

Projekt VaV SP/1a6/108/07

„Zpřesnění dosavadních odhadů dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření“

(extrakt ze závěrečné zprávy)

Úvod

Jednou ze základních povinností České republiky, vyplývajících z přijetí Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu a jejího Kjótského protokolu, je podpora základního i aplikovaného výzkumu v oblasti klimatické změny a pravidelné sledování těchto změn a jejich dopadů. Z textu Úmluvy mj. vyplývá i důležitost adaptačních opatření v procesu snah o zmírňování dopadů změn klimatu na společnost a na nejvýznamnější oblasti jejich činností (čl. 2, 4.1, aj. Úmluvy).

V současné době je význam uplatňování adaptačních opatření na zmírňování dopadů změny klimatu stále více kladen na podobnou rovinu důležitosti jako význam opatření zaměřených na snižování úrovně koncentrací skleníkových plynů v atmosféře, a tedy snižování jejich emisí. Přínosy adaptačních opatření mají v porovnání s přínosem snižování emisí skleníkových plynů většinou lokální či regionální charakter, přesto jsou však v měřítku státu významným nástrojem pro snižování negativních dopadů změny klimatu a proto je nelze opomíjet. Tyto skutečnosti byly hlavním důvodem prací na tomto projektu.

Řešitelé projektu

Na řešení projektu se kromě Českého hydrometeorologického ústavu (*ČHMÚ*) jako koordinátora projektu dále spolupodílely

- Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i. (*VÚV*);
- Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta (*MFF UK*);
- Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. (dříve Ústav systémové biologie a ekologie AV ČR, v. v. i.) (*CVGZ*); a
- Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i. (*VÚRV*).

Hlavní cíle projektu

Cíle projektu řešeného v letech 2007–2011 byly v souladu se Smlouvou o poskytnutí účelové podpory na řešení programového projektu formou dotace z výdajů státního rozpočtu na výzkum a vývoj podle zákona č. 130/2002 Sb., o podpoře výzkumu a vývoje z veřejných prostředků ze dne 27. 8. 2007 zaměřeny zejména na

- zpřesnění a aktualizace scénářů vývoje klimatu na území ČR s využitím regionálních klimatických modelů (RCM) s měsíčním a denním krokem pro časové horizonty 2010–2039, 2040–2069 a 2070–2099;
- vyhodnocení možnosti sestavování dlouhodobých scénářů klimatologických anomálií pro území ČR se zaměřením na anomálie teplot a srážek pomocí regionálních modelů s vysokým rozlišením;

- archivace a distribuce časových řad vybraných klimatologických charakteristik (teplota vzduchu, srážky, vlhkost, globální záření, rychlost větru) s měsíčním a denním krokem pro budoucí klima;
- porovnání vytvořených scénářů s výsledky projektů EU CECILIA a EU ENSEMBLES;
- analýzu vývoje základních indikátorů klimatické změny (teplota a srážky) na území ČR v období 1961–2010;
- regionální analýzu dopadů klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a hodnocení základních prvků hydrologické bilance, průměrných a minimálních průtoků a výskyt suchých období;
- metodiku hodnocení dopadů klimatické změny na vodní hospodářství, zejména ve vazbě na potřebu zásob vody v zemědělství a lesním hospodářství;
- analýzu změn hodnot parametrů hydrologických modelů při odlišných klimatických podmínkách a výpočty statistických charakteristik denních a ročních minimálních průtoků na vybraných vodoměrných stanicích a zpracování trendů průměrných měsíčních a denních průtoků;
- analýzu očekávané změny povodňového režimu v důsledku klimatické změny;
- analýzu dlouhodobých řad vybraných agroklimatických prvků a jejich statistická vyhodnocení a regionální analýza dopadů klimatické změny na jejich další očekávaný vývoj;
- přípravu databáze lesnických dat dokumentujících vliv abiotických a biotických stresorů na lesní porosty pro vybrané přírodní lesní oblasti a shrnutí výsledků terénních průzkumů poškození, vitality a adaptačního potenciálu vybraných porostů s převládajícím smrkem ztepilým;
- zhodnocení újmy na životním prostředí v důsledku snížení hodnoty celospolečenských funkcí lesa za různých scénářů vývoje klimatu;
- pilotní řešení vlivu vybraných typů adaptačních opatření na změny vodního režimu krajiny, režimu odtoku z povodí a užívání vod v zemědělství a lesním hospodářství;
- návrhy vybraných typů adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství, zemědělství a pro jednotlivé typy vývoje lesa a pilotní cost-benefit analýza jejich účinnosti;
- analýzy nejistot výsledků odhadu dalšího vývoje projevů klimatické změny na území ČR v průřezových obdobích 2010–2039, 2010–2069 a 2070–2099 s ohledem na nejistotu vstupů a dalších parametrů.

Členění projektu

S ohledem na cíle, byl projekt členěn do šesti úzce propojených dílčích projektů, zaměřených na

1. Zpřesnění a aktualizace regionálních scénářů klimatické změny;
2. Dopady změny klimatu na hydrologickou bilanci a vodní zdroje a návrhy adaptačních opatření v sektoru vodního hospodářství;
3. Dopady změny klimatu na extrémní hydrologické jevy;
4. Dopady změny klimatu a návrhy adaptačních opatření v sektoru zemědělství;
5. Dopady změny klimatu a návrhy adaptačních opatření v sektoru lesního hospodářství; a
6. Syntézu dopadů změny klimatu, vlivu adaptačních opatření, odhad ekonomických nákladů a koordinaci řešení.

Zaměření výsledků a jejich využití

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA O ŘEŠENÍ PROJEKTU v rozsahu 139 str. obsahuje pět kapitol, které jsou zaměřeny na podrobný popis výsledků, dosažených v rámci jednotlivých dílčích projektů v průběhu řešení, z nichž každá obsahuje seznam relevantní literatury k daným tématům.

Šestá kapitola obsahuje přehled publikací řešitelů z doby řešení projektu, které mají přímý vztah k řešené tématice. Jsou uvedeny publikace v impaktovaných, recenzovaných i nerecenzovaných časopisech a sbornících, prezentace na národních a mezinárodních konferencích či seminářích, příp. diplomové či disertační práce, zpracovávané na řešitelských pracovištích. K termínu dokončování projektu tento přehled obsahuje 138 publikačních aktivit ve vazbě na projekt.

V sedmé kapitole je uveden seznam příloh zprávy, které jsou na přiloženém DVD a rozšiřují informace zahrnuté v textové části zprávy. Příloha 01–1 obsahuje časové řady hodnot analyzovaných meteorologických prvků pozorovaných a simulovaných modelem ALADIN 25 (korigovaných i nekorigovaných) pro jednotlivé uzlové body v textových souborech, které mohou uživatelům sloužit jako výchozí materiál pro další výzkum klimatické změny v regionálních podmínkách.

Z uživatelského hlediska bylo připraveno i TECHNICKÉ SHRNUÍ VÝSLEDKŮ PROJEKTU, které je koncipováno jako přehledné shrnutí hlavních výsledků dosažených v průběhu řešení. Výsledky jsou shrnuty v rozsahu 68 str. (včetně použité literatury) v pěti kapitolách TS. 1 až TS. 5, a ve formě dodatku (TS. D) je uveden přehled vývoje základních klimatických indikátorů na území ČR v období 1961–2010.

Podle Smlouvy o využití výsledků projektu SP/1a6/108/07 budou výsledky projektu poskytovatelem finanční dotace (Ministerstvo životního prostředí) využity zejména při přípravách Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR a Politiky ochrany klimatu v ČR a dále budou poskytovatelem prezentovány na evropské úrovni (např. při jednáních v souvislosti s implementací adaptačních opatření do domácích politik na národní, regionální a lokální úrovni, apod.) a při jednáních k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu.

Zpřesnění a aktualizace regionálních scénářů klimatické změny

K aktualizovaným dopadům klimatické změny na jednotlivé vybrané sektory bylo třeba pro zvolené území a budoucí časové horizonty aktualizovat tzv. scénáře změny klimatu. Scénáře mají pomoci najít rámec či meze budoucího vývoje klimatu, které mohou za předpokládaných okolností (růstu emisí skleníkových plynů a aerosolů v atmosféře podle určitých předpokladů – scénářů emisí) pravděpodobně nastat. Pro konstrukci scénářů změny klimatu jsou obecně k dispozici výstupy globálních, a v posledním desetiletí i regionálních klimatických modelů, nicméně specifikovat tyto výhledy pro relativně velmi malé území ČR není jednoduché.

Metodika konstrukce scénáře

Základ scénáře změny klimatu ČR tvoří výstupy regionálního klimatického modelu ALADIN-CLIMATE/CZ v rozlišení 25 km (dále ALADIN 25) pro období 1961–2100 opravené o chyby modelu, které byly identifikovány při porovnávání modelové simulace pro referenční období 1961–1990 s naměřenými hodnotami. Jako základní prvky pro scénář byly vybrány: průměrná denní teplota vzduchu, denní úhrn srážek, denní suma globálního záření, průměrná denní rychlost větru a relativní vlhkost vzduchu. Výběr základních klimatických prvků vyplýval z požadavků sektorů zabývajících se odhady dopadů a z dostupnosti výstupů regionálních klimatických modelů. Z denních hodnot je možné pomocí programu ProClimDB vypočítat řadu dalších charakteristik, vyjadřujících mj. i extrémní rysy klimatu (např. počet tropických dní, počet mrazových dní, počet dní s úhrnem srážek nad 20 mm, apod.).

Změny klimatických prvků vypočítané modelem ALADIN-CLIMATE/CZ pro období 2010–2100 podle scénáře emisí SRES A1B jsou jen jednou z možných variant budoucího vývoje klimatu. Tyto změny je nutno zařadit do kontextu neurčitostí vyplývajících z použití různých regionálních modelů (RCM), řídicích globálních modelů (GCM) a scénářů emisí. Při konstrukci scénáře se řešitelé zaměřili na tři třicetileté časové horizonty 2010–2039, 2040–2069 a 2070–2099. Získal se tak první blízký horizont, který je důležitý pro bezprostřední aplikaci navržených opatření.

Validace modelu ALADIN 25

Výstupy modelu ALADIN 25 ve formě řad pro období 1961–1990 v časovém rozlišení 6 hodin byly nejprve konvertovány na denní data. Vypočteny byly denní průměrné, maximální a minimální teploty vzduchu, denní úhrny srážek, denní průměrná relativní vlhkost vzduchu a denní suma globálního záření. Následně byla provedena validace získaných polí, a to porovnáním se souborem pozorování, získaným převedením dostupných staničních dat do pravidelné sítě modelu ALADIN 25.

Odchytky simulovaných sezónních průměrů teploty vzduchu od pozorování v referenčním období se v létě a v zimě na většině území pohybují do 1 °C, ale na jaře a na podzim je model podstatně chladnější než pozorování (na jaře ojediněle i o více než 3 °C). Při modelování vývoje atmosférických srážek model ALADIN 25 ve všech ročních obdobích pozorované srážkové úhrny v referenčním období v průměru nadhodnocuje (podobně se chovají i další RCM a GCM), v zimě a na jaře místy až o 30–40 %. Na druhou stranu jsou ale v některých oblastech ČR srážky podhodnoceny, zejména v zimě a na podzim. Velké odchytky od pozorování vykazuje zejména vlhkost vzduchu, kterou model na většině území nadhodnocuje, místy až o 30 %. U globálního záření model nadhodnocuje hodnoty v letním a spíše podhodnocuje v zimním období. Rychlost větru má model tendenci v létě spíše podhodnocovat, v zimě spíše pozorované hodnoty nadhodnocovat.

Postprocesing výstupů modelu ALADIN 25

Vzhledem k tomu, že se při validaci modelu ALADIN 25 objevily systematické chyby v simulacích sledovaných klimatických prvků a charakteristik, bylo pro odhady dopadů doporučeno výstupy modelu pro budoucí klima buď použít relativně (tj. u teploty vzduchu pracovat s rozdíly, u dalších prvků s podíly průměrných hodnot pro nové a referenční období), nebo použít data, která prošla tzv. postprocesingem (tj. aplikací statistických korektivních funkcí k redukci systematických chyb). Vzhledem k malým rozdílům výsledků různých metod postprocesingu v porovnání s dalšími neurčitostmi byla použita kvantilová metoda, kdy pro každý klimatický prvek, den a gridový bod byly zkonstruovány kvantilové funkce měřených a simulovaných hodnot za období 1961–1990. Porovnáním hodnot odpovídajících si kvantilů pak byly vypočteny korekce, které byly následně aplikovány na období popisující budoucí klima.

Scénář změny klimatu pro období 2010–2039

Tento scénář je vztažen pouze ke scénáři emisí SRES A1B, neboť pro takto blízké období se mezi jednotlivými scénáři SRES předpokládají pouze nevýznamné rozdíly.

V období 2010–2039 se teplota vzduchu na území ČR zvýší podle modelu ALADIN 25 cca o 1°C, oteplení v létě a zimě je jen o něco menší než na jaře a na podzim. Patrné je systematické zvýšení teplot relativně málo proměnlivé v prostoru. U změn sezónních úhrnů srážek je situace složitější. Ve většině uzlových bodů je v zimě simulován pokles budoucích srážek (v závislosti na konkrétní lokalitě ČR do 20 %), na jaře jejich zvýšení (od 2 do cca 16 %), v létě a zejména na podzim se situace v různých částech území ČR liší (na podzim najdeme na několika místech ČR slabý pokles o několik procent, jinde zvýšení až o 20–26 %, v létě převládá slabý pokles, místy (např. západní Čechy) naopak zvýšení až o 10 %). Zároveň je patrná poměrně výrazná prostorová proměnlivost změn, je tudíž možné, že případný klimatický signál může být v tomto blízkém období překryt projevy přirozených (meziročních) fluktuací srážkových úhrnů.

Vzhledem ke slabému signálu změn relativní vlhkosti v 21. století, a v neposlední řadě i skutečnosti, že naměřené hodnoty relativní vlhkosti se v období 1961–2000 neměnily, bylo doporučeno, aby při odhadech dopadů pro toto období bylo pracováno s měřenými hodnotami relativní vlhkosti z období 1961–1990.

Nejenom v období 2010–2039, ale i v obdobích následných, jsou simulované změny sezónních průměrů denních sum globálního záření největší v zimě (až o více než 10 %), v ostatních sezónách se

na většině míst pohybují do 4%, nicméně ve srovnání s chybami modelu jsou změny globálního záření dopadajícího na zemský povrch malé. Pro aplikační práce s těmito soubory platí stejné doporučení, jako v případě relativní vlhkosti.

Scénáře změny klimatu pro období 2040–2069 a 2070–2099

V období 2040–2069 je simulované oteplení již výraznější, nejvíce se zvýší teploty vzduchu v létě (o 2,7 °C), nejméně v zimě (o 1,8 °C). Za zmínku stojí zvýšení teplot v srpnu o téměř 3,9 °C. V jednotlivých gridových bodech ČR se oteplení může na jaře a v létě pohybovat od 2,3 °C po 3,2 °C, na podzim od 1,7 °C po 2,1 °C a v zimě od 1,5 °C po 2,0 °C. V období 2070–2099 oteplení v létě dosahuje 4 °C (na území ČR se mění od 3,5 do 4,7 °C), na podzim a v zimě činí „pouze“ 2,8 °C (v jednotlivých gridových bodech od 2,6 do 3,1 °C).

Pro období 2040–2069 je již charakteristický pokles srážek v zimě (např. Krkonoše, Českomoravská Vysočina, Beskydy až o 20 %) a zvýšení na podzim. V létě začíná na území ČR dominovat pokles srážek, který je v období 2070–2099 ještě výraznější, zatímco pokles zimních úhrnů srážek je oproti předchozímu období menší.

Změny relativní vlhkosti jsou malé, model ALADIN 25 dává ve všech sezónách a časových horizontech pokles relativní vlhkosti, v zimě do 5 %, v létě 5–10 %, na konci 21. století pak na některých místech až 15 % (část středních Čech, Vysočina), což je v souladu s přepokládaným zvýšením teploty vzduchu a snížením srážkových úhrnů. Řešitelům bylo doporučeno pro obě období pracovat s korigovanými daty, příp. použít tzv. delta postup, tj. aplikovat relativní změny mezi budoucím a referenčním obdobím na časové řady pozorování v referenčním období 1961–1990. V případě simulací globálního záření platí to, co bylo řečeno v předchozím odstavci. V obou obdobích jsou změny sezónních průměrů denních sum globálního záření největší v zimě (až o více než 10 %), v ostatních sezónách se na většině míst pohybují do 4 %. Pro práci s těmito soubory platí doporučení uvedené u relativní vlhkosti.

Model ALADIN 25, stejně jako RCM ENSEMBLES počítaly pouze se scénářem emisí SRES A1B, globální modely i se scénáři SRES B1 a A2. Projekt se proto pro období 2040–2069 a 2070–2099 zabýval i těmito scénáři. Výsledky pro scénáře SRES B1 a A2 jsou ve zprávě uvedeny.

Posouzení věrohodnosti regionálních scénářů klimatické změny

Schopnost modelu ALADIN 25 zachytit základní rysy klimatu ČR byla porovnána i s úspěšností dalších simulací RCM, především z projektu EU ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.metoffice.com>). S použitím vybraného typu skill skóre bylo vytvořeno pořadí regionálních modelů podle jejich úspěšnosti simulovat vybrané charakteristiky klimatu referenčního období. Model ALADIN 25 se v tomto pořadí u většiny hodnocených charakteristik umístil v první polovině skupiny vybraných RCM.

Nejistoty scénářových modelových simulací, provedených v rámci projektu, spočívají v zásadě ve třech zdrojích:

- nejistota emisního scénáře
- nejistota řídicího globálního modelu
- nejistota vnořeného regionálního modelu.

Simulace pomocí modelu ALADIN-CLIMATE/CZ byly prováděny pro scénář emisí SRES A1B, který je považovaný za jeden ze středních scénářů. V modelových výstupech se navíc rozdíly mezi scénáři pro období 2010–2039 a do značné míry i 2040–2069 příliš neprojevují, závislost na emisním scénáři je patrná až pro období 2070–2099, a to prakticky jen v teplotách (největší změny z posuzovaných scénářů pro A2, menší pro A1B a nejmenší pro B2). U změn srážek patrnější závislost na emisním scénáři není (posuzováno pomocí výstupů GCM).

Rozptyl změn mezi jednotlivými RCM, podobně jako mezi jednotlivými GCM, s časovým horizontem postupně roste. Většina nárůstu rozptylu se projevuje podobně jak u RCM, tak i u GCM (pro emisní

scénář A1B). Analýzy ukázaly, že GCM vnášejí do scénářů zpravidla větší nejistotu, než navazující RCM.

Ve srovnání s dalšími regionálními modely pro scénář A1B lze konstatovat, že model ALADIN 25 pro období 2010–2039 příliš nevybočuje z kontextu ostatních regionálních modelů, pouze v zimě indikuje, na rozdíl od většiny ostatních modelů, mírný pokles srážek. Pro období 2040–2069 a 2070–2099 se však zejména v zimním období odlišuje více od charakteristik ostatních modelů. Dává systematicky menší vzestup teplot, spíše pokles srážek a nárůst globálního záření, což nezapadá zcela do kontextu ostatních modelů. Příčinou může být velká simulovaná anticyklonalita v zimním období ve srovnání s ostatními regionálními modely. Z tohoto důvodu lze konstatovat, že scénáře modelu ALADIN 25 pro zimu vykazují větší nejistotu, než v ostatních ročních obdobích, zatímco pro ostatní roční období většinou dobře zapadají do kontextu ostatních RCM.

Dopady změny klimatu na hydrologickou bilanci a vodní zdroje a návrhy adaptačních opatření v sektoru vodního hospodářství

Klimatická změna může způsobit nebo přispět ke zvýšení potíží v obou extrémech hydrologického režimu, v obdobích hydrologického sucha i při výskytu povodní. Jedná se o situace, kdy nejsou splněny potřeby obyvatelstva, v případě sucha zejména na odběry vody a ředění vypouštěných odpadních vod, v případě povodní potřeby na ochranu obyvatelstva a všeho co využívají (v dosahu účinku povodně). Oba extrémy mohou poškozovat ekosystémy v plošném měřítku krajiny, zejména však ekosystémy přímo spojené s vodními toky. Podstatné je že, výskyt období s nedostatkem vody je očekáván s větší pravděpodobností, než zvětšení intenzity a četnosti příválových srážek, které jsou příčinou povodní.

Teplota je zásadní faktor ovlivňující hydrologickou bilanci, neboť s rostoucí teplotou roste potenciální evapotranspirace (a pokud je v povodí dostupná voda, tak i územní výpar). Dochází tedy k rychlejšímu úbytku vody z povodí. Pozorovaný růst teploty vede k růstu potenciální evapotranspirace v ročním průměru přibližně o 5–10 %, stejný růst lze konstatovat i pro jaro a léto. K nejméně výraznému růstu evapotranspirace dochází v zimě (až o více než 20 %), což je způsobeno větším počtem dní s kladnými teplotami vzduchu. Naopak na podzim k zásadním změnám potenciální evapotranspirace nedochází, neboť není pozorováno zvyšování teploty vzduchu.

Růst potenciální evapotranspirace je na velké části našeho území kompenzován růstem srážek. V roční bilanci činí tento nárůst až 10 %. V ročním chodu můžeme konstatovat výraznější nárůst u podzimních srážek (až 20 % – zejména v jižní části ČR). Výjimkou je oblast středních Čech, kde namísto zmiňovaného růstu srážek, dochází k jejich poklesu, na jaře až o 20 %. Z rozdílu změn srážek a potenciální evapotranspirace je zřejmé, že v roční bilanci dochází na velké části našeho území k účinné kompenzaci růstu potenciální evapotranspirace zvýšenými srážkami, nicméně ve střední části ČR se nacházejí povodí, pro která změny srážek nejsou schopny kompenzovat zvýšení potenciální evapotranspirace, takže hydrologická bilance je v těchto oblastech dlouhodobě pasivní.

Odhad dopadů změn klimatu na hydrologickou bilanci povodí ČR a jeho nejistoty

Pro účely projektu bylo provedeno rozsáhlé modelování dopadů změn klimatu na hydrologický režim pomocí hydrologického modelu BILAN na 250 povodích v ČR. Byla uvažována konzistentní sada patnácti simulací regionálních klimatických modelů, které mají srovnatelné horizontální rozlišení (cca 25 km x 25 km) a pokrývají stejný časový úsek (1961–2099). Regionální modely byly řízeny různými globálními klimatickými modely podle emisního scénáře SRES A1B. Posuzovány byly změny mezi obdobími 1961–1990 a 2010–2039, 2040–2069 a 2070–2099.

Základní podstata možných změn hydrologické bilance na našem území plyne z projekcí srážek a teploty pro Evropu, tj. postupného zvyšování teplot během celého roku a poklesu letních, růstu

zimních a stagnace ročních úhrnů srážek. Poloha ČR v oblasti přechodu mezi předpokládaným růstem srážek na severu a jejich poklesem na jihu Evropy přispívá k nejistotě odhadu změn roční bilance srážek, respektive odtoku a ostatních složek hydrologického cyklu. Nerovnoměrné rozložení projektovaných změn srážek během roku patří mezi jevy společné pro velkou řadu simulací klimatických modelů.

Princip změn hydrologické bilance lze shrnout následovně: V období od začátku podzimu do začátku léta dochází k růstu srážek, jenž je doprovázen řádově stejným růstem územního výparu způsobeným růstem teploty. V letním období srážkové úhrny klesají a v důsledku úbytku zásob vody v povodí nemůže docházet k výraznému zvyšování územního výparu. Důležitým faktorem ovlivňující změny odtoku je posun doby tání v důsledku vyšší teploty přibližně z dubna na leden až únor. Změny odtoku v období leden až květen jsou tedy dominantně určeny právě odlišnou dynamikou sněhové zásoby, změny v letním období zejména úbytkem srážek.

Průměrné změny odtoku z uvažované sady regionálních klimatických modelů pro jednotlivá roční období jsou konzistentní pro všechny posuzované časové horizonty (tj. 2010–2039, 2040–2069 a 2070–2099) – zpravidla můžeme konstatovat růst odtoků v zimním období a jejich pokles po zbytek roku a pro velkou část našeho území i v roční bilanci. K větším poklesům zpravidla dochází v jižní polovině našeho území. Mírně se vymyká nejbližší časový horizont 2010–2039, pro který se i v letním období a na podzim vyskytují povodí, na kterých odtoky stagnují, případně výjimečně dokonce rostou. V roční bilanci tak můžeme pro toto období očekávat stagnaci odtoků v severní a západní části našeho území a pokles (většinou do 10 %) v jižní a jihovýchodní části republiky. Pro časové horizonty 2040–2069 a 2070–2099 je možno jasně rozlišit období růstu odtoků v zimě (většinou 5–10 %, místy až 20 %) a poklesu v ostatních obdobích, nejvíce v létě (20–40 %), v roční bilanci zpravidla 5–20 %). Je evidentní, že zejména změny roční bilance odtoku jsou pro všechny časové horizonty na většině území relativně nejisté.

Možnosti adaptace na změnu klimatu ve vodním hospodářství

Adaptační opatření vedoucí k předcházení a zmenšení negativních dopadů změn klimatu jsou založena buď na zmenšování požadavků (na vodní zdroje, zábor půdy apod.) nebo zmenšování účinků (kompenzace nedostatku vodních zdrojů, protipovodňová opatření). Na evropské úrovni byla vypracována řada více či méně podrobných katalogizací možných adaptačních opatření. Nicméně ne všechna z možných adaptačních opatření jsou vhodná a aplikovatelná na území ČR. V rámci projektu byl proto vypracován přehled zásadních adaptačních opatření, jež je možno v našich podmínkách uvažovat. Jsou to zejména:

- a) opatření v krajině – organizační (podpora plošné rozmanitosti v rámci komplexních pozemkových úprav, podpora zalesnění a zatravnění, omezení plodin, pod nimiž se vytváří nepropustná kůra, např. kukuřice), agrotechnická (osevní postupy podporující infiltraci atp.), biotechnická (průlehy, zasakovací pásy atd.);
- b) opatření na tocích a v nivě – revitalizace toků (úpravy řečišť zpomalující odtok vody a zlepšující komunikaci s přípovrchovou zvodní), uvolnění nivy pro rozlivy;
- c) opatření v urbanizovaných územích – zvýšení infiltrace dešťové vody (retenční a vsakovací objekty), jímání a využívání srážkových vod;
- d) obnova starých či zřízení nových vodních nádrží;
- e) zefektivnění hospodaření s vodními zdroji – převody vody mezi povodími a vodárenskými soustavami, zpětné převody vody uvnitř povodí, dočasné využití statických zásob podzemní vody, umělé infiltrace, vícenásobné využití vody, zhodnocení a přerozdělení kapacit vodních zdrojů;
- f) zmenšení spotřeby vody – minimalizace ztrát ve vodárenských soustavách, racionalizace stanovení minimálních průtoků, stanovení priorit pro kritické situace nedostatku vody; a
- g) dokonalejší čištění odpadních vod.

Význam opatření v krajině spočívá zejména ve zlepšení vodního režimu krajiny a snížení povodňového odtoku z přívalových povodní a s tím spojených negativních jevů (např. eroze). Na druhou stranu, lepší uplatnění vody v krajině vede ke zvětšení územní evapotranspirace, takže na odtok ze srážek v období sucha zůstane vody méně. Pro zvětšení průtoků a zásob podzemní vody v období hydrologického sucha nemají reálně proveditelná opatření v krajině (zejména vzhledem k rozloze pozemků, na nichž je možno tato opatření realizovat) znatelný význam. Podobně i opatření na toku a v nivě mají vliv zejména na snížení odtoků za povodní, jejich význam pro zlepšení hydrologických podmínek v období sucha je marginální.

Velký potenciál z hlediska opatření vedoucích ke zmírnění dopadů hydrologického sucha mají zejména vodohospodářská opatření různých typů a to jak opatření již známá a využívaná (využití vodních nádrží, převodů vody), tak opatření, jejichž efekt je sice slibný, nicméně doposud nebyl komplexně kvantifikován (recyklace průtoků, řízené vícenásobné využití vody). Z hlediska snížení odtoku z urbanizovaných území nelze pominout potenciál jímání a následného užití dešťových vod. Prostředky racionalizace využívání a ochrany vodních zdrojů je nutné spatřovat i v legislativních opatřeních a snižování požadavků na odběr vody.

Každé z vybraných adaptačních opatření je aplikovatelné a má dostatečnou účinnost za jiných podmínek. Mezi zásadní omezení účinnosti/realizovatelnosti adaptačních opatření patří zejména problémy s řešením majetkových vztahů, omezení přírodními podmínkami (např. srážko-odtokovými poměry, ale i hydrogeologií apod.), nevhodná morfologie koryta a velikost plochy, na které je možno realizovat adaptační opatření. Vodítkem k výběru může být rámcové posouzení účinnosti a limitů jednotlivých opatření, které jsou v závěrečné zprávě podrobně popsány. Další zobecnění naráží na jedinečnost každého řešení. Stejně tak není možné obecně kvantifikovat finanční náročnost jednotlivých opatření či jejich kombinace a je nutné každý jednotlivý návrh adaptačních opatření posuzovat samostatně.

Hypoteticky by bylo možné na základě regionální diverzifikace předpokládaných dopadů změn klimatu identifikovat vhodná adaptační opatření pro dané oblasti. V klasické analýze rizika je riziko součinem pravděpodobnosti negativního jevu (např. povodní, hydrologického sucha) a zranitelnosti. Z hlediska projekcí klimatických modelů nelze regionálně vymezit oblasti s větší pravděpodobností zvýšení intenzity či četnosti extrémních srážek ani přívalových povodní.

V případě hydrologického sucha je situace obdobná, nicméně simulace klimatických modelů naznačují, že poklesy odtoků budou vyšší a pravděpodobnější v jižní části republiky, spíše v Čechách než na Moravě. Pokud bude pokračovat dosavadní trend oteplování a stagnace srážek ve středních Čechách, lze v této oblasti v nejbližším období očekávat prohlubování a rozšiřování problémů s nedostatkem vody. Na druhé straně, hydrologické sucho je jev plošný a v případě velkého sucha bude pravděpodobně zasažena významná část republiky. Rizika jsou tedy i pro budoucí období podstatnou měrou určena zranitelností jednotlivých povodí spíše než zvyšováním pravděpodobnosti negativních jevů. (Nicméně se jak v případě povodní, tak zejména v případě hydrologického sucha do budoucna zvyšují). S tím souvisí i výběr adaptačních opatření.

Posouzení věrohodnosti odhadů dopadů klimatické změny na vodní hospodářství

Obecně je možno věrohodnost jednotlivé projekce klimatického modelu hodnotit ze dvou různých hledisek: (i) dle schopnosti simulovat kontrolní klima a (ii) dle odchylky projekcí daného klimatického modelu od projekcí ostatních klimatických modelů pro budoucí klima. Odchylky srážek a teploty mezi simulacemi klimatických modelů a pozorovanými daty nejsou zanedbatelné – v uvažované sadě modelů se průměrná chyba v teplotě pohybuje pro jednotlivá roční období v rozmezí 0–1 °C, přičemž v případě jednotlivých modelů může být v rozmezí -2 – +5 °C. Srážky jsou v klimatických modelech typicky nadhodnoceny (mimo letní období). V zimě dosahuje chyba až 50 %, nejmenší rozdíly jsou v případě letních srážek. Z uvedeného je zřejmé, že nekorigované simulace nejsou pro hydrologické

modelování přímo použitelné a využívají se proto různé formy tzv. post-processingu (např. korekce systematických chyb nebo přírůstková (delta) metoda.

Rozpětí projekcí mezi jednotlivými simulacemi klimatických modelů je značné a vede k výrazné nejistotě závěrů navazujících na hydrologické modelování dopadů změn klimatu. Při použití výstupů klimatických modelů pro hydrologické modelování se k těmto nejistotám přidávají další – zejména nejistoty spojené s volbou metody pro převedení výstupu klimatického modelu do měřítka jednotlivých povodí (downscaling), metodikou tvorby scénářů změn klimatu a strukturou hydrologického modelu a jeho parametry. Ukazuje se, že nejistota související s volbou klimatického modelu značně převyšuje nejistotu spojenou s volbou emisního scénáře nebo nejistotu vyplývající z hydrologického modelování. V měřítku jednotlivých povodí můžeme zpravidla konstatovat, že pokles odtoků v období od dubna do října je společný valné většině modelů a míra i pravděpodobnost tohoto poklesu se směrem do budoucna zvyšuje. Růst odtoku v zimních měsících je nejistý pro všechny časové horizonty. S tím souvisí i nejistota spojená se změnami roční bilance odtoků.

Možnosti rámcového odhadu nákladů adaptačních opatření

Obecný odhad nákladů adaptačních opatření ve vodním hospodářství (byť rámcový) je značně složitý a zpravidla každý problém vyžaduje specifickou studii řešící konkrétní podmínky v dané lokalitě s přihlédnutím k primárnímu účelu posuzovaných adaptačních opatření. Obecně, z hlediska přímých nákladů, lze za nejefektivnější považovat opatření vedoucí k optimalizaci hospodaření s vodními zdroji, jelikož tato opatření nemusí vyžadovat enormní investice. Nicméně zjednodušeně lze konstatovat, že náklady na opatření jsou do jisté míry přinejmenším řádově úměrné účinnosti opatření a jeho rozsahu, tzn. mezi nejnákladnější (a zároveň neúčinnější) opatření patří budování nových vodních nádrží a jiné rozsáhlé vodohospodářské infrastruktury. Proto je nezbytné vždy jasně definovat účel a priority adaptačních opatření a na jejich základě zvažovat jejich potenciál a finanční únosnost.

V závěrečné zprávě jsou uvedeny dva příklady rámcových návrhů adaptačních opatření, včetně představ o možných nákladech na různé varianty adaptačních opatření pro povodí již v současnosti negativně ovlivněna změnou klimatu – povodí Rakovnického potoka a povodí Horní Srpiny.

Dopady změny klimatu na extrémní hydrologické jevy

Zvýšený výskyt povodní a zvýšení míry povodňového rizika, stejně jako zvýšení frekvence minimálních průtoků, jsou často předpokládané důsledky očekávaných klimatických změn. Zejména v případě povodní však dosavadní studie nebyly schopny poskytnout jednoznačný a metodicky správně odvozený závěr, zda se v oblasti střední Evropy míra povodňového rizika a povodňový režim změní.

Cílem projektu bylo modelovat možné dopady změněných a modely predikovaných klimatických podmínek na změnu povodňového režimu, stejně jako stanovit vliv předpokládané klimatické změny na minimální průtoky. Za tímto účelem byly analyzovány nejen simulované řady odtoku ve změněných podmínkách, ale byly statisticky hodnoceny i dlouhodobé pozorované řady s cílem identifikovat, zda se dosavadní nárůst teploty vzduchu v průběhu druhé poloviny 20. století projevil v měřených datech. Posledním cílem byla analýza současné experimentální základny v Jizerských horách a její uzpůsobení pro měření prvků hydrologického cyklu s cílem identifikovat projevy změn klimatu.

Trendy vybraných charakteristik průtoků

Pro 150 vodoměrných stanic byly zpracovány trendy vybraných charakteristik průtoků (průměrných a minimálních průtoků) za období 1961–2005. Analyzovány byly pozorované řady denních průměrných průtoků především ve stanicích, které nejsou průtokově významně ovlivněny provozem vodních

nádrží. Hodnoceny přitom byly různé charakteristiky minimálních průtoků – byly vyhodnoceny M-denní průtoky stanovené z řad denních průměrných průtoků (běžný přístup používaný v ČR) a navíc i z řad denních průtoků vyrovnaných klouzavými průměry za 7 dní (přístup používaný v některých evropských zemích). K podrobnější analýze trendů minimálních průtoků byly vybrány průtoky Q_{330d} , Q_{355d} a Q_{364d} , jejichž hodnoty, vypočítané oběma přístupy, byly vzájemně porovnány. Dále bylo pro vybrané profily provedeno i hodnocení velikosti a délky trvání nedostatkových objemů pod hranicí Q_{330} . Hodnoceny byly trendy z pohledu celého roku i jednotlivých kalendářních měsíců. Výsledky ukázaly, že i když v průměrném ročním odtoku nedochází k výrazným změnám, určité změny jsou pozorovány u průměrných měsíčních průtoků, statisticky významný rostoucí trend vykazují leden, únor a březen a naopak měsíce květen a červen vykazují statisticky významný trend klesající. V případě charakteristik minimálních průtoků a nedostatkových objemů však byly významné trendy identifikovány jen výjimečně.

Simulace průtokových charakteristik pro hodnocená období

Simulace budoucích průtokových řad (pro povodí Orlice, Výrovky, Jizery, horní Vltavy, Otavy, Smědé a Bečvy, tři časová období 2010–2039, 2040–2069 a 2070–2099 a emisní scénáře IPCC SRES A1B, A2 a B1¹) byly založeny na vybraných klimatických scénářích nejlépe hodnocených klimatických modelů (MIROC3_2_M; MPI_ECHAM5; UKMO_HADCM3; ALADIN-CLIMATE/CZ²) a také střed ansámblu osmi nejúspěšnějších hodnocených GCM modelů (dále označován jako MED). Modelování hydrologické odezvy na řídicí klimatické proměnné bylo řešeno za použití hydrologického modelovacího systému AquaLog. Pro potřeby simulací byly upraveny parametry jednotlivých modelů s cílem, nejen dosáhnout dobré shody simulovaného a pozorovaného odtoku v kalibračním a verifikačním období 2000–2008, ale rovněž co nejdříve vystihnout hydrologickou bilanci včetně míry evapotranspirace.

Následně byly provedeny simulace ve výpočetním kroku 6 hodin a 1 den o délce 1 000 let. Přitom plošný rozpočet byl realizován upravenou metodikou Schaake shuffle na základě náhodného výběru historických analogů, tedy situací s podobným celkovým srážkovým úhrnem. Pro účely podrobnějšího hydrologického modelování pak bylo přistoupeno rovněž k náhodnému rozdělení srážek do 6h intervalů na základě výběru historických analogů, nebo dříve odvozeného třístupňového náhodného generátoru.

Simulované 1000leté řady průměrných denních průtoků byly použity pro analýzu minimálních průtoků z čáry překročení M-denních průtoků (Q_a , Q_{330d} , Q_{355d} a Q_{364d}) a minimálních sedmidenních průtoků a spolu se simulací v 6hodinovém kroku pro analýzu změn empirických křivek dob opakování povodňových průtoků.

Využití výsledků modelových simulací

Z analýzy výsledků modelových simulací je patrné, že charakteristiky řad namodelovaných průměrných i minimálních průtoků mají výrazný rozptyl a tedy nejistotu. Přesto je patrný převažující signál směrem k poklesům (výjimkou jsou scénáře založené na MIROC3_2_M, které předpokládají navýšování srážek v letním období a tím i minimálních průtoků). Pro nejbližší časové období 2010–2039 vycházejí relativně malé odchylky průtoků Q_a , Q_{330d} , Q_{355d} a Q_{364d} , a to do -5%. Ve druhém časovém období 2040–2069 dosahují průtoky výraznějších poklesů. Průměrná hodnota poklesu průtoků Q_a je cca -5%, pro průtok Q_{355d} cca -13%. Pro nejvzdálenější časové období 2070–2099 jsou zjištěny ještě výraznější poklesy průtoků. Průměrná hodnota poklesu průtoků Q_a je cca -13%, pro průtok Q_{355d} činí cca -23%. Porovnáme-li mezi sebou chování průměrných hodnot relativních odchylek minimálních průtoků Q_{330d} , Q_{355d} a Q_{364d} , zjistíme, že ve většině stanic dochází ve sledovaných obdobích k nejvýraznějším poklesům směrem k minimálnímu průtoků Q_{364d} .

¹ podrobnosti viz <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>

² případné podrobnosti o hodnocených modelech jsou uvedeny v závěrečné zprávě projektu

U hodnocení minimálních sedmidenních průtoků (průměrů i 100-letých sedmidenních minim $Q_{100\min7d}$) oproti referenčnímu období se ze všech hodnocených stanic a variant modelů v nejbližším časovém horizontu průměry téměř neliší (+0,2 %) a $Q_{100\min7d}$ klesají o 2 %, v druhém horizontu průměr klesá o 7,9 % a $Q_{100\min7d}$ o 11,0 %, v nejvzdálenějším horizontu průměr klesá o 15,5 % a $Q_{100\min7d}$ o 18,2 %. U hodnocení minimálních průtoků z čáry překročení M-denních průtoků a minimálních sedmidenních průtoků vycházejí v průměru ze všech hodnocených stanic a variant modelů poklesy průtoků, které jsou výraznější ve vzdálenějších časových horizontech.

Výsledky ukazují, že předpokládaná reakce povodňového režimu na změněné klimatické podmínky se výrazně liší v závislosti na použitém řídicím klimatickém scénáři. Zatímco scénáře založené na modelu MPI_ECHAM5 všeobecně pro všechny zkoumané časové periody udávaly zmenšení velikosti povodňových průtoků, scénáře vycházející z modelu MIROC3_2_M odhadovaly naopak většinou významné zvýšení rizika povodní. Přitom se zdá, že zásadní vliv na simulovaný povodňový režim, zejména v oblasti delších dob opakování průtoků, má předpokládané množství srážek v letním období.

Simulace pro referenční období 1961–1990 je blízka středu rozptylu ansámblu všech provedených simulací. Nelze proto identifikovat jednoznačný trend, avšak většina simulací, zejména scénář A1B, ukazuje spíše pokles velikosti povodní pro vzdálenější časové horizonty, zatímco pro nejbližší simulované období (do roku 2039) jsou získané signály nejednoznačné a objevují se ve vyhodnocených profilech jak nárůsty, tak také poklesy velikosti povodní. Pouze u emisního scénáře A2 převládá nárůst směrem k pozdějšímu období. Simulované rozdíly jsou vůči referenčnímu scénáři většinou relativně malé, průměrná změna dosahuje do +/-5 %. Nejednoznačnost trendu jde na vrub antagonistickému působení vlivu srážek (méně časté, ale extrémnější) a menšího průměrného počátečního nasycení půdy (v důsledku vyšší potenciální evapotranspirace a delšího období výskytu suchých epizod v letním půlroce).

Věrohodnost odhadů dopadů klimatické změny na extrémní hydrologické jevy

Vzhledem k výsledkům řešení pro nejbližší časový horizont (2010–2039), kdy poklesy průtoků v porovnání s referenčním obdobím vycházejí relativně malé, nenavrhujeme při poskytování dlouhodobých průměrných a M-denních průtoků zvláštní opatření. Zatím je dostačujícím opatřením, že ČHMÚ bude poskytovat v blízké budoucnosti (od roku 2013) tyto průtoky za nové referenční období (1981–2010), které lépe charakterizuje současný hydrologický režim, než dosud používané období 1931–1980.

Protože nebyl prokázán jednoznačný a robustní trend změn ve velikosti povodní v budoucím období 21. století, lze se domnívat, že případný dopad klimatických změn na povodňový režim ve střední Evropě nebude znamenat zásadní změny ve velikosti návrhových průtoků. Z hlediska adaptačních opatření proto může být pravděpodobným vhodným opatřením například při odvození návrhových průtoků se započtením možného vlivu klimatických změn snížení spolehlivosti daných údajů (spíše než jejich změna).

Experimentální povodí

Během celého období řešení projektu probíhal terénní monitoring hydrometeorologických veličin v experimentálních povodích ČHMÚ se zvláštním důrazem na měření výšky a vodní hodnoty sněhové pokrývky. Jedná se o exp. povodí Uhlířská (povodí Lužické Nisy), Blatný potok, Kristiánov, Jezdecká, Jizerka (povodí Jizery), Bílá a Černá Smědá (povodí Smědé). Pro povodí Smědé byl následně proveden výpočet hydrologické bilance modelem BILAN pro referenční období 1986–2008 a byly zjišťovány trendy v modelovaných prvcích hydrologické bilance.

Modelována byla rovněž očekávaná změna hydrologické bilance na základě simulovaných klimatických scénářů z RCM ALADIN-CLIMATE/CZ a středu ansámblu 20ti RCM (PRUDENCE) pro cílová období 2010–2039 a 2070–2099. Dosažené výsledky odpovídaly všeobecným předpokladům nárůstu

evapotranspirace, nárůstu odtoku v zimním období spolu s úbytkem sněhové pokrývky a naopak poklesu průměrného odtoku v letním období.

Dopady změny klimatu a návrhy adaptačních opatření v sektoru zemědělství

Výnosy zemědělských plodin jsou významně limitovány přírodními podmínkami. Počasí v interakci s půdními a agrotechnickými faktory je hlavní příčinou meziročníkové variability jejich výše. Mimořádné jsou vlivy extrémních jevů, u teplot se jedná převážně o výskyt minimálních teplot vzduchu, zvláště holomrazů, u srážek jde o výskyty sucha, velké škody působí též povodně. Tento vliv "ročníku" se projevuje u jednotlivých zemědělských plodin a jejich odrůd odlišně a je dále modifikován fytopatologickými vlivy. Definovat a interpretovat vliv jednotlivých meteorologických prvků na výnosy v provozních podmínkách je mimořádně obtížné. Nejde jen o přímý vliv podnebí na plodiny, ale také o ovlivnění dalších podmínek, např. výskytu chorob a škůdců, uplatnění ekologicky zaměřených technologií apod. Dokladem je vysoká proměnlivost výnosů zemědělských plodin v posledních letech. Je však nutné zdůraznit, že souběžně roste výnosový potenciál nových odrůd, zlepšování efektivnosti hnojení, ochranou rostlin a uplatnění látek regulační povahy, významné jsou též změny technologie zpracování půdy a setí.

Dopady změny klimatu na agroklimatologické podmínky

Zvýšení průměrné roční teploty vzduchu mezi referenčním (1961–1990) a scénářovými obdobími 2010–2039, 2010–2069 a 2070–2099 činí postupně 1,2 °C, 2,3 °C a 3,3 °C. Obdobný trend s výraznějším nárůstem průměrných teplot vzduchu byl prokázán pro vegetační období (zvýšení o 1,1 °C, 2,6 °C a 3,8 °C).

Zvyšování teploty vzduchu způsobí prodloužení vegetačního období. Předpokládá se, že délka velkého vegetačního období v celé ČR bude v letech 2070–2099 o 41 dní delší než v období 1961–1990. V období 2010–2039 (nadmořské výšky 300–400 m) bude délka vegetačního období 234 dní, v období 2040–2069 246 dní. Predikované úhrny srážek uváděné pro jednotlivá průřezová období vykazují vyšší variabilitu, počet dnů bezesrážkového období bude narůstat.

Dopady změn teploty

Vyšší teplota vzduchu i půdy přináší celý komplex vlivů na agroklimatologické podmínky. Průběh teplot určuje vývoj plodin a tím i načasování většiny agrotechnických operací. Nárůst teploty přináší jak nové možnosti, tak rizika pro určité skupiny plodin. Vyšší teploty vyvolávají rychlejší vývoj plodin, který též ovlivní organizace práce (např. například výsev řepky je limitován včasnou sklizní předplodiny). Současně se vyskytují i určitá rizika, např. kratší doba růstu, předčasný vývoj ozimů na podzim s vyšším rizikem chorob (viróz), nedostatečné otužení ozimů a poškození epizodami vpádu studeného vzduchu v zimě a na jaře. Za významné lze rovněž považovat možné problémy s fertilitou pylu, vlivy vysokých teplot na vývoj semen či odlišnou dynamiku vývoje chorob, škůdců a plevelů. Predikované zvýšení variability teplot je pro zemědělství jednoznačně nepříznivý jev, kterému bude nutné přizpůsobit agrotechniku, plánování a organizaci práce v zemědělských podnicích. Operativní řízení na základě místních podmínek, podmínek ročníku a prognózy počasí musí být více flexibilní, s technickou rezervou pro zvládnutí agrotechnických operací v krátkém období. Předností bude rozšíření nových druhů teplomilných plodin, zelenin a ovocných dřevin, zlepšené podmínky pro celoroční pastvu.

V zimním období se bude zmenšovat hloubka promrzaní od 20 cm v referenčním období 1961–1990 po 15 cm v polovině 21. století a v posledním období 2070–2099 by se dokonce termoizopleta 0 °C v nejteplejších oblastech ani neměla vyskytovat. S vyšší teplotou dojde k posunutí začátku velkého vegetačního období z 31. března až na 1. března a ke změně konce hlavního vegetačního období 30.

října až na 10. listopadu. Délka vegetačních období a jejich geografické rozložení je ukazatelem pro delimitaci plodin a různých zemědělských aktivit na území ČR. Rajonizace plodin, odrůd a agrotechniky (např. systémů zpracování půdy) vychází z výrobních oblastí a klimatických regionů, a bude ji třeba častěji aktualizovat. Z délky vegetační doby, spolu s dalšími ukazateli, lze určit, které druhy teplotně náročnějších plodin bude u nás možné výhledově pěstovat. Delší vegetační doba naznačuje možnost pěstování dvou kultur za rok, ale tento potenciál bude zásadně limitován množstvím dostupné vody.

Dopady změn vláhových poměrů

V podstatě jediným zdrojem vody pro zemědělství jsou srážky. Jejich množství by v blízké budoucnosti mělo být mírně vyšší, ve vzdálenější budoucnosti zhruba srovnatelné s množstvím srážek v referenčním období. V mnohem větší míře než u teploty vzduchu můžeme u srážek vidět v budoucnosti větší variabilitu srážkových úhrnů, tedy nárůst bezsrážkových období.

Vláhové podmínky zemědělských půd budou odpovídat rozdílu mezi srážkami a evapotranspirací. Použitý scénář klimatické změny poukazuje na skutečnost, že v budoucích obdobích bude docházet k úbytku vody v půdě a tím ke snižování její vlhkosti. Deficit vody v půdě se bude stávat kritickým zvláště v době vrcholícího léta. Rovněž v době začínajícího podzimu, tedy v době osevu ozimými odrůdami zemědělských plodin, by měla být půda v budoucnosti výrazněji sušší než v období referenčním. Zřetelně zhoršující se podmínky pro pěstování zemědělských plodin lze očekávat ve druhé polovině našeho století.

V nižších vertikálních pásmech se podmínky pro zemědělskou produkci s ohledem na sucho obecně zhorší. Pozitivem bude dřívější nástup vegetačního období zvýšením teplot, kdy bude převažovat i příznivý obsah vody v půdě. V době vrcholného léta však podmínky pro pěstování většiny zemědělských plodin budou značně nepříznivé.

Věrohodnost odhadů dopadů klimatické změny na zemědělství

Vývoj produkce zemědělských plodin nezávisí jen na klimatických podmínkách, ale na vývoji dalších faktorů, jako je výskyt chorob a škůdců nebo rezistentních plevelů, dále na výsledcích šlechtění a vývoji technologických postupů, objevech v oblasti fyziologie rostlin. Jednoznačně jistým poznatkem stávajících studií je skutečnost, že klesá rozmanitost pěstovaných zemědělských plodin, snižuje se obsah organických látek v půdě a narůstá její eroze.

Z hlediska mechanismu vlivu různých meteorologických faktorů na růst a tvorbu výnosu generuje nejistoty odhadu nejen predikce průměrných a sumárních hodnot, ale i jejich extrémů, variabilita a rozdělení v průběhu roku nebo vzhledem ke kritickým obdobím u jednotlivých plodin. S ohledem na přímé i nepřímé vlivy meteorologických faktorů na plodiny lze mít za to, že nejistoty dalšího vývoje odpovídají nejistotám v predikci budoucího klimatu. Vysoce pravděpodobný je nedostatek vody v krajině, tzn. i v půdě. S využitím „principu aktuálnosti“ bude se výskyt sucha v závěru století vyskytovat takřka každý druhý rok. V tomto pohledu je jednoznačně nutné věnovat veškerá opatření ke zvýšené retenční kapacitě krajiny.

Možnosti adaptace na změnu klimatu v zemědělství

Z dosavadních poznatků o předpokládaném vývoji klimatické změny a o jejích dopadech na zemědělství lze uvést následující návrhy na směřování adaptačních opatření:

- úprava zemědělské činnosti;
- využívání agrotechnických opatření;
- udržení úrodnosti půdy;
- změna pěstebních postupů;
- optimalizace závlahových systémů a stanovení závlahových dávek;

- ochrana před zvýšeným tlakem infekčních chorob a škůdců.

Podrobněji jsou jednotlivé směry popsány v závěrečné zprávě.

Možnosti rámcového odhadu nákladů adaptačních opatření

Adaptační opatření vyžadují finanční prostředky, které tvoří jednak jejich příprava, ale hlavně realizace v praxi. V mnoha případech je obtížné prokázat, že náklady na jejich zavedení budou prokazatelně navráceny snížením výše škod, vyvolaných negativními dopady změny klimatu. Protože pro dané ekonomické vyhodnocení je nutné mít podklady o finančních nákladech před jejich zaváděním, lze v současné době jen velmi obtížně realisticky vyčíslit jejich ekonomický přínos.

Určitým pokusem může být příklad zavedení agrometeorologických modelů předpovědi výskytu škůdců následně včasné používání postřikové techniky. Orientační kalkulace, i reakce zemědělských podniků naznačují, že návratnost využívání agrometeorologických modelů je dosti vysoká.

Analogicky je možné provést rámcový odhad například pro náklady na hnojení, zvláště pro pozdní kvalitativní dávky, které jsou při výskytu letního sucha, zcela neúčinné. Typickým příkladem nákladů je adaptace cestou změny systémů zpracování půdy, které vyžaduje značné prostředky na výzkum změn v půdě, plevelů a půdních organismů, a současně náklady v zemědělských podnicích na mechanizaci, modifikaci technologie hnojení apod.

Dopady změny klimatu a návrhy adaptačních opatření v sektoru lesního hospodářství

Výstupy části zaměřené na sektor lesního hospodářství poskytují komplexní metodický postup pro odhad současných i budoucích environmentálních rizik narušení stávajících lesních ekosystémů s převahou smrku. Současně poskytují odhad jejich dalšího pravděpodobného vývoje, zhodnocení změn v hodnotě služeb lesních ekosystémů v důsledku jejich narušení a návrh strukturovaných adaptačních opatření pro zvyšování adaptačního potenciálu lesů, včetně odhadu jejich finanční náročnosti. Použité metody jsou aplikovatelné na různá prostorová měřítka, od celé republiky, přes jednotlivé přírodní lesní oblasti (dále jen „PLO“) až po jednotlivé lesní revíry, případně až po porostní jednotky, konkrétně až po porostní skupinu. Postupy řešení jsou dokumentovány dílčími výsledky v různých prostorových měřících, které jsou z větší části shrnuty a podrobně uvedeny textu a v přílohách závěrečné zprávy.

Odhad environmentálních rizik narušení vývoje stávajících lesních ekosystémů

Při provádění odhadu environmentálních rizik narušení vývoje stávajících lesních ekosystémů s převahou smrku pro vybraný scénář vývoje klimatu včetně odhadu jejich dalšího pravděpodobného vývoje byl kladen hlavní důraz na odhad vývoje klimatických stresových faktorů do konce tohoto století. Byly spočteny prostorové průměry základních klimatických charakteristik (průměrná denní teplota, denní úhrn srážek, průměrná denní rychlost větru, vlhkost vzduchu a sluneční záření) pro všechny lesní vegetační stupně (dále jen „LVS“) vyskytující se v jednotlivých PLO a pro menší modelové oblasti (pro území LS Jablunkov a horní část povodí Stropnice). Dále byl zjišťován výskyt tří klimatických extrémů – počet dní s denním úhrnem srážek menším než 1 mm, které se ve vegetačním období vyskytly v obdobích delších než 10 dnů za sebou, počet dnů ve vegetačním období, kdy byla průměrná denní teplota vyšší než 30°C a počet teplotních zvrátů v předjaří (období, kdy se v zimních měsících vyskytla alespoň 5 dnů po sobě průměrná denní teplota vyšší než 5°C a pak opět klesla pod bod mrazu).

Provedené analýzy ukazují na výrazné snížení rozlohy s vhodnými podmínkami pro růst smrku ztepilého v období 2010–2039 na 67,2 % současné plochy, v období 2040–2069 na téměř polovinu a

v období 2070–2099 již jen na třetinu. To se projeví ve zhoršeném zdravotním stavu porostů s převahou smrku ztepilého v těchto oblastech.

Zhodnocení současného stavu porostů a odhad jeho dalšího pravděpodobného vývoje

Tato část zprávy je zaměřena na hodnocení dřevin zejména z hlediska adaptačního potenciálu porostů, rizika houbových patogenů a hmyzích konzumentů, apod. Synergické působení extrémních klimatických výkyvů, dlouhodobé přirozené acidifikace půdy a antropogenních vlivů, především imisní zátěže a hospodářských zásahů má za následek snižování vitality lesních porostů. Naprosto zásadní význam mají v procesu chřadnutí smrku abiotické, případně iniciační stresory. K nejvýznamnějším abiotickým stresorům náleží sucho, především v předjaří a jarních měsících. Letní přísušky se uplatňují jako významný predispoziční faktor pro vznik kořenových hnilob. Významným rizikem je u smrku kombinace abiotických stresorů, kterými jsou letní přísušky a vysoká teplota v kombinaci s vysokou vzdušnou vlhkostí, které mohou jako mortalitní stresor zapříčinit přehřátí pletiv. Klimatické extrémní v zimě jsou pro smrk rizikové především narušením dormance relativně teplým obdobím a náhlým poklesem teplot pod bod mrazu. Biotické faktory se uplatňují především jako iniciační stresory (např. savý a listožravý hmyz). V kombinaci s působením abiotických predispozičních stresorů mohou působit jako mortalitní stresory. V případě lýkožrouta smrkového a větru poskytují polomy vhodné podmínky pro nastartování jeho gradací a ohrožení okolních porostů.

Výsledky analýzy LVS pro celé území ČR dokladují, že v období 2010–2039 by nemělo dojít k posunu LVS, naopak hodnoty stresových faktorů jsou někdy překvapivě nižší než v období 1991–2009. V obdobích 2040–2069 a 2070–2099 lze na základě provedené analýzy naopak přepokládat posun LVS zpravidla o dva LVS k nižším LVS.

Návrh strukturovaných adaptačních opatření

Dopady klimatické změny na lesní ekosystémy jsou a budou regionálně velmi proměnné, proto adaptační opatření musí být výsledkem dlouhodobého plánování na úrovni jednotlivých lesních oblastí. Rozhodnutí o uskutečnění či neuskutečnění opatření musí být učiněno u konkrétního porostu určité kvality a podle lokální predikce možného ohrožení. Přímé či nepřímé vlivy možných změn klimatu na dalšího vývoje lesních ekosystémů byly v posledním desetiletí již několikrát široce diskutovány a následně byly formulovány obecné návrhy adaptačních opatření v lesním hospodářství.

Obecně nejdůležitějším opatřením je zvyšování adaptačního potenciálu lesů druhovou, genovou a věkovou diverzifikací porostů. Dalším zásadním adaptačním opatřením je převod holosečného způsobu hospodaření na podrostní za účelem pěstování bohatě strukturovaných lesů. Těžba zde bude dražší, obnovní náklady nižší, celková produkce však vyšší. Tento způsob hospodaření by měl být volen i v případě hospodaření v lesích za účelem zachytu vzdušného uhlíku (pěstování Kyoto porostů), významně se tím zvýší množství i doba jeho zachytu. Nejrazantnějším opatřením je vynucená přeměna druhové skladby porostů, a to těch, které neodolají klimatické změně na příslušných stanovištích. Jedná se zejména o předčasné smýcení porostů jehličnanů, zvláště smrku, a náhradu těchto porostů směsí dřevin o vyšší stabilitě, tedy s podílem zpevňujících a melioračních dřevin ve smrkových porostech vyšším jak 50 %.

Vlastní adaptační opatření spočívají ve dvou souběžně probíhajících krocích. První z kroků má výrazně preventivní charakter – okamžitě začít měnit cílové druhové porostní skladby v jednotlivých hospodářských souborech, resp. zastoupených skupin lesních typů. Do začátku období 2070–2099 zbývá polovina obmýti; nabízí se zde tedy časový prostor na změnu klimatických podmínek relativně včas zareagovat. Druhým krokem jsou opatření asanačního charakteru v jednotlivých hospodářských souborech, resp. lesních vegetačních stupních a struktuře porostních typů. Smrkové porosty jsou v rizikových lesních vegetačních stupních ohroženy již v současné době, a proto se v následném období 2010–2039 již nekompromisně navrhuje jejich postupná včasná asanace. Tím by měla být výrazně omezena plocha monokultur, které jsou nejvíce rizikové na klimatickou změnu a její průvodní jevy.

Přílohy závěrečné zprávy obsahují rovněž návrh rámcových směrnic hospodaření (včetně podrobného návrhu cílové druhové porostní skladby), zpracovaný pro smrkové porostní typy a jejich segmenty v nejčastěji se vyskytujících typech vývoje lesa, stejně jako podrobnou metodiku navrhování adaptačních opatření a konkrétní opatření pro pět nejčastěji se vyskytujících typu vývoje lesa v přírodní lesní oblasti PLO 14 Novohradské hory.

Vývoj základních klimatických indikátorů v období 1961–2010

Teplota vzduchu a srážkové úhrny jsou dvě základní klimatologické charakteristiky, které patří k nejvýznamnějším indikátorům vývoje regionálního klimatu a jeho změn. Vývoj uvedených základních indikátorů na území ČR v posledních padesáti letech byl vyhodnocen zejména na základě analýzy řad tzv. územních teplot a srážkových úhrnů, které představují jejich charakteristické hodnoty, beroucí v úvahu výsledky měření z celé staniční sítě ČR (teplota je redukována na střední nadmořskou výšku). Pro odhady proměnlivosti indikátorů a jejich změn byly použity řady denních teplotních, resp. srážkových hodnot z 30 stanic na území ČR z období 1961–2010.

Doplňkovou informaci poskytují informace, získané zpracováním řady měření průměrných měsíčních a ročních teplot vzduchu a srážkových úhrnů na stanici Praha-Klementinum, která má k dispozici nejdelší řady pozorování v ČR (v případě teploty od roku 1775, v případě srážek od roku 1805) a jedny z nejdelších řad v Evropě a lze jich s jistým omezením využít i pro rámcový popis dlouhodobého vývoje klimatu na území ČR.

Teplotní režim

- průměrná roční teplota vykazuje dlouhodobě vzestupný trend, který se v posledních několika desetiletích zvyšuje;
- průměrné roční územní teploty podléhaly v posledním padesátiletí výrazným meziročním změnám, nicméně vykazují trend postupného nárůstu (necelé 0,3°C/10 let); výrazněji se teplota zvyšuje v létě (0,4°C/10 let), pomaleji na podzim (méně než 0,1°C/10 let);
- v posledních dvou desetiletích se průměrná roční teplota oproti standardnímu období (1961–1990) zvýšila o 0,8°C, větší změny byly zaznamenány v letních měsících, menší na podzim; v letních měsících se teplota zvyšuje nepatrně rychleji na území Moravy, v zimě a na jaře na území Čech, nicméně rozdíly jsou minimální;
- v souladu s postupným nárůstem teplot a se zvyšující se teplotní extremitou v posledních dvou desetiletích, se zvyšuje průměrný počet dní s vysokými teplotami (letní a tropické dny, tropické noci a dny s TMA $\geq 35^{\circ}\text{C}$) a snižuje průměrný počet dní s nízkými teplotami (mrazové, ledové a arktické dny); rozdíly mezi Čechami a Moravou nejsou výrazné;
- časová variabilita průměrných denních teplot vykazuje zřetelný roční chod (vyšší v zimě a nižší v létě) a zvyšuje se v chladné polovině, resp. snižuje v teplé polovině roku; rozdíly ve změnách na územích Čech a Moravy nejsou výrazné;
- prostorová proměnlivost časové variability průměrných denních teplot i jejích změn se během roku výrazně nemění.

Srážkový režim

- průměrné roční srážkové úhrny vykazují v posledním padesátiletí velmi výraznou meziroční proměnlivost (rok 2002 byl srážkově nejbohatší, následný rok 2003 srážkově nejchudší) s velmi mírně vzrůstajícím trendem;
- v posledních dvou desetiletích se průměrný roční srážkový úhrn oproti standardnímu období (1961–1990) zvýšil přibližně o 5 %;

- hlavní rysy ročního chodu srážek zůstávají zachovány (maximum v létě, minimum v zimě), dochází však k redistribuci měsíčních srážkových úhrnů během roku (pokles od dubna do června, nárůst od července do září); rozdíly mezi Čechami a Moravou nejsou výrazné;
- teplé období roku je k výraznějším změnám srážkového režimu zřetelněji „náchylnější“ než období chladné a k výraznějším změnám v obou směrech dochází zejména na přelomech mezi létem a podzimem, resp. zimou a jarem; území Moravy obecně vykazuje větší sklon k změnám ve prospěch vyšších srážkových úhrnů než území Čech;
- počet dní se sněhovou pokrývkou 1 cm a více je meziročně značně proměnlivý jak v nižších, tak i vyšších polohách, nicméně v posledním padesátiletí jejich počet zejména v souvislosti s nárůstem průměrné teploty klesá;
- časová variabilita průměrných denních srážkových úhrnů vykazuje ještě výraznější roční chod než variabilita průměrných denních teplot (vyšší v létě, nižší v zimě); obecně je vyšší na území Moravy;
- v posledních dvou desetiletích se časová variabilita průměrných denních srážkových úhrnů v teplé polovině roku zvyšuje, v chladné polovině roku snižuje; režim změn je výrazně zřetelnější na území Čech, zatímco na území Moravy jsou změny vyrovnanější;
- prostorová proměnlivost časové variability srážek je v porovnání s teplotou výrazně vyšší, což je hlavní příčinou statisticky nevýznamných rozdílů ve výskytech průměrných počtů dnů s nadlimitními denními srážkovými úhrny na jednotlivých stanicích; významnější rozdíly v prostorové proměnlivosti mezi územím Čech a Moravy nelze vysledovat.

Závěr

Oponenty závěrečné zprávy byli Prof. Ing. Pavel Kovář, DrSc. z katedry biotechnických úprav krajiny Fakulty životního prostředí v Praze, který se hodnocené tématice dlouhodobě věnuje a RNDr. Pavel Šťastný, CSc. ze Slovenského hydrometeorologického ústavu v Bratislavě, který byl v letech 2010–2011 jedním z hlavních řešitelů obdobného projektu „Dôsledky klimatickej zmeny a možné adaptačné opatrenia v jednotlivých sektoroch“ pro Ministerstvo životního prostředí SR.

Oba oponenti závěrečnou zprávu hodnotili velmi kladně a konstatovali, že je na vysoké evropské úrovni, použitá grafika má solidní vypovídající schopnost a argumentace v textu je logická a návazná. Rovněž ocenili, že nejistoty scénářových modelových simulací, jako základu pro návazné sektorové využití, jsou řešiteli jasně deklarovány, stejně jako uvítali, věcná doporučení pro další práci se scénářovými daty po ukončení projektu.

Za velmi zdařilý příspěvek oponenti pokládají i návaznou prezentaci materiálu „Technické shrnutí výsledků projektu 2007–2011“, obsahujícího veškeré přínosy a inovace pětiletého řešení dopadů klimatické změny v sektorech vodního hospodářství, zemědělství a lesnictví a návrhy adaptačních opatření, stejně jako její přílohu, dokumentující vývoj základních klimatických indikátorů v období 1961–2010.

Podle jejich názorů řešitelský tým stanovené cíle naplnil a předložil vysoce odbornou a z hlediska metodiky a použitých scénářů velmi konsistentní studii, která prezentuje vědecký přínos, nedává sice jednoduché odpovědi na zadané otázky, ale snaží se je představit v nejistém světle dalšího vývoje klimatického systému, chování lidské společnosti a složitých reakcí živé přírody. Oponenti vyslovili názor, že výstupy mohou cílovým skupinám, a zejména Ministerstvu životního prostředí, sloužit jako podkladový materiál při rozhodovacích činnostech vedoucích k adaptačním aktivitám, včetně přípravy národní adaptační strategie.

Jedním z původních záměrů projektu byl i pokus o posouzení finanční náročnosti adaptačních opatření při jejich zavádění. Tento původní záměr by v průběhu řešení modifikován na pokusy o jisté pilotní testy ekonomických úvah. Důvodem pro neúplné plnění původního záměru projektu v části

byla zejména nerealistická očekávání v době přípravy projektu. Řešitelé původně předpokládali, že ve smyslu dokumentu COM(2007) 354 final *"Adapting to climate change in Europe – options for EU action"* dojde v průběhu řešení projektu v rámci EU či v rámci Evropské agentury pro životní prostředí (EEA) k vypracování sjednocených metodik pro hodnocení věcné i nákladové účinnosti adaptačních opatření. Ukazuje se, že s ohledem na výrazné regionální rozdíly v projevech a dopadech klimatické změny v nejvýznamnějších postižených sektorech je zatím velmi obtížné jakákoliv ekonomická hodnocení zobecňovat. Proto se členské státy EEA zatím zaměřují převážně pouze na pilotní analýzy účinnosti adaptačních opatření a projekt DG CLIMA *Clearing House Mechanism*, který by měl umožňovat výměnu informací mezi jednotlivými členskými státy EEA, byl pro svou pilotní fázi přislíben až na rok 2012.

Z poznatků o současném stavu a pravděpodobném dalším vývoji klimatické změny v našich regionálních podmínkách vyplývá, že hlavní problémy, které klimatická změna v budoucnu zřejmě přinese, budou spjaté s nárůstem extremity jednotlivých povětrnostních jevů a jejich přímých důsledků. Jejich důsledky budou zřetelně významnější, než důsledky „prostého zvýšení průměrné teploty“.

Návrhy a implementace adaptačních opatření by měly tuto skutečnost respektovat a právě na tyto důsledky by měly být primárně zaměřeny. Jelikož dlouhodobý vývoj výskytu extrémních projevů počasí je časově značně nespojitý parametr, je velmi obtížné cokoliv s tím souvisejícího zcela rigorózně modelovat a predikovat, natož pak ekonomicky vyhodnocovat a případně i generalizovat (a to i za hypotetických podmínek zcela stabilního makroekonomického vývoje).