where the maximum number of days with snow cover falls in 1996, 2006 and 2010. The highest average snow depth was recorded in January and February.

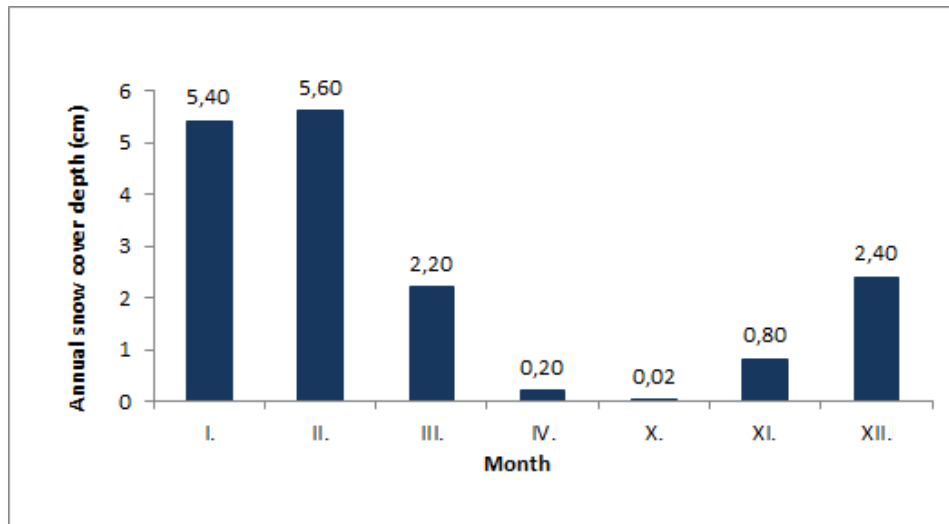


Figure 14: Average snow depth for selected months (1976-2011), (Kocelovice climate station)

The periods of increased flows in the Lomnice basin (1979-1982, 1985-1988), which were defined using the mass curves, can be characterized as moderate, in terms of temperature, with greater average snow depth and a larger number of days with snow cover. A study of headwater parts of the Otava (KLIMENT *et al.* 2011) has shown that there is a decrease in the number of days with snow cover at lower altitudes (Klatovy station – elevation 430 m.), and that this is compensated by an increase in winter runoff. An analysis of monthly flows between 1975 and 2011 in the Lomnice basin showed a decrease in runoff in the winter and summer months. Thus, the situation in the headwater areas of the Otava and in the Lomnice basin differ from each other. Increased spring and summer temperatures appear to contribute to a decline in runoff, especially during the summer months.

These periods (1979-1982, 1985-1988) correspond with large-scale management changes in the Lomnice basin. A study of contemporary maps indicates (Ministry of Agriculture 2012) that the largest river flow regulations were carried out between 1977 and 1990. The largest changes in land use were recorded between 1948 and 1990, when there was a decline by almost 6% in Agricultural Land Resources (ALR) (arable land, meadows, pastures and temporary grassland). In the same period, there was an increase in forested areas, urban areas and other areas. The highest proportion of the decline in ALR fell on arable land (-3%), while forested area increased by 1% and urban area increased by 0.5% in that period (LUCC 2013). A comparison between the data from the CORINE 2000 database and its previous version CORINE 1990 showed no significant changes in land use.

Estimation of the water balance.

Three characteristic hydrological years were selected for a description of the behaviour of the Lomnice basin (2002 - wet year, 2003 - dry year, 2004 - normal year). Individual components of the water balance are shown in Figure 11 (2002), Figure 12 (2003) and Figure 13 (2004). The results were compared with the water balance in the Upper Vltava basin carried out by the Czech Hydrometeorological Institute for the river basin (CHMI 2003, 2004, 2005) and the long-term average precipitation and runoff values in the Lomnice basin. The coincidence of the simulated and measured discharge records was evaluated as sufficient by the coefficient of determination $CD \geq 0.75$ and the coefficient of variation $CV \leq 0.25$ (LEGATES and MCCABE 1999; NASH and SUTCLIFFE 1970).

2002 was a year with very rich rainfall and discharges, characterized by large fluctuations. The spring runoff was affected by the melting of a comparatively high snow cover. Very low rainfall and discharges (one half of the long-term average) followed in April and May. Beginning in July, there was an increase in precipitation and runoff, and the peak was reached in August. The extreme values for the August runoff (almost twenty times the long-term average values) reflect the occurrence of catastrophic floods in August 2002, see the figures in Figure 3. Later in the year, there was below-average precipitation in September, but there were still noticeable remains of extreme runoff (three times the long-term average levels). There was rich rainfall in October, and the flows were still abundant (twice the long-term average levels) but with a declining trend (Figure 11).

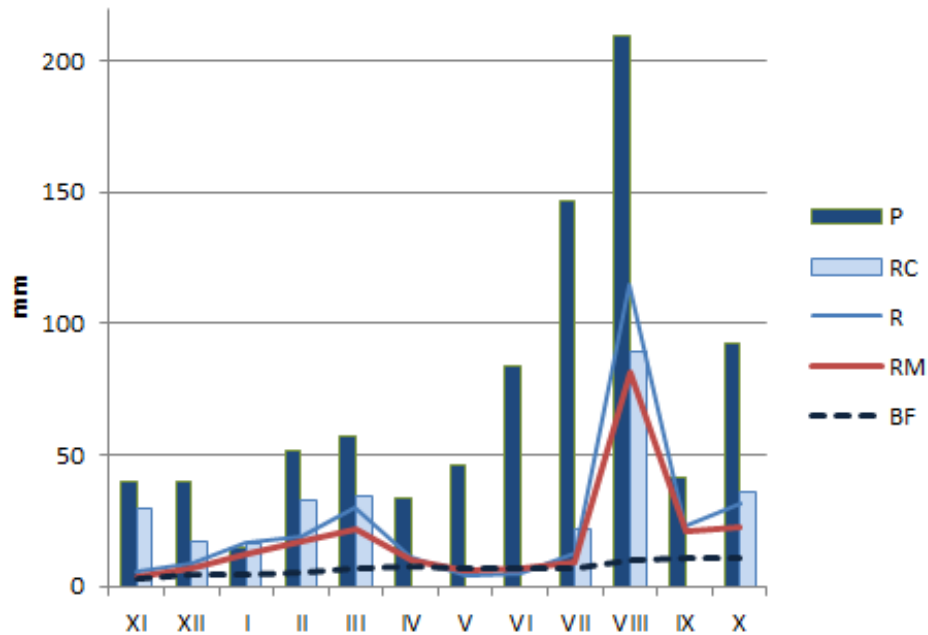


Figure 15: Water balance 2002 (wet year) of the Lomnice basin. P - precipitation, RC - groundwater recharge, R - measured runoff, RM - modelled runoff, BF - base flow (mm)

The rainfall-runoff regime at the beginning of 2003 was affected by the high saturation of the basin from autumn 2002 (twice the average precipitation levels in November, and six times the long-term average (hereinafter referred to as average) runoff in December). After this, the precipitation levels fell to normal and the runoff values were three times the average levels). The January 2003 flows were increased by snow melting to nearly four times the average level. In the following months, however, there was a season of extremely low rainfall (less than half of the average, with the exception of May, when the rainfall totals reached average values). This strongly affected the runoff regime, which was often less than a quarter of the long-term average (Figure 7). Overall, 2003 was considered a very dry year, as is confirmed by zero groundwater recharge from March onwards (Figure 12). An important role was also played by above-average air temperatures (Figure 9).

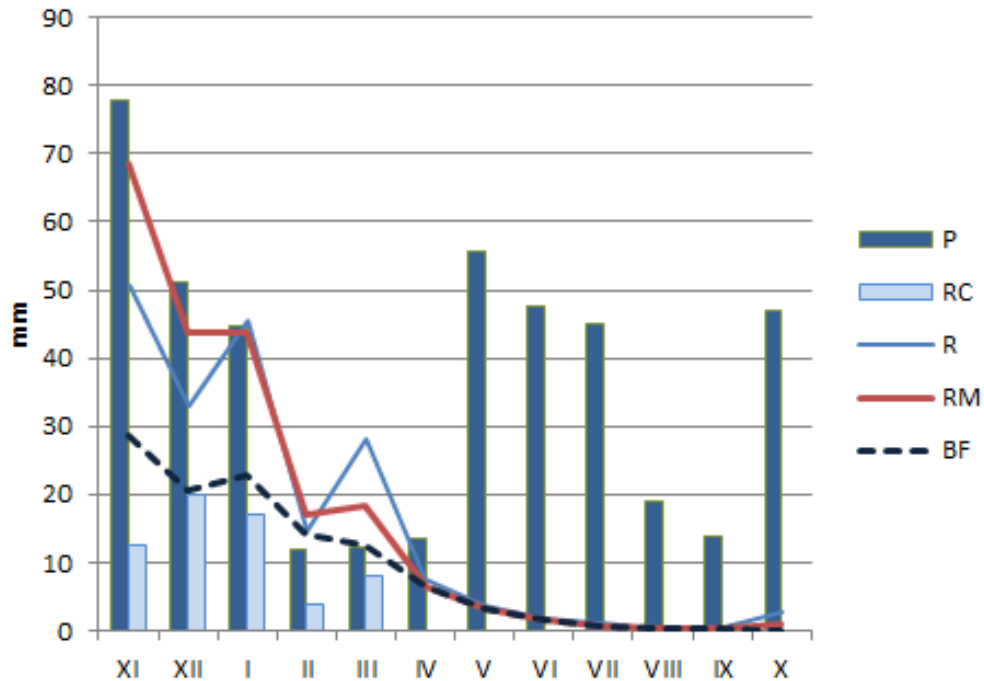


Figure 16: Water balance 2003 (dry year) of the Lomnice basin. P - precipitation, RC - groundwater recharge, R - measured runoff, RM - modelled runoff, BF - base flow (mm)

2004 was a year with a normal to slightly dry character in terms of the precipitation and discharge rates, with unevenly distributed rainfall and runoff (Figure 13). At the beginning of the year there were below-average values (approx. 55-85% of the long-term average).

A significant increase in precipitation was recorded in January (254% of the average). This was the month with the highest precipitation in the whole year. This precipitation led to a growth in runoff in February (121% of the average). This corresponds to the long-term distribution of flows in the Lomnice basin (Figure 7). Other fluctuations were observed in June (203%) and September (163%), along with high discharge values (269% of the average in June, and 133% of the average in September). The other months produced below-average values.

The ground water level (GWL) increased in January. A typical decline of GWL came in spring as a consequence of the increase in temperature and the growth of vegetation. After a high level of rainfall in June, GWL rose again. The rest of the year showed a declining trend until September, when there was an insignificant increase in GWL values (see Figure 13).

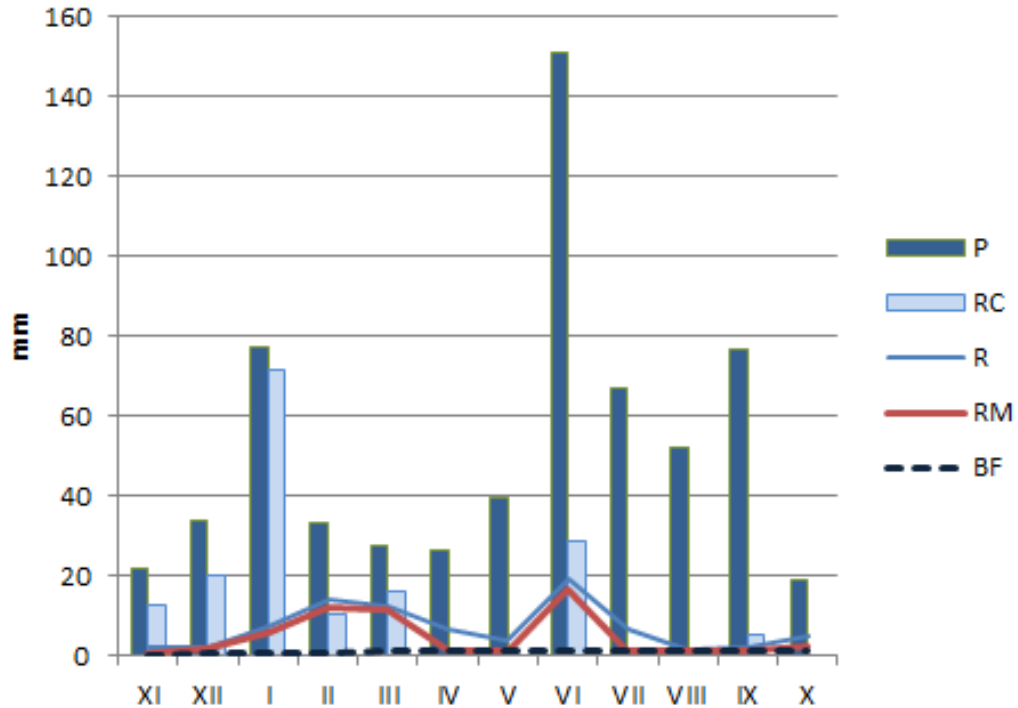


Figure 17: Water balance 2004 (normal year) of the Lomnice basin. P - precipitation, RC - groundwater recharge, R - measured runoff, RM - modelled runoff, BF - base flow (mm)

DISCUSSION

The aim of this paper has been to form a comprehensive picture of the rainfall-runoff regime in the Lomnice basin, using several methods: rainfall-runoff regime assessment by single and double mass curve method and the Bilan hydrological water balance model, and also an analysis of the development of air temperatures and snow conditions.

Mass curve methods (supplemented by an analysis of snow and temperature conditions) have confirmed the existence of certain changes in runoff trends in the model basin of the River Lomnice. The method of single and double mass curve provides a quite simple way to determine the time point at which there was a potential disturbance of the homogeneity of the data series.

It can be debated whether a 36-year time series of flows and rainfall is long enough to enable valid conclusions to be drawn. A longer series would have a higher predictive value, but the absence of continuous data would make it problematic to examine earlier historical flow and precipitation series. According to some other studies dealing with long-term trends of rainfall-runoff processes in the catchment, for instance BAE (2008), this length of the time series can be considered to be sufficient for the analysis. Kocelovice climate station was

used for the calculation of snow and thermal characteristics of the Lomnice basin. The elevation of the station (519 m) corresponds with the elevation range of the main part of the basin. Therefore, the data acquired from Kocelovice can be applied to the whole basin of the Lomnice. Another study might bring an analysis of several climatic stations in relation to changes in runoff, snow depth and the development of the number of days with snow cover to validate the results presented in this paper.

The distribution of runoff in the Lomnice basin is completely different from the situation in the source areas of the Otava analysed in (KLIMENT *et al.* 2011). Generally, the source areas of the Otava have shown a distinct increase in the proportion of runoff in winter over the last half-century whereas, with a few exceptions (August 2002), there has been a gradual decrease in runoff in summer months. In the headwater areas of the Otava, the biggest increase in the proportion of runoff falls in December (March for the Lomnice basin), while the biggest decrease is characteristic for July (December for the Lomnice basin).

Further issues for discussion emerge from the conclusions reached in this paper. To what extent are the observed changes just a result of long-term evolution, and to what extent may the changes have been caused by anthropogenic interventions (land use changes and river flow regulation) within the basin? In the 20th century, the landscape of the Czech Republic was strongly influenced by restructuring of landscape components. This influence has also been reflected in the Lomnice basin, and was observed in a study of the Otava basin (KLIMENT AND MATOUŠKOVÁ 2005). The issue of factors affecting the runoff regime in a basin was covered also by some recent international pilot projects, which deal with changes in land use planning considering climatic changes (JUCKEM 2008; HUO 2008; ZHANG 2008), effects of water reservoirs, urban areas, mining and industry and stream regulations on runoff regime in the basin (MEYER 2001; CZAJA 2005). Generally, the results of this study correspond to the trends from abroad. The Otava study investigated three catchments, the Ostružná, the Blanice and the Vydra Rivers, in the Šumava Mountains and in the foothills of Šumava. Variations in the development of the outflow were most evident in the farmed Ostružná catchment, to a much less extent in the upper basin of the Blanice catchment, and were not detected at all in a natural forested basin of the Vydra catchment. Extensive hydro-ameliorative measures, linked to modifications of the hydrographic network and the construction of surface and subsurface drainage systems, are a decisive anthropogenic factor here (KLIMENT AND MATOUŠKOVÁ 2005). The Lomnice basin is also mainly used for farming, with the exception of the headwaters (the Třemšín National Monument) and the confluence of the Otava (the V Obouch nature reserve). Taking into

account the results for the Ostružná basin, we conclude that the Lomnice basin has been importantly affected by management regulation, particularly by regulation of the river flow and by changes in land use.

Primarily, the differences in the balance of the upper basin of the River Vltava and its sub-basin of the Lomnice River point to a major impact of human activities in the catchment. In extreme years, the rainfall-runoff regime of the basin copied the upper basin and small fluctuations in the overall perspective of the sub-basin were losing. In a normal year (represented here by 2004), the deviations from average values became noticeable. This has led us to the conclusion that the smaller the basin is, the more the rainfall-runoff regime is affected by management activities, and of course by local conditions (geographic location, topography, local atmospheric conditions, etc.) Other case studies may confirm this theory.

CONCLUSIONS

Our analysis of the relationship between precipitation and runoff in the Lomnice basin shows that some changes in rainfall-runoff conditions have occurred since 1970. Using mass curves, the deviations in runoff development were identified. Changes occurred mainly in the 1980s and 1990s (there was increased runoff between 1979-1982 and 1985-1988). The period of increased runoff can be described as average, in terms of temperature, with above-average snow depth and an above-average number of days with snow cover. In comparison with the period of higher runoff in the Otava basin, this corresponds to a longer integrated interval of higher runoff in the Otava basin between 1974 and 1982 (KLIMENT *et al.* 2011). The temperature values in the Otava basin were below average, whereas the height of the snow cover and the number of days with snow cover were above the average.

In order to meet the increasing social demands on natural resources, the rate of anthropogenic intervention in the natural cycle of the Lomnice river basin has been increasing since the 20th century (BAŽATOVÁ 2009). This has notably affected the nature of the discharge regime of the basin. When the hydrological balance of the Lomnice was compared with hydrological balance of the Upper Vltava River basin (CHMI 2003, 2004, 2005), several differences were detected, mainly in the normal year 2004. The Lomnice sub-basin displayed a dry-to-normal character, while the Upper Vltava River basin, to which the Lomnice belongs, and the whole country in 2005 were assessed as normal. This difference highlights the importance of local anthropogenic interventions in the river basin. The sub-basin was affected, while no significant effects were recorded in the large basin. It is therefore necessary to consider

the impact of human activities not only at global scale but also at local scale when planning the sustainable use of water resources.

REFERENCES

- BAE D. (2008): Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins. *Hydrological Processes*, 22, 14, 2644—2656.
- BAŽATOVÁ T. (2009): Changes in rainfall-runoff conditions and anthropogenic modification in the Lomnice river basin. [Diploma Thesis.] Faculty of Science, Charles University, Prague. (in Czech)
- BENSON M. A., MATALAS N. C. (1967): Synthetic hydrology based on regional statistical parameters. *Water Resources Research*, 3 (4), 931 – 935.
- BEVEN K., J. (2011): *Rainfall-runoff Modelling, The Primer*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 360 s.
- CHMI (2003): Hydrological balance of the Czech Republic. Year 2002. Available at http://voda.chmi.cz/opzv/bilance/zprava_bilance_02.pdf. (accessed March 2013)
- CHMI (2004): Hydrological balance of the Czech Republic. Year 2003. Available at http://voda.chmi.cz/opzv/bilance/zprava_bilance_03.pdf. (accessed March 2013)
- CHMI (2005): Hydrological balance of the Czech Republic. Year 2004. Available at http://voda.chmi.cz/opzv/bilance/zprava_bilance_04.pdf. (accessed March 2013)
- CZAJA S. (2005): Changes in river discharge structure and regime in mining-industrial-urban areas. *Reg. Environ. Change*, 5, 18-26.
- CZECH ENVIRONMENTAL INFORMATION AGENCY – CENIA (2013): Program CORINE Land Cover 1990 and 2000. Available at <http://geoportal.gov.cz/>. (accessed June 2013)
- HORÁČEK S., KAŠPÁREK L., NOVICKÝ O. (2008): Estimation of climate change impact on water resources by using Bilan water balance model. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 4.
- HUO Z. (2008): Effects of climate changes and water related human activities on annual stream flows of the Shiyang river basin in arid north-west China. *Hydrological Processes*, 22, 16, 3155 – 3167.
- JUCKEM P.F. (2008): Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin. *Journal of Hydrology*, 355, 1-4, 123 – 30.
- KAŇOK J. (1997): A study of the anthropogenic influence on stream flow magnitude for the river of the Oder basin to the water-gauge at Kožle. *Journal of University of Ostrava*, 103.

- KAŠPÁREK L., NOVICKÝ O. (2004): User's guide manual. Available at http://www.geo.uio.no/edc/software/BILAN/User_guide_BILAN.pdf. (accessed August 2014).
- KLIMENT Z., MATOUŠKOVÁ M. (2005): Trendy ve vývoji odtoku v povodí Otavy. Geografie-Sborník ČGS, 110 (1), 32-45. (in Czech)
- KLIMENT Z., MATOUŠKOVÁ M., LEDVINKA O., KRÁLOVEC V. (2011): Trend analysis of rainfall-runoff regimes in selected headwater areas of the Czech Republic. J. Hydrol. Hydromechanics 59, 36–50.
- KŘÍŽ V. (1981): Nástin prognózy potenciálních změn hydrického režimu Moravskoslezských Beskyd. Sborník ČSG, 86, 1, 19-27. (in Czech)
- LANGHAMMER J. (2010): Analysis of the relationship between the stream regulations and the geomorphologic effects of floods. Nat. Hazards 54, 121–139.
- LEGATES D., GREGORY J., MCCABE JR. (1999): Evaluating the use of “godness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, 35 (1): 233-241.
- LUCC (2013): Czechia Database. Databáze dlouhodobých změn využití ploch Česka (1845–2000) Available at http://lucc.ic.cz/lucc_data/okresy/. (accessed January 2013)
- MEYER W.B. (2001): Human impact on the Earth. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 9780521558471.
- MINISTRY OF AGRICULTURE - MZE (2012): Maps groundwork, water flow regulation – Lomnice.
- NASH J. E., SUTCLIFFE J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10 (3): 282–290.
- ŠIMKOVÁ J., 2012: Study of the water balance in the Medard mining pit, in the Sokolov region. [Diploma Thesis.] Faculty of Environmental Science – Czech University of Life Sciences Prague. (in Czech)
- VACULÍN O., SOUKALOVÁ E. (2003): Regime of groundwater and hydrological water balance model in the infiltration area of the Brno water supply system. In 5th International Conference in Brno 2003.
- VÁŇOVÁ V., LANGHAMMER J. (2011): Modelling the impact of land cover changes on flood mitigation in the upper lužnice basin. J. Hydrol. Hydromechanics 59, 262–274.
- VIZINA A., HANEL M., NOVICKÝ O., TREML P. (2010): Experience from Simulation of Climate Impacts on Water Regime in Monthly and Daily Time Step. VÚV TGM (T. G. Masaryk Water Research Institute).

VÚV T.G.M. (2011): Bilan water balance model – Manual. Prague.

ZHANG X. (2008): Response of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China. Water Resources Research. 44.

ZÍDEK H. (1965): Hydrologické poměry ČSSR 1. Prague. (in Czech)

Contact address: Mgr. Tereza Bažatová, Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, KBÚK, Kamýcká 1176, Praha 6, 165 21. E-mail: bazatova@fzp.czu.cz

5.3 STUDIE 3: A Comparison of Water Regimes using the Hydrological Balance of Two Dump Catchments in Dry Years in the Krusne Mountains

Jan Gregar, Pavel Kovář, Hana Bačínová and Tereza Bažatová

Soil & Water Res., 2016 (accepted manuscript, under revision)

(vlastní podíl 15%)

Jeden ze základních rekultivačních procesů po povrchové těžbě hnědého uhlí je optimalizace vodního režimu. Výsypková území se potýkají s problematikou optimalizace vodního režimu především v klimaticky suchých obdobích. Pro tuto studii byly vybrána povodí Radovesické a Loketské výsypky. Tyto výsypky se nacházejí v oblasti Krušných hor, vzdálené od sebe asi 90 km. Povodí Radovesické výsypky spadá do srážkového stínu Krušných hor, dlouhodobý srážkový deficit v tomto povodí je cca 100 mm ročně.

Hydrologická bilance je základním prostředkem pro hodnocení výskytu a distribuce vody v povodí. Spočívá v kvantitativním rozdělení vody z atmosférických srážek na jednotlivé bilanční složky (Vaculín et Soukalová 2003). Průběh tohoto procesu zásadně ovlivňují klimatické podmínky povodí a naopak.

Pro analýzu bilance povodí byl vybrán bilanční model WBCM-6. Model WBCM (*Water Balance Conceptual Model*) je klasifikován jako model deterministický, konceptuální, celistvý, nelineární. Jeho parametry jsou pravděpodobnostně rozděleny po ploše povodí tak, aby byla zachována jejich plošná variabilita. Každý kapacitní element modelu reprezentuje přirozenou zásobu vody v jednotlivých vertikálních subsystémech hydrologického profilu. Model byl navržen pro studium jednotlivých komponent hydrologické bilance v závislosti na změnách hospodářského využití povodí (Kulhavý, Kovář 2000). Tato práce srovnává hydrologickou bilanci výsypek ve vegetačním období srážkově chudého roku 2003 (suchý rok) se srážkově průměrným rokem (tzv. normálním) 2004 (Radovesická výsypka) a rokem 2006 (Loketský výsypka) kvůli posouzení vhodnosti návrhů biotechnického opatření. Jako indikátor změn slouží data srážkových úhrnů, rozdíl v potenciální a aktuální evapotranspiraci a změn hladin podzemní vody.

Výsledky modelu poukazují na vhodnost zlepšení hydrologické retence a akumulace vody v povodí (především v povodí Radovesické výsypky), a to pomocí např.

biotechnických opatření. Situace v povodích obou výsypek lze řešit vybudováním systému malých nádrží, infiltračních příkopů nebo pásů či ostatních typů opatření.

Měřená data byla získána pomocí velmi moderních metod měření. Meteorologická stanice s automatickým měřicím systémem byla instalována v zájmových povodí, nabíjena byla díky solárnímu panelu. Data byla měřena v hodinovém kroku.

A Comparison of Water Regimes using the Hydrological Balance of Two Dump Catchments in Dry Years in the Krusne Mountains

JAN GREGAR, PAVEL KOVÁŘ, HANA BAČINOVÁ and TEREZA BAŽATOVÁ

Faculty of Environmental Sciences. Czech University of Life Sciences Prague.

Czech Republic

Abstract

After surface mining of coal, one of the basic recultivation operations involves optimizing the water regime on dump catchments to deal with drought conditions. Two dump catchments in the Krusne Mountains in the Czech Republic were selected for a study to reveal whether the hydrological balance in these catchments is adequate to keep life in them on a sufficiently natural level. A comparison is made between the different hydrological conditions in the Radovesický and Loketský dump catchments. These dumps are located about 90 km apart. The Radovesický catchment lies in a precipitation shadow. The WBCM-6 water balance model has been implemented for this hydrological case study. The Radovesický dump catchment suffers from a much greater precipitation deficit than the Loketský dump catchment does. The long-term deficit in the Radovesický dump catchment is about 100 mm annually.

This paper analyses the growing season of the dry year 2003, in order to identify suitable biotechnical hydrological measures, in particular cascades of small reservoirs.

Keywords: water balance model, biotechnical measures, mining dump, landscape improvement.

Introduction

The concept of recultivation after surface mining in the North-West Bohemian brown coal basin requires studies of water regimes in support of future restoration processes. The WBCM-6 hydrological model has been applied to exploited areas of the Loketský and Radovesický dump catchments. The 1 000 ha area of the Radovesický dump catchment, is at an elevation of 200 m to 400 m (see Fig. 1). It belongs to the B2 climatological region (mild warm and dry) and partly to the B3 region (warm, dry with mild winter). The average long-term temperature is 8°C to 9°C, and the annual precipitation does not exceed 500 mm. The Radovesický dump catchment has the lowest number of snow days of any catchment in Czechia (about 40 days). Due to the prevailing winds, the water regime tends to be very dry.

The Loketský dump catchment lies in the Eastern part of the Sokolov district, and is more than 500 ha in area. Its characteristic shape is elliptical, a with longer axis in the east-west direction. The land use is mostly forest that was recultivated in the past. A study project in 1985 investigated the recultivation of the whole dump complex as a unit, with the aim of creating an ecologically well-balanced locality, a landscape suitable for agriculture, and good living conditions for the inhabitants.

Methods and Materials

The WBCM-6 Model

Conceptual models are frequently applied in operational practice. However, they usually neglect the spatial variability of the parameters and state variables. They are often calibrated using measured stream flow data. Models of this type include HBV (Bergström 1995), SAC-SMA (Burnash 1995), TOPMODEL (Beven et al. 1995), SWAT (Arnold et al. 1998)

and AFFDEF (Moretti and Montanari 2007). The parameters of models of this kind often cannot be measured in the field, or lack physical meaning. These models also suffer from lack of parameter identifiability, and from equifinality.

Recharge estimation is essential for proper management of a catchment area. There is a group of water balance models based on the water balance equation, e.g. simplified DHVSM (Andrew and Dymond 2007), HIDROMORE (Sánchez et al. 2010), and the WBCM-6 model (Kovář and Vaššová 2010). The WBCM-7 model (Kovář et al. 2016) can be used to improve water regimes quantitatively with the use of water reservoirs.

This paper provides a comparison of the water balance in the growing season (April 1 to October 31) in dry year 2003 with the monthly balance in normal year 2004 on the Radovesický dump catchment and also with monthly balance in normal year 2006 on the Loketský dump catchment. The water balance for a particular area in a given time span can be described by the equation (in mm):

$$SP = STF + SAE + ASM + GWR - BF \quad (1)$$

where SP is rainfall, $STF = SOF + BF$ is total runoff, and SAE is actual evapotranspiration. ASM is the change in soil moisture content, GWR is groundwater recharge, BF is baseflow, and SOF is direct runoff.

The net difference in groundwater storage is $SNGWR$, and it is calculated from (in mm):

$$SNGWR = SGWR - BF = ASM + GWR - BF \quad (2)$$

where $SNGWR$ is the net change in subsurface storage (after subtracting BF), and $SGWR$ is the change in subsurface storage. The variable $DGWR$ is the change in subsurface storage (i.e. soil water):

$$DGWR = ASM + SNGWR \quad (3)$$

The aim of implementing the WBCM-6 model was to quantify the water balance. It is a combined model with the unsaturated soil zone as a distributed part and the other zones conceptually structured. In principle, it is based on the integrated storage approach. Each storage element represents the natural storages of interception, the soil surface, the root zone, the whole unsaturated zone, and the active ground water zone. The model with a daily step computes the storage of each zone and treats the daily values, including the input and output rates, in line with physical regularities, as reflected by the system of recurrent final difference and algebraic equations balancing the following processes (Kovář et al. 2004; Kovář 2006): (1) potential evapotranspiration, interception and throughfall, (2) surface runoff recharge, (3) root soil moisture zone dynamics, (4) soil moisture content and actual evapotranspiration, and (5) groundwater dynamics, baseflow and total flow.

The WBCM-6 model has 11 parameters, but only three of them are to be optimized (Kulhavý and Kovář 2000): **SMA**X (mm) a parameter representing the maximum capacity of the unsaturated zone, **G**W**M** (mm), a parameter representing the maximum capacity of the saturated zone, and **B**F (days), the transformation parameter of the base flow.

The individual parameters have the following physical meaning:

AREA	Catchment area (km ²)
FC	Average field capacity of the unsaturated zone (-)

POR	Average total porosity (-)
KS	Hydraulic conductivity (mm.h ⁻¹)
DROT	Average depth of the root zone (mm)
WIC	Upper limit of interception (mm)
ALPHA	Non-linear filling function exponent (-)
SMAX	Maximum capacity of the unsaturated zone mm)
GWM	Maximum capacity of the groundwater zone (mm)
BK	Baseflow transformation parameter (day)
CN	Curve Number (USDA NRSC) (-)

The modified Penman-Monteith method (Penman 1963; Monteith 1965), and also the Priestley-Taylor method (Priestley and Taylor 1972), and the Turc method (Turc 1961) are used for computing the daily potential evapotranspiration values. The model unit that computes the actual interception and throughfall is based on a simulation of the irregular distribution of the local interception capacities around their mean value, WIC.

The US Natural Resources Conservation Service method, based on Curve Number (CN) assessment (NRCS 1986), was used for quantifying direct runoff. The standard procedure for the initial CN value was accepted, and the daily storages of the active zone, SS, were computed by this procedure. The recharge of the root zone, and thus of all unsaturated zones, depends greatly on the previous soil moisture content, and is controlled by the KS of the FC parameters. The evaluation procedure is based on the assumption that the distribution of the local FC values around their average is linear.

The exhaustion function with negative input represents the prevailing evapotranspiration in the daily step. This is applied for the root zone and also for the lower layer of unsaturated soil. Parameters P2 and P7 are based on particular soil retention curves: P2 = 0.2, P7 = 0.7 (loamy soils), 0.6 for clay soils and 0.8 for sandy soils. Parameter P1 = 0.1 describes very dry conditions for stomata transpiration. Linear retention curves can be substituted by a non-linear curve introducing parameter ALPHA.

The WBCM-6 model describes deep infiltration that recharges a groundwater zone and base flow while the upward capillary flux evaporates when evaporative conditions are favourable. Simultaneously, the exhaustion from this zone due to evapotranspiration is computed. To simulate this procedure, use is made of the proportions between the actual evapotranspiration and the potential evapotranspiration, according to the soil moisture content and according to the particular physical properties of the soil. The saturated zone is filled with groundwater recharge and is depleted through the base flow. Automatic optimization of parameters **SMAX**, **GWM** and **BK** is applied where the efficiency of the model can be controlled by minimizing the sum of least squared differences between the computed decades and the observed decades (periods of 10 days) of the annual water balance or of the vegetation period water balance.

Results

The water balance was simulated for year 2003 (dry), and also the monthly water balances for 2004 (normal) on the Radovesicky dump catchment and for 2006 (normal) on the Loketsky dump catchment. Our interest was focused on dry years, as the aim of our study is to protect the water balance of dump catchments, in particular the water balance of the Radovesicky dump catchment. The water balance simulation of the vegetation periods

in dry year 2003 is the most important episode in our study. This year shows the importance of precipitation as the fundamental component of the water balance equation.

The differences in rainfall, SP , and in water deficits between potential and actual evapotranspiration ($SPE - SAE$) show clearly the character of each year (dry or normal). The second indicator is the net change in subsurface storage ($SNGWR$), which is a figure that usually expresses a deficit in growing periods. Tab. 1 presents an overview of the decade values in 2003 on the Radovesický dump catchment, and Tab. 2 presents the values on the Loketský dump catchment. These tables are computed by subtracting the components of the water balance equation.

Figures 4 and 5 present the major graphs produced in this study, which express the decade water balance for the tested growing seasons. They are arranged sequentially step-by-step as graphs, subtracting the water balance components on the right side of the equation for each decade. i.e. (1) SP , (2) $SP - SAE$, (3) $SP - SAE - STF$, (4) $SP - SAE - STF - DGWR$. The last component, $DGWR$, expresses the subsurface water storage as the sum of the water in both the unsaturated zone and the saturated zone ($ASM + SNGWR$). Negligible imbalances can be observed in a few decades, when they are considered separately. These imbalances (DIF) are computed by:

$$DIF = SP - SAE - STF - DGWR \quad (4)$$

The very small differences (DIF) are due to the fact that all balance components are calculated independently by the model, without forcing the balance processes to close at the end of each day. However, these imbalances, with values lower than 1.0%, which are usually observed for the entire vegetation periods, indicate that the parameterisation of the model is satisfactory.

The sum of the imbalances (i.e. the differences) is then expressed by:

$$SDIF = \sum_{i=1}^N DIF_i \quad (5)$$

where $SDIF$ is the total difference between the left and right balance equation for the annual growing period (mm), and DIF_i is the difference between the decadal left and right balance equation in decade i (mm). These differences can also be expressed as a percentage:

The differences in the water balance equation on the Radovesický dump catchment in 2003 are: $SDIF = 0.90$ mm (0.37%), and on the Loketský dump catchment: $SDIF = -0.27$ mm (-0.05%).

The rainfalls are 23% higher on the Loketský dump catchment area than on the Radovesický catchment. For this reason, other major water balance components are also considerably higher there. Other components of the water balance are therefore hardly able to improve the water regime on the Radovesický catchment. Biotechnical measures are needed to improve retention and accumulation. This situation calls for more advanced “water harvesting” technologies. For example, a system of small reservoirs can be constructed, infiltration ditches can be managed, and other water regime improvement measures can be introduced.

Discussion

The analysis of the water balance equation leads to the mass conservation equation, which can be derived from eq. (1):

$$(ASM + GWR) = SP - STF - BF - SAE \quad (6)$$

All variables are understood to be functions of time, averaged over the whole catchment area (Kirchner 2009). According to Kirchner's analysis, eq. (6) should take into account how its individual terms can be measured to find the degree of uncertainty of their values. The precipitation (*SP*) calculations are local, and are consequently loaded with the highest bias; the *SAE* data depend on the evapotranspiration method that is used. However, global radiation data and unsaturated soil moisture parameter measurements ensure reliability only when they are measured in areal transects that are reasonably well selected. The soil moisture dynamics (*ASM*) is then computed by data calculations. The direct runoff component (*SQ*) and the baseflow component (*BF*) cannot be calculated directly. Instead, we applied the measured groundwater tables. These values also depend on the selection of borehole sites. This problem was also described by Banks et al. (2011), who assessed the spatial and temporal connectivity between surface water and groundwater in a regional catchment. Implementation of soil moisture assimilation data was also described in a similar way by Han et al. (2012), who investigated how surface layer soil moisture data affect all hydrological processes at catchment scale.

Conclusions

This paper has compared the water balance in the growing seasons in a distinctly dry year (2003) with the water balance in two normal years, 2004 and 2006. The water balance data was measured on the Radovesický and Loketský dump catchments in the Krusné Mountains. The hydrological balance was computed using the WBCM-6 model. The following innovations in water balance modelling were introduced:

- The climate data measurements and the data collection were done using state-of-the-art technology. A meteorological station with an automatic measurement system was used. There was a charger connected to a solar panel. For the WBCM-6 model, the climate data was measured with a time step of 60 min, using ALA and VIRRIB devices.
- This paper has provided a specific hydrological study for use as background information for reclamation in an engineering system project planned for improving the water regimes in the area.

Acknowledgement

The field studies, model improvement, assessment and evaluation have been supported by the Technological Agency of the Czech Republic, under Project TACR TA02020402 Water regime optimization to mitigate impact on hydrological extremes.

References

- Andrew R.M., Dymond J.R. (2007): A distributed model of the water balance in the Motueka catchment. New Zealand. Environmental Modelling & Software. 22. 1519–1528.
- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. (1998): Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. Journal of the American Water Resources Association. 34(1). 73–89.
- Banks E.W., Simmons C.T., Love A.J., Shand P. (2011): Assessing spatial and temporal connectivity between surface water and groundwater in a regional catchment: Implications for regional scale water quantity and quality. Journal of Hydrology. 404(1-2). 30–49.

- Bergström S. (1995): The HBV model. In Singh. V. P. (Ed.). Computer models of watershed hydrology (pp. 443–520). Highlands Ranch. Colorado. USA: Water Resources Publications.
- Beven K.J., Lamb R., Quinn P., Romanowicz R., Freer J. (1995): TOPMODEL. In Singh. V. P. (Ed.). Computer models of watershed hydrology (pp. 627–668). Highlands Ranch, Colorado, USA: Water Resources Publications.
- Burnash R.J.C. (1995): The NWS river forecast system – Catchment modelling. In Singh. V. P. (Ed.). Computer models of watershed hydrology (pp. 311–366). Highlands Ranch. Colorado. USA: Water Resources Publications.
- Han E., Merwade. V., Heathman G.C. (2012): Implementation of surface soil moisture data assimilation with watershed scale distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*. 416-417. 98–117.
- Kirchner J.W. (2009): Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modelling and doing hydrology backward. *Water Resources Research*. doi: 10.1029/2008/WR006912.
- Kovář P., Vaššová D. (2010): Impact of Arable Land to Grassland Conversion on the Vegetation-Period Water Balance of Small Agricultural Catchment (Němčický Stream). *Soil and Water Research*. 5(4). 128–138.
- Kovář P. (2006): The extent of land use impact on water regime. *Plant, Soil and Environment*. 52(6). 239–244.
- Kovář P., Cudlín P., Šafař J. (2004): Simulation of Hydrological Balance on Experimental Catchments Všeminka and Dřevnice in the extreme periods 1992 and 1997. *Plant, Soil and Environment*. 50(11). 478–483.
- Kovář P., Heřmanovská D., Hadaš P., Hrabalíková M., Pešková J. (2016): Water balance analysis of the Morava River floodplain in the Kostice-Lanžhot transect using the WBCM-7 model. *Environ Monit Assess* (2016) 188: 74, DOI 10.1007/s10661-015-5080-7.
- Kulhavý Z., Kovář P. (2000): Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. Praha: VÚMOP Praha.
- Monteith J.L. (1965): Evaporation and Environment. In Fogg. G. E. (Ed.). *The State and Movement of Water in Living Organisms* (pp. 205–234). UK: Academic Press for the Society for Experimental Biology.
- Moretti G., Montanari A. (2007): AFFDEF: A spatially distributed grid based rainfall-runoff model for continuous time simulations of river discharge. *Environmental Modelling & Software*. 22. 823–836.
- NRCS (1986): *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55 (13). Washington D. C.: U.S. Department of Agriculture.
- Penman H. L. (1963): *Vegetation and Hydrology*. Harpenden. U. K: Technical Committee 53. C. Bureau of Soils.
- Priestley C.H.B., Taylor R.J. (1972): On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*. 100. 81–82.
- Sánchez N., Fernández J.M., Calerab A., Torres E., Gutiérrez C.P. (2010): Combining remote sensing and in situ soil moisture data for the application and validation of a distributed water balance model (HIDROMORE). *Agricultural Water Management*. 98. 69–78.

Turc L. (1961): Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Annales agronomiques. 12. 13–49.

List of Figures:

Figure 1: The locations of the Radovesicky and Loketsky dump catchments

Figure 2: The Radovesicky dump catchment area

Figure 3: The Loketsky dump catchment area

Figure 4: Subtracted decade water balance graph of the Radovesicky dump catchment in the growing season of 2003

Figure 5: Subtracted decade water balance graph of the Loketsky dump catchment in the growing season of 2003

Figure 1: The locations of the Radovesicky and Loketsky dump catchments



Figure 2: The Radovesický dump catchment area



Figure 3: The Loketský dump catchment area



Figure 4: Subtracted decade water balance graph of the Radovesický dump catchment in the growing season of 2003

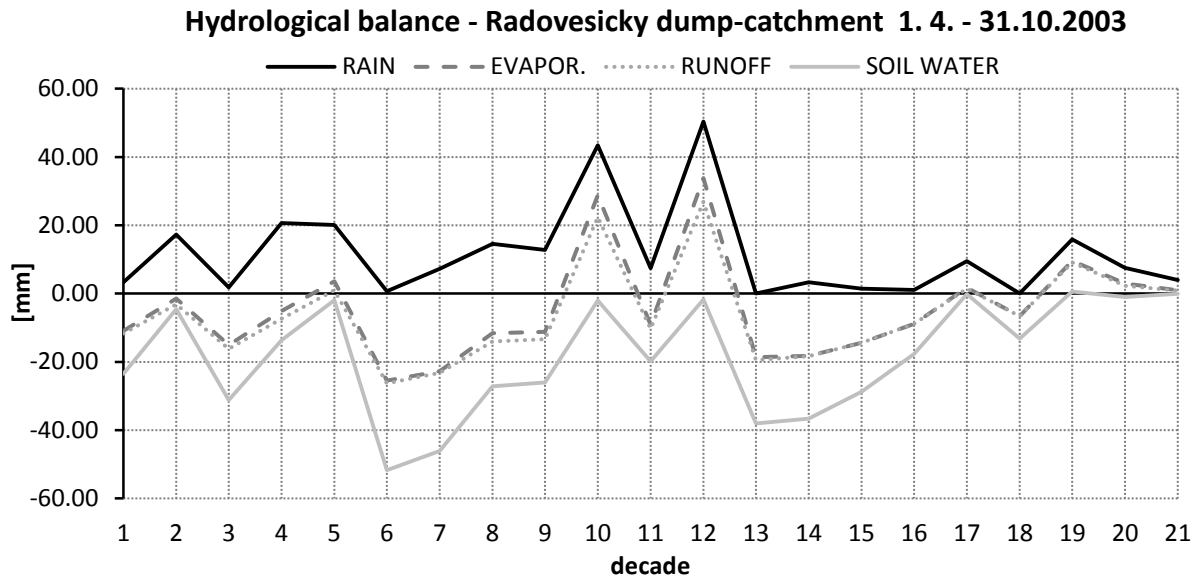
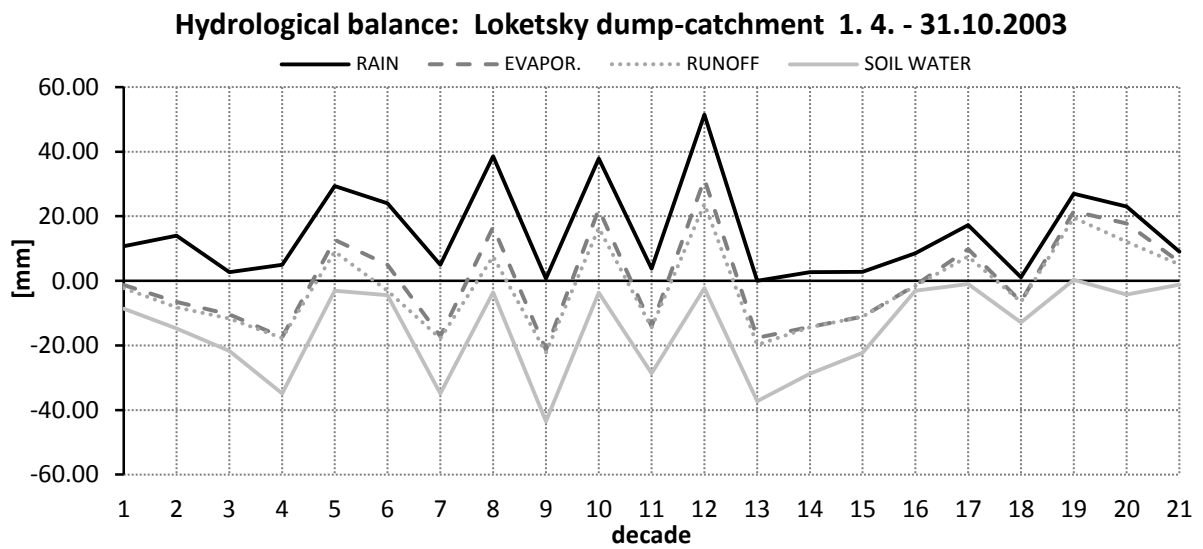


Figure 5: Subtracted decade water balance graph of the Loketský dump catchment in the growing season of 2003



List of Tables:

Table 1: Subtracted decade water balance of the Radovesicky dump-catchment in dry year 2003 (1. 4. – 31.10.2003)

Table 2: Subtracted decade water balance graph of the Loketsky dump catchment in dry year 2003 (1. 4. – 31.10.2003)

Table 3: Seasonal hydrological balance of the Radovesicky dump-catchment in 2003 (dry) and in 2004 (normal), in mm

Table 4: Seasonal hydrological balance of the Loketsky dump-catchment in 2003 (dry) and in 2006 (normal), in mm

Table 5: Major component water balance differences between the Radovesicky and Loketsky dump-catchments in a dry period 2003

Table 1: Subtracted decade water balance of the Radovesicky dump-catchment in dry year 2003 (1. 4. – 31.10.2003)

Subtracted graph: Decade hydrological balance				
DECADE	RAINFALL	EVAPOR.	RUNOFF	SOIL WAT.
	SP (mm)	SAE (mm)	STF (mm)	DGWR (mm)
1	3.30	-10.90	-11.70	-23.50
2	17.30	-1.50	-3.20	-4.61
3	1.80	-15.10	-16.20	-31.21
4	20.70	-5.10	-7.40	-13.71
5	20.10	3.60	1.00	-1.96
6	0.70	-25.50	-26.30	-51.69
7	7.20	-22.80	-23.20	-46.13
8	14.60	-11.60	-14.00	-27.20
9	12.80	-11.20	-13.40	-26.09
10	43.40	28.80	22.30	-2.03
11	7.40	-9.20	-10.30	-19.90
12	50.40	33.80	26.90	-1.80
13	0.00	-18.60	-19.50	-38.07
14	3.30	-18.30	-18.40	-36.63
15	1.40	-14.40	-14.40	-28.78
16	1.10	-8.90	-8.90	-17.70
17	9.50	1.70	1.40	-0.12
18	0.00	-6.60	-6.60	-13.22
19	15.90	9.60	9.10	0.63
20	7.50	2.90	2.30	-0.97
21	4.00	1.00	0.90	-0.08

Table 2: Subtracted decade water balance graph of the Loketsky dump-catchment in dry year 2003 (1. 4. – 31.10.2003)

Subtracted graph: Decade hydrological balance				
DECADE	RAINFALL	EVAPOR.	RUNOFF	SOIL WAT.
	SRAIN (mm)	SAE (mm)	STF (mm)	DGWR (mm)
1	10.70	-1.30	-2.30	-8.60
2	14.00	-6.50	-8.20	-14.80
3	2.70	-10.40	-11.70	-21.70
4	5.00	-17.40	-17.70	-34.90
5	29.40	12.70	9.00	-3.10
6	24.00	5.00	-3.10	-4.40
7	5.00	-17.10	-17.80	-34.90
8	38.60	16.70	7.50	-3.60
9	0.70	-21.30	-22.20	-43.50
10	37.90	22.20	16.40	-3.70
11	3.80	-14.10	-14.50	-28.60
12	51.50	31.50	23.80	-2.30
13	0.00	-17.60	-19.80	-37.30
14	2.70	-14.30	-14.40	-28.70
15	2.80	-11.10	-11.10	-22.30
16	8.50	-1.40	-1.60	-3.10
17	17.30	9.80	7.50	-1.00
18	1.10	-6.40	-6.50	-12.90
19	27.00	21.50	19.50	0.30
20	23.00	17.80	12.10	-4.20
21	9.00	5.90	5.10	-1.20

Table 3: Seasonal hydrological balance of the Radovesický dump catchment in 2003 (dry) and in 2004 (normal) in mm

Radovesický seasonal balance 1. 4. - 31. 10. in mm	2003	2004
RAINFALL SP	243.9	340.9
TOTAL RUNOFF STF	31.4	53.3
SURFACE RUNOFF SOF	16.6	27.6
BASIC FLOW BF	14.8	25.7
POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION SPE	516.5	422.7
ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION SAE	341.6	336.5
INFILTRATION RECHARGE SRECH	180.5	245.6
DIFFERENCE IN SOIL MOISTURE ASM	-171.4	-123.2
GROUNDWATER RECHARGE SGWR	56.3	100.2
NET GROUNDWATER RECHARGE SNGWR	41.4	74.4

Table 4: Seasonal hydrological balance of the Loketský dump-catchment in 2003 (dry) and in 2006 (normal) in mm

Loketský seasonal balance 1. 4. - 31. 10.	2003	2006
RAINFALL SP	315.3	419.3
TOTAL RUNOFF STF	54.4	78.7
SURFACE RUNOFF SOF	23.1	25.2
BASIC FLOW BF	31.3	53.5
POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION SPE	390.2	378.3
ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION SAE	312.2	329.7
INFILTRATION RECHARGE SRECH	221.2	299.7
DIFFERENCE IN SOIL MOISTURE ASM	-116.5	-98.4
GROUNDWATER RECHARGE SGWR	93.3	161.5
NET GROUNDWATER RECHARGE) SNGWR	62.0	108.0

Table 5: Major component water balance differences between the Radovesicky and Loketsky dump catchments in dry period 2003

Water Balance Component	Radovesicky catchment (mm)	Loketsky catchment (mm)
Rainfall SP	243.9	315.3
Total runoff STF	31.4	54.4
Actual Evapotranspiration SAE	341.6	312.2
Difference in soil moisture ASM	-171.4	-116.5
Net groundwater recharge SNGWR	41.4	62.0

5.4 STUDIE 4: *Hydrological regime of the Chabařovice Lake*

Tereza Bažatová, Vít Rous

Soil & Water Res., 2016 (accepted manuscript, under revision)

(vlastní podíl 50%)

Tento článek řeší vodní režim jezera Chabařovice. Jezero Chabařovice se nachází na místě bývalého povrchového hnědouhelného lomu v nejvýchodnější části severočeské hnědouhelné pánve v těsné blízkosti města Ústí nad Labem, Chabařovice a Trmice. Oblast prošla rekultivací. Pro rekultivaci zasaženého území byla vybrána tzv. rekultivace hydrická. Hydrická rekultivace se v tomto případě jeví jako ekonomicky i technicky optimální metoda.

Při rekultivaci došlo k podstatné úpravě vodotečí a převodu vod mimo jejich přirozené povodí. Tato studie má právě proto za cíl identifikovat stav vodních zdrojů jezera a analýzu hydrologického režimu. Pomocí hydrologického modelu jsou vytipovány zdroje vody dotující jezero a určena jejich vydatnost.

Ke zpracování hydrologického modelu jezera bylo uvažováno o využití modelu SWAT s modelováním srážko-odtokových procesů pomocí modifikované metody CN křivek, jejichž hodnoty jsou lehce dostupné pro celou ČR, a která byla s úspěchem využita i v jiných obdobných studiích. Ovšem problematický je vstup antropogenního ovlivnění v povodí, který má ve zkoumané oblasti velký vliv, a proto bylo zvoleno programové prostředí HEC-HMS.

Pomocí modelu HEC-HMS došlo k identifikaci povodí jezera a vytvoření kontinuálního hydrologického modelu, který simuluje určité období v době trvání 1 rok. Jako referenční období pro hydrologické modelování jezera bylo stanoveno období od 1.1. 2014 do 30.10.2015. Toto období je srážkově podprůměrné, což se podepsalo I na hydrologickém režimu jezera Chabařovice. Státní podnik Palivový kombinát Ústí, s.p. (PKÚ) se tak potýkal s problémy s udržením hladiny v optimální úrovni.

Z výsledků modelu vyplývá, že jezero Chabařovice je v současném stavu z hydrologického pohledu dlouhodobě stabilní a hladina vody se bude pohybovat v současné úrovni. Mírné zaklesnutí vody by bylo možné očekávat pouze v případě dlouhodobého výpadku přelivového vrtu 9 jako dodatečného zdroje vody pro jezero.

Severní část povodí je však dostatečně velká, aby byla schopná dodávat dostatek vody pro zátopu jezera a doplňovat tak výpar z volné vodní hladiny. Zavedení vody do jezera z jižní části by mělo větší význam z hydrologického pohledu pouze za předpokladu, že by bylo možné využít větší plochu tohoto subpovodí. To je však problematické z hlediska kvality vody.

Hydrological regime of the Chabařovice Lake

Tereza Bažatová¹, Vít Rous²

¹ Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 1176, Praha 6, 165 20;² PKÚ, s.p., Hrbovická 2, Chlumec 403 39

Abstract

This article deals with the water system of Chabařovice Lake. Chabařovice Lake is located in the place of a former lignite surface mine in the easternmost area of the North Bohemian Coalfield in proximity of the cities of Ústí nad Labem, Chabařovice and Trmice.

The area has undergone a process of restoration. A water restoration was selected for this afflicted region. This restoration appears to be an optimal method from both the economical and technical point of view in this case. During and mainly before restoration, there was a significant adjustment of watercourses and transfers of water streams outside their natural catchment areas. This study aims to identify the condition of the lake water resources and to analyse the hydrologic regime. By means of a hydrologic model, resources supplying the lake are selected and their yield is determined.

The programme HEC-HMS was selected as a suitable hydrological model. This model allowed to identify the lake catchment area and to create a continuous hydrologic model which simulates a specific time period of one year. The reference period for hydrologic modelling of the lake the period from 1 January 2014 to 30 October 2015 was determined. During this time there was below average precipitation which reflected itself in the water regime of the Chabařovice Lake as well. The state enterprise of PKÚ, s.p. struggled with maintaining the water level at an optimum depth.

The results follow that Chabařovice Lake is stable from a long-term hydrologic point of view at the current standpoint and the water level will remain in its current level. Moderate water decrease could be expected only in the event of a long-term failure of the overflow drill PV9 which is an important resource of groundwater for the lake.

Keywords: HEC HMS, hydrological modelling, restoration, water resources

INTRODUCTION

The issue of human influence on natural processes is very topical today and the importance of understanding these natural processes is growing together with the increasing intensity

of anthropogenic impact. Human society has always been limited physiogeographically, however, people have also been adapting and rearranging their environment by their activity. That is also the case of raw material extraction which has a long tradition in the Czech Republic and thus has had a great impact on the environment. Lignite surface mining, which is widespread in the Czech Republic, belongs to the most significant anthropogenic impacts to the rock environment and it is understandable that this has very few positive impact in the environment (NEUŽIL 1998). Positive influences are manifested in other areas. Negative environmental impacts of lignite surface mining are predominant and it is necessary to prevent and minimize them as soon as the first studies stage and initiation of the project creation (NEUŽIL 1998, BIAM 2009). It can only be emphasized that a logical conclusion of mining is a successful restoration. In the Czech Republic, conceptual restoration has been performed since 1970s and 1980s (ŠTÝS 2015).

Restoration defines as putting the afflicted area into such a kind of condition so that a self-sufficient ecosystem may function there (JONÁŠ 1975, RICHARDS ET AL. 1993, JANEČEK 1994, LÁGNER 2004). There are many types of restoration (ROTHBAUER, 2004, ROTHBAUER 2004).

Many kinds of spoil tips restoration have been applied in the past years, mainly agricultural and forest restoration. The solution for open-pit mines remained a problem. Mines used to be left to be flooded spontaneously. However, these were small mines the surface of which we can compare with a pond, only having different depth. Major mines that have gradually been closed down since the early 1990s are a completely different subject matter. Water restoration was finally determined to me the economically and technically optimal method (ŠTÝS 2015).

In the course of time, three lakes came to existence in the Czech Republic – Most Lake, Chabařovice lake and Medard Lake which by their parameters exceed common water reservoirs in many aspects and tend to have the parameters of a dam. Two of the newly emerged lakes are under the supervision of PKÚ, state enterprise, and they are Most Lake and Chabařovice Lake. Further three lakes of an even greater range are to be created in the next decades (ŠTÝS 2015). Although the lakes are of a potentially important influence on hydrological regime in given catchment areas, the subject of an intensive research interest in last years during their flooding and subsequent monitoring was the observation of water quality development, biodiversity and the influence on microclimate (LHOTSKÝ 2013).

Therefore in this study we concentrate on the issue of the older of the lakes, Chabařovice lake. The former Chabařovice mine was established in 1977 for the purpose of securing coal

for the Úžin pressure gasworks and the Trmice heating plant. The termination of all mining after the mine extension stoppage in 1991 came in 1997. There were discussions in the meantime whether the restoration should be "dry" or "wet". In 1993, the wet solution was decided and works were initiated that finally led to the creation of Chabařovice Lake.

Restoration affected water management circumstances to a great extent, in this case the issues included the transfer of stream beds, the establishment of retention reservoirs and pumping water from mines. Filling the lake began after inevitable terrain adjustments (such as coal layer covering, river bank modification, blocking old galleries) on 15 June 2001. Water was brought from a nearby Kateřina reservoir situated approximately 2 km to the west (a similarly flooded mine, Kateřina reservoir was established as a part of water management protection of Chabařovice mine for the prevention of surface water coming from Krušné Mountains together with the Modlany reservoir), by the means of two methods: by former fire protection water mains as well as the Zalužanský stream Brook (through Zalužanský reservoir further on through the lake feeding stream brook).

In August 2008, there was a change in the water feeding system to the lake. In the section from the Zalužanský reservoir there was a new trench built leading to an eutrophication control reservoir from which the water overflowed to the lake through a special trench. The allowed maximum for releasing water from the Kateřina reservoir was 700 l/s.

Another water resource was an overflow drill PV9 in the northern part of the lake which supplies the lake with ground water. With the lake water level rising there was a transfer to a higher altitude. The PV9 building operations were finished in November 2008. After the ground water reached the necessary level, drawing from this resource was initiated.

Therefore the lake water is a mixture of stream, ground and rain water. Its quality is regularly monitored. The lake was filled up to its defined level of 145,7 m above the sea level on 8 August 2010, after longer than 9 years.

A system of trenches was built in order to drain the slopes surrounding the lake. The construction of Modlany stream redirection around the Chabařovice Lake drains normal flows from the south slopes pit heap (Lochočice). By connecting the structure to the object "Redirecting Chabařovice Lake water into Bílina river" the water goes directly to the river outside the actual lake. By the construction of "Redirecting Chabařovice Lake water into Bílina river" surplus water from the lake are led to an open trench through a connecting pipeline where it opens into the Bílina river (PKÚ 2016).

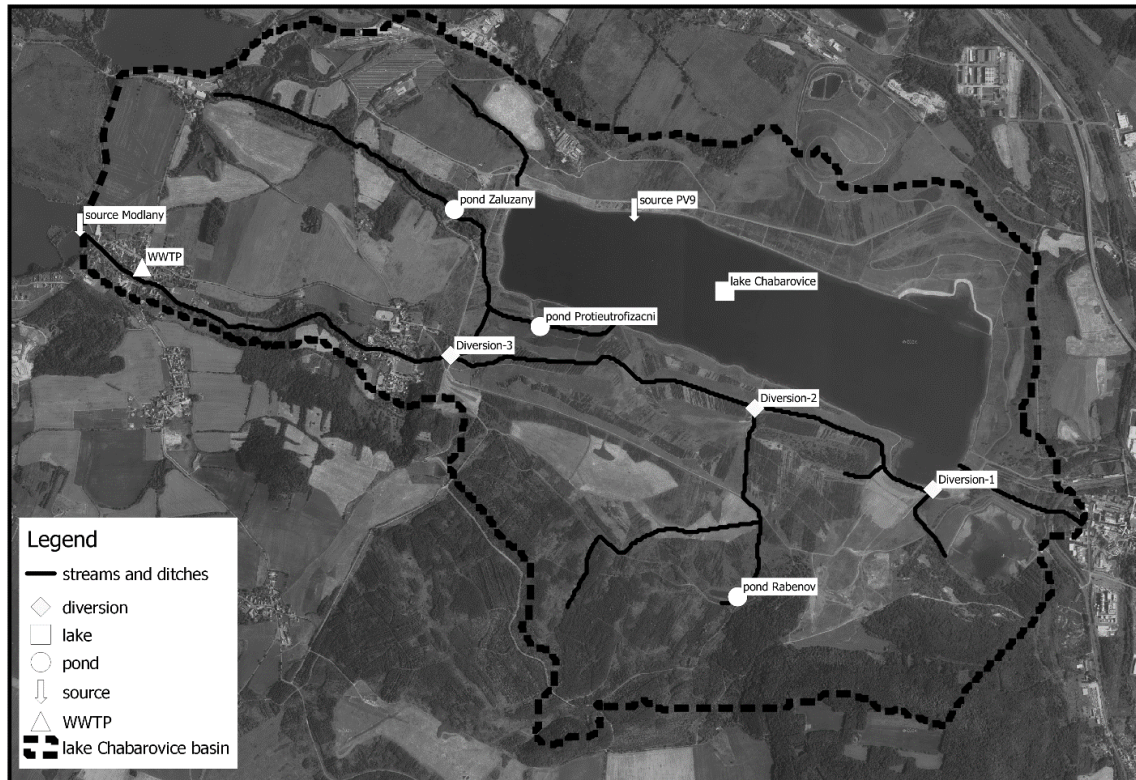


Figure 1. Chabařovice Lake - situation layout

Purpose of the study. In the recent past, there was a surface mine in place of Chabařovice Lake the restoration of which led to significant adjustment of watercourse and transferring water streams off their natural catchment area. The purpose of this study is to identify the condition of the lake water resources and to provide an analysis of the hydrologic regime. For a filling computation of the Chabařovice Lake an appropriate mathematical model that solves a hydrological balance has to be selected.

For the purpose of processing such a model of the lake with the rise of SWAT model including precipitation/runoff processes modelling with the use of a modified method of CN curves was considered (GEETHA ET AL. 2007; MISHRA ET AL. 2004; SAHU ET AL. 2007; SINGH ET AL. 2015). Its figures are easily accessible for all of the Czech Republic and it has been successfully used in other similar studies (FUKUNAGA ET AL. 2015; LU ET AL. 2015). What is perceived as problematic is the anthropogenic impact in the catchment area which has a great influence in the area of research, therefore the programme setting of HEC-HMS was selected (HEC USACE 2016) as it allows to incorporate runoff statistics of the reservoirs, various transfers of water from one model component to another, etc. However, this model only allows for continuous hydrologic simulation the use

of precipitation/runoff Soil Moisture Accounting method (HEC USACE 2016; BENNET 2000).

Therefore, the purpose of this study is to identify the lake catchment area and to create a continuous hydrologic model which simulates a specific period of one year about. Its reference period for the lake hydrologic modelling was established to be from 1 January 2014 to 30 October 2015.

The years 2014 and 2015 the Czech Republic there was below average precipitation. The deficit manifested itself in a very negative water balance and the creation of soil drought (ČHMÚ 2016). Precipitation below-average amount, in 2014 and 2015 had a dry effects on the hydrologic regime of Chabařovice Lake as well. PKÚ struggled with maintaining the water level at its optimum and this is the reason why this particular period was selected for the model simulation.

MATERIAL AND METHODS

Model HEC-HMS General Characteristics. HEC-HMS (the latest version – 4.1) was designed so as to be able to simulate rainfall-runoff processes in branched water systems. The model is applicable in a wide range of geographic processes. More specifically, it is capable of solving flood hydrology issues, water reserves from large catchment areas as well as water runoff from small or municipal areas. The HEC-HMS outputs include hydrographs illustrating the course of water runoff in time with the reference to precipitation and other catchment area characteristics. The resulting hydrographs may immediately be used for further hydrologic analyses or in combination with other software they contribute to hydrologic forecasts, calculation of flood damage, regulation of water in meadows, operational forecasts, water source availability, etc. (HEC USACE 2016).

HEC-HMS programme is a generalized modelling system that allows the assessment of different catchment areas and territories (HEC USACE 2016). HEC-HMS is a flexible programme which enables the user to select various approaches to calculate hydrological processes as a semi-distributed model as accurate as possible (MAIDMENT, DJOKIC 2000).

According to the classification, the model belongs to deterministic and conceptual models as sections of the hydrological process are calculated by mathematical relations within the programme.

Mostly the HEC-HMS is used as an event model as it is capable of good torrential rain simulation if provided suitable data. Continuous approach may be applied for methods designed to determine the runoff volume such as SMA (*Soil moisture accounting*), etc. (FELDMAN 2000).

Assessing spatial data as input for modelling in HEC-HMS is generated in geographic information systems which enable data export from GIS into HEC-HMS and a subsequent results import back to GIS.

Model Structure. Precipitation-runoff modelling in HEC-HMS requires three basic input components: catchment area parameters (Basin Model Manager), precipitation component (Meteorologic Model Manager), control component (Control Specifications Manager).

The first two are strongly dependent of spatial factors, the input data is generated by the means of geographic information systems (MAIDMENT, OLIVER 1999). The need of input data relates to the used calculation model for individual components, time and spatial step of the calculation (JENÍČEK 2009). HEC-HMS programme uses the catchment area model to express individual rainfall-runoff elements of the process. There are four basic model parts (FELDMAN 2000): direct-runoff, runoff-volume, baseflow, routing parts.

Chabařovice Lake Model. The Chabařovice Lake Model was designed in the programme of HEC-HMS version 4.1 based on available data from the period from 1 January 2014 to 30 October 2015. The aim of the simulation was to identify the main water resources of Chabařovice Lake and to compare these resources with free water evaporation loss and to determine a possible effect of a failure of groundwater resource from PV9 with a long-term point of view.

Data Background and Resources as follows:

1. Digital relief model of the lake and its catchment area – geodetic measurement (PKÚ) and the ZABAGED altitude in grid 10 x 10 m (ČÚZK 2016) for the determination of catchment areas and sub-catchment areas.
2. Runoff curve figures (CN), infiltration of soil and retention water capacity of soil (VÚMOP, v.v.i. 2016).
3. Daily gauge depth readings on the runoff from a reservoir (PKÚ 2016).
4. Meteorologic data:
 - Hourly and daily precipitation and temperature from Teplice and Kočkov stations (Hydrodata 2016).
 - 3-hour evaporation data (GLDAS 2016).

- Data retrieved through Hydrodesktop software (AMES 2012).
 - Data on average evaporation from open water surface (CZECH HYDROMETEOROLOGIC INSTITUT 2016).
5. Data on monthly inflow to Chabařovice Lake from an independent resource of groundwater from PV9 (PKÚ 2016).
6. The data was processed in Saga GIS (CONRAD ET AL. 2015), QGIS (QGIS 2015).

Creating the Model. The model of Chabařovice Lake catchment area was compiled using the following components and methodology:

- Rainfall loss was calculated by the Soil Moisture Accounting (SMA) method including interception (Simple Canopy) and rainfall retention on soil surface (Simple Surface).
- Transformation of surface runoff was carried out by Unit Hydrograph SCS method.
- The basic runoff was derived by the Linear Reservoir method (Linear Reservoir).
- Muskingum-Cunge method was selected to determine the water movement within the stream channel flowing.
- Meteorological model consisted of a specific hyetograph defining rainfall within an hour, specific evapotranspiration within three hours and temperature index method for the simulation of snowfall runoff. For the compilation of a specific hyetograph for the Chabařovice Lake catchment area, data from stations Teplice and Kočkov were used and combined so that they reflect actual runoff according to measured data at individual reservoir stream gauge at the runoff.

	Parameters			
Method	Direct-runoff model	Runoff-volume model	Baseflow model	Routing model
		SCS Unit Hydrograph	Soil Moisture Accounting (SMA)	Linear Reservoir

Table 1. Overview of used methods to calculate parameters on rainfall-runoff model HEC-HMS Chabařovice (Feldman 2000)

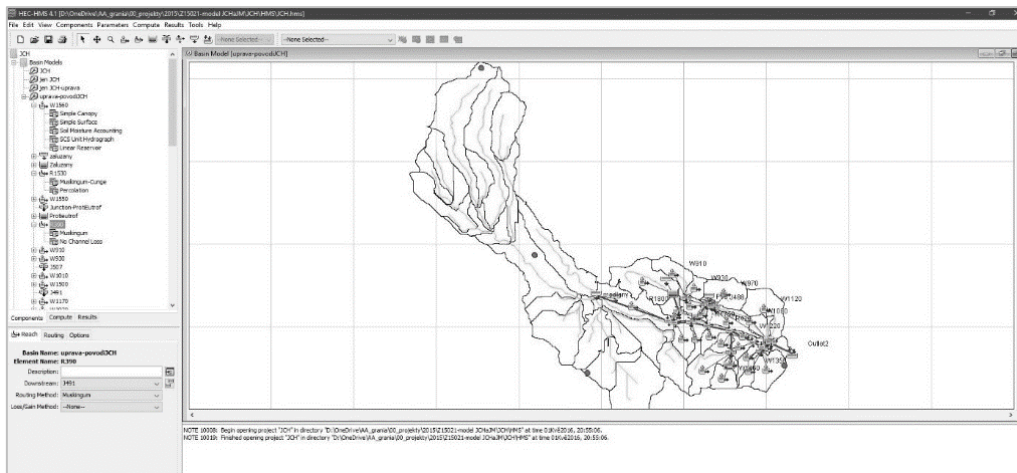


Figure 2. HEC-HMS programme during Chabařovice Lake model creation (HEC USACE 2016)

RESULTS

Development of Water Surface. The model was compiled as it represents possible tributaries to Chabařovice Lake and it was then adjusted (calibrated) by repeated simulation in HEC-HMS programme so that simulated figures (level of water in reservoirs) correspond with real measured figures. Apparent in Fig. 1, the simulation is in good correspondence with measured figures, especially in winter. Unfortunately, there was no success in identifying the parameter which would enable further accuracy of the model. Further, we proceeded to simulate the model with no groundwater supply from the PV9 into Chabařovice Lake. The simulated water surface level is also represented in Figure 3.

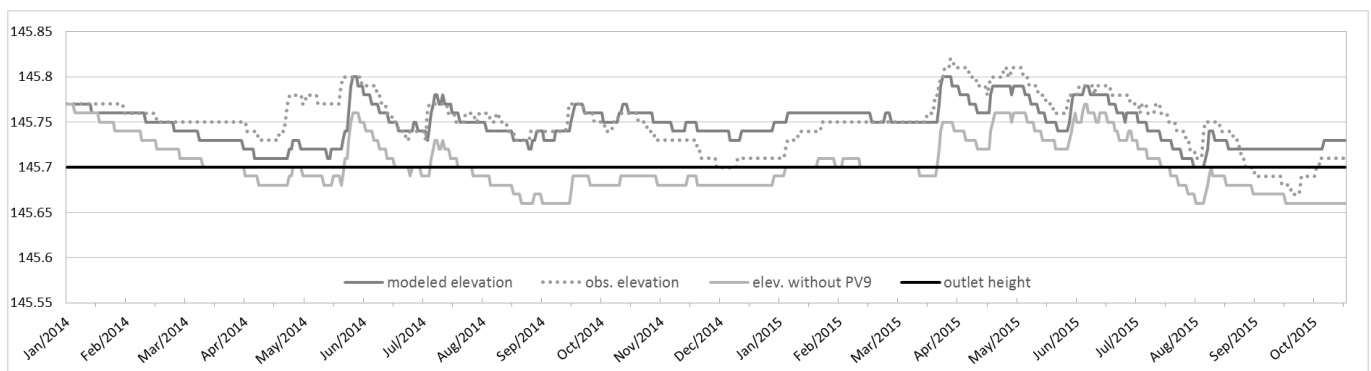


Figure 3: Development of water surface in Chabařovice Lake in the period of January 2014 – October 2015 (modelled elevation, observed elevation, elevation without PV9 and outlet height).

Comparison of hydrologic balance components. In 2014 and especially 2015 there was below average precipitation. The comparison of individual balance components may therefore allow us to clarify whether Chabařovice Lake catchment area is adequate to water level to supply the lake in time steps in a long-term failure of groundwater supply from the PV9, the present water level sustains. Furthermore, with the hydrologic model it is possible to compare individual components of lake supply and to determine their significance in water supply.

The total amount of evaporation within the simulated period amounts to about 2.7 million m³ of water whereas the supply of the lake from the active (mostly northern) part of the catchment area amounted to about 2.8 million m³. These figures point out to prior mentioned issue of the lake balance, i.e. the lake supply volume in the researched period is covered almost with no remainder by reservoir evaporation. Water infiltration into the ground appears to be of little significance. The lake balance is slightly positive even during periods of drought and with no water supply from the PV9. The total runoff from the lake amounted to approximately 1.4 million m³ which coarsely corresponds with the PV9 inflow which amounted to 1.2 million m³. There is an interesting figure of total runoff volume in the south inactive part of the lake catchment area which is basically in its entirety run away from the flooded area of the lake by a bypass to the Modlany stream. This volume of 1.7 million m³ constitutes 61% inflow of the northern part of the catchment area. In case of need, however, this would have the potential to fully replace the water resource of PV9. The following graph in Figure 4. represents the proportions of the individual components of the lake hydrologic balance within the researched period of time.

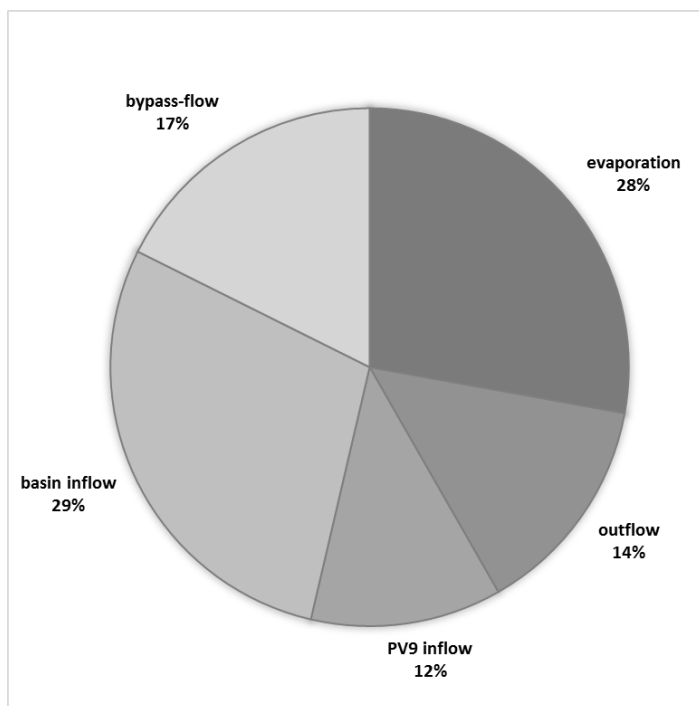


Figure 4. Summary of hydrologic balance components from the period of January 2014 – October 2015 for the Chabařovice Lake catchment area (evaporation, outflow, PV9 inflow, basin inflow – the inflow from the active lake catchment area, bypass-flow – by-pass into Modlanský stream from the inactive part of the lake catchment area).

Catchment area surface runoff – comparison. Due to the division of Chabařovice Lake catchment area, it is possible to study the individual sub-catchment areas more thoroughly and analyze the share of the individual sub-catchment areas in the total possible surface water inflow into the lake. As mentioned earlier, the northern part of the catchment area is more significant from this point of view than the southern part which is even situated outside the flooded area of the lake itself. Taking into account that the considered K and A trenches should be connected straight to the flooded area of the lake. Both trenches combined amount to a total volume of mere 0.3 million m³ which comprises only 11% inflow of the northern part of the catchment area and 18% of the total southern part runoff. Supplying water from this part directly into the flooded area of the lake would have no visible effect from a hydrologic point of view. Figure 5 shows arranges within given circumstances graphically well.

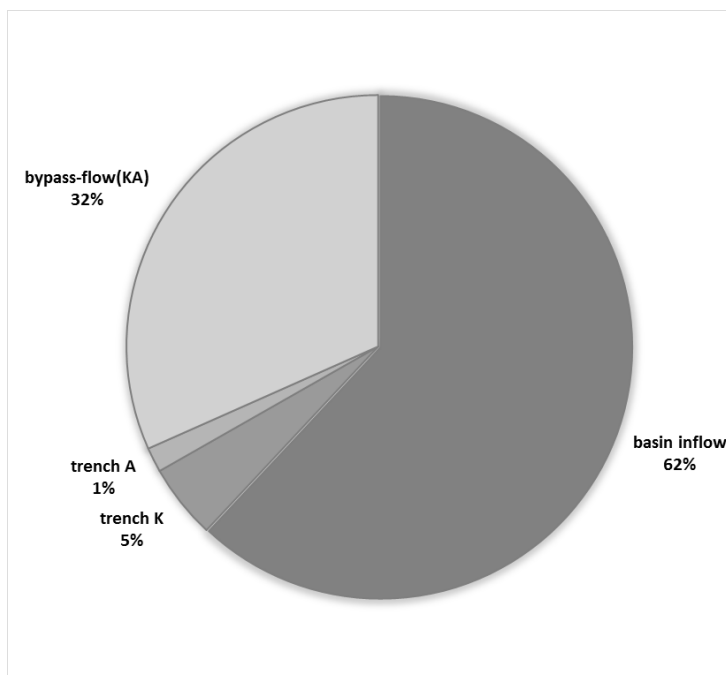


Figure 5. Summary of selected runoff components of the hydrologic balance for the period of Jan 2014 – October 2015 for the Chabařovice Lake catchment area (basin inflow – inflow from the active lake catchment area, bypass-flow(KA) – bypass to the Modlany stream from an inactive part of lake catchment area without trench K and A, trench K – outflow through a trench K, trench A – outflow through a trench A).

CONCLUSION

From the above information it follows that Chabařovice Lake is stable from a long-term hydrologic point of view at the current standpoint and the water level will remain in its current level. Moderate water decrease could be expected only in the event of a long-term failure of the PV9 which is a sufficient water resource for the lake. The possible decrease may be estimated to be within the range of 0,1-0,2 m at its maximum, especially in periods of drought. The lake would then become a lake with no runoff for a long period of time. The northern part of the catchment area, however, is sufficiently large to supply enough water to flood the lake and supplement evaporation of open water surface. Supplying the lake from the southern part would only be sensible from a hydrologic perspective in case it would be possible to use a larger portion of this sub-catchment area. This, however, is questionable due to the water quality.

***Acknowledgements.** This study was supported by the Technological Agency of The Czech Republic, Project No. TA 02020402 "Water Regime Optimisation to Mitigate Impacts on Hydrological Extremes". We express our gratitude for this financial support.*

REFERENCES

- AMES, D.P., HORSBURGH, J.S., CAO, Y., KADLEC, J., WHITEAKER, T., VALENTINE, D. (2012): HydroDesktop. Web Services-Based Software for Hydrologic Data Discovery, Download, Visualization and Analysis. Environmental Modeling & Software.
- BEDIENT, P. B., HUBER, W. C. (1989): Hydrology and Floodplain Analysis. Addison-Wesley.
- BENNETT, T. AND PETERS, J. (2000): Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Building Partnerships: pp. 1-10.
- BIAN, Z., INYANG, H.I, DANIELS, J.L., OTTO, F., STRUTHERS, S. (2009): Environmental issues from coal mining and their solutions. Mining Science and Technology. 20: 215-223.
- CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., DIETRICH, H., FISCHER, E., GERLITZ, L., WEHBERG, J., WICHMANN, V., BÖHNER, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA). Geosci. Model Dev.
- ČHMÚ (2016): Drought assessment on the territory of Czechia in 2015. Available at http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/SUCHO/zpravy/Sucho_2015_predbezna_zprava_CHMU.pdf (accessed Mar 2016) (in Czech)
- ČÚZK (2016): Dataset of ZABAGED. Available on <http://geoportal.cuzk.cz/> (accessed Jan2016)
- CZECH HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE (2016): Dataset - Data on average evaporation from open water surface.
- FELDMAN, A. D. (2000): Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. USACE, Davis.
- FUKUNAGA, D.C., CECÍLIO, R.A., ZANETTI, S.S., OLIVEIRA, L.T., CAIADO, M.A.C. (2015): Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. CATENA 125, 206–213.

- GEETHA, K., MISHRA, S., ELDHO, T., RASTOGI, A., PANDEY, R. (2007): Modifications to SCS-CN Method for Long-Term Hydrologic Simulation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133, 475–486.
- GLDAS (2016): Global Land Data Assimilation System - NASA. Available at <<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/services/grads-gds/gldas>> (accessed Jan2016)
- HEC USACE (2016): Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers. Available at <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>> (accessed Jan2016)
- HYDRODATA (2016): Hourly and daily precipitation and temperature from Teplice and Kočkov stations. Available at <<http://hydrodata.info/api/stanice>> (accessed Jan2016)
- JANEČEK, M. (1994): Cultivation and Recultivation. VUMOP, Praha, 198. (in Czech)
- JENÍČEK, M. (2008): Modeling the effect of small reservoirs on flood regime in the Chomutovka river basin. In: XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, 2.-4. June 2008. Ljubljana. Available at <<http://floodserv.natur.cuni.cz/jenicek/profil.php?akce=publikace>> (accessed Dec2015)
- JENÍČEK, M. (2009): Modelling of hydrologic processes I. Available at <<http://floodserv.natur.cuni.cz/jenicek/vyuka.php?akce=procesy>> (accessed Jan2016) (in Czech)
- JONÁŠ, F. (1975): Assignments to Recultivation and to New soils on the Dumps in the Krusne Mountains. VUMOP, Praha. 247. (in Czech)
- LÁGNER, A. (2004): Recultivation or we hand back to nature what is obliged. *Nature.cz*. Available at <<http://www.priroda.cz/clanky.php?detail=211>> (accessed Apr2016) (in Czech)
- LHOTSKÝ, R. (Ed.) (2013): Lakes and wetlands in pits after minings. ENKI, o.p.s., Třeboň. (in Czech)
- LU, Z., ZOU, S., XIAO, H., ZHENG, C., YIN, Z., WANG, W. (2015): Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China. *Water Scarcity Integr. Water Resour. Manag.* 79–82, 76–85.
- MAIDMENT, D. R., DJOKIC, D. (2000): Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems. Esri Press. Redlands, 216.
- MAIDMENT, D. R., OLIVER, F. (1999): GIS Tools for HMS Modeling Support. 19th Annual ESRI International User Conference. San Diego. Available at <<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap801/p801.htm>> (accessed May2016)

- MISHRA, K.S., JAIN, K.M., SINGH, P.V. (2004): Evaluation of the SCS-CN-Based Model Incorporating Antecedent Moisture. *Water Resour. Manag.* 18, 567–589.
- NEUŽIL, M. (1998): Impact of surface minings of brown coal on Environment. MŽP -EIA : Spirax-Sarco, a.s., Praha. Available at <[http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/B18C18B302379CCCC1256FC000407A70/\\$file/e-02-5.htm](http://www.mzp.cz/osv/edice.nsf/B18C18B302379CCCC1256FC000407A70/$file/e-02-5.htm)> (accessed Jan2016) (in Czech)
- PKU s.p. (2016): Chabařovice. Available at <http://www.pku.cz/lokality/chabarovice/> (accessed Mar2016) (in Czech)
- QGIS (2016): A free and open source geographic information system. Available at <http://www.qgis.org/en/site/> (accessed Mar 2016)
- QGIS DEVELOPMENT TEAM (2015): QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- RICHARDS, I.G., PALMER, J.P., BARRATT, P.A. (1993): The reclamation of former coal mines and steelworks . 1. Amsterdam, NL : Elsevier Science Publishers B.V. 717. ISBN 0-444-81703-4.
- ROTHBAUER, I.M. (2004): Territorial Prognosis of the Sokolov Locality impacted by brown coal mining. Ateliér T-plan. Available at <http://www.medardlake.eu/file_download/78> (accessed Nov2015) (in Czech)
- SAGA GIS (2016): System for Automated Geoscientific Analyses. Available at <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (accessed Mar 2016)
- SAHU, R.K., MISHRA, S.K., ELDHO, T.I., JAIN, M.K. (2007): An advanced soil moisture accounting procedure for SCS curve number method. *Hydrol. Process.* 21, 2872–2881.
- SINGH, P.K., MISHRA, S.K., BERNDTSSON, R., JAIN, M.K., PANDEY, R.P. (2015): Development of a Modified SMA Based MSCS-CN Model for Runoff Estimation. *Water Resour. Manag.* 29, 4111–4127.
- ŠTÝS, S. (2015): The Revival Earth. Ústecké tiskárny s.r.o., Ústí nad Labem. (in Czech)
- VÚMOP, v.v.i. (2016): Dataset Runoff curve figures (CN), infiltration of soil and retention water capacity of soil.

Contact address: Mgr. Tereza Bažatová, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 1176, Praha 6, 165 20. E-mail: bazatova.tereza@gmail.com.

6 Celkové shrnutí a doporučení pro další výzkum

Předložená disertační práce dokládá komplexnost využití hydrologického modelování. V dnešní době známe mnoho hydrologických modelů, které se vyvinuly právě díky odlišným přístupům k jednotlivým komponentám srážko-odtokového procesu nebo díky odlišnostem ve struktuře povodí. Pro výběr vhodného modelu je důležité položit si otázku „co chceme přesně modelovat a pro jaké území“. Studie obsažené v této práci tuto komplexnost dokazují a mimo jiné poukazují na jednotlivá úskalí výběru modelu, často se jedná o nedostatek měřených dat nebo zohledňování pouze některých faktorů ovlivňujících odtok. Např. v článku, který popisuje bilanci jezera Chabařovice bylo uvažováno nad modelem SWAT, který ovšem nezohledňuje antropogenní ovlivnění toku, což je pro toto povodí stěžejní faktor. V článku, který se týká povodí Lomnice a antropogenního ovlivnění odtoku, je zjevná náročnost na vstupní data, apod.

Mezi hlavní přínosy studií patří:

Studie 1. Původním záměrem přírodě blízké úpravy Jindřichovického potoka byl návrat bioty do vodního prostředí, ale také směrová i hloubková stabilizace koryta, což se dle výsledků studie povedlo. V návrhu byla ponechána hloubka a rozměry původního koryta, objekty byly voleny tak, aby umožňovaly migraci bioty. Hloubka vody se zvyšuje, což je dáno menším podélným sklonem a vyšší drsností. Rychlost proudění a tangenciální napětí se snížily s ohledem na výše uvedené změny. Objem vody se zvýšil díky členitějšímu podélnému profilu a větší hloubce vody. Podélný profil se více blíží přírodnímu „vlnitému“ podélnému profilu se střídáním peřejí a tůň. Tůň nad a pod příčnými objekty vytváří refugia pro živočichy za nízkých vodních stavů. Dalším pozitivem úpravy bylo provzdušňování vody na častých přepadech a skluzech, zachování migrační prostupnosti toku díky vhodným objektům a celkově byl podpořen krajinný ráz oblasti. Vzorkování makrozoobentosu poukázalo na podstatně vyšší vhodnost nového typu úpravy koryta oproti úpravě staré. Jak taxonomické složení, tak kvantita bentické fauny v nově upraveném korytě výrazně převyšovaly tyto parametry v korytě se starou úpravou, a to především díky přítomnosti přírodě blízkých úseků dna, sestávajících z pestré škály habitatů (písek, štěrk, menší i větší kameny). Rovněž hojná přítomnost písčín pod hrázkami se ukázala být v tomto typu toku přínosná pro pestrost a komplexnost bentického společenstva. Úseky dna vytvořené ze skládaných kamenů se sice ukázaly z habitatů nově upraveného úseku jako na

makrozoobentos nejchudší, přesto pro něj představují podstatně příznivější prostředí než souvislá kamenná dlažba staré úpravy.

Studie 2. Studie odtokového režimu povodí Lomnice dokázala vytvořit komplexní obraz srážko-odtokových poměrů v povodí. A to pomocí několika metod: posouzení odtokových poměrů metodou součtových čar a hydrologického bilančního modelu Bilan, dále analýzy vývoje teplot vzduchu a sněhových poměrů. Použité metody jednoduchých a podvojných součtových čar (doplněné o analýzu sněhových a teplotních poměrů) potvrdily existenci určitých změn trendů odtoku v modelovém povodí Lomnice. Identifikované období nárůstu odtoku koresponduje s hospodářskými zásahy v povodí (především regulace toku a změny land use). Při srovnání hydrologické bilance povodí Lomnice s povodím Horní Vltavy lze zjistit rozdíly především v normálním roce 2004. Dílčí povodí Lomnice vykazovalo povahu směrodatně suchou až normální, ačkoli pro povodí Horní Vltavy, kam Lomnice spadá, i celou ČR byl rok 2004 hodnocen jako normální. Tento rozdíl poukazuje na lokální význam antropogenních zásahů do povodí, které dílčí povodí ovlivnily, velké povodí již nijak výrazně. Při dalším plánování trvale udržitelného využívání vodních zdrojů v povodí by bylo tudíž vhodné zvážit vliv lidského působení také v lokálním měřítku.

Studie 3. Výsledky modelu poukazují na vhodnost zlepšení hydrologické retence a akumulace vody v povodí (především v povodí Radovesické výsypky), a to pomocí např. biotechnických opatření. Studie přináší vhodné řešení situace v povodí obou výsypek, a to pomocí vybudování systému malých nádrží, infiltračních příkopů nebo pásů či ostatních typů opatření. Ve studii byly představeny inovační přístupy v oblasti modelování vodního režimu. Měřená data byla získána pomocí velmi moderních metod měření. Meteorologická stanice s automatickým měřicím systémem byla instalována v zájmových povodí, nabíjena byla díky solárnímu panelu. Pro model WBCM-6 byla data měřena v hodinovém kroku. Velkým přínosem studie je, že přináší mnoho konkrétních výstupů, které jsou využitelné v inženýrských projektech řešících zlepšení vodního režimu v daném území.

Studie 4. Zpracování srážko-odtokových poměrů povodí jezera Chabařovice přináší velmi důležité závěry pro vodohospodářské plánování správce povodí. Z výsledků modelu HEC-HMS vyplývá, že jezero Chabařovice je v současném stavu z hydrologického pohledu dlouhodobě stabilní a hladina vody se bude pohybovat v současné úrovni. Mírné zaklesnutí vody by bylo možné očekávat pouze v případě dlouhodobého výpadku přelivového vrtu 9 jako dodatečného zdroje vody pro jezero. Možné zaklesnutí lze však odhadnout na úrovni maximálně 0,1-0,2 m a to zejména v sušším období. Jezero by se tak stalo bezodtokým na delší časové období. Severní část povodí je však dostatečně velká, aby byla schopná dodávat

dostatek vody pro zátopu jezera a doplňovat tak výpar z volné vodní hladiny. Zavedení vody do jezera z jižní části by mělo větší význam z hydrologického pohledu pouze za předpokladu, že by bylo možné využít větší plochu tohoto subpovodí. To je však problematické z hlediska kvality vody.

Potenciál pro další výzkum vidím ve všech zmíněných lokalitách a povodích. Bylo by jistě velmi zajímavé detailně analyzovat, kdy a které antropogenní zásahy do povodí ovlivnily odtokové poměry povodí Lomnice vzhledem k tomu, že povodí ve své minulosti prošlo četnými antropogenními změnami. Díky husté rybniční síti je tento výzkum velmi náročný na vstupní data, která nejsou vždy dostupná a bude velice náročné tato data v terénu získat. V povodí jezera Chabařovice a Radovesické a Loketské výsypky můžeme dále pracovat s bilancí povodí a vybrat delší referenční období pro přesnější návrh případného opatření. Povodí Jindřichovického potoka nabízí posouzení funkčnosti přírodně blízké úpravy bystřin moderním postupem „skluz-tůň“ v současné době, tzn. s odstupem času, několik let po vybudování.

Nesmíme však opomíjet nejistoty hydrologického modelování. Hydrologické modelování vychází ze zjednodušeného popisu přírodního systému a toto zjednodušení s sebou právě přináší i nejistotu. Nejistoty lze dělit na dvě skupiny (Jeníček 2009), a to nejistoty vstupů (např. nahodilé chyby, systematické chyby měření, chyby prostorové interpretace) a nejistoty hydrologického modelu (prostorové a časové měřítko, počáteční podmínky, kalibrace modelu). Obě uvedené skupiny tvoří podle Krzysztofowicz a Maranzano 2004 dohromady hydrologickou nejistotu.

Na závěr mi dovolu citaci Loague a Freeze (1985): „V mnoha ohledech je hydrologické modelování více umění, než věda a je pravděpodobné, že to tak bude i nadále“. Ačkoli prošlo hydrologické modelování od té doby obrovským vývojem, použitelnost výsledků hydrologického modelování není vždy jednoznačné a závisí na mnoha faktorech.

7 Seznam uvedených tabulek, grafů, obrázků a map

Obr.č. 1: Obecná struktura srážko-odtokového modelu (Jeníček 2007b)

Obr. č. 2: Vznik povrchového odtoku, a) infiltration excess, b) saturation excess, c) return flow; P – srážky, q_0 – povrchový odtok, q_r – vratný odtok, q_s – podpovrchový odtok (Beven, 2006)

Obr.č. 3: Bezrozměrný jednotkový hydrogram (Kovář 2010)

Obr. č. 4: Srovnání vlastností Hortonovského povrchového odtoku a nasyceného povrchového odtoku (Fluviální geomorfologie 2003)

Obr. č. 5: Hydrologické skupiny půd (VÚMOP 2011)

Obr.č. 6: Hydrologická bilance (Serrano 1997)

Obr. č. 7: Návrh schématu účelového hodnocení fluvialních systémů (Kopp 2003)

Obr. č. 8: Matematické řešení diferenciálních rovnic převodem přes numerické úpravy do diferenčních (algebraických) rovnic (Kovář 2011)

Obr.č. 9: Klasifikace dle typu simulovaného systému (podle Becker, Serban v Daňhelka et al., 2003)

Obr.č. 10: Klasifikace dle hydrologických procesů a parametrů (podle Becker, Serban v Daňhelka et al., 2003)

Obr.č. 11: Zjednodušené schéma odlišné reprezentace prostorových dat, a) celistvý model, b) semidistribuovaný model, c) distribuovaný model (DIBAVOD, CORINE - Land cover 2000, <http://geoportal.cenia.cz>)

Obr.č. 12: Schéma základního dělení hydrologických modelů (upraveno podle Becker, Serban, 1990)

8 Použitá literatura a ostatní zdroje

Asce, M., et al. 2003. Simple Estimation of Prevalence of Hortonian Flow in New York City Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering* 8, č.4, s. 214-218.

Ashagrie, A., G. et al. 2006. Detecting the influence of land use changes on discharges and floods in the Meuse River Basin – the predictive power of a ninety-year rainfall-runoff relation? *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, s.691-701.

Bažatová T., Šimková J. 2015. Changes in runoff regime. The Lomnice catchment case study. *Soil & Water Res.*, 10:40–48

Becker, A. Serban, P. 1990. Hydrological models for water - resources systém design and operation. *Operational Hydrology Report No. 34*, WMO, Ženeva, 80 s.

Bedient, P. B., Huber, W. C. 1989. *Hydrology and Flood plainn Analysis*. Addison - Wesley, 650 s.

Beven, K., J. 2006. *Rainfall-runoff Modelling, The Primer*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 360 s.

Bohn, B., A., Kershener, J., L. 2002. Establishing aquatic restoration priorities using a watershed approach. *Journal of Environmental Management*, 64, s. 355–363.

Boughton, W., Droop, O. 2002. Continuous simulation for design flood estimation – a review. *Environmental Modelling and Software*, 18, č.4, s. 309 - 318.

Blažková, Š. 1993. Srážkoodtokové modelování založené na principu jednotkového hydrogramu. *Práce a studie, sešit 183*. Praha: VÚV TGM. 114 s.

Buchetele, J. 2002. Úvod k metodám a modelům hydrologických předpovědí. In: *Povodně: prognózy, vodní toky a krajina*. Praha: ČVUT, s. 51-55.

Cantón, Y., et al. 2001. Hydrological and erosion response of badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology* 252, s. 65-84.

Čermák, M. 1968. Základní činitelé ovlivňující odtok velkých vod. In: *Sborník prací č.12*. Praha: ČHMÚ. s. 57-76.

Černohous, V. 2002. Vliv evapotranspirace na odtok z povodí. In *Zprávy lesnického výzkumu* 47, č. 3. s. 144 – 145.

Daňhelka, J. et al. 2003. Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. *Český hydrometeorologický ústav*. Praha, 196 s.

Daňhelka, J. 2007. *Operativní hydrologie: Hydrologické modely a nejistota předpovědí*. Český hydrometeorologický ústav. Praha, 104 s.

Dawdy, R. D., Lichty, W. R., Bergmann, J. M. 1972. A Rainfall-Runoff Simulation Model for Estimation of Flood Peaks for Small Drainage Basins. Geological Survey professional paper 506 – B. United States Government Printing office. Washington. 28 s.

Distribovaný model DIBAVOD, CORINE – Land cover. 2000. [online, cit. 6. 5. 2000]. Dostupné z WWW: <<http://geoportal.cenia.cz/>>

Divín, J. 2013. Modelování průtoků pomocí softwarů HEC-RAS a HEC-GeoRAS. Diplomová práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně. 87 s.

Dub, O., et al. 1969. Hydrologie. Technický průvodce 34. Praha: SNTL. 379 s.

Feldman, A. D. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. USACE, Davis, 155 s.

Fluviální geomorfologie. Přednáška 2: Hydrologie povodí: povrchový odtok, hydrologické extrémy, srážko-odtokové poměry. Brno: PřF MUNI.

Gabriel, P. aj. 1982. Výpočetní technika pro obor vodní hospodářství a vodní stavby. Praha: SNTL.

HEC USACE 2016. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers. Available at <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>> (accessed Jan2016)

Hladný, J. 2008. Aplikované hydrologie, podklady k přednášce. Praha: PřF UK.

Hlavčová, K., Holko, L., Szolgay, J. 2001. Tvorba a modelovanie odtoku na svahoch a z malých povodí. Životne prostredie 35, č.3, s. 126-132.

Horáček S., Kašpárek L., Novický O. 2008. Estimation of climate change impact on water resources by using Bilan water balance model. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 4.

Hrádek, F. 1990. Maximální odtok z velmi malých povodí. Doktorská disertační práce. AF ČZU. Praha, 39 s.

Hrádek, F., Kuřík, P. 2002. Hydrologie, Skriptum FLE ČZU Praha. Praha: FLE ČZU. 280 s.

Hynie, O. 1961. Hydrogeologie ČSSR I. Prosté vody. Praha: ČSAV. 564 s.

Janeček, M. et al. 2002. Ochrana zemědělské půdy před erozí. Praha: ISV nakladatelství. 201 s.

Janeček, M. 2008. Základy erodologie. Praha: ČZU. 172s.

Jedlička, J., Štych, P. 2006. Hydrologické modelování v programu ArcGIS. Praha, 64 s.

- Jeníček, M. 2007b. Rainfall-runoff modeling in small and middle-large catchments – an overview. In *Geografie – Sborník ČGS*, 111, č. 3. s. 305 – 313.
- Jeníček, M. 2009. Modelování průběhu extrémních povodní v kontextu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany. *Disertační práce*. Praha: PŘF UK. 141s.
- Kantor, P. 2003. *Lesy a povodně. Souhrnná studie*. Praha: MŽP. 48 s.
- Kender, J. 2004. *Voda v krajině: Kniha o krajinnotvorných programech*. Praha: Konsult. 207 s.
- Kemel, M. 1980. *Hydrologie. Skriptum Fakulty stavební ČVUT*. Praha: ČVUT. 292 s.
- Kern, K. 1994. *Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung*. Heidelberg, Berlin : Springer Verlag, 256 s.
- Koivusalo, H. and Karvonen, T. 1995. Modeling surface runoff – A case study of a cultivated field in Southern Finland, *Nordic Hydrology*, 26, 205– 222.
- Kopp, J. 2003. Hodnocení fluvialních systémů jako součást revitalizační studie povodí. *Geomorfologický sborník 2*. Plzeň: ČAG ZČU.
- Kovář, P. 2011. *Deterministic Model. Materiály k přednášce*. Praha: FŽP ČZU.
- Kovář, P. 2010. *Materiál k přednáškám – Malé vodní toky*. Praha: ČZU.
- Kovář P., 1992: Possibilities of design floods assessment using model KINFIL (in Czech). *Vodohospodářský Časopis*, roč. 40, č. 2, s. 197–220.
- Kovář, P. 1990. *Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodí*. Praha: ČZU. 95s.
- Kovář P., Hrádek F., 1994: Design flood determination on small catchments using the KINFIL II model. In: Seuna P. et al. (eds): *FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data*. IAHS Publication No. 221, Wallingford, s. 307–313, ISBN 0-947571-04-3.
- Kovář, P. a kol. 2012. *Posouzení účinnosti přírodě blízkých způsobů hrazení bystřin. Případová studie Jindřichovického potoka*. *Vodní hospodářství 7/2012*.
- Kovář, P., Křovák, F. 2011. *Nature Close Torrent Control in Ore Mountains*. Vienna: *HydroEco 2011*. s. 113.
- Kovář, P., Křovák, F. et al. 2013. *An appraisal of the effectiveness of nature-close torrent control methods – Jindrichovicky Brook case study*. *Ecohydrology*.
- Kovář P., Vaššová D. 2011. *Model KINFIL- manuál*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 16 s.

Kovář, P., Zedulák, J. 2010. Program Flood V- příručka pro uživatele. Případová studie Žarošice. Praha: ČZU.

Kulhavý, Z., Kovář, P. 2000. Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí. Praha: VÚMOP. 123 s.

Královec, V. 2006. Hodnocení srážkoodtokových poměrů v povodí Otavy. Bakalářská práce. Praha: PřF UK. 80 s.

Kříž, H. 2004. Geografické podmínky vzniku povodní. Praha: Vodní hospodářství č.8. s. 253 - 255.

Krzysztofowicz, R., Maranzano, C.J. 2004. Hydrologic uncertainty processor for probabilistic stage transition forecasting. Journal of Hydrology. s. 57-73.

Langhammer, J. 2004c. Změny přírodního prostředí jako indikátor povodňového rizika[online, cit. 19. 4. 2009]. Dostupné z WWW: <<http://hydro.natur.cuni.cz/floodweb/download.php?akce=vysledky&cislo=4>>

Langhammer, J. 2009. Typologie povodní, extrémní povodně v Evropě a ČR. Praha: PřF UK.

Loague, K. M., Freeze, R. A. 1985. A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. Water Resources Research, 21,2. s. 229-248.

Loganathan, G., V., et al. 1989. Variable Source Area Concept for Identifying Critical Runoff-Generating Areas in a Watershed. [online, cit. 5. 7. 2006]. Dostupné z WWW: <<http://www.vwrrc.vt.edu/publications/Bulletin%20164.pdf> />

Maidment, D. R. 1993. Handbook of hydrology. McGraw-Hill, New York, 1424 s.

Maidment, D. R., Djokic, D. 2000. Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic informatik systems. EsriPress. Redlands, 216 s.

Matoušková, M. 2007. Ekohydrologický monitoring vodních toků v kontextu Rámcové směrnice ochrany vod EU. Závěrečná výzkumná zpráva projektu GAČR č. 205/02/P102, PřF UK v Praze a GAČR, Praha.

Matějček, J., Hladný, J. 1990. Povodňová katastrofa 20. století na území České republiky. Praha: MŽP. 60 s. ISBN: 80-7212-067-3.

Naef, F., Scherrer, S., Weiler, M. 2002. A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. Journal of Hydrology, Volume 267, Issues 1-2. s. 74-79.

Neruda, M., Slavík, L. 2004. Vodní režimy v krajině. Fakulta životního prostředí UJEP Ústí nad Labem. Ústí nad Labem. 134 s.

Netopil, R. 1984. Fyzická geografie I. Praha: SPN. 273 s.

Němečková, S. 2005. Analýza faktorů působících na postupovou dobu průtoků na vodních tocích v povodí Berounky a Sázavy. Magisterská práce. Praha: KFGG PřF UK. 91 s

O'Connel, E. et.al. 2007. Is there a link between agricultural land-use management and flooding? *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, s.96-107.

Perlman, H. 2005. The water cycle: Surfac runoff. USGS – U.S. Geological Survey [online, cit. 15. 4. 2009]. Dostupné z WWW: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclerrunoff.html> >

Ranzi, R. et al. 2002. Effects on floods of recent afforestation and urbanization in the Mella River (Italian Alps). *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, s.239-253.

Rosgen, D., L. 2001. A stream channel stability assessment methodology. In *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference*, Vol. 2. s. 18–26.

Serrano, E.S.1997. *Hydrology for engineers, Geologists and Environmental Professionals*, HydroScience Inc., Lexington, Kentucky. 480 s.

Smolová, I. 2011. *Hydrologie – materiály k přednáškám*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [online, cit. 19. 9. 2011]. Dostupné z WWW: <http://geography.upol.cz/soubory/lide/smolova/PPR/PPR_Extremni%20hydrologicke%20jevy.pdf/>

Stomph, T., J. 2002. Scale Effects of Hortonian Overland Flow and Rainfall-Runoff Dynamics: Laboratory Validation of a Process-Based Model. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, s. 847-855.

Šimková J., 2012: Study of the water balance in the Medard mining pit, in the Sokolov region. [Diploma Thesis.] Faculty of Environmental Science – Czech University of Life Sciences Prague.

SRH. 2016. [online, cit. 19. 8. 2016]. Dostupné z WWW: <<http://www.usbr.gov/>>

Šulcová, L. 2008. Porovnání srážek a průtoků na lokalitě Jenín ve vztahu ke koncentraci dusičnanů. Diplomová práce. České Budějovice: JČU. 73s.

Švihla, V. 1997. Příspěvek k řešení problému lesního vodního hospodářství. In: *Povodně a krajina 97*.Brno. s. 27-31.

Taufmannová, A. 2009. Modelování vlivu malých vodních nádrží na povodňové události. Diplomová práce. Praha: PřF UK. 125s.

Uhlířová, K., Vrána, K. 2005. Vliv retenční kapacity krajiny na povodňové průtoky. In: *Krajinotvorné programy*. Sborník konference. Průhonice, s. 26-35.

Vaculín O., Soukalová E. 2003. Regime of groundwater and hydrological water balance model in the infiltration area of the Brno water supply system. In *5th International Conference in Brno 2003*.

Vizina A., Hanel M., Novický O., Tremel P. (2010): Experience from Simulation of Climate Impacts on Water Regime in Monthly and Daily Time Step. VÚV TGM (T. G. Masaryk Water Research Institute).

Vlnas, R. a kol. 2011. Hydrologická bilance množství a jakosti vody České republiky za rok 2010. Praha: ČHMÚ. 170 s.

VÚMOP 2011. Hydrologické skupiny půd. Praha: VÚMOP.

VÚV T.G.M. (2011): Bilan water balance model – Manual. Prague.