

ČASOVÁ A PROSTOROVÁ PROMĚNLIVOST POVODNÍ A EXTRÉMNÍCH SRÁŽEK NA ÚZEMÍ ČECH

TEMPORAL AND SPATIAL VARIABILITY OF FLOODS AND EXTREME PRECIPITATION IN BOHEMIA

Jan Kyselý¹, Olga Halášová², Vilibald Kakos¹

¹Institute of Atmospheric Physics AS CR, Prague, Czech Republic, kysel@ufa.cas.cz

²Czech Hydrometeorological Institute, Hradec Králové, Czech Republic

ABSTRACT

Long-term variability of floods and heavy precipitation events is analyzed using series of peak discharges on the Vltava river in Prague and the Elbe river in Děčín, reaching or exceeding a 2-yr flood, and various characteristics of the frequency and severity of extreme precipitation measured at gauge stations in Bohemia. The occurrence of winter floods shows a conspicuous decline since the end of the 19th century, particularly on the Vltava river, while there is no clear trend in the frequency of summer floods over the same period. Differences between long-term variability of winter floods on the Vltava and Elbe rivers may reflect changes in snow accumulation characteristics between north and south parts of Bohemia since the late 19th century. A long-term decrease (increase) in characteristics of precipitation extremes in winter (summer) hydrological half-year, conspicuous e.g. for maximum seasonal k-day amounts, the frequency of heavy 1-day and 3-day precipitation events and daily intensity index, appears in Prague since the mid-19th century. It suggests that the decline in the winter flood occurrence is not only due to a warming trend and a reduced snow accumulation, but the decrease in the frequency of intense rainfall plays a role as well.

KEY WORDS: floods – extreme precipitation events – snow accumulation – long-term variability – climate change – Czech Republic

1. ÚVOD

Dlouhodobá proměnlivost výskytu klimatických extrémů významným způsobem ovlivňuje lidskou společnost. Povodně patří mezi jevy s největším dopadem, o čemž svědčí mj. obrovské materiální škody při rozsáhlých záplavách na území Čech v srpnu 2002 (ČHMÚ, 2003). Větším ztrátám na lidských životech přitom zabránila jen připravenost složek civilní ochrany a dobrá organizace evakuačních a záchranných prací.

Nedávný výskyt více než stoletých povodní ve střední Evropě (zejména 1997, 2002; např. Kašpar, 2003; Ulbrich a kol., 2003; Engel, 2004; Řezáčová a kol., 2005; Brázdil a kol., 2005) znovu oživil i otázky souvislosti povodní a předpokládaného zesílení hydrologického cyklu v budoucím klimatu. Zvýšení četnosti a velikosti extrémních srážkových úhrnů a povodní (zejména letních) je pravděpodobným scénářem klimatické změny ve střední Evropě (mj. Christensen a Christensen, 2004; Pal a kol., 2004; Semmler a Jacob, 2004) a i z tohoto důvodu se věnuje studiu povodní, jejich meteorologických příčin a možností omezení společensko-ekonomických dopadů velká pozornost.

Je přitom dobře známo, že extrémní povodeň v Čechách v roce 2002 nastala po období povodňového klidu trávajícího bezmála půlstoletí, kdy četnost především zimních povodní byla velmi malá; od roku 1941 (až do roku 2002) se na Vltavě v Praze vyskytla nejvýše 10letá voda (povodeň v roce 1954 by bez vlivu vltavské kaskády byla 20letá), po roce 1954 nejvýše 5letá. Tyto změny v povodňovém režimu byly někdy mylně přisuzovány pouze vlivu vybudované vltavské kaskády, k čemuž přispělo

zejména velké vodní dílo Slapy, které bezprostředně po svém dokončení výrazně snížilo kulminační průtok povodně v červenci 1954. Vltavská kaskáda je však schopna rozsah velkých vod pouze zmírnit a s rostoucí velikostí povodně relativní snížení kulminačního průtoku klesá (Kašpárek a Bušek, 1990). Povodeň ze srpna 2002, která ukončila dlouhé období povodňového klidu, byla v Praze prokazatelně největší přinejmenším od roku 1432 (srov. např. Kotyza a kol., 1995), pravděpodobně se však jednalo o vůbec nejmohutnější známou historickou povodeň na dolním toku Vltavy (Müller a Kakos, 2003).

Dlouhodobému kolísání povodní na území Čech se věnovalo několik nedávných prací (např. Brázdil, 1998; Brázdil a kol., 2004, 2005). Cílem tohoto příspěvku je uvést dlouhodobou proměnlivost povodní na Vltavě v Praze a na Labi v Děčíně do vztahu k proměnlivosti srážkových extrémů a ukázat na možné příčiny odlišných trendů v četnosti pražských a děčínských povodní.

2. DATA A METODY

a. Extrémní průtoky v Praze na Vltavě a v Děčíně na Labi

Pro analýzu extrémních průtoků na Vltavě a na Labi byly vybrány vodočetné stanice Praha a Děčín. Jako základní data byly uvažovány průtoky, které ve vrcholech povodňových vln dosáhly alespoň hodnoty 2leté vody ($Q_2=1090 \text{ m}^3/\text{s}$ v Praze, $Q_2=1830 \text{ m}^3/\text{s}$ v Děčíně; ČHMÚ, 1996); údaje byly k dispozici za období 1851-2005 (Brázdil a kol., 2005).¹ U případů po roce 1954 včetně bylo uvažováno ovlivnění průtoků vltavskou kaskádou podle Kašpárka a Buška (1990), po roce 1990 byl odhad proveden ve spolupráci s pracovníky dispečinku Povodí Vltavy a Českého hydrometeorologického ústavu. Použité řady by proto neměly být vybudováním přehrad na Vltavě, které vedlo po roce 1954 ke snížení pozorovaných průtoků, ovlivněny. Průtok Labe nebyl výrazněji ovlivněn jiným vodním dílem.

Poloha vodočetné stanice v Praze se sice v průběhu let (v souvislosti s úpravami na toku, zejména budováním jezů) několikrát měnila, na povodňové průtoky by však tyto změny neměly mít vliv. Obě vzniklé úplné řady kulminačních průtoků, pro území Čech zatím nejdelší (1851-2005; Brázdil a kol. (2005) uvádějí pražské povodně i před rokem 1851, údaje však nejsou úplné), lze tedy pokládat za poměrně homogenní. Přehled základních charakteristik průtokových řad je uveden v tab. 1.

Tab. 1: N-leté průtoky na Vltavě v Praze a na Labi v Děčíně (podle ČHMÚ, 1996). Q_N značí N-letý průtok.

tok	stanice	průměr [m ³ /s]	Q_1 [m ³ /s]	Q_2 [m ³ /s]	Q_5 [m ³ /s]	Q_{10} [m ³ /s]	Q_{20} [m ³ /s]	Q_{50} [m ³ /s]	Q_{100} [m ³ /s]
Vltava	Praha	148	765	1090	1600	2030	2490	3150	3700
Labe	Děčín	309	1400	1830	2430	2890	3380	4030	4540

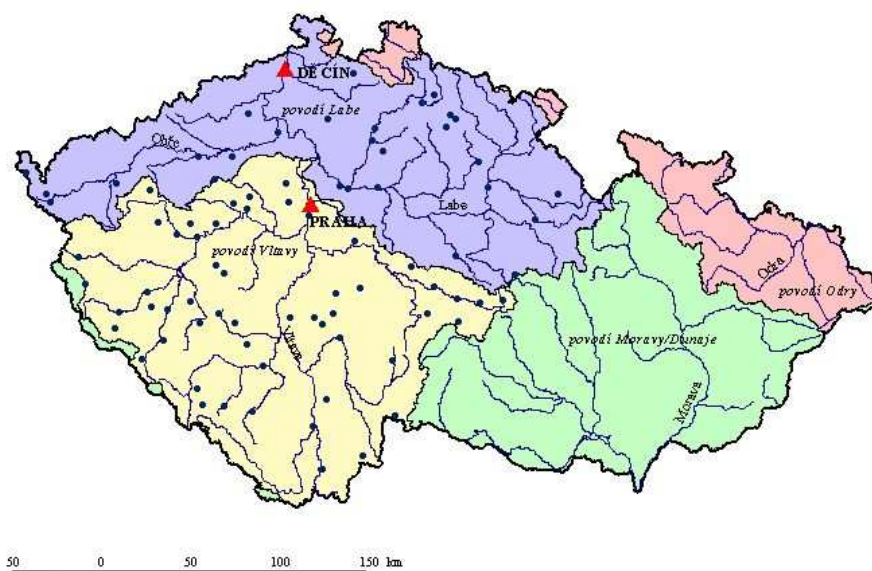
b. Srážkoměrné údaje

K analýze dlouhodobých změn charakteristik extrémních srážkových úhrnů byla použita řada měření v Praze-Klementinu od května roku 1804, v níž chybí pouze měsíce leden 1806 a říjen 1908. Data

¹ Základním zdrojem údajů byl Novotný (1963) a Databanka kulminačních průtoků ČHMÚ. V případě nesouhlasu mezi těmito dvěma zdroji nebo existence nejistých údajů byly sporné případy dohledány v archivu ČHMÚ v Brozanech nebo i kontrolovány podle průběhu počasí předcházejícího povodni v Praze-Klementinu. Podstatná část kontroly byla provedena též srovnáním údajů o průtoku v Praze a v Děčíně, zejména pokud jde o čas kulminace (průměrná postupová doba povodňové vlny mezi Prahou a Děčínem je necelých 24 hodin) a hodnoty kulminačních průtoků (podíl $Q_k\text{-Děčín} / Q_k\text{-Praha}$ se pohybuje v rozmezí 1 až 2, s výjimkou některých letních povodní, kdy může být <1). V konečném souboru dat tak byly některé případy z Novotného (1963) i z Databanky ČHMÚ vypuštěny nebo opraveny (např. chybné datum), jiné přidány; vyřazeny byly rovněž všechny případy kulminačních průtoků, pokud byl časový interval mezi sousedními kulminacemi kratší než 12 dní (Brázdil a kol., 2005).

poskytl Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Podle hodnocení provedeného Wijngaard a kol. (2003) nebyly v klementinské srážkové řadě od roku 1901 nalezeny nehomogenity. Při interpretaci výsledků týkajících se dlouhodobých změn je však třeba vzít do úvahy problémy s kvalitou srážkoměrných dat v 19. století, zejména jeho první polovině (např. Křivský, 1957). Zde vyslovené závěry by proto bylo v budoucnu žádoucí ověřit na sekulárních denních srážkoměrných řadách z dalších lokalit v Čechách, na jejichž rekonstrukci se v současné době v ČHMÚ pracuje.

Dále byla využita měření denních úhrnů srážek v síti 84 stanic v povodích Vltavy a Labe (obr. 1), dostupná za období 1961-2005. Stanice byly voleny tak, aby pokrývaly pokud možno rovnoměrně celé území obou povodí a v uvedeném období nedošlo k jejich významnému přesunu; z analýzy byly proto vyloučeny všechny stanice, které byly během období 1961-2005 přemístěny o více než 50 m v nadmořské výšce. Až na výjimky se jedná o nepřerušené řady bez chybějících dat, pouze na méně než 10% stanic musela být chybějící denní data (nejvýše 2 měsíce za 45 let) doplněna podle měření několika nejbližších srážkoměrných stanic dostupných v databázi ČHMÚ. 57 lokalit se nachází v povodí Vltavy (plocha povodí 28 090 km²; Vlček a kol., 1984), 27 ve zbylém povodí Labe (23 302 km²). Poněkud odlišný charakter obou povodí podle zastoupení jednotlivých nadmořských výšek ilustruje skutečnost, že zatímco v povodí Vltavy jen 9% (30%) stanic leží ve výškách do 300 (400) m n.m., ve zbytku povodí Labe je to 44% (63%) stanic.



Obr. 1: Rozložení stanic použitých ke zpracování charakteristik extrémních srážkových jevů a poloha vodočetných stanic Praha a Děčín.

Zkoumané charakteristiky extrémních srážkových událostí zahrnují

- maximální sezónní k -denní srážkové úhrny ($k = 1$ až 30 dnů);
- podíl srážek ve ‘dnech s intenzivními srážkami’ (tj. ve dnech s 24-hodinovým úhrnem nad zvolenou prahovou hodnotou – zde 40 mm v letním hydrologickém pololetí, 20 mm v zimním) na celkovém úhrnu;
- sezónní počet dnů s intenzivními srážkami;
- počet 3denních období ze srážkovým úhrnem ≥ 50 mm (≥ 25 mm) v letním (zimním) hydrologickém pololetí;

- ‘index denní intenzity’ (Frich a kol., 2002), definovaný jako podíl sezónního srážkového úhrnu a počtu dní s úhrnem srážek ≥ 1 mm;
- ‘index intenzity srážek’ (Klein Tank a kol., 2002), definovaný jako průměrný srážkový úhrn ve dnech se srážkami.

Analyzováno bylo zvláště letní a zimní hydrologické pololetí. Ke stanovení trendu byl použit neparametrický odhad pomocí Kendallova tau (např. Zhang a kol., 2004), který je vhodnější mírou než klasický lineární regresní koeficient. Statistická významnost trendu byla určena s využitím Mann-Kendalova testu.

3. VÝSLEDKY

a. Typy povodní

Většinu povodní na Vltavě v Praze a na Labi v Děčíně lze přiřadit jednoznačně do jednoho ze dvou typů, které se vyznačují výrazně odlišnými meteorologickými i cirkulačními charakteristikami (Kakos, 1983): zimní (Z) a letní (L) (tab. 2).

Pro zimní povodně, vyvolané kombinací velkoplošných srážek ve formě deště a tání sněhu, případně ledovými jevy na tocích, jsou charakteristické výrazné kladné odchylky teploty od normálu příslušných kalendářních dnů ve dnech D-3 až D-1 před kulminací, které činí v některých případech až $+8^{\circ}\text{C}$ (průměr za 3denní období, použita teplotní měření z Prahy-Klementina), a převládající zonální proudění (od jihozápadu až severozápadu) se sérií postupujících cyklón s jednotlivými frontálními systémy, kde středy těchto cyklón procházejí obvykle severně od území ČR (Kakos, 1983; Kyselý a kol., 2003; Brázdil a kol., 2005).

Příčinou letních povodní jsou intenzivní dlouhotrvající srážky zasahující velké území, místy zesílené orografickými efekty, popř. i bouřkovými přívalovými dešti, k nimž jako podružný faktor přistupuje nasycenost povodí (Kakos a Kulasová, 1990). Výrazné záporné odchylky teploty od normálu ve dnech D-3 až D-1 před kulminací se mohou blížit až -8°C . Typické cirkulační podmínky jsou níže nebo brázda nad střední Evropou a situace se severní nebo východní složkou, zpravidla se jedná o pomalu postupující teplotně asymetrickou cyklónu z oblasti Středozemního moře převážně k severovýchodu (Kakos, 1983; Kyselý a kol., 2003; Brázdil a kol., 2005). Na dolních tocích Vltavy a Labe se prakticky nevyskytují letní povodně, jejichž hlavní příčinou by byly přívalové srážky z konvektivní oblačnosti zasahující malou část povodí. Výjimku tvoří jen květnová povodeň z roku 1872, která byla způsobena téměř výhradně přítokem z Berounky (Müller a Kakos, 2004). Od té doby se už podobná situace pravděpodobně neopakovala.

Zařazování jednotlivých případů povodní bylo od května do října jednoznačné, neboť všechny vybrané pražské i děčínské povodně patřily do typu L; podobně případy od prosince do března do typu Z. V dubnu a listopadu bylo nutno o každém případě individuálně rozhodnout mezi těmito dvěma typy podle průběhu počasí (teplot a jejich odchylek od normálu, charakteru srážek aj.) v Praze-Klementinu v několika dnech před kulminací. Některé případy v březnu a první půlce dubna, které dříve nebylo možné podle průběhu teploty ani povětrnostní situace jednoznačně zařadit do jednoho z typů Z nebo L a byly proto hodnoceny jako neurčité (Kakos, 1983), byly nověji jednoznačně typizovány v Brázdil a kol. (2005).

V obou vodoměrných profilech převládají zimní povodně; v Praze tvoří 65% všech alespoň dvouletých povodní v období 1851-2005, v Děčíně 70%. S rostoucí velikostí povodně se však jejich relativní zastoupení snižuje, jak o tom svědčí poslední dva sloupce tab. 2 zachycující četnost výskytu povodňových typů mezi 20 (10) největšími povodněmi. Nejnověji byla četnost pražských a děčínských povodní podrobně zpracována v Brázdil a kol. (2005) pro jednotlivé měsíce, zimní a letní pololetí a dále pak i pro různé N-letosti kulminačních průtoků.

Tab. 2: Četnosti a charakteristiky jednotlivých typů povodní na Vltavě v Praze a na Labi v Děčíně v období 1851-2005. Průměrná teplota a srážky jsou určeny podle Prahy-Klementina. Součet četností

výskytu mezi 10 (20) největšími povodněmi je větší než 10 (20) tehdy, pokud se shodovaly kulminační průtoky povodní na 10. a 11. (20. a 21.) místě.

a. Praha

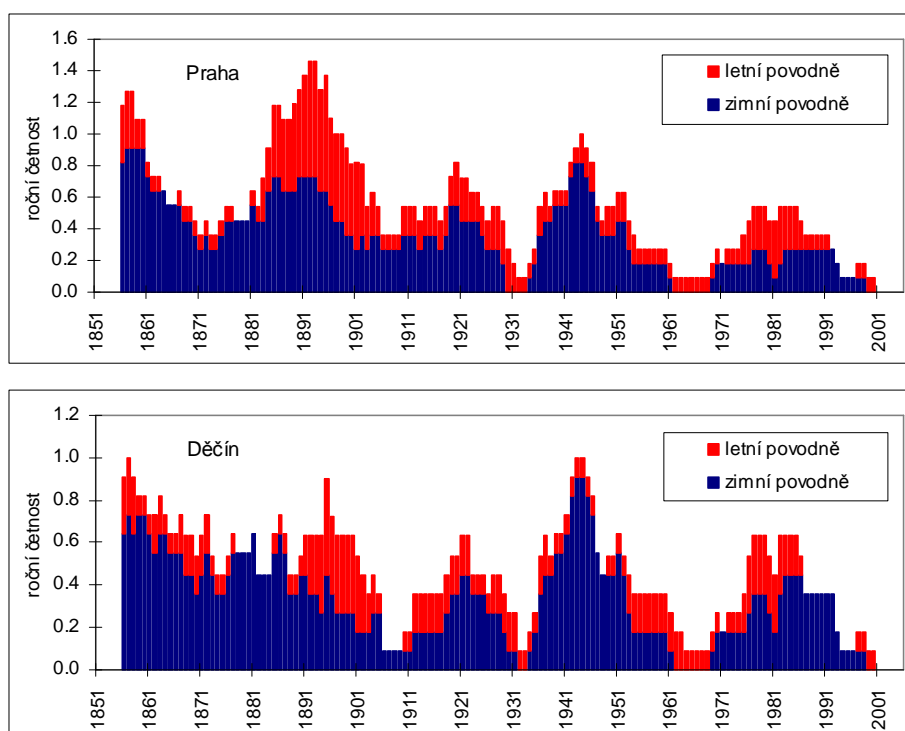
typ	počet případů $Q_k \geq Q_2$	prům. teplota ve dnech D-3 až D-1 – odchylka od normálu [°C]	prům. úhrn srážek ve dnech D-3 až D-1 [mm]	četnost výskytu mezi 20 největšími povodněmi	četnost výskytu mezi 10 největšími povodněmi
Z	57	3.5	9.4	11	3
L	31	-3.2	37.4	10	7

b. Děčín

typ	počet případů $Q_k \geq Q_2$	prům. teplota ve dnech D-3 až D-1 – odchylka od normálu [°C]	prům. úhrn srážek ve dnech D-3 až D-1 [mm]	četnost výskytu mezi 20 největšími povodněmi	četnost výskytu mezi 10 největšími povodněmi
Z	52	3.7	7.8	13	6
L	22	-3.6	29.2	7	5

b. Časová proměnlivost výskytu povodní typu Z a L

Dlouhodobé změny v četnosti povodní typu Z a L zachycuje obr. 2. Uvedené grafy se vztahují vždy k celému hydrologickému pololetí, podrobnější rozlišení na jednotlivé měsíce a různé intervaly kulminačních průtoků lze nalézt v Brázdil a kol. (2005). Zejména v Praze je patrný výrazný pokles četností povodní typu Z od poloviny 19. století; v Děčíně (srov. Kakos, 1996) tento pokles není zdaleka tak nápadný. Převládající sestupný trend souvisí se zimním oteplováním a omezenými zásobami sněhu, který buď padá v menším množství, nebo také postupně odtává a nedochází tak často k jeho akumulaci. Z rozboru uvedeného v práci Brázdil a kol. (2005) je zřejmé, že k poklesu četnosti došlo zhruba až ve druhé polovině zimy, kdy je větší pravděpodobnost výskytu větších zásob sněhu. V důsledku postupného oteplování se tato pravděpodobnost postupně snižovala.



Obr. 2: Dlouhodobé změny v četnostech alespoň 2letých zimních a letních povodní v Praze a Děčíně. Znázorněny jsou 11leté klouzavé průměry.

Nápadný rozdíl mezi úbytkem povodní typu Z v Praze a v Děčíně může pramenit z poněkud odlišných změn charakteru zimního období (především teplotních a srážkových poměrů) zhruba v jižní a severní polovině Čech. Je pravděpodobné, že dlouhodobé změny v akumulaci sněhu a/nebo četnostech výrazných oblev od konce 19. století byly méně výrazné v severních oblastech Čech (Krkonoše, Jizerské, Orlické a Krušné hory), které odvodňují toky, vlévající se do Labe, než v jižních a středních Čechách (Šumava, Český les, Novohradské hory, část Českomoravské vrchoviny), nacházejících se v povodí Vltavy. Svou roli přitom mohou hrát některé z následujících faktorů nebo pravděpodobněji jejich kombinace:

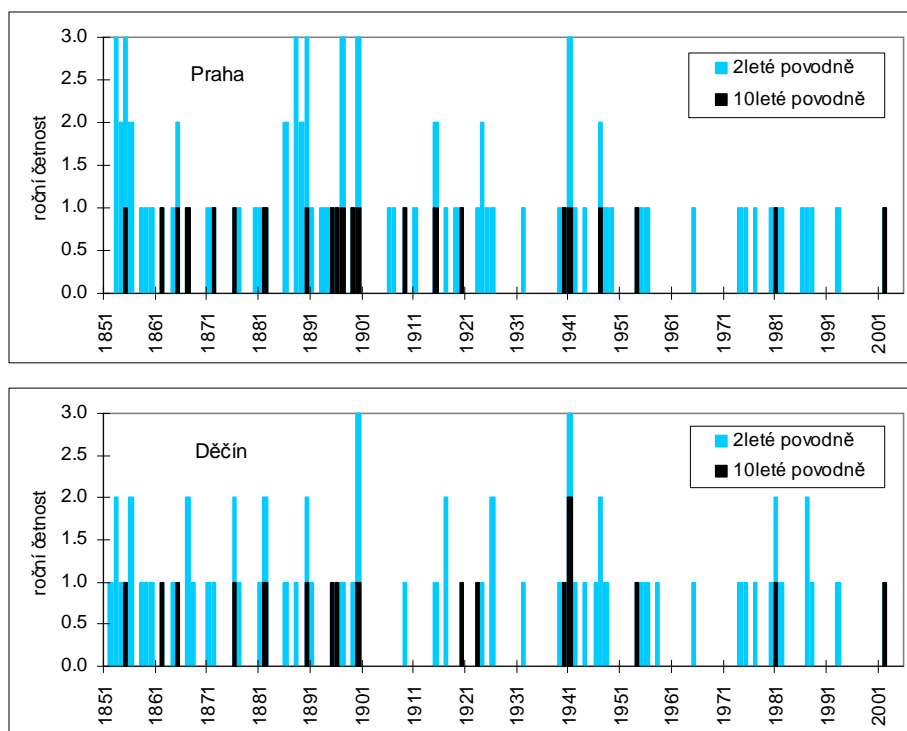
- Větší růst teploty v zimním období v jižní polovině Čech ve srovnání se severní. V důsledku toho by došlo k rychlejšímu poklesu pravděpodobnosti výskytu větších zásob sněhu v jižní polovině Čech než v severní.
- Za předpokladu rostoucí teploty se projevuje větší pestrost nadmořských výšek v povodí Vltavy, kde jsou rovnoměrněji zastoupena jednotlivá výšková patra. Pokud se nevyskytují mimořádně tuhé a na sníh bohaté zimy s dlouhotrvajícími mrazy a výraznou akumulací sněhu i v nižších polohách, je v povodí Vltavy větší pravděpodobnost postupného odtávání sněhu při dílčích otepleních (v závislosti na nadmořské výšce). S rostoucí teplotou pravděpodobnost výskytu tuhých zim klesá.
- Za předpokladu zesílených a častějších zonálních situací v zimě, s přílivem poměrně teplého vzduchu ze západního kvadrantu, je větší pravděpodobnost vypadávání intenzivních dešťových srážek přibližně v severní polovině Čech než v jižní, což by mohlo přispívat k většímu snížení povodní vyvolaných táním sněhu v povodí Vltavy. Při silném západním proudění budou navíc více orograficky zesilovat srážky v severním a severovýchodním pohraničí než na Šumavě a v Novohradských horách. Zesílené zonální proudění v zimě, projevující se např. v růstu indexu Severoatlantské oscilace (NAOI) a středoevropského zonálního indexu (CEZI), je podle modelových studií pravděpodobným scénářem změny klimatu nad Evropou (např. Rauthe a kol., 2004; Terray a kol., 2004), a k výraznému zesílení zonálního proudění v zimě došlo přibližně od poloviny 60. let do poloviny 90. let 20. století (Bárdossy a Caspary, 1990; Slonosky a kol., 2000; Jacobeit a kol., 2001; Plaut a Simonnet, 2001; Kyselý a Huth, 2006).
- Za předpokladu rostoucí teploty může být větší úbytek zásob sněhu v povodí Vltavy zčásti způsoben rovněž menším průměrným vertikálním gradientem teploty vzduchu vzhledem k povodí Labe. Tento gradient, odhadnutý na základě staničních měření (Petrovič a kol., 1969), byl v povodí Vltavy v měsících prosinec až březen za období 1901-1950 menší (0.33 °C/100 m) než na zbylém povodí českého Labe (0.49 °C/100 m). To znamená, že při oteplení např. o 1 °C by se mohly stejné teploty vyskytovat v dlouhodobém průměru o 300 m výše v povodí Vltavy, kdežto na zbylém povodí Labe jen o 200 m výše. Tento rozdíl by přispíval k výskytu menších zásob vody ve sněhové pokrývce (za stejných srážkových podmínek) v povodí Vltavy, neboť její odtávání ve výše položených oblastech je pravděpodobněji.

Protože je plocha povodí Vltavy po Prahu součástí většího povodí Labe v Děčíně, a vzhledem k absenci dlouhých homogenních řad meteorologických prvků s denním krokem, na nichž by bylo možné provést ověření, je třeba některé zde uvedené možné příčiny pokládat za čistě hypotetické. Na druhou stranu je zřejmé, že pokud za odlišné trendy výskytu zimních povodní na Vltavě a na Labi nejsou odpovědné meteorologické faktory, spočívá jediné další přijatelné vysvětlení ve výrazné nehomogenitě projevující se alespoň v jedné řadě kulminačních průtoků.

Rovněž změny v četnostech povodní typu L vykazují (po relativně klidném období třetí čtvrtiny 19. století) v Praze i v Děčíně mírně sestupnou tendenci. Výrazné maximum v četnosti letních povodní nastalo na konci 19. století; v Praze koincidovalo i s maximem v četnosti zimních povodní. V rozmezí let 1886-1900 se zde vyskytlo celkem 22 alespoň dvouletých povodní, zatímco např. v celé druhé

polovině 20. století jen 14. V průběhu 20. století však není patrný žádný trend ve výskytu letních povodní, jejich četnost byla dokonce v Praze i Děčíně kolem roku 1980 ve 20. století nejvyšší (obr. 2). Pokles povodňové aktivity během 20. století je tak dán výhradně snížením četností zimních povodní, a to zejména na Vltavě.

Pokles ve výskytu povodní v Praze dokládá rovněž obr. 3, v němž je zachycena proměnlivost četností kulminačních průtoků $\geq Q_2$ a $\geq Q_{10}$ bez ohledu na jejich příčinu. I v Děčíně je tento dlouhodobý trend nápadný, není však zdaleka tak výrazný. To může rovněž naznačovat změněné srážkové poměry severní části Čech ve srovnání s jižními.



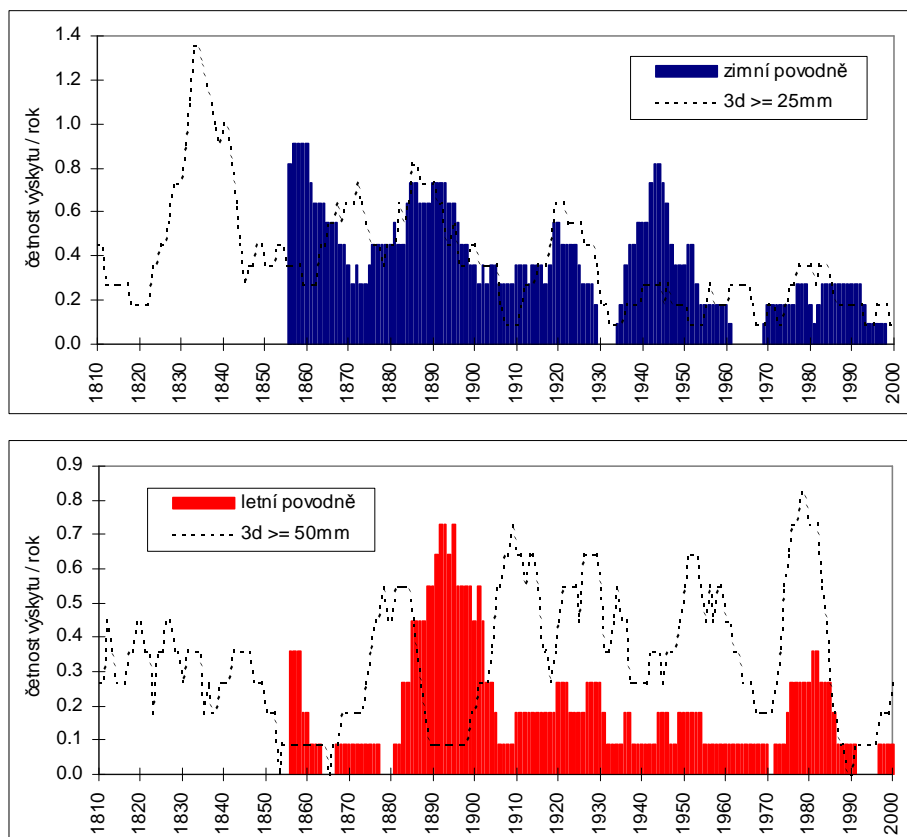
Obr. 3: Dlouhodobé změny v četnostech alespoň 2letých a alespoň 10letých povodní v Praze a Děčíně. Znázorněny jsou výskyty povodní v jednotlivých letech.

c. Časová proměnlivost vysokých srážkových úhrnů v Praze-Klementinu

Dlouhodobé změny ve výskytu srážkových extrémů podle údajů z pražského Klementina jsou zachyceny na obr. 4 pomocí četností 3denních srážkových úhrnů přesahujících 25 mm v zimním a 50 mm v letním hydrologickém pololetí (v dlouhodobém průměru se oba tyto případy vyskytují zhruba jednou za 2 roky v příslušném pololetí), na obr. 5 pomocí maximálních sezónních 1denních až 30denních úhrnů a na obr. 6 pomocí indexu denní intenzity srážek (definovaného jako podíl sezónního srážkového úhrnu a počtu dní s úhrnem srážek ≥ 1 mm; Frich a kol., 2002). Přestože je reprezentativnost srážkoměrné řady z jedné lokality omezená (podle závěrů Křivského (1958) lze však klementinskou řadu považovat zejména v zimním období za reprezentativní pro oblast Čech), jsou některé dlouhodobé změny zřejmě společné pro rozsáhlejší území.

Z dlouhodobého hlediska je velmi nápadná změna v rozložení výskytu 3denních srážkových extrémů v průběhu roku (obr. 4). V zimním pololetí je patrný od první poloviny 19. století do poloviny 20. století výrazný pokles; je nepravděpodobné, že by toto zjištění bylo ovlivněno nehomogenitami srážkové řady v 19. století, přestože lze mít určité pochybnosti o reálnosti výrazného maxima ve 30. letech 19. století. V letním pololetí převládá od poloviny 19. století až do začátku 80. let 20. století nárůst. Tyto protichůdné tendence lze ilustrovat např. tím, že zatímco kolem poloviny 19. století připadal na 3 zimní takto definované srážkové extrémy 1 letní, v 70. a 80. letech 20. století byl tento

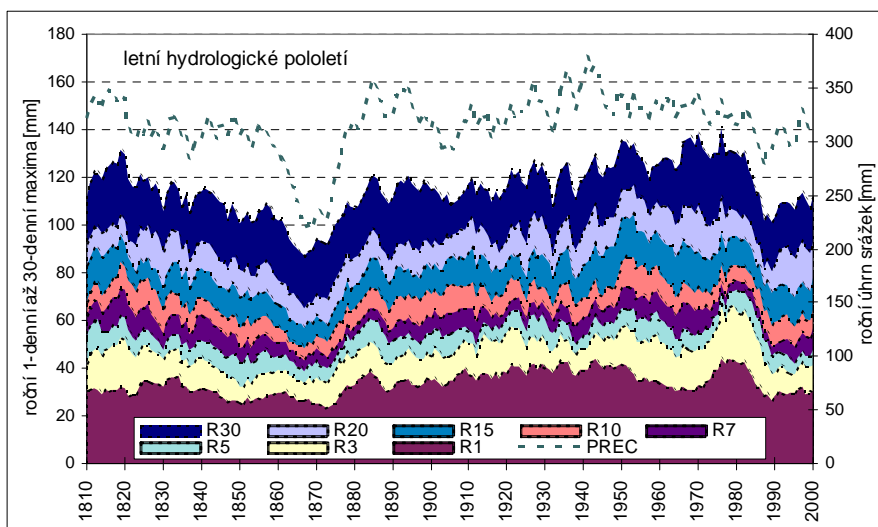
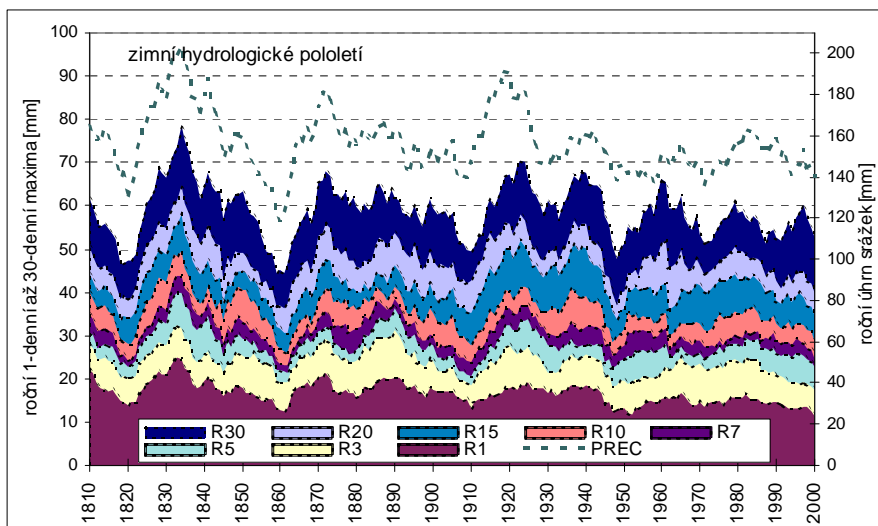
poměr opačný. Po roce 1980 však došlo k výraznému poklesu četnosti srážkových extrémů v letním hydrologickém pololetí.



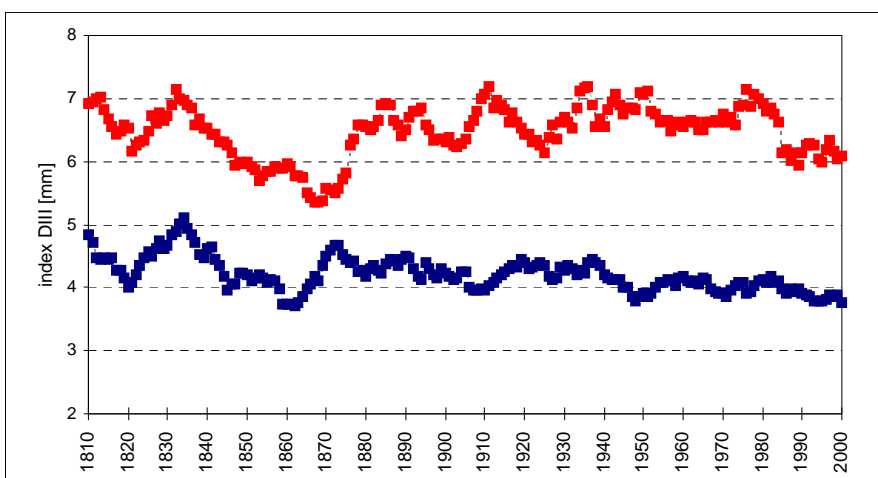
Obr. 4: Dlouhodobé změny počtu 3denních období se srážkovým úhrnem ≥ 25 mm (≥ 50 mm) v zimním (letním) hydrologickém pololetí v Praze-Klementinu. Znázorněny jsou rovněž změny ve výskytu letních a zimních povodní (alespoň dvouletých), zobrazené hodnoty odpovídají 11letým klouzavým průměrům.

Podobný charakter dlouhodobé proměnlivosti naznačuje i obr. 5. Nápadnější než dlouhodobý záporný trend maximálních sezónních k -denních úhrnů je v zimním pololetí kolísání na škále desetiletí, s maximy kolem let 1830, 1870, 1890, 1920, 1940, 1960 a 1980. Rostoucí trend v letním pololetí je patrný pro všechny hodnoty k od 60. let 19. století, nejvyšších úhrnů bylo dosaženo v 50. letech 20. století nebo kolem roku 1980 (v závislosti na hodnotě k). Za zmínku stojí skutečnost, že se postupný růst k -denních úhrnů od konce 19. století neprojevil ve zvýšení celkových letních úhrnů srážek (horní křivka na obr. 5). V průběhu 80. let 20. století následoval výrazný pokles intenzit. Nápadné změny indexu denní intenzity srážek ukazuje obr. 6; z dlouhodobého pohledu je opět patrný rozdílný časový vývoj v zimě a v létě. Zatímco změny, k nimž docházelo v 19. století, mohou pravděpodobně zčásti připadat na vrub nehomogenit v řadách denních srážkových úhrnů, dlouhodobý pokles od konce 19. století v zimním hydrologickém pololetí a nárůst v letním pololetí do roku 1980 odráží reálné změny intenzity denních srážek.

Souvislost s dlouhodobým kolísáním výskytu povodní je nápadnější v zimním pololetí, v němž dochází k dlouhodobému poklesu četnosti povodní i srážkových extrémů a k poměrně dobré shodě některých lokálních maxim, např. kolem let 1890 a 1920 (obr. 4). Zimní povodně jsou sice do značné míry vyvolány táním sněhu a nemusí tak mít bezprostřední vazbu na vybrané případy vysokých srážek, intenzivní srážky v podobě deště však přispívají jak k tání sněhu, tak i k samotnému zvýšení průtoků. V létě je nápadná shoda zvýšení četnosti povodní i srážkových extrémů kolem roku 1980.



Obr. 5: Dlouhodobé změny maximálních sezónních k -denních srážkových úhrnů pro $k=1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30$ dnů (R1 až R30) v Praze-Klementinu. Grafy odpovídají 11letým klouzavým průměrům. Znáznorněny jsou rovněž celkové úhrny srážek v příslušném hydrologickém pololetí (PREC).

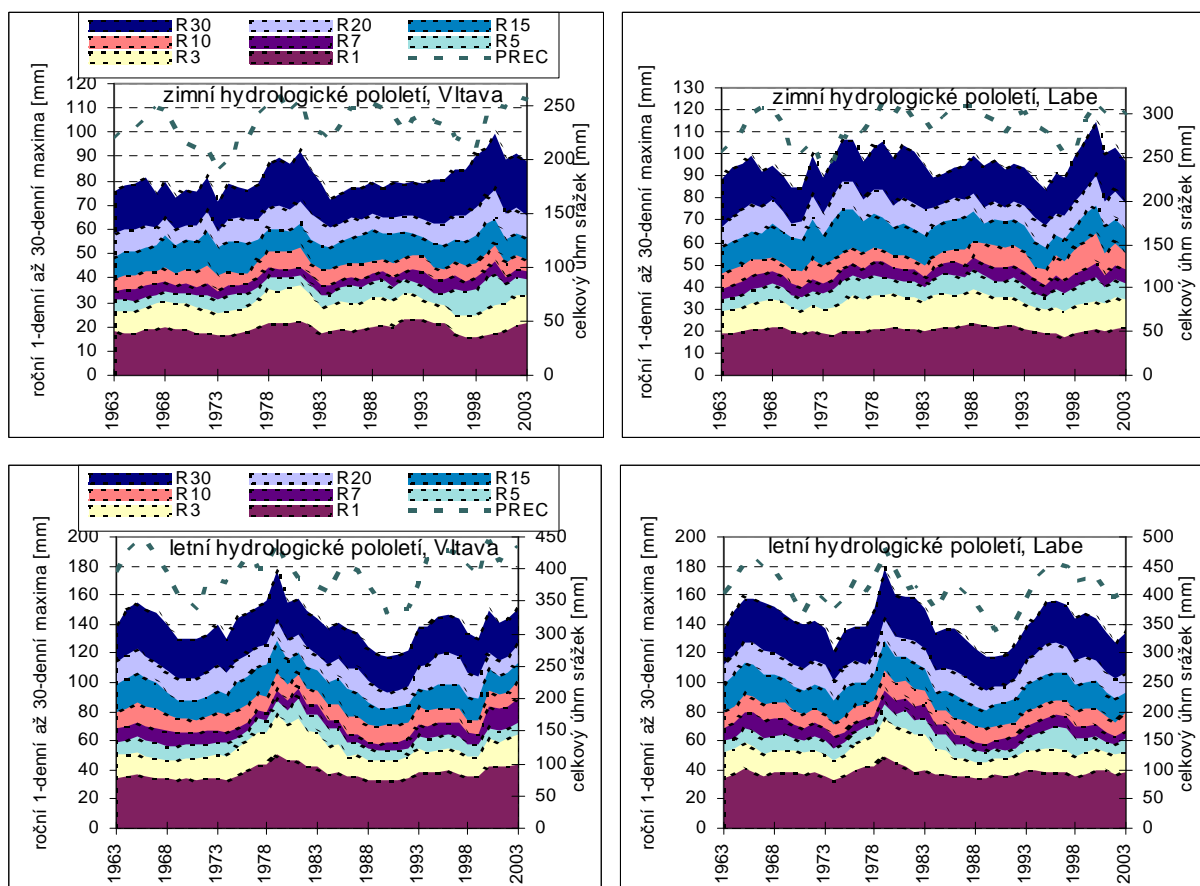


Obr. 6: Dlouhodobé změny indexu denní intenzity srážek v Praze-Klementinu v zimním (modře) a letním (červeně) hydrologickém pololetí. Křivky odpovídají 11letým klouzavým průměrům.

d. Časová proměnlivost vysokých srážkových úhrnů v Čechách od roku 1961

S využitím dat z klimatologické databáze ČHMÚ byla analyzována proměnlivost vybraných charakteristik srážkových extrémů za období 1961-2005 na 84 stanicích pokrývajících přibližně území Čech, které byly rozděleny na povodí Vltavy (57) a zbylé povodí Labe (27; viz část 2b).

V zimním hydrologickém pololetí převládá v obou povodích v uvedeném období nárůst intenzity srážkových extrémů (obr. 7 a 9); výjimku tvoří nížinné oblasti středních Čech (zejména okolí Prahy). Uvažují-li se řady vzniklé průměrováním přes všechny stanice v příslušném povodí, jsou ve všech charakteristikách četnosti a intenzity extrémních srážek (viz část 2b) v obou povodích trendy kladné. Podle některých charakteristik bylo toto zvýšení výraznější v povodí Labe, zejména je to patrné pro četnosti dnů s intenzivními srážkami a jejich podíl na celkových sezónních úhrnech (obr. 8). Výrazné a statisticky významné (na hladině 5%) kladné trendy se projevují zejména v severních a východních Čechách (podhůří Krkonoš). Tyto skutečnosti by mohly zčásti potvrzovat možné vysvětlení rozdílů v rychlosti poklesu povodní v Praze a v Děčíně (část 3b), rozdíly mezi povodími jsou však poměrně malé a analyzované období, pro něž jsou dostupná data, relativně krátké.



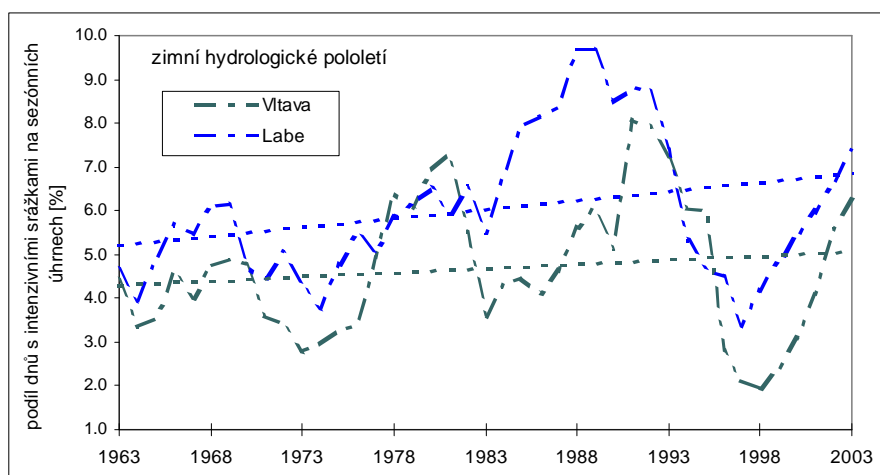
Obr. 7: Proměnlivost maximálních sezónních k -denních srážkových úhrnů pro $k=1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30$ dnů za období 1961-2005 v povodí Vltavy (průměr z 57 stanic) a ve zbylém povodí Labe (27 stanic). Grafy odpovídají 5letým klouzavým průměrům. Znárodněny jsou rovněž celkové úhrny srážek v příslušném hydrologickém pololetí (PREC).

V letním hydrologickém pololetí došlo k nápadnému zvýšení četnosti a intenzity srážkových extrémů kolem roku 1980, trendy za období 1961-2005 jsou většinou nevýznamné (obr. 7 a 10). Rozdíl ve statistické významnosti trendů a v jejich prostorové proměnlivosti mezi zimním a letním pololetím lze ilustrovat např. tím, že zatímco v zimě jsou trendy maximálních sezónních 5-denních úhrnů významné

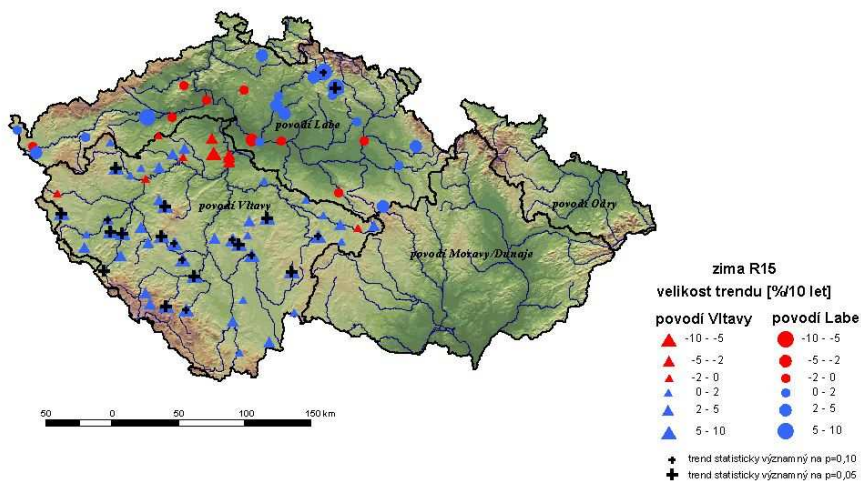
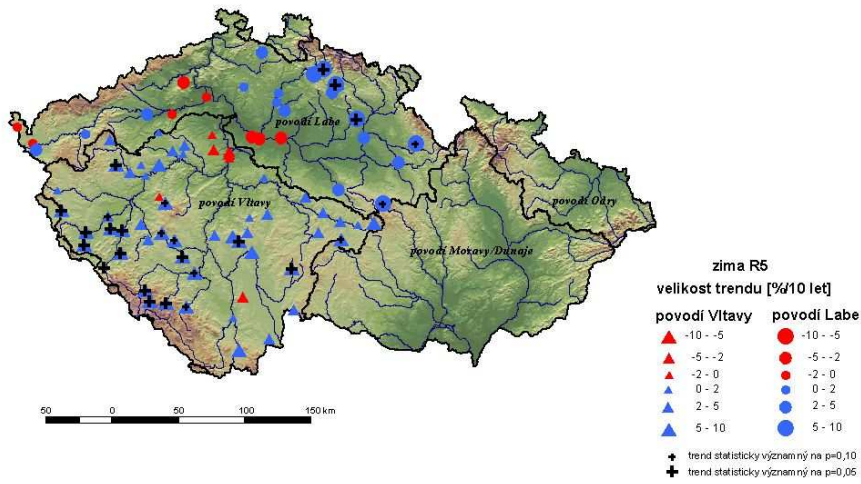
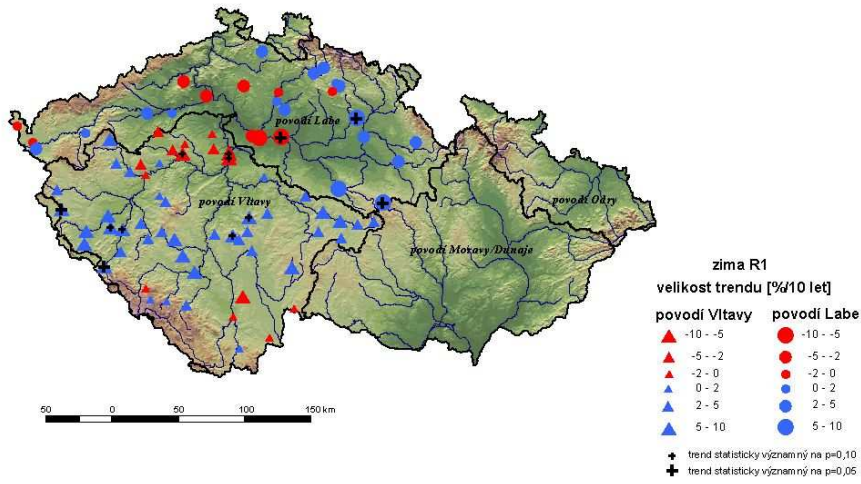
na hladině 10% na 26 stanicích (ve všech případech jde o kladné trendy), v létě pouze na 5 stanicích (z toho na třech záporné a na dvou kladné). V povodí Vltavy (uvažují-li se opět řady vzniklé průměrováním přes všechny stanice) je trend kladný pro 1denní až 10denní srážkové úhrny, četnost dnů s intenzivními srážkami a jejich podíl na celkových sezónních úhrnech; v povodí Labe jsou všechny trendy záporné. Rozdíl pramení především z toho, že mimořádné srážkové úhrny v létě 2002 se podílely na zvýšení hodnot většiny charakteristik srážkových extrémů ke konci analyzovaného období v povodí Vltavy, které se v povodí Labe neprojevovalo.

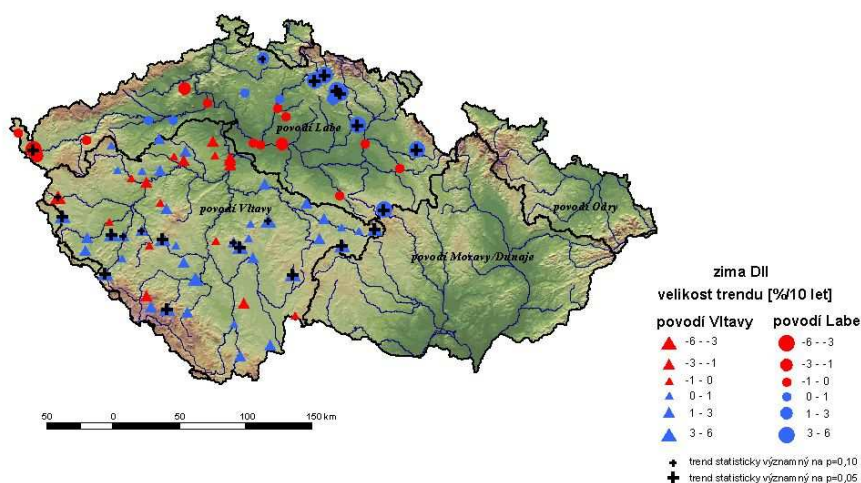
Mírný nárůst intenzit srážkových extrémů (analyzovaných pomocí extrémních 1denních až 7denních srážkových úhrnů) v zimě a nevýrazný trend v letním období byl zjištěn pro celé území ČR (s využitím pouze 30 stanic a kratšího období 1961-2000) už v práci Pokorná a Kyselý (2003). Uvedené výsledky jsou v dobrém souladu i s dalšími evropskými studiemi, které potvrzují převládající nárůst intenzity a četnosti vysokých srážkových úhrnů, zejména v zimě (např. Klein Tank a kol., 2002; Zolina a kol., 2005). Hundecha a Bardossy (2005) zjistili za období 1958-2001 nárůst na území západního Německa (povodí Rýnu) ve všech sezónách s výjimkou léta, kdy byl patrný opačný trend. Podobně tak analýza pro švýcarské stanice za celé 20. století (Schmidli a Frei, 2005) ukázala na statisticky významné zvýšení ve většině charakteristik srážkových extrémů v zimě a v menší míře na podzim, zatímco na jaře a v létě byly trendy nevýznamné.

Uvedené trendy pozorované na stanicích v Čechách za posledních 45 let (zejména pokud jde o rozdíl mezi zimním a letním pololetím) se jen v omezené míře shodují se změnami, které se ve stejném období projevují v Praze-Klementinu. Celkový pokles charakteristik extrémních srážek je v Praze v tomto období výraznější, patrný je v zimě i v létě a oblast okolí Prahy se tak poněkud vymyká z převládající tendence k častějším a intenzivnějším srážkovým extrémům v zimě (obr. 9). Prostorová proměnlivost mezi jednotlivými stanicemi a oblastmi je ještě výraznější v létě, kdy se i na velmi blízkých stanicích mohou vyskytovat poměrně výrazné (většinou však statisticky nevýznamné) trendy opačného znaménka. Výsledky získané na staniční síti tak upozorňují na to, že je třeba opatrně interpretovat dlouhodobé změny, které se projevují v datech z jedné stanice na škále století, zvláště pokud jde o případné hypotetické extrapolace směrem do budoucnosti.

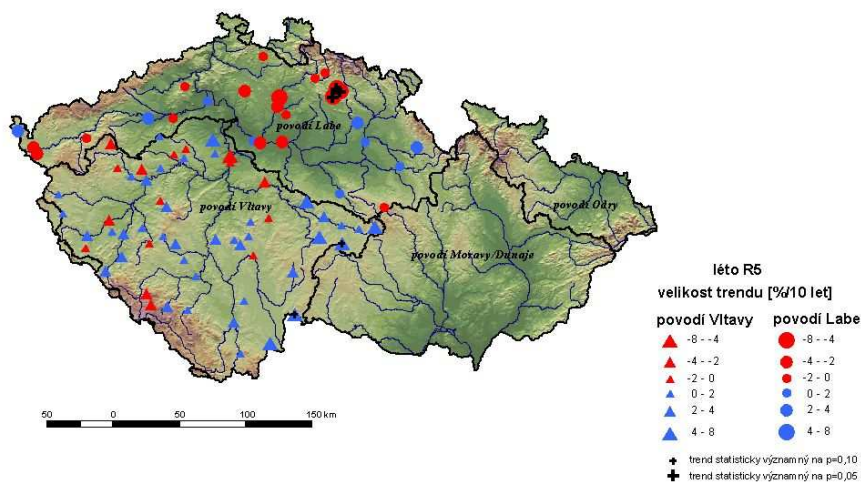
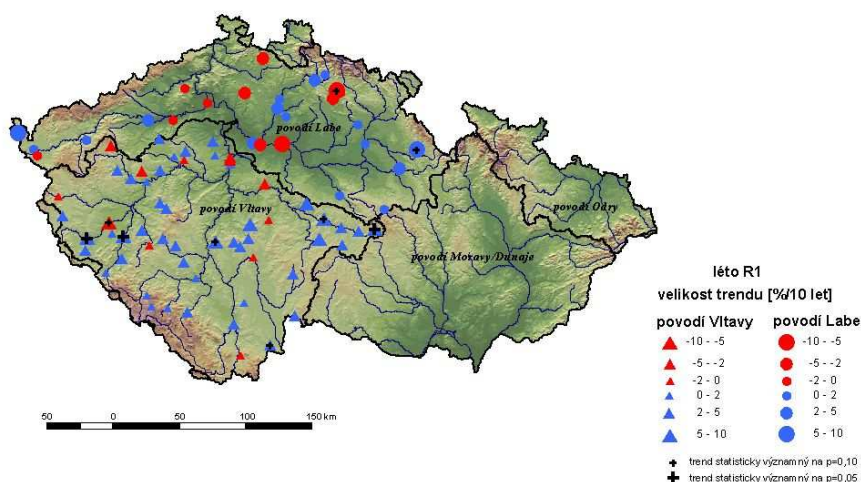


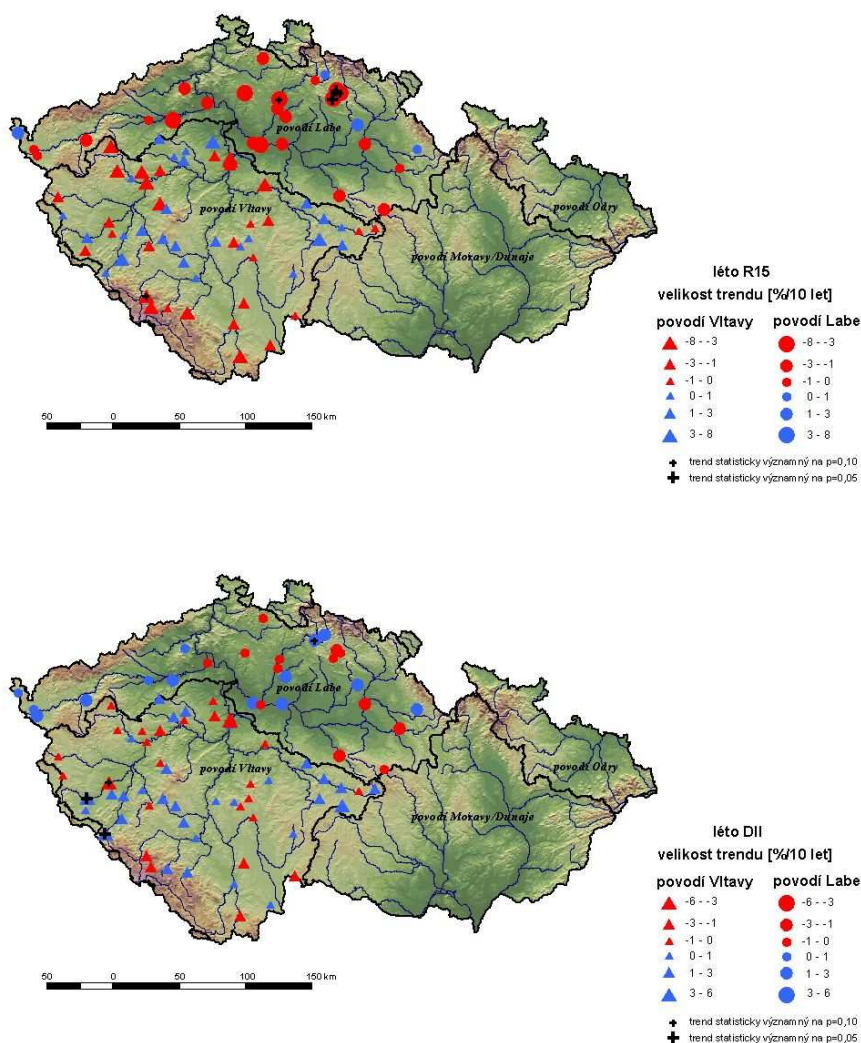
Obr. 8: Proměnlivost podílu dnů s intenzivními srážkami na sezónních úhrnech v povodí Vltavy a ve zbylém povodí Labe v zimním hydrologickém pololetí. Křivky odpovídají 5letým klouzavým průměrům.





Obr. 9: Trendy vybraných charakteristik extrémních srážkových jevů v povodích Vltavy a ve zbylém povodí Labe v zimním hydrologickém pololetí. R1 (R5, R15) označuje maximální sezónní 1-denní (5-denní, 15-denní) úhrny, DII index denní intenzity srážek. Odhad trendu (1961-2005) byl proveden pomocí Kendallova tau, velikost je vyjádřena v % za 10 let.





Obr. 10: Trendy vybraných charakteristik extrémních srážkových jevů v povodích Vltavy a ve zbylém povodí Labe v letním hydrologickém pololetí. R1 (R5, R15) označuje maximální sezónní 1-denní (5-denní, 15-denní) úhrny, DII index denní intenzity srážek. Odhad trendu (1961-2005) byl proveden pomocí Kendallova tau, velikost je vyjádřena v % za 10 let.

4. ZÁVĚR

Dlouhodobá proměnlivost četnosti povodní a extrémních několikadenních srážkových událostí byla studována s využitím dlouhých řad povodňových kulminačních průtoků na Vltavě v Praze a na Labi v Děčíně (1851-2005) a řad ze srážkoměrných stanic v Čechách, s důrazem na nejdelší řadu pozorování denních srážkových úhrnů v Praze-Klementinu (1804-2005). V průtokových datech se projevují dva zřetelně odlišné druhy povodní, zimní (vyvolané kombinací tání sněhové pokrývky a velkoplošných srážek ve formě deště, vyskytující se v zimním hydrologickém pololetí) a letní (způsobené intenzivními srážkami v letním hydrologickém pololetí a koncem dubna). V četnostech zimních povodní je pozorován nápadný pokles od konce 19. století, který je větší na Vltavě v Praze než na Labi v Děčíně, zatímco změny ve výskytu letních povodní jsou ve stejném období nevýrazné. Rozdíly mezi dlouhodobou proměnlivostí zimních povodní na Vltavě a na Labi pravděpodobně odrážejí změny v teplotních a srážkových poměrech a zásobách vody ve sněhové pokrývce mezi severními a jižními oblastmi Čech; růst zimních teplot nebo změny srážkového režimu se projeví ve

vztahu k možnosti akumulace sněhu silněji v povodí Vltavy, a četnost povodní na jejím dolním toku se proto snížila více ve srovnání se situací na Labi.

Dlouhodobý pokles (nárůst) četnosti intenzivních 3denních srážkových událostí a dalších charakteristik srážkových extrémů v Praze-Klementinu v zimním (letním) hydrologickém pololetí naznačuje, že pokles četnosti zimních povodní nemusí odrážet pouze výrazné oteplování v zimních měsících a omezenou akumulaci sněhu, ale rovněž menší výskyt případů vysokých srážkových úhrnů, podporujících tání sněhu a přispívajících ke zvýšeným průtokům. Ve staničních datech pokrývajících povodí Vltavy a Labe (přibližně odpovídá území Čech) převládá od roku 1961 tendence k vyšší četnosti a intenzitě srážkových extrémů v zimním hydrologickém pololetí, v letním pololetí jsou trendy nevýrazné a prostorově proměnlivější. Tyto výsledky se jen v omezené míře shodují se změnami, které se ve stejném období projevují v Praze-Klementinu (okolí Prahy se v rámci Čech vymyká z převládající tendence k častějším a intenzivnějším srážkovým extrémům v zimním pololetí za období 1961-2005), a upozorňují tak na skutečnost, že je třeba opatrně interpretovat dlouhodobé změny, které se projevují v datech z jedné stanice, a pokud možno se vyvarovat jejich extrapolací prostorových (změny zasahující větší území) a především časových (směrem do budoucna).

Poděkování: Autoři děkují ze podporu projektu B300420601 Grantové agentuře Akademie věd ČR.

LITERATURA:

Bárdossy A., Caspary H.J., 1990: Detection of climate change in Europe by analyzing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, **42**, 155-167.

Brázdil R., 1998: The history of floods on the rivers Elbe and Vltava in Bohemia. *Erfurter Geographische Studien*, **7**, 93-108.

Brázdil R., Dobrovolný P., Kotyza O., 2004: Floods in the Czech Republic during the past millennium. *Houille Blanche-Revue Internationale De L'Eau*, **5**, 50+.

Brázdil R. a kol., 2005: Historické a současné povodně v České republice. Masarykova univerzita a Český hydrometeorologický ústav, Brno a Praha, 370 s.

ČHMÚ, 1996: Hydrologické charakteristiky vybraných vodoměrných stanic České republiky. ČHMÚ, Praha, 134 s.

ČHMÚ, 2003: Výroční zpráva 2002. ČHMÚ, Praha, 67 s.

Engel H., 2004: The flood event 2002 in the Elbe river basin: causes of the flood, its course, statistical assessment and flood damages. *Houille Blanche-Revue Internationale De L'Eau*, **6**, 33+.

Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., Peterson T., 2002: Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the 20th century. *Climate Research*, **19**, 193-212.

Hundecca Y., Bardossy A., 2005: Trends in daily precipitation and temperature extremes across western Germany in the second half of the 20th century. *International Journal of Climatology*, **25**, 1189-1202.

Christensen O.B., Christensen J.H., 2004: Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global and Planetary Change*, **44**, 107-117

Jacobeit J., Jönsson P., Bärring L., Beck C., Ekström M., 2001: Zonal indices for Europe 1780-1995 and running correlations with temperature. *Climatic Change*, **48**, 219-241.

Kakos V., 1983: Hydrometeorologický rozbor povodní na Vltavě v Praze za období 1873 až 1982. *Meteorologické zprávy*, **36**, 171-181.

Kakos V., 1996: Klimatické změny ve vztahu k povodním na Labi v Děčíně. In: Tradice a pokrok v meteorologii. Sborník referátů z konference v Radostovicích 10.-12.9.1996. ČHMÚ Praha, 226-233.

- Kakos V., Kulasová B., 1990: Povodeň v září 1890 na Vltavě v Praze. *Vodní hospodářství*, **7**, 267-273.
- Kašpar M., 2003: Porovnání extrémnosti synoptických podmínek během povodní v České republice v srpnu 2002 a v červenci 1997. *Meteorologické zprávy*, **56**, 166-177.
- Kašpárek L., Bušek M., 1990: Vliv vltavské kaskády na povodňový režim Vltavy v Praze. *Vodní hospodářství*, **7**, 280-286.
- Klein Tank A.M.G. a kol., 2002: Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, **22**, 1441-1453.
- Kotyza O., Cvrk F., Pažourek V., 1995: Historické povodně na dolním Labi a Vltavě. Okresní muzeum v Děčíně, Děčín, 169 s.
- Křivský L., 1957: Atmosphärische Niederschläge in Prag-Klementinum (1804-1956). *Studia Geophysica et Geodaetica*, **1**, 182-192.
- Křivský L., 1958: Reprezentativnost srážek Prahy-Klementina pro Čechy. *Meteorologické zprávy*, **11**, 70-74.
- Kyselý J., Kakos V., Huth R., Buchtele J., 2003: Atmosférická cirkulace a povodňové situace na Vltavě. In: Bioklimatologické pracovní dny. Funkcia energetickej a vodnej bilancie v bioklimatických systémoch [CD-ROM], Račková dolina, 5 s.
- Kyselý J., Huth R., 2006: Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, **85**, 19-36.
- Müller M., Kakos V., 2003: Hydrometeorologické srovnání povodní v srpnu 2002 s vybranými historickými případy dešťových povodní na Vltavě v Praze. *Meteorologické zprávy*, **56**, 129-136.
- Müller M., Kakos V., 2004: Extrémní konvekční bouře v Čechách 25.-26. května 1872. *Meteorologické zprávy*, **57**, 69-77.
- Novotný J., 1963: Dvě století hydrologické řady průtokové na českých řekách. In: Sborník prací HMÚ v Praze, sv. 2, Praha.
- Pal J.S., Giorgi F., Bi X.Q., 2004: Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophysical Research Letters*, **31**, L13202
- Petrovič, Š. (ed.) a kol., 1969: Podnebí ČSSR. Souborná studie. Hydrometeorologický ústav, Praha, 357 s.
- Plaut G., Simonnet E., 2001: Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Climate Research*, **17**, 303-324.
- Pokorná L., Kyselý J., 2003: Temporal variations in extreme precipitation events and dry spells in the Czech Republic. In: Geophysical Research Abstracts, **5**, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France.
- Rauthe M., Hense A., Paeth H., 2004: A model intercomparison study of climate change signals in extratropical circulation. *International Journal of Climatology*, **24**, 643-662.
- Řezáčová D., Kašpar M., Müller M., Sokol Z., Kakos V., Hanslian D., Pešice P., 2005: A comparison of the flood precipitation episode in August 2002 with historic extreme precipitation events on the Czech territory. *Atmospheric Research*, **77**, 354-366.
- Semmler T., Jacob D., 2004: Modeling extreme precipitation events – a climate change simulation for Europe. *Global and Planetary Change*, **44**, 119-127.
- Schmidli J., Frei C., 2005: Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology*, **25**, 753-771.
- Slonosky V.C., Jones P.D., Davies T.D., 2000: Variability of the surface atmospheric circulation over Europe, 1774-1995. *International Journal of Climatology*, **20**, 1875-1897.

Terray L., Demory M.-E., Deque M., de Coetlogon G., Maisonnave E., 2004: Simulation of late-21st century changes in wintertime atmospheric circulation over Europe due to anthropogenic causes. *Journal of Climate*, **17**, 4630-4635.

Ulbrich U., Brücher T., Fink A.H., Leckebusch G.C., Krüger A., Pinto J.G., 2003: The central European floods of August 2002. Part I: Rainfall periods and flood development. *Weather*, **58**, 371-377.

Vlček V. a kol., 1984: Vodní toky a nádrže, Zeměpisný lexikon ČSR, Academia, s. 316.

Wijngaard J.B., Klein Tank A.M.G., Koennen G.P., 2003: Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology*, **23**, 679-692.

Zhang X., Zwiers F.W., Li G., 2004: Monte Carlo experiments on the detection of trends in extreme values. *Journal of Climate*, **17**, 1945-1952.

Zolina O., Simmer C., Kapala A., Gulev S., 2005: On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe. *Geophysical Research Letters*, **32**, L14707.