

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta  
Ústav pro životní prostředí**

**Charles University in Prague, Faculty of Science  
Institute for Environmental Studies**

Doktorský studijní program: Ekologie a ochrana prostředí – Aplikovaná a krajinná ekologie  
Ph.D. study program: Ecology and Environmental Protection – Applied and Landscape  
Ecology

**Autoreferát disertační práce  
Summary of the Ph.D. Thesis**



**Vliv globálních změn klimatu na hydrologický režim pramenných  
povodí**

**Effect of Global Climate Change on Hydrological Patterns in  
Headwater Catchments**

**Mgr. Anna Lamačová**

Školitel/Supervisor: doc. RNDr. Jakub Hruška, CSc.

Školitel-konzultant/Supervisor-consultant: prof. RNDr. Evžen Stuchlík, CSc.

**Praha, červen 2014**

## ABSTRAKT

Cílem této práce bylo (i) vyhodnotit dlouhodobé změny ve vydatnostech pramenů v České republice (1971–2007) a v odtocích z malých lesních povodí sítě GEOMON (1994–2011), (ii) vyhodnotit vliv změny klimatu na chemismus povrchových vod v povodí citlivém na kyselou atmosférickou depozici (Lysina); a (iii) odhadnout dopady očekávané změny klimatu na hydrologický režim malých lesních povodí (GEOMON) a alpinského pramenného povodí (Skalnaté pleso) podle různých emisních scénářů CO<sub>2</sub> v období 2021–2050 a 2071–2100.

Statisticky významné poklesy průměrných ročních vydatností byly pozorovány u 18 % pramenů, zatímco rostoucí vydatnosti v méně než 0,5 % z celkových 157 testovaných objektů. V případě hodnocení trendů v hydrogeologických oblastech se významný klesající trend projevil ve 4 z 18 oblastí. Mezi tyto oblasti patřily rajony v sedimentech paleogénu a křídý Karpatské soustavy v jihovýchodní a severovýchodní části České republiky, rajony v terciálních a křídových sedimentech pánví na jihovýchodě a krystalinika, proterozoika a paleozoika v centrální části České republiky. Vydatnosti pramenů klesaly nejčastěji v letních měsících červen – srpen (v průměru o 24 %) a nejméně v období únor až duben (v průměru o 15 %) (Článek I).

Napříč povodími sítě GEOMON nedochází ke statisticky významným poklesům nebo nárůstům průtoků v některém měsíci nebo ročním období 1994–2011 (Článek VI).

Očekávané dopady změny klimatu na chemismus povrchových vod povodí Lysina budou zanedbatelné v porovnání s vlivem kyselé atmosférické depozice. Budoucí koncentrace SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> v povrchových vodách zůstane v případě minimálních nebo žádných změn v ročním odtoku přibližně na současné hladině 90 µeq L<sup>-1</sup> (2008–2009) nebo by vzrostla o 10–30 % v důsledku odhadovaného poklesu odtoku. Stejně změny lze očekávat i v případě koncentrace bazických kationtů, kde měřená hodnota dosahovala 160 µeq L<sup>-1</sup> (2008–2009). Vliv změny klimatu na pH se očekává malý a vedl by k opětovnému mírnému okyselení povrchových vod v porovnání se současným pH 4,2 (2008–2009) (Článek IV).

Předpokládaná změna klimatu významně ovlivní hydrologický režim malých pramenných povodí v obdobích 2021–2050 a 2071–2100. U ročního odtoku lze většinou očekávat pokles v obou obdobích. Modelové předpovědi předpokládají, že zimní odtok vzroste, dojde k posunu jarních maxim odtoku blíže k zimě a letní a podzimní odtoky citelně poklesnou. Modelované poklesy v průměrných denních odtocích ukazují, že sledované toky by mohly pravidelně na kratší období vysychat, a to zejména v případě povodí v nižších nadmořských výškách. Podobnou situaci lze očekávat i v případě alpinských povodí s mělkými jezery a malou plochou povodí, kde by mohlo docházet ke změně některých jezer z trvalých na periodická (Články II, III, V, VI).

## ABSTRACT

The aims of this theses were (i) to evaluate trends in spring yields in the Czech Republic (period 1971–2007) and trends in runoff from small forested catchments of the GEOMON network during the period 1994–2011, (ii) evaluate the impact of climate change on streamwater chemistry in acid-sensitive catchment (Lysina), and (iii) estimate the impact of anticipated climate change projected according to different CO<sub>2</sub> emission scenarios on flow patterns forested (GEOMON) and alpine headwater (Skalnaté Lake) catchments in the periods 2021–2050 and 2071–2100.

Significant negative trends on the annual level were observed at 18% of springs while positive trends at only less than 0.5% of 157 tested objects and 4 of 18 regions revealed significant decreasing trend. To these regions belonged the zones of Carpathian Cretaceous and Paleogene sediments in the southeast and northeast of the Czech Republic, the zones of tertiary and Cretaceous basins in the southeast and Proterozoic and Paleozoic crystalline rocks in the central part of the Czech Republic. Most spring yields were decreasing within the summer months June–August (on average 24%) and least between February and April (on average 15%) (Paper I).

There were no general patterns found indicating either significant increases or decreases in runoff on either seasonal or annual levels across the investigated GEOMON network catchments from 1994–2011 (Paper VI).

The climate change influence on streamwater chemistry would be small compared to the influence of atmospheric acid deposition. Future streamwater SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentration would maintain at the current level of approximately 90 µeq L<sup>-1</sup> (2008–2009) in case of minimum or no change in runoff, or would increase by 10–30% as a result of projected runoff decrease. The runoff change would increase the concentration of base cations a similar magnitude compared to measured 160 µeq L<sup>-1</sup> (2008–2009). The effect of climate change on pH would be small and would lead to slight re-acidification of streamwater compared to the measured value 4.2 (2008–2009) (Paper IV).

Projected climate change will significantly affect hydrological pattern in the periods 2021–2050 and 2071–2100. The annual runoff is mainly projected to decrease for both periods. Winter runoff is expected to increase, the spring runoff maxima will shift toward the winter months, and runoff in summer and autumn will decrease notably. The projected declines in mean daily flows indicate that studied streams might regularly dry up for short periods in the summer and autumn especially in catchments with low elevation. A similar situation can be expected for alpine catchments with shallow lakes with small drainage area, where future climate conditions could cause a change in their status from permanent to temporary lakes (Papers II, III, V, VI).

**PUBLIKACE A RUKOPISY ZAHRNUTÉ DO DISERTAČNÍ PRÁCE/ *PUBLICATIONS AND MANUSCRIPTS INCLUDED IN THE PH.D. THESIS***

- I.** Ledvinka, O., **Lamačová, A.** Detection of field significant long-term monotonic trends in spring yields (Submitted to Stochastic Environmental Research and Risk Assessment in April 2014, IF 1.961)
- II.** **Benčoková, A.**, Stuchlík, E. and Křeček J. (2009). Impacts of global climate change on the hydrological cycle in a small alpine catchment – the High Tatras, Slovakia. Acta Universitatis Carolinae – Environmentalica 1–2. 33–43.
- III.** **Benčoková, A.**, Hruška, J., Krám, P., Stuchlík, E. (2011) Future and recent changes in flow patterns in the Czech headwater catchments. Die Bodenkultur 62, (1–4), 15–20.
- IV.** **Benčoková, A.**, Hruška, J., Krám, P. (2011): Modeling anticipated climate change impact on biogeochemical cycles of an acidified headwater catchment. Applied Geochemistry 26, S, 6–8. (IF 1.708)
- V.** **Benčoková, A.**, Krám, P., Hruška, J. (2011) Future climate and changes in flow patterns in Czech headwater catchments. Climate Research 49, 1-15. (IF 2.684)
- VI.** **Lamačová, A.**, Hruška, J., Krám, P., Stuchlík, E., Farda, A., Chuman, T., Fottová, D. Runoff trends analysis and future projections of hydrologic patterns in small forested catchment (Accepted for publication in Soil and Water Research in April 2014, IF 0.333)

## ÚVOD

Odhad budoucího vývoje klimatu a jeho potenciální vliv na hydrologický režim představuje důležité téma pro výzkum, neboť dostupnost vody je klíčová jak pro lidskou společnost, tak pro ekosystémy (Prudhomme and Davies, 2009).

Mnoho současných prací se zaměřovalo na vyhodnocení změn v odtocích v jednotlivých státech, například ve Francii (Renard et al., 2008), Švýcarsku (Schmocker-Fackel and Naef, 2010), České republice (Fiala et al., 2010) nebo na Slovensku (Demeterová and Škoda, 2009). Některé studie se zabývaly i změnami odtoků v Evropě (např. Stahl et al., 2010; Villarini et al., 2011). Další práce se soustředily i na vyhodnocení změn v podzemních vodách na území jednotlivých států například na Slovensku (Majerčáková et al., 1997) a ve Finsku (Hyvarinen, 2003). Nicméně výše uvedené studie používaly průtoky z větších řek nebo hladiny podzemních vod a pramenným oblastem a vydatností pramenů byla věnována jen malá pozornost.

Pramenná povodí jsou velmi důležitá z ekologického pohledu, zejména v případě odlehlých alpinských povodí (Beniston, 2006), mimoto jsou rovněž považována za oblasti obzvláště citlivé vůči změnám klimatu (Haigh et al., 2000). Malá povodí o velikosti desítek až stovek hektarů představují ideální výzkumné plochy pro hodnocení hydrologické a hydrochemické bilance, protože je v nich snazší měřit vstupy a výstupy v porovnání s většími povodími (Fottová, 2003).

Výsledky hydrologických studií modelujících vliv změny klimatu na evropská povodí ukazují podobný charakter změn odtokového režimu v ročních obdobích, a to pokles letního a nárůst zimního odtoku (e.g. Fowler and Kilsby, 2007; Graham et al., 2007; Driessen et al., 2010; Hurkmans et al., 2010; Hanel et al., 2012).

Hanel et al. (2012) očekávají pokles v jarním a letním odtoku na většině z 250 sledovaných českých povodí. Dále předpokládají nárůst zimního odtoku v severovýchodní části České republiky podle většiny scénářů, zejména v případě povodí s vyšší nadmořskou výškou. Simulace pro sub-povodí řeky Malše (437 km<sup>2</sup>) v jihovýchodní části ČR ukázaly nejvýznamnější změnu (pokles) v hydrologickém režimu na jaře, avšak změny v zimních odtocích byly jen nepatrné, případně vykazovaly mírný pokles (Němečková et al., 2011). Statisticky významný posun budoucího jarního odtokového maxima do dřívějšího období, který je způsobený nárůstem teploty ovlivňující tání sněhu, byl publikován v různých pracích (např. Shabalova et al., 2003; Horton et al., 2006).

## CÍLE

Předložená disertační práce je zaměřena na zodpovězení následujících obecných otázek: (i) jsme schopni nalézt známky vlivu klimatické změny v současných hydrologických datech z pramenů a malých pramenných povodí a (ii) jaké budou dopady odhadované změny klimatu na vodní bilanci a chemismus povrchových vod v budoucnosti?

Hlavní cíle práce byly:

- Vyhodnotit trendy ve vydatnostech pramenů a plošné trendy v hydrogeologických oblastech v České republice v období 1971–2007

- Vyhodnotit trendy v odtocích z malých lesních povodí sítě GEOMON v období 1994–2011
- Biogeochemické modelování budoucích změn v chemismu povrchových vod v povodí citlivém na kyselou atmosférickou depozici dle různých scénářů klimatu
- Hydrologické modelování dopadů budoucího klimatu na odtokový režim lesních a alpských povodí v období 2021–2050 a 2071–2100

## MATERIÁL A METODIKA

V rámci práce byly zkoumány tři typy lokalit: výběr pramenů ze sítě Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ, pro vyhodnocení trendů v současných vydatnostech pramenů); Skalnaté pleso ve Vysokých Tatrách (pro hodnocení budoucího hydrologického režimu v alpském povodí); a síť povodí GEOMON (pro určení trendů v současných odtocích a budoucí hydrologický režim v malých lesních povodích).

Hydrologická data zahrnovala vydatnosti pramenů měřené manuálně jednou týdně kalibrovanou nádobou na přelivu. Odtok ze Skalnatého plesa byl vypočítán z bilanční rovnice jako rozdíl mezi srážkami a evapotranspirací. V případě povodí sítě GEOMON byly průtoky stanoveny z kontinuálních měření výšek hladin na přelivu (většinou konstruovaného jako trojúhelníkový) umístěného v uzávěrovém profilu povodí.

Meteorologická data byla použita ze standardních meteorologických stanic provozovaných ČHMÚ, Geofyzikálním ústavem (Slovenská akademie věd) nebo Slovenským Hydrometeorologickým ústavem (s výjimkou povodí Litavka vybaveného meteorologickou stanicí). Stanice se nacházely v blízkosti jednotlivých povodí. Teplotní data byla upravena na základě místních teplotních gradientů pro minimální a maximální teplotu, tak aby odpovídala průměrné nadmořské výšce povodí.

Denní srážky z ČHMÚ byly opraveny v případě významného rozdílu mezi nadmořskou výškou stanice a povodí pomocí faktoru spočítaného jako podíl dlouhodobých měřených srážek na klimatické stanici a ve srážkoměrech na volné ploše na povodích.

Dlouhodobé změny v měsíčních mediánech vydatností pramenů byly stanoveny metodou vycházející z Mann-Kendallového testu („trend-free pre-whitening” – Mann-Kendall, TFPW-MK, Yue et al., 2002). Statisticky významné poklesy či nárůsty v hydrogeologických oblastech byly určeny upravenou metodou na stanovení regionálních trendů poprvé navrženou Douglasem et al. (2000) a později upravenou Yuem and Wangem (2002). TFPW-MK metoda byla použita rovněž pro stanovení trendů v měsíčních měřených odtocích z povodí sítě GEOMON.

Ve článcích **II**, **III**, **IV**, **V** byly použity datové soubory s rozlišením čtverců 0.44° (~50 km) pro referenční období 1961–1990 a období scénářů 2071–2100 z projektu PRUDENCE („Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects” – Předpověď regionálních scénářů a nejistot při definování rizik a dopadů klimatické změny v Evropě, <http://prudence.dmi.dk>). Tyto budoucí klimatické scénáře vycházely z IPCC („Intergovernmental Panel on Climate Change“ – Mezivládní panel pro klimatickou změnu) A2

a B2 SRES („Special Report on Emissions Scenarios“ – Zvláštní zpráva o emisních scénářích) emisních scénářů antropogenního CO<sub>2</sub> (Nakicenovic and Swart, 2000).

V předložených studiích byly použity tři regionální klimatické modely (RCM) a dva řídicí globální klimatické modely (GCM). Regionální klimatický model RCAO (Räisänen et al., 2003) využil okrajových podmínek ze dvou GCM: HadAM3H a ECHAM4/OPYC3, každý běh s emisními scénáři A2 a B2 (články **II**, **III**, **IV**, **V**). V článku **V** byly navíc použity další dva regionální klimatické modely CHRМ (Vidale et al., 2003) s emisním scénářem A2 a HIRHAM (Hanssen-Bauer et al., 2003) s emisními scénáři A2 a B2.

Pro článek **VI** byla použita data s rozlišením čtverců ~10 km z regionálního klimatického modelu ALADIN-Climate/CZ (Farda et al., 2010) řízeného globálním klimatickým modelem ARPEGE-Climate využívajícím IPCC SRES A1B emisní scénář pro období 2021–2050 a 2071–2100.

Simulovaná klimatická data z RCM pro referenční období (1961–1990) se významně odlišovala od měřených dat a proto byla pro účely modelování upravena. Ve člancích **II**, **III**, **IV** a **V** byl použit postup vycházející z metody opravující odchylky – „bias correction“ (např. Fowler and Kilsby, 2007). V článku **VI** byly výstupy z modelu opraveny podle pozorovaných dat statistickou percentilovou metodou navrženou Déquém (2007).

Pro stanovení budoucího hydrologického režimu byl použit model Brook90 (Federer et al., 2003). Biogeochemické cykly na povodí Lysina byly modelovány modelem MAGIC (Cosby et al., 2001).

## VÝSLEDKY A DISKUZE

Předložená práce zahrnuje šest článků. V člancích **I** a **VI** jsou diskutovány změny v měřených vydatnostech pramenů v hydrogeologických oblastech a v odtocích z pramenných povodí. Článek **II** je zaměřený na vliv očekávané klimatické změny na vodní bilanci alpského povodí. Články **III**, **V** a **VI** se věnovaly vlivu očekávané klimatické změny na hydrologický režim v malých lesních pramenných povodích. Článek **IV** se zabýval vlivem klimatické změny na biochemické cykly na acidifikovaném povodí Lysina.

Článek **I** byl zaměřený na využití prostorového hodnocení trendů v podzemních vodách. Pro tyto účely byla upravena metoda vycházející z Mann-Kendallova testu („Trend-free pre-whitening“). Vyhodnocení bylo provedeno zvlášť pro roky, roční období a měsíce. Tato metoda byla použita pro stanovení dlouhodobých změn ve vydatnostech pramenů v jednotlivých hydrogeologických oblastech v České republice během období 1971–2007. Trendy ve vydatnostech byly vyhodnoceny u 157 pramenů a v 18 oblastech. Statisticky významné klesající průměrné roční vydatnosti se vyskytly u 18 % pramenů, zatímco rostoucí vydatnosti jen v méně než 0,5 %. V případě plošných trendů se statisticky významné poklesy průměrných ročních vydatností projeví ve 4 z 18 hodnocených oblastí.

Cílem článku **II** bylo vyhodnocení dopadů globální klimatické změny na množství a roční průběh odtoků v malém alpském povodí (Skalnaté pleso, Vysoké Tatry, Slovensko). Podle modelů bude očekávaný nárůst průměrné roční teploty o 2,5 až 5,9 °C. Citelná změna se

předpokládá zejména v zimním období a to především nárůst průměrné teploty nad bod mrazu v některých měsících. Pokles budoucích ročních úhrnů srážek se pohybuje v rozmezí 1–14% s významnou změnou v sezónním rozdělení srážek. Odhadovaný nárůst evapotranspirace je o 17–32 %. Předpokládaný pokles odtoků je o 12 až 35 % s maximem v letních měsících, kdy by mohlo docházet k poklesu odtoků až o 90 %. V zimním období se naopak očekává nárůst odtoků a to až o 50 %.

Článek **III** se věnoval změnám v odtokovém režimu vlivem klimatické změny na dvou pramenných povodích Lysině a Červíku. Další povodí – Litavka bylo v této studii použito jako příklad povodí velmi citlivého na změny v sezónním rozložení srážek a nárůst teploty. Pokles ročního odtoku je odhadovaný o 11–28 % (LYS), případně 2–23 % (CER). Očekává se významný vliv na rozdělení odtoků v průběhu roku, pokles až o 94 % (LYS), 97 % (CER) v létě a na podzim a nárůst odtoků až o ~69 % (LYS), ~176 % (CER) v porovnání s průměrnými odtoky v referenčním období 1967–1990 (LYS) a 1961–1990 (CER). S očekávaným nárůstem teploty a změnou v sezónní distribuci srážek bylo odhadnuto, že další malá povodí v České republice by se mohla stát výrazně citlivá vůči obdobím sucha, stejně jako je to možné pozorovat v současnosti v případě povodí Litavka.

Cílem článku **IV** bylo odhadnout budoucí vodní bilanci a změny v chemismu povrchových vod podle scénářů klimatické změny v povodí citlivém na kyselou atmosférickou depozici, které bylo silně ovlivněno antropogenní acidifikací ve dvacátém století. Budoucí koncentrace  $\text{SO}_4^{2-}$  v povrchových vodách zůstanou přibližně na stejné úrovni jako je dnes a to  $90 \mu\text{eq L}^{-1}$  (2008–2009) pokud nedojde k výrazným změnám v odtoku, anebo by vzrostly o 10–30 % jako důsledek poklesu odtoku. Změny v odtoku rovněž způsobily nárůst koncentrace bazických kationtů v porovnání se současnou měřenou koncentrací  $160 \mu\text{eq L}^{-1}$  (2008–2009). Dle použitých scénářů se očekává pouze malý vliv změny klimatu na pH, ten by se projevil opětovným mírným okyselením v porovnání s měřenou hodnotou pH 4,2 (2008–2009). Vliv klimatické změny na chemismus povrchových vod bude zanedbatelný v porovnání s vlivem kyselé atmosférické depozice. Ekologický stav sledovaného toku zůstane pravděpodobně nadále neuspokojivý až do sedmdesátých let 21. století, dominantní vliv na povodí bude mít kyselá atmosférická depozice a způsob lesního hospodaření.

Článek **V** vyhodnotil dopady očekávané klimatické změny na odtok a evapotranspiraci malých lesních povodí Lysina a Pluhův bor, ve Slavkovském lese v západní části České republiky. Odhadovaný úbytek průměrného ročního odtoku je o 10 až 30 % s významným sezónním rozložením měsíčních odtoků, poklesem o 30 až 95 % v období léto až podzim a nárůstem zimních odtoků až o ~40 % v porovnání s průměrnými odtoky v období 1967–1990. Od srpna do listopadu se očekává snížení průměrných denních průtoků o ~70%. Rozdíly mezi průměrem, mediánem a kvartily odtoků poukazují na to, že v budoucím hydrologickém režimu budou časté hydrologické extrémy, kdy období sucha budou následovat vysoké průtoky.

Článek **VI** se zaměřil na vyhodnocení dlouhodobých změn v odtocích z malých lesních povodí síť GEOMON v průběhu období 1994–2011 a odhady vlivu očekávané klimatické změny na hydrologický režim v obdobích 2021–2050 a 2071–2100. Budoucí vodní bilance byly stanoveny

pro následujících 8 ze 14 povodí sítě GEOMON: LYS, PLB, LIT, LES, ANE, LKV, UDL a CER. Napříč povodími sítě GEOMON nedochází ke statisticky významným poklesům nebo nárůstům průtoků v některém měsíci nebo ročním období 1994–2011. Dle zvoleného scénáře klimatického modelu by roční odtoky poklesly v průměru o 15 % (2021–2050) a 35 % (2071–2100) s výrazným poklesem v letních měsících a mírným nárůstem v zimním období.

## ZÁVĚRY

- a) Vydatnosti pramenů se v období 1971–2007 spíše nemění nebo klesají, pouze několik málo časových řad vykázalo vzestupný trend, který však byl způsoben převážně nárůstem vydatností na jaře a v zimě, což může být důsledek posunu tání sněhu do zimních měsíců. Trendy v jednotlivých měsících ukazují, že vydatnosti pramenů nejvíce klesají v létě (červen až srpen) a nejméně klesají mezi únorem a dubnem tedy v období ročního maxima. Závislost statisticky významných poklesů na fyzicko-geografických charakteristikách (plocha, zeměpisná šířka a délka, srážky) nebo hydrogeologických funkčních komplexech se nepotvrdila (Článek I).
- b) Na odtokových řadách z povodí sítě GEOMON se neprokázaly změny v hydrologickém režimu, které by bylo možné přisoudit změnám klimatu v současnosti. Napříč 12 sledovanými povodími sítě GEOMON nedochází ke statisticky významným poklesům nebo nárůstům průtoků v některém měsíci nebo ročním období 1994–2011 (Článek VI)
- c) Simulace biogeochemickým modelem MAGIC ukázaly, že odhadované změny klimatu nebudou mít výraznější vliv na chemismus povrchových vod povodí Lysina (citlivého na kyselou atmosférickou depozici) navzdory tomu, že pokles ročního odtoku může dle některých scénářů dosahovat až 30 % v porovnání se současným stavem. Důvodem je kyselost povodí v současnosti, která je pozůstatkem nedávné antropogenní acidifikace. Ekologický stav sledovaného toku zůstane pravděpodobně nadále neuspokojivý. Dominantní vliv na povodí bude mít i snížená kyselá atmosférická depozice a způsob lesního hospodaření (Článek IV)
- d) Odhadovaný nárůst teploty spolu se sezónním přerozdělením srážek, poklesem letních a nárůstem zimních úhrnů, výrazně ovlivní evapotranspiraci a odtok z malých pramenných povodí v obdobích 2021–2050 a 2071–2100. Nárůst evapotranspirace nastane v důsledku vyšší teploty a prodloužení vegetační sezóny. Simulace ukazují pokles ročního odtoku a výraznou změnu hydrologického režimu. Očekává se, že zimní odtok vzroste a jarní odtokové maximum se posune směrem ke konci zimy a průtoky v létě a na podzim citelně poklesnou. Modelovaný pokles průměrných denních průtoků ukazuje, že sledované toky by mohly pravidelně na krátká období na jaře a na podzim vysychat. Obdobnou situaci lze očekávat i v případě alpinských povodí s mělkými jezery a malou plochou, kde by mohlo docházet vlivem klimatické změny ke změně jezer z trvalých na periodická (Články II, III, V, VI).

## INTRODUCTION

Assessing the future climate and its potential effect on the hydrological cycle remains an important topic for research, since water availability affects both society and ecosystems (Prudhomme and Davies, 2009).

Many recent regionally oriented studies have focused on changes in streamflow on the national scale, for instance in France (Renard et al., 2008), Switzerland (Schmocker-Fackel and Naef, 2010), Czech Republic (Fiala et al., 2010) or Slovakia (Demeterová and Škoda, 2009). In addition, some studies evaluated the streamflow changes on European scale (e.g. Stahl et al., 2010; Villarini et al., 2011). Few studies focused also on changes in groundwater on national scale, for instance in Slovakia (Majerčáková et al., 1997) and Finland (Hyvarinen, 2003).

Nevertheless the above mentioned studies were using data either from larger rivers or mainly groundwater levels and less attention was paid to headwater areas and spring yields.

Headwater catchments are highly important from ecological point of view, especially in the case of remote alpine catchments (Beniston, 2006), besides, they are considered to be particularly vulnerable to the climate change (Haigh et al., 2000). Small catchments with size of tens of hectares up to several hundreds of hectares represent ideal research sites for the evaluation of hydrological and hydrochemical balance, because it is easier to measure inputs and outputs compared to larger areas (Fottová, 2003).

Most of the recently published studies focus on the impact of climate change on hydrologic pattern in meso or large scale catchments (Hurkmans et al., 2010; Němečková et al., 2011; Hanel et al., 2012; Schneider et al., 2013; Somorowska and Piętko, 2013). However, much less attention was paid to the effect of climate change on hydrological pattern in small headwater catchments.

Results of hydrological impact studies focusing on European catchments showed a similar pattern of seasonal runoff cycle represented by decreases in summer and increases in winter (e.g. Fowler and Kilsby, 2007; Graham et al., 2007; Driessen et al., 2010; Hurkmans et al., 2010; Hanel et al., 2012).

Hanel et al. (2012) projected a decrease in spring and summer runoff in most of the 250 investigated Czech catchments. Further they projected an increase in winter runoff in the northern part of the Czech Republic in majority of scenarios, especially at catchments with high elevation. Simulations for a sub-basin of the Malše River basin (437 km<sup>2</sup>) in the southern part of Czech Republic showed the most significant change (decrease) in hydrological pattern in spring period however almost no change or slight decrease in winter runoff (Němečková et al., 2011). A significant shift in the future spring maximum runoff to periods earlier in the year as a result of increasing temperature affecting the snow-melt process was published in different studies (e.g. Shabalova et al., 2003; Horton et al., 2006).

### AIMS:

The presented theses is focused on addressing of following general questions: (i) can we detect an impact of climate change in the recent hydrological data from springs or small headwater

catchments and (ii) what will be the impact of projected climate change on water balance and stream water chemistry in the future.

The major objectives were:

- Evaluation of trends in spring yields and field significant trends in hydrogeological regions in the Czech Republic in the period 1971–2007
- Evaluation of trends in runoff from small forested catchments of the GEOMON network in the period 1994–2011
- Biogeochemical modelling of future stream water chemistry changes in acid-sensitive catchment according to different climate change scenarios
- Hydrological modelling of the future climate impact on flow pattern in forested and alpine headwater catchments in the periods 2021–2050 and 2071–2100

## METHODS AND MATERIAL

Three categories of locations were investigated in the theses: a subset of spring monitoring network from Czech Hydrometeorological Institute (CHMI, for evaluation of trends in present spring yields data); Skalnaté pleso in the Tatra Mts. (for testing of present and future hydrological pattern in alpine condition) and GEOMON monitoring network for identification of recent and future changes in water balance in small forested headwater catchments.

Hydrological data included spring yields measured manually once a week with calibrated bucket at V-notch weirs. The runoff was calculated as a difference between precipitation and evapotranspiration for Skalnaté pleso. In the case of GEOMON catchments discharges were continuously measured at catchment outlets by gauging stations constructed mostly as V-notch weir equipped with water level recorder.

Meteorological data were used from standard meteorological stations operated by CHMI, Geophysical Institute (Slovak Academy of Science) or Slovak Hydrometeorological Institute (with the exception of the Litavka catchment equipped with a meteorological station). Stations were located at catchments surroundings. Air temperature data were corrected based on local minimum and maximum temperature lapse rates to represent the average catchment altitudes. Daily precipitation from CHMI stations were corrected, if the altitude of the catchment and CHMI station differed notably, by a factor calculated as the ratio between mean annual precipitation measured by bulk precipitation collectors at the investigated catchments and precipitation from the climatic stations (for the observed periods).

Trends in spring yield monthly medians were tested with the trend-free pre-whitening modification of the Mann-Kendall (TFPW-MK) test (Yue et al., 2002). Significant increases or decreases in hydrogeological regions were determined using extended field significant trend method (Yue and Wang, 2002). TFPW-MK was used also for identification of changes in monthly measured runoff at GEOMON network catchments.

Datasets with resolution of 0.44°grids (~50 km) for a control period from 1961–1990 and a scenario period from 2071–2100 from the PRUDENCE project (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects

<http://prudence.dmi.dk>) were used in papers **II**, **III**, **IV**, **V**. These future climate scenarios were based on the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) A2 and B2 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions scenarios (Nakicenovic and Swart, 2000).

Three regional climate models (RCMs) with two driving global climate models (GCMs) and two emission scenarios were used in presented studies. The regional climate model RCAO (Räisänen et al., 2003) was used with large-scale lateral boundary conditions from two GCMs: HadAM3H and ECHAM4/OPYC3, each run with A2 and B2 emission scenarios (papers **II**, **III**, **IV**, **V**). Two further RCMs using HadAM3H boundary conditions: the limited area model CHRMM (Vidale et al., 2003) with the A2 emission scenario, and HIRHAM (Hanssen-Bauer et al., 2003) with the A2 and B2 emission scenarios were utilized in the study **V**.

In the paper **VI** data with grid resolution of ~10 km from the ALADIN-Climate/CZ (Farda et al., 2010) regional climate model coupled to ARPEGE-Climate global circulation model and forced with IPCC SRES A1B emission scenario for periods of 2021–2050 and 2071–2100 were used.

Simulated RCM climatic data for the control period (1961–1990) differed notably from measured data, and were therefore transformed for hydrological modelling purposes. In papers **II**, **III**, **IV** and **V** an error correction similar to the methods of bias correction (e.g. Fowler and Kilsby, 2007) was applied. In the paper **VI**, model outputs were statistically corrected according to observed values using the percentile approach proposed by Déqué (2007).

Hydrological patterns in the future were modelled by the Brook90 model (Federer et al., 2003). Biogeochemical cycles at the Lysina catchment were modelled by the MAGIC model (Model of Acidification of Groundwater In Catchments) (Cosby et al., 2001).

## RESULTS AND DISCUSSION

Six articles were included in the theses. Recent long-term changes in spring yields at site and in hydrogeological regions and in runoff in headwater catchments are discussed in paper **I** and **VI**. Paper **II** focused on an impact of anticipated climate change on future water balance in alpine conditions. Paper **III**, **V**, and **VI** focused on impact of anticipated climate change in hydrological pattern in small headwater forested catchments. Paper **IV** discussed an effect of climate change on biogeochemical cycles at an acidified catchment Lysina.

Paper **I** was focused on a spatial application of trend analysis in groundwater data. For this purpose, a modification of the Mann-Kendall test, based on the trend-free pre-whitening approach, was developed. The analysis was done separately for years, each season and each month. The method was used for evaluation of long-term changes in spring yields in different hydrogeological regions in the Czech Republic during the period 1971–2007. Trends in spring yields were evaluated at 157 objects in 18 regions. Significant negative trends were observed at 18% of springs while positive trends at only less than 0.5% on the annual level. In case of field

significant trend, 4 of 18 investigated hydrogeological regions revealed significant decreasing trend in annual time series.

The aim of paper **II** was to estimate impacts of global climate change on water yield and runoff timing in a small alpine catchment (basin of the Skalnaté pleso (lake), the High Tatras, Slovakia). The models project an increase in the mean annual temperature of 2.5 to 5.9 °C. A noticeable change is expected in the winter period – a rise in mean monthly temperature above the freezing point during some months. The estimated decrease in annual precipitation amount is from 1–14%, but there is an expected change in the seasonal distribution of precipitation. The estimated annual increase in evapotranspiration is 17–32%. The predicted drop in annual runoff ranges from 12 to 35%, with a maximum decrease of up to 90% during the summer months. An increase in discharge is supposed during the winter period (up to 50%).

Paper **III** focused on changes in flow patterns due to projected climate change in two headwater catchments Lysina and Červík. Another catchment – Litavka was presented as an example of the catchment that is highly sensitive to changes in the seasonal precipitation distribution and temperature increase. Annual runoff is predicted to decline by 11–28% (LYS), respective 2–23% (CER). Impacts on the distribution of monthly flow are predicted to be significant, with summer-autumn decreases up to 94% (LYS), 97% (CER) and winter increases of up to ~69% (LYS), ~176% (CER) compared to mean flow from the control period 1967–1990 (LYS) respectively 1961–1990 (CER). With the anticipated increase of temperature and change in seasonal precipitation distribution, it was estimated that other small catchments in the Czech Republic could become vulnerable to extreme drought spells similar to the situation observed recently in the Litavka catchment.

The aim of paper **IV** was to estimate future water balance and streamwater chemistry changes, according to different climate change scenario, in a forested acid-sensitive catchment (Lysina) that was affected by large anthropogenic acidification in the 20<sup>th</sup> century. Future streamwater  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration would maintain at the current level of approximately 90  $\mu\text{eq L}^{-1}$  (2008–2009) in case of minimum or no change in runoff, or would increase by 10–30% as a result of projected runoff decrease. The runoff change would increase the concentration of base cations a similar magnitude compared to measured 160  $\mu\text{eq L}^{-1}$  (2008–2009). According to used scenarios, the effect of climate change on pH would be small and would lead to slight re-acidification of streamwater compared to the measured value 4.2 (2008–2009). The climate change influence to streamwater chemistry would be small compared to the influence of atmospheric acid deposition. The environmental condition of the studied stream would probably remain unsatisfactory until the 2070s, the dominant influence being the atmospheric acid deposition and the forest management in the area.

The aim of study **V** was to estimate the impacts of anticipated global climate change on runoff and evapotranspiration in small-forested catchments, Lysina and Pluhův Bor situated in the Slavkov Forest in western Czech Republic. Annual runoff is projected to decline by 10 to 30%, and impacts on the distribution of monthly flow are projected to be significant, with summer–autumn decreases of 30 to 95%, and winter increases of up to ~40% compared to mean discharge

for the period 1967–1990. Mean daily flows are estimated to decrease by ~70% from August to November. The difference between future summer mean, median and quartiles indicated that in future flow pattern hydrologic extremes will likely more occur and dry periods will be followed by the high flows.

Paper VI focused on evaluation of trends in runoff from small forested catchments of the GEOMON network during the period 1994–2011, and estimation of the impact of anticipated climate change on flow patterns in the periods 2021–2050 and 2071–2100. Future water balances were projected for the following 8 of 14 GEOMON catchments: LYS, PLB, LIT, LES, ANE, LKV, UDL and CER. There were no general patterns found indicating either significant increases or decreases in runoff on either seasonal or annual levels across the investigated catchments from 1994–2011. Annual runoff is projected to decrease on average by 15% (2021–2050) and 35% (2071–2100) with a significant decrease in summer months and a slight increase in winter months as a result of expected climate change as simulated by the selected climate model.

## CONCLUSIONS

- a) Spring yields are rather stable or decreasing in the period 1971–2007, only a few series revealed upward trends, which were a result of winter-spring months trends probably caused by a shift of snowmelt timing from spring months to winter months. Monthly trends indicate that the spring yields decline the most in summer months (June–August) and the least between February and April in the time of annual maxima. The dependence of significant decreases on selected physical-geographical characteristics (area, latitude, longitude, precipitation) or hydrogeological functional complexes was not confirmed. (Paper I)
- b) Runoff series from GEOMON network catchments did not show any changes in hydrological pattern which can be attributed to recent climate change. There were no general patterns found indicating either significant increases or decreases in monthly runoff on either seasonal or annual levels across the investigated 12 catchments between 1994–2011 (Paper VI)
- c) According to the MAGIC biogeochemical model simulations the projected climate change will not have a significant impact on the chemistry of surface water at the acid-sensitive Lysina catchment even though the projected decline in stream runoff for the pessimistic scenario would be significant (up to 30% compare to present). The reason is the present high acidity due to the high level of recent anthropogenic acidification. The environmental condition of the studied stream would probably remain unsatisfactory. Main factors controlling the future stream water chemistry will be reduced acidic deposition and the forest management in the area rather than the hydrological change (Paper IV)
- d) The estimated increase of temperature and the seasonal redistribution of precipitation with expected summer decreases and winter increases will significantly affect evapotranspiration rates and runoff in the periods 2021–2050 and 2071–2100. Evapotranspiration is expected to increase as a result of higher temperature and prolongation of the vegetation season. The annual runoff is projected to decrease and the annual cycle will change significantly. Winter runoff is expected to increase, the runoff maxima will shift from spring to winter, and runoff

in summer and autumn will decrease notably. The projected declines in mean daily flows indicate that studied streams might regularly dry up for short periods in the summer and autumn. A similar situation can be expected in the case of alpine catchments with shallow lakes with small drainage area, where a change in future climate conditions could cause a change in their status from permanent to temporary lakes (Papers **II, III, V, VI**).

## REFERENCES

- Beniston, M., 2006. Mountain Weather and Climate: A General Overview and a Focus on Climatic Change in the Alps. *Hydrobiologia* 562, 3–16. doi:10.1007/s10750-005-1802-0
- Cosby, B.J., Ferrier, R.C., Jenkins, A., Wright, R.F., 2001. Modelling the effects of acid deposition: refinements, adjustments and inclusion of nitrogen dynamics in the MAGIC model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 5, 499–517.
- Demeterová, B., Škoda, P., 2009. Low Flow in Selected Streams of Slovakia. *J. Hydrol. Hydromech.* 57, 55–69.
- Déqué, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Glob. Planet. Change, Extreme Climatic Events* 57, 16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030
- Douglas, E.M., Vogel, R.M., Kroll, C.N., 2000. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *J. Hydrol.* 240, 90–105. doi:10.1016/S0022-1694(00)00336-X
- Driessen, T.L.A., Hurkmans, R.T.W.L., Terink, W., Hazenberg, P., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R., 2010. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 651–665.
- Farda, A., Deque, M., Somot, S., Horanyi, A., Spiridonov, V., Toth, H., 2010. Model ALADIN as regional climate model for Central and Eastern Europe. *Stud. Geophys. Geod.* 54, 313–332. doi:10.1007/s11200-010-0017-7
- Federer, C.A., Vorosmarty, C., Fekete, B., 2003. Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J. Hydrometeorol.* 4, 1276–1290. doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1276:SOAETS>2.0.CO;2
- Fiala, T., Ouarda, T.B.M.J., Hladný, J., 2010. Evolution of low flows in the Czech Republic. *J. Hydrol.* 393, 206–218. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.08.018
- Fottová, D., 2003. Trends in sulphur and nitrogen deposition fluxes in the GEOMON network, Czech Republic, between 1994 and 2000. *Water. Air. Soil Pollut.* 150, 73–87. doi:10.1023/A:1026146723728
- Fowler, H.J., Kilsby, C.G., 2007. Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Clim. Change* 80, 337–367. doi:10.1007/s10584-006-9117-3
- Graham, L.P., Hagemann, S., Jaun, S., Beniston, M., 2007. On interpreting hydrological change from regional climate models. *Clim. Change* 81, 97–122. doi:10.1007/s10584-006-9217-0
- Haigh, M.J., Martins, L., Krecek, J., 2000. *Environmental Reconstruction in Headwater Areas*. Springer, Dordrecht.
- Hanel, M., Vizina, A., Máca, P., Pavlásek, J., 2012. A Multi-Model Assessment of Climate Change Impact on Hydrological Regime in the Czech Republic. *J. Hydrol. Hydromech.* 60, 152–161. doi:10.2478/v10098-012-0013-4
- Hanssen-Bauer, I., Forland, E.J., Haugen, J.E., Tveito, O.E., 2003. Temperature and precipitation scenarios for Norway: comparison of results from dynamical and empirical downscaling. *Clim. Res.* 25, 15–27. doi:10.3354/cr025015
- Horton, P., Schaeffli, B., Mezghani, A., Hingray, B., Musy, A., 2006. Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty. *Hydrol. Process.* 20, 2091–2109. doi:10.1002/hyp.6197
- Hurkmans, R., Terink, W., Uijlenhoet, R., Torfs, P., Jacob, D., Troch, P.A., 2010. Changes in Streamflow Dynamics in the Rhine Basin under Three High-Resolution Regional Climate Scenarios. *J. Clim.* 23, 679–699. doi:10.1175/2009JCLI3066.1
- Hyvarinen, V., 2003. Trends and characteristics of hydrological time series in Finland. *Nord. Hydrol.* 34, 71–90.

- Majerčáková, O., Fendeková, M., Lešková, D., 1997. The variability of hydrological series due to extreme climate conditions and the possible change of the hydrological characteristics with respect to potential climate change, in: Gustard, A., Blazkova, S., Brilly, M., Demuth, S., Dixon, J., VanLanen, H., Llasat, C., Mkhani, S., Servat, E. (Eds.), *Friend'97-Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management*. pp. 59–66.
- Nakicenovic, N., Swart, R., 2000. *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Němečková, S., Slámová, R., Šípek, V., 2011. Climate Change Impact Assessment on Various Components of the Hydrological Regime of the Malše River Basin. *J. Hydrol. Hydromech.* 59, 131–143. doi:10.2478/v10098-011-0011-y
- Prudhomme, C., Davies, H., 2009. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 1: baseline climate. *Clim. Change* 93, 177–195. doi:10.1007/s10584-008-9464-3
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullersteig, A., Döscher, R., Graham, L. P., Jones, C., Meier, H., E., M., Samuelsson, P., Willén, U., 2003. GCM driven simulations of recent and future climate with the Rossby Centre coupled atmosphere – Baltic Sea regional climate model RCAO. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping.
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O., Niel, H., Sauquet, E., Prudhomme, C., Parey, S., Paquet, E., Neppel, L., Gailhard, J., 2008. Regional methods for trend detection: Assessing field significance and regional consistency. *Water Resour. Res.* 44, W08419. doi:10.1029/2007WR006268
- Schmocker-Fackel, P., Naef, F., 2010. More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850. *J. Hydrol.* 381, 1–8. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.022
- Schneider, C., Laize, C.L.R., Acreman, M.C., Floerke, M., 2013. How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 325–339. doi:10.5194/hess-17-325-2013
- Shabalova, M.V., van Deursen, W.P.A., Buishand, T.A., 2003. Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. *Clim. Res.* 23, 233–246. doi:10.3354/cr023233
- Somorowska, U., Piętka, I., 2013. Streamflow Changes in Mesoscale Lowland Catchment Under Future Climate Conditions. *Pap. Glob. Change IGBP* 19, 53–65. doi:10.2478/v10190-012-0004-7
- Stahl, K., Hisdal, H., Hannaford, J., Tallaksen, L.M., van Lanen, H. a. J., Sauquet, E., Demuth, S., Fendekova, M., Jodar, J., 2010. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 2367–2382. doi:10.5194/hess-14-2367-2010
- Vidale, P.L., Luthi, D., Frei, C., Seneviratne, S.I., Schar, C., 2003. Predictability and uncertainty in a regional climate model. *J. Geophys. Res.-Atmospheres* 108, 4586. doi:10.1029/2002JD002810
- Villarini, G., Smith, J.A., Serinaldi, F., Ntelekos, A.A., 2011. Analyses of seasonal and annual maximum daily discharge records for central Europe. *J. Hydrol.* 399, 299–312. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.01.007
- Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G., 2002. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.* 259, 254–271. doi:10.1016/S0022-1694(01)00594-7
- Yue, S., Wang, C.Y., 2002. Regional streamflow trend detection with consideration of both temporal and spatial correlation. *Int. J. Climatol.* 22, 933–946. doi:10.1002/joc.781

## ŽIVOTOPIS

**Jméno** Anna Lamačová  
**Rodné příjmení** Benčoková  
**Narozena** 27. září 1982 v Praze

### Vzdělání

od 2007 doktorské studium (studijní program Aplikovaná a krajinná ekologie), Ústav pro životní prostředí, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze  
2002–2007 magisterské studium (studijní program biologie, katedra Ekologie), Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze

### Zaměstnání

od srpna 2013 mateřská dovolená  
2008–2013 hydrolog (úvazek 60 %), Český hydrometeorologický ústav, oddělení podzemních vod  
2008–2013 vědecká pracovnice (úvazek 20 %), Česká geologická služba, oddělení biogeochemie a klimatické změny  
2011–2013 Ph.D. student (úvazek 50 %), Centrum výzkumu globální změny, Akademie věd ČR v.v.i., oddělení biogeochemických a hydrologických cyklů

### Další pracovní zkušenosti

2005–2008 terénní a administrativní práce pro Agenturu ochrany přírody a krajiny ČR, Praha

### Pedagogická činnost

Podíl na praktické výuce předmětů: Limnologické metody – praktikum,  
Konzultantka bakalářské práce studenta Ústavu pro životní prostředí Zdeňka Píchy  
Konzultantka diplomové práce Universidad Autónoma de Madrid, Eloy Benito Reyes

### Odborné stáže a pobyty v zahraničí

2012 Pennsylvania State University, State College, USA (2 týdny, kalibrace distribuovaného hydrologického modelu)  
2004 Vrije Universiteit Amsterdam, Faculty of Earth and Life Science, Nizozemí (3 měsíce, z toho 6 týdnů terénní cvičení z hydrologie a hydrogeologie v Dolomitech, Itálie)

### Získané granty

2009–2010 Modelování hydrologických procesů v malých lesních povodích v pramenné oblasti řeky Litavky (GA UK 94609; hlavní řešitelka)

### Spolupráce na grantech

2010–2014 Soil Transformations in European Catchments (Změny v půdním pokryvu evropských povodí) (7. rámcový program EU No. 244118)  
2009–2013 Integrovaný vliv změn klimatu, kvality ovzduší a lesnického hospodaření na vodní ekosystémy v pramenných povodích (Grantová agentura ČR, GA526/09/0567).  
2007–2011 Hodnocení vlivu klimatických změn na hydrologickou bilanci a návrh praktických opatření ke zmírnění jejich dopadů (Grantová agentura ministerstva pro životní prostředí – program Věda a Výzkum, VaV SP/1A6/151/07)  
2007–2011 Zákonitosti interakce systému "voda-hornina-krajina" a jejich využití při ochraně podzemních vod v České republice (Grantová agentura ministerstva pro životní prostředí – program Věda a Výzkum, VaV SP/2e1/153/07)

## CURRICULUM VITAE

**Name** Anna Lamačová  
**Maiden name** Benčoková  
**Born** September 27, 1982 in Prague

### Education

since 2007 Ph.D. study (study programme), Institute for environmental studies, Faculty of Science, Charles University in Prague  
2002–2007 MSc. study (study programme Biology, department: Ecology), Faculty of Science, Charles University in Prague

### Occupation

since 2013 on maternity leave  
since 2008 hydrologist (60% capacity), Czech Hydrometeorological Institute, Groundwater Department  
since 2008 researcher (20% capacity), Czech Geological Survey, Department of Environmental Geochemistry and Biogeochemistry  
since 2011 Ph.D. student (50% capacity), Centrum výzkumu Global Change, Academy of Science of the Czech Republic v.v.i., Department of Biocheogemical and Hydrological cycles

### Other work experience

2005–2008 field and administration work, Agency for Nature Conservation and Landscape Protection of the Czech Republic, Prague

### Teaching

Contribution to practical subjects: Field course in Limnology,  
Consultant of bachelor theses of Institute for Environmental Studies student, Zdeněk Pícha,  
Consultant of master theses of the Universidad Autónoma de Madrid student, Eloy Benito Reyes

### International experience

2012 Pennsylvania State University, State Collage, USA (2 weeks, calibration of the distributed hydrological model)  
2004 Vrije Universiteit Amsterdam, Faculty of Earth and Life Science, The Netherland (3 months, including 6 weeks field course in hydrology and hydrogeology in Dolomity mountains, Italy)

### Granted projects

2009–2010 Modelling of hydrological processes in small forested catchments in headwaters area of the Litavka River (Grant Agency of Charles University in Prague; GA UK 94609; Principal investigator)

### Cooperation on grant projects

2010–2014 Soil Transformations in European Catchments (European Commission 7th Framework Programme as a Large Integrating Project, SoilTrEC, Grant Agreement No. 244118)  
2009–2013 The integrated impact of climate change, air quality, and forest management on water ecosystem in headwater catchments (GA526/09/0567).  
2007–2011 Evaluation of influence of climate changes on hydrological balance and proposal of practical measures to mitigation of their impacts (VaV SP/1A6/151/07)

2007–2011 The "water/rock/landscape" system interaction principles and its application in groundwater protection in the Czech Republic (VaV SP/2e1/153/07)

### SEZNAM PUBLIKACÍ / *SELECTED PUBLICATIONS*

#### Recenzované články / *Peer-reviewed papers*

- Lamačová, A.**, Hruška, J., Krám, P., Stuchlík, E., Farda, A., Chuman, T., Fottová, D. Runoff trends analysis and future projections of hydrologic patterns in small forested catchments. (*Accepted for publication in Soil and Water Research in April 2014*, IF 0.333)
- Yu, X., **Lamačová, A.**, Duffy, C., Krám, P., Hruška, J., White, T., Bhatt, G., (2014). Modeling the long term water yield effects of forest management in a Norway spruces forest. *Hydrological Sciences Journal*. DOI:10.1080/02626667.2014.897406. (*Accepted for publication in February 2014*, IF 1.114)
- Ledvinka, O., **Lamačová, A.** Detection of field significant long-term monotonic trends in spring yields, (*Submitted to Stochastic Environmental Research and Risk Assessment April 2014*, IF 1.961)
- Banwart, S., Menon, M., Bernasconi, S., Bloem, J., Blum, W., Maia de Souza, D., Davidsdotir, B., Duffy, C., Lair, G., Krám, P., **Lamačová, A.**, Lundin, L., Nikolaidis, N., Novák, M., Panagos, P., Ragnarsdottir, K. Vala, Reynolds, B., Robinson, D., Rouseva, S., de Ruiter, P., van Gaans, P., Weng, L., White, T., Zhang, B. (2012). Soil processes and functions across an international network of Critical Zone Observatories: introduction to experimental methods and initial results. *Comptes Rendus Geoscience* 344, 758-772. (IF 1.401)
- Benčoková, A.**, Hruška, J., Krám, P. (2011). Modeling anticipated climate change impact on biogeochemical cycles of an acidified headwater catchment. *Applied Geochemistry* 26, S6-8. (IF 1.961)
- Benčoková, A.**, Krám, P., Hruška, J. (2011). Future climate and changes in flow patterns in Czech headwater catchments. *Climate Research* 49, 1-15. (IF 2.684)
- Benčoková, A.**, Hruška, J., Krám, P., Stuchlík, E. (2011). Future and recent changes in flow patterns in the Czech headwater catchments. *Bodenkultur* 62, 17-22.
- Benčoková, A.**, Stuchlík, E. and Křeček J. (2009). Impacts of global climate change on the hydrological cycle in a small alpine catchment – the High Tatras, Slovakia. *Acta Universitatis Carolinae – Environmentalica* 1-2, 33-43.

#### Knihy / *Books*

- Šantrůčková, H., Vrba, J., Rusek, J., Matějka, K., Kopáček, J., Fuchs, R., Edwards, M., Svoboda, M., Křenová, Z., Hruška, J., **Benčoková, A.** (2010). Co vyprávějí šumavské smrčiny - Průvodce lesními ekosystémy Šumavy [*Stories of the Bohemian forest spruces – A guide through Bohemian forest ecosystems*]. Správa Národního parku a Chráněné krajinné oblasti Šumava, Vimperk, 157 s.

#### Populárně odborné články / *Popular scientific articles*

- Benčoková, A.** (2009). Trendy podzemních vod ČR 1971–2007, [*Groundwater trends of the Czech Republic 1971–2007*] VERONICA, 23/1, ČSOP Brno.

## PŘÍSPĚVKY NA KONFERENCÍCH / CONFERENCE PRESENTATIONS

### Mezinárodní konference / *International conferences*

- Benčoková A.**, Krám P., Hruška J., Stuchlík E. (2010). Future and recent changes in flow patterns in the Czech headwater catchments (přednáška / *oral presentation*). Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins, 13th Biennial Conference ERB 2010, Hydrological Responses of Small Basins to a changing environment, Seggau Castle, Austria 5–8.9. 2010.
- Benčoková A.** (2010). Recent trends in groundwater levels in shallow hydrological system in the Czech Republic (poster). XXXVIII IAH congress, International association of hydrogeologists, Groundwater Quality Sustainability. Krakow, Poland, 12–17.9. 2010.
- Benčoková A.**, Krám P., Hruška J. (2010). The impact of climate change on hydrological patterns in headwater catchments of Czech GEOMON network (poster). XXXVIII IAH congress, International association of hydrogeologists, Groundwater Quality Sustainability. Krakow, Poland, 12–17.9. 2010.
- Benčoková A.**, Hruška J., Krám P. (2011). Modeling anticipated climate change impact on biogeochemical cycles of an acidified headwater catchment (poster). 9th International Symposium Geochemistry of the Earth's Surface. Boulder, Colorado, USA, 3–7.6. 2011.
- Lamačová A.**, Hruška J., Krám P., Fottová D. (2012). Future changes in flow patterns in nine Czech headwater catchments (poster). BIOGEOMON 2012: The 7th International Symposium on Ecosystem Behavior, North Port, Maine, USA, 15–20.7. 2012.
- Lamačová A.**, Yu X., Krám P., Duffy C.J., Hruška J. (2012). Distributed modeling of hydrologic patterns at small forested catchment (poster). BIOGEOMON 2012: The 7th International Symposium on Ecosystem Behavior, North Port, Maine, USA, 15–20.7. 2012.
- Lamačová A.**, Yu X., Krám P., Duffy C.J., Hruška J., Farda A. (2013). Catchment Reanalysis for Water-Energy-Vegetation Regimes at Lysina, Czech Republic (poster). Global Change and Resilience, Brno, Czech Republic, 22–24.5. 2013.

### Domácí konference / *National conferences*

- Benčoková A.**, Stuchlík E., Hardekopf D. (2008). Using regional climate models for an estimation of global change impacts on water balance in the Tatra Mts. Slovakia (poster). Hydrologie malého povodí 2008 [*Hydrology of a small basin 2008*]. Praha, 23–24.4. 2008.
- Benčoková A.**, Ledvinka O. (2009). Kvantitativní hodnocení pramenů na území ČR v období 1971-2008 [*Quantitative spring yields assessment in the Czech Republic in the period 1971–2008*] (přednáška / *oral presentation*). 10. Česko-slovenský mezinárodní hydrogeologický kongresu. [*10<sup>th</sup> Czech-Slovak international hydrogeological congress*] Ostrava. 31.8.–3.9. 2009.
- Benčoková, A.** (2010). Impact of deforestation on flow pattern in the Bohemian Forest (poster). Aktuality šumavského výzkumu IV [*Bohemian forest research news IV*], Vimperk. 19–20.10. 2010.
- Lamačová A.**, Reyes E.B, Stuchlík E. (2012). Impacts of global climate change on the hydrological cycle in a small alpine catchment (přednáška / *oral presentation*). Tatrzańskie warsztaty hydrologiczne [*Tatra hydrological workshop*], Zakopane, Poland, 19–22.9. 2012.