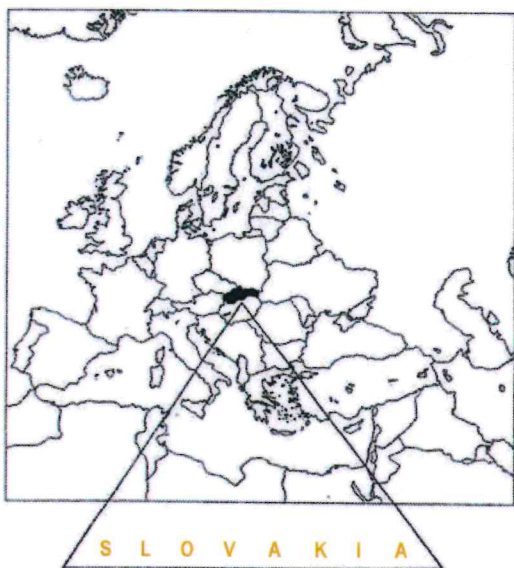




# NKP 12/08

## DÔSLEDKY KLIMATICKEJ ZMENY A ADAPTAČNÉ OPATRENIA CLIMATE CHANGE IMPACTS AND ADAPTATION MEASURES

- Úvod k scenárom extrémnych poveternostných situácií a vybrané výsledky spracovania  
(Introduction to Scenarios of Extreme Weather Events and Selected Results of Elaboration)
- Obdobia s nedostatkom atmosférických zrážok na Slovensku  
(Precipitation deficit periods in Slovakia)
- Zhodnotenie vývoja minimálnych prietokov na území Slovenska  
(The Evaluation of the Development of Minimal Runoff in Slovakia)
- Zmeny hydrologického režimu slovenských tokov a základné adaptačné opatrenia na zmenu klímy vo vodnom hospodárstve  
(Changes in Hydrologic Regime of Slovak Rivers and Basic Adaptation Measures to Reduce Climate Change Impacts on Water Management)
- Simulácia zvyšovania teploty vody Dunaja v stanici Bratislava v dôsledku zvyšovania teploty atmosféry  
(Simulation of Temperature Increase in the Danube River at Bratislava as a Response to the Projected Rise in Air Temperature)
- Dôsledky klimatickej zmeny na podmienky rastlinnej výroby na Slovensku  
(The Impacts of Climate Change on Plant Production Conditions in Slovakia)
- Dôsledky klimatickej zmeny na úrody poľných plodín na Podunajskej nížine  
(Climate Change Impacts on Crop Yields on Danubian Lowland)
- Výskyt suchých a vlhkých období vo vegetačných stupňoch západných Karpát na Slovensku: analýza časového radu 1951-2005 a prognóza očakávaných zmien klímy  
(Occurrence of Dry and Wet Periods in Altitudinal Vegetation Stages of West Carpathians in Slovakia: Time-Series Analysis 1951-2005 and Prognosis of Expected Climatic Changes)
- Modelovanie produkcie lesa pod vplyvom klimatických zmien pomocou modelu SIBYLA  
(Modelling of Forest Production at Climate Change by Growth Model SIBYLA)

*NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM  
SLOVENSKEJ REPUBLIKY*

---

*NATIONAL CLIMATE PROGRAM  
OF THE SLOVAK REPUBLIC*

# **NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM SLOVENSKEJ REPUBLIKY**

**Zväzok 12**

Editori: Milan Lapin, Pavol Nejedlík

Editors: Milan Lapin, Pavol Nejedlík

**BRATISLAVA 2008**



© MINISTERSTVO ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA SR  
SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

---

SLOVAK MINISTRY OF THE ENVIRONMENT  
SLOVAK HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE

**2008**

## OBSAH

ŠŤASTNÝ, P.

|                                                                                                                                                |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| ÚVOD K PROBLEMATIKE DÔSLEDKOV KLIMATICKEJ ZMENY A ADAPTAČNÝCH<br>OPATRENÍ. AKTIVITY EEA – JRC – WHO O DÔSLEDKOCH KLIMATICKEJ ZMENY<br>V EURÓPE | 5 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

LAPIN, M. - DAMBORSKÁ, I. - DRINKA, R. - FAŠKO, P. - GAÁL, L. - MELO, M.

|                                                                                                                     |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| ÚVOD K SCENÁROM EXTRÉMNYCH POVETERNOSTNÝCH SITUÁCIÍ<br>A VYBRANÉ VÝSLEDKY SPRACOVANIA (lektorovala: O. Majerčáková) | 9 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

PECHO, J. – FAŠKO, P. – DRINKA, R. – KAJABA, P. – ŠŤASTNÝ, P.

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| OBDOBIA S NEDOSTATKOM ATMOSFÉRICKÝCH ZRÁŽOK<br>NA SLOVENSKU (lektoroval: J. Tomlain) | 31 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|

ŠKODA, P. - MAJERČÁKOVÁ, O. - DEMETEROVÁ, B. – DANÁČOVÁ, Z.

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ZHODNOTENIE VÝVOJA MINIMÁLNYCH PRIETOKOV<br>NA ÚZEMÍ SLOVENSKA (lektoroval: P. Miklánek) | 49 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|

HLAVČOVÁ, K. - SZOLGAY, J. - HALMOVÁ, D. - PARAJKA, J. – KOHNOVÁ, S.

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ZMENY HYDROLOGICKÉHO REŽIMU SLOVENSKÝCH TOKOV<br>A ZÁKLADNÉ ADAPTAČNÉ OPATRENIA NA ZMENU KLÍMY<br>VO VODNOM HOSPODÁRSTVE (lektoroval: M. Lapin) | 61 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

PEKÁROVÁ, P. – ONDERKA, M. – ŠKODA, P. – PEKÁR, J.

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| SIMULÁCIA ZVYŠOVANIA TEPLoty VODY DUNAJA V STANICI<br>BRATISLAVA V DÔSLEDKU ZVYŠOVANIA TEPLoty ATMOSFÉRY<br>(lektoroval: M. Lapin) | 87 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

ŠIŠKA, B.

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| DÔSLEDKY KLIMATICKEJ ZMENY NA PODMIENKY RASTLINNEJ<br>VÝROBY NA SLOVENSKU (lektoroval: P. Nejedlík) | 103 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

TAKÁČ, J. – ŠIŠKA, B.

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| DÔSLEDKY KLIMATICKEJ ZMENY NA ÚRODY POLNÝCH PLODÍN<br>NA PODUNAJSKEJ NÍŽINE (lektoroval: J. Nekovář) | 113 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

ŠKVARENINA, J. - TOMLAIN, J. - HRVOL, J. - ŠKVARENINOVÁ, J. – HLAVATÁ, H.

|                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| VÝSKYT SUCHÝCH A VLHKÝCH OBDOBÍ VO VEGETAČNÝCH STUPŇOCH<br>ZÁPADNÝCH KARPÁT NA SLOVENSKU: ANALÝZA ČASOVÉHO RADU 1951-2005<br>A PROGNOZA OČAKÁVANÝCH ZMIEN KLÍMY (lektoroval: M. Tesar) | 123 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

FABRIKA, M.

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| MODELOVANIE PRODUKCIE LESA POD VPLYVOM KLIMATICKÝCH<br>ZMIEN POMOCO U MODELU SIBYLA (lektoroval: J. ŠKVARENINA) | 143 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

# CONTENTS

*English Abstracts and Summaries are at the end of Papers*

---

ŠŤASTNÝ, P.

PLANNED 2008 EEA – JRC – WHO REPORT ON IMPACTS OF CLIMATE  
CHANGE IN EUROPE

5

LAPIN, M – DAMBORSKÁ, I. – DRINKA, R. – FAŠKO, P. – GAÁL, L. – MELO, M.

INTRODUCTION TO SCENARIOS OF EXTREME WEATHER EVENTS  
AND SELECTED RESULTS OF ELABORATION (Reviewed by: O. Majerčáková)

9

PECHO, J. – FAŠKO, P. – DRINKA, R. – KAJABA, P. – ŠŤASTNÝ, P.

PRECIPITATION DEFICIT PERIODS IN SLOVAKIA (Reviewed by: J. Tomlain)

31

ŠKODA, P. – MAJERČÁKOVÁ, O. – DEMETEROVÁ, B. – DANÁČOVÁ, Z.

THE EVALUATION OF THE DEVELOPMENT OF MINIMAL  
RUNOFF IN SLOVAKIA (Reviewed by: P. Miklánek)

49

HLAVČOVÁ, K. – SZOLGAY, J. – HALMOVÁ, D. – PARAJKA, J. – KOHNOVÁ, S.

CHANGES IN HYDROLOGIC REGIME OF SLOVAK RIVERS AND BASIC  
ADAPTATION MEASURES TO REDUCE CLIMATE CHANGE IMPACTS  
ON WATER MANAGEMENT (Reviewed by: M. Lapin)

61

PEKÁROVÁ, P. – ONDERKA M. – ŠKODA, P. – PEKÁR, J.

SIMULATION OF TEMPERATURE INCREASE IN THE DANUBE RIVER AT BRATISLAVA  
AS A RESPONSE TO THE PROJECTED RISE IN AIR TEMPERATURE  
(Reviewed by: M. Lapin)

87

ŠIŠKA, B.

THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON PLANT PRODUCTION  
CONDITIONS IN SLOVAKIA (Reviewed by: P. Nejedlík)

103

TAKÁČ, J. – ŠIŠKA, B.

CLIMATE CHANGE IMPACTS ON CROP YIELDS ON DANUBIAN LOWLAND  
(Reviewed by: J. Nekovář)

113

ŠKVARENINA, J. – TOMLAIN, J. – HRVOL, J. – ŠKVARENINOVÁ, J. – HLAVATÁ, H.

OCCURRENCE OF DRY AND WET PERIODS IN ALTITUDINAL VEGETATION  
STAGES OF WEST CARPATHIANS IN SLOVAKIA: TIME-SERIES ANALYSIS  
1951-2005 AND PROGNOSIS OF EXPECTED CLIMATIC CHANGES  
(Reviewed by: M. TESÁŘ)

123

FABRIKA, M.

MODELLING OF FOREST PRODUCTION AT CLIMATE CHANGE BY GROWTH  
MODEL SIBYLA (Reviewed by: J. ŠKVARENINA)

143



# ÚVOD K PROBLEMATIKE DÔSLEDKOV KLIMATICKEJ ZMENY A ADAPTAČNÝCH OPATRENÍ AKTIVITY EEA – JRC – WHO O DÔSLEDKOCH KLIMATICKEJ ZMENY V EURÓPE

Pavel Šťastný, European Environment Agency, Copenhagen, [pavel.stastny@eea.europa.eu](mailto:pavel.stastny@eea.europa.eu)

**Abstrakt:** Európska environmentálna agentúra (EEA), Ústav pre životné prostredie a trvalo udržateľný rozvoj Spoločného výskumného centra (JRC-IES) Európskej komisie a Svetová zdravotnícka organizácia (WHO) pripravujú spoločnú správu o dopadoch klimatickej zmeny v Európe. Je založená na hodnotení indikátorov dopadu klimatickej zmeny. Správa má byť vydaná v septembri 2008. EEA pri jej zostavení tiež úzko spolupracuje s niekoľkými zo svojich Európskych tematických centier (ETCs). Táto správa je v poradí druhou správou o dopadoch klimatickej zmeny v Európe, prvá vyšla v roku 2004 (EEA 2004).

Správa je určená politikom na európskej a národnej úrovni a pre informovanú verejnosť. Jej hlavným cieľom je predstaviť minulosť a predpokladanú budúcu klimatickú zmenu a jej dopady na základe indikátorov a určiť najzraniteľnejšie sektory a oblasti s vysokou potrebou adaptačných opatrení. Medzi ďalšie ciele patrí zvýšenie uvedomenia potreby adaptácií, ako aj opatrení pre zmiernenie škôd na globálnej a európskej úrovni. Správa tiež zdôrazňuje potrebu monitorovania a zhromažďovania údajov a zároveň znižovania stupňa neurčitosti informácií a projekcií.

## Úvod

Činnosť v problematike dopadov klimatickej zmeny na pôde EEA nie je nová. Začala sa už v roku 2001, kedy bol v EEA a v Európskom tematickom centre o klimatickej zmene a atmosfére (ETC-ACC) zostavený počiatočný zoznam indikátorov dopadov klimatickej zmeny. Tento prešiel pripomienkovým konaním, pozostávajúcim z hodnotenia splnenia kritérií pre zaradenie indikátorov a dotazníkovej akcie, v ktorej sa k nemu vyjadrovali príslušné národné ohniskové body z jednotlivých krajín EU. Podľa zoznamu bol vytvorený technický dokument – zoznam indikátorov dopadov klimatickej zmeny, obsahujúci popis jednotlivých indikátorov. Tieto obsahovali definíciu indikátora, jeho charakteristiku, zdroje údajov, vhodné scenáre a súvisiace riešené projekty. Tieto indikátory, spolu 22, boli použité pri tvorbe Správy EEA č. 2/2004 o dopadoch klimatickej zmeny v Európe. Indikátory boli rozdelené do 8 kategórií, zahŕňajúce atmosféru a klímu, kryosféru a hydrosféru, vodné a suchozemské ekosystémy, zdravie a ekonomické sektory. Správa obsahovala aj analýzu adaptačných opatrení.

## Prípravné práce pre vydanie tohoročnej správy

Po publikovaní správy v roku 2004 bolo na EEA prijaté rozhodnutie o tom, že tieto správy budú pripravované cyklicky a najbližšia má vyjsť v roku 2008. K tomuto zámeru boli postupne vytvorené podmienky. V roku 2006 bol navrhnutý inovovaný zoznam indikátorov, ktorý prešiel opäť pripomienkovým konaním a jeho výsledkom bol zoznam 43 indikátorov, s podobnou identifikáciou ako v predošlom zozname, s aktualizáciou údajových základní, zdrojov informácií a riešených projektov.

Indikátory boli vybrané podľa viacerých kritérií. Medzi ne patrili napr. politická závažnosť, merateľný vývoj indikátora, metodologická a vedecká podloženosť (príčinné vzťahy s klimatickou zmenou, odlíšiteľnosť od prirodzeného kolísania klímy), dostupnosť dlhých historických radov, pokiaľ možno pokrývajúcich Európu a prehľadnosť (ľahká zrozumiteľnosť). Zároveň bol v pláne práce EEA v roku 2006 zaradený samostatný projekt venovaný uvedenej správe o dopadoch klimatickej zmeny v Európe. Tento zabezpečil jeho finančné, personálne a organizačné zabezpečenie. Podobne sa aktivizovala činnosť na partnerských inštitúciách JRC, WHO a ETC-ACC. Vytvoril sa riadiaci výbor projektu, zložený zo zástupcov riešiteľských organizácií. Ďalej bola zostavená poradná skupina pre

tento projekt. Je zložená z popredných odborníkov, venujúcich sa problematike klimatickej zmeny a zároveň pokrývajúcimi problematiku jednotlivých odborných oblastí správy. Sú to zástupcovia z odborných a vedeckých inštitúcií, z nezávislých organizácií a tiež z orgánov Európskej komisie. Mnohí z nich sú uznávaní experti, ktorí pracovali napr. v jednotlivých pracovných skupinách IPCC pri zostavovaní jej štvrtej hodnotiacej správy.

## Obsah a štruktúra správy

Plánovaná správa o dopadoch klimatickej zmeny v Európe sa skladá z úvodných kapitol, ktoré približujú podstatu fungovania klimatického systému Zeme za spolupôsobenia antropogénnych vplyvov. Tieto state stručne popisujú zložité mechanizmy zosilňovačov (zoslabovačov) klimatickej zmeny a spätných väzieb v klimatickom systéme. Zaoberajú sa tiež použitím rôznych scenárov a projekcií klimatickej zmeny a problematikou zahrnutia a vyjadrenia neistôt v správe. Začlenená je aj kapitola o údajoch, ich monitorovaní a použití v správe. Celkový obsah správy má nasledovné členenie:

1. Úvod a hlavné správy (main messages)
2. Klimatická zmena
3. Dopady klimatickej zmeny v minulosti
4. Očakávané dopady klimatickej zmeny v budúcnosti
5. Hodnotenie klimatickej zmeny na základe indikátorov
6. Adaptáčne opatrenia
7. Problematika monitorovania, údajov a neistoty

Najdôležitejšia a zároveň najobsažnejšia časť správy je kapitola 5 (Hodnotenie dopadov klimatickej zmeny na základe indikátorov). Spomenutých 43 indikátorov bolo rozdelených do deviatich kategórií, zahrňujúcich fyzikálne, biologické a ďalšie oblasti, najviac ovplyvnené ľudskou činnosťou. Každéj kategórii patrí jedna podkapitola z kapitoly 5. Zoznam kategórií je nasledujúci:

- Atmosféra a klíma
- Kryosféra
- Morské ekosystémy
- Suchozemské ekosystémy a biodiverzita
- Poľnohospodárstvo a lesníctvo
- Kvantita vody, povodne, sucho
- Kvalita vody a ekológia sladkej vody
- Ľudské zdravie
- Ekonomické sektory

V piatej kapitole je, oproti správe z roku 2004, celkom nová kategória zaoberajúca sa kvalitou vody. Význačne sú tiež rozšírené kategórie venujúce sa poľnohospodárstvu, kvantite vody a ekonomickým sektorom. Táto kapitola má ambície ukázať najnovšie výsledky výskumu o dopadoch klimatickej zmeny v Európe a to práve prostredníctvom spomínaných indikátorov dopadov klimatickej zmeny.

Každá stať, zaoberajúca sa jednotlivým indikátorom, má predpísanú štruktúru. Na začiatku sú uvedené kľúčové správy z hodnotenia daného indikátora, pozostávajúce z výstižných krátkych informácií o trendoch v minulom období, projekciách v budúcnosti, s prípadným vyjadrením geografických rozdielov a tiež hodnotením neistoty v stanovení trendov. Tieto správy sú vlastne zhrnutím zistení, predstavených v nasledujúcej textovej časti. V samotnom texte prvá krátka časť predstavuje indikátor, za ním nasledujú časti o minulom trende indikátora a o jeho projekciách v budúcnosti.

Správa zvýrazní najcitlivejšie oblasti a sektory, ktoré vyžadujú najvyššiu potrebu adaptácií. Správa má zvýšiť uvedomenie potreby adaptačných opatrení v globálnom i európskom meradle a opatrení pre zmiernenie následkov klimatickej zmeny. Bude sa zaoberať aj potrebou integrovaného kvalitného monitorovania a zlepšenia nástrojov skúmania klimatickej zmeny, najmä modelov.



## Organizácia projektu

Organizáciu projektu má na starosti spojený riadiaci výbor projektu. Zodpovednosť za jednotlivé skupiny indikátorov sú rozdelené medzi EEA, JRC a WHO. Do práce sú zapojení aj odborníci ďalších ETC, pre vodu a biodiverzitu. V praxi sa o tvorbu jednotlivých kategórií (v publikácii podkapitolu) stará jej koordinátor. Každý indikátor má svojho vedúceho autora. Koordinátor si môže vytvoriť autorský tím na dosiahnutie čo najlepšieho výsledku. V prípade potreby vykonáva porady so svojim autorským kolektívom, zabezpečuje konzultácie a externý prehľad. V jednotlivých fázach projektu sa robí jeho redakcia, spočiatku po jednotlivých indikátoroch, neskôr kategórií a v konečnej fáze písania správy už ako celku. Dôraz je kladený na celkovú konzistenciu správy, použitie aktuálnych údajov, porovnateľných scenárov, ako aj na odstránenie prekrývajúcich sa statí. Dbá sa na vzájomnú previazanosť a zrozumiteľnosť textu. Ďalšia práca, pozostávajúca z jazykovej korekcie, grafickej úpravy a prípravy na tlač sa robí v réžii EEA.

Zdroje údajov a informácií pre projekt sú rôzne. Veľa sa čerpá z najčerstvejšej správy IPCC, ale aj ďalších správ o klimatickej zmene, napr. v Arktíde (ACIA report 2004), v kryosfére (UNEP GEO4 report 2007), či v oceánoch (JRC Marine climate change impacts report 2006). Ďalšie zdroje sú z rôznych národných správ o klimatickej zmene a tiež európskych a národných projektov.

## Časový postup riešenia projektu

Samotná práca na správe začala v prvej polovici januára 2007, dvoma na seba nadväzujúcimi poradami riadiaceho výboru projektu a poradnej skupiny projektu. Tu sa odsúhlasili obsah a štruktúra správy a tiež sa pripomienkovali indikátory dopadov klimatickej zmeny. Zároveň boli rozdelené povinnosti medzi jednotlivé riešiteľské organizácie a bol odsúhlasený časový harmonogram riešenia. Riešenie projektu je rozložené na dobu 21 mesiacov. V januári 2007 sa rozbehli ďalšie prípravné práce, vytvorením príručiek pre písanie správy a konečným odsúhlasením indikátorov, po pripomienkovaní jednotlivými národnými ohniskovými bodmi. V apríli sa uskutočnila prvá schôdza autorského kolektívu, kde boli prezentované základné požiadavky na tvorbu správy, na prezentáciu indikátorov a organizáciu práce. Boli určení koordinátori za jednotlivé kategórie a bol odsúhlasený časový harmonogram na najbližšie obdobie. Pre vyhotovenie prvého konceptu hlavnej, piatej kapitoly správy: Hodnotenie klimatickej zmeny na základe indikátorov, bol stanovený termín 15. 6. 2007. V lete bolo vykonané vnútorné posúdenie konceptu kapitoly a návrhy na jej vylepšenie, resp. doplnenie boli zaslané autorom. Na ich základe vypracovali druhý koncept kapitoly 5, ktorý bol predstavený na druhej schôdži autorského kolektívu v polovici septembra. Na tejto schôdži boli prezentované jednotlivé kapitoly, ujasnené pravidlá pre výber časových radov, vyjadrenie neurčitostí a autori jednotlivých kapitol osúhlasovali znenie textu. Na základe výsledkov porady bol vypracovaný tretí koncept kapitoly 5, ktorý bol zaslaný na posúdenie poradnej skupine. Táto svoje zistenia tlmočila na 2. schôdži poradnej skupiny, konanej koncom októbra, za účasti riadiaceho výboru projektu a koordinátorov jednotlivých indikátorových kategórií.

Harmonogram práce na rok 2008 je nasledovný:

21. január: Vyhotovenie prvého konceptu úplnej správy

Január - február: Interná revízia správy, odstránenie nedostatkov, modifikácia jednotlivých kapitol

Marec: Dokončenie druhého konceptu úplnej správy

Marec – apríl: Pripomienkovanie správy národnými ohniskovými bodmi, vedeckou radou EEA, orgánmi Európskej komisie

16. apríl: Tretia schôdza poradnej skupiny

Máj – jún: Zahŕnutie pripomienok, úprava správy

30. jún: Konečná verzia správy

Júl - august: Záverečná odborná a jazyková kontrola, príprava pre tlač

September: Tlač a publikácia správy

30. september: Vydanie správy

Druhý rok riešenia projektu je náročnejší so záväzným termínom 30. jún pre vyhotovenie konečnej verzie správy a 30. september pre jej vydanie. Tvorba správy a jej dostupnosť je preto organizovaná tak, že koordinátori za jednotlivé kapitoly ich vkladajú do vyhradeného priestoru na webovskej

stránke EEA (tzv. CIRCA). Tu sú tiež umiestnené všetky dokumenty, týkajúce sa správy. Návod a inštrukcie pre autorov patria medzi tie odborné, ale sú tu aj zápisy a pracovné materiály a zápisy z autorských porád a schôdzí poradnej skupiny. Práce na samotnej publikácii sa začínajú už 1. apríla, prípravou grafov a máp. Všetky musia zodpovedať vzorom EEA a musia mať zodpovedajúce náležitosti, týkajúce sa metadát a autorských práv. Posledné prípravy správy pred tlačou sú sústredené v prázdninovom období. Pre ich zabezpečenie sa musia vytvoriť dobré organizačné podmienky, napríklad dostupnosť autorov pri korekciách a nevyhnutných zmenách.

## **Záver**

Spoločná správa EEA, JRC a WHO, vychádzajúca v roku 2008, má za cieľ priniesť komplexné a čo najčerstvejšie informácie o dopadoch klimatickej zmeny v Európe. Indikátory predstavené v správe budú tiež aktualizované na webovej stránke EEA.

## **LITERATÚRA**

EEA: Impacts of Europe's changing climate, EEA Report No 2/2004 ([http://reports.eea.europa.eu/climate\\_report\\_2\\_2004/en](http://reports.eea.europa.eu/climate_report_2_2004/en)).

## **PLANNED 2008 EEA-JRC-WHO REPORT ON IMPACTS OF CLIMATE CHANGE IN EUROPE**

**Pavel Šťastný, European Environment Agency, Copenhagen, [pavel.stastny@eea.europa.eu](mailto:pavel.stastny@eea.europa.eu)**

**Abstract:** The European Environment Agency (EEA), the Commission's Joint Research Centre (JRC-IES) and the World Health Organisation (WHO) are preparing an indicator report on climate change impacts in Europe to be published in September 2008. The EEA is also cooperating closely with several of its European Topic Centres (ETCs). This report is the second indicator report on climate change impacts in Europe (the 1st was issued in 2004).

This report is focused on policymakers at EU and national level and the informed public. The main aims of the report are to present past and projected climate change and impacts through indicators and to identify sectors and regions most vulnerable with a high need for adaptation. Furthermore it aims to increase awareness of the need for both adaptation and global and EU mitigation and to highlight the need for enhanced monitoring, data collection and dissemination, and reduce uncertainties.



# ÚVOD K SCENÁROM EXTRÉMNYCH POVETERNOSTNÝCH SITUÁCIÍ A VYBRANÉ VÝSLEDKY SPRACOVANIA

<sup>(1)</sup>Lapin, M., <sup>(1)</sup>Damborská, I., <sup>(1)</sup>Drinka, R., <sup>(3)</sup>Faško, P., <sup>(2)</sup>Gaál, L. a <sup>(1)</sup>Melo, M.

<sup>(1)</sup>Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského, Bratislava

[lapin@fmph.uniba.sk](mailto:lapin@fmph.uniba.sk), [damborska@fmph.uniba.sk](mailto:damborska@fmph.uniba.sk), [drinka@fmph.uniba.sk](mailto:drinka@fmph.uniba.sk), [melo@fmph.uniba.sk](mailto:melo@fmph.uniba.sk)

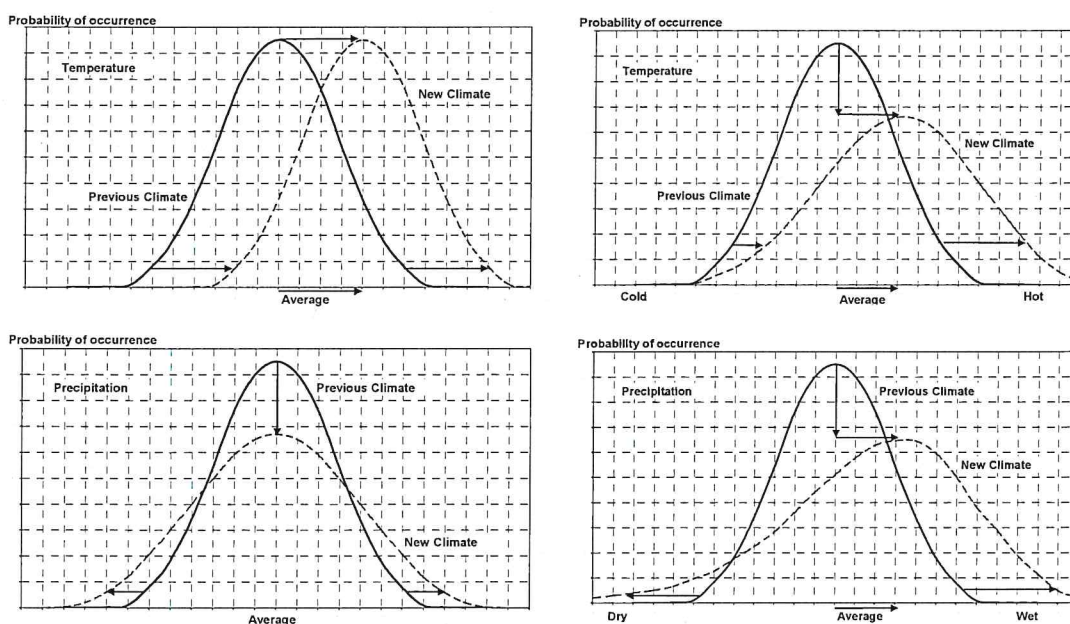
<sup>(2)</sup>Stavebná fakulta Slovenskej technickej univerzity, Bratislava, [ladislav.gaal@svf.stuba.sk](mailto:ladislav.gaal@svf.stuba.sk)

<sup>(3)</sup>Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, [pavol.fasko@shmu.sk](mailto:pavol.fasko@shmu.sk)

**Abstrakt:** Scenáre klimatickej zmeny, ako odchýlky dlhodobých priemerov od nejakého referenčného normálu z minulosti, sa postupne nahrádzajú časovými radmi simulujúcimi priemery, variabilitu, trend, extrémny a mimoriadne udalosti. V žiadnom z týchto scenárov ale nejde o prognózu počasia pre konkrétne dni a mesiace. V tomto príspevku prezentujeme diskusiu o extrémnych prípadoch počasia a o vybraných metódach testovania vstupných údajov na prípravu scenárov zmien klímy, vrátane extrémov počasia do konca 21. storočia. Väčšina výstupov cirkulačných modelov predpokladá na Slovensku rast priemerov teploty vzduchu o 2 až 4 °C, pokles úhrnov zrážok na juhu a rast na zvyšku Slovenska. Očakávajú sa aj závažné zmeny v režime úhrnov a výskytu zrážok. Pomerne veľkou neznámou sú možné zmeny variability klimatických prvkov, vrátane výskytu extrémov a extrémnych udalostí spojených s počasím. Tento príspevok je iba úvodom do problematiky scenárov extrémov.

## 1. ÚVOD

V minulosti sa problém klimatickej zmeny chápal predovšetkým ako zmena dlhodobých priemerov teploty vzduchu a úhrnov zrážok. V IPCC (2001) sa po prvýkrát viedla rozsiahlejšia diskusia o možných zmenách distribučných kriviek údajov jednotlivých klimatických prvkov (zmeny hustoty pravdepodobnosti údajov v časových radoch z rôznych období). Na obr. 1 sú uvedené základné možnosti posunu distribučných kriviek, pričom môže dôjsť významnej zmene výskytu priemerov a aj hodnôt na okrajoch variačného intervalu podľa doterajších kriviek návrhových veličín. Pre náš región sú najpravdepodobnejšími eventualitami zmien príklady uvedené vľavo hore pre teplotu vzduchu a vľavo dole pre úhrny zrážok, no nie je možné vylúčiť ani priblíženie k príkladom uvedeným vpravo.

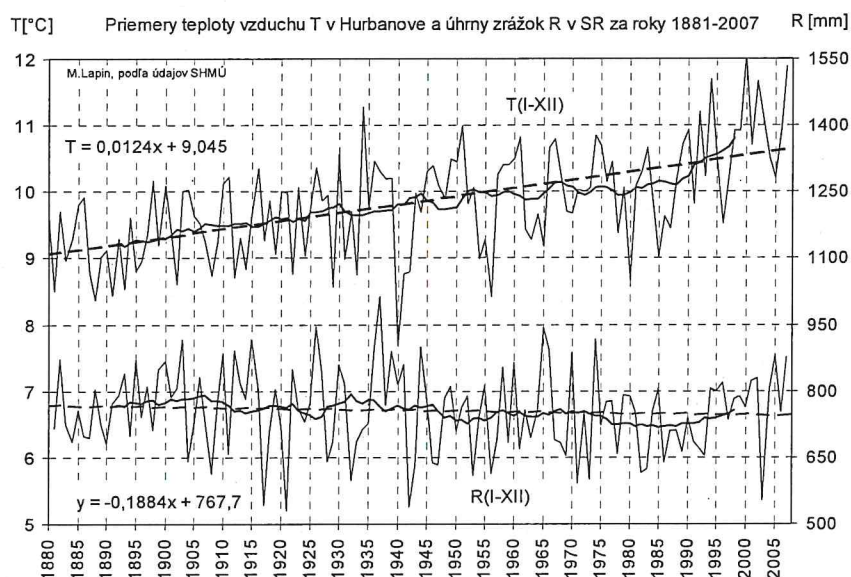


Obr. 1 Možné zmeny priemerov a variability teploty vzduchu (hore) a úhrnov zrážok (dole) ako zmena hustoty pravdepodobnosti výskytu – modifikácia podľa IPCC (2001)

Fig. 1 Possible changes in mean and variability of air temperature (top) and precipitation totals (bottom) – modified according to IPCC (2001)

Ako je zrejmé aj z uvedených zjednodušených príkladov, v budúcnosti môže dôjsť k zásadným zmenám vo výskyte extrémnejších poveternostných udalostí v oboch smeroch. Väčšina dôležitých socio-ekonomických aktivít človeka, a nakoniec aj procesov v prirodzených ekosystémoch, je nastavených tak, že bez väčšej ujmy znesú výskyt extrémov počasia iba v určitej pravdepodobnosti výskytu. Priame pozorovania potvrdili, že udalosti s priemernou pravdepodobnosťou prekroenia raz za 50 rokov sú asi krajinou hranicou prijateľnej akceptácie. Dá sa to interpretovať aj tak, že človek počas aktívnej časti svojho života by mal zvládnuť všetky bežné prípady výkyvov počasia. Prirodzené ekosystémy sa zrejme adaptujú na premenlivosť počasia a klímy zložitejšie, no berme to tak, že aj v tomto prípade ich genetická pamäť počíta s menej extrémnym počasím ako je priemerné prekročenie raz za 50 rokov. Niektoré systémy sa zrejme adaptujú rýchlejšie a iné pomalšie (IPCC, 1998, 2001, 2007).

Štatistická analýza časových radov meteorologických (ale aj hydrologických) pozorovaní umožňuje stanoviť (nájsť) návrhové hodnoty distribučných kriviek (teda aj pravdepodobnosť výskytu  $p = 0,02$  a  $p = 0,98$ ) iba za určitých podmienok a obmedzení. Ešte pred ich vymenovaním a diskusiou o ich význame musíme zdôrazniť, že sa často v minulosti štatisticky spracovávali časové rady pozorovaných údajov aj bez analýzy ich spoľahlivosti na takýto typ spracovania. Nezriedka sa použili aj 10 - až 20 - ročné rady pozorovaní. Za dôležité považujeme najmä nasledujúce 4 podmienky:



Obr. 2 Ročné priemery teploty vzduchu ( $T$ ) v Hurbanove a ročné úhrny územných zrážok ( $R$ ) na Slovensku v období 1881-2007 (podľa dvojitého váženého územného priemeru z 203 zrážkomerných staníc), zmeny  $T$  a  $R$  sú prezentované 20-ročnými kĺzavými priemermi a lineárnym trendom

Fig. 2 Annual air temperature means ( $T$ ) at Hurbanovo and annual precipitation totals ( $R$ ) in Slovakia in 1881-2007 (based on double-weighted averages of areal means from 203 stations),  $T$  and  $R$  changes are shown by 20-year moving averages and linear trendlines of  $T$  and  $R$

- 1) Časový rad údajov musí spĺňať podmienku časovej homogenity z pohľadu metodiky a reprezentatívnosti pozorovaní (v praxi to znamená najmä: pozorovanie na rovnakom mieste, žiadna významná zmena okolia stanice, rovnaká metodika pozorovaní a porovnateľné prístrojové vybavenie). V takomto prípade majú prípadné zistené nehomogenity iba klimatologické príčiny (prechodná zmena atmosférickej cirkulácie, časový trend niektorého z klimatických prvkov – najčastejšie teploty vzduchu a p., Nosek, 1972, Guide WMO 100, 1983, Lapin a Tomlain, 2001a).
- 2) Časový rad musí spĺňať podmienku náhodného a nezávislého výberu s dostatočným počtom členov radu (v praxi to znamená, že vybraný časový rad by mal byť svojimi štatistickými parametrami porovnateľný, ak už nie zhodný, s oveľa dlhším časovým radom z daného miesta a mal by mať najmenej  $n = 30$  prvkov, Nosek, 1972). Ak aj vyberieme časový rad s určitým, vopred zvoleným zámerom (napríklad štandardné normálové obdobie 1961-1990), nesmie byť tento zámer motivovaný doplnkovým úmyslom, napríklad o spracovanie nejakého výnimočného obdobia, vnieslo by to do štatistickej analýzy zníženie počtu stupňov voľnosti  $\nu$  (prijateľné je  $\nu = n - 2$ ).



- 3) Nezávislosť výberu má ale aj iný rozmer. V praxi musíme občas analyzovať časové rady údajov, ktoré nevznikli za úplne nezávislých podmienok (v rovnakom období roka a za podobných podmienok radiačnej bilancie alebo zvrstvenia atmosféry, ale nie za tej istej synoptickej situácie). Ide predovšetkým o mimoriadne prípady vysokých úhrnov zrážok, vlny horúčav, vlny dusna, epizódy sucha a p. Testovanie nezávislosti všetkých členov radu sa preto musí robiť veľmi dôkladne, inak získame zavádzajúce výsledné štatistické charakteristiky. Podrobnosti uvedieme ďalej v texte.
- 4) Posledným dôležitým predpokladom je stacionarita časového radu. Príklad pre ročné priemery teploty vzduchu vidíme na obr. 2, z ktorého je zrejmé, že stacionárnych 30-ročných období nemáme v časovom rade 1871-2006 veľa. Obdobie 1951-1980 stacionárnym určite je, obdobie 1971-2000 však určite nie je. Problémom stacionarity sa budeme tiež zaoberať v ďalšom texte.

## 2. METÓDY

Cieľom štatistického spracovania návrhových hodnôt klimatických prvkov s malou pravdepodobnosťou výskytu je predovšetkým príprava použiteľných klimatických charakteristík pre praktickú aplikáciu v socio-ekonomickej sfére, v štátnej správe a vo výskume. Pokúsme sa preto navrhnúť najprv východiská predmetnej analýzy (Nosek, 1972, Guide WMO 100, 1983, Lapin a Tomlain, 2001a).

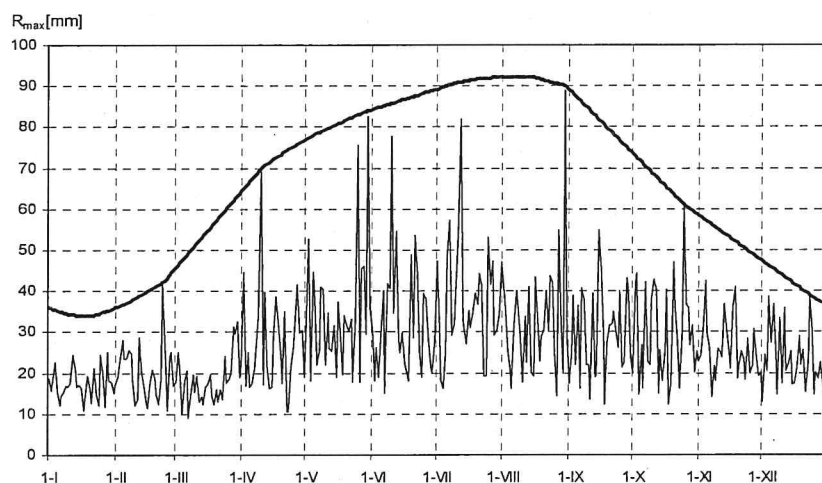
### 2.1. Podkladové údaje

Podkladové údaje predstavujú nejaké súbory pozorovaní pravidelne alebo nepravidelne rozložené v čase a priestore – najlepším riešením sú údaje zo staničnej siete meteorologických a hydrometeorologických služieb, ktorá má dlhodobu stabilnú organizačnú a metodickú zabezpečenie. Ak máme na mysli tzv. „štatistické spracovanie extrémov alebo extrémnych prípadov počasia“, musíme si najprv ozrejmiť čo sú to extrémny. Čisto z pohľadu matematickej štatistiky, sú lokálnymi extrémami najvyššia a najnižšia hodnota v danom časovom intervale. Ak je takým intervalom mesiac, tak v každom mesiaci máme aspoň jedno maximum a aspoň jedno minimum. Problém nastane vtedy, keď majú všetky pozorované údaje v danom mesiaci rovnakú hodnotu, napríklad v bezzrážkovom mesiaci sú to nuly úhrnov zrážok a v zamračenom mesiaci sú to desiatky pokrytia oblačnosťou. Ak je dĺžka časového intervalu totožná aj s definičnou dĺžkou meranej veličiny, tak každá hodnota je súčasne maximom aj minimom (denné úhrny zrážok pre deň 1. júl v období 1871-2000, na obr. 3 sú iba absolútne maximá). Ďalšou podmienkou je skutočnosť, že takých lokálnych extrémov musíme mať najmenej 30 počas úplne porovnateľných mesiacov (alebo iných zvolených období), aby sme splnili inú podmienku štatistického spracovania. Môžeme ešte diskutovať o nezávislosti výberu extrémov, ak máme dojem, že počas výskytu lokálnych extrémov mohli existovať rozdielne podmienky, ktoré znižujú počet stupňov voľnosti. Napríklad, v mesiaci apríl sú podstatne odlišné podmienky na konvekciu na jeho začiatku a konci, teda vysoký denný/hodinový úhrn zrážok má iný fyzikálny a aj štatistický význam, ak sa vyskytne 1. alebo 30. apríla. Ešte zložitejšia situácia nastane, ak si vyberieme za základ obdobie teplého polroka, teda od 1. apríla do 30. septembra. Je známe, že hydrológovia (a nielen oni) občas spracúvajú extrémny vybrané z celého obdobia roka (napríklad prietoky), pričom neberú do úvahy, že mohli vzniknúť za veľmi rozdielných podmienok. Úplne odlišným problémom je definovanie prípadu extrémneho počasia. Skoro vždy ide pritom o komplex meteorologických a iných prvkov, ktoré majú z určitých príčin za následok extrémnu škodu, alebo extrémny účinok na ekosystémy, prípadne aj na socio-ekonomické aktivity. Určite existuje rad štúdií, v ktorých sa autori snažili kvantifikovať takto definované komplexné extrémny podľa váh jednotlivých meteorologických a iných prvkov. Nebudeme sa tým ale na tomto mieste zaoberať. Subjektívne označenie „extrémne počasia“ ale určite nie je prijateľným extrémom na spracovanie z pohľadu matematickej štatistiky.

Na obr. 3 máme príklad ročného chodu absolútnych maxim denných úhrnov zrážok v Hurbanove za obdobie 1871-2000. Tu sme zvolili ideálnu metódu stanovenia extrémov, pretože je úplne eliminovaný ročný chod (údaje sa spracúvajú po dňoch). Z obr. 3 je zrejmé, že sme sa dostali čiastočne do slepej uličky, pretože je ročný chod krajne nepravidelný a ani obalová krivka nie je celkom jednoznačná. Iba o málo lepšia je situácia v ročnom chode denných priemerov teploty vzduchu (obr. 4), kde je tiež dĺžka intervalu totožná s definičnou dĺžkou meranej veličiny (kvôli lepšej názornosti sme ročný chod čiastočne odstránili použitím normalizovaných hodnôt, čo sú v tomto prípade odchýlky od dlho-

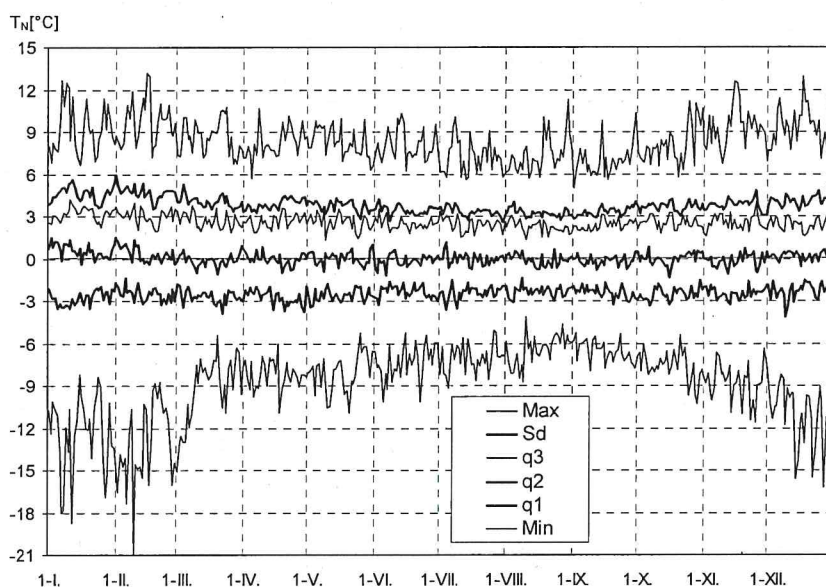


dobého priemeru pre jednotlivé dni). Pri denných úhrnoch zrážok máme teda k dispozícii pre každý deň 130 členné súbory a pre teplotu vzduchu 50 členné súbory. To by malo bohato stačiť na štatistické spracovanie (Nosek, 1972), ale napriek tomu ročný chod návrhových charakteristík (odhadnutých nejakým štatistickým modelom) s malou pravdepodobnosťou výskytu tu určite nebude bez problémov.



Obr. 3 Absolútne maximá denných úhrnov zrážok po jednotlivých dňoch roka v Hurbanove v období 1871-2000 a subjektívne konštruovaná obalová krivka (podľa údajov SHMÚ)

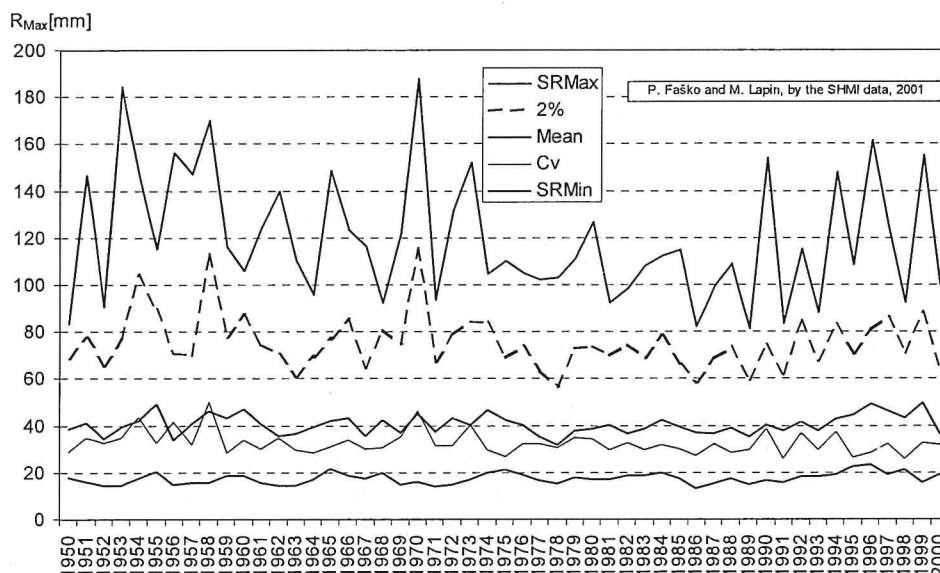
Fig. 3 Absolute maxima in daily precipitation totals at Hurbanovo in 1871-2000 and the envelop curve constructed subjectively (by SHMI data)



Obr. 4 Charakteristiky normalizovaných denných priemerov teploty vzduchu v Hurbanove v období 1951-2000 (absolútne maximum a minimum, horný a dolný kvartil, medián a smerodajná odchýlka).

Fig. 4 Statistics of normalized daily mean temperatures at Hurbanovo in 1951-2000 (absolute maximum and minimum in daily means, upper and lower quartiles, median and standard deviation of daily means)

Je treba pripomenúť, že sme uviedli takmer ideálne súbory údajov, v iných prípadoch sa štatisticky spracúvajú oveľa menšie súbory s oveľa spornejším výberom (jednotlivé dažde na spracovanie intenzít zrážok, epizódy mimoriadneho počasia, viacdenné mimoriadne úhrny zrážok atď.). Samostatným problémom sú súbory údajov s regionálnym prístupom, napríklad denné maximá úhrnov zrážok v klimatologicky homogénnom regióne podľa meraní na jednotlivých staniciach (Gaál, 2006). Na obr. 5 uvádzame iba jeden príklad odlišných podkladových údajov – časový priebeh charakteristík ročných maxím z denných úhrnov zrážok na 557 staniciach na Slovensku v období 1950-2000.



Obr. 5 Ročné maximá z denných úhrnov zrážok na 557 staniciach na Slovensku v období 1950-2000  
Fig. 5 Annual maxima from daily precipitation totals at 557 stations in Slovakia in 1950-2000

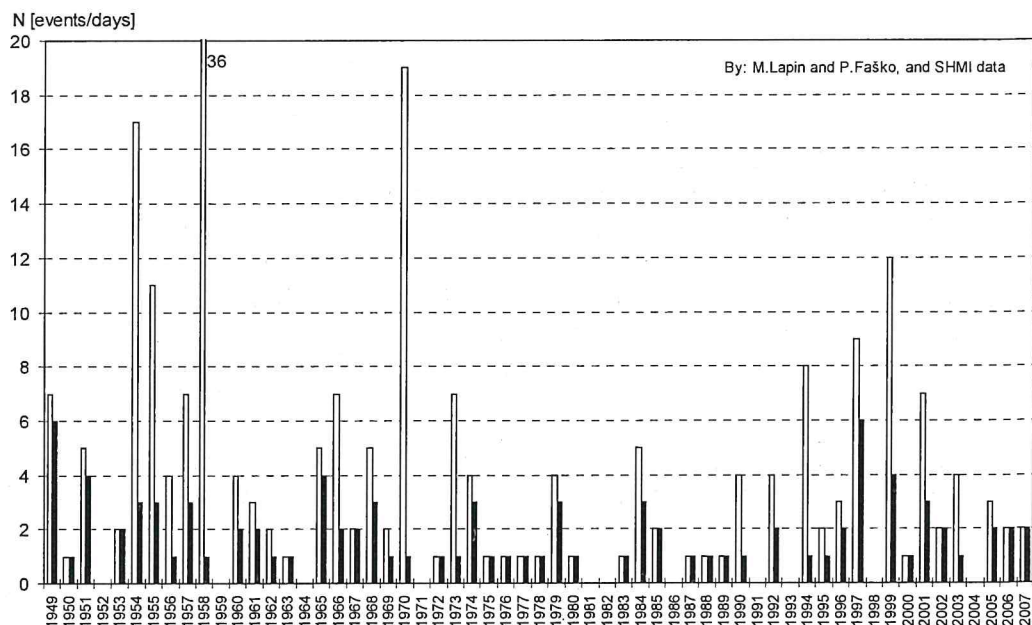
Tab. 1 Zoznam staníc s dennými úhrnmi zrážok  $R \geq 150$  mm na Slovensku v období 1951-2000 (podľa meraní na všetkých zrážkomerných staniciach, ktoré boli v činnosti (ročne asi 700), Faško et al., 2002)

Tab. 1 List of stations with daily precipitation totals  $R \geq 150$  mm in Slovakia in 1951-2000 (based on all stations with precipitation measurements evaluation (about 700 each year), Faško et al., 2002)

| Year<br>Rok | Station<br>Stanica      | N<br>[° '] | E<br>[° '] | H<br>[m] | $R_{Max}$<br>[mm] | Datum<br>dd-mm-rr | Sit<br>CS |
|-------------|-------------------------|------------|------------|----------|-------------------|-------------------|-----------|
| 1951        | Trnava                  | 48 22      | 17 38      | 155      | 162,8             | 03-VI-51          | C         |
| 1956        | Sokolovce               | 48 31      | 17 50      | 165      | 156,4             | 19-VII-56         | VFZ       |
| 1957        | Salka                   | 47 53      | 18 45      | 111      | 231,9             | 12-VII-57         | B         |
| 1958        | Chata Zbojnícka         | 49 11      | 20 10      | 1958     | 169,0             | 29-VI-58          | C         |
| 1958        | Hrebienok               | 49 09      | 20 13      | 1285     | 165,0             | 29-VI-58          | C         |
| 1958        | Skalnaté pleso          | 49 11      | 20 14      | 1778     | 170,0             | 29-VI-58          | C         |
| 1961        | Železnô                 | 48 57      | 19 23      | 990      | 153,7             | 18-X-61           | B         |
| 1966        | Veľké Pole              | 48 33      | 18 34      | 556      | 164,0             | 19-VIII-66        | C         |
| 1970        | Oravská Lesná           | 49 22      | 19 10      | 780      | 163,2             | 18-VII-70         | B         |
| 1970        | Novoť                   | 49 25      | 19 15      | 770      | 187,6             | 18-VII-70         | B         |
| 1970        | Oravská Polhora - Roveň | 49 33      | 19 26      | 704      | 182,1             | 18-VII-70         | B         |
| 1970        | Oravice                 | 49 16      | 19 45      | 853      | 154,3             | 18-VII-70         | B         |
| 1970        | Zverovka                | 49 14      | 19 42      | 1027     | 154,5             | 18-VII-70         | B         |
| 1973        | Podspády, VT            | 49 16      | 20 10      | 910      | 152,3             | 30-VI-73          | Wal       |
| 1990        | Luková                  | 48 57      | 19 35      | 1661     | 153,0             | 29-X-90           | SWc3      |
| 1990        | Jasná                   | 48 58      | 19 35      | 1196     | 154,0             | 29-X-90           | SWc3      |
| 1996        | Cífer                   | 48 19      | 17 29      | 147      | 161,5             | 12-VIII-96        | B         |
| 1999        | Limbach                 | 48 17      | 17 13      | 181      | 155,0             | 10-VII-99         | Ec        |
| 1999        | Pezinok, Grinava        | 48 05      | 17 05      | 159      | 151,5             | 10-VII-99         | Ec        |

Je evidentné, že obr. 5 bol skonštruovaný na základe najkvalitnejších údajov, aké máme vôbec k dispozícii na posudzovanie 1-denných zrážkových extrémov (Faško et al., 2002). Napriek tomu, tento graf neposkytuje všetky informácie o absolútne najvyšších denných úhrnoch zrážok (tab. 1) a ani o ich časovom a priestorovom rozdelení. Určitým nedostatkom je aj to, že ročné maximá denných úhrnov sa vyberali bez ohľadu na ročnú dobu a synoptickú situáciu. Preto sú tam zahrnuté aj niektoré úhrny z chladného polroka, ktoré vznikli z celodenných trvalých zrážok počas centrálnej cyklóny (C) alebo brázdy (B) nad strednou Európou (posledný stĺpec v tab. 1). Ale aj maximá z teplého polroka môžu mať pôvod v jednej alebo viacerých búrках, prípadne aj v trvalých zrážkach spojených s ojediniele sa vyskytujúcou centrálnou cyklónou alebo tlakovou brázdou v lete (tab. 1).





**Obr. 6** Počet prípadov (každá stanica je každý deň považovaná za jeden prípad) a dní (keď sa vyskytol aspoň jeden prípad na Slovensku) s úhrnom zrážok  $R \geq 100$  mm na Slovensku v rokoch 1949-2007  
**Fig. 6** Number of events (each station is considered as one event each day) and days (at least one event in Slovakia) with precipitation totals  $R \geq 100$  mm in Slovakia in the years 1949-2007

Za podstatne odlišnú metódu výberu podkladových údajov na analýzu extrémov zrážok môžeme považovať limitovaný výber, napríklad všetkých denných úhrnov s  $R \geq 100$  mm (obr. 6, Faško et al., 2002, doplnené v roku 2007). Takýmto výberom síce získame pomerne dobrý prehľad o vysokých denných úhrnoch zrážok v jednotlivých rokoch, pretože každý rok bolo k dispozícii viac ako 700 pozorujúcich staníc, avšak ani zďaleka nemôžeme takýto rad údajov považovať za bezchybný z hľadiska štatistického spracovania. Príčinou je hlavne premenlivý celkový počet staníc (pomerne veľa staníc má iba krátke rady pozorovaní) a nedá sa potvrdiť a ani zistiť, že ide o nezávislý výber. Napriek tomu bol tento graf veľmi populárny v odbornej komunite hneď po prvom zverejnení v roku 2000, spolu s podobnými údajmi z južného Poľska (Cebulak et al., 2000). Za určitú kuriozitu môžeme považovať extrém z 29.6.1958, keď sa vyskytlo až takých 36 prípadov a v ostatných dňoch roka 1958 ani jeden (v južnom Poľsku bolo 29.6.1958 vyše 100 prípadov denných úhrnov zrážok s  $R \geq 100$  mm).

V tejto časti sme sa pokúsili na obmedzenom počte príkladov naznačiť existenciu problémov už pri výbere údajov na spracovanie. Je zjavné, že pri výbere komplexnejších podkladov na analýzu mimoriadneho počasia, v ktorom vystupujú extrémne ako súhrnné pôsobenie viacerých meteorologických prvkov, je situácia ešte zložitejšia. Ide o také extrémne ako: suché obdobia, vlny horúčav, riziko povodní, riziko lesných požiarov, riziko lavín atď. V týchto prípadoch sa musí brať vždy do úvahy niekoľko prvkov, vrátane vlhkosti pôdy, stavu vegetácie, predchádzajúceho počasia, využívania krajiny atď. Iba na základe spoločného zhodnotenia mimoriadneho alebo extrémneho stavu počas skúmanej udalosti sa dané obdobie (alebo daný deň) zoberie do spracovania nejakého časového radu ako jeden prvok. Aj v týchto prípadoch je ale prospešné, ak sa vytvorí časový rad udalostí tak, aby spĺňal uvedené 4 podmienky z úvodu tohto príspevku. Netreba opakovať, že nejde o problém jednoduchý.

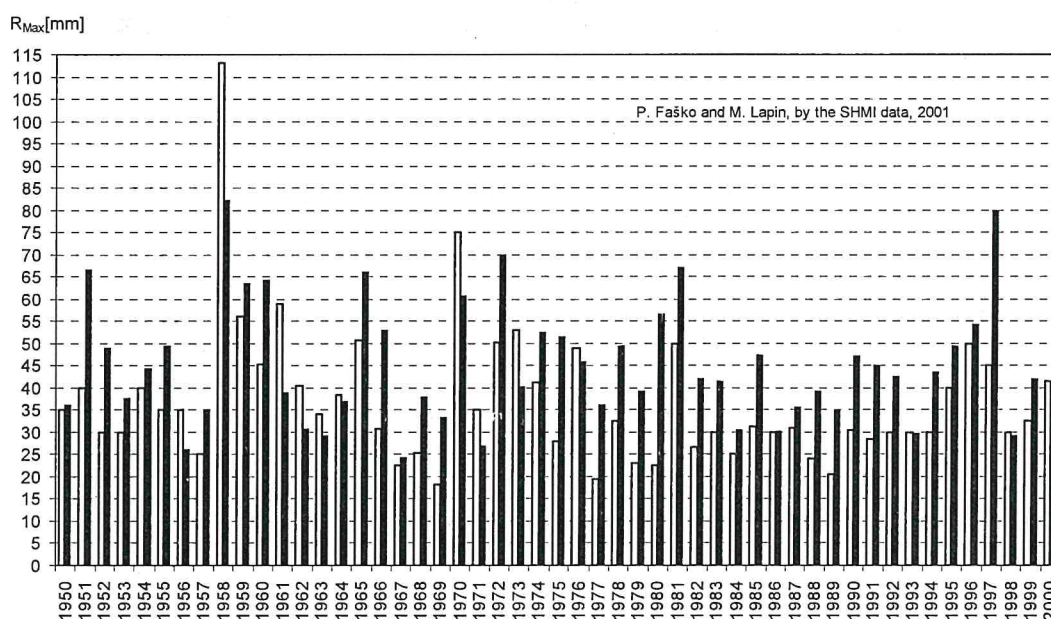
## 2.2 Testovanie spoľahlivosti

Ako je všeobecne známe, vstupné údaje klimatologických spracovaní majú veľa potenciálnych nedostatkov. Preto má mať testovanie a nevyhnutná úprava podkladových údajov niekoľko úrovní. Sústreďujeme sa najmä na kompletnosť a časovú homogenitu časových radov. Dá sa testovať aj stacionarita priemerov a hodnôt vzdialenejších od dlhodobých priemerov (kvantily, extrémne). Na tomto mieste nie je však dostatok priestoru na prezentáciu detailov uvedených metód, preto sa sústreďujeme iba na podstatné problémy (Nosek, 1972, Storch et al., 2000, Lapin a Tomlain, 2001a).



Ak analyzujeme extrémne údaje a extrémne prípady alebo epizódy počasia, zvyčajne narazíme na nekompletnosť časových radov ako na prvý kľúčový problém. Súvisí to so skutočnosťou, že na spoľahlivú analýzu extrémov potrebujeme dlhé časové rady údajov a pri predlžovaní radov nad 50 rokov rýchle klesá počet kompletných pozorovaní (aj na menej ako desatinu zo všetkých staníc). Je však ešte jeden dôvod, ktorý nás núti využívať veľmi dlhé rady, a to sú odľahlé hodnoty (outliers). Napríklad, pri úhrnoch zrážok sa takmer každý rok na niektorej zo 700 staníc objaví denný úhrn nad 100 mm. Prinajmenšom na polovici z nich znamená tento denný úhrn odľahlú hodnotu v časových radoch okolo 30 rokov. Z obr. 6 vidíme, že pri počte 700 staníc na Slovensku sa ročne vyskytujú zväčša 2 až 3 prípady s úhrnom  $R \geq 100$  mm, čiže zhruba jeden prípad na 250 staníc. Za 30 rokov je to asi 70 prípadov, teda 1 prípad na 10 staníc. Pravdepodobnosť, že takýto prípad bude odľahlou hodnotou je preto veľmi vysoká. Z prvkov, ktoré majú väčšiu frekvenciu spracovania, má podobné vlastnosti ako maximá zrážok aj denné minimum teploty vzduchu, predovšetkým v zimných mesiacoch. Odľahlú hodnotu nemôžeme v štatistickom spracovaní brať do úvahy bez podrobnejšej analýzy, pričom aj tak nevieme dostatočne presne odhadnúť jej polohu na základnej distribučnej krivke. Odľahlá hodnota takmer vždy skresľuje odhad bodov na distribučnej krivke s malou pravdepodobnosťou výskytu. Existujú však metódy regionálnej analýzy na riešenie tohto problému (Gaál, 2006).

Vráťme sa teda najprv k dopĺňaniu chýbajúcich údajov. Ako príklad si zoberme denné úhrny zrážok. Už pri kompletovaní časových radov extrémov z obdobia 1950-2000 na 557 staniciach sme narazili na chýbajúce denné údaje v jednotlivých mesiacoch, čo znemožnilo jednoznačné stanovenie ročného maximálneho denného úhrnu v danom roku. Mesačné úhrny vieme doplniť pomerne úspešne, ak máme k dispozícii zanalyzovanú mapu mesačných úhrnov zo všetkých pozorujúcich staníc. Dopĺňanie extrémov pri spracovaní prezentovanom v príspevku Cebulak et al. (2000) sme realizovali na SHMÚ tak, že sme identifikovali všetky potenciálne dni s možnými extrémami a dopĺňali sme ich na základe analýzy okolitých staníc v danom dni, s prihliadnutím na charakter synoptickej situácie. Je zrejmé, že dopĺňanie bolo jednoduchšie pri situácii centrálna cyklóna (*C*) a tlaková brázda (*B*) a oveľa zložitejšie pri situáciách s priestorovo veľmi pestrým výskytom intenzívnych búrkových lejakov v lete. Ako extrémny príklad uvádzame na obr. 7 časový rad dvojice blízkych staníc z Liptova, z ktorých je jedna kompletná (Huty, plné stĺpce) a druhá má dopĺňané údaje v 16 rokoch (Bobrovček, prázdne stĺpce).



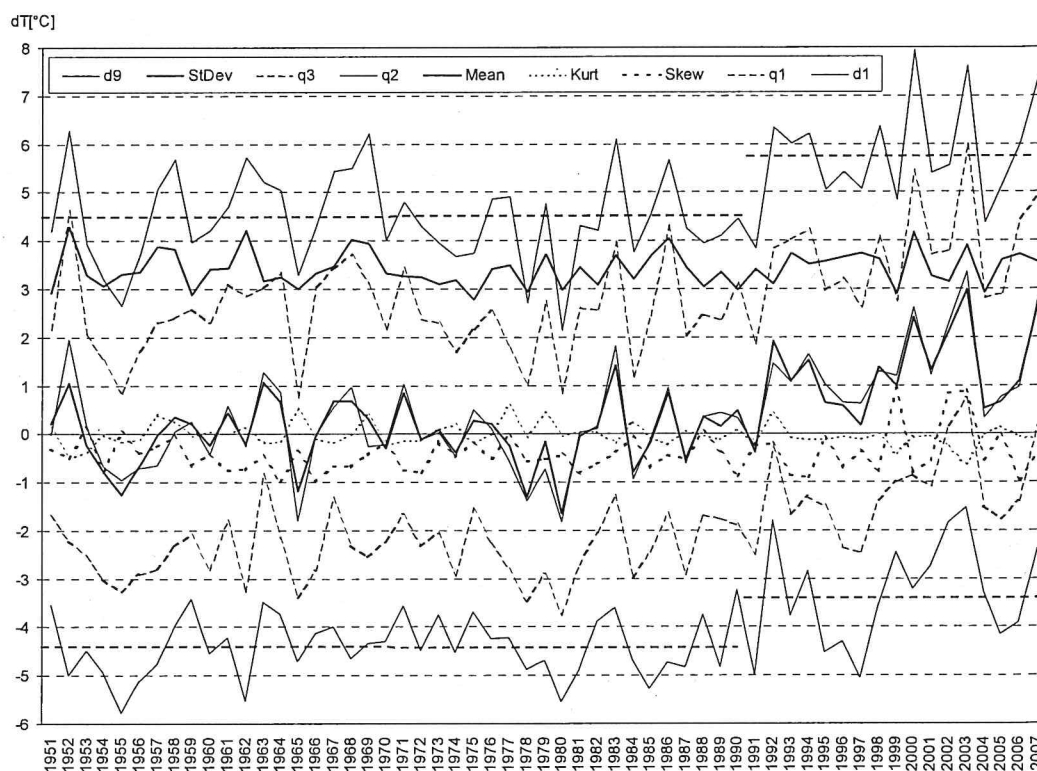
Obr. 7 Časový rad ročných maxím denných úhrnov zrážok na staniciach Bobrovček (667 m) a Huty (795 m, plné stĺpce, vzdialenosť 8 km), pričom v Bobrovčeku sú v prvých 8 rokoch a aj v rokoch 1991-1998 doplnené hodnoty na základe analýzy meraní na okolitých staniciach

Fig. 7 Time series of annual maxima in daily precipitation totals at two close stations in the Liptov region (Bobrovček, 667 m, has 16 filled data, Huty, 795 m, (black columns) is complete, distance 8 km)



Je zrejmé, že podobnú metódu môžeme použiť aj pri iných prvkoch, hoci taký vysoký počet doplných údajov ako na príklade obr. 7 (16 prípadov je 31%, čo bolo najviac v celom súbore 557 staníc) sa dá použiť iba zriedka (tu sme mali k dispozícii pomerne hustú sieť staníc a dobre definované náveterné efekty). Oveľa lepšia situácia je pri teplote vzduchu, najmä ak máme aj aerologické údaje.

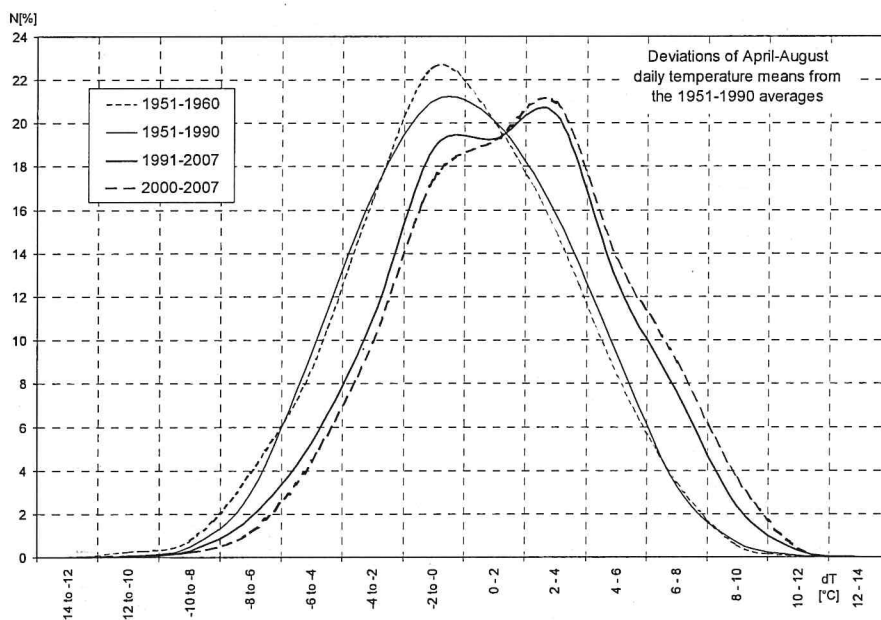
Po získaní časových radov ročných maxím z denných zrážkových úhrnov z 557 staníc sme uvažovali nad testami homogenity, ale žiaden z testov nepriniesol žiadateľný výsledok. Objavil sa rad zdanlivých nehomogenít v testoch relatívnej homogenity, podobne ako to opisuje Gaál (2006), ktoré sa nepotvrdili metadátami (pomocné údaje o meraniach, staniách, pozorovateľoch a prístrojovom vybavení). Uspokojili sme sa teda s predpokladom, že ak sú na daných staniách prijateľne homogénne časové rady ročných úhrnov zrážok (čo sa dá spoľahlivejšie otestovať aj testami relatívnej homogenity), tak je predpoklad, že budú homogénne aj vybrané extrémny denných úhrnov. Na tomto mieste treba zdôrazniť, že v iných prípadoch, najmä pri hodnotení extrémov denných maxím teploty vzduchu a extrémov vlhkosti vzduchu máme rad možností na prísnejšie posudzovanie časovej homogenity.



Obr. 8 Časový priebeh základných charakteristík normalizovaných denných priemerov teploty vzduchu dT v sezóne od 1. apríla do 31. augusta v Hurbanove v rokoch 1951-2007 (odhora: horný decil d9, smerodajná odchýlka, horný kvartil q3, medián, priemer, špicatosť, šikmosť, dolný kvartil q1 a dolný decil d1)  
Fig. 8. Temporal course of basic statistical characteristics of normalized daily mean temperatures dT (deviations from normal) at Hurbanovo for the season April 1<sup>st</sup> to Aug. 31<sup>st</sup> in the period 1951-2007 (from the top: d9 - upper decile, StDev - standard deviation, q3 - upper quartile, q2 - median, mean, Kurt - kurtosis, Skew - skewness, q1 - lower quartile, and d1 - lower decile); not significant change in StDev, Kurt and Skew, increases in other values since 1991 by about 1-1.5 °C (dashed horizontal lines) indicate climate change category No.1 from Figure 1 (the year 2007 seems comparable with the years 2000 and 2003)

Stacionarita časových radov je ďalším kľúčovým problémom analýzy extrémov (Guide WMO, 1983 a nový dodatok na [www.wmo.ch](http://www.wmo.ch)). Ako je vidieť z obr. 1, existuje závažný dôvod na nespoľahlivosť odhadu návrhových hodnôt s nízkou pravdepodobnosťou opakovania v prípade meniacej sa klímy. Do určitej miery sa o tom môžeme presvedčiť aj na časovom rade charakteristík normalizovaných denných priemerov teploty vzduchu v modifikovanom vegetačnom období od 1. apríla do 31. augusta v rokoch 1951-2007 (obr. 8). Už po roku 1990 tu máme vo vegetačnom období celkom odlišné podmienky nielen pri priemeroch teploty vzduchu, ale aj pri okrajových hodnotách spektra distribúcie odchýlok denných priemerov od dlhodobých normálov. Hodnotenie pravdepodobnosti opakovania

alebo prekročenia určitých návrhových hodnôt na základe štatistického spracovania údajov z obdobia 1901-1990 preto nadobúda v súčasnosti už celkom iný rozmer. Zdá sa, že aj horný a aj dolný decil normalizovaných denných priemerov teploty sa posunul asi o 1,2 °C smerom k vyšším hodnotám, preto je oprávnený predpoklad, že tak bude aj v prípade teplotných extrémov. V tomto konkrétnom prípade je priemer horného decilu v období 1951-1991 iba 4,13 °C, ale v období 1992-2007 až 5,39 °C (prerušovaná čiara na obr. 8), pre priemer je to -0,32 a 0,98 °C a pre dolný decil -4,74 a -3,51 °C. Rok 2007 mal podobné odchýlky ako doteraz najteplejšie vegetačné obdobia (IV až VIII) v rokoch 2000 a 2003. Z obrázku je tiež vidieť, že sa po roku 1991 prakticky nezmenila ani smerodajná odchýlka (StDev) a ani šikmosť (Skew) a špicatosť (Kurt), čo nasvedčuje, že ide o prvý prípad zmeny klímy z obr. 1, teda o lineárne posunutie distribučnej krivky bez významnej zmeny variability.



Obr. 9 Zmena distribučnej krivky výskytu normalizovaných denných priemerov teploty vzduchu v teplom polroku v Hurbanove v obdobiach 1951-1960 až 2000-2007 (mierne zhladené krivky)

Fig. 9 Shift in the distribution curves of the daily air temperature between the 1951-1990 and 1991-2007 periods in the April-August season (the dashed lines represent shorter periods 1951-1960 (left) and 2000-2007 (right)). Each daily value in this graph has been calculated as deviation from the 1951-1990 average for every day in annual course (the lines have been slightly smoothed)

### 2.3 Použitie modelov štatistického rozdelenia hustoty pravdepodobnosti

Krátke časové rady, prechodná nestacionarita radov a zložitý tvar a časový priebeh základných štatistických charakteristík klimatických prvkov majú za následok, že použitie teoretických modelov rozdelenia hustoty pravdepodobnosti má v klimatológii tiež viacero obmedzení. Iba málokedy môžeme využiť Gaussovu krivku normálneho a symetrického rozdelenia, pre ktorú vieme dobre interpretovať všetky štatistické charakteristiky. Zvlášť to platí pri analýze extrémnych hodnôt. Klimatické extrémny sa vyskytujú zriedkavo a ich veľkosť je len čiastočne výsledkom pôsobenia náhodných vplyvov. Presná predpoveď výskytu takýchto javov nie je v zásade možná, avšak dajú sa oceniť vhodným matematickým aparátom štatistickej klimatológie (Nosek, 1972, Storch et al., 2000, Wilks, 2005).

Existujú prípady, keď odchýlky od normálneho rozdelenia sú také veľké, že aplikácia normálneho rozdelenia by viedla k výraznému skresleniu skutočností, ako napr. pri rozdeleniach, ktorých variačné rady začínajú nulou alebo ich najvyššie hodnoty sú vyjadrené určitým celým číslom. V takýchto prípadoch je výhodnejšie použiť asymetrické rozdelenie, ktoré lepšie vyhovuje povahe sledovaných javov, ako napr. Pearsonove rozdelenie III. typu, vhodné pre niektoré klimatologické a zvlášť zrážkové javy (aj hydrologické javy). Priebeh Pearsonovej krivky III. typu určujú 3 parametre: aritmetický priemer, variačný koeficient a miera asymetrie. Podobne ako pri normálnom rozdelení, aj pri tomto rozdelení nás zaujíma, s akou pravdepodobnosťou sa vyskytujú jednotlivé hodnoty alebo ako často a s akou pravdepodobnosťou budú určité hodnoty prekročené, na čo je vhodné použiť súčtové čiary



početností (čiary prekročenia). Vzhľadom na to, že výsledky spracovania výraznou mierou ovplyvňuje rozsah radov pozorovaných hodnôt a skúmané rady nebývajú príliš rozsiahle, využívame na konštrukciu súčtovej čiary tvary teoreticky odvodených čiar, k čomu stačí znalosť uvedených troch parametrov. Pri kratších radoch sa stretávame s veľkou chybou miery asymetrie (Nosek, 1972).

Štatistická metóda, pomocou ktorej získame pravdepodobnostné odhady (návrhové hodnoty) veľkosti extrémneho javu určitého trvania, ktorý možno pozorovať s danou pravdepodobnosťou v uvažovanej oblasti alebo stanici, sa nazýva frekvenčná analýza (iným slovom analýza početnosti výskytu extrémnych javov). Ako miera významnosti klimatickej návrhovej veličiny slúži doba opakovania (perióda)  $t$ , vyjadrujúca počet rokov, počas ktorých sa v priemere návrhová hodnota raz dosiahne alebo prekročí. Ako ďalšia charakteristika miery významnosti návrhovej veličiny sa používa aj periodičita (priemerná ročná frekvencia)  $P$ , ktorá predstavuje pomer počtu prípadov dosiahnutia alebo prekročenia hodnoty klimatického prvku k počtu rokov jej pozorovania ( $P = 1/t$ ). Doplnkom k pravdepodobnosti prekročenia je pravdepodobnosť nedosiahnutia, vyplývajúca zo všeobecnej definície distribučnej funkcie.

Všeobecným predpokladom frekvenčnej analýzy klimatických extrémov je nezávislosť pozorovaných javov, z čoho vyplýva aj ďalší predpoklad, podľa ktorého prirodzená variabilita nevyplýva na štatistické rozdelenie extrémnych javov. Riziko výskytu sa považuje z roka na rok za rovnaké a nezávislé od prevládajúcich klimatických mechanizmov. Hypotéza identického rozdelenia, nezávislosti a stacionarity klimatických extrémov sa však zdá byť ohrozená vo svetle globálnej klimatickej zmeny (pozri úvod článku aj obr. 1). Z toho vyplýva, že návrhové hodnoty klimatických prvkov, ktoré sa určovali v predchádzajúcich desaťročiach na základe „minulej klímy“ a použili sa v tvorbe noriem, v inžinierskom projektovaní, teda v rôznych odvetviach socio-ekonomickej sféry, nemusia mať všeobecnú platnosť v súčasných (nastávajúcich) klimatických podmienkach. Pri praktickom využití návrhových hodnôt z minulosti teda musíme byť veľmi opatrní, prípadne ich treba prehodnotiť.

Cieľom frekvenčnej analýzy je získať spoľahlivý odhad návrhovej hodnoty pre významnú dobu opakovania. Vo všeobecnosti platí, že návrhové hodnoty s dobou opakovania  $t$  sa dajú spoľahlivo odhadnúť na základe  $n$ -ročného pozorovania stanice v prípade, že  $t \leq n$  (Hosking a Wallis, 1997). V praktických aplikáciách je vhodné obmedziť sa iba na také hodnoty  $t$ , ktoré nepresahujú trojnásobok  $n$ , nakoľko návrhové hodnoty nemožno dostatočne spoľahlivo odhadnúť pre väčšiu dobu opakovania. Tento problém je však možné obísť použitím alternatívnych alebo dodatočných zdrojov informácií, ktoré vhodne využíva práve regionálna analýza. V praxi je veľmi často potrebné odhadovať návrhové hodnoty meteorologických prvkov s takou dobou opakovania, ktorá presahuje dĺžku radov pozorovania a nedostatočná veľkosť výberových súborov by mohla byť z matematického pohľadu neprekonateľnou prekážkou, nakoľko spätné rozšírenie radov sa dá dosiahnuť iba pomocou pomerne komplexného aparátu matematickej štatistiky. Tento problém rieši regionálny prístup, ktorý úspešne nahrádza časový rozmer priestorovým rozmerom. V meteorológii, hydrológii, ako aj v iných environmentálnych vedných odboroch je často k dispozícii väčší počet navzájom súvisiacich súborov údajov. Ak lokálne početnosti javov na rôznych miestach regiónu majú podobné štatistické vlastnosti, tak potom súčasnou analýzou všetkých dostupných údajov je možné dosiahnuť spoľahlivejšie odhady návrhových hodnôt ako pomocou jednotlivých vzoriek zvlášť.

V súčasnosti sa uprednostňuje regionálny prístup k frekvenčnej analýze, ktorá sa ukazuje ako perspektívna metóda v znižovaní neurčitosti (teda vo zvyšovaní spoľahlivosti) návrhových hodnôt, predovšetkým na pravom konci distribučnej funkcie, teda pre hodnoty s veľmi nízkou pravdepodobnosťou výskytu. Regionálna analýza je však opodstatnená iba za predpokladu klimatologickej podobnosti daného regiónu pre štatistickú charakteristiku, ktorú študujeme (Gaál, 2006). Nevyhnutnou požiadavkou súčasných analýz je analytické stanovenie neurčitosti odhadovaných návrhových hodnôt, čo vyžaduje aplikáciu komplexných matematických metód, ktoré by mali viesť k čo najužším intervalom spoľahlivosti vypočítaných návrhových hodnôt. Zložitosť frekvenčnej analýzy spočíva predovšetkým v bohatej ponuke nástrojov štatistiky, pomocou ktorých sa môžu určovať návrhové hodnoty. Existuje pestrá paleta teoretických distribučných funkcií, k dispozícii je bohatý výber metód odhadu ich parametrov, nehovoriac o rozdielnych možnostiach konštrukcie výberových súborov. Voľba ľubovoľnej alternatívy z vyššie uvedeného zoznamu nástrojov významnou mierou ovplyvňuje výsledné návrhové hodnoty.

Dvojparametrické Gumbelovo rozdelenie, resp. trojparametrické Pearsonovo rozdelenie III. typu boli veľmi dlho najčastejšie používanými distribučnými funkciami na odhad návrhových hodnôt klimatologických a hydrologických veličín v bývalom Československu. V súčasnosti je však k dispozícii oveľa širší výber alternatívnych možností. Špecialisti problematiky sa zhodujú v tom, že by sa na frekvenčnú analýzu už nemali používať 2-parametrické rozdelenia, lebo nie sú dostatočne flexibilné a ich šetrnosť v parametroch vedie k pomerne vychýleným odhadom kvantilov. Distribučné funkcie s tromi (napr. zovšeobecnené extrémne (GEV), zovšeobecnené logistické, zovšeobecnené normálne, Weibullovo, Pearsonovo III. alebo Paretovo rozdelenie), štyrmi (kappa rozdelenie) alebo aj piatimi parametrami (Wakebyho rozdelenie) sú vo všeobecnosti odporúčané viacerými autormi (Hosking a Wallis, 1997). Predovšetkým rozdelenie GEV sa ukázalo ako mimoriadne výhodné na celom svete (aj v strednej Európe) na určovanie návrhových hodnôt atmosférických zrážok (e.g., Kohnová et al., 2004; Gaál, 2006; Kyselý a Pícek, 2006; Alila, 1999; Smithers a Schulze, 2001), prietokov/povodní (Kohnová a Szolgay, 2003, Kohnová et al., 2006; Castellarin et al., 2001; Kumar a Chatterjee, 2005) alebo teploty vzduchu (Kharin a Zwiers, 2000; Kyselý, 2002). Treba iba pripomenúť, že v minulosti populárne dvojparametrické Gumbelovo rozdelenie je špeciálnym prípadom rozdelenia GEV, keď parameter tvaru (koeficient asymetrie) je nulový (Coles, 2001).

Veľmi dôležitým krokom frekvenčnej analýzy extrémnych javov je konštrukcia výberového súboru, t.j. voľba vhodnej metódy na získanie údajov výberového súboru z pozorovaných hodnôt. Do úvahy prichádzajú rady ročných maximálnych hodnôt, resp. rady nadprahových hodnôt. Najčastejšie používanou metódou zostavenia výberového súboru je metóda ročných maximálnych hodnôt daného klimatického prvku, ktorá zahŕňa jedinu, a to najväčšiu pozorovanú hodnotu z každého roku. Nevýhodou metodiky je to, že pri nej môže dôjsť k strate určitých informácií – napr. druhá alebo tretia najväčšia hodnota v danom roku môže byť väčšia než maximálna hodnota v niektorom inom roku. Takéto prípady sú vylúčené v rade nadprahových hodnôt, nakoľko do následného štatistického spracovania sa vyberajú všetky údaje, ktoré sú väčšie ako vopred stanovená prahová hodnota. Táto metodika je čisto zo štatistického pohľadu výhodnejšia, avšak kvôli komplexnosti jej matematického aparátu sa v odbornej komunite neteší veľkej obľube. Pri tvorbe výberových súborov je dôležité dodržiavať zásadu nezávislosti výberu, podľa ktorej jedna synoptická situácia môže byť reprezentovaná vo výberovom súbore nanajvýš jednou hodnotou klimatického prvku. V prípade ročných maxím nie je ohrozená táto zásada, avšak v metodike nadprahových hodnôt je potrebné venovať definícii nezávislosti po sebe idúcich mimoriadnych udalostí veľkú pozornosť. Tiež treba venovať pozornosť aj odľahlým údajom.

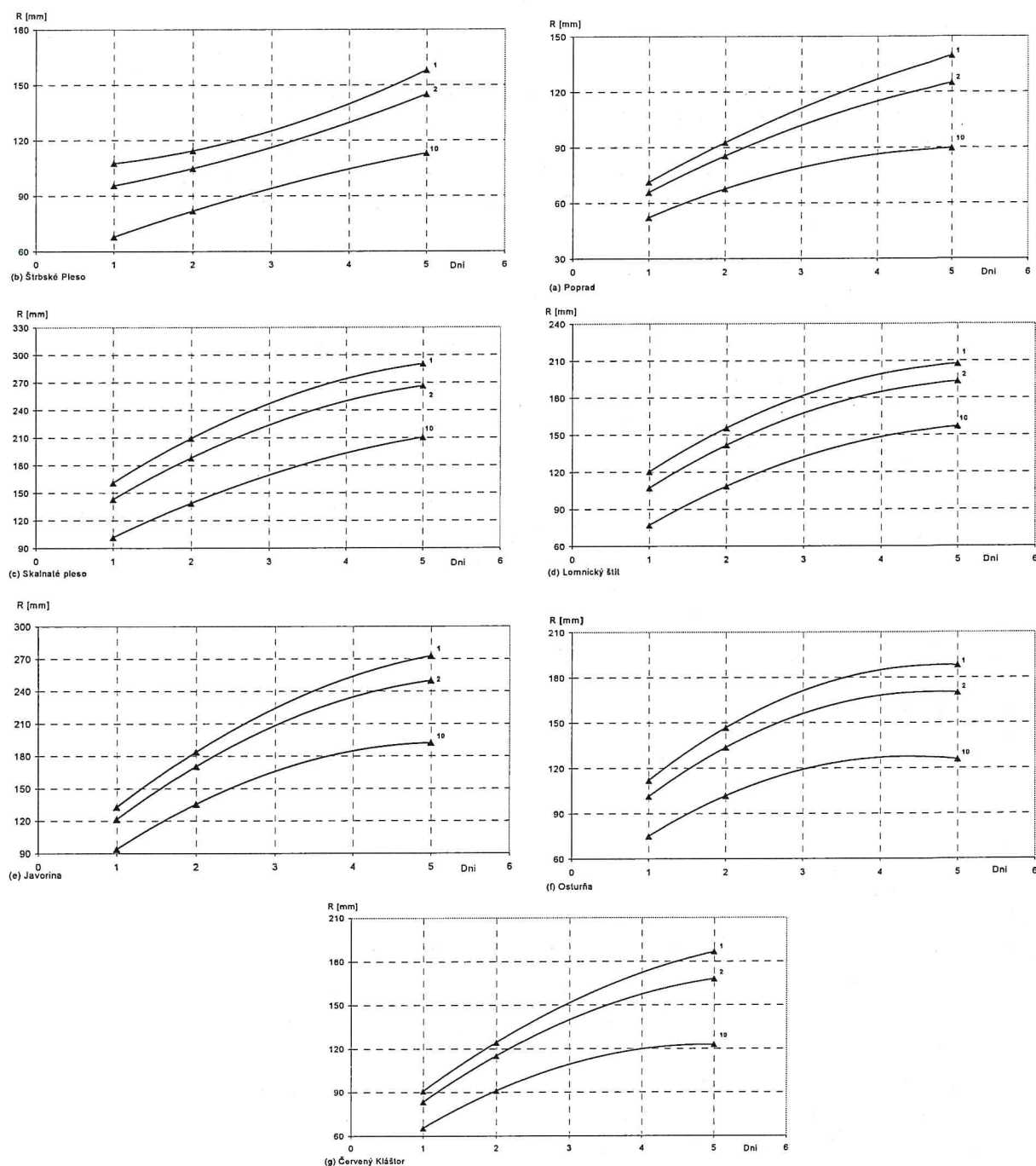
Vzhľadom na existenciu celého radu publikácií na danú tému, nebudeme v tejto podkapitole zachádzať do podrobností a odporúčame záujemcom siahnuť po nasledujúcich publikáciách: Dzubák (1969), Nosek (1972), Guide WMO (1983), Hosking a Wallis (1997), Storch et al. (2000), Wilks (2005), Gaál (2006) a i..

### 3. PRÍKLADY SPRACOVANIA

V tejto kapitole uvedieme iba niekoľko príkladov z posledných spracovaní štatistických charakteristík extrémov zrážok. Na príklade spracovania extrémov denných a viacdenných úhrnov zrážok je asi najlepšie vidieť celý rad problémov súvisiacich s korektným odhadom použiteľných návrhových charakteristík. Pod pojmom „korektné“ tu rozumieme také návrhové charakteristiky, ktorých hodnoty môžeme získať aplikáciou všetkých známych metód pri dodržaní podmienok, ktoré sa aplikáciou požadujú (dostatočná dĺžka radu, reprezentatívnosť polohy, overená časová homogenita radu, overená kvalita pozorovaní počas celého obdobia, podobnosť odhadu viacerými nezávislými metódami atď.).

Ako prvé sme vybrali spracovanie 1-, 2- a 5-denných úhrnov zrážok za 55 ročné obdobie 1951-2005, prezentované kolektívom autorov Faško et al., (2006, obr. 9). V prípade 5-denných úhrnov išlo o každodenný výskyt zrážok aspoň s úhrnom 0,1 mm. Je vidieť, že aj na pomerne malom území v okolí Vysokých Tatier, ide o dosť rozdielne návrhové hodnoty aj pri nevelkom rozdielne nadmorskej výšky. Úlohu tu určite zohrali náveterné efekty, ktoré najmä pri takých stanicích ako Javorina (severné úpätie V. Tatier) a Skalnaté Pleso (juhovýchodný svah V. Tatier) až takmer na dvojnásobok zdvihli návrhové hodnoty 5-denných úhrnov zrážok nielen v porovnaní s Popradom, ale aj so Štrbským Plesom.

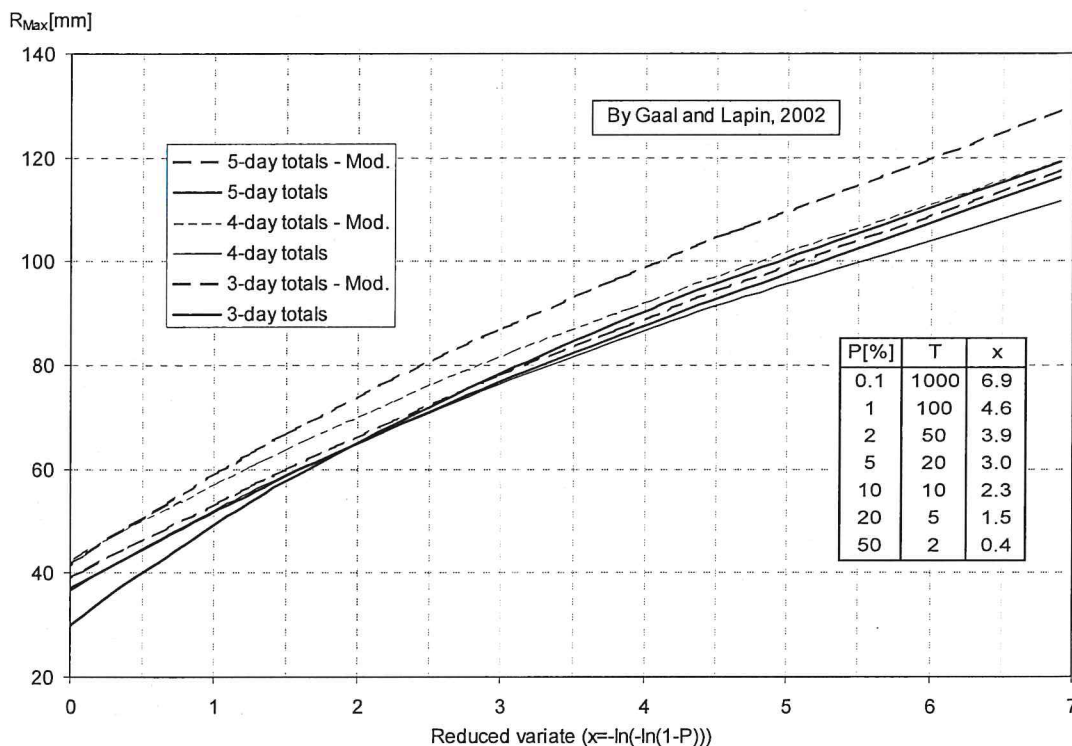




Obr. 9 Vypočítaná 1%, 2% a 10% zabezpečenosť prekročenia 1-, 2- a 5-denných úhrnov atmosférických zrážok [mm] podľa Pearsonovho rozdelenia pravdepodobnosti III. typu na meteorologických staniciach v okolí V. Tatier: Poprad (a), Štrbské Pleso (b), Skalnaté Pleso (c), Lomnický štít (d), Javorina (e), Osturňa (f) a Červený Kláštor (g) podľa meraných údajov v období rokov 1951-2005 (Faško et al., 2006, čiary spájajúce 1- až 5-denné návrhové charakteristiky sú iba orientačné a nevyjadrujú dobre údaje medzi hodnotami pre 1-, 2- a 5-denné úhrny)

Fig. 9 Design values daily precipitation totals  $R$  [mm] corresponding to the probability of occurrence of 1%, 2% and 10% at the stations around the High Tatras: Poprad (a), Štrbské Pleso (b), Skalnaté Pleso (c), Lomnický štít (d), Javorina (e), Osturňa (f) a Červený Kláštor (g) based on data observed in 1951-2005 and the Pearson III theoretical distribution function (Faško et al., 2006; the lines connected 1- to 5-day design values are only approximate and do not represent values between the 1-, 2- and 5-day totals correctly)

Pri 1- a 2-denných úhrnoch zrážok nie sú rozdiely až také veľké, čo súvisí s rozdielnym fyzikálnym mechanizmom vzniku a priebehu krátkodobých intenzívnych zrážok. Najvyššie 1- a 2-denné úhrny zrážok vznikajú obvykle pri intenzívnych búrkach, najmä v dôsledku ich viacnásobného opakovania na tom istom mieste. Čiary spájajúce hodnoty 1-, 2- a 5-denných úhrnov sú iba orientačné. V prípade 30- až 180-minútových úhrnov zrážok by bol vplyv náveterných efektov vysokých pohorí zrejme sotva badateľný, pretože tieto úhrny vznikajú iba pri izolovaných búrkach, ktoré nemajú takú tesnú väzbu na náveterné efekty (Šamaj a Valovič, 1973). Problému sa venovali aj iní autori, napríklad: Dzubák, 1969, Šamaj et al., 1985, Kyselý et al., 2004, Lapin et al., 2003a, Parajka et al., 2004.



Obr. 10 Základné a modifikované DDF-krivky (Mod. – s 1-denným prerušením úhrnov zrážok) 3- až 5-denných maxim úhrnov zrážok ( $R_{Max}$ ) pre teplý polrok (apríl-sept.) v Hurbanove v období 1901-2000 (Gaál et al., 2002ab)

Fig. 10 Basic and modified DDF-curves (Mod. – with 1-day gap in precipitation totals) of maximum 3- to 5-day precipitation totals ( $R_{Max}$ ) for warm half-year (April-Sept.) at the Hurbanovo Observatory in 1901-2000 (Gaál et al., 2002ab)

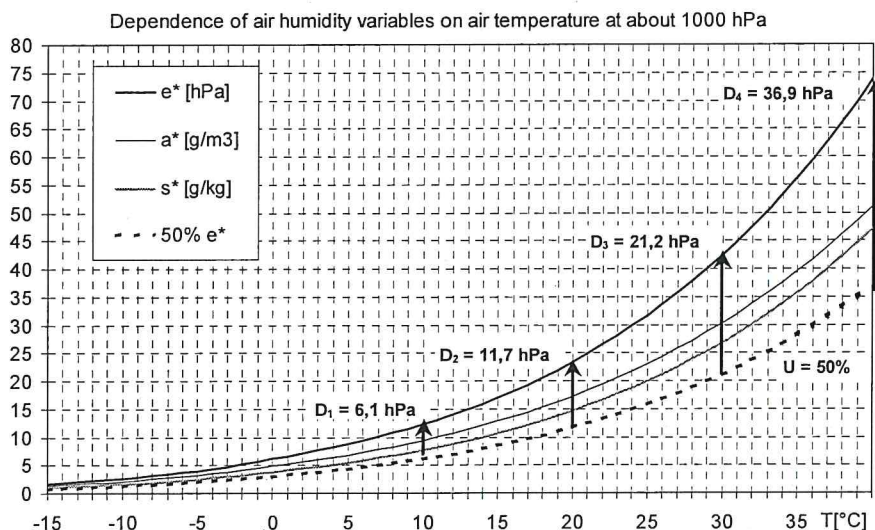
Na druhom príklade (obr. 10) uvádzame podobné spracovanie pre Hurbanovo, ktoré prezentovali Gaál et al., (2002, 2004). Je zrejme, že nižšie polohy na Slovensku majú odlišný zrážkový režim ako horské oblasti. Takmer každý frontálny systém má intenzívnejšie zrážkové prejavy na severe Slovenska v porovnaní s nížinami na juhu. Do určitej miery to platí aj o podmienkach vzniku a priebehu viacnásobných búrok v instabilnej vzduchovej hmote. Na juhu Slovenska sa v teplom polroku len veľmi zriedka vyskytujú kontinuálne zrážkové epizódy v trvaní viac ako 2 dni a aj v chladnom polroku je ich podstatne menej ako v horských oblastiach na severe Slovenska. Preto sme museli siahnuť k modifikácii metodiky výberu extrémov v prípade 3- až 5-denných úhrnov zrážok a pripustili sme aj jeden deň bez zrážok. Zvlášť veľké rozdiely medzi krivkami pre neprerušené a prerušené viacdenné úhrny zrážok sa vyskytli najmä v teplom polroku (IV-IX). Na nížinách je malý počet neprerušených viacdenných úhrnov a ich krivky sú preto menej spoľahlivé. Podobný postup zvolili Kohnová et al., (2005) pre 10-denné úhrny, pričom brali do úvahy aj podmienky evapotranspirácie a odtokové pomery počas 1- až 2-denných prerušení zrážok. Vychádzali z predpokladu, že krátke prerušenie zrážkovej epizódy má význam iba vtedy, ak je vtedy intenzívny výpar meniaci zásoby vody v pôde.



#### 4. SCENÁRE MOŽNÉHO VÝVOJA EXTRÉMOV

Do roku 2005 sme mali k dispozícii iba výstupy modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry (GCMs) v tvare denných a mesačných priemerov, no aj v tom prípade išlo o akési územné priemery na ploche asi 90 tisíc km<sup>2</sup> okolo uzlového bodu (Lapin et al., 2001b, 2004). Z takýchto podkladov bolo pomerne obtiažné zostrojiť scenáre extrémnych hodnôt alebo mimoriadnych udalostí s možným výskytom do roku 2100. V prípade scenárov výskytu mimoriadnych zrážkových udalostí sme preto postupovali kombinovanou metódou analógie s využitím prípadov z obdobia 1951-2000 a s predpokladom zmeny teplotných a vlhkosťových podmienok (Lapin a Hlavčová, 2003a, Lapin et al., 2003c).

Ak predpokladáme, že sa v budúcnosti vyskytnú synopticky podobné epizódy mimoriadneho počasia ako v minulosti, s tým rozdielom, že to bude pri teplote o 2 až 4 °C vyššej, tak sa nám núka hneď niekoľko reálnych možností: 1) Aj v budúcnosti sa vyskytnú v teplom polroku cyklónálne situácie s takmer 100% relatívnou vlhkosťou vzduchu v malej nadmorskej výške; 2) Aj v budúcnosti sa vyskytnú v teplom polroku instabilné situácie s dobrými podmienkami na vznik konvektívnej oblačnosti; 3) Aj v budúcnosti sa vyskytnú prípady dlhšie trvajúceho suchého počasia v lete, keď bude počas dňa relatívna vlhkosť vzduchu nižšia ako 50%. Každá z uvedených 3 alternatív môže významne zasiahnuť do vývoja extrémov počasia v nasledujúcich desaťročiach, čo môžeme zjednodušene celkom výstižne ilustrovať aj na obr. 11. Ak sa zvýši teplota vzduchu o 4 °C a súčasne bude v cyklóne relatívna vlhkosť vzduchu rovnaká ako v minulosti, tak vzrastie merná vlhkosť vzduchu o 25 až 40% (ešte o viac pri  $T < -6$  °C). Najmenej v rovnakom rozsahu sa zvýšia aj úhrny zrážok, ak sa bude vyskytovať rovnaký priemer rýchlosti výstupných pohybov ako v minulosti. Vyššia počiatková teplota vzduchu o 4 °C pri rovnakej relatívnej vlhkosti vzduchu znamená pre  $T = 24$  °C nielen väčší sytostný doplnok asi o 28% ale aj väčšiu energiu instability za predpokladu rovnakého labilného vertikálneho gradientu teploty vzduchu. Konečným dôsledkom bude jednak najmenej o 28% väčší potenciálny výpar ale tiež vyššia rýchlosť konvektívneho výstupu najmenej o 10% a zväčšenie turbulencie v oblakoch.



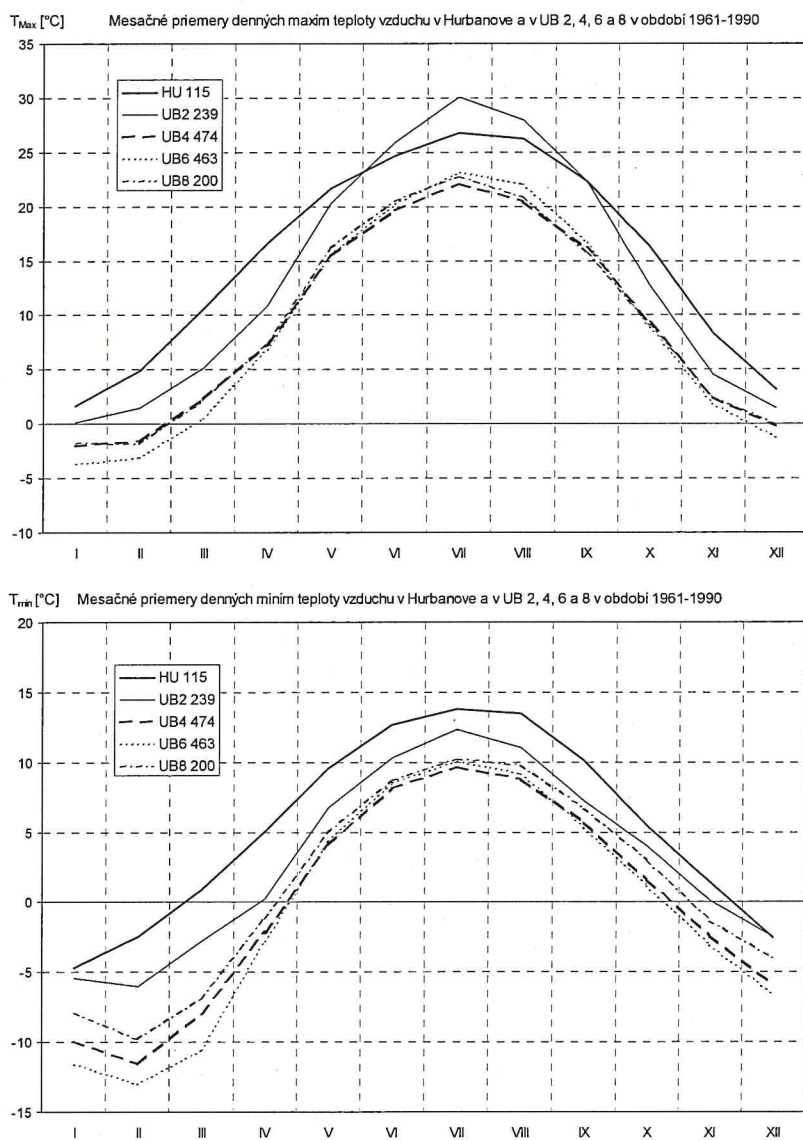
Obr. 11 Závislosť vlhkosti vzduchu od teploty vzduchu  $T$  v stave nasýtenia pre tlak vzduchu okolo 1000 hPa –  $e^*$  je parciálny tlak vodnej pary,  $a^*$  je absolútna vlhkosť,  $s^*$  je merná vlhkosť v g vodnej pary na kg vlhkého vzduchu,  $U = 50\%$  je relatívna vlhkosť vzduchu,  $D$  je sytostný doplnok pre  $U = 50\%$ , zvýšenie  $T$  z 20 na 24 °C znamená rast  $e^*$ ,  $s^*$  a  $D$  o 28% a  $a^*$  o 26% (Psychrometrické tabuľky, SHMÚ, 1989)

Fig. 11 Dependence of air humidity variables on air temperature  $T$  at saturation state and about 1000 hPa air pressure –  $e^*$  is water vapor pressure,  $a^*$  is absolute humidity,  $s^*$  is specific humidity in g of water vapor per kg of humid air,  $U = 50\%$  is relative air humidity,  $D$  is saturation deficit for  $U = 50\%$ ,  $T$  rise by 4 °C (from 20 to 24 °C) means  $e^*$ ,  $s^*$  and  $D$  increase by 28% and  $a^*$  increase by 26%

V roku 2007 sme získali nové výstupy niekoľkých GCMs, v ktorých sú už zahrnuté aj scenáre denných maxim a denných minim teploty vzduchu, ako aj iných prvkov vhodných na prípravu scenárov mimoriadnych meteorologických a hydrologických epizód. V tomto príspevku sa budeme venovať iba denným extrémom podľa kanadského modelu CGCM3.1 (Flato et al, 2001, Web, 2007), pričom po-



dobný postup môžeme aplikovať aj v prípade výstupov iných GCMs. V porovnaní s predchádzajúcimi verziami modelu CGCM1 a CGCM2, ktoré sme využili aj na prípravu scenárov pre Slovensko, má model CGCM3.1 výstupy v asi 4-krát hustejšej sieti uzlových bodov (UB, v okolí Slovenska je až 9 UB, tab. 2). Už na prvý pohľad je zrejmé, že ide o podstatne hustejšiu sieť UB a o ich presnejšiu výškovú lokalizáciu ako v prípade predchádzajúcich kanadských modelov. Pre nedostatok priestoru uvedieme iba porovnanie denných maxím a miním teploty vzduchu so stanicou Hurbanovo, UB 2, 4, 5, 6 a 8, denných úhrnov zrážok a denných priemerov mernej vlhkosti vzduchu v období 1961-1990 pre 9 UB tak, aby sme zistili možné rozdiely režimu týchto prvkov na Slovensku. UB 4 reprezentuje západ a UB 6 východ Slovenska, UB 2 charakterizuje približne klímu južnej časti Panónskej kotliny a UB 8 klímu južnej časti Poľska. Modifikáciu týchto výstupov pre lokality na Slovensku urobíme podrobnejšie až do roku 2100 v niektorom z najbližších príspevkov. Podobne ako v predchádzajúcich spracovaniach použijeme iba emisné scenáre SRES-A2 a SRES-B2, prípadne aj SRES-B1.



Obr. 12 Porovnanie mesačných priemerov denných maxím (hore) a denných miním (dole) teploty vzduchu podľa meraní v Hurbanove a v uzlových bodoch (UB) 2, 4, 6 a 8 (tab. 2) z výstupov modelu CGCM3.1 v období 1961-1990

Fig. 12 Comparison of monthly averages of daily maximum (top) and daily minimum (bottom) air temperatures measured at Hurbanovo (HU) and modeled by CGCM3.1 model for the grid points (UB) 2, 4, 6 and 8 (Table 2) in 1961-1990

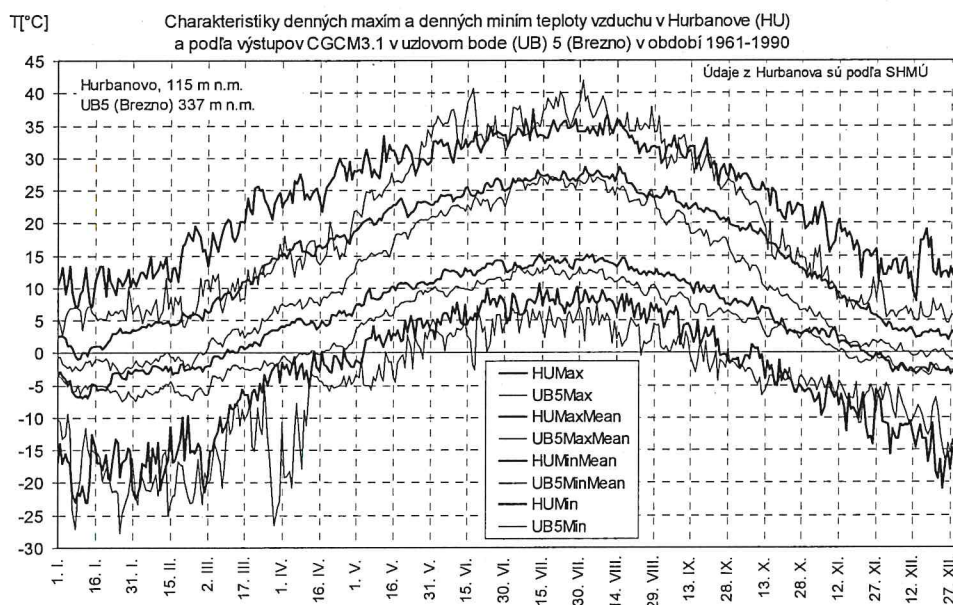
Tab. 2 Poloha uzlových bodov (UB) kanadského modelu CGCM3.1 v okolí Slovenska

Tab. 2 Geographical location of the grid points of the Canadian model CGCM3.1 in the close surrounding of Slovakia

| UB | Zem. dĺžka (°) | Zem. šírka (°) | Nadm. výška (m) | Blízke mesto    |
|----|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1  | 16,88          | 46,04          | 306,5           | Zagreb, Chorv.  |
| 2  | 19,69          | 46,04          | 239,0           | Subotica, Srb.  |
| 3  | 22,50          | 46,04          | 483,1           | Hunedoara, Rum. |
| 4  | 16,88          | 48,84          | 474,1           | Břeclav, ČR     |
| 5  | 19,69          | 48,84          | 336,7           | Brezno, SR      |
| 6  | 22,50          | 48,84          | 463,4           | Ubfá, SR        |
| 7  | 16,88          | 51,62          | 193,3           | Wroclaw, PL     |
| 8  | 19,69          | 51,62          | 199,7           | Radomsko, PL    |
| 9  | 22,50          | 51,62          | 216,4           | Lublin, PL      |

S výnimkou UB 4 (Břeclav) a UB 2 (Subotica) môžeme dokonca považovať aj nadmorskú výšku UB za vcelku reprezentatívnu. Nadmorská výška je určená stupňom zhladenia použitej topografie zemského povrchu v modeli, pričom v staršej verzii CGCM1 a CGCM2 model „nepoznal“ ani Panónsku kotlinu, Alpy tvorili tak spolu s Karpatami a Balkánskymi horami jedno ploché návršie v strednej Európe. Dá sa očakávať, že model CGCM3.1 bude lepšie simulovať aj režim atmosférických zrážok, vrátane náveterných a záveterných efektov. Preto tu uvádzame aspoň ukážku z analýzy režimu zrážok.

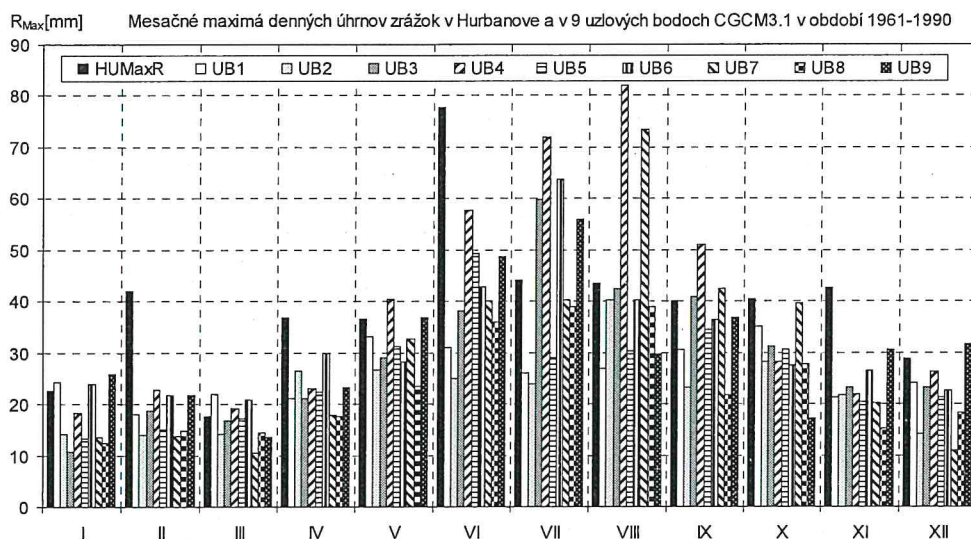
Po zhodnotení výstupov denných údajov teploty vzduchu jednoznačne vyplýva, že sú v lepšej zhode s meraniami na stanici Hurbanovo v porovnaní so všetkými doterajšími verziami kanadských a iných použitých modelov GCM. Naďalej ale zotrvala jedna nepresnosť, dotýkajúca sa ročného chodu v období od februára do začiatku mája, ktoré sa javí ako relatívne studené. Je to pravdepodobne ovplyvnené zvýšenou variabilitou teploty vzduchu na jar, keď v niektorých rokoch dochádza dokonca aj začiatkom apríla k poklesu denných minim teploty vzduchu až pod  $-20^{\circ}\text{C}$  v jednom roku, dokonca aj v južných uzlových bodoch (obr. 13). Napriek uvedenej skutočnosti nebudú žiadne väčšie problémy so štatistickou modifikáciou denných výstupov teploty vzduchu do jednotlivých staníc a výsledky budú zrejme hodnovernejšie ako v prípade modelov CGCM1 a CGCM2. Príklad ročného chodu neupravených hodnôt denných maxim a denných minim teploty vzduchu z modelu CGCM3.1 je na obr. 13.



Obr. 13 Porovnanie denných priemerov a extrémov denných maxim (hore) a denných minim (dole) teploty vzduchu podľa meraní v Hurbanove (HU, hrubšia čiara) a v uzlovom bode (UB) 5 (tab. 2) z výstupov modelu CGCM3.1 v období 1961-1990 (UB 5 sa nachádza neďaleko Brezna)

Fig. 13 Comparison of daily averages and extremes of daily maximum (top) and daily minimum (bottom) air temperatures measured at Hurbanovo (HU, solid line) and modeled by CGCM3.1 model for the grid point (UB) 5 (Table 2) in 1961-1990 (UB 5 lies in the centre of Slovakia)

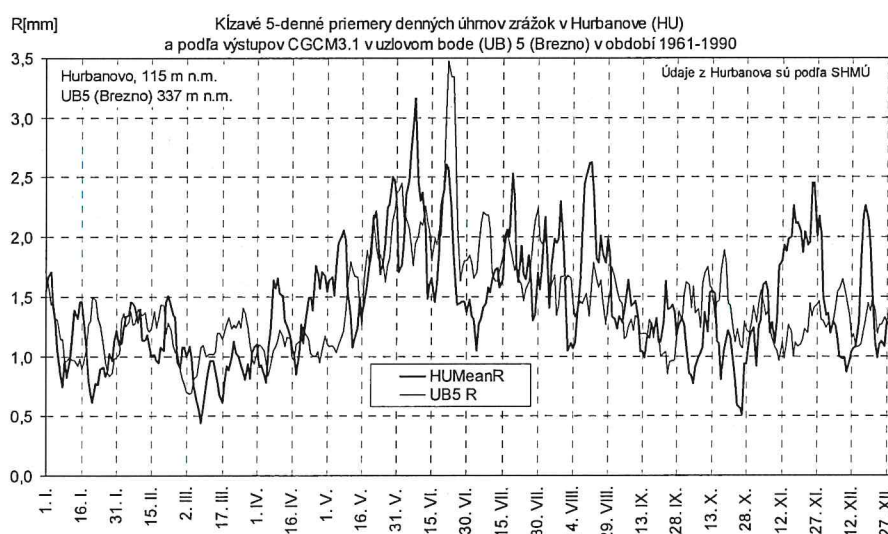




Obr. 14 Porovnanie mesačných maxim v denných úhrnoch zrážok podľa meraní v Hurbanove (HU, čierne stĺpce) a v uzlových bodoch (UB) 1 až 9 (tab. 2) z výstupov modelu CGCM3.1 v období 1961-1990 bez akejkoľvek modifikácie (UB 5 sa nachádza neďaleko Brezna)

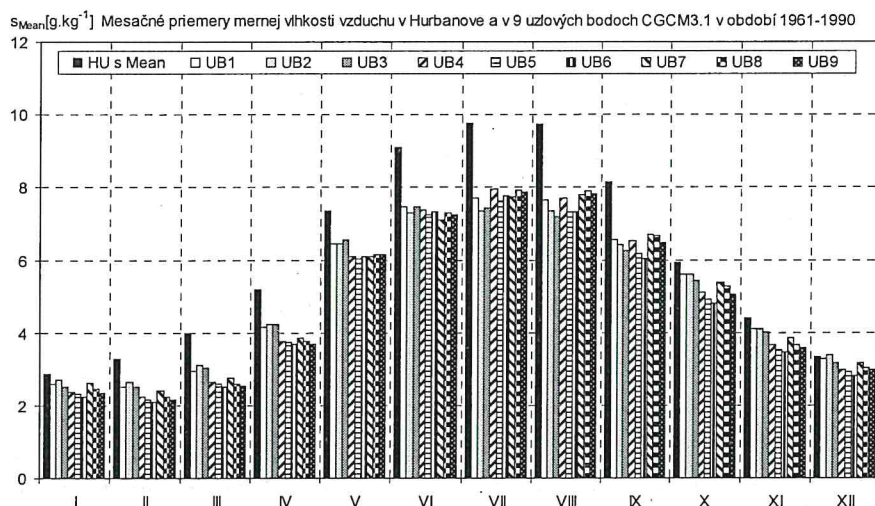
Fig. 14 Comparison of monthly maxima in daily precipitation totals measured at Hurbanovo (HU, black column) and modeled by CGCM3.1 model for the grid points (UB) 1 to 9 (Table 2) in 1961-1990, without any modification of CGCM outputs (UB 5 lies in the centre of Slovakia)

Z údajov znázornených na obr. 14 je zreteľne vidieť, že maximá denných úhrnov zrážok sú dobre porovnateľné s meranými hodnotami v Hurbanove, pričom je zohľadnená aj priestorová variabilita a závislosť od nadmorskej výšky. Na druhej strane je ale zrejmé, že extrémny denných úhrnov zrážok sú väčšinou relatívne nízke aj v porovnaní s Hurbanovom, lebo každý uzlový bod reprezentuje akýsi priemer z územia o rozlohe okolo 25 tisíc km<sup>2</sup>. Priemerné úhrny zrážok majú ročný chod úplne v súlade s meraniami na stanici Hurbanovo (obr. 15). Modifikáciu časových radov denných úhrnov zrážok budeme robiť do jednotlivých staníc vždy iba podľa výstupov z najbližších UB a predpokladáme, že na rozdiel oproti minulosti nebudeme mať s tým žiadne väčšie problémy.



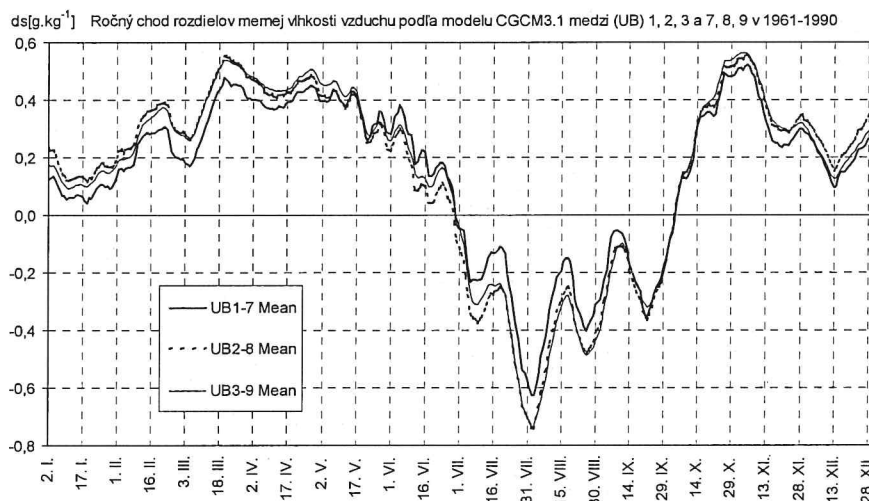
Obr. 15 Porovnanie denných priemerov úhrnov zrážok (vrátane dní bez zrážok) podľa meraní v Hurbanove (HU, hrubšia čiara) a v uzlovom bode (UB) 5 (tab. 2) z výstupov modelu CGCM3.1 v období 1961-1990 bez akejkoľvek modifikácie (UB 5 sa nachádza neďaleko Brezna)

Fig. 15 Comparison of daily averages of precipitation totals (including days with no precipitation) measured at Hurbanovo (HU, solid line) and modeled by CGCM3.1 model for the grid point (UB) 5 (Table 2) in 1961-1990, without any modification of CGCM outputs (UB 5 lies in the centre of Slovakia)



Obr. 16 Porovnanie mesačných priemerov mernej vlhkosti vzduchu podľa meraní v Hurbánove (HU, čierne stĺpce) a v uzlových bodoch (UB) 1 až 9 (tab. 2) z výstupov modelu CGCM3.1 v období 1961-1990 bez akejkoľvek modifikácie (UB 5 sa nachádza neďaleko Brezna)

Fig. 16 Comparison of monthly mean specific humidity measured at Hurbánovo (HU, black column) and modeled by CGCM3.1 model for the grid points (UB) 1 to 9 (Table 2) in 1961-1990, without any modification of CGCM outputs (UB 5 lies in the centre of Slovakia)



Obr. 17 Porovnanie denných priemerov mernej vlhkosti vzduchu v južných uzlových bodoch (UB) 1, 2 a 3 v severných UB 7, 8 a 9 (tab. 2) z výstupov modelu CGCM3.1 v období 1961-1990 bez akejkoľvek modifikácie (hladené 15-denným kľzavým priemerom)

Fig. 17 Comparison of daily mean specific humidity modeled by CGCM3.1 model differences between the southern grid points (UB) 1, 2 and 3 and the northern ones UB 7, 8 and 9 (Table 2) in 1961-1990, without any modification of CGCM outputs (smoothed by 15-day running average)

Na rozdiel od predchádzajúcej verzie kanadského modelu CGCM2 (Lapin et al. 2002, 2004) musíme vysloviť veľkú spokojnosť s výstupmi mernej vlhkosti vzduchu. Z obr. 16 je zjavné, že výstupy zo všetkých uzlových bodov modelu CGCM3.1 sú úplne konzistentné s meraniami na stanici Hurbánovo (treba pri tom prihliadať na rozdielnu nadmorskú výšku a rozdielne hodnoty teploty vzduchu vo výstupoch CGCM3.1). Takto získame aj porovnateľné hodnoty relatívnej vlhkosti vzduchu, čo pri CGCM2 nebolo reálne. Na obr. 17 sme sa pokúsili zistiť nakoľko reprezentuje modelový výstup vlhkosti vzduchu z CGCM3.1 priestorové rozdiely ročného chodu v strednej Európe. Rozdiely v uzlových bodoch južných (UB 1, 2 a 3) a severných (UB 7, 8 a 9) by mali vyjadrovať skutočnosť, že juh strednej Európy má na jeseň, v zime a na jar vyššiu a v lete nižšiu mernú vlhkosť ako sever. Ako je vidieť, tento režim je veľmi dobre vyjadrený. Pretože sme zistili aj pomerne dobrý súlad výstupov



globálneho žiarenia s meraniami v Hurbanove (nie je tu prezentované), predpokladáme, že nebudeme mať závažné problémy ani s štatistickým a dynamickým downscaling-om ostatných požadovaných klimatických prvkov ako scenárov zmeny klímy do roku 2050, prípadne aj do roku 2100. Popri emisnom scenári SRES-A2 využijeme vo výstupoch CGCM3.1 aj alternatívny optimistický scenár SRES-B1, ktorý má podobné parametre ako doteraz aplikovaný scenár SRES-B2 (má ešte menšie oteplenie po roku 2050).

## 5. ZÁVER

V príspevku sme sa snažili poukázať na rad problémov súvisiacich so spoľahlivým výberom a spracovaním extrémnych prípadov počasia. Opierali sme sa predovšetkým o publikované výsledky slovenských autorov v posledných rokoch a o údaje z našej najkvalitnejšej stanice Hurbanovo (SHMÚ, 115 m n. m., od 1871). Je zrejmé, že sme nevyčerпали všetky možnosti a riziká potenciálnych chýb a nepresností pri takomto spracovaní. Stručne ich môžeme zhrnúť takto: 1) Extrémy počasia musíme predovšetkým správne definovať, vybrať a testovať, inak sú výsledky spracovania nespoľahlivé; 2) Na spracovanie môžeme použiť niekoľko teoretických štatistických rozdelení, uprednostňujeme trojparametrické; 3) Doba opakovania návrhových hodnôt  $t$  by nemala prekročiť trojnásobok počtu rokov pozorovaní  $n$ , spoľahlivejšie sú však iba hodnoty  $t \leq n$ ; 4) Komplexné prípady mimoriadneho počasia (sucho, riziko lesných požiarov...) vyberáme veľmi starostlivo, inak nezískame z ich štatistického spracovania použiteľné výsledky; 5) Zvláštnu pozornosť venujeme stacionarite. Aj z takéhoto stručného prehľadu je zrejmé, že nastupujúca zmena klímy môže zásadným spôsobom ovplyvniť využiteľnosť doteraz spracovaných návrhových hodnôt extrémov klimatických prvkov na strane jednej a nastoľuje potrebu modifikácie doterajších metód štatistického spracovania na strane druhej. Z nášho prehľadu vyplýva aj poznatok, že je potrebné kriticky sa postaviť k doteraz publikovaným návrhovým hodnotám extrémov, lebo sa neraz pri spracovaní nedodržali elementárne zásady výberu a testovania časových radov údajov a tiež ich štatistického spracovania. Interpretácia a praktické využitie takých výsledkov môžu byť preto v konečnom dôsledku aj značne nepresné.

Iné klimatické prvky boli štatisticky spracované z pohľadu možnej zmeny extrémov napríklad v publikáciách: Alila, 1999, Castellarin et al., 2001, Easterling et al., 2000, Faško et al., 2003, Fowler et al., 2003, Szolgay et al., 2003, Majerčáková et al., 2004, Lapin et al., 2005, 2007 a i. podľa zoznamu literatúry. V niektorých prácach sme sa venovali aj možnosti konštrukcie scenárov vývoja extrémov v súvislosti s klimatickou zmenou (Lapin et al., 2001b, 2002, 2003ab, 2004).

V závere príspevku sme uviedli základné informácie o výstupoch najnovšieho kanadského modelu CGCM3.1 z roku 2007, ktorý predpokladáme využiť aj na modifikáciu scenárov extrémnych prípadov počasia do roku 2100. Ukazuje sa, že výstupy z tohto modelu sú v referenčnom období 1961-1990 relatívne v oveľa lepšej zhode s meranými údajmi v porovnaní s predchádzajúcimi verziami modelu. Podobným spôsobom vyberieme aj výstupy iného modelu na prípravu scenárov zmeny klímy.

**Podakovanie:** Časť výsledkov v tomto príspevku bola prevzatá z podkladov riešených projektov VEGA No. 1/1042/04, APVT 51-017804 a tiež boli využité údaje zo siete staníc SHMÚ. Autori ďakujú za poskytnuté podklady.

## LITERATÚRA

- ALILA, Y., 1999: A hierarchical approach for the regionalization of precipitation annual maxima in Canada, J. Geophys. Res., 104(D24), 31,645–31,656.
- CASTELLARIN, A., BURN, D.H., BRATH, A. 2001: Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis. J. Hydrol., 241, 270-287.
- CEBULAK, E., FAŠKO, P., LAPIN, M., ŠTASTNÝ, P., 2000: Extreme precipitation events in the Western Carpathians. In.: Prace geograficzne - Zeszyt 108, Images of Weather and Climate, Cracow, Inst. of Geography, Jagelonian Univer., Cracow, 117-124.
- COLES, S., 2001: An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer-Verlag, London, 222 pp.
- DZUBÁK, M., 1969: Stanovenie zákona maximálnych denných zrážkových úhrnov pomocou globálnych čiar prekročenia. *Vodohospodársky časopis SAV* 17(3): 209-225.

- EASTERLING, D.R., EVANS, J.L., GROISMAN, P.Y., KARL, T.R., KUNKEL, K.E., AMBENJE, P., 2000: Observed variability and trends in extreme climate events: A review. *Bulletin of American Meteorological Society* 81(3): 417-425.
- FAŠKO, P., LAPIN, M., ŠŤASTNÝ, P., VIVODA, J., 2000: Maximum daily sums of precipitation in Slovakia in the second half of 20<sup>th</sup> century. In.: *Prace geograficzne - Zeszyt 108, Images of Weather and Climate*, Cracow, Inst. of Geography, Jagellonian Univer., Cracow, 131-138.
- FAŠKO, P., LAPIN, M., ŠŤASTNÝ, P., 2002: Zhodnotenie vysokých denných úhrnov zrážok na Slovensku. *Zb. z konferencie „100. výročie narodenia akademika Duba“*, SHMÚ, 10. 10. 2002, 37-38.
- FAŠKO, P., LAPIN, M., SEKÁČOVÁ, Z., ŠŤASTNÝ, P., 2003: Extraordinary climatic anomaly in 2003. *Meteorologický časopis*, Vol. VI, No. 3, 2003, 3-7.
- FAŠKO, P., ŠŤASTNÝ, P., VIVODA, J., 2003: The orography influence on the maximum daily sums of precipitation in Slovakia. 27<sup>th</sup> Int. Conf. on Alpine Meteorol., May 2003, Brig, Switzerland.
- FAŠKO, P., GAÁL, L., LAPIN, M., PECHO, J., ŠŤASTNÝ, P., 2006: Príspevok k problematike odhadu návrhových hodnôt denných úhrnov zrážok. (K nedožitým 80. narodeninám prof. Milana Dzubáka). *Zborník zo seminára*. SHMÚ, Bratislava 2006, 19-26.
- FLATO, G.M. AND G.J. BOER, 2001: Warming Asymmetry in Climate Change Simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 195-198.
- FOWLER, H.J., KILSBY, C.G., 2003: A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. *International Journal of Climatology* 23(11): 1313-1334.
- GAÁL, L., LAPIN, M., 2002a: Extreme several day precipitation totals at the Hurbanovo observatory (Slovakia) during the 20th century. *Contr. to Geophysics and Geodesy*, Vol. 32, No. 3, 2002, 197-213.
- GAÁL, L., LAPIN, M., 2002b: Extrémne viacdenné zrážkové úhrny v Hurbanove v 20. storočí. In.: Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds): *Zb. z XIV. Česko-slovenskej bioklimatologickej konf. „Bioklima-Prostředí-Hospodářství“*. Lednice 2.-4.9.2002, text na s. 97-108 na CD ISBN 80-85813-99-8.
- GAÁL, L., LAPIN, M., FAŠKO, P., 2004: Maximálne viacdenné úhrny zrážok na Slovensku. In.: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed): *Seminář „Extrémy počasí a podnebí“*, Brno, 11. března 2004, ISBN 80-86690-12-1, 15 strán na CD
- GAÁL, L., LAPIN, M., SZOLGAY, J., 2005: Regional frequency analysis of *k*-day precipitation totals in the Slovak Republic – delineation of homogeneous groups. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 03408, 2005, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-03408, © EGU 2005, ISSN: 1029-7006.
- GAÁL, L., 2006: Methods for estimation of statistical characteristics of design *K*-days precipitation totals in Slovakia (in Slovak), PhD. Thesis, Comenius University Bratislava, Slovakia, 227 p.
- GROISMAN, P.Y. ET AL., 1999: Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Climatic Change* 42(1): 243-283.
- Guide WMO, No. 100, 1983: Guide to climatological practices. Second Edition. WMO, Geneva Switzerland.
- HEINO, R. ET AL., 1999: Progress in the study of climatic extremes in Northern and Central Europe. *Climatic Change* 42(1): 151-181.
- HOSKING, J.R.M., WALLIS, J.R., 1997: *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge; New York; Oakleigh. 224 p. ISBN 0-521-43045-3.
- IPCC, 1998: The Regional Impacts of Climate Change. An Assessment of Vulnerability. Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H., (eds.). A Special Report of IPCC WG II. Cambridge University Press, 518 pp.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge Univ. Press, UK 2001, 944 pp.
- IPCC, 2007: IPCC Fourth Assessment Report, WG1, The Physical Science Basis, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch), 996 pp.
- KHARIN, V.V., ZWIERS, F.W., 2000: Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. Clim.*, 13, 3760-3788.
- KLEIN TANK, A.M.G., KÖNNEN, G.P., 2003: Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. *Journal of Climate* 16(22): 3665-3680.
- KOHNÓVÁ, S., SZOLGAY, J., 2003: Regional estimation of the index flood and the standard deviation of the summer floods in the Tatry mountains. *J. Hydrol. Hydromech.*, 51(4), 241-255.
- KOHNÓVÁ, S., SZOLGAY, J., GAÁL, L., 2004: Estimation of design 5-day maximum precipitation totals in the upper Hron region. *Meteorological Journal*, 7(2), 79-83.
- KOHNÓVÁ, S., LAPIN, M., SZOLGAY, J., GAÁL, L., 2005: Methodology for the selection of 10-day maximum precipitation totals and their statistical analysis in the upper Hron region. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, Vol.35/3, 2005, 299-318.



- KOHNŮVÁ, S., SZOLGAY, J., SOLÍN, E., HLAŤOVÁ, K., 2006: Regional methods for prediction in ungauged basins. Key Publishing, Ostrava, 113 pp.
- KUMAR, R., CHATTERJEE, CH., 2005: Regional flood frequency analysis using L-moments for North Brahmaputra region of India. *J. Hydrologic Engrg.*, 10(1), 1-7.
- KYSELÝ, 2002: Comparison of extremes in GCM-simulated, downscaled and observed central-European temperature series. *Clim. Res.*, 20, 211-222.
- KYSELÝ, J., PICEK, J., 2006: Regional growth curves and improved design value estimates of extreme precipitation events in the Czech Republic. *Clim. Res.*, 33, 243-255.
- KYSELÝ, J., PICEK, J., HUTH, R., 2004: Regional analysis of extreme precipitation events in the Czech Republic. In Conference proceedings - International Bioclimatological Workshop „Climate Change - Weather Extremes - Organisms and Ecosystems“, Viničky, 23-26. August 2004. Ed. B. Šiška. Slovak Agricultural University, Nitra. p. 34. ISBN 80-8069-402-8. [9 p. on CD-ROM].
- LAPIN, M., TOMLAIN, J., 2001a: Všeobecná a regionálna klimatológia. Vyd. UK Bratislava, 184 s.
- LAPIN, M., DAMBORSKÁ, I., MELO, M., 2001b: Scenarios of Several Physically Plausible Climatic Elements (Scenáre súborov viacerých vzájomne fyzikálne konzistentných klimatických prvkov). Národný klimatický program SR, VI, No. 11, SHMÚ a MŽP SR, Bratislava, 5-30. (in Slovak with English summary)
- LAPIN, M., MELO, M., 2002: Scenáre časových radov 10 klimatických prvkov pre obdobie 2001-2090 podľa modelov CCCM2000 a GISS98. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds): Zborník z XIV. Česko-slovenskej bioklimatologickej konferencie „Bioklima-Prostředí-Hospodářství“. Lednice 2.-4.9.2002, plný text na s. 254-266 na CD ISBN 80-85813-99-8.
- LAPIN, M., 2003: Zmeny meteorologických podmienok rizika povodní v meniacej sa klíme. Životné prostredie, Vol. XXXVII, No. 4, 2003, 184-190.
- LAPIN, M., HLAŤOVÁ, K., 2003a: Changes in Summer Type of Flash Floods in the Slovak Carpathians due to Changing Climate. Proceedings of the Int. Conf. on Alpine Meteorol. and MAP2003 Meeting, Brig, Switzerland, 19.-23.V.2003, Publ. Of MeteoSwiss, No. 66, 105-108.
- LAPIN, M., MELO, M., 2003b: Možnosti konštrukcie scenárov denných hodnôt a extrémov klimatických prvkov z výstupov najnovších modelov GCMs, Zborník z medzinárodnej konferencie: Funkcia energetickej a vodnej bilancie v bioklimatických systémoch v Račkovej doline, 2.-4. IX. 2003, CD ISBN 80-8069-244-0.
- LAPIN, M., HLAŤOVÁ, K., PETROVIČ, P., 2003c: Vplyv klimatickej zmeny na hydrologické procesy, Zborník z medzinárodnej konferencie: Hydrológia na prahu 21. st. vízie a realita v Smoleniciach, 5.-7. V. 2003, na CD ISBN 80-89139-00-0.
- LAPIN, M., MELO, M., DAMBORSKÁ, I., GERA, M., 2004: Scenáre úhrnov zrážok počas extrémnych zrážkových situácií na Slovensku. In.: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed): Seminár „Extrémy počasi a podnebí“, Brno, 11. března 2004, ISBN 80-86690-12-1, 18 strán na CD.
- LAPIN, M., ŠŤASTNÝ, P., CHMELÍK, M., 2005: Detection of climate change in the Slovak mountains. *Croatian Meteorological Journal*, Vol. 40, 101-104.
- LAPIN, M., FAŠKO, P., PECHO, J., 2007: Snow cover variability and trends in the Tatra mountains in 1921-2006. In.: Proc. Of the XXIXth ICAM Conference, June 4-8, 2007, Chambery, 683-686.
- MAJERČÁKOVÁ, O., ŠŤASTNÝ, P., FAŠKO, P., 2004: Prehľad mimoriadnych hydrologických a meteorologických situácií za ostatné roky. *Vodohospodársky spravodajca*, 47, č. 2-3, 10-11.
- NOSEK, M., 1972: Metody v klimatologii. Praha, Academia 1972. 431s.
- PARAJKA, J., KOHNŮVÁ, S., SZOLGAY, J., 2004: Mapping the maximum daily precipitation totals in the upper Hron region using stochastic interpolation methods. *Acta Hydrologica Slovaca*, 5/1: 78 – 87, (in Slovak).
- Psychrometrické tabuľky, 1989. Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava.
- SMITHERS, J.C., SCHULZE, R.E., 2001: A methodology for the estimation of short duration design storms in South Africa using a regional approach based on L-moments. *J. Hydrol.*, 241, 42-52.
- STORCH, H., ZWIERS, F.W., 2000: Statistical Analysis in Climate Res. Cambridge Univ. Press, 484 pp.
- SZOLGAY, J., HLAŤOVÁ, K., LAPIN, M., DANIHLÍK, R., 2003: Impact of climate change on mean monthly of runoff in Slovakia. *Meteorologický časopis*, Vol. VI, No. 3, 2003, 9-21.
- ŠAMAJ, F., VALOVIČ, Š., BRÁZDIL, R., 1985: Denné úhrny zrážok s mimoriadnou výdatnosťou v ČSSR v období 1901-1980. In: Zborník prác SHMÚ, zväzok 24. Alfa, Bratislava. 9-113.
- ŠAMAJ, F., VALOVIČ, Š., 1973: Intenzity krátkodobých dažďov na Slovensku. In.: Zb. prác HMÚ Bratislava. SPN, Bratislava.
- WILKS, D., 2005: Statistical methods in the atmospheric sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press, San Diego. 648 pp.
- WEB: <http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/models/cgcm3.shtml> (XII. 2007)



# INTRODUCTION TO SCENARIOS OF EXTREME WEATHER EVENTS DESIGN AND SELECTED RESULTS OF ELABORATION

<sup>(1)</sup>Lapin, M., <sup>(1)</sup>Damborská, I., <sup>(1)</sup>Drinka, R., <sup>(3)</sup>Faško, P., <sup>(2)</sup>Gaál, L. and <sup>(1)</sup>Melo, M.

<sup>(1)</sup>Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Bratislava  
[lapin@fmph.uniba.sk](mailto:lapin@fmph.uniba.sk), [damborska@fmph.uniba.sk](mailto:damborska@fmph.uniba.sk), [drinka@fmph.uniba.sk](mailto:drinka@fmph.uniba.sk), [melo@fmph.uniba.sk](mailto:melo@fmph.uniba.sk)  
<sup>(2)</sup>Civil Engineering Faculty, Slovak University of Technology, Bratislava, [ladislav.gaal@svf.stuba.sk](mailto:ladislav.gaal@svf.stuba.sk)  
<sup>(3)</sup>Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, [pavol.fasko@shmu.sk](mailto:pavol.fasko@shmu.sk)

## EXTENDED ABSTRACT

Scenarios of climate change designed as deviations from long-term averages have been calculated for some reference period and at present they are being replaced gradually by time series of daily and monthly data representing means, variability and trends, extremes and unusual meteorological events. Any of these scenarios do not represent weather forecast for specific concrete days or months. Basic approaches and statistically based methods of extreme climatologic characteristics definition, selection, testing and elaboration, including short-term to several days unusual weather events scenarios design are presented in this study. The scenarios design is usually realized according to users demand for time frames (2010, 2030, 2075 etc.) and periods (2010-2040, 2036-2065 etc.) until the horizon 2100. Most of General Circulation Models (GCMs) suppose an increase of annual mean temperature for Slovakia by 2 to 4 °C during the period 2001 – 2100, small decrease of annual precipitation in southern and small increase in northern Slovakia, increase in winter and decrease in summer precipitation totals, decrease of relative air humidity and snow cover and increase of potential evaporation in the lowlands etc. Quite unknown are the changes in weather variability, there are some indices of increase in weather extremes range.

Some precipitation and temperature characteristics of extremes measured at the Hurbanovo Meteorological Observatory (SW Slovakia, 115 m a.s.l.) and unusual precipitation events from all Slovakia are shown there as examples (Figures 2 to 9, Table 1). The selection of extremes in the form of time series for statistical elaboration has to fulfill several preconditions: 1) Representativeness; 2) Homogeneity; 3) Random selection; 4) Independent selection. Any statistical elaboration of incorrectly designed time series cannot bring usable results for the practice. There are quite good possibilities to prepare time series of about 100-year length from several elements in Slovakia. It seems that at air temperature even 40-year length is suitable, but at precipitation, snow cover and air humidity at least 60-70 year series are needed.

In Slovakia we have long precipitation measurements time series with higher quality, at 203 stations since 1901 and at 557 stations since 1950. Because of only 49,036 sq km of territory and medium complex terrain, this number of stations enables to prepare valuable design values for specific precipitation events with long return periods (50, 100, 200 years). Upwind and lee effects modify the precipitation distribution curves especially for several day and monthly totals. The lowland stations have only small number of events with continual precipitation of three and more days, that is why modified method of such events selection was designed. See Figures 9 and 10.

Figures 12 to 17 show selected information from the Canadian CGCM3.1 outputs testing before the extreme weather event scenarios designing for Slovakia. The GCM outputs of daily time series enable to construct series of daily extreme values as well as the short events of unusual weather with duration of several days. This procedure needs to apply several physically plausible variables from the GCM outputs tested on climatological reliability according to observed data in the control period (1961-1990 in this case). These tests showed only insignificant deviations of modeled (by CGCM3.1) and observed climate (Hurbanovo) in the control period, so the needed modification of the GCM outputs will not result in serious physical plausibility distortion in designed scenarios. Based on this method and at least one another GCM the scenarios of daily data extremes for individual variables and the complex climatological elements will be presented in some of next paper (air temperature maxima and minima, droughts, heat and cold waves, K-day precipitation etc.).

**Keywords:** meteorological extremes, extreme weather events, statistical elaboration, climatic scenarios.



# OBDOBIA S NEDOSTATKOM ATMOSFÉRICKÝCH ZRÁŽOK NA SLOVENSKU

<sup>(1)</sup>Pecho, J., <sup>(1)</sup>Faško, P., <sup>(2)</sup>Drinka, R., <sup>(1)</sup>Kajaba, P., <sup>(1)</sup>Šťastný, P.

<sup>(1)</sup> Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava 37  
[jozef.pecho@shmu.sk](mailto:jozef.pecho@shmu.sk), [pavol.fasko@shmu.sk](mailto:pavol.fasko@shmu.sk), [peter.kajaba@shmu.sk](mailto:peter.kajaba@shmu.sk), [pavel.stastny@shmu.sk](mailto:pavel.stastny@shmu.sk)

<sup>(2)</sup> Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie (KAFZM), FMFI UK,  
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, [drinka@fmph.uniba.sk](mailto:drinka@fmph.uniba.sk),

## ÚVOD

Geografická poloha Slovenska vytvára predpoklady pre existenciu dočasného nedostatku atmosférických zrážok, ktorý môže predovšetkým v prechodných ročných obdobiach a v lete spôsobiť sucho. Nedostatok, ale aj prebytok zrážok sú problémy, ktoré spôsobujú stále častejšie a väčšie škody.

Dlhé časové rady denných úhrnov zrážok, ktoré sú k dispozícii od konca 19., resp. začiatku 20. storočia, umožnili uskutočniť na Slovensku analýzu období s nedostatkom zrážok. Meteorologické stanice, z ktorých boli získané údaje o denných úhrnoch zrážok, sú rozmiestnené po celom území Slovenska v rôznych prírodných podmienkach a ich počet je väčší ako 10 (Tab. 1, Obr. 1). Pri riešení tejto problematiky sme sa sústredili na trendy a častosť výskytu období s nedostatkom zrážok, ich ročný režim a regionálny rozsah.

Na území Slovenska patria z tohto pohľadu medzi potenciálne ohrozené oblasti predovšetkým južné regióny Slovenska. Skúsenosti, hlavne z posledného štvrtstoročia, však naznačujú, že riziko výskytu nedostatku zrážok pravdepodobne bude rásť aj v ostatných regiónoch Slovenska a nezanedbateľný bude aj vzrastajúci regionálny rozsah suchých období.

## METODIKA

Pre stanovenie období s nedostatkom atmosférických zrážok je okrem ročného režimu a regionálneho aspektu ich výskytu dôležité aj stanovenie kritérií na ich určenie.

V priebehu roka sa na väčšine územia Slovenska výskyt období s nedostatkom zrážok sústreďuje do prechodných ročných období, najmenej pravdepodobný je ich výskyt v letných mesiacoch, predovšetkým v júni a čiastočne aj v júli. Toto pravidlo je najviac narušované v najjužnejších regiónoch Slovenska, na juhu Podunajskej nížiny. V týchto oblastiach sa môže obdobie s nedostatkom zrážok vyskytnúť približne s porovnateľnou pravdepodobnosťou približne počas celého roka. Na ostatnom území Slovenska pomerne pravidelný výskyt búrok v lete toto neumožňuje. Sucho, v zmysle nedostatku vlhky, však v lete existuje aj v týchto ostatných regiónoch Slovenska, pretože užitočnosť vody z búrkových lejakov je nízka a vysoká teplota vzduchu, menej oblačnosti, častejší slnečný svit a vietor pôsobia výsušne aj mimo južných oblastí Slovenska.

Tab. 1 Geografická poloha vybraných meteorologických staníc  
 Tab. 1 Geographical location of selected meteorological station

| Názov stanice        | Nadmorská výška<br>[m n.m.] | Geografická šírka<br>[stupne, minúty, sekundy] | Geografická dĺžka<br>[stupne, minúty, sekundy] |
|----------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Beňuš                | 550                         | 48° 49' 49"                                    | 19° 45' 36"                                    |
| Bratislava-Koliba    | 287                         | 48° 10' 07"                                    | 17° 06' 38"                                    |
| Hurbanovo            | 115                         | 47° 52' 23"                                    | 18° 11' 39"                                    |
| Kremnica             | 580                         | 48° 42' 38"                                    | 18° 55' 09"                                    |
| Liptovský Hrádok     | 640                         | 49° 02' 21"                                    | 19° 43' 31"                                    |
| Medzilaborce         | 305                         | 49° 15' 12"                                    | 21° 54' 50"                                    |
| Oravská Lesná        | 780                         | 49° 22' 06"                                    | 19° 10' 59"                                    |
| Rimavská Sobota      | 215                         | 48° 22' 26"                                    | 20° 00' 38"                                    |
| Senica               | 195                         | 48° 40' 50"                                    | 17° 20' 37"                                    |
| Štrbské Pleso        | 1354                        | 49° 07' 26"                                    | 20° 04' 09"                                    |
| Trebišov (Milhostov) | 104                         | 48° 40' 05"                                    | 21° 44' 05"                                    |

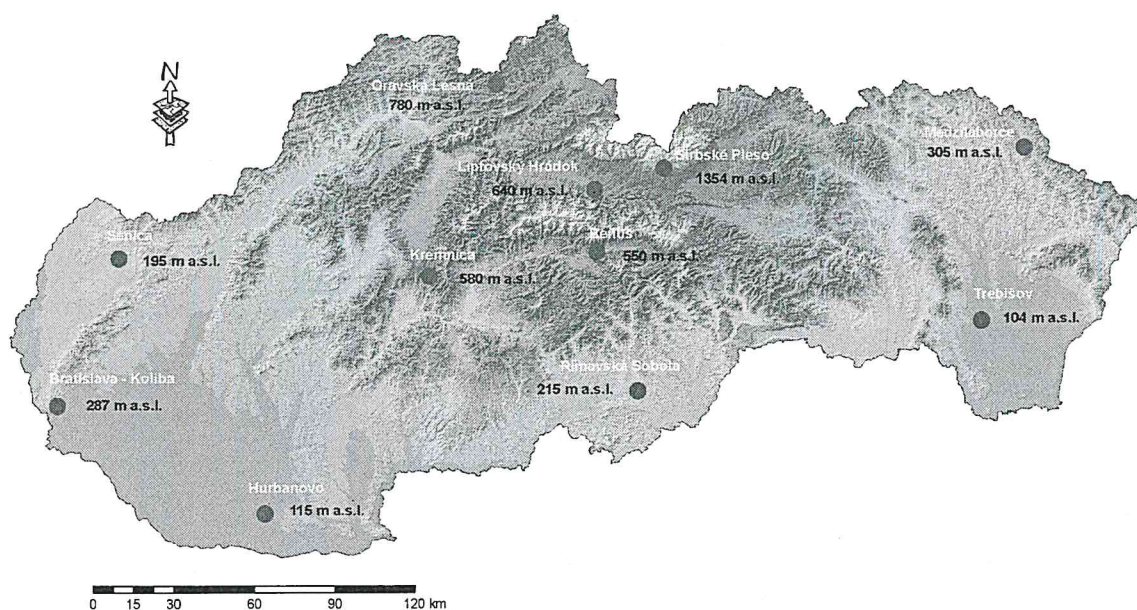
Častosť výskytu období s nedostatkom zrážok je najnižšia v oblastiach, v ktorých sa vyskytujú pravidelne zrážky. Na Slovensku je to región severozápadného a severného Slovenska, kde okrem častých zrážok sú zaznamenávané aj vysoké úhrny zrážok. Porovnateľne vysoké úhrny zrážok sú však zaznamenávané aj v niektorých iných oblastiach Slovenska, kde je však rozloženie zrážok v priebehu roka nerovnomernejšie a zrážky tam majú viac sezónny charakter.

Na Slovensku boli v minulosti publikované práce, ktoré analyzovali obdobia s nedostatkom zrážok podľa stanovených kritérií. V záujme kontinuality sme tieto kritéria využili aj v aktuálne publikovaných výsledkoch. Kritéria boli založené na dĺžke trvanie obdobia s nedostatkom zrážok a na úhrne zrážok, ktorý môže byť v príslušnom období dosiahnutý:

- 1. kritérium, ak nedostatok zrážok trval najmenej 15 dní, počas ktorých spadlo menej ako 1 mm zrážok.
- 2. kritérium, ak nedostatok zrážok trval najmenej 20 dní, pričom spadlo menej ako 2,5 mm zrážok.
- 3. kritérium, ak nedostatok zrážok trval najmenej 30 dní a spadlo menej ako 5 mm zrážok.

Kritérium, podľa ktorého by nedostatok zrážok mal trvať aspoň 15 dní, pričom úhrn zrážok v tomto období by nemal dosiahnuť ani 1 mm, je spĺňané podľa očakávania najčastejšie. Z regionálneho hľadiska je výskyt takýchto období, vplyvom kontinentálnejšej klímy, s výnimkou letných mesiacov, sústredený najviac na juhovýchodnom Slovensku a podobne je to aj v kotlinách vo východných častiach Horehronia, v Liptove a na Spiši. Na Podunajskej nížine, na severozápade a severovýchode Slovenska je zreteľný v ročnom režime úbytok takýchto období predovšetkým v decembri a v januári.





Obr. 1 Rozmiestnenie vybraných meteorologických staníc na území Slovenska  
Fig. 1 Spatial distribution of selected meteorological stations in Slovakia

## VÝSLEDKY

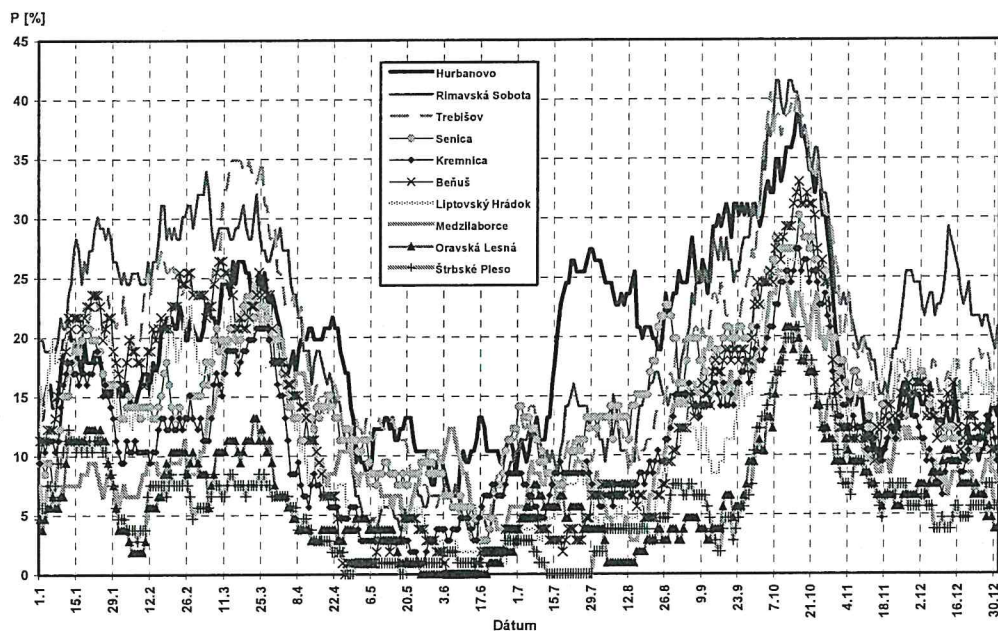
Dlhšie obdobia s nedostatkom zrážok v ďalších dvoch kritériách majú nižšiu pravdepodobnosť výskytu, predovšetkým v horských oblastiach a regiónoch s oceáničkejšou klímou na krajnom západe Slovenska a na severozápade a severe Slovenska. V prípade výskytu dlhých období s nedostatkom zrážok, ktoré trvajú viac ako mesiac, sa v ich výskyte začína menej prejavovať ročný režim a o niečo menej zreteľný je aj regionálny pohľad ich výskytu. Výnimkou sú kotlinové polohy na strednom a východnom Slovensku, kde v lete existujú predpoklady, vplyvom ich intenzívneho prehrievania, pre vytváranie búrok aj vo vnútri vzduchových hmôt. Takže sa môže stať, že dlhé obdobie s nedostatkom zrážok, resp. sucha, ktoré má aj veľký regionálny rozsah, môže byť v týchto kotlinových polohách jedinou náhodnou búrkou. Potvrdzujú to výsledky získané z meteorologických staníc Beňuš a Liptovský Hrádok.

**Tab. 2 Teplotný charakter jednotlivých mesiacov v období 1951-2007 na stanici Hurbanovo** (teplotne- NN- nadnormálny; NP - normálny s kladnou odchýlkou od normálu; PP - normálny so zápornou odchýlkou od normálu, 0 - normálny s nulovou odchýlkou od normálu; PN - podnormálny mesiac)

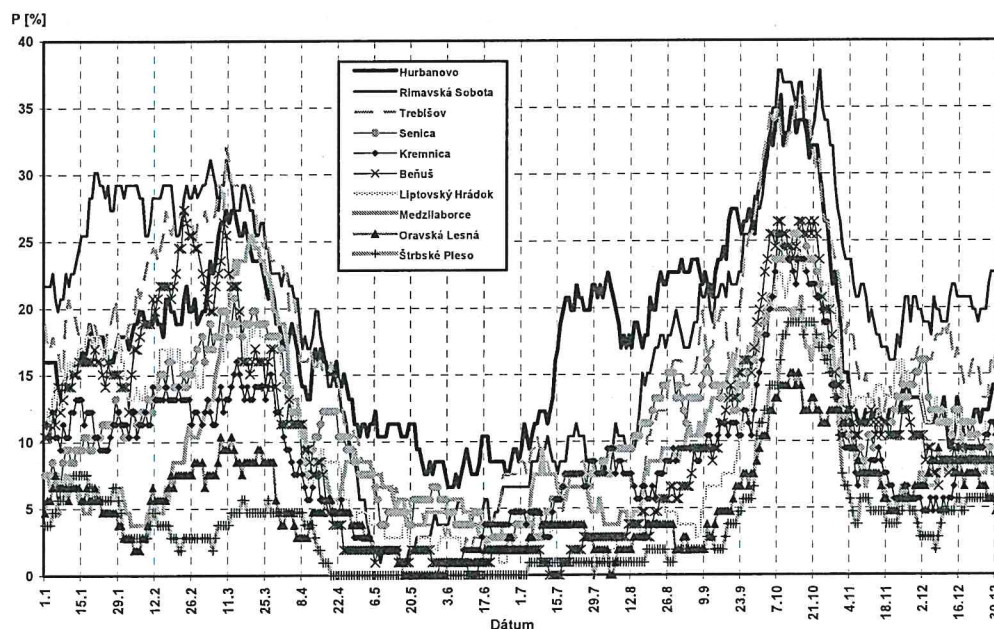
**Tab. 2 Monthly air temperature (T) in Hurbanovo (1951-2007) compared with monthly air temperature normal 1961-1990** (air temperature deviation values: NN – above normal; NP – above-average, PP – below average; PN – subnormal; 0 – without T deviation (normal))

| Rok  | I. | II. | III. | IV. | V. | VI. | VII. | VIII. | IX. | X. | XI. | XII. |
|------|----|-----|------|-----|----|-----|------|-------|-----|----|-----|------|
| 1951 | NN | NN  | PP   | NP  | PP | 0   | PP   | NN    | NN  | PN | NN  | NP   |
| 1952 | NP | PP  | PN   | NN  | PP | PP  | NN   | NN    | PN  | PN | PN  | PP   |
| 1953 | NP | PP  | PP   | NP  | PN | NP  | NP   | PN    | NP  | NN | PN  | NP   |
| 1954 | NP | PP  | PP   | NP  | PN | NP  | NP   | PN    | NP  | NN | PN  | NP   |
| 1955 | PP | PP  | PN   | PN  | PN | PP  | PP   | PN    | PP  | PP | 0   | NN   |
| 1956 | NP | PN  | PN   | PP  | PP | PN  | NP   | PP    | NP  | PP | PN  | NP   |
| 1957 | PP | NN  | NP   | NP  | PN | NN  | NP   | PN    | PN  | PP | NN  | NP   |
| 1958 | NP | NN  | PN   | PN  | NN | PN  | NP   | NP    | NP  | NP | NN  | NN   |
| 1959 | NP | PP  | NN   | NP  | PP | PP  | NP   | 0     | PN  | PP | NP  | NN   |
| 1960 | 0  | PP  | NP   | PP  | PP | NP  | PN   | 0     | PP  | NN | NN  | NN   |
| 1961 | PP | NP  | NN   | NN  | PP | NP  | PN   | NP    | NN  | NN | NP  | PP   |
| 1962 | NP | PP  | PN   | NN  | PN | PN  | PN   | NN    | PP  | 0  | NP  | PN   |
| 1963 | PN | PN  | PN   | NN  | NP | NN  | NN   | NP    | NN  | PP | NN  | PN   |
| 1964 | PN | PP  | PN   | NP  | PP | NN  | NP   | PP    | NP  | PP | NN  | PP   |
| 1965 | NP | PN  | 0    | PN  | PN | PP  | PP   | PN    | NP  | PN | PN  | NP   |
| 1966 | PN | NN  | PP   | NN  | PP | NP  | PN   | PP    | PP  | NN | NP  | NP   |
| 1967 | NP | NP  | NP   | PP  | NP | 0   | NN   | NP    | NN  | NN | PP  | PP   |
| 1968 | PP | NP  | NP   | NN  | NP | NN  | NP   | PP    | PP  | PP | NN  | PN   |
| 1969 | PP | PN  | PP   | PP  | NN | PP  | NP   | PP    | NP  | NP | NN  | PN   |
| 1970 | PP | PN  | PP   | PP  | PN | NP  | PP   | 0     | PP  | PP | NN  | NP   |
| 1971 | PP | NP  | PN   | NP  | NN | PN  | NP   | NN    | PN  | PN | PP  | NN   |
| 1972 | NP | NN  | NN   | NP  | PP | NP  | NP   | PN    | PN  | PN | NP  | NP   |
| 1973 | NP | NP  | NP   | PN  | NP | NP  | PP   | NP    | NP  | PN | PN  | NP   |
| 1974 | NN | NN  | NN   | PP  | PN | PN  | PP   | NN    | PP  | PN | NN  | NN   |
| 1975 | NN | PP  | NN   | PP  | NN | PP  | NP   | NP    | NN  | PP | PN  | NP   |
| 1976 | NN | PP  | PN   | NP  | PP | NP  | NN   | PN    | PN  | NN | NN  | 0    |
| 1977 | PP | NN  | NN   | PN  | 0  | NN  | PP   | PP    | PN  | NP | NP  | PP   |
| 1978 | NN | PP  | NP   | PN  | PN | PP  | PN   | PN    | PN  | 0  | PN  | NP   |
| 1979 | PN | NP  | NN   | PN  | NP | NN  | PN   | PP    | PP  | PN | NP  | NN   |
| 1980 | PP | NP  | PP   | PN  | PN | PP  | PN   | PP    | PN  | PP | PN  | PP   |
| 1981 | PP | PP  | NN   | NP  | NP | NP  | PP   | PP    | NP  | NN | PP  | PP   |
| 1982 | PN | PN  | 0    | PN  | NP | NP  | NP   | NP    | NN  | NN | NP  | NN   |
| 1983 | NN | PN  | NP   | NN  | NP | NP  | NN   | NP    | NP  | PP | PN  | PP   |
| 1984 | NP | 0   | PP   | PP  | PP | PN  | PN   | PP    | PP  | NN | NP  | PP   |
| 1985 | PN | PN  | PP   | 0   | NP | PN  | NP   | NP    | PP  | PP | PN  | NN   |
| 1986 | NP | PN  | PP   | NN  | NN | PP  | PP   | NP    | PN  | PP | NP  | PP   |
| 1987 | PN | PP  | PN   | PP  | PN | 0   | NN   | PN    | NN  | NN | NP  | NP   |
| 1988 | NN | NP  | PP   | PP  | NP | PP  | NN   | NP    | PP  | PP | PN  | 0    |
| 1989 | NP | NN  | NN   | NN  | PP | PN  | NP   | PP    | NP  | NP | PN  | NP   |
| 1990 | NP | NN  | NN   | PP  | NP | 0   | PP   | NN    | PN  | NP | NN  | PP   |
| 1991 | NP | PN  | NN   | PN  | PN | PP  | NN   | NP    | NN  | PN | NP  | PN   |
| 1992 | NN | NN  | NP   | NP  | NP | NN  | NN   | NN    | NP  | PP | NP  | PP   |
| 1993 | NP | PN  | PP   | NP  | NN | NP  | PP   | NN    | NP  | NN | PN  | NN   |
| 1994 | NN | NP  | NN   | NP  | NP | NP  | NN   | NN    | NN  | PN | NN  | NN   |
| 1995 | NP | NN  | PP   | NP  | PP | PP  | NN   | NP    | PP  | NN | PN  | NP   |
| 1996 | PP | PN  | PN   | NP  | NP | NN  | PN   | NP    | PN  | NP | NN  | PN   |
| 1997 | PP | NP  | PP   | PN  | NP | NN  | PP   | NN    | PP  | PN | NN  | NN   |
| 1998 | NN | NN  | PP   | NN  | NP | NN  | NP   | NN    | PP  | NN | PN  | PN   |
| 1999 | NP | PP  | NN   | NN  | NP | NP  | NN   | NP    | NN  | NP | PN  | NP   |
| 2000 | PP | NN  | NP   | NN  | NN | NN  | PP   | NN    | NP  | NN | NN  | NN   |
| 2001 | NN | NN  | NN   | PP  | NN | PP  | NN   | NN    | PN  | NN | PN  | PN   |
| 2002 | NP | NN  | NN   | 0   | NN | NN  | NN   | NN    | PP  | PP | NN  | PP   |
| 2003 | PP | PN  | NP   | NP  | NN | NN  | NN   | NN    | NP  | PN | NN  | NP   |
| 2004 | PP | NP  | PP   | NN  | PP | 0   | NP   | NN    | NP  | NN | NP  | NP   |
| 2005 | NP | PP  | PP   | NP  | NP | NP  | NP   | PP    | NN  | NP | PP  | NP   |
| 2006 | PP | PN  | PP   | NN  | PP | NN  | NN   | PN    | NN  | NN | NN  | NN   |
| 2007 | NN | NN  | NN   | NN  | NN | NN  | NN   | NN    | PN  | PP | PP  | PP   |

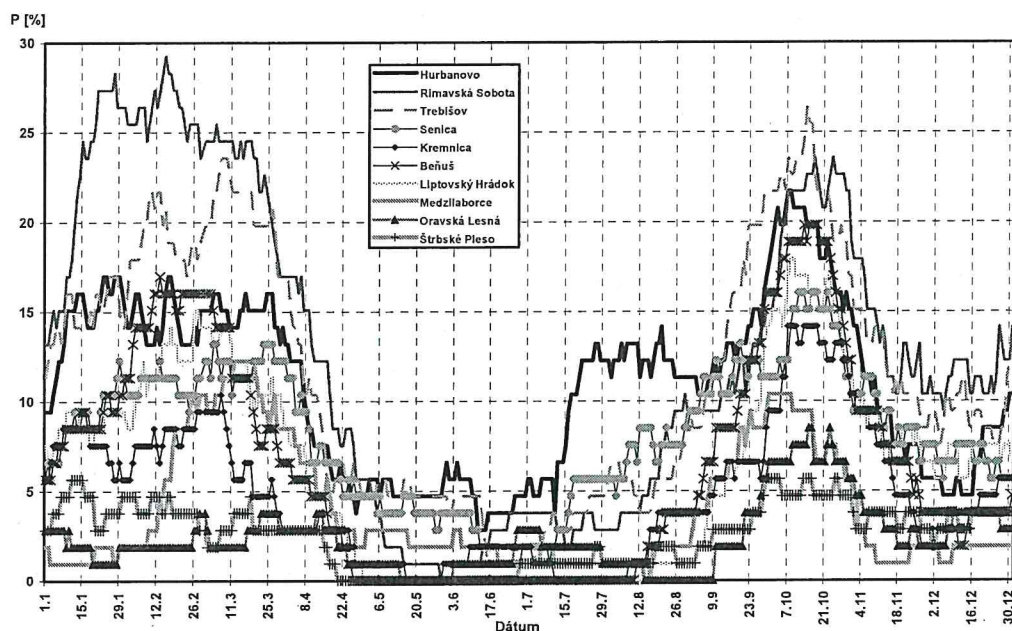




Obr. 2 Ročný režim pravdepodobnosti výskytu dní v bezzážkovom období (definovanom podľa 1. kritéria) na vybraných meteorologických staniciach na Slovensku v období 1901-2006  
 Fig. 2 Annual regime of day occurrence probability within precipitation deficit period (according to criteria 1) at selected meteorological stations in Slovakia within 1901-2006 period

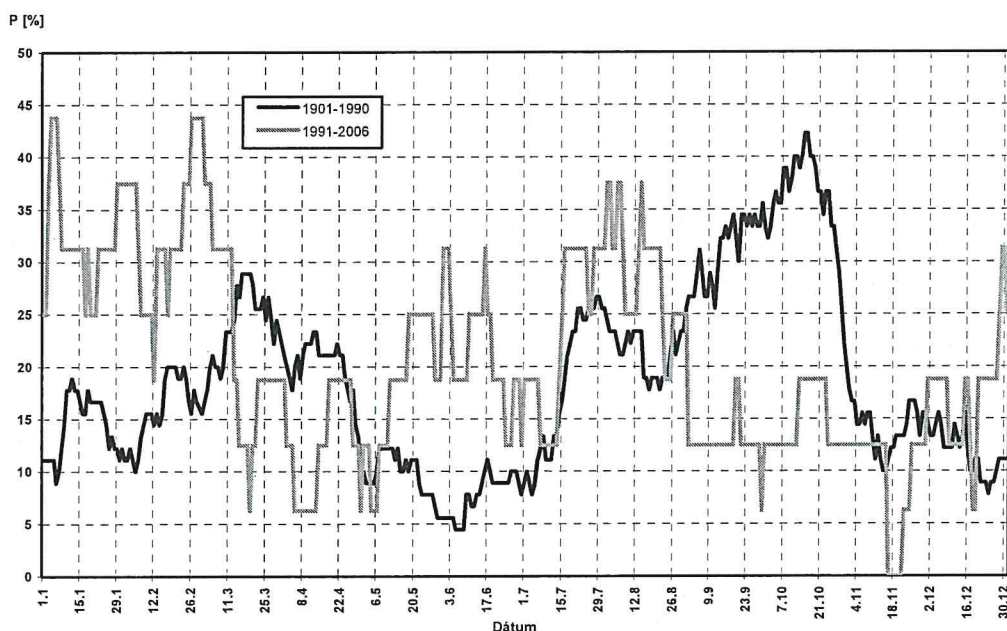


Obr. 3 Ročný režim pravdepodobnosti výskytu dní v bezzážkovom období (definovanom podľa 2. kritéria) na vybraných meteorologických staniciach na Slovensku v období 1901-2006  
 Fig. 3 Annual regime of day occurrence probability within precipitation deficit period (according to criteria 2) at selected meteorological stations in Slovakia within 1901-2006 period



Obr. 4 Ročný režim pravdepodobnosti výskytu dní v bezzážkovom období (definovanom podľa 3. kritéria) na vybraných meteorologických staniciach na Slovensku v období 1901-2006

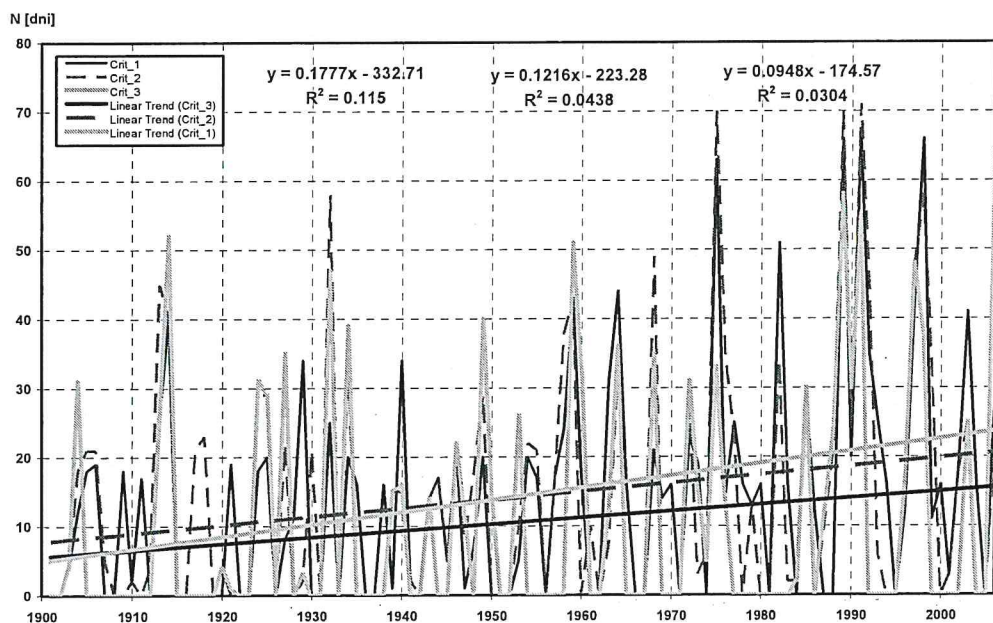
Fig. 4 Annual regime of day occurrence probability within precipitation deficit period (according to criteria 3) at selected meteorological stations in Slovakia within 1901-2006 period



Obr. 5 Porovnanie ročného režimu pravdepodobnosti výskytu dní v bezzážkovom období (definovanom podľa 1. kritéria) v Hurbanove v období 1901-1990, resp. 1991-2006

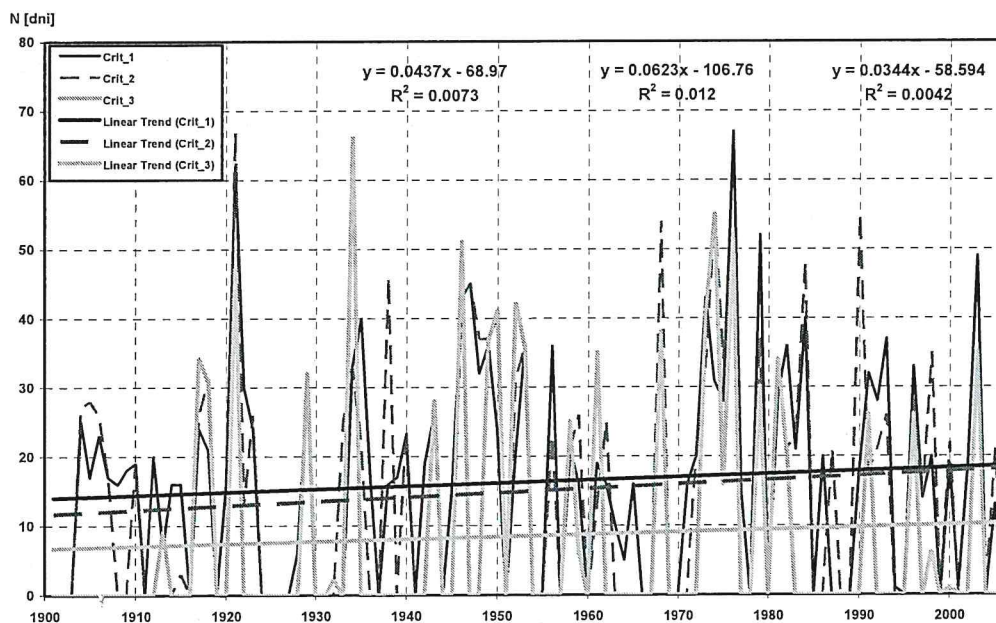
Fig. 5 Annual regime of day occurrence probability within precipitation deficit period (according to criteria 1) at Hurbanovo meteorological station within 1901-1990 and 1991-2006 periods





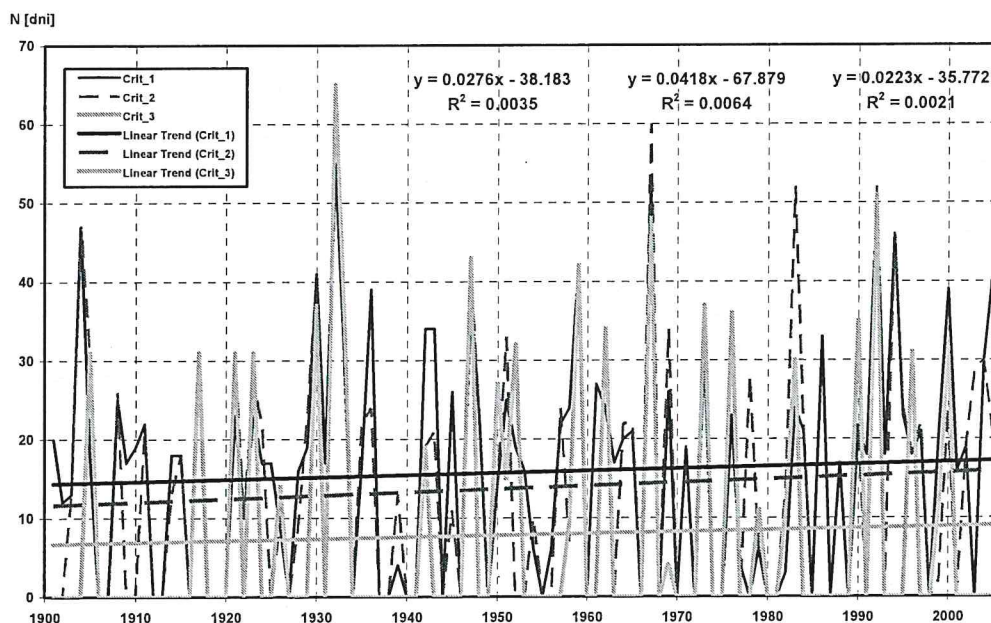
Obr. 6 Počet dní v bezsrážkovom období (všetky kritéria) v zime (XII-II) v Hurbanove v období 1901-2006

Fig. 6 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in winter (XII-II) in Hurbanovo within the 1901-2006 period



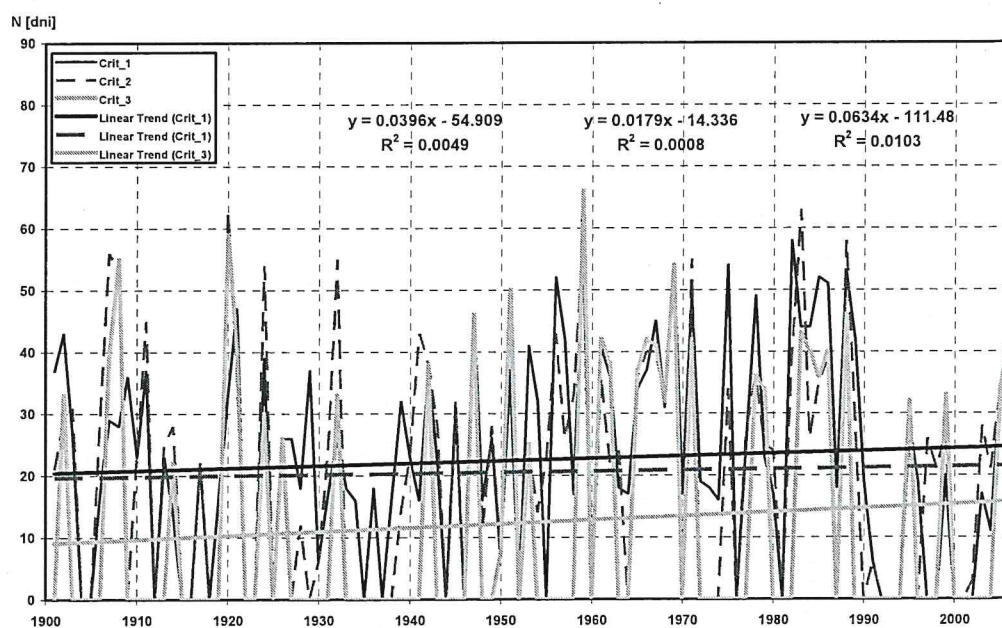
Obr. 7 Počet dní v bezsrážkovom období (všetky kritéria) na jar (III-V) v Hurbanove v období 1901-2006

Fig. 7 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in spring (III-V) in Hurbanovo within the 1901-2006 period



Obr. 8 Počet dní v bezzážkovom období (všetky kritéria) v lete (VI-VIII) v Hurbanove v období 1901-2006

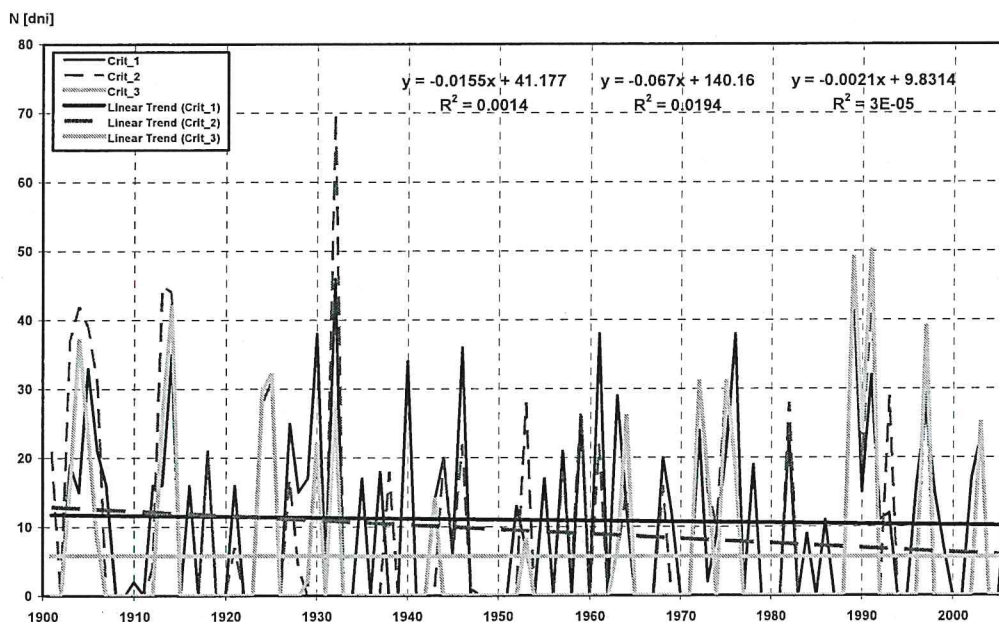
Fig. 8 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in summer (VI-VIII) in Hurbanovo within the 1901-2006 period



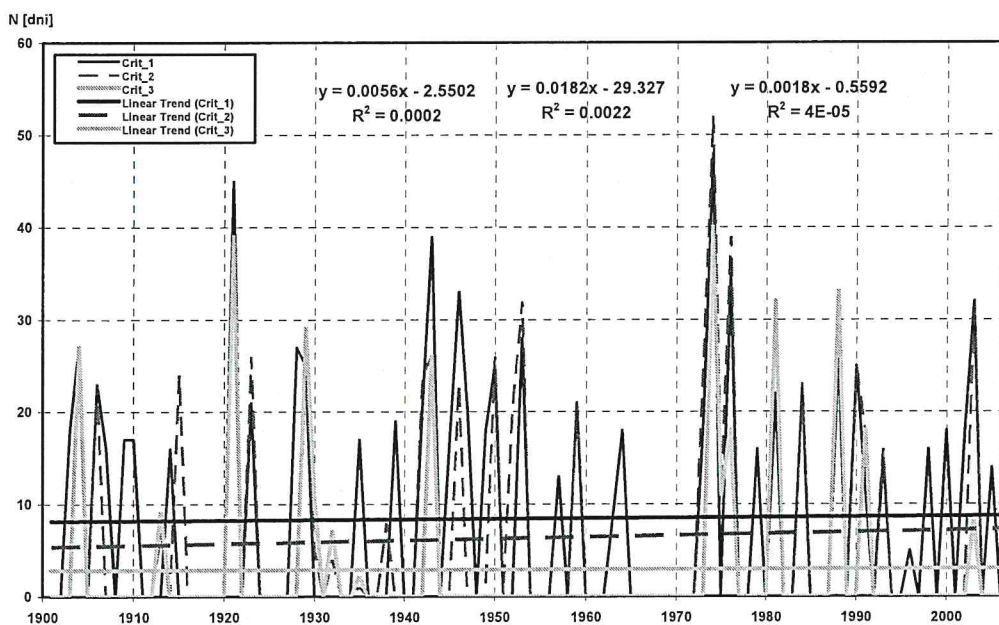
Obr. 9 Počet dní v bezzážkovom období (všetky kritéria) na jeseň (IX-XI) v Hurbanove v období 1901-2006

Fig. 9 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in autumn (IX-XI) in Hurbanovo within the 1901-2006 period

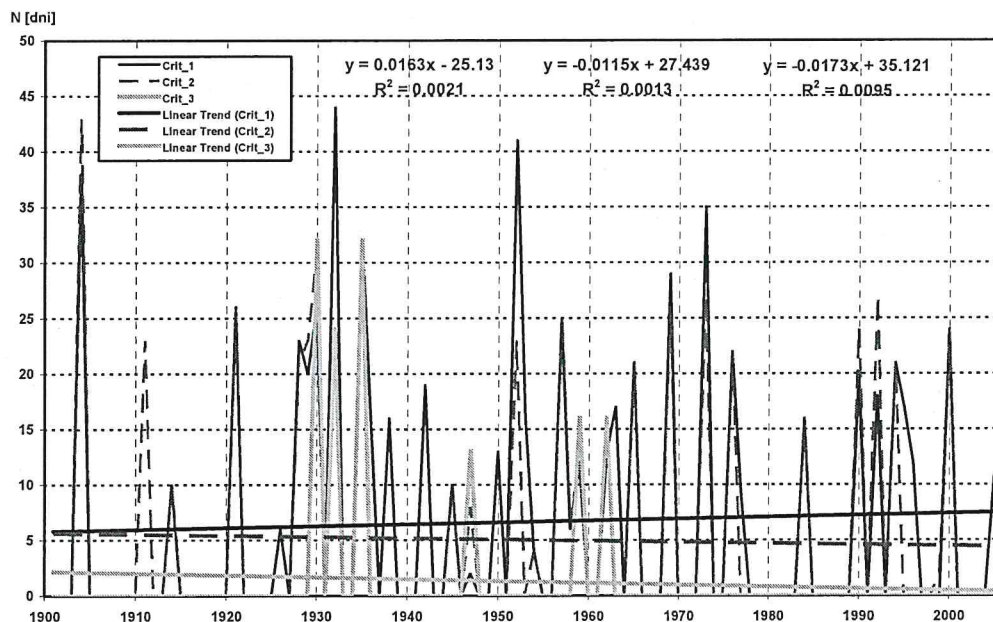




Obr. 10 Počet dní v bezzážkovom období (všetky kritéria) v zime (XII-II) v Kremnici v období 1901-2006  
Fig. 10 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in winter (XII-II) in Kremnica within the 1901-2006 period

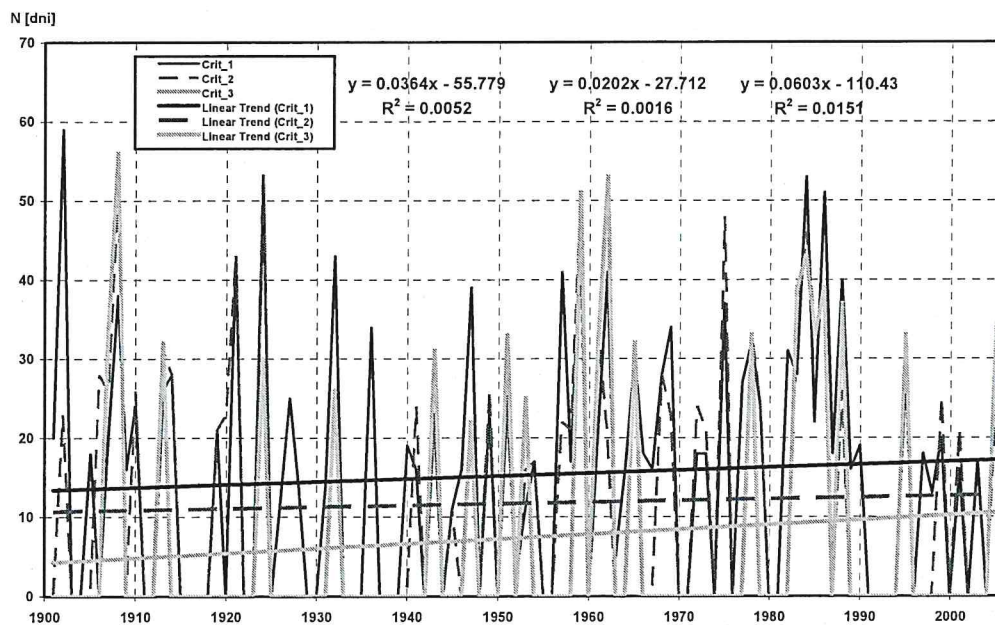


Obr. 11 Počet dní v bezzážkovom období (všetky kritéria) na jar (III-V) v Kremnici v období 1901-2006  
Fig. 11 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in spring (III-V) in Kremnica within the 1901-2006 period



Obr. 12 Počet dní v bezzážkovom období (všetky kritéria) v lete (VI-VIII) v Kremnici v období 1901-2006

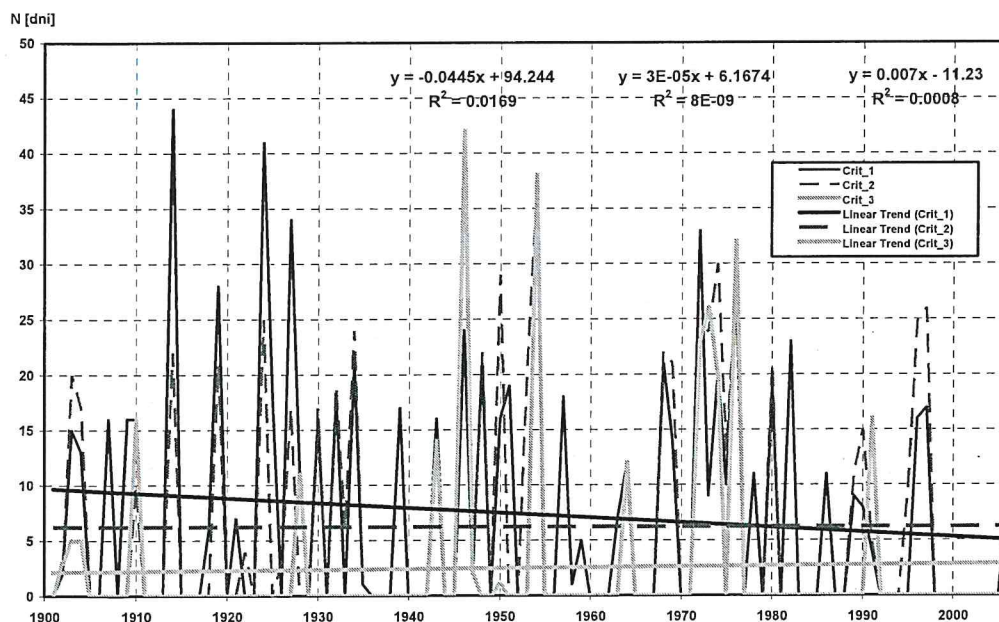
Fig. 12 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in summer (IX-XI) in Kremnica within the 1901-2006 period



Obr. 13 Počet dní v bezzážkovom období (všetky kritéria) na jeseň (IX-XI) v Kremnici v období 1901-2006

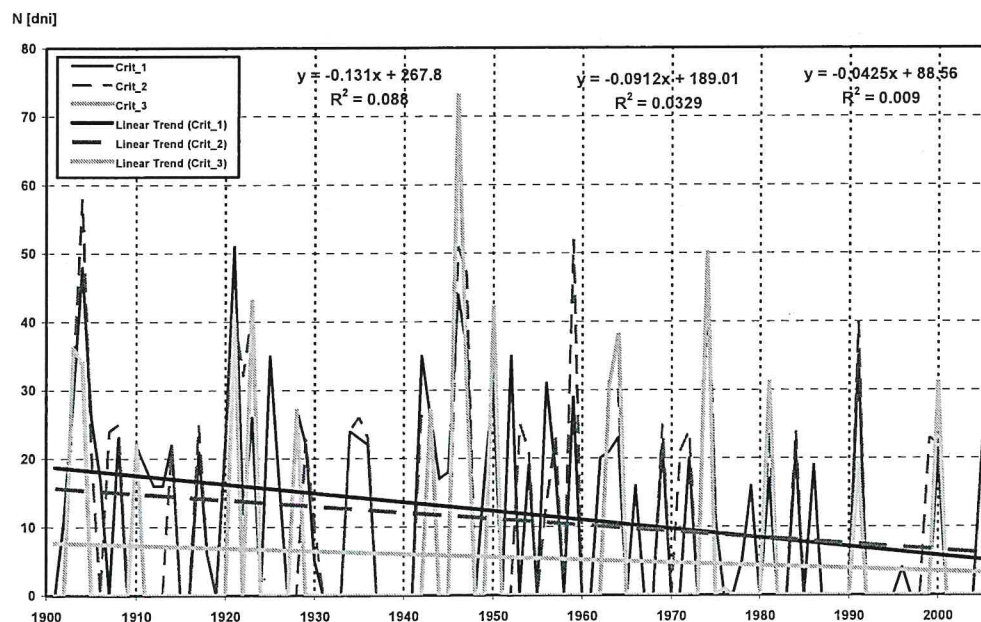
Fig. 13 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in autumn (IX-XI) in Kremnica within the 1901-2006 period





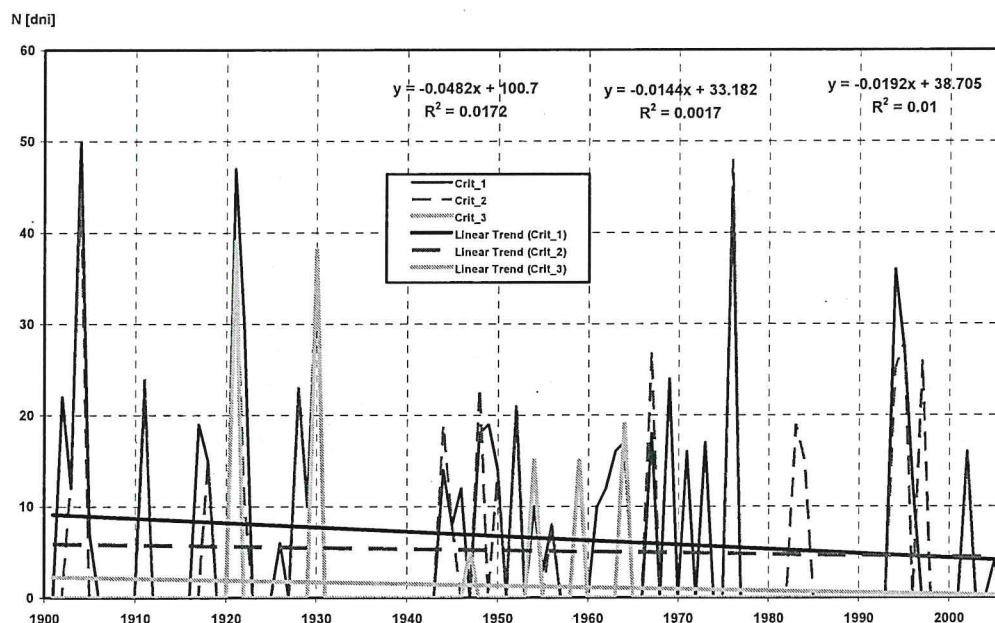
Obr. 14 Počet dní v bezsrážkovom období (všetky kritéria) v zime (XII-II) v Medzilaborciach v období 1901-2006

Fig. 14 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in winter (XII-II) in Medzilaborce within the 1901-2006 period



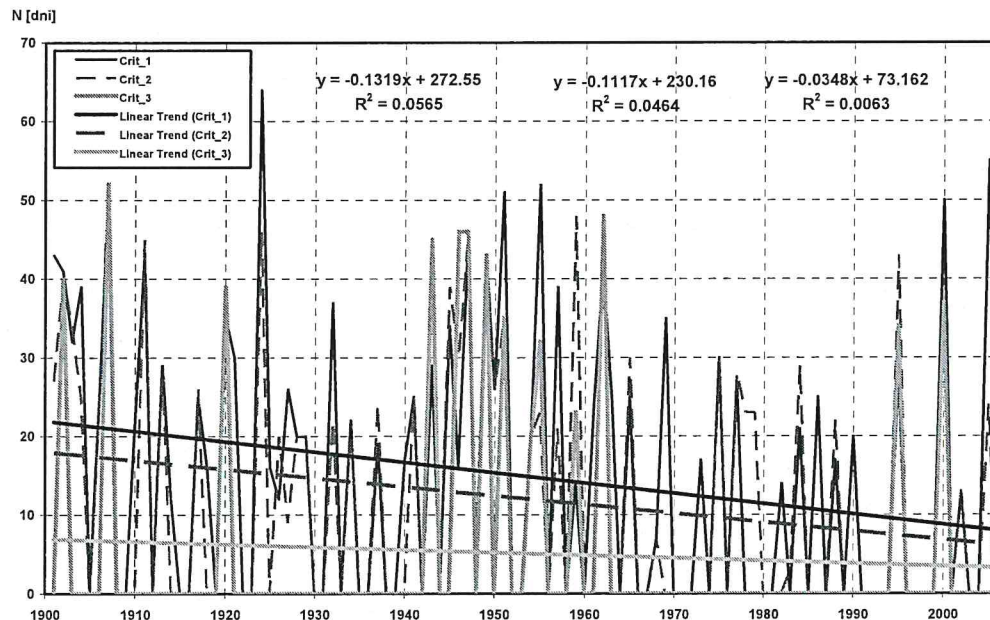
Obr. 15 Počet dní v bezsrážkovom období (všetky kritéria) na jar (III-V) v Medzilaborciach v období 1901-2006

Fig. 15 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in spring (III-V) in Medzilaborce within the 1901-2006 period



Obr. 16 Počet dní v bezzrážkovom období (všetky kritéria) v lete (VI-VIII) v Medzilaborciach v období 1901-2006

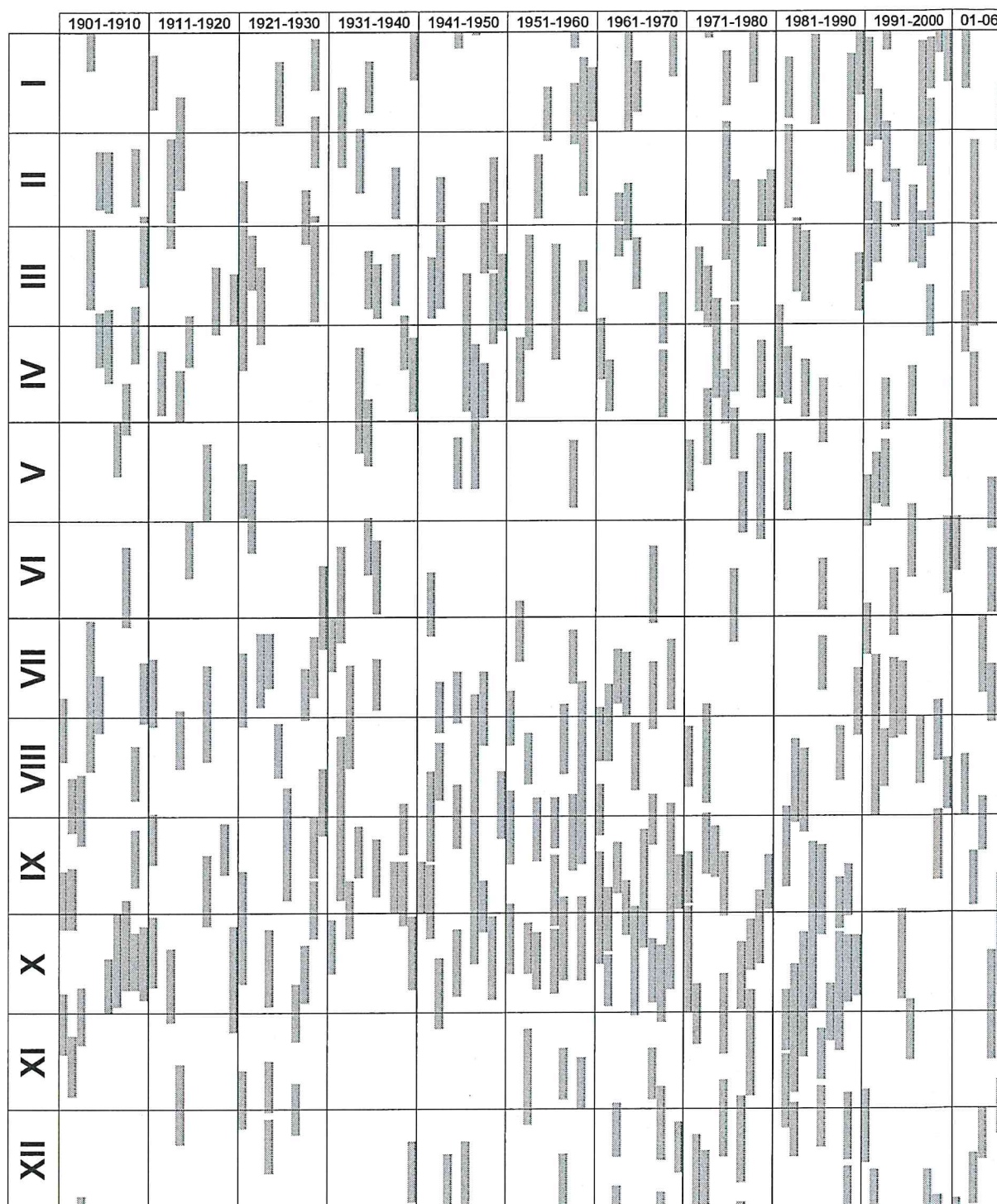
Fig. 16 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in summer (VI-VIII) in Medzilaborce within the 1901-2006 period



Obr. 17 Počet dní v bezzrážkovom období (všetky kritéria) na jeseň (IX-XI) v Medzilaborciach v období 1901-2006

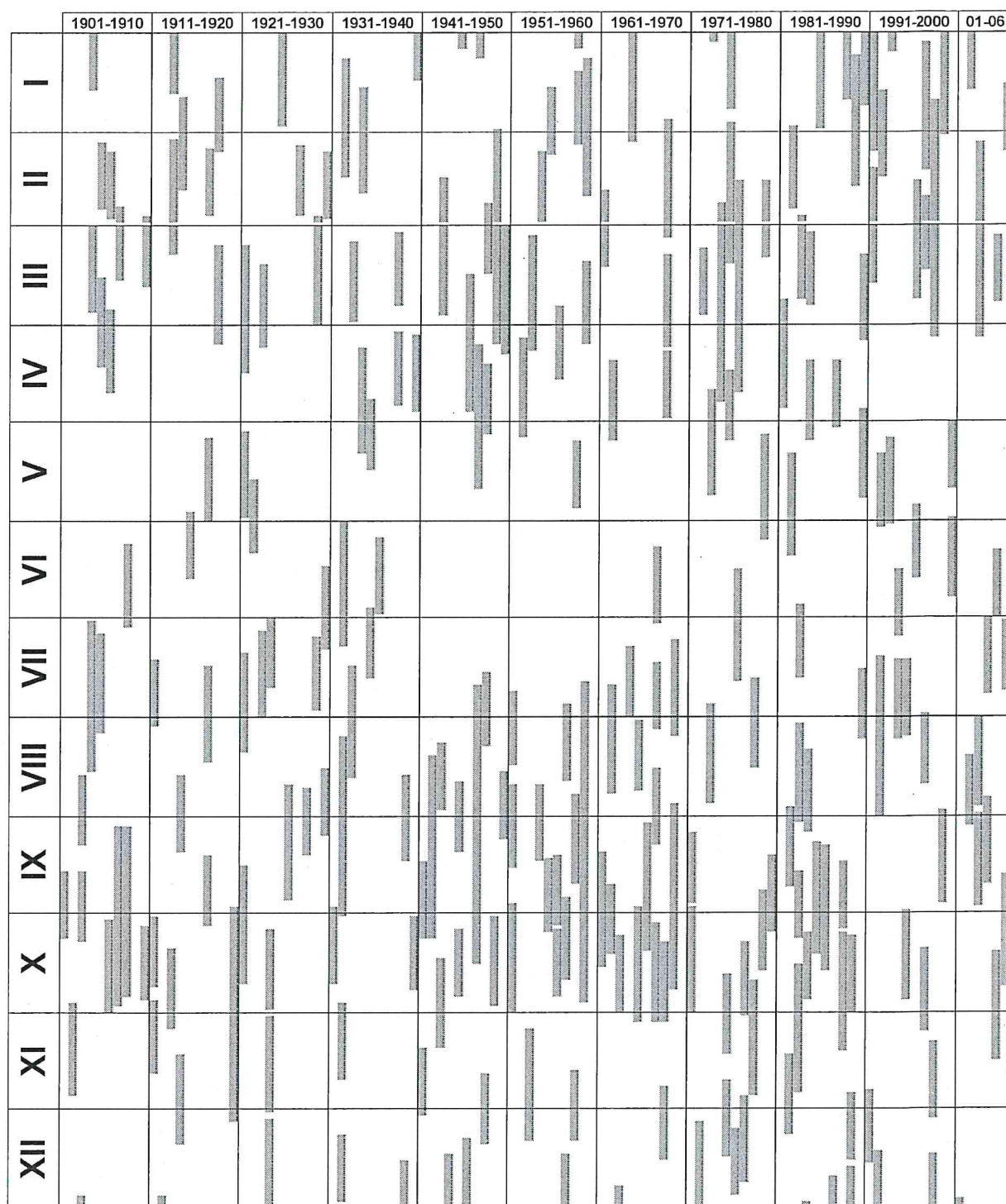
Fig. 17 Number of days within the precipitation deficit period (all criteria) in autumn (IX-XI) in Medzilaborce within the 1901-2006 period





Obr. 18 Výskyt bezzrážkových období (vyznačené sivé polia – 1. kritérium) v časovom rade denných úhrnov zrážok na meteorologickej stanici v Hurbanove v období rokov 1901 až 2006

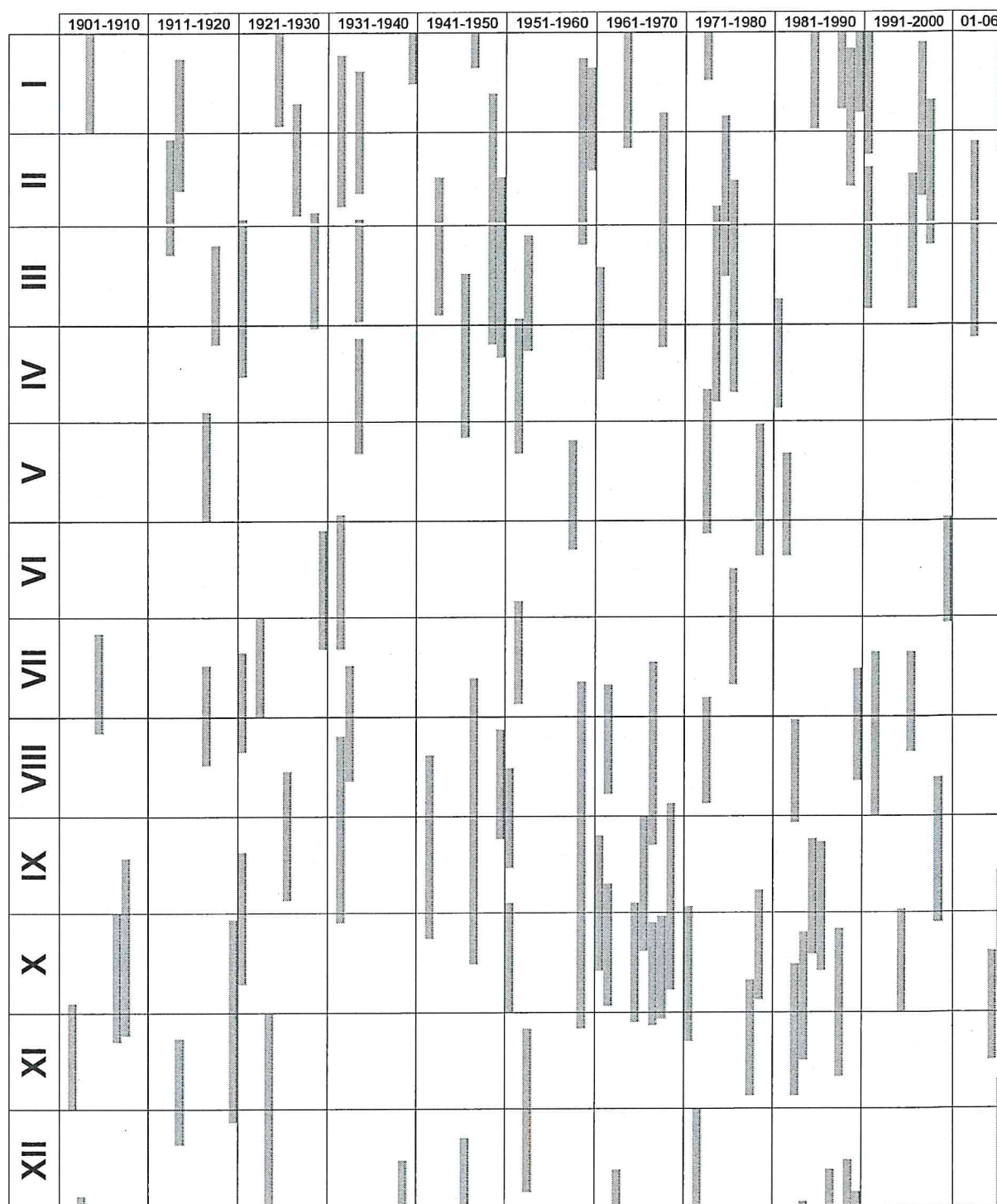
Fig. 18 The precipitation deficit periods occurrence (according to criteria 1) identified in daily precipitation time series at Hurbanovo meteorological station within 1901-2006 period



Obr. 19 Výskyt bezzrážkových období (vyznačené sivé polia – 2. kritérium) v časovom rade denných úhrnov zrážok na meteorologickej stanici v Hurbanove v období rokov 1901 až 2006

Fig. 19 The precipitation deficit periods occurrence (according to criteria 2) identified in daily precipitation time series at Hurbanovo meteorological station within 1901-2006 period





Obr. 20 Výskyt bezzrážkových období (vyznačené sivé polia – 3. kritérium) v časovom rade denných úhrnov zrážok na meteorologickej stanici v Hurbanove v období rokov 1901 až 2006

Fig. 20 The precipitation deficit periods occurrence (according to criteria 3) identified in daily precipitation time series at Hurbanovo meteorological station within 1901-2006 period

Najnápadnejšie zmeny nastali približne v posledných 2 desaťročiach pri využití 1. a 2. kritéria. Najjužnejšie regióny Slovenska reprezentuje rad denných úhrnov zrážok z meteorologickej stanice Hurbanovo. Tam, predovšetkým podľa 1. kritéria, najviac pribudli obdobia s nedostatkom zrážok v júni a v januári, ale aj v máji a menej nápadne aj v júli. Naopak nápadný úbytok období s nedostatkom zrážok, podľa rovnakého kritéria, sa prejavil v období od septembra do novembra. Ročný režim zrážok, z tohto pohľadu, začína v najjužnejších oblastiach Slovenska pripomínať ročný režim zrážok v južnejších zemepisných šírkach Európy. To znamená výskyt sporadických, aj keď niekedy intenzívnych búrkových lejakov alebo krátkodobých výdatných dažďov v letných obdobiach a daždivejšieho počasia v jesenných mesiacoch. Zaujímavé je aj pribúdanie období s nedostatkom zrážok v januári, ktoré je registrované nielen v hurbanovskom časovom rade denných úhrnov zrážok, ale aj na ostatnom území Slovenska. V tejto súvislosti je nápadná séria nadnormálne, resp. normálne teplých januárov, pretože napríklad v časovom rade priemerných mesačných teplôt vzduchu v januári v Hurbanove bol posledný podnormálne teplý január v roku 1987 (Tab. 2).

Nárast období s nedostatkom zrážok v letnom období, podľa uvádzaných kritérií, sa na ostatnom území Slovenska, ale ani v Bratislave, ktorá je relatívne blízko Hurbanova, neprejavil. Príčinou sú búrkové lejaky, ktoré majú na tomto území Slovenska väčšiu pravdepodobnosť výskytu.

V najsevernejších regiónoch Slovenska bol zaregistrovaný úbytok období s nedostatkom zrážok, čo dobre korešponduje s rastúcim trendom zrážok v tomto priestore.

## ZÁVER

Problematika nedostatku zrážok, ktorá je riešená v tomto príspevku, je iba jednou so súčastí fenoménu sucha. Sucho, a s ním súvisiaci nedostatok vody, začínajú byť dominantným nebezpečenstvom ľudstva. Na Slovensku registrujeme náznaky narušania ročného režimu niektorých charakteristík meteorologických prvkov. Pri komplexnom pohľade na túto problematiku sa uvádzané skutočnosti musia prejavíť aj v hydrologickom režime, v pedosfére a v biosfére. Zložité vzájomné väzby v tomto systéme si vyžaduje spoluprácu odborníkov, ktorí sa špecializujú na analýzu jednotlivých subsystémov. Výmena získaných informácií a systémový prístup k riešeniu objavujúcich sa problémov vytvárajú predpoklady, že budeme schopní pohotovejšie reagovať na možné rizika klimateckej zmeny.

**Pod'akovanie:** Táto štúdia bola podporená Agentúrou na podporu vedy a techniky v rámci projektu APVV-51-030205.

## LITERATÚRA

- BRÁZDIL, R., 1993:** Fluctuation of Atmospheric Precipitation in Europe. In: *Geojournal*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 27-3, pp 275-291
- BYUN, H., WILHITE, D. A., 1999:** Objective Quantification of Droughts Severity and Duration. In: *Journal of Climate*, Volume 12, No. 9, pp 2747-2756, September 1999
- LAPIN, M., DAMBORSKÁ, I., GAÁL, L., MELO, M., 2003:** Possible precipitation regime change in Slovakia due to air pressure circulation changes in the Euro-Atlantic area until 2001. In: *Contributions to Geophysics and Geodesy*. Vol. 33, No. 3, 2003, pp. 161-189
- ŠAMAJ, F., VALOVIČ, Š., 1972:** Suché a vlhké obdobia na Slovensku. In: *Vodohospodársky časopis SAV*, XX, No. 4, 1972
- VALOVIČ, Š., 1965:** Suché obdobia v Trebišove. In: *Meteorologické zprávy XVIII*, 1965, pp 144
- Zborník prác SHMÚ 33/I (1991), ALFA, Bratislava, 1991, 239 pp**



## PRECIPITATION DEFICIT PERIODS IN SLOVAKIA

<sup>(1)</sup>Pecho. J., <sup>(1)</sup>Faško, P., <sup>(2)</sup>Drinka, R., <sup>(1)</sup>Kajaba, P., <sup>(1)</sup>Šťastný, P.

<sup>(1)</sup> Slovak Hydrometeorological Institute, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava 37  
[jozef.pecho@shmu.sk](mailto:jozef.pecho@shmu.sk), [pavol.fasko@shmu.sk](mailto:pavol.fasko@shmu.sk), [peter.kajaba@shmu.sk](mailto:peter.kajaba@shmu.sk), [pavel.stastny@shmu.sk](mailto:pavel.stastny@shmu.sk)

<sup>(2)</sup> Department of Astronomy, Physics of the Earth and Meteorology,  
Faculty of Mathematics, Physics and Informatics of Comenius University,  
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, [drinka@fmph.uniba.sk](mailto:drinka@fmph.uniba.sk),

**Abstract:** Geographic position of Slovakia creates preconditions for existence of the temporary precipitation deficit periods resulting in drought mainly during transition seasons (spring and autumn) as well as summer. Not only precipitation deficit but also precipitation surplus represents a trouble that cause increasingly more significant and widespread damages. In the term of precipitation deficit period occurrence in the Danubian lowland region in Slovakia represent potentially the most endangered areas by drought. However our experience from climatological practice indicates increasing risk of the precipitation deficit incidence even in other regions of Slovakia. The ascending extent of regional of precipitation deficit period is also very significant.

The long-term time series of daily precipitation totals available from the end of 19<sup>th</sup> century, respectively from the beginning of the 20<sup>th</sup> century to present period have made us possible to analyze the incidence of the precipitation deficit period in Slovakia. Selected meteorological stations from which the daily precipitation totals data sets are available within the above mentioned period are situated in different natural and climatological conditions in Slovakia.

In our previous statistical and regional analyses of precipitation deficit periods within the 1901-2006 period we have revealed the noticeable changes not only in occurrence frequency but also in annual regime of drought periods occurrence in the most southernmost regions within the Danubian lowland in Slovakia. The Danubian lowland represents, from the economic viewpoint, the most eminent and interesting region in Slovakia.

In the paper we deal with the statistical trend and frequency analysis as well as with the annual regime and regional extent analysis of the precipitation deficit periods incidence at selected meteorological stations in Slovakia, mainly in the Danubian lowland region. Recently climate in the Danubian lowland begins to show some features typical for the Mediterranean region with its warmer spells and aridization trends.





# ZHODNOTENIE VÝVOJA MINIMÁLNYCH PRIETOKOV NA ÚZEMÍ SLOVENSKA

Škoda, P., Majerčáková, O., Demeterová, B., Danáčová, Z.

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava  
[peter.skoda@shmu.sk](mailto:peter.skoda@shmu.sk), [olga.majercakova@shmu.sk](mailto:olga.majercakova@shmu.sk), [beata.demeterova@shmu.sk](mailto:beata.demeterova@shmu.sk),  
[zuzana.danacova@shmu.sk](mailto:zuzana.danacova@shmu.sk)

**Abstrakt:** Vo vybraných vodomerných staniciach hodnotíme vývoj ročných minimálnych prietokov a početnosť výskytu minimálnych mesačných prietokov v jednotlivých dekádach. Hodnotenie sa vykonáva za celé obdobie pozorovania. Početnosťou výskytu minimálnych mesačných prietokov v jednotlivých desaťročiach vyjadrujeme časové rozloženie tejto charakteristiky. Trendová analýza aplikovaná na celé rady ročných minimálnych prietokov a rady minimálnych 7-dňových prietokov naznačuje vývoj týchto charakteristík na území Slovenska. Hodnotenia a analýzy sme robili vo vodomerných staniciach, zaradených do Národného klimatického programu SR.

**Kľúčové slová:** minimálny prietok, početnosť výskytu minimálnych mesačných prietokov, trendy minimálnych prietokov, vodomerné stanice NKP SR

*Key words: annual minimum discharges, frequency of occurrence of monthly minimum discharges, trends of minimum discharges, water gauging station of National climate programme of Slovak Republic*

## ÚVOD

V období 2001-2005 sa na Slovenskom hydrometeorologickom ústave riešila úloha „Spracovanie hydrologických charakteristík“. Jej nosnými čiastkovými úlohami boli „Priemerné ročné prietoky a úhrny zrážok na povodie“, „Priemerné mesačné prietoky“, „N – ročné maximálne prietoky“ a „M – denné prietoky“.

Nové hydrologické charakteristiky, ktoré boli jedným z výstupov uvedenej úlohy, sa už používajú v hydrologickej a vodohospodárskej praxi.

Okrem uvedenej úlohy sa riešili aj „Hydroekologické limity - malá vodnosť“. Toto riešenie v súčasnej dobe pokračuje ako jedna z implementačných úloh RSV: Sucho a nedostatok vody.

Cieľom všetkých spomenutých úloh bolo vypracovať metodické postupy pre stanovenie jednotlivých hydrologických charakteristík vo vodomerných staniciach s dlhými a spoľahlivými radmi pozorovaní a priestorovo ich rozpracovať do profilov všetkých existujúcich vodomerných staníc, ďalej do profilov pre stanovovanie hydrologickej a vodohospodárskej bilancie kvantity a kvality vody, a tiež do všetkých dôležitých profilov riečnej siete, akými sú napríklad uzlové body riečnej siete. Súčasťou každej z týchto úloh bolo aj hodnotenie vývoja jednotlivých hydrologických charakteristík v posledných desaťročiach a porovnanie za obdobia 1931-1980 a 1961-2000, tj. za referenčné obdobie predchádzajúce a referenčné obdobie súčasné.

Okrem výstupov zo spomenutých úloh sa viacerí autori zaoberali porovnaním hydrologických charakteristík a bilančných komponentov aj za iné vybrané obdobia. Výsledky nájdeme napríklad v prácach Demeterová, Škoda, 2004a, b, 2005, Šipikalová a kol., 2006, alebo Majerčáková a kol., 2004.

V predloženom príspevku sme položili dôraz na hodnotenie trendov ročných minimálnych prietokov za celé obdobie pozorovania a na časový výskyt minimálnych mesačných prietokov za celé pozorovacie obdobie v staniciach Národného klimatického programu (NKP)

## VÝVOJ MINIMÁLNYCH PRIETOKOV VO VYBRANÝCH VODOMERNÝCH STANICIACH

Minimálny prietok  $Q_{\min}$  je definovaný ako najmenší okamžitý prietok v danom profile za zvolené obdobie. Na prirodzených tokoch sa za minimálny prietok považuje spravidla najmenší priemerný denný prietok.

V Tab. 1 uvádzame vo vybraných vodomerných staniciach za celé obdobie pozorovania až do roku 2006 hodnoty  $Q_{\min}$ , ďalej smernice lineárneho trendu (SLT)  $Q_{\min}$ , ako aj M – denné prietoky  $Q_{355}$  a  $Q_{364}$  za referenčné obdobie 1961-2000.

Z rozboru výsledkov z Tab. 1 môžeme konštatovať: Z 32 hodnotených vodomerných staníc v 20 je klesajúci trend minimálnych prietokov, v 9 je trend stúpajúci a v 3 vodomerných staniciach je trend úplne vyrovnaný. Vývoj minimálnych prietokov úzko korešponduje s celkovým vývojom vodnosti na slovenských tokoch, aj keď určité odlišnosti existujú. To je v prípade, zrejme najcitlivejšej hydrologickej charakteristiky, pochopiteľné. V grafickej prílohe uvádzame priebeh a trend minimálnych prietokov pre všetky analyzované stanice.

Za najvýznamnejšiu skutočnosť považujeme výrazný pokles minimálnych prietokov pravostranných prítokov Hrona z Nízkych Tatier. Tieto povodia sa pri hodnotení citlivosti a možnej zraniteľnosti vodných zdrojov zaradili do pásma stredne zraniteľného. S ohľadom na vývoj minimálnych prietokov by sa však mohli považovať aj za potenciálne najviac zraniteľné povodia. Ak sa bližšie pozrieme na možné príčiny tohto javu, za dve najhlavnejšie možno považovať pokles snehových zásob v jednotlivých rokoch a nárast teploty, obidve navyše spojené s južnou expozíciou svahov. Rovnaké dôvody vedú k poklesu minimálnych denných prietokov aj v povodiach južného a juhovýchodného Slovenska. Tam, kde nie sú povodia južne exponované, prípadne sú pod značným vplyvom vodnosti tvoriacej sa v povodiach s inou ako južnou expozíciou, k výraznému klesajúcemu trendu v radoch minimálnych prietokov nedochádza. Ide napríklad o povodia Čierneho Hrona, Hrona po Brezno alebo aj o povodie západnejšej Handlovky. Napriek regionálnemu charakteru tohto javu v južnej časti Slovenska existujú však výnimky. Je to napríklad povodie Ipľa po Holišu, kde je úplne vyrovnaný trend. V tomto prípade je vysvetlenie zrejmé, spôsobuje to „váha“ extrémne malých prietokov v rokoch 1947 až 1949. K povodiám s klesajúcim trendom minimálnych prietokov sa zaraďujú aj Biely Váh vo Východnej, Boca v Kráľovej Lehote a Revúca v Podsucej. Nepriaznivý vývoj minimálnych prietokov v hornej časti povodia Váhu dokáže Belá v Podbanskom zvrátiť natoľko, že na Váhu v Liptovskom Mikuláši je trend minimálnych prietokov už vyrovnaný. Pomerne zaujímavá situácia je na samotnom Hrone, kde vo vodomerných staniciach Zlatno, Banská Bystrica a Brehy je klesajúci trend, zatiaľ čo v Brezne minimálne prietoky narastajú. Pripisujeme to skutočnosti, že vplyvom ľavostranných prítokov Hrona zo Slovenského Rudohoria neklesli minimálne prietoky v deväťdesiatych rokoch tak transparentne, ako na tokoch nízkotatranských.

Dunaj v Bratislave má mierne stúpajúci trend minimálnych prietokov, pri priemerných ročných prietokoch a maximálnych ročných prietokoch je trend tohto výše storočného radu vyrovnaný.

Stúpajúci trend minimálnych prietokov majú toky povodí z flyšových oblastí, a to tak zo západného flyšu v povodí Kysuce ako aj východného flyšu v povodí Torysy a Tople. Vo všetkých skúmaných vodomerných staniciach flyšových oblastí s dlhými radmi pozorovaní nielen vývoj minimálny, ale aj celkový vývoj vodnosti je priaznivý. V prípade postupného znižovania úhrnov zrážok by v takýchto typoch povodí priaznivý vývoj určite nemohol nastať.

Analýze výskytu minimálnych prietokov v jednotlivých úsekoch celého obdobia vyhodnocovania prietokov sa venujeme v nasledujúcej časti.

## ČASOVÝ VÝSKYT MINIMÁLNYCH PRIETOKOV

V rámci úlohy Hydroekologické limity - malá vodnosť, ktorej výstupy tvoria tak prietokové, ako aj neprietokové charakteristiky malej vodnosti sme o. i. vo forme tabuliek spracovali rozloženie výskytu ročných minimálnych prietokov v jednotlivých mesiacoch za celé pozorovacie obdobie. Vzor takéhoto spracovania predstavuje Tab. 2, v ktorej sú uvedené minimálne mesačné prietoky vo vodomernej



stanici Hron – Brezno za obdobie 1931-2006. Podobným spôsobom sme analyzovali všetkých 32 hodnotených vodomerných staníc. Sumárne výsledky pre všetky hodnotené vodomerné stanice, t.j. početnosť výskytu minimálnych mesačných prietokov za celé sledované obdobie (ktorých konečná suma je teda 12) uvádzame v Tab. 3 pre jednotlivé desaťročia. Takáto analýza nám umožňuje určiť dekádu s najvyšším počtom minimálnych mesačných prietokov v sledovanom období.

Pre vodomerné stanice s kratším obdobím vyhodnocovania prietokov (ktoré v Tab. 3 neuvádzame) sa výskyt mesačných minimálnych prietokov viaže na posledné desaťročie minulého storočia a na rok 2003.

Iná je situácia vo vodomerných staniaciach, ktoré začali vyhodnocovať prietoky v roku 1931 a skôr. V týchto vodomerných staniaciach už jasne prevláda výskyt mínim v desaťročí 1941-1950.

Ak by sme brali do úvahy len obdobie 1961-2000, teda nové platné referenčné obdobie, tak výrazne prevláda výskyt mínim v desaťročí 1991-2000, o niečo menšiu frekvenciu mal výskyt mínim v desaťročí 1961-1970. Aby sa desaťročie 2001-2010 „zaradilo na ich úroveň“, museli by byť v ďalších troch rokoch aspoň ešte dva také suché roky, ako bol rok 2003.

Z pohľadu výskytu mínim v jednotlivých desaťročiach by mohli byť zaujímavé aj roky 1921-1930. Z tohto obdobia však máme k dispozícii údaje len z 5 vodomerných staníc, preto nie je možné urobiť závery s platnosťou pre celé územie Slovenska. Avšak pre týchto 5 vodomerných staníc najvýznamnejšie minimum sa vyskytli v dekáde 1921 – 1930, a až po nej ako dve rovnocenné z hľadiska výskytu minimálnych mesačných prietokov sú dekády 1941 – 1950 a 1991 - 2000.

Ak by sme do hodnotenia priradili aj vodomerné stanice s výrazne ovplyvneným hydrologickým režimom, tak na tých, ktoré sú pod vodnými nádržami (napr. Ondava - Horovce) by sa výskyt mínim v jednotlivých desaťročiach postupne zmenšoval (podobne, ako je to pri hodnotení trendov), naopak vo vodomerných staniaciach, nad ktorými sú výrazné odbery podzemných vôd (Bebrava, Čierny Váh) by sa výskyt mínim presúval do súčasnosti.

Z uvedeného rozboru vyplýva, že nie je možné posledných 20 rokov označiť za výnimočné z hľadiska minimálnych mesačných prietokov, a to aj napriek pozorovaným zvýšeným teplotám vzduchu a regionálne zníženým zrážkovým úhrnom.

## ZÁVER

Vývoj vodnosti, ktorý bol hodnotený v prácach Demeterová, Škoda, 2004a, b, 2005a v Šipikalová a kol., 2006 ukázal na nerovnomerné rozloženie zmien a na pomerne jasne vyhranenú regionálnu povahu vývoja odtoku. V zjednodušenej podobe možno územie Slovenska rozdeliť na povodia, v ktorých dochádza k výraznému poklesu vodnosti, na povodia, v ktorých pokles vodnosti je mierny a na povodia, v ktorých nebol identifikovaný pokles, resp. miestami dochádza aj k nárastu vodnosti. Pri porovnávaní M – denných prietokov v práci Demeterová, Škoda, 2004a autori konštatovali, že vo väčšine prípadov došlo k nárastu hodnôt malých kvantilov, t.j.  $Q_{355}$  a  $Q_{364}$ , čo je spôsobené skutočnosťou, že táto charakteristika je charakteristikou pozičnou. Aj keď v posledných rokoch, pričom máme na mysli posledné desaťročie minulého storočia a rok 2003, sa vyskytli suché roky, rozsahom a dĺžkou trvania nepredstavovali také obdobia malej vodnosti, ako napr. v rokoch 1947 a 1949.

$Q_{min}$  svojím spôsobom predstavujú tiež pozičnú hydrologickú charakteristiku. Analýza výskytu minimálnych denných prietokov v jednotlivých desaťročiach potvrdila rovnakú povahu vývoja ako pri M – denných prietokoch. Iná je už situácia pri hodnotení trendov minimálnych prietokov. Regionálne posudzovanie vývoja do značnej miery korešponduje s vývojom celkovej vodnosti, aj keď vieme poukázať na viaceré odlišnosti.

**PodĎakovanie:** Príspevok vznikol v rámci projektu APVV-0335-06. Za podporu ďakujeme.

## LITERATÚRA

- DEMETEROVÁ, B., ŠKODA, P., (2004a): Porovnanie vybraných charakteristík M – denných prietokov obdobia 1961-2000 a 1931-1980 na území Slovenska. Meteorologický časopis 2004, č. 3, s.137-142
- DEMETEROVÁ, B., ŠKODA, P., (2004b): Porovnanie malej vodnosti v období 1961-2000 s hydrologickým referenčným obdobím 1931-1980 na území Slovenska. 8. okresné dni vody, Michalovce, s. 39-48
- DEMETEROVÁ, B., ŠKODA, P., (2005) : Režim minimálnych prietokov na slovenských tokoch v období 1961-2000 na staniciach Národného klimatického programu. Meteorologický časopis 2005, č. 3, s.155-163
- MAJERCÁKOVÁ, O., ŠKODA, P., FAŠKO, P., ŠTASTNÝ, P., (2004): Vývoj zložiek hydrologickej bilancie za obdobia 1931 – 1980 a 1961 – 2000. J. Hydrol. Hydromech. 52, 4, 355-364
- ŠKODA, P., KULLMAN, E., (1997): Monitorovanie zmien klímy na vybraných hydrologických staniciach na Slovensku. Národný klimatický program Slovenskej republiky.6/97.s.118-124
- ŠIPIKALOVÁ, H., ŠKODA, P., DEMETEROVÁ, B., MAJERCÁKOVÁ, O., (2006): Nové hydrologické údaje povrchových vôd. Vodohospodársky spravodajca 5-6, 2006, roč. XLIX, str. 26-29.

## ASSESSMENT OF THE TREND OF MINIMUM DISCHARGES ON THE SLOVAK TERRITORY

Škoda, P., Majercáková, O., Demeterová, B., Danáčová, Z.

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava  
[peter.skoda@shmu.sk](mailto:peter.skoda@shmu.sk), [olga.majercakova@shmu.sk](mailto:olga.majercakova@shmu.sk), [beata.demeterova@shmu.sk](mailto:beata.demeterova@shmu.sk),  
[zuzana.danacova@shmu.sk](mailto:zuzana.danacova@shmu.sk)

In selected water gauging stations, the development of the hydrological characteristics of low flows - annual minimum discharges - and the occurrence of the monthly minimum discharges in individual decades are evaluated during the observed period. The frequency of occurrence of monthly minimum discharges indicates the time distribution of this characteristic. The trend analysis applied on whole series of annual minimum discharges and minimum 7-days discharges describes the development of these characteristics on the Slovak territory. The evaluation as well as the analysis were made in water gauging station involved into National climate programme of Slovak Republic.

Prílohy:

Tab. 1 Charakteristiky malej vodnosti vo vybraných vodomerných staniciach  
*Characteristics of low flow in selected water gauging stations*

Tab. 2 Minimálne mesačné prietoky vo vodomernej stanici Hron – Brezno  
*Monthly minimum discharges in water gauging station Hron - Brezno*

Tab. 3 Početnosť výskytu minimálnych mesačných prietokov v jednotlivých desaťročiach vo vybraných vodomerných staniciach  
*The frequency of occurrence of monthly minimum discharges in individual decades in selected water gauging stations*

Grafická príloha:

Priebeh a trend minimálnych prietokov vo vybraných vodomerných staniciach

*Graphs:*

*Course and trend of minimum discharges in selected water gauging stations*



Tab. 1

| P.č. | Tok              | Stanica              | Plocha povodia | Obdobie   | Q <sub>min abs</sub> | Q <sub>355</sub> | Q <sub>364</sub> | SLTQmin |
|------|------------------|----------------------|----------------|-----------|----------------------|------------------|------------------|---------|
| 1    | Morava           | Moravský Ján         | 24129,3        | 1922-2005 | 7,7                  | 23,74            | 15,5             | 0,023   |
| 2    | Dunaj            | Bratislava           | 131331,1       | 1901-2005 | 580                  | 913              | 800              | 0,993   |
| 3    | Biely Váh        | Východná             | 105,64         | 1923-2005 | 0,209                | 0,492            | 0,35             | -0,004  |
| 4    | Boca             | Kráľova Lehota       | 116,6          | 1931-2005 | 0,206                | 0,414            | 0,293            | -0,005  |
| 5    | Belá             | Podbanské            | 93,49          | 1928-2005 | 0,4                  | 0,665            | 0,544            | 0,002   |
| 6    | Váh              | LM                   | 1107,21        | 1921-2005 | 3,8                  | 6,237            | 4,937            | 0,002   |
| 7    | Revúca           | Podsudá              | 217,95         | 1931-2005 | 0,5                  | 1,103            | 0,66             | -0,006  |
| 8    | Ľubochňanka      | Ľubochňa             | 118,48         | 1931-2005 | 0,32                 | 0,78             | 0,47             | -0,001  |
| 9    | Turiec           | Martin               | 827            | 1931-2005 | 2,121                | 3,3              | 2,65             | -0,004  |
| 10   | Kysuca           | Čadca                | 492,54         | 1931-2005 | 0,32                 | 0,84             | 0,438            | 0,001   |
| 11   | Kysuca           | Kysucké Nové Mesto   | 955,09         | 1931-2005 | 0,84                 | 2,02             | 1,234            | 0,014   |
| 12   | Rajčianka        | Poluvsie             | 243,6          | 1931-2005 | 0,298                | 0,691            | 0,485            | -0,001  |
| 13   | Handlovka        | Handlová             | 40,18          | 1931-2005 | 0,042                | 0,135            | 0,09             | 0,000   |
| 14   | Hron             | Zlatno               | 83,67          | 1931-2005 | 0,16                 | 0,314            | 0,232            | -0,002  |
| 15   | Hron             | Brezno               | 582,08         | 1931-2005 | 1,2                  | 1,773            | 1,355            | 0,002   |
| 16   | Čierny Hron      | Hronec               | 239,41         | 1931-2005 | 0,373                | 0,612            | 0,49             | 0,000   |
| 17   | Bystrianka       | Bystrá               | 36,01          | 1931-2005 | 0,096                | 0,165            | 0,125            | -0,003  |
| 18   | Štiavnička       | Mýto pod Ďumbierom   | 47,1           | 1931-2005 | 0,17                 | 0,244            | 0,207            | -0,005  |
| 19   | Vajskovský potok | Dolná Lehota         | 53,02          | 1931-2005 | 0,245                | 0,356            | 0,31             | -0,003  |
| 20   | Hron             | Banská Bystrica      | 1766,48        | 1931-2005 | 4,8                  | 7,549            | 6,541            | -0,027  |
| 21   | Brehy            | Hron                 | 3821,38        | 1931-2005 | 7,7                  | 11,65            | 9,841            | -0,028  |
| 22   | Ipel'            | Holíša               | 685,67         | 1931-2005 | 0,01                 | 0,287            | 0,128            | 0,000   |
| 23   | Krivánsky potok  | Lučenec              | 204,2          | 1931-2005 | 0,04                 | 0,102            | 0,063            | 0,002   |
| 24   | Krupinica        | Plášťovce            | 302,97         | 1931-2005 | 0,017                | 0,094            | 0,032            | -0,001  |
| 25   | Litava           | Plášťovce            | 214,27         | 1931-2005 | 0,01                 | 0,04             | 0,02             | -0,001  |
| 26   | Dobšinský potok  | Dobšiná              | 31,97          | 1931-2005 | 0,052                | 0,112            | 0,085            | -0,004  |
| 27   | Štítnik          | Štítnik              | 129,63         | 1931-2005 | 0,062                | 0,26             | 0,14             | -0,004  |
| 28   | Rimavica         | Lehota nad Rimavicou | 148,95         | 1931-2005 | 0,03                 | 0,2              | 0,1              | -0,002  |
| 29   | Torysa           | Košické Oľšany       | 1298,3         | 1931-2005 | 0,54                 | 1,25             | 0,86             | -0,001  |
| 30   | Topľa            | Hanušovce            | 1050,05        | 1931-2005 | 0,71                 | 1,432            | 1,02             | 0,003   |
| 31   | Poprad           | Matejovce            | 311,1          | 1931-2005 | 0,78                 | 1,226            | 1,02             | -0,001  |
| 32   | Poprad           | Chmelnica            | 1262,41        | 1931-2005 | 2,24                 | 3,591            | 2,683            | -0,018  |

Tab.2

Tok: Hron

Stanica: Brezno

|      | 11    | 12    | 1    | 2    | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    | 8    | 9    | 10    |
|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 1931 | 8,90  | 3,50  | 3,30 | 3,60 | 4,30  | 7,90  | 6,10  | 3,40  | 2,60 | 3,30 | 4,60 | 3,60  |
| 1932 | 4,90  | 3,10  | 2,80 | 2,20 | 2,20  | 3,60  | 5,40  | 5,80  | 3,50 | 2,10 | 2,60 | 2,90  |
| 1933 | 3,00  | 2,10  | 1,90 | 1,90 | 1,68  | 1,32  | 2,10  | 2,30  | 5,30 | 2,50 | 2,30 | 2,10  |
| 1934 | 9,00  | 2,50  | 3,40 | 2,70 | 3,80  | 8,10  | 2,50  | 2,10  | 2,10 | 1,56 | 2,30 | 2,30  |
| 1935 | 4,80  | 7,10  | 3,80 | 3,40 | 6,70  | 8,50  | 8,50  | 2,90  | 1,90 | 1,56 | 1,56 | 1,56  |
| 1936 | 2,50  | 2,70  | 7,00 | 7,60 | 14,70 | 17,90 | 11,80 | 7,60  | 2,90 | 5,30 | 2,50 | 2,50  |
| 1937 | 2,50  | 2,50  | 2,10 | 2,20 | 7,60  | 12,30 | 10,90 | 4,80  | 2,70 | 1,90 | 8,10 | 4,80  |
| 1938 | 4,80  | 10,40 | 5,70 | 5,10 | 6,70  | 3,30  | 5,30  | 2,30  | 1,68 | 1,44 | 3,80 | 3,40  |
| 1939 | 3,40  | 4,30  | 3,70 | 4,00 | 4,40  | 6,70  | 7,10  | 7,60  | 1,90 | 1,44 | 1,44 | 2,50  |
| 1940 | 5,70  | 2,40  | 1,90 | 2,10 | 2,10  | 4,30  | 7,60  | 5,30  | 6,20 | 2,50 | 2,90 | 1,90  |
| 1941 | 5,30  | 3,80  | 2,70 | 3,00 | 5,20  | 10,30 | 9,90  | 7,00  | 5,00 | 5,00 | 4,80 | 4,80  |
| 1942 | 5,20  | 4,80  | 2,70 | 2,60 | 2,80  | 5,80  | 5,80  | 4,00  | 3,60 | 2,40 | 2,20 | 2,60  |
| 1943 | 2,00  | 1,90  | 1,80 | 2,20 | 2,80  | 3,70  | 1,70  | 2,20  | 2,80 | 1,20 | 1,25 | 1,20  |
| 1944 | 1,26  | 1,31  | 1,27 | 1,26 | 3,00  | 3,40  | 10,10 | 7,70  | 7,70 | 2,90 | 2,50 | 3,00  |
| 1945 | 15,60 | 17,00 | 6,40 | 2,20 | 7,00  | 15,40 | 11,00 | 8,20  | 2,20 | 2,00 | 2,10 | 1,90  |
| 1946 | 2,00  | 4,70  | 2,30 | 2,30 | 3,40  | 9,40  | 5,60  | 3,90  | 3,20 | 1,90 | 1,50 | 1,50  |
| 1947 | 2,10  | 1,49  | 1,33 | 1,39 | 1,30  | 5,60  | 2,00  | 1,70  | 1,65 | 1,33 | 1,30 | 1,22  |
| 1948 | 1,39  | 2,20  | 5,70 | 4,30 | 3,80  | 9,40  | 6,00  | 4,60  | 4,70 | 2,00 | 1,49 | 1,65  |
| 1949 | 2,00  | 1,30  | 1,40 | 1,43 | 1,83  | 6,30  | 3,70  | 2,80  | 2,40 | 2,60 | 1,90 | 2,10  |
| 1950 | 1,68  | 6,30  | 3,00 | 3,20 | 5,00  | 4,40  | 3,60  | 2,10  | 1,88 | 1,65 | 1,30 | 2,20  |
| 1951 | 3,90  | 7,10  | 5,60 | 5,00 | 6,20  | 12,60 | 10,50 | 9,30  | 4,10 | 3,30 | 2,10 | 1,98  |
| 1952 | 2,10  | 2,00  | 4,30 | 4,40 | 3,70  | 17,20 | 5,10  | 3,50  | 1,80 | 1,72 | 1,88 | 2,90  |
| 1953 | 7,60  | 5,20  | 6,00 | 5,60 | 4,40  | 8,40  | 6,00  | 4,80  | 6,10 | 3,50 | 2,30 | 2,30  |
| 1954 | 1,60  | 1,72  | 1,70 | 1,24 | 1,60  | 3,70  | 7,60  | 11,40 | 7,20 | 3,60 | 2,50 | 1,95  |
| 1955 | 1,75  | 1,92  | 3,60 | 6,80 | 4,00  | 9,10  | 8,70  | 4,00  | 3,20 | 4,20 | 4,40 | 4,00  |
| 1956 | 3,60  | 3,30  | 3,20 | 2,20 | 4,00  | 9,00  | 5,50  | 4,30  | 2,80 | 2,20 | 1,60 | 1,40  |
| 1957 | 1,35  | 2,20  | 2,80 | 2,00 | 2,00  | 6,60  | 4,40  | 2,80  | 3,00 | 2,60 | 2,60 | 2,70  |
| 1958 | 2,42  | 2,60  | 2,10 | 2,80 | 3,20  | 8,50  | 6,00  | 6,10  | 4,20 | 3,60 | 2,30 | 2,34  |
| 1959 | 3,60  | 3,10  | 5,20 | 2,30 | 5,48  | 3,90  | 4,80  | 4,90  | 7,60 | 4,80 | 2,72 | 2,44  |
| 1960 | 1,90  | 2,70  | 1,90 | 2,30 | 4,20  | 7,50  | 5,20  | 5,50  | 4,90 | 7,10 | 4,40 | 4,60  |
| 1961 | 6,77  | 6,45  | 5,37 | 4,58 | 4,41  | 3,15  | 2,35  | 3,30  | 2,65 | 1,90 | 1,20 | 1,20  |
| 1962 | 1,90  | 4,15  | 3,40 | 3,22 | 3,20  | 21,20 | 8,56  | 4,44  | 3,06 | 1,76 | 1,48 | 1,34  |
| 1963 | 1,76  | 3,06  | 1,80 | 2,18 | 2,38  | 11,20 | 7,24  | 4,16  | 2,88 | 3,06 | 3,24 | 3,06  |
| 1964 | 3,06  | 2,40  | 2,65 | 2,80 | 2,54  | 3,42  | 2,70  | 2,06  | 3,24 | 2,22 | 2,54 | 2,22  |
| 1965 | 6,44  | 7,52  | 3,99 | 2,40 | 2,00  | 13,00 | 13,70 | 10,30 | 8,50 | 6,10 | 4,85 | 3,60  |
| 1966 | 2,80  | 3,40  | 1,20 | 1,20 | 5,70  | 5,35  | 4,70  | 3,80  | 3,15 | 5,10 | 3,42 | 2,40  |
| 1967 | 5,00  | 4,60  | 2,60 | 2,18 | 7,00  | 12,10 | 7,60  | 5,30  | 3,60 | 2,70 | 2,10 | 2,81  |
| 1968 | 2,50  | 2,80  | 2,00 | 2,15 | 3,90  | 6,85  | 4,45  | 3,70  | 2,70 | 2,65 | 2,95 | 3,10  |
| 1969 | 2,90  | 2,50  | 2,02 | 2,14 | 3,14  | 9,20  | 4,95  | 4,30  | 3,60 | 3,00 | 2,50 | 2,25  |
| 1970 | 2,50  | 3,30  | 3,00 | 2,60 | 2,90  | 18,10 | 9,10  | 6,17  | 6,45 | 7,20 | 3,62 | 3,15  |
| 1971 | 3,30  | 4,93  | 4,55 | 4,00 | 3,60  | 9,40  | 7,35  | 7,03  | 3,82 | 3,50 | 2,80 | 2,61  |
| 1972 | 2,50  | 2,60  | 2,10 | 2,03 | 4,80  | 4,80  | 9,20  | 9,70  | 5,20 | 3,40 | 3,50 | 3,50  |
| 1973 | 3,30  | 1,70  | 1,34 | 1,55 | 2,67  | 4,28  | 3,35  | 3,20  | 4,60 | 2,71 | 1,94 | 1,98  |
| 1974 | 1,80  | 1,55  | 1,70 | 2,65 | 3,90  | 4,06  | 4,40  | 6,10  | 3,84 | 3,20 | 3,00 | 16,30 |
| 1975 | 7,75  | 6,50  | 5,60 | 4,50 | 4,60  | 9,50  | 8,40  | 8,70  | 5,80 | 3,85 | 3,46 | 3,11  |
| 1976 | 3,20  | 2,80  | 2,80 | 2,70 | 3,62  | 11,60 | 6,48  | 3,31  | 2,25 | 2,25 | 3,11 | 4,35  |
| 1977 | 7,01  | 7,50  | 4,80 | 5,99 | 19,90 | 14,30 | 7,50  | 3,45  | 2,58 | 3,70 | 3,75 | 3,05  |
| 1978 | 2,93  | 3,23  | 3,06 | 2,88 | 5,85  | 7,22  | 10,97 | 7,38  | 4,80 | 4,44 | 3,76 | 3,44  |
| 1979 | 2,70  | 2,16  | 2,08 | 3,73 | 3,99  | 12,47 | 6,68  | 5,52  | 3,13 | 2,64 | 2,66 | 2,44  |
| 1980 | 2,53  | 7,46  | 4,34 | 3,41 | 2,93  | 10,09 | 7,36  | 5,41  | 6,30 | 4,99 | 4,14 | 4,02  |
| 1981 | 8,67  | 5,60  | 4,20 | 3,68 | 3,67  | 5,69  | 4,14  | 8,28  | 4,22 | 2,49 | 2,41 | 2,74  |
| 1982 | 3,85  | 3,61  | 3,85 | 3,60 | 4,10  | 6,69  | 6,07  | 3,80  | 3,36 | 2,63 | 2,12 | 2,30  |
| 1983 | 2,18  | 2,60  | 4,46 | 5,13 | 5,81  | 11,83 | 6,88  | 3,28  | 2,29 | 2,05 | 1,83 | 1,96  |
| 1984 | 1,82  | 1,82  | 1,69 | 1,68 | 2,41  | 5,45  | 5,14  | 8,07  | 3,42 | 2,90 | 2,59 | 6,10  |
| 1985 | 4,35  | 3,62  | 3,10 | 2,90 | 2,90  | 8,26  | 8,33  | 10,14 | 5,88 | 5,21 | 2,94 | 2,32  |
| 1986 | 2,51  | 2,70  | 2,80 | 2,42 | 2,42  | 10,51 | 5,31  | 6,10  | 2,92 | 2,64 | 1,78 | 1,70  |
| 1987 | 1,66  | 1,36  | 1,36 | 1,36 | 1,36  | 8,86  | 7,93  | 5,87  | 2,99 | 1,86 | 1,44 | 1,78  |
| 1988 | 1,61  | 2,69  | 2,83 | 3,39 | 3,30  | 10,58 | 7,72  | 6,49  | 4,80 | 3,27 | 4,53 | 3,07  |
| 1989 | 1,99  | 1,99  | 1,61 | 1,70 | 5,66  | 8,27  | 6,97  | 7,93  | 3,68 | 2,35 | 1,96 | 1,79  |
| 1990 | 1,91  | 1,75  | 1,84 | 2,08 | 3,27  | 5,53  | 6,30  | 4,38  | 3,37 | 2,09 | 1,65 | 2,20  |
| 1991 | 4,64  | 5,09  | 2,61 | 2,22 | 2,11  | 6,21  | 6,30  | 5,77  | 4,69 | 3,28 | 1,94 | 1,80  |
| 1992 | 2,52  | 4,26  | 2,00 | 2,72 | 2,89  | 8,29  | 4,72  | 3,42  | 2,75 | 1,76 | 1,65 | 1,82  |
| 1993 | 5,02  | 3,27  | 3,07 | 2,86 | 2,67  | 4,13  | 3,18  | 2,22  | 1,62 | 1,28 | 1,79 | 1,95  |
| 1994 | 2,26  | 2,37  | 4,31 | 2,96 | 6,30  | 16,70 | 7,70  | 4,66  | 1,95 | 1,77 | 2,26 | 3,39  |
| 1995 | 5,26  | 3,72  | 2,50 | 2,94 | 6,28  | 7,44  | 10,11 | 7,60  | 4,00 | 2,50 | 4,56 | 2,86  |
| 1996 | 2,13  | 1,81  | 2,04 | 2,10 | 1,81  | 5,08  | 11,23 | 7,31  | 3,99 | 3,09 | 7,36 | 4,10  |
| 1997 | 3,51  | 3,18  | 2,19 | 2,14 | 3,08  | 3,33  | 5,10  | 3,26  | 5,31 | 3,48 | 2,47 | 1,90  |
| 1998 | 2,02  | 3,44  | 2,51 | 2,50 | 2,95  | 2,96  | 4,79  | 4,41  | 2,72 | 2,41 | 2,22 | 7,10  |
| 1999 | 5,20  | 2,28  | 1,71 | 1,90 | 2,39  | 13,13 | 4,17  | 4,06  | 6,48 | 3,97 | 2,28 | 2,12  |
| 2000 | 1,70  | 1,50  | 1,61 | 2,11 | 2,26  | 14,84 | 3,88  | 3,18  | 3,01 | 2,70 | 1,88 | 1,69  |
| 2001 | 2,23  | 2,09  | 5,40 | 3,91 | 4,40  | 10,93 | 3,92  | 2,56  | 2,69 | 4,03 | 3,73 | 2,98  |
| 2002 | 2,68  | 2,33  | 2,28 | 4,22 | 6,63  | 5,73  | 4,00  | 2,90  | 2,12 | 6,11 | 3,96 | 3,82  |
| 2003 | 7,28  | 4,30  | 3,32 | 2,53 | 2,72  | 5,20  | 6,04  | 2,73  | 1,95 | 1,29 | 1,33 | 1,72  |
| 2004 | 1,69  | 1,32  | 1,65 | 1,63 | 1,83  | 7,83  | 7,53  | 5,81  | 3,73 | 3,59 | 2,32 | 2,11  |
| 2005 | 2,87  | 2,90  | 2,50 | 2,31 | 2,13  | 16,37 | 8,23  | 4,05  | 3,26 | 6,00 | 3,84 | 2,97  |
| 2006 | 2,19  | 2,79  | 2,97 | 2,58 | 2,58  | 19,06 | 7,43  | 7,24  | 4,11 | 4,08 | 2,30 | 1,87  |

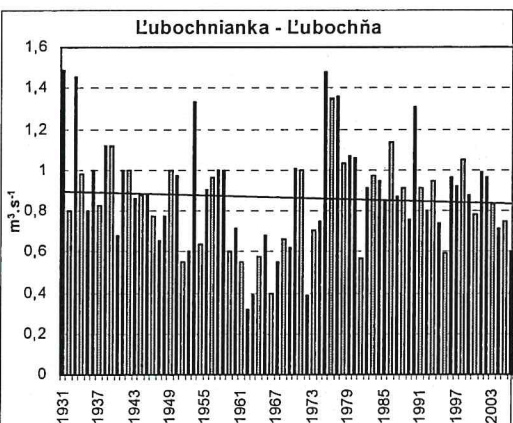
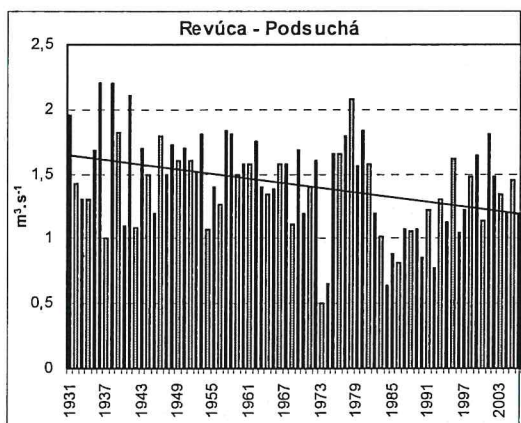
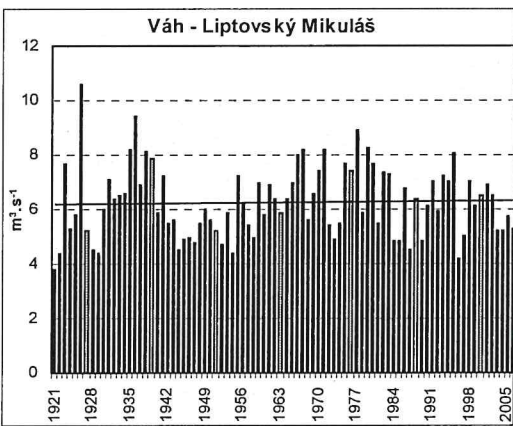
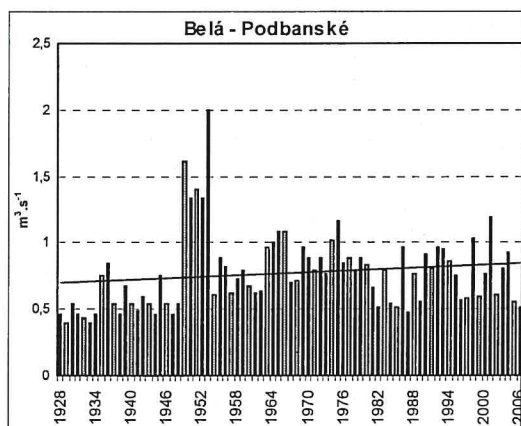
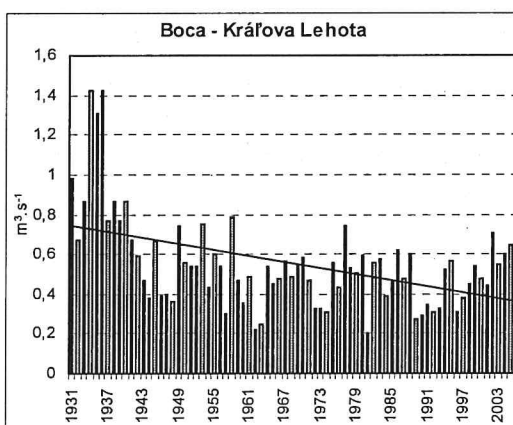
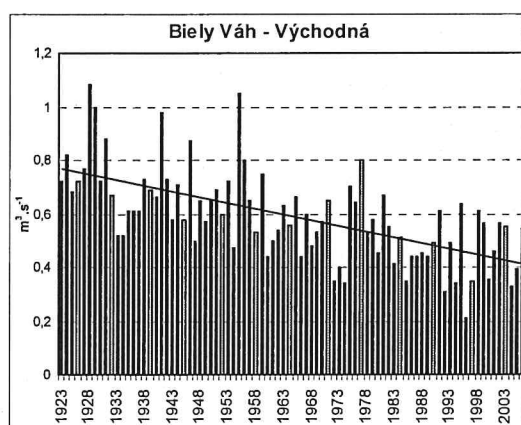
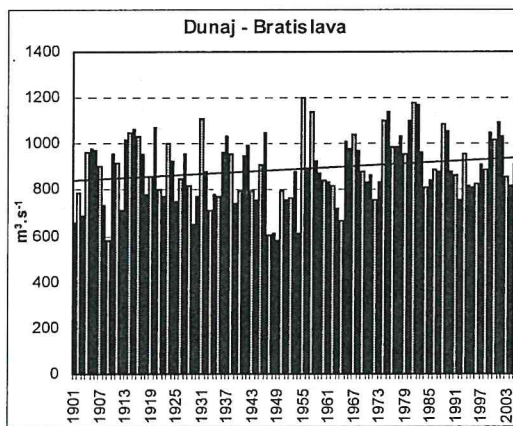
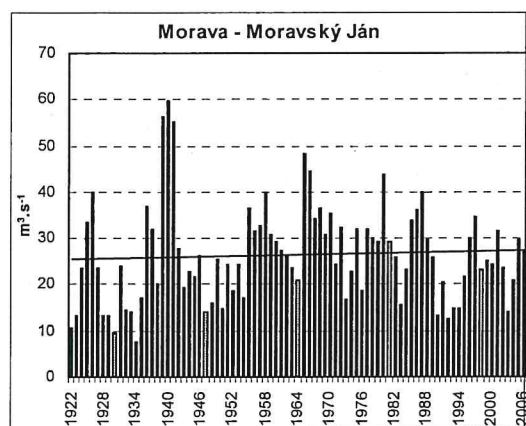


Tab. 3

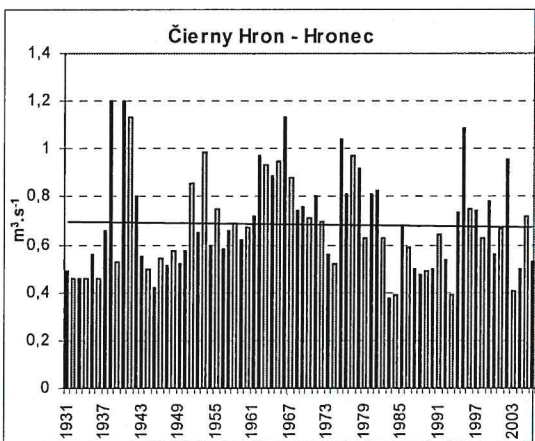
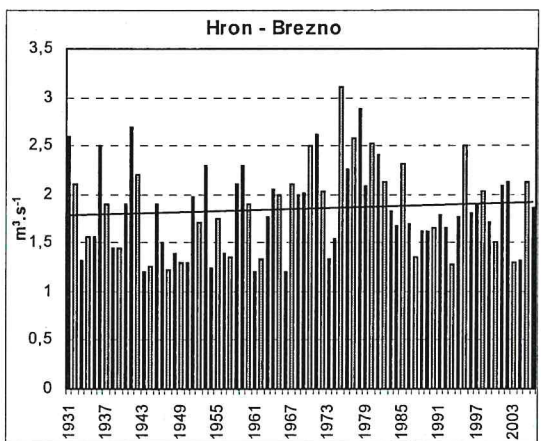
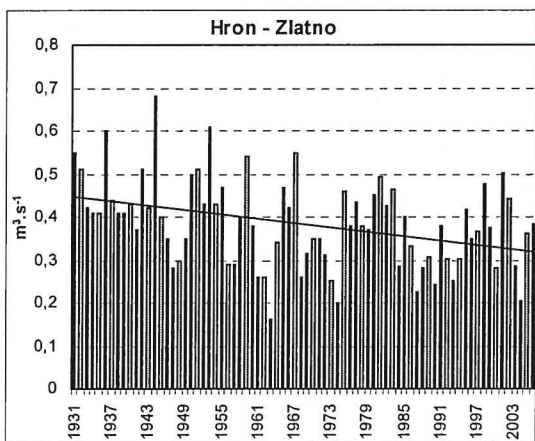
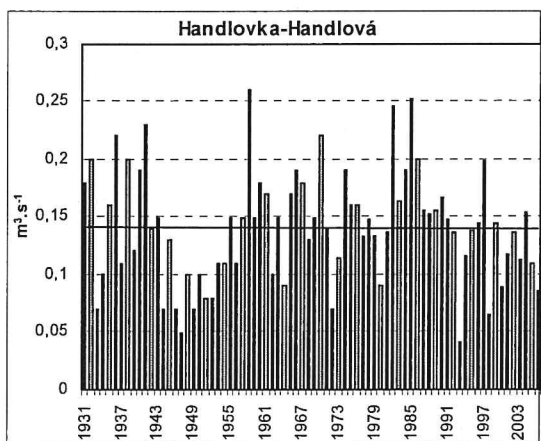
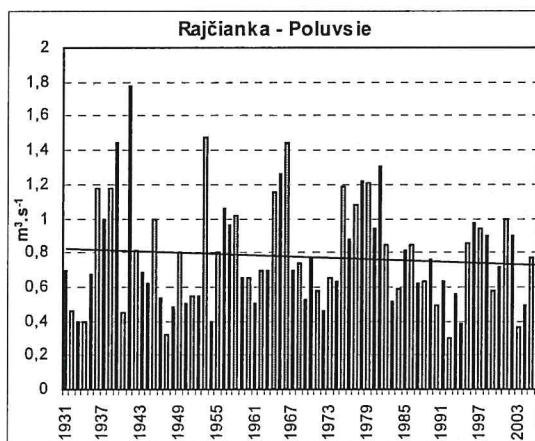
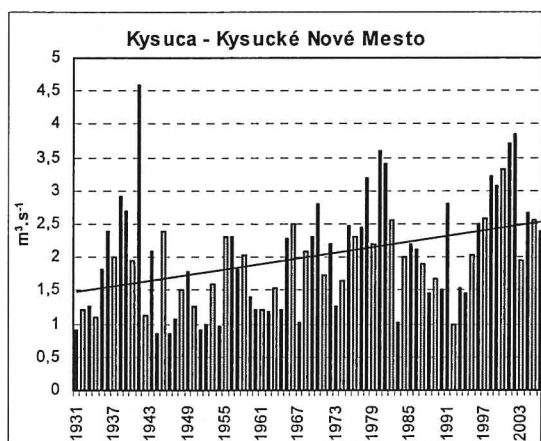
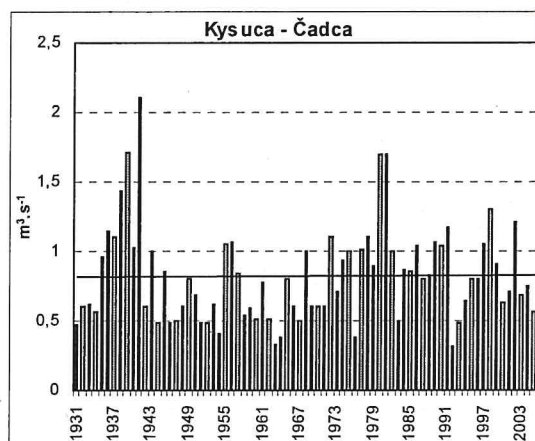
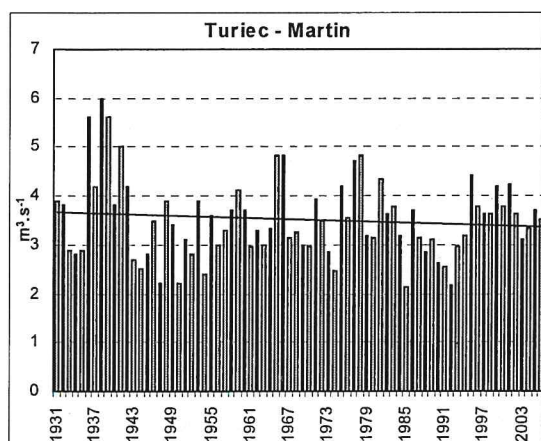
| P.č. | Tok              | Stanica              | 1901-1910 | 1911-1920 | 1921-1930 | 1931-1940 | 1941-1950 | 1951-1960 | 1961-1970 | 1971-1980 | 1981-1990 | 1991-2000 | 2001- |
|------|------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 1    | Morava           | Moravský Ján         |           |           | 4         | 5         | 1         | 0         | 0         | 1         | 1         | 0         | 0     |
| 2    | Dunaj            | Bratislava           | 3         | 0         | 0         | 1         | 4         | 0         | 0         | 1         | 0         | 1         | 2     |
| 3    | Biely Váh        | Východná             |           |           | 0         | 1         | 0         | 0         | 0         | 0         | 2         | 8         | 1     |
| 4    | Boca             | Kráľova Lehota       |           |           |           | 0         | 0         | 2         | 4         | 1         |           | 4         | 1     |
| 5    | Belá             | Podbanské            |           |           | 4         | 3         | 2         | 0         | 1         | 0         | 1         | 1         | 0     |
| 6    | Váh              | LM                   |           |           | 6         | 0         | 4         | 1         | 0         | 0         | 0         | 1         |       |
| 7    | Revúca           | Podsúchá             |           |           |           | 0         | 0         | 0         | 0         | 6         | 3         | 3         | 0     |
| 8    | Lubochňanica     | Lubochňa             |           |           |           | 0         | 0         | 1         | 6         | 3         | 1         | 1         | 0     |
| 9    | Turiec           | Martin               |           |           |           | 0         | 3         | 2         | 0         | 1         | 2         | 4         | 0     |
| 10   | Kysuca           | Čadca                |           |           |           | 1         | 2         | 3         | 3         | 0         | 0         | 2         | 1     |
| 11   | Kysuca           | Kysucké Nové Mesto   |           |           |           | 4         | 6         | 2         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0     |
| 12   | Rajčianka        | Poluvsie             |           |           |           | 4         | 1         | 1         | 0         | 0         | 1         | 3         | 2     |
| 13   | Handlovka        | Handlová             |           |           |           | 0         | 11        | 0         | 0         | 0         | 0         | 1         | 0     |
| 14   | Hron             | Zlatno               |           |           |           | 2         | 0         | 0         | 5         | 1         | 0         | 3         | 1     |
| 15   | Hron             | Brezno               |           |           |           | 1         | 6         | 0         | 4         | 0         | 0         | 1         | 0     |
| 16   | Čierny Hron      | Hronec               |           |           |           | 3         | 2         | 0         | 0         | 0         | 5         | 0         | 2     |
| 17   | Bystrianka       | Bystrá               |           |           |           | 0         | 0         | 0         | 1         | 2         | 5         | 3         | 1     |
| 18   | Štiavica         | Myto pod Ďumbierom   |           |           |           | 0         | 0         | 1         | 2         | 2         | 2         | 3         | 1     |
| 19   | Vajskovský potok | Dolná Lehota         |           |           |           | 1         | 2         | 0         | 0         | 1         | 4         | 2         | 2     |
| 20   | Hron             | Banská Bystrica      |           |           |           | 1         | 4         | 3         | 0         | 0         | 0         | 2         | 2     |
| 21   | Brehy            | Hron                 |           |           |           | 2         | 2         | 2         | 0         | 1         | 1         | 1         | 3     |
| 22   | Krivánsky potok  | Lučenec              |           |           |           | 2         | 7         | 2         | 1         | 0         | 0         | 0         | 0     |
| 23   | Ipeľ             | Holiša               |           |           |           | 0         | 12        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0     |
| 24   | Krupinica        | Plášťovce            |           |           |           | 0         | 2         | 0         | 1         | 7         | 0         | 2         | 0     |
| 25   | Litava           | Plášťovce            |           |           |           | 0         | 3         | 2         | 2         | 0         | 2         | 3         | 0     |
| 26   | Dobšinský potok  | Dobšiná              |           |           |           | 0         | 1         | 0         | 0         | 1         | 4         | 6         | 0     |
| 27   | Štítnik          | Štítnik              |           |           |           | 0         | 3         | 2         | 4         | 0         | 1         | 2         | 0     |
| 28   | Rimavica         | Lehota nad Rimavicou |           |           |           | 0         | 3         | 2         | 4         | 0         | 1         | 2         | 0     |
| 29   | Torysa           | Košické Oľšany       |           |           |           | 0         | 4         | 0         | 7         | 1         | 0         | 0         | 0     |
| 30   | Topľa            | Hanušovce            |           |           |           | 3         | 6         | 0         | 0         | 1         | 2         | 0         | 0     |
| 31   | Poprad           | Matejovce            |           |           |           | 2         | 1         | 1         | 3         | 1         | 1         | 0         | 3     |
| 32   | Poprad           | Chmeľnica            |           |           |           | 1         | 0         | 0         | 5         | 1         | 4         | 0         | 1     |

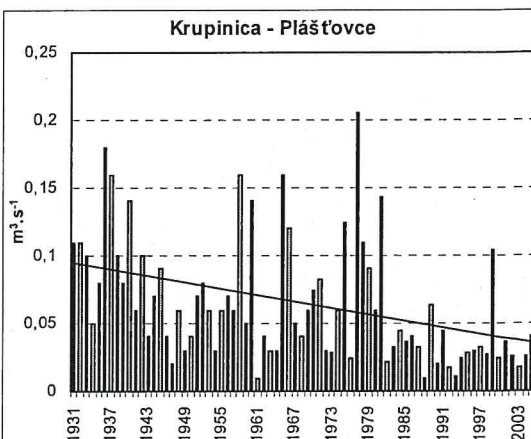
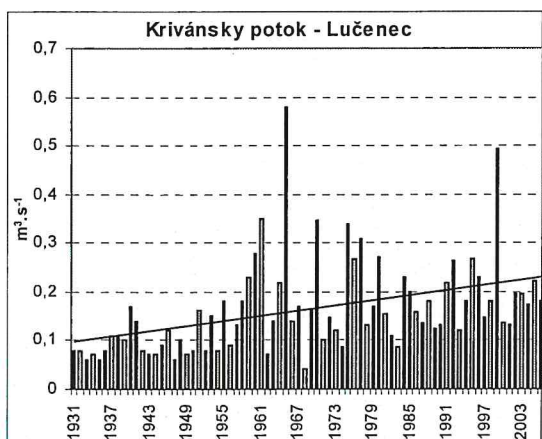
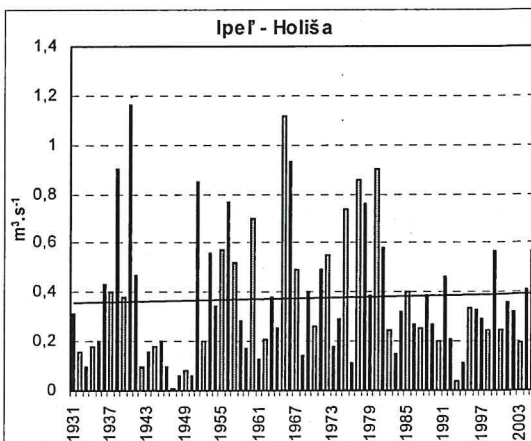
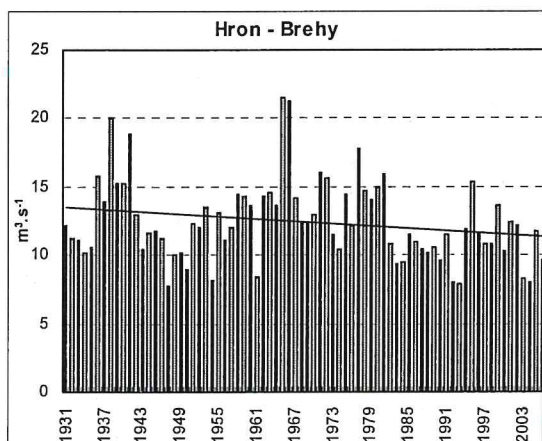
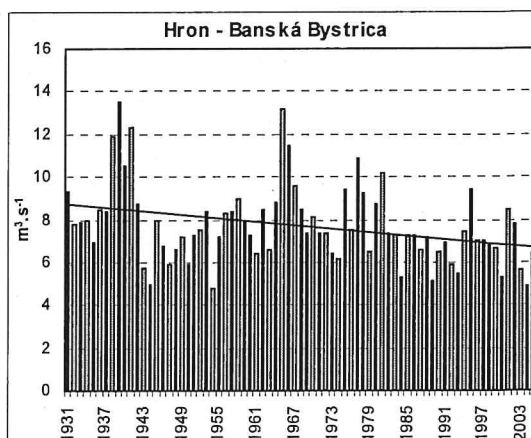
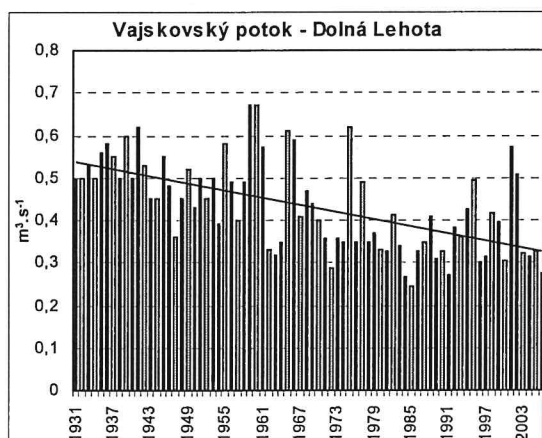
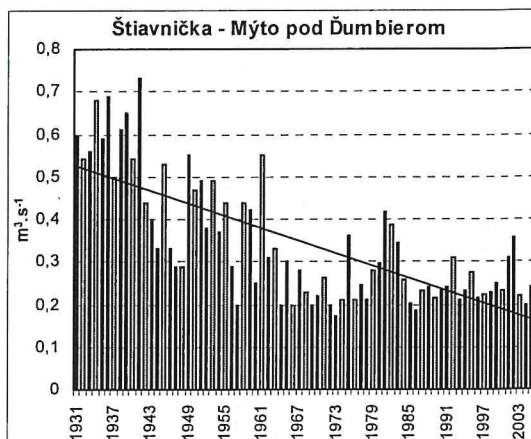
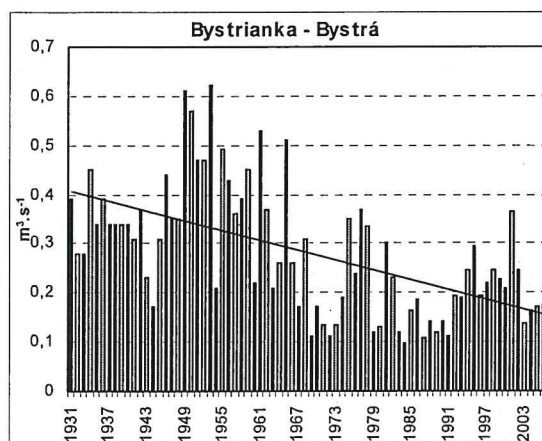
v príslušných staniaciach a rokoch sa prietoky nevyhodnocovali  
detailné hodnotenie stanice Brezno je v Tab. 2

# Grafická príloha:

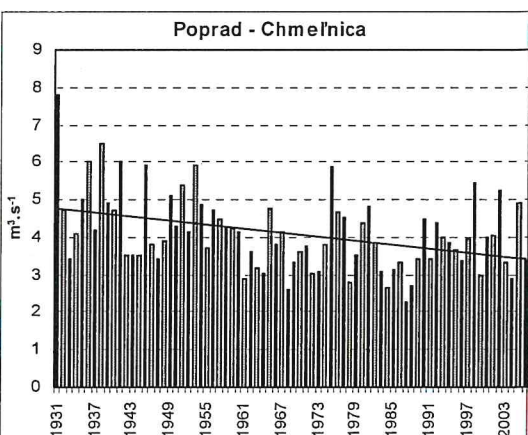
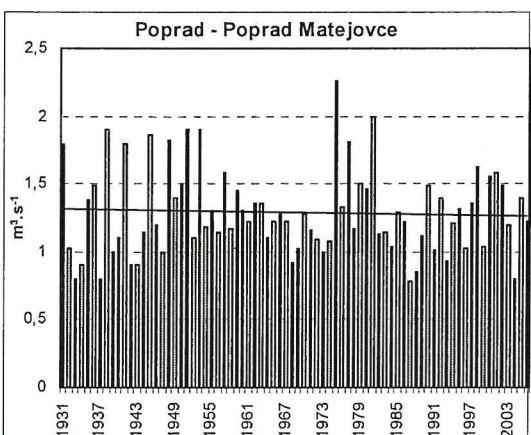
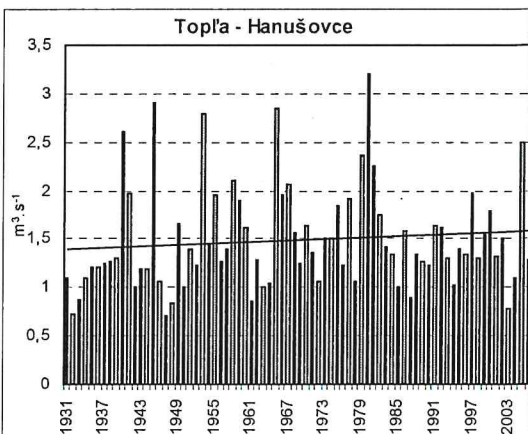
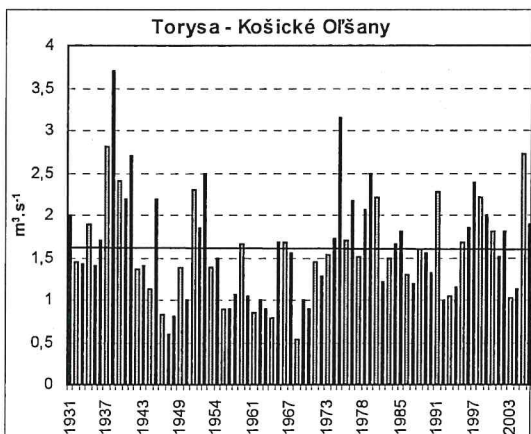
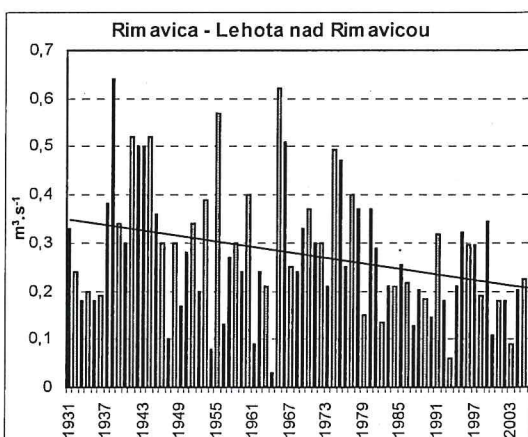
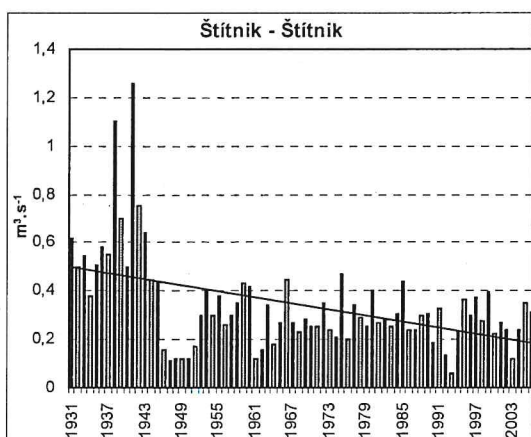
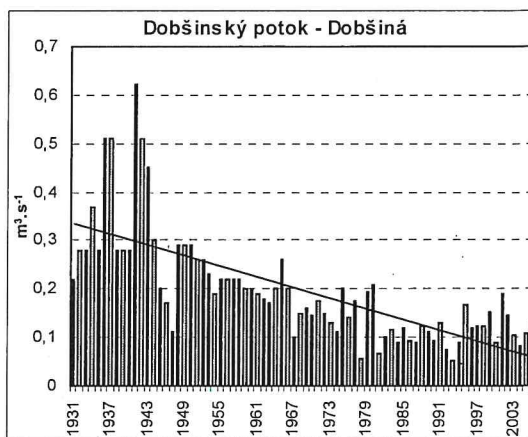
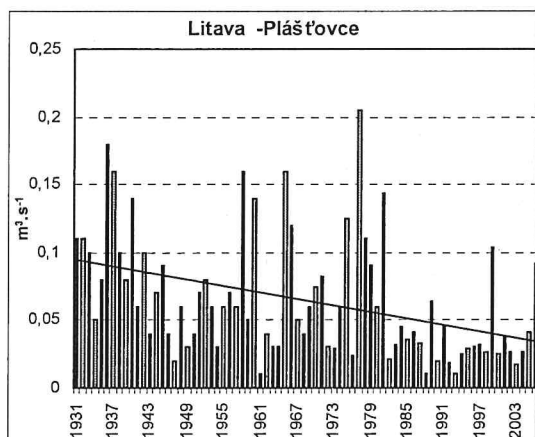
















# ZMENY HYDROLOGICKÉHO REŽIMU SLOVENSKÝCH TOKOV A ZÁKLADNÉ ADAPTAČNÉ OPATRENIA NA ZMENU KLÍMY VO VODNOM HOSPODÁRSTVE

<sup>(1)</sup>Kamila Hlavčová, <sup>(1)</sup>Ján Szolgay, <sup>(2)</sup>Dana Halmová, <sup>(3)</sup>Juraj Parajka, <sup>(1)</sup>Silvia Kohnová

<sup>(1)</sup> Katedra vodného hospodárstva krajiny SvF STU v Bratislave

<sup>(2)</sup>Ústav hydrológie SAV v Bratislave <sup>(3)</sup>Institute for Hydraulic and Water Resources  
Engineering, VUT Vienna

**Abstrakt:** Príspevok syntetizuje výsledky analýz možného vplyvu zmeny klímy na odtokový režim vo vybraných regiónoch a povodiach Slovenska. Pomocou rôznych hydrologických modelov boli simulované hydrologické scenáre budúceho vývoja dlhodobého priemerného ročného odtoku, sezónneho rozdelenia odtoku, ako aj zabezpečenia odberu vody z vodných nádrží. Ako klimatické scenáre boli použité scenáre spracované z výstupov globálnych modelov atmosféry s prepojeným systémom oceán – atmosféra (GISS98 a CCCM97), regionalizované pre územie Slovenska, ako aj analógové scenáre spracované v rámci NKP SR (WP a SD). Pri posúdení zmien zabezpečenia odberu vody z vodných nádrží boli porovnané aj výsledky dosiahnuté s použitím niektorých starších klimatických scenárov. Možné zmeny odtoku aj odberu vody z VN v budúcich časových horizontoch 2010, 2030 a 2075 boli porovnané s referenčným obdobím 1951-1980. V závere príspevku sú naznačené rámcové adaptačné opatrenia na zmiernenie negatívnych dôsledkov zmeny klímy na hydrologický režim a vodné hospodárstvo.

**Kľúčové slová:** hydrologické scenáre dlhodobého priemerného ročného odtoku, sezónneho rozdelenia odtoku a zabezpečenia odberu z VN, hydrologické modelovanie

## 1. ÚVOD

Možné zmeny odtokových pomerov, spôsobené zmenenými klimatickými podmienkami, predstavujú v súčasnosti jeden z hlavných zdrojov neistoty v oblasti hospodárenia s vodnými zdrojmi. Môžu sa prejavovať poklesom výdatnosti vodných zdrojov, zvýšením extrémnosti povodní a sucha, zmenou režimu odtoku, ako aj zásob snehu na Slovensku.

V uvedenom príspevku prinášame výsledky analýz možného vplyvu zmeny klímy na odtokový režim v rôznych regiónoch a povodiach Slovenska. Syntetizujeme tu výsledky niektorých prác, ktoré boli v poslednom období spracované najmä pre potreby MŽP SR a Národného klimatického programu SR, a v ktorých sme sa zaoberali analýzami možných zmien dlhodobého priemerného ročného a mesačného odtoku (Hlavčová a kol., 1999, 2000a,b, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007; Szolgay a kol., 1997, 1999, 2000, 2002, 2004, 2007), ako aj zmien zabezpečenia odberu vody z vodných nádrží v budúcnosti (Halmová, 2004a,b, 2005a,b,c, 2006; Halmová a Melo, 2006).

Z rôznych metodických postupov, ktoré sa v súčasnosti používajú v impaktných štúdiách na odhad dôsledkov zmeny klímy, sme použili matematické modelovanie zmien hydrologického režimu. Vychádzali sme pritom zo systémovej paradigmy, v rámci ktorej sa klimatické charakteristiky považujú za vstupné veličiny do hydrologického systému. Zmena hydrologického režimu v dôsledku očakávaných zmien klimatických charakteristík sa určuje pomocou niektorého z hydrologických bilančných modelov.

Ako klimatické scenáre sme použili scenáre spracované z výstupov globálnych modelov cirkulácie atmosféry s prepojeným systémom oceán – atmosféra (GISS98 a CCCM97), regionalizované pre územie Slovenska, ako aj analógové scenáre spracované v rámci NKP SR (WP a SD) (Lapin, 2000a, 2000b, 2001a, 2001b). Pri posúdení zmien zabezpečenia odberu vody z vodných nádrží sme porovnali aj výsledky dosiahnuté s použitím niektorých starších klimatických scenárov. Bližším opisom použitých klimatických scenárov sa v tomto príspevku nezaobráme. Možné zmeny odtoku aj odberu vody z VN v budúcich časových horizontoch 2010, 2030 a 2075 sme porovnávali s referenčným ob-

dobím 1951-1980, ktoré odporúča Medzivládny panel pre klimatickú zmenu (IPCC) ako základ pre odvodzovanie scenárov teploty vzduchu.

## **2. VPLYV KLIMATICKEJ ZMENY NA ZMENU DLHODOBÉHO PRIEMERNÉHO ROČNÉHO ODTOKU NA SLOVENSKU**

V tejto časti sumarizujeme výsledky hodnotenia vplyvu možnej klimatickej zmeny na zmenu dlhodobého priemerného ročného odtoku na území Slovenska. Na vytvorenie priestorového vyjadrenia budúcich možných zmien dlhodobého priemerného ročného odtoku bol s využitím prostredia a metód GIS vytvorený empirický rastrový model hydrologickej bilancie, ktorý vychádza zo závislosti medzi priemerným ročným odtokom a priemerným ročným úhrnom zrážok a teplotou vzduchu, resp. indexom priemerného ročného potenciálneho výparu (Turc, 1954). Výsledky prác Szolgay, a kol. (1999), Parajka (2000, 2001) ukázali, že Turcov model modifikovaný pre klimatické pomery územia Slovenska umožňuje vytvoriť pre naše územie reprezentatívne priestorové rozloženie dlhodobého priemerného ročného odtoku.

Na základe použitých klimatických scenárov možnej zmeny ročných úhrnov zrážok vo vybraných klimatických staniách na Slovensku boli vytvorené mapy zmeny dlhodobého priemerného ročného úhrnu zrážok voči zvolenému referenčnému obdobiu 1951-1980. Tieto spolu s informáciou o možnej zmene dlhodobej priemernej ročnej teploty vzduchu slúžili ako vstupné mapy pre Turcov model na výpočet priestorových scenárov zmeny dlhodobého priemerného ročného odtoku. Metódami mapovej algebry sa vypočítali aj územné priemery percentuálnej zmeny odtoku pre vybrané oblasti a povodia Slovenska.

### **a. Metodika výpočtu zmien dlhodobého priemerného ročného špecifického odtoku**

Metodika výpočtu možných zmien dlhodobého priemerného ročného odtoku pre vybrané záujmové oblasti a povodia Slovenska bola založená na nasledovnom postupe:

1. Vytvorenie referenčnej rastrovej mapy priestorového rozloženia dlhodobého priemerného ročného elementárneho odtoku podľa modifikovaného modelu Turca s využitím rastrových máp dlhodobého priemerného ročného úhrnu zrážok a teploty vzduchu pre referenčné obdobie 1951 – 1980.
2. Testovanie vybraných interpolačných metód (metódy inverzne váženej vzdialenosti, Thiessenových polygónov, kriging a metódy 2D regularizovaného splajnu s tenziou) pre vytvorenie rastrových máp zmeny dlhodobého priemerného ročného úhrnu zrážok podľa jednotlivých klimatických scenárov a zhodnotenie ich presnosti.
3. Vytvorenie rastrových máp priestorového rozloženia dlhodobého priemerného ročného elementárneho odtoku pre rôzne scenáre zmien prvkov hydrologickej bilancie.
4. Vytvorenie rastrových máp percentuálneho rozdielu medzi mapou dlhodobého priemerného ročného odtoku referenčného obdobia a mapami odtoku konštruovanými pre jednotlivé klimatické scenáre podľa modifikovaného modelu Turca.
5. Výpočet územných priemerov zmeny dlhodobého priemerného ročného odtoku podľa jednotlivých klimatických scenárov pre vybrané regióny a povodia a ich zhodnotenie.

### **b. Empirický priestorový model hydrologickej bilancie**

Empirické modely na výpočet dlhodobého priemerného ročného odtoku vychádzajú najčastejšie zo závislosti odtoku od iných klimatických činiteľov, ako napr. dlhodobého priemerného ročného úhrnu zrážok a teploty vzduchu, resp. indexu potenciálnej evapotranspirácie. Na základe výsledkov a zhodnotenia uvedených metód (Parajka, 2001) bol na modelovanie priestorového rozloženia dlhodobého priemerného ročného odtoku v referenčnom období a jeho možnej zmeny v budúcnosti vybraný Turcov model (1954). Turc vyjadril závislosť medzi priemernými ročnými hodnotami klimatického výparu  $V$  (mm), odtoku  $O$  (mm), úhrnu zrážok  $Z$  (mm) a teploty vzduchu  $T$  (°C) podľa vzťahu:



$$V / EPI = f(Z / EPI), \quad (1)$$

ktorý charakterizuje pomer dlhodobého priemerného klimatického výparu  $V$  k tzv. indexu potenciálnej evapotranspirácie  $EPI$  ako funkciu pomeru dlhodobého priemerného ročného úhrnu zrážok  $Z$  k indexu  $EPI$ . Hodnotu dlhodobého priemerného ročného odtoku Turc kvantifikoval pomocou rovnice hydrologickej bilancie. Na základe údajov z 254 povodí viacerých klimatických pásiem odvodil pre priemernú ročnú odtokovú výšku  $O$  vzťah:

$$O = Z \cdot \left[ 1 - \frac{EPI}{\left( c \cdot EPI^n + Z^n \right)^{\frac{1}{n}}} \right], \quad (2)$$

v ktorom  $EPI$  vyjadruje tzv. index potenciálnej evapotranspirácie. Index potenciálnej evapotranspirácie vyjadril Turc empiricky ako funkciu dlhodobej priemernej ročnej teploty vzduchu  $T$ :

$$EPI_{TURC} = A + B \cdot T + D \cdot T^3. \quad (3)$$

Regionálne parametre  $A$ ,  $B$ ,  $D$ ,  $c$ ,  $n$  sú určované pre každé povodie na základe meraných hodnôt odtoku, úhrnu zrážok a teploty vzduchu (Parajka, 1994). Na zvýšenie priestorovej reprezentatívnosti Turcovho vzťahu pre územie Slovenska bol tento model postupne spresňovaný s využitím prostredia a metód GIS (Hlavčová a kol., 1999; Parajka, 2000 a 2001, Szolgay a kol., 2007). Na základe nelineárnej regresnej analýzy medzi rastrovými mapami dlhodobého priemerného ročného úhrnu zrážok, skutočnej a potenciálnej evapotranspirácie a teploty vzduchu boli pre obdobie 1951-80 odvodené rovnice:

$$O = Z \cdot \left[ 1 - \frac{EPI_{SR}}{\left( 1,168 EPI_{SR}^{3,273} + Z^{3,273} \right)^{1/3,273}} \right], \quad (4)$$

$$EPI_{SR} = 377,7 + 25 T + 0,05 T^3. \quad (5)$$

Na vytvorenie rastrovej mapy dlhodobého priemerného ročného elementárneho odtoku pomocou takto modifikovaného Turcovho modelu sú potrebné ako vstupy rastrové mapy dlhodobej priemernej ročnej teploty vzduchu a dlhodobého priemerného ročného úhrnu zrážok. Rastrová mapa dlhodobej priemernej ročnej teploty vzduchu bola vytvorená digitalizáciou izočiariovej mapy pre obdobie 1951-1980 (Hlavčová a kol., 1999). Rastrová mapa dlhodobého priemerného ročného úhrnu zrážok pre obdobie 1951-1980 bola vytvorená interpoláciou bodových hodnôt zo zrážkomerných staníc. Ako interpolačná metóda bol použitý 3-dimenzionálny regularizovaný splajn s tenziou.

### c. Zhodnotenie zmien dlhodobého priemerného ročného odtoku

Základom určovania zmien dlhodobého priemerného ročného odtoku bolo vytvorenie rastrových máp dlhodobého priemerného ročného elementárneho odtoku podľa jednotlivých klimatických scenárov s využitím nakalibrovaného priestorového modelu Turca. Pre každý klimatický scenár bola následne vypočítaná rastrová mapa percentuálnej zmeny voči dlhodobému priemernému ročnému odtoku referenčného obdobia 1951-80. Tieto sa stali základom pri výpočte územných priemerov vybraných záuj-

mových oblastí a povodí. Z výsledných rastrových máp percentuálnej zmeny dlhodobého priemerného ročného odtoku bolo následne vypočítané percentuálne zastúpenie plochy jednotlivých kategórií zmeny v rámci územia Slovenska (tab. 1), priemerná zmena dlhodobého priemerného ročného odtoku pre vybrané výškové pásma (tab. 2) a vybrané povodia Slovenska. Rastrové mapy percentuálnej zmeny dlhodobého priemerného ročného odtoku pre časový horizont 2030 podľa scenára CCCM97 a WP sú prezentované na obr. 1 a 2.

**Tab. 1 Plošné zastúpenie [%] kategórií zmeny dlhodobého priemerného ročného odtoku na Slovensku podľa jednotlivých klimatických scenárov**

**Tab. 1 Spatial distribution [%] of the categories of changes in the long-term mean annual runoff in Slovakia according different climate change scenarios**

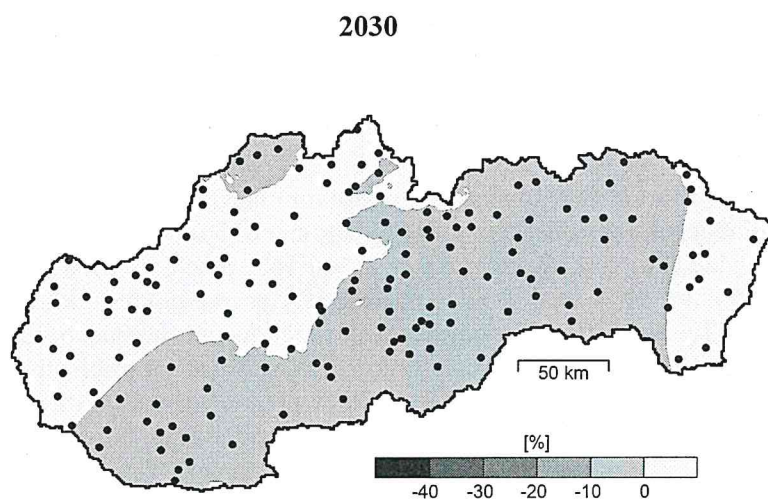
| <b>CCCM97: Kategória zmeny</b> | <b>2010</b> | <b>2030</b> | <b>2075</b> |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| viac ako 5 %                   | 3,3         | 6,3         | 0,0         |
| 0 % až +5 %                    | 21,5        | 34,5        | 0,4         |
| -5 % až 0 %                    | 38,1        | 38,8        | 13,2        |
| -20 % až -5 %                  | 37,2        | 20,5        | 84,1        |
| -40 % až -20 %                 | 0,0         | 0,0         | 2,3         |
| menej ako -40 %                | 0,0         | 0,0         | 0,0         |
| <b>GISS98: Kategória zmeny</b> | <b>2010</b> | <b>2030</b> | <b>2075</b> |
| viac ako 5 %                   | 15,6        | 15,9        | 9,4         |
| 0 % až +5 %                    | 13,7        | 13,1        | 10,3        |
| -5 % až 0 %                    | 18,8        | 15,5        | 10,3        |
| -20 % až -5 %                  | 51,9        | 55,5        | 69,9        |
| -40 % až -20 %                 | 0,0         | 0,0         | 0,1         |
| menej ako -40 %                | 0,0         | 0,0         | 0,0         |
| <b>SD: Kategória zmeny</b>     | <b>2010</b> | <b>2030</b> | <b>2075</b> |
| viac ako 5 %                   | 0,0         | 0,0         | 0,0         |
| 0 % až +5 %                    | 0,0         | 0,0         | 0,0         |
| -5 % až 0 %                    | 0,5         | 0,0         | 0,0         |
| -20 % až -5 %                  | 99,5        | 33,7        | 2,8         |
| -40 % až -20 %                 | 0,0         | 66,3        | 91,2        |
| menej ako -40 %                | 0,0         | 0,0         | 5,9         |
| <b>WP: Kategória zmeny</b>     | <b>2010</b> | <b>2030</b> | <b>2075</b> |
| viac ako 5 %                   | 0,0         | 0,0         | 0,0         |
| 0 % až +5 %                    | 0,0         | 0,0         | 0,0         |
| -5 % až 0 %                    | 1,3         | 0,0         | 0,0         |
| -20 % až -5 %                  | 72,8        | 31,8        | 3,8         |
| -40 % až -20 %                 | 25,8        | 65,2        | 47,2        |
| menej ako -40 %                | 0,0         | 3,0         | 49,1        |



**Tab. 2** Priemerné percentuálne zmeny dlhodobého priemerného ročného odtoku vo výškových pásmach Slovenska podľa jednotlivých klimatických scenárov

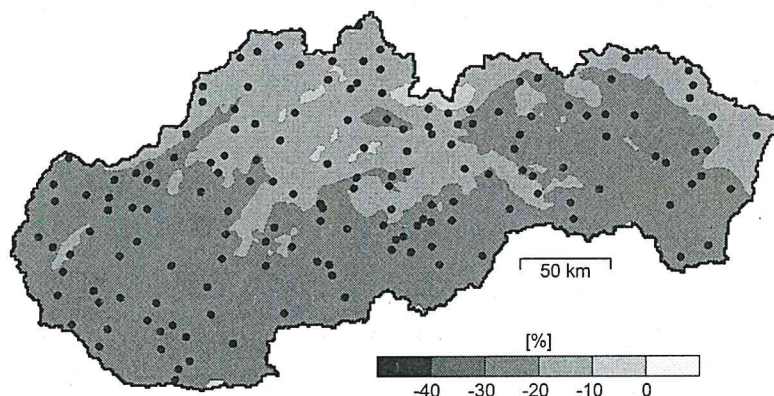
**Tab. 2** Mean percentage changes in the long-term mean annual runoff in elevation zones in Slovakia according different climate change scenarios

| <b>CCCM97: Výškové pásmo</b><br>[m n. m.] | <b>2010</b> | <b>2030</b> | <b>2075</b> |
|-------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| do 300                                    | -2,9        | -1,0        | -13,5       |
| 300 až 800                                | -2,5        | -0,7        | -9,4        |
| 800 až 1500                               | -2,3        | -0,5        | -6,3        |
| 1500 a viac                               | -1,5        | 0,3         | -1,9        |
| <b>GISS98: Výškové pásmo</b><br>[m n. m.] | <b>2010</b> | <b>2030</b> | <b>2075</b> |
| do 300                                    | -5,9        | -7,0        | -12,4       |
| 300 až 800                                | -1,6        | -1,9        | -5,6        |
| 800 až 1500                               | 1,0         | 1,3         | -0,1        |
| 1500 a viac                               | 5,4         | 6,3         | 7,1         |
| <b>SD: Výškové pásmo [m n. m.]</b>        | <b>2010</b> | <b>2030</b> | <b>2075</b> |
| do 300                                    | -2,5 %      | -3,9 %      | -6,0 %      |
| 300 až 800                                | -2,4 %      | -3,8 %      | -5,8 %      |
| 800 až 1500                               | -2,4 %      | -3,9 %      | -6,1 %      |
| 1500 a viac                               | -2,1 %      | -3,6 %      | -5,9 %      |
| <b>SD: Výškové pásmo [m n. m.]</b>        | <b>2010</b> | <b>2030</b> | <b>2075</b> |
| do 300                                    | -18,5       | -29,3       | -44,9       |
| 300 až 800                                | -13,0       | -21,4       | -35,1       |
| 800 až 1500                               | -9,3        | -15,6       | -26,4       |
| 1500 a viac                               | -4,8        | -8,2        | -14,1       |



**Obr. 1** Zmeny dlhodobého priemerného ročného odtoku [%] oproti referenčnému obdobiu 1951-1980 podľa klimatického scenára CCCM97 pre časový horizont 2030.

**Fig. 1** Changes in the long-term mean annual runoff [%] in comparison with the reference period 1951-1980 according to the CCCM97 scenario and horizon of 2030



**Obr. 2** Zmeny dlhodobého priemerného ročného odtoku [%] oproti referenčnému obdobiu 1951-1980 podľa klimatického scenára WP pre časový horizont 2030.

**Fig. 2** Changes in the long-term mean annual runoff [%] in comparison with the reference period 1951-1980 according to the WP scenario and horizon of 2030

Zo zhodnotenia zmien dlhodobého priemerného ročného odtoku vyplynulo, že pri klimatickom scenári CCCM97, aj napriek uvažovanému miernemu nárastu ročného úhrnu zrážok, možno predpokladať, že časť územia Slovenska bude poznačená miernym poklesom odtoku. V časovom horizonte 2010 sa bude 37% plochy územia nachádzať v pásme poklesu dlhodobého priemerného ročného odtoku od -5 do -20% oproti referenčnému obdobiu, v horizonte 2030 to bude 21% plochy územia a v horizonte 2075 sa v tomto pásme bude nachádzať 84% plochy územia. V časovom horizonte 2075 sa budú 2% plochy územia nachádzať v pásme poklesu od -20 do -40%. Mierny nárast dlhodobého priemerného ročného odtoku, resp. zachovanie súčasného stavu sa predpokladá v rámci sledovaných povodií pre povodia západného Slovenska pre časové horizonty 2010 a 2030. V ostatných povodiach sa predpokladá mierny pokles dlhodobého priemerného ročného odtoku. Pre časový horizont 2010 sa pokles dlhodobého priemerného ročného odtoku približne -6 až -7% očakáva pre povodie Ipľa, Lehotu nad Rimavicou, Obišovce, Košické Olšany a Nižný Medzev. Pre časový horizont 2030, vďaka predpokladanému vyššiemu nárastu úhrnov zrážok ako v horizonte 2010 budú všetky povodia zasiahnuté iba nevýrazným poklesom odtoku do -6%. V roku 2075 možno očakávať zníženie odtoku od -13 do -18 % v povodiach Ipľa a Lehoty nad Rimavicou, a pokles od -7 do -18 % vo všetkých povodiach východného Slovenska.

Podľa klimatického scenára GISS98 sa očakáva v časovom horizonte 2010 približne na 52% plochy územia SR pokles dlhodobého priemerného ročného odtoku od -5 do -20% oproti referenčnému obdobiu, nárast odtoku o viac ako +5% sa predpokladá na asi 16% plochy územia Slovenska. V časovom horizonte 2030 sa približne 56% územia bude nachádzať v pásme poklesu odtoku od -5% do -20%, zvyšná časť územia (44% plochy) v oblasti praktického zachovania súčasného stavu. Pre časový horizont 2075 možno kategóriu poklesu odtoku od -5 do -20% očakávať na približne 70% plochy územia. V sledovaných povodiach sa klimatický scenár GISS98 prejavil nárastom dlhodobého priemerného ročného odtoku od +4 do +7% pre všetky časové horizonty v povodiach horného Váhu a Bielej Oravy, a o +7 až 12% v povodí Laboraca a Tople. Najväčší pokles odtoku v týchto časových horizontoch sa predpokladá pre povodia Nitry, Žitavy, Ipľa a Rimavice, a to -8 až -11% v horizontoch 2010 a 2030 a -12 až -15% v horizonte 2075.

Podľa klimatického scenára SD bude pravdepodobne celé územie Slovenska poznačené znížením dlhodobého priemerného ročného odtoku. V časovom horizonte 2010 možno predpokladať pokles dlhodobého priemerného ročného odtoku v kategórii od -5 do -20% takmer na celom území Slovenska. V horizonte 2030 možno predpokladať na 34% územia pokles dlhodobého priemerného ročného odtoku v kategórii od -5 do -20% a na 66% územia pokles odtoku od -20 do -40%. V horizonte 2075



možno na 91% územia prepokladať pokles dlhodobého priemerného ročného odtoku od -20 do -40% a na 6% územia pokles odtoku väčší ako -40%. Vo vybraných povodiach sa môže podľa tohto scenára znížiť dlhodobý priemerný ročný odtok pre časový horizont 2010 od -11 do -15% pre všetky uvažované povodia západného Slovenska, pre povodia Rimavice, Ipľa, Svinky, Bodvy, Torysy a Tople. V časovom horizonte 2030 možno na väčšine povodí očakávať pokles odtoku od -20 do -22% a v horizonte 2075 pre väčšinu povodí pokles odtoku vyšší ako -30%, s najvýraznejším poklesom -39% v povodí Ipľa.

Podľa scenára WP sa v časovom horizonte 2010 bude nachádzať viac ako 73% územia Slovenska v pásme poklesu dlhodobého priemerného ročného odtoku od -5 do -20% a 26% územia v pásme poklesu od -20 do -40%. Plocha územia v kategórii poklesu od -5 do -20% sa v nasledujúcom časovom horizonte 2030 zvýši na 32% a plocha kategórie poklesu od -20 do -40% na 65 % územia. V časovom horizonte 2075 sa bude 47 % územia Slovenska nachádzať v pásme poklesu dlhodobého priemerného ročného odtoku od -20 do -40% a na 49% plochy územia bude pokles odtoku väčší ako -40%. Vo vybraných povodiach sa najvýraznejší pokles dlhodobého priemerného ročného odtoku oproti referenčnému stavu predpokladá pre povodie Ipľa: -23% v časovom horizonte 2010, -36% v časovom horizonte 2030 a -53% v časovom horizonte 2075. Podobne výrazný pokles je pravdepodobný aj pre povodia Trnávky, Dolného Dudváhu a Rimavice: do -21% v časovom horizonte 2010, do -33% v časovom horizonte 2030 a do -50% v časovom horizonte 2075.

### **3. VPLYV KLIMATICKEJ ZMENY NA ZMENU VNÚTROROČNÉHO ROZDELENIA ODTOKU**

Uvedená kapitola je venovaná spracovaniu scenárov možnej zmeny vnútroročného rozdelenia odtoku v 20 vybraných povodiach Slovenska, ktoré reprezentujú rôzne fyzicko - geografické regióny Slovenska. Na modelovanie odtoku z povodia v mesačnom časovom kroku bol použitý matematický model hydrologickej bilancie, vyvinutý na Katedre vodného hospodárstva krajiny SvF STU v Bratislave. Pre všetky vybrané povodia boli kalibráciou modelu určené jeho parametre pre referenčné obdobie 1951-1980, charakterizujúce súčasný stav. Ako scenáre možnej zmeny klímy boli použité scenáre CCCM97 a GISS98, ako aj alternatívne analógové scenáre WP a SD. Možné zmeny priemerných mesačných prietokov boli vypočítané pre budúce časové horizonty 2010, 2030 a 2075.

#### **a. Metodika výpočtu zmien dlhodobých priemerných mesačných prietokov**

Na odhad zmien vnútroročného rozdelenia odtoku bol použitý nasledovný metodický postup:

1. Kalibrácia parametrov hydrologického bilančného modelu pre jednotlivé povodia a pre referenčné obdobia a vytvorenie referenčných modelovaných časových radov priemerných mesačných prietokov, reprezentujúcich referenčné obdobie.
2. Vytvorenie modelových časových radov klimatických charakteristík pre budúce časové horizonty s použitím uvedených scenárov zmien klímy. Pri vytváraní modelových radov klimatických charakteristík boli ich pôvodné hodnoty upravené v každom mesiaci o zmenu udávanú príslušným scenárom.
3. Vytvorenie hydrologických scenárov priemerných mesačných prietokov pomocou hydrologického bilančného modelu na základe modelových vstupných údajov klimatických charakteristík a parametrov modelu z kalibračného obdobia.
4. Porovnanie hydrologických scenárov priemerných mesačných prietokov s modelovanými priemernými mesačnými prietokmi z referenčného obdobia.

#### **b. Matematický model hydrologickej bilancie**

Na modelovanie zmeny vnútroročného rozdelenia odtoku bol použitý koncepčný matematický model hydrologickej bilancie so sústredenými parametrami, ktorý pracuje v mesačnom časovom kroku. Povodie je v modeli schematizované na dve nelineárne nádrže. V prvej nelineárnej nádrži prebieha proces akumulácie a topenia snehu, v druhej nádrži prebieha simulácia zásoby vody v povodí a ostatných

prvkov hydrologickej bilancie povodia. V modeli je zabudovaný submodel na výpočet potenciálnej evapotranspirácie (Daníhlík a kol., 2004; Pekárová a Szolgay, 2005).

Jednotlivé zložky odtoku z povodia závisia od aktuálnej zásoby vody v povodí. Hydrologická bilancia povodia je riadená rovnicou v tvare:

$$S_i - S_{i-1} = (P_i(1 - drc)) - Rs_i - Rss_i - Ev_i - Rb, \quad (5)$$

kde:

$S_i, S_{i-1}$  - aktuálna zásoba vody v povodí v mesiaci  $i$  a  $i-1$  [mm],

$i$  - časový krok [mesiac],

$P_i$  - úhrn zrážok na povodie za mesiac  $i$  [mm],

$drc$  - koeficient vyjadrujúci podiel zrážok na povodie, ktoré dopadnú na nepriepustné a vodné plochy ( $0 \leq drc \leq 1$ ) [-],

$Rs_i$  - povrchový odtok za mesiac  $i$  [mm],

$Rss_i$  - podpovrchový odtok za mesiac  $i$  [mm],

$Ev_i$  - aktuálna evapotranspirácia na povodí za mesiac  $i$  [mm],

$Rb$  - základný odtok [mm].

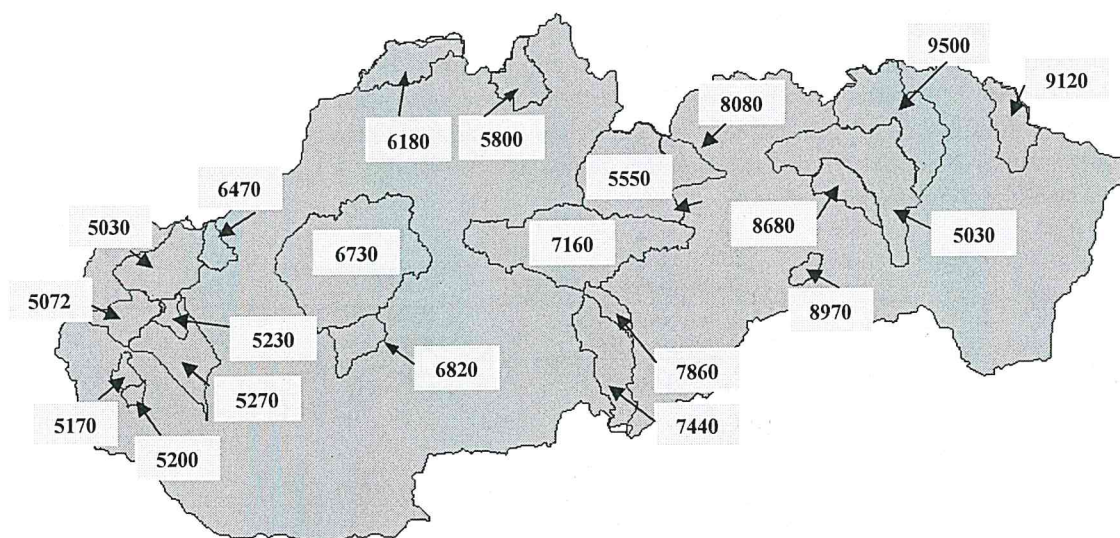
Vstupné údaje do modelu tvoria mesačné úhrny zrážok na povodie, priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu na povodí a hodnoty mesačnej potenciálnej evapotranspirácie na povodí. Hodnoty mesačnej potenciálnej evapotranspirácie na klimatickej stanici možno vypočítať priamo v modeli, a to metódou založenou na riešení rovníc energetickej bilancie upravených podľa Tomlaina (Tomlain a Damborská, 1999), FAO metódou založenou na riešení radiačnej bilancie (Doorenbos a Pruitt, 1977) a empirickými metódami podľa Ivanova a Thornthwaitea (Thornthwaite, 1948; Novák, 1995). Na výpočet potenciálnej evapotranspirácie sú potrebné ďalšie vstupné klimatické údaje v závislosti od vybranej metódy. Vstupné údaje potrebné na výpočet potenciálnej evapotranspirácie Tomlainovou metódou sú mesačné úhrny zrážok, priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu, priemerné mesačné hodnoty tlaku vodnej pary, priemerné mesačné hodnoty pokrytia oblačnosti a počet dní v mesiaci so snehovou pokrývkou. Do metódy FAO vstupujú ako vstupné údaje mesačné úhrny zrážok, priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu, priemerné mesačné hodnoty rýchlosti vetra, trvanie slnečného svitu v mesiaci a priemerné mesačné hodnoty relatívnej vlhkosti vzduchu. Vstupné údaje na výpočet metódou podľa Thornthwaitea sú priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu. Výpočet podľa Ivanova vyžaduje ako vstupné hodnoty priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu a priemerné mesačné hodnoty relatívnej vlhkosti vzduchu. Na kalibráciu modelu sú potrebné priemerné mesačné prietoky v záverečnom profile povodia.

Pri kalibrácii hydrologického bilančného modelu je optimalizovaných jedenásť parametrov. Pre parametre modelu možno nastaviť rozsahy prípustných hodnôt, v ktorých optimalizačný algoritmus hľadá najlepší súbor parametrov na základe minimalizácie zvolenej optimalizačnej funkcie. V modeli je možné zvoliť niekoľko rôznych optimalizačných kritérií a ich kombinácií. Základné optimalizačné kritériá sú koeficient Nash-Sutcliffe, suma štvorcov rozdielov medzi meranými a simulovanými priemernými mesačnými prietokmi, suma štvorcov rozdielov logaritmov meraných a simulovaných priemerných mesačných prietokov a koeficient Nash-Sutcliffe pre dlhodobé mesačné priemery.

### c. Výber povodí a vstupné údaje

Na modelovanie odtoku a tvorbu hydrologických scenárov v mesačnom kroku boli vybrané povodia reprezentujúce rôzne fyzicko-geografické oblasti Slovenska. Výber bol zároveň determinovaný vstupnými hydrologickými a klimatickými údajmi, ktoré pre tieto povodia existujú v mesačnom časovom kroku pre zvolené referenčné obdobie 1951-1980 (v západoslovenskom regióne 1961-80 alebo kratšie, podľa disponibilných údajov). Lokalizácia vybraných povodí je znázornená na obr. 3.





Obr. 3 Vybrané povodia pre spracovanie scenárov zmeny vnútroročného rozdelenia odtoku.  
Fig. 3 Selected pilot basins for modelling mean monthly runoff.

Na kalibráciu hydrologického bilančného modelu pre jednotlivé povodia boli použité nasledovné údaje z referenčného obdobia 1951-1980, prípadne 1961-80:

- priemerné mesačné prietoky v záverečnom profile povodia [mm],
- mesačné zrážkové úhrny na povodie [mm],
- priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu na povodí [°C],
- mesačné úhrny potenciálnej evapotranspirácie na povodí [mm] vypočítané Tomlainovou metódou.

Mesačné úhrny zrážok na povodie boli určované váženým priemerom mesačných zrážkových úhrnov zo zrážkomerných staníc v danom povodí. Váhy boli jednotlivým staniciam priradené podľa plôch výškových zón, zodpovedajúcich jednotlivým staniciam. Výškové zóny a ich plochy boli určené z digitálneho modelu reliéfu v prostredí GIS. Rovnakou metodikou boli určené aj priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu na povodie.

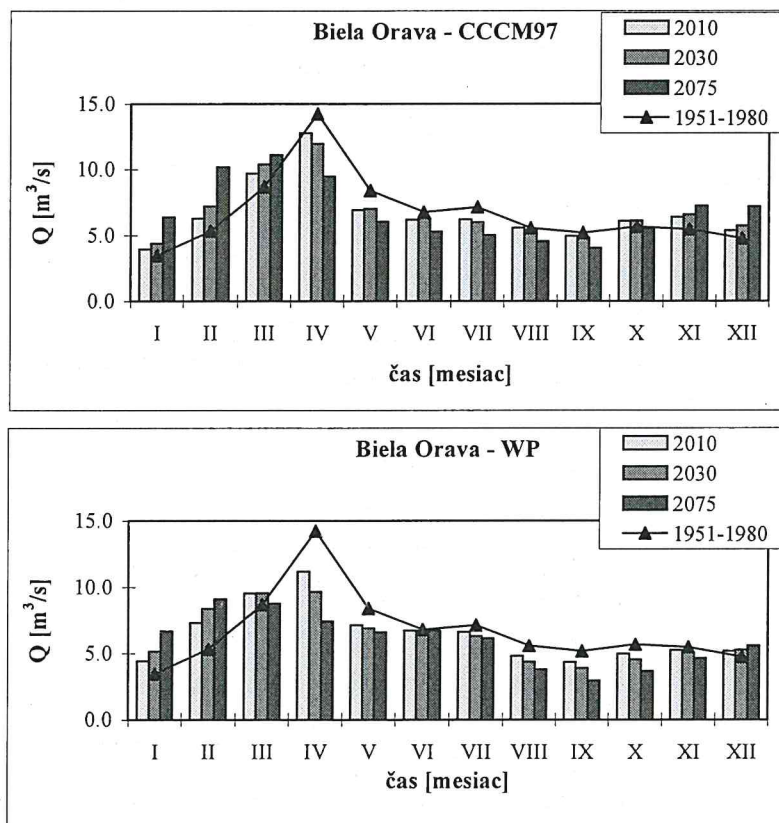
Hodnoty mesačnej potenciálnej evapotranspirácie boli vypočítané na klimatickej stanici v danom povodí, prípadne na najbližšej stanici k danému povodiu metódou podľa Tomlaina. Hodnoty potenciálnej evapotranspirácie boli zo stanice prepočítané do jednotlivých výškových pásiem povodia podľa gradientu dlhodobej priemernej potenciálnej evapotranspirácie na povodí. Mesačná potenciálna evapotranspirácia na povodí bola vypočítaná ako vážený priemer mesačnej potenciálnej evapotranspirácie v jednotlivých výškových pásmach.

#### d. Hydrologické scenáre zmien vnútroročného rozdelenia odtoku

Parametre matematického modelu hydrologickej bilancie boli pre jednotlivé povodia určené kalibráciou modelu, pri ktorej sa optimalizačnými funkciami posudzovala a hľadala čo najlepšia zhoda medzi meranými a modelovanými priemernými mesačnými prietokmi v záverečnom profile povodia.

Pri tvorbe hydrologických scenárov vnútroročného rozdelenia odtoku v budúcich časových horizontoch boli matematickým modelom hydrologickej bilancie nasimulované časové rady priemerných mesačných prietokov so stredom v budúcich časových horizontoch. Vstupné časové rady do modelu tvorili mesačné úhrny zrážok na povodie, hodnoty priemernej mesačnej teploty vzduchu na povodí a mesačnej potenciálnej evapotranspirácie na povodí modifikované podľa klimatických scenárov. Pri

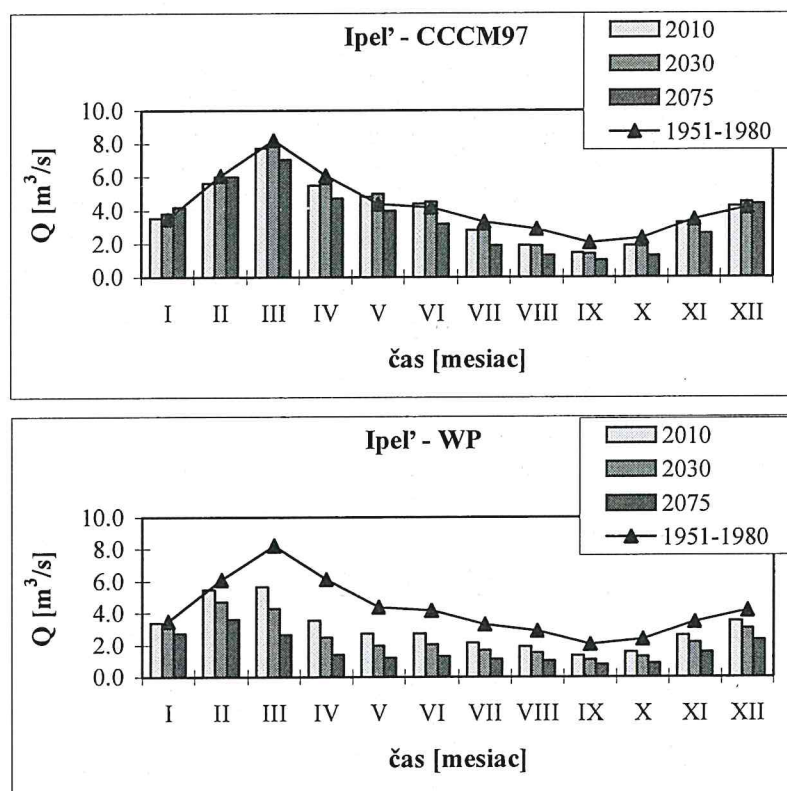
výpočte priemernej mesačnej potenciálnej evapotranspirácie boli použité modifikované hodnoty priemernej mesačnej teploty vzduchu, modifikované hodnoty priemernej mesačnej relatívnej vlhkosti vzduchu a mesačného počtu dní so snehovou pokrývkou. Pri simulovaní boli použité parametre modelu získané kalibráciou modelu pre jednotlivé povodia a referenčné obdobie 1951-1980 (prípadne 1961-1980). Simulované priemerné mesačné prietoky v budúcich časových horizontoch boli následne porovnané s priemernými mesačnými prietokmi referenčného obdobia. Ilustratívne porovnanie absolútnych rozdielov (v  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) medzi dlhodobými priemernými mesačnými prietokmi v budúcich časových horizontoch a simulovanými dlhodobými priemernými mesačnými prietokmi referenčného obdobia pre 2 vybrané povodia a 2 scenáre zmeny klímy je znázornené na obr. 4 a 5, porovnanie relatívnych rozdielov (v %) je uvedené v tab. 3.



Obr. 4 Porovnanie dlhodobých priemerných mesačných prietokov v referenčnom období a v budúcich časových horizontoch podľa scenára CCCM97 a WP pre povodie 5800 Biela Orava - Lokca.

Fig. 4 Comparison of the long-term mean monthly discharges in the reference period and the future time horizons for the CCCM97 and WP scenarios in the Biela Orava - Lokca basin.





Obr. 5 Porovnanie dlhodobých priemerných mesačných prietokov v referenčnom období a v budúcich časových horizontoch podľa jednotlivých scenárov pre povodie 7440 Ipeľ – Holiša.

Fig. 5 Comparison of the long-term mean monthly discharges in the reference period and the future time horizons for the the CCCM97 and WP scenarios in the Ipeľ – Holiša basin.

Tab. 3 Percentuálne zmeny dlhodobých priemerných mesačných prietokov v budúcich časových horizontoch v porovnaní s referenčným obdobím.

Tab. 3 Percentage changes in the long-term mean monthly runoff in the future time horizons in comparison with the reference period.

| Povodie                         | Scenár | Horizont | I   | II  | III | IV  | V   | VI  | VII | VIII | IX  | X   | XI  | XII |
|---------------------------------|--------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| [%]                             |        |          |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |
| Myjava<br>Šaštín-Stráže<br>5030 | CCCM   | 2010     | 33  | 21  | 11  | 4   | 14  | 0   | 0   | -2   | 10  | 15  | 24  | 27  |
|                                 |        | 2030     | 47  | 26  | 11  | 9   | 20  | 3   | 1   | -1   | 11  | 17  | 29  | 35  |
|                                 |        | 2075     | 76  | 26  | 1   | 0   | 6   | -15 | -18 | -20  | -9  | -6  | 8   | 41  |
|                                 | GISS   | 2010     | -37 | -39 | -27 | -4  | 38  | 90  | 71  | 55   | 20  | -9  | -32 | -40 |
|                                 |        | 2030     | 10  | -4  | -11 | -6  | -4  | -2  | -3  | -1   | 3   | 5   | 2   | 5   |
|                                 |        | 2075     | 38  | 4   | -11 | -3  | -3  | -7  | -11 | -13  | -11 | -10 | -7  | 16  |
|                                 | SD     | 2010     | 20  | 1   | -12 | -12 | -13 | -14 | -16 | -15  | -14 | -13 | -8  | 2   |
|                                 |        | 2030     | 29  | -4  | -20 | -19 | -22 | -23 | -28 | -26  | -22 | -22 | -16 | 2   |
|                                 |        | 2075     | 36  | -7  | -30 | -29 | -33 | -36 | -41 | -39  | -32 | -32 | -27 | -3  |
|                                 | WP     | 2010     | -1  | -10 | -23 | -19 | -15 | -13 | -13 | -16  | -16 | -19 | -17 | -13 |
|                                 |        | 2030     | -2  | -19 | -34 | -29 | -24 | -21 | -22 | -25  | -23 | -26 | -26 | -21 |
|                                 |        | 2075     | -10 | -33 | -46 | -42 | -36 | -32 | -33 | -36  | -33 | -37 | -38 | -31 |
| Rudava<br>Veľké Leváre<br>5072  | CCCM   | 2010     | 1   | -6  | -6  | -17 | -5  | -20 | -49 | -30  | -22 | -34 | -23 | -4  |
|                                 |        | 2030     | 2   | -5  | -5  | -15 | -3  | -19 | -49 | -31  | -24 | -35 | -24 | -4  |
|                                 |        | 2075     | 5   | -1  | -6  | -18 | -14 | -31 | -58 | -42  | -34 | -44 | -33 | -9  |



|                                              |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Šurský kanál<br>Svätý Jur<br>5170            | GISS | 2010 | -2  | -4  | -5  | -5  | -3  | -5  | -12 | -6  | -6  | -9  | -7  | -3  |
|                                              |      | 2030 | -2  | -4  | -5  | -5  | -3  | -5  | -12 | -6  | -6  | -9  | -7  | -3  |
|                                              |      | 2075 | 0   | -2  | -3  | -4  | -2  | -5  | -13 | -8  | -8  | -11 | -8  | -3  |
|                                              | SD   | 2010 | -1  | -3  | -4  | -6  | -4  | -6  | -14 | -8  | -8  | -11 | -8  | -3  |
|                                              |      | 2030 | -1  | -3  | -5  | -7  | -6  | -8  | -15 | -10 | -9  | -12 | -9  | -4  |
|                                              |      | 2075 | -1  | -4  | -7  | -9  | -8  | -10 | -17 | -13 | -12 | -14 | -11 | -6  |
|                                              | WP   | 2010 | -30 | -31 | -26 | -16 | 7   | 8   | -29 | -18 | -26 | -44 | -43 | -37 |
|                                              |      | 2030 | -16 | -21 | -28 | -30 | -21 | -23 | -47 | -32 | -31 | -43 | -36 | -23 |
|                                              |      | 2075 | -23 | -30 | -39 | -40 | -31 | -32 | -54 | -41 | -39 | -49 | -44 | -32 |
| Trnávka<br>Bohdanovce<br>nad Trnavou<br>5230 | CCCM | 2010 | 12  | 21  | 10  | -2  | 5   | -19 | -25 | -25 | -15 | -10 | 3   | 16  |
|                                              |      | 2030 | 22  | 30  | 10  | -2  | 6   | -19 | -25 | -25 | -16 | -12 | 3   | 21  |
|                                              |      | 2075 | 58  | 43  | -4  | -13 | -7  | -34 | -41 | -39 | -30 | -26 | -6  | 34  |
|                                              | GISS | 2010 | -5  | -1  | -6  | -10 | -6  | -9  | -11 | -4  | -3  | -3  | -1  | 1   |
|                                              |      | 2030 | 5   | 2   | -12 | -14 | -8  | -9  | -11 | -5  | -4  | -2  | -1  | 4   |
|                                              |      | 2075 | 52  | 26  | -11 | -13 | -7  | -13 | -20 | -21 | -21 | -17 | -6  | 24  |
|                                              | SD   | 2010 | 12  | 10  | -10 | -18 | -17 | -18 | -23 | -22 | -21 | -18 | -10 | 2   |
|                                              |      | 2030 | 33  | 14  | -16 | -24 | -24 | -24 | -30 | -30 | -28 | -24 | -14 | 7   |
|                                              |      | 2075 | 59  | 13  | -26 | -31 | -33 | -34 | -41 | -42 | -39 | -35 | -22 | 11  |
|                                              | WP   | 2010 | -2  | 2   | -27 | -36 | -29 | -27 | -27 | -25 | -26 | -26 | -20 | -12 |
|                                              |      | 2030 | 5   | -4  | -41 | -48 | -39 | -36 | -35 | -35 | -35 | -34 | -26 | -16 |
|                                              |      | 2075 | 13  | -19 | -58 | -62 | -53 | -49 | -47 | -48 | -48 | -47 | -39 | -23 |
| Dolný Dudvák<br>Čierny Brod<br>5270          | CCCM | 2010 | 9   | 17  | 6   | 2   | 18  | -2  | -6  | -8  | 0   | -1  | 7   | 21  |
|                                              |      | 2030 | 18  | 20  | 9   | 5   | 22  | 0   | -6  | -8  | 0   | -2  | 7   | 31  |
|                                              |      | 2075 | 64  | 11  | 0   | -6  | 6   | -14 | -18 | -16 | -8  | -10 | -6  | 43  |
|                                              | GISS | 2010 | 2   | 0   | -4  | -6  | -1  | -5  | -4  | 1   | 4   | 1   | 4   | 14  |
|                                              |      | 2030 | 17  | 0   | -12 | -10 | -4  | -6  | -4  | 0   | 3   | 1   | 3   | 25  |
|                                              |      | 2075 | 78  | 8   | -5  | -5  | -2  | -7  | -9  | -8  | -5  | -6  | -5  | 42  |
|                                              | SD   | 2010 | 24  | 5   | -14 | -17 | -15 | -15 | -14 | -11 | -7  | -9  | -8  | 18  |
|                                              |      | 2030 | 61  | -2  | -18 | -23 | -23 | -21 | -21 | -16 | -11 | -12 | -13 | 21  |
|                                              |      | 2075 | 83  | -5  | -27 | -33 | -33 | -29 | -29 | -23 | -16 | -16 | -21 | 14  |
|                                              | WP   | 2010 | 5   | -7  | -27 | -29 | -22 | -18 | -14 | -10 | -7  | -10 | -12 | 1   |
|                                              |      | 2030 | 18  | -17 | -39 | -40 | -32 | -25 | -19 | -15 | -11 | -14 | -19 | -4  |
|                                              |      | 2075 | 20  | -35 | -52 | -52 | -44 | -35 | -29 | -22 | -16 | -19 | -27 | -15 |
| Nitra<br>Nitrianska                          | CCCM | 2010 | 12  | 8   | 4   | -9  | 12  | 2   | -11 | -18 | -11 | 3   | 10  | 10  |
|                                              |      | 2030 | 20  | 15  | 5   | -9  | 16  | 4   | -10 | -18 | -12 | 2   | 12  | 16  |
|                                              |      | 2075 | 36  | 4   | -3  | -9  | -8  | -24 | -28 | -32 | -26 | -33 | -28 | -30 |
|                                              | GISS | 2010 | -9  | -10 | -12 | -13 | -14 | -15 | -15 | -14 | -13 | -22 | -21 | -42 |
|                                              |      | 2030 | -5  | -17 | -17 | -14 | -15 | -15 | -14 | -14 | -14 | -21 | -21 | -41 |
|                                              |      | 2075 | 23  | 0   | -11 | -8  | -13 | -16 | -19 | -23 | -22 | -30 | -28 | -39 |
|                                              | SD   | 2010 | 1   | -10 | -18 | -21 | -25 | -25 | -25 | -26 | -24 | -32 | -31 | -46 |
|                                              |      | 2030 | 10  | -8  | -22 | -28 | -32 | -32 | -32 | -32 | -29 | -37 | -36 | -48 |
|                                              |      | 2075 | 10  | -14 | -30 | -38 | -42 | -42 | -42 | -42 | -38 | -44 | -44 | -54 |
|                                              | WP   | 2010 | -20 | -26 | -34 | -36 | -33 | -30 | -26 | -26 | -25 | -34 | -35 | -54 |
|                                              |      | 2030 | -25 | -35 | -47 | -48 | -43 | -39 | -34 | -33 | -31 | -40 | -42 | -60 |
|                                              |      | 2075 | -36 | -51 | -60 | -61 | -54 | -49 | -43 | -42 | -40 | -48 | -51 | -68 |



|                                         |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Streda<br>6730                          | GISS | 2075 | 38  | 25  | 1   | -20 | -1  | -20 | -37 | -42 | -38 | -30 | -11 | 19  |
|                                         |      | 2010 | -4  | -8  | -11 | -13 | -10 | -13 | -15 | -13 | -9  | -6  | -7  | -2  |
|                                         |      | 2030 | 4   | -6  | -14 | -16 | -11 | -11 | -13 | -12 | -8  | -3  | -2  | 4   |
|                                         | SD   | 2075 | 24  | 9   | -9  | -19 | -12 | -18 | -24 | -30 | -31 | -26 | -15 | 20  |
|                                         |      | 2010 | 17  | 8   | -9  | -19 | -19 | -21 | -27 | -29 | -29 | -25 | -15 | 6   |
|                                         |      | 2030 | 24  | 9   | -13 | -28 | -30 | -33 | -39 | -43 | -42 | -37 | -23 | 8   |
|                                         | WP   | 2075 | 37  | 6   | -24 | -40 | -44 | -49 | -57 | -60 | -58 | -56 | -40 | 6   |
|                                         |      | 2010 | 0   | -4  | -21 | -30 | -24 | -21 | -20 | -25 | -29 | -28 | -22 | -11 |
|                                         |      | 2030 | 0   | -9  | -30 | -41 | -33 | -30 | -31 | -35 | -40 | -41 | -33 | -17 |
| Jablonka<br>Čachtice<br>6740            | CCCM | 2075 | -9  | -26 | -47 | -57 | -51 | -47 | -48 | -54 | -56 | -59 | -51 | -31 |
|                                         |      | 2010 | 36  | 28  | 25  | 14  | 23  | 14  | 9   | 5   | 15  | 24  | 39  | 41  |
|                                         |      | 2030 | 49  | 33  | 25  | 16  | 28  | 16  | 10  | 6   | 15  | 25  | 45  | 51  |
|                                         | GISS | 2075 | 75  | 34  | 18  | 7   | 14  | -2  | -13 | -17 | -10 | -4  | 16  | 51  |
|                                         |      | 2010 | 13  | 7   | 8   | 7   | 10  | 11  | 9   | 11  | 17  | 17  | 19  | 21  |
|                                         |      | 2030 | 24  | 6   | 4   | 4   | 9   | 13  | 13  | 11  | 16  | 20  | 22  | 27  |
|                                         | SD   | 2075 | 53  | 17  | 9   | 8   | 11  | 9   | 3   | -3  | -2  | 0   | 8   | 37  |
|                                         |      | 2010 | 32  | 15  | 7   | 1   | 0   | -1  | -5  | -7  | -4  | -3  | 5   | 22  |
|                                         |      | 2030 | 43  | 11  | 0   | -7  | -11 | -11 | -18 | -19 | -17 | -15 | -5  | 21  |
| Žitava<br>Vieska nad<br>Žitavou<br>6820 | CCCM | 2075 | 54  | 8   | -9  | -17 | -24 | -26 | -35 | -36 | -33 | -29 | -20 | 14  |
|                                         |      | 2010 | 12  | 3   | -6  | -10 | -5  | 0   | 1   | -5  | -6  | -8  | -4  | 3   |
|                                         |      | 2030 | 10  | -8  | -19 | -22 | -17 | -10 | -10 | -14 | -15 | -18 | -15 | -6  |
|                                         | GISS | 2075 | 2   | -23 | -34 | -38 | -33 | -24 | -24 | -30 | -31 | -33 | -31 | -19 |
|                                         |      | 2010 | -15 | -17 | -13 | -15 | 8   | -9  | -10 | -29 | -19 | -14 | -16 | -10 |
|                                         |      | 2030 | -10 | -14 | -12 | -12 | 12  | -8  | -10 | -28 | -18 | -14 | -13 | -4  |
|                                         | SD   | 2075 | -4  | -11 | -18 | -22 | -5  | -28 | -32 | -44 | -34 | -35 | -31 | -3  |
|                                         |      | 2010 | -29 | -30 | -31 | -27 | -19 | -18 | -16 | -20 | -14 | -18 | -26 | -23 |
|                                         |      | 2030 | -26 | -30 | -32 | -28 | -18 | -16 | -15 | -20 | -11 | -14 | -21 | -19 |
| Váh<br>Liptovský<br>Mikuláš<br>5550     | CCCM | 2075 | -13 | -22 | -29 | -27 | -18 | -21 | -24 | -33 | -29 | -31 | -33 | -12 |
|                                         |      | 2010 | -16 | -20 | -28 | -30 | -26 | -25 | -25 | -31 | -27 | -29 | -29 | -17 |
|                                         |      | 2030 | -14 | -22 | -32 | -37 | -36 | -35 | -37 | -43 | -35 | -37 | -36 | -17 |
|                                         | GISS | 2075 | -11 | -27 | -42 | -47 | -50 | -49 | -51 | -56 | -46 | -49 | -47 | -21 |
|                                         |      | 2010 | -24 | -34 | -37 | -40 | -32 | -27 | -21 | -29 | -27 | -31 | -36 | -31 |
|                                         |      | 2030 | -28 | -39 | -48 | -51 | -42 | -35 | -30 | -37 | -34 | -40 | -43 | -36 |
|                                         | SD   | 2075 | -41 | -52 | -63 | -65 | -60 | -53 | -47 | -52 | -46 | -52 | -55 | -47 |
|                                         |      | 2010 | 6   | 11  | 14  | -3  | -8  | -6  | -10 | -6  | -1  | 5   | 7   | 6   |
|                                         |      | 2030 | 11  | 23  | 26  | -1  | -9  | -6  | -11 | -8  | -2  | 6   | 10  | 10  |
| Biela Orava<br>Lokca                    | CCCM | 2075 | 34  | 69  | 57  | -7  | -22 | -19 | -22 | -17 | -12 | 0   | 19  | 24  |
|                                         |      | 2010 | 7   | 9   | 11  | 6   | -3  | 2   | 3   | 7   | 11  | 11  | 11  | 10  |
|                                         |      | 2030 | 17  | 22  | 15  | 2   | -6  | 3   | 5   | 8   | 12  | 14  | 17  | 18  |
|                                         | GISS | 2075 | 46  | 64  | 51  | 3   | -16 | -4  | -2  | -1  | 1   | 9   | 28  | 41  |
|                                         |      | 2010 | 18  | 29  | 24  | -3  | -16 | -10 | -12 | -11 | -11 | -5  | 5   | 11  |
|                                         |      | 2030 | 35  | 52  | 37  | -8  | -25 | -17 | -20 | -19 | -17 | -8  | 7   | 21  |
|                                         | SD   | 2075 | 75  | 96  | 46  | -27 | -39 | -28 | -32 | -30 | -27 | -15 | 14  | 41  |
|                                         |      | 2010 | 9   | 26  | 22  | -5  | -16 | -5  | -5  | -9  | -11 | -9  | -4  | 2   |
|                                         |      | 2030 | 17  | 44  | 32  | -13 | -23 | -8  | -8  | -15 | -18 | -15 | -7  | 2   |
| Biela Orava<br>Lokca                    | CCCM | 2075 | 40  | 80  | 37  | -33 | -33 | -14 | -14 | -23 | -29 | -25 | -12 | 6   |
|                                         |      | 2010 | 15  | 18  | 12  | -10 | -18 | -9  | -13 | 1   | -4  | 8   | 17  | 13  |
| Lokca                                   | CCCM | 2030 | 28  | 36  | 20  | -16 | -16 | -7  | -16 | -3  | -7  | 8   | 21  | 20  |



|                                    |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 5800                               | GISS | 2075 | 86   | 92  | 28  | -33 | -28 | -22 | -30 | -18 | -21 | -3  | 33  | 51  |
|                                    |      | 2010 | 10   | 6   | 5   | -2  | -7  | -1  | 0   | 8   | 17  | 14  | 12  | 13  |
|                                    |      | 2030 | 27   | 20  | 2   | -11 | -9  | 3   | 3   | 7   | 16  | 18  | 20  | 23  |
|                                    | SD   | 2075 | 86   | 64  | 18  | -26 | -15 | -1  | -4  | -4  | 0   | 10  | 31  | 61  |
|                                    |      | 2010 | 42   | 38  | 8   | -21 | -21 | -10 | -14 | -11 | -11 | -5  | 10  | 25  |
|                                    |      | 2030 | 78   | 59  | 8   | -33 | -28 | -16 | -22 | -21 | -21 | -9  | 14  | 41  |
|                                    | WP   | 2075 | 140  | 72  | -2  | -51 | -38 | -27 | -37 | -35 | -35 | -18 | 22  | 72  |
|                                    |      | 2010 | 29   | 38  | 9   | -21 | -15 | -1  | -7  | -13 | -16 | -12 | -4  | 9   |
|                                    |      | 2030 | 50   | 57  | 10  | -32 | -18 | -1  | -12 | -21 | -25 | -20 | -7  | 11  |
|                                    |      | 2075 | 94   | 71  | 1   | -48 | -22 | -1  | -14 | -32 | -43 | -35 | -15 | 17  |
| Kysuca<br>Čadca<br>6180            | CCCM | 2010 | 9    | 4   | -1  | -18 | -10 | -5  | -15 | -6  | 1   | 12  | 10  | 1   |
|                                    |      | 2030 | 20   | 13  | 0   | -20 | -7  | -5  | -17 | -10 | -2  | 12  | 14  | 6   |
|                                    |      | 2075 | 70   | 38  | -4  | -34 | -17 | -22 | -36 | -30 | -25 | -8  | 13  | 29  |
|                                    | GISS | 2010 | 8    | 3   | 0   | -6  | 3   | 7   | 6   | 12  | 21  | 16  | 12  | 11  |
|                                    |      | 2030 | 26   | 8   | -7  | -13 | 3   | 9   | 8   | 12  | 20  | 18  | 17  | 16  |
|                                    |      | 2075 | 80   | 32  | -3  | -24 | 0   | 3   | -2  | -5  | -2  | 6   | 22  | 56  |
|                                    | SD   | 2010 | 47   | 22  | -4  | -22 | -11 | -7  | -12 | -12 | -14 | -6  | 9   | 21  |
|                                    |      | 2030 | 75   | 28  | -10 | -32 | -18 | -15 | -23 | -25 | -25 | -13 | 10  | 36  |
|                                    |      | 2075 | 123  | 33  | -23 | -48 | -31 | -28 | -40 | -43 | -44 | -27 | 9   | 65  |
|                                    | WP   | 2010 | 29   | 19  | -8  | -25 | -5  | 3   | 0   | -9  | -15 | -13 | -4  | 5   |
| 2030                               |      | 44   | 21   | -15 | -34 | -7  | 3   | -4  | -19 | -27 | -23 | -10 | 5   |     |
| 2075                               |      | 69   | 20   | -29 | -48 | -16 | -3  | -14 | -36 | -47 | -42 | -20 | 8   |     |
| Hron<br>Banská<br>Bystrica<br>7160 |      | CCCM | 2010 | 9   | 17  | 18  | -5  | 5   | -5  | -9  | -16 | -4  | 5   | 14  |
|                                    | 2030 |      | 17   | 31  | 27  | -8  | 6   | -4  | -9  | -15 | -3  | 8   | 19  | 19  |
|                                    | 2075 |      | 46   | 72  | 32  | -27 | -8  | -20 | -23 | -26 | -13 | -1  | 29  | 40  |
|                                    | GISS | 2010 | 2    | 1   | -2  | -11 | -8  | -5  | -6  | -1  | 5   | 3   | 4   | 5   |
|                                    |      | 2030 | 11   | 11  | -5  | -18 | -10 | -4  | -5  | -2  | 5   | 5   | 10  | 11  |
|                                    |      | 2075 | 38   | 43  | 11  | -28 | -13 | -10 | -12 | -13 | -8  | -1  | 19  | 36  |
|                                    | SD   | 2010 | 22   | 31  | 8   | -21 | -22 | -15 | -18 | -17 | -13 | -6  | 6   | 16  |
|                                    |      | 2030 | 41   | 47  | 8   | -33 | -32 | -23 | -26 | -26 | -19 | -9  | 9   | 29  |
|                                    |      | 2075 | 83   | 74  | -1  | -53 | -46 | -35 | -37 | -38 | -29 | -16 | 16  | 54  |
|                                    | WP   | 2010 | 13   | 24  | -3  | -34 | -24 | -12 | -9  | -12 | -13 | -10 | -4  | 5   |
| 2030                               |      | 23   | 37   | -9  | -49 | -35 | -20 | -15 | -19 | -18 | -16 | -6  | 7   |     |
| 2075                               |      | 47   | 51   | -27 | -68 | -50 | -32 | -25 | -28 | -27 | -24 | -8  | 14  |     |
| Ipeľ<br>Holiša<br>7440             |      | CCCM | 2010 | 2   | -7  | -6  | -10 | 10  | 6   | -15 | -35 | -30 | -21 | -5  |
|                                    | 2030 |      | 10   | -1  | -4  | -8  | 14  | 8   | -14 | -36 | -32 | -21 | -3  | 8   |
|                                    | 2075 |      | 21   | -1  | -14 | -22 | -9  | -24 | -42 | -55 | -51 | -46 | -24 | 5   |
|                                    | GISS | 2010 | -4   | -10 | -15 | -16 | -13 | -16 | -22 | -20 | -15 | -12 | -9  | -5  |
|                                    |      | 2030 | 1    | -10 | -19 | -20 | -14 | -16 | -23 | -22 | -16 | -11 | -8  | -3  |
|                                    |      | 2075 | 23   | 2   | -13 | -20 | -15 | -23 | -34 | -39 | -38 | -33 | -20 | 6   |
|                                    | SD   | 2010 | 18   | 5   | -11 | -23 | -27 | -27 | -35 | -38 | -36 | -31 | -18 | -1  |
|                                    |      | 2030 | 25   | 2   | -18 | -33 | -40 | -40 | -48 | -50 | -48 | -42 | -27 | -1  |
|                                    |      | 2075 | 31   | -4  | -32 | -47 | -55 | -56 | -64 | -67 | -64 | -59 | -44 | -10 |
|                                    | WP   | 2010 | -2   | -10 | -31 | -42 | -37 | -34 | -35 | -35 | -35 | -34 | -24 | -15 |
| 2030                               |      | -8   | -22  | -48 | -60 | -55 | -51 | -49 | -48 | -47 | -46 | -37 | -27 |     |
| 2075                               |      | -21  | -41  | -68 | -77 | -73 | -68 | -66 | -65 | -63 | -63 | -54 | -44 |     |
| Rimavica                           |      | 2010 | 0    | -6  | -9  | -20 | -2  | -6  | -22 | -39 | -29 | -19 | -5  | -3  |



|                                     |      |      |     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
|-------------------------------------|------|------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| Lehota nad<br>Rimavicou<br>7860     | CCCM | 2030 | 9   | 2  | -6  | -22 | 2   | -5  | -24 | -40 | -29 | -19 | -3  | 3  |
|                                     |      | 2075 | 34  | 22 | -7  | -37 | -16 | -28 | -45 | -54 | -45 | -38 | -10 | 13 |
|                                     |      | 2010 | 1   | -4 | -8  | -15 | -9  | -9  | -12 | -10 | -2  | -2  | 0   | 2  |
|                                     | GISS | 2030 | 13  | 1  | -14 | -23 | -11 | -8  | -12 | -10 | -4  | 0   | 3   | 7  |
|                                     |      | 2075 | 48  | 28 | -3  | -31 | -15 | -17 | -24 | -28 | -25 | -19 | 2   | 32 |
|                                     |      | 2010 | 31  | 22 | -2  | -25 | -24 | -21 | -25 | -26 | -24 | -18 | -2  | 14 |
|                                     | SD   | 2030 | 51  | 33 | -5  | -38 | -37 | -34 | -38 | -40 | -38 | -29 | -7  | 24 |
|                                     |      | 2075 | 91  | 49 | -15 | -57 | -55 | -51 | -57 | -57 | -54 | -45 | -14 | 39 |
|                                     |      | 2010 | 17  | 13 | -16 | -42 | -34 | -25 | -21 | -22 | -23 | -19 | -9  | 1  |
|                                     | WP   | 2030 | 24  | 17 | -26 | -58 | -49 | -38 | -33 | -33 | -32 | -29 | -16 | -1 |
|                                     |      | 2075 | 40  | 16 | -45 | -76 | -69 | -59 | -52 | -50 | -51 | -50 | -29 | -3 |
| Poprad<br>Matejovce<br>8080         | CCCM | 2010 | 5   | 8  | 10  | -5  | -3  | -7  | -8  | -6  | 2   | 4   | 7   | 5  |
|                                     |      | 2030 | 8   | 15 | 16  | -5  | -1  | -6  | -9  | -7  | 1   | 5   | 9   | 8  |
|                                     |      | 2075 | 22  | 37 | 25  | -14 | -11 | -19 | -21 | -18 | -10 | -5  | 10  | 15 |
|                                     | GISS | 2010 | 4   | 6  | 6   | 2   | 1   | 2   | 1   | 6   | 9   | 9   | 8   | 7  |
|                                     |      | 2030 | 10  | 12 | 6   | -2  | -1  | 3   | 3   | 6   | 9   | 11  | 12  | 11 |
|                                     |      | 2075 | 27  | 33 | 22  | -5  | -4  | -2  | -4  | -4  | -2  | 4   | 16  | 24 |
|                                     | SD   | 2010 | 10  | 13 | 5   | -12 | -14 | -13 | -15 | -14 | -11 | -7  | 0   | 6  |
|                                     |      | 2030 | 17  | 21 | 7   | -19 | -20 | -20 | -24 | -23 | -19 | -13 | 0   | 9  |
|                                     |      | 2075 | 32  | 31 | 4   | -33 | -30 | -30 | -36 | -33 | -28 | -19 | -1  | 15 |
|                                     | WP   | 2010 | 4   | 11 | 2   | -15 | -12 | -6  | -8  | -11 | -12 | -10 | -6  | -1 |
|                                     |      | 2030 | 7   | 15 | 1   | -23 | -15 | -9  | -12 | -18 | -18 | -17 | -10 | -2 |
| Svinka<br>Obišovce<br>8680          | CCCM | 2010 | 10  | 11 | 4   | -13 | -2  | -3  | -4  | -1  | 8   | 13  | 14  | 11 |
|                                     |      | 2030 | 17  | 18 | 7   | -13 | 1   | -2  | -5  | -2  | 7   | 9   | 14  | 15 |
|                                     |      | 2075 | 39  | 38 | 5   | -21 | -8  | -13 | -19 | -13 | -5  | -6  | 8   | 29 |
|                                     | GISS | 2010 | 7   | 5  | 0   | -4  | 0   | 1   | 0   | 4   | 8   | 10  | 9   | 11 |
|                                     |      | 2030 | 17  | 10 | -3  | -8  | -1  | 2   | 1   | 4   | 8   | 12  | 12  | 17 |
|                                     |      | 2075 | 46  | 33 | 5   | -9  | -2  | -1  | -6  | -4  | -3  | -2  | 8   | 42 |
|                                     | SD   | 2010 | 21  | 16 | 0   | -13 | -10 | -9  | -13 | -10 | -8  | -9  | 1   | 13 |
|                                     |      | 2030 | 34  | 21 | -5  | -20 | -16 | -14 | -21 | -18 | -14 | -14 | 0   | 21 |
|                                     |      | 2075 | 64  | 27 | -17 | -29 | -23 | -21 | -31 | -27 | -22 | -22 | -6  | 33 |
|                                     | WP   | 2010 | 10  | 10 | -6  | -14 | -4  | 0   | -5  | -9  | -10 | -13 | -8  | 0  |
|                                     |      | 2030 | 14  | 10 | -13 | -19 | -5  | 1   | -5  | -13 | -15 | -20 | -14 | -2 |
| Torysa<br>Košické<br>Olšany<br>8870 | CCCM | 2010 | 7   | 6  | 2   | -15 | -11 | -17 | -13 | -15 | -6  | -1  | 3   | 5  |
|                                     |      | 2030 | 16  | 15 | 4   | -17 | -8  | -15 | -13 | -17 | -8  | -1  | 6   | 11 |
|                                     |      | 2075 | 55  | 42 | -3  | -26 | -17 | -27 | -24 | -24 | -18 | -12 | 5   | 35 |
|                                     | GISS | 2010 | 4   | -1 | -3  | -7  | -2  | -2  | -1  | 3   | 8   | 5   | 3   | 7  |
|                                     |      | 2030 | 20  | 6  | -8  | -13 | -5  | -1  | 1   | 4   | 9   | 9   | 7   | 18 |
|                                     |      | 2075 | 62  | 29 | -5  | -17 | -5  | -4  | -4  | -5  | -6  | -1  | 5   | 48 |
|                                     | SD   | 2010 | 25  | 14 | -9  | -26 | -23 | -18 | -18 | -18 | -19 | -13 | -4  | 11 |
|                                     |      | 2030 | 50  | 23 | -13 | -27 | -21 | -21 | -26 | -27 | -28 | -18 | -3  | 27 |
|                                     |      | 2075 | 100 | 25 | -27 | -38 | -31 | -30 | -38 | -40 | -41 | -28 | -6  | 46 |
|                                     | WP   | 2010 | 14  | 12 | -10 | -19 | -7  | -2  | -4  | -13 | -20 | -19 | -13 | -1 |
|                                     |      | 2030 | 24  | 14 | -20 | -26 | -8  | -1  | -6  | -20 | -29 | -28 | -19 | -2 |
| Bodva                               |      | 2075 | 51  | 5  | -34 | -34 | -13 | -1  | -9  | -29 | -42 | -41 | -27 | 1  |
|                                     |      | 2010 | 12  | 12 | 5   | -9  | 4   | -4  | -7  | -13 | -3  | 7   | 12  | 13 |



|                                          |      |      |     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------------|------|------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nižný Medzev<br>8970                     | CCCM | 2030 | 23  | 23 | 8   | -10 | 8   | -2  | -8  | -15 | -5  | 9   | 16  | 20  |
|                                          |      | 2075 | 62  | 55 | 3   | -26 | -8  | -22 | -29 | -31 | -20 | -5  | 21  | 45  |
|                                          |      | 2010 | 5   | 2  | -4  | -10 | -2  | -1  | -1  | 4   | 11  | 10  | 7   | 8   |
|                                          | GISS | 2030 | 20  | 10 | -10 | -18 | -4  | 1   | -1  | 1   | 11  | 13  | 11  | 16  |
|                                          |      | 2075 | 63  | 42 | -5  | -25 | -8  | -8  | -14 | -17 | -10 | -2  | 17  | 48  |
|                                          |      | 2010 | 42  | 32 | -1  | -21 | -13 | -11 | -11 | -10 | -9  | -2  | 10  | 26  |
|                                          | SD   | 2030 | 67  | 45 | -8  | -32 | -23 | -19 | -22 | -21 | -19 | -10 | 12  | 40  |
|                                          |      | 2075 | 117 | 56 | -20 | -47 | -36 | -32 | -37 | -37 | -32 | -23 | 15  | 69  |
|                                          |      | 2010 | 27  | 26 | -6  | -23 | -7  | 1   | -1  | -10 | -12 | -9  | -3  | 9   |
|                                          | WP   | 2030 | 41  | 35 | -15 | -35 | -14 | -3  | -8  | -18 | -20 | -20 | -7  | 13  |
|                                          |      | 2075 | 67  | 35 | -31 | -49 | -24 | -11 | -19 | -33 | -34 | -35 | -15 | 19  |
|                                          |      | 2010 | 14  | 20 | 8   | -15 | -10 | -7  | -16 | -16 | -14 | 11  | 13  | 12  |
| Laborec<br>Košovce<br>9120               | CCCM | 2030 | 28  | 36 | 8   | -19 | -7  | -5  | -16 | -19 | -19 | 10  | 17  | 23  |
|                                          |      | 2075 | 107 | 76 | 3   | -35 | -19 | -23 | -37 | -38 | -37 | -10 | 18  | 68  |
|                                          |      | 2010 | 10  | 10 | 5   | -6  | 1   | 4   | 5   | 8   | 21  | 17  | 12  | 20  |
|                                          | GISS | 2030 | 33  | 22 | -3  | -14 | 1   | 7   | 9   | 13  | 23  | 20  | 20  | 40  |
|                                          |      | 2075 | 115 | 55 | -3  | -27 | -1  | 0   | -5  | -10 | -4  | 6   | 22  | 102 |
|                                          |      | 2010 | 41  | 33 | -11 | -35 | -26 | -21 | -23 | -22 | -21 | -13 | 0   | 29  |
|                                          | SD   | 2030 | 94  | 43 | -15 | -39 | -24 | -23 | -30 | -31 | -31 | -18 | 1   | 58  |
|                                          |      | 2075 | 200 | 52 | -31 | -55 | -37 | -35 | -46 | -46 | -46 | -29 | 0   | 101 |
|                                          |      | 2010 | 22  | 31 | -9  | -25 | -3  | 0   | -8  | -20 | -26 | -24 | -14 | 8   |
|                                          | WP   | 2030 | 52  | 37 | -16 | -34 | -4  | 1   | -13 | -30 | -35 | -31 | -22 | 10  |
|                                          |      | 2075 | 121 | 46 | -32 | -45 | -8  | -1  | -21 | -44 | -53 | -49 | -33 | 21  |
|                                          |      | 2010 | 16  | 19 | 9   | -12 | -9  | -10 | -11 | -15 | 0   | 5   | 5   | 12  |
| Topľa<br>Hanušovce<br>nad Topľou<br>9500 | CCCM | 2030 | 30  | 33 | 10  | -18 | -6  | -9  | -14 | -19 | -6  | 3   | 6   | 20  |
|                                          |      | 2075 | 93  | 81 | 6   | -36 | -20 | -25 | -28 | -29 | -22 | -15 | 4   | 52  |
|                                          |      | 2010 | 8   | 4  | 1   | -4  | 1   | 0   | -3  | 1   | 10  | 11  | 6   | 13  |
|                                          | GISS | 2030 | 30  | 16 | -5  | -13 | 0   | 3   | 1   | 5   | 12  | 15  | 13  | 26  |
|                                          |      | 2075 | 89  | 52 | 1   | -26 | -4  | -4  | -9  | -12 | -11 | -1  | 10  | 67  |
|                                          |      | 2010 | 39  | 28 | -9  | -33 | -25 | -17 | -20 | -18 | -20 | -16 | -3  | 17  |
|                                          | SD   | 2030 | 73  | 42 | -10 | -36 | -23 | -19 | -25 | -26 | -29 | -22 | -1  | 38  |
|                                          |      | 2075 | 142 | 52 | -26 | -52 | -35 | -30 | -38 | -39 | -43 | -34 | -5  | 64  |
|                                          |      | 2010 | 22  | 24 | -8  | -24 | -5  | -1  | -8  | -17 | -24 | -25 | -14 | 2   |
|                                          | WP   | 2030 | 37  | 32 | -14 | -33 | -7  | -1  | -12 | -26 | -34 | -34 | -21 | 1   |
|                                          |      | 2075 | 74  | 34 | -31 | -45 | -12 | -6  | -19 | -38 | -49 | -50 | -32 | 6   |
|                                          |      | 2010 | 16  | 19 | 9   | -12 | -9  | -10 | -11 | -15 | 0   | 5   | 5   | 12  |

#### e. Zhodnotenie zmien dlhodobého priemerného ročného odtoku

Zo zhodnotenia scenárov priemerných mesačných prietokov v budúcich desaťročiach a ich porovnania s referenčným obdobím vyplýva, že v budúcnosti možno na celom území Slovenska očakávať zmenu dlhodobých priemerných mesačných prietokov. Táto zmena sa môže prejaviť rôzne, v závislosti od predpokladaného scenára zmeny klímy, ako aj od jednotlivých povodí alebo regiónov. Na základe výsledkov možno rozdeliť analyzované povodia do 4 oblastí – západné Slovensko, severná časť stredného Slovenska, južná časť stredného Slovenska a východné Slovensko.

Z hodnotenia zmien vnútroročného rozdelenia odtoku vyplýva, že v budúcich desaťročiach možno očakávať vo všetkých regiónoch Slovenska zmenu dlhodobých priemerných mesačných prietokov. Pre všetky scenáre a horizonty sa prejaví nárast zimného a jarného odtoku a pokles letného a jesenného odtoku, najmä vo vegetačnom období. Najviac postihnuté oblasti budú oblasti južného a západného Slovenska, kde pokles dlhodobých priemerných mesačných prietokov možno očakávať



od februára (prípadne marca), do novembra (prípadne decembra), s najvýraznejšími poklesmi v mesiacoch máj až júl, a to v niektorých povodiach do -70% v horizonte 2075. Menej postihnuté oblasti budú oblasti severného Slovenska, s obdobím zvýšených priemerných mesačných prietokov od novembra do marca, a obdobím znížených prietokov od apríla do októbra. Najvýraznejšie poklesy dlhodobých priemerných mesačných prietokov možno očakávať v mesiacoch apríl až máj, a to približne do -50% v horizonte 2075.

#### **4. VPLYV KLIMATICKEJ ZMENY NA ZABEZPEČENOSŤ ODBERU VODY Z VODNÝCH NÁDRŽÍ**

Jednou z hlavných úloh vodného hospodárstva je posudzovanie vzťahu medzi požiadavkami na vodu a disponibilnými zdrojmi. Ak tento vzťah riešime pre budúcnosť, vzhľadom na možné zmeny klímy je potrebné uvedomiť si, že klimatické zmeny môžu ovplyvniť nielen budúce vodné zdroje, ale aj samotné požiadavky na vodu (cez demografiu, nároky na závlahovú vodu a pod.).

Nádrže patria k najúčelnejším vodohospodárskym zariadeniam na úpravu odtokových pomerov. Sú budované s cieľom plniť niekoľko úloh. Ich základnou úlohou je racionálna redistribúcia prietokov v priestore a čase. V rámci tejto funkcie nádrží svojím retenčným priestorom znižuje maximálne prietoky a chráni nižšie položené územie pred povodňami a živelnosťou vody, zásobným objemom zabezpečuje odberateľmi požadovaný objem vody a nadlepšuje nízke prietoky pod nádržou aj počas málovodných období. Nádrže sú však potenciálnym nebezpečenstvom pre nižšie položené územia. Prítok do nádrže závisí od množstva vody v povodí, zatiaľ čo odtok závisí od požiadaviek užívateľov. Výkonnosť vodnej nádrže závisí aj na klimatických faktoroch a môže reagovať na predpokladané klimatické zmeny.

Problematickou vplyvu klimatických zmien na povodia nad nádržami a na samotné veľké i malé vodné nádrže sa zaoberali viacerí autori (Svoboda, 1996; Szolgay a Parajka, 1997). Zhodujú sa v tom, že z hľadiska odtoku sa javí ako významnejší vstupný prvok teplota vzduchu, ktorej scenáre považujú klimatológovia za spoľahlivejšie ako scenáre ďalšieho vstupného prvku – úhrnov zrážok. Zmena vzťahu medzi veľkosťou zásobného objemu, celkovým nadlepením a zabezpečenosťou vyvolaná zmenami hydrologických podmienok môže výrazne ovplyvniť využívanie súčasných objemov nádrží. Rozhodujúcu úlohu tu budú hrať odhady nárokov spoločnosti na využitie nádrží a na vodné hospodárstvo v najbližšej budúcnosti (Bergström a kol., 1997).

V Slovenskej republike sú súčasné potreby vody zaistované niekoľkými vodnými nádržami, ktoré ako jediné z povrchových zdrojov sú schopné do istej miery prerozdeľovať nerovnomerné prirodzené prietoky podľa vodohospodárskych potrieb. Doterajšie zahraničné i domáce výskumné práce dokazujú, že dôsledky predpokladanej klimatickej zmeny na hospodárenie s vodnými zdrojmi by mohli byť nielen značne nepriaznivé, ale aj pôsobiť v dosť širokom rozsahu. Dôvodom je neurčitost' odhadu klimatickej zmeny, čo sa logicky premieta i do neurčitosti zmien hydrologických procesov a vedie k neistote pri posudzovaní funkcie nádrží v budúcich podmienkach.

##### **a. Metodika hodnotenia zmien zabezpečenia odberu z vodných nádrží – model WBMOD**

Na hodnotenie zmien zabezpečenia odberu z vodných nádrží bol použitý model WBMOD s mesačným krokom, zostavený na ÚH SAV (Halmová, 2004a,b; Halmová, 2005), ktorý simuluje prítok do nádrže za zmenených klimatických podmienok v povodí. Na posúdenie vplyvu zmenených klimatických podmienok na schopnosť vodnej nádrže zabezpečiť určitý odber vody, bolo potrebné vypracovať submodel Reservoir, ktorý bilancuje prebytky a nedostatky vody na základe prítoku do nádrže a odtoku z nej. Následne bola vyhodnocovaná zabezpečenosť odberu podľa požadovaného objemu a trvania bezporuchovej prevádzky. Tento "model" práce nádrže bol zostavený na základe metód (grafických a numerických) riešenia regulácie odtoku vody nádržami, bežne používaných vo vodnom hospodárstve.

V prvej verzii bol zostavený program uvažujúci s konštantným odberom vody z nádrže, definovaným ako dlhodobý priemerný mesačný prietok v konečnej stanici daného povodia. Výstupom modelu bola závislosť potrebného akumulačného objemu vodnej nádrže (VN) od veľkosti odberu. Táto závislosť

bola vypracovaná pre VN Orava, VN Lipt. Mara, VN Vihorlat a VN Veľká Domaša. Predpoklad konštantného odberu vody z nádrže je však reálny len pre niektoré nádrže, s málo variabilným odberom vody. Manipulačné poriadky väčších nádrží však naznačujú značnú variabilitu odberu. Z týchto dôvodov bol vypracovaný všeobecný variant programu, ktorý pracuje s definovaným konkrétnym časovým radom odberu a tiež užívateľom definovanými hodnotami limitných objemov vody v nádrži (počiatočný objem, maximálny a minimálny objem v letnom a zimnom polroku). Tento reálny chronologický rad odberu pre nás predstavuje etalón, s ktorým sa porovnávali prípady zmeneného prítoku do nádrže (ovplyvnené klimatickou zmenou) a tiež alternatívne zmeny minimálnej prevádzkovej hladiny v nádrži (t.j. zmeny zásobného objemu nádrže). Cieľom druhého kroku bolo teda zistiť, do akej miery by prítok do nádrže ovplyvnený klimatickými zmenami zmenil zabezpečenosť takého odberu vody, aký sa reálne uskutočnil od doby výstavby nádrže. Táto časť bola spracovaná iba pre povodia VN Vihorlat a VN Orava.

#### **b. Zabezpečenosť rovnomerného odberu z VN po aplikácii starších verzií klimatických scenárov**

Úlohou modelu WBMOD bolo určenie zabezpečení určitého odberu vody z nádrží po aplikácii vybraných starších verzií klimatických scenárov. Prvým krokom bolo vyčíslieť zabezpečenosť rovnomerného odberu z nádrží a zistiť závislosť potrebných akumulčných objemov od rôznych hodnôt rovnomerného odberu vody z nádrže. Tieto závislosti ukazujú, nakoľko budú pravdepodobne tieto nádrže schopné zabezpečiť rovnomerný odber vody v predpokladaných zmenených klimatických podmienkach. Bol vyčíslený stupeň redukcie konštantného odberu, ktorý by boli nádrže schopné zabezpečiť svojim, v súčasnej dobe definovaným, celkovým objemom, v podmienkach zmenenej klímy (k časovému horizontu 2075, resp. podmienke 2-násobku skleníkových plynov v atmosfére). Výsledky sú zosumarizované v tab. 4.

**Tab. 4** Stupeň redukcie konštantného odberu vody z nádrže (v %)

**Tab. 4** Degree of the reduction of constant water withdrawal from water reservoir (in %)

| Vodná      |          |                   | Klim. | Scenár |      |      | celk. objem VN     |
|------------|----------|-------------------|-------|--------|------|------|--------------------|
| Nádrž      | CCCMprep | */+               | GFL   | GIL    | CCC  | WPL  | mil.m <sup>3</sup> |
| V. Domaša  | 87,2     | 91,4*             | 86,8  | 83,3   | 81,7 | 71,4 | 185                |
| Vihorlat   | 96,8     | 101,0*            | 90,5  | 93,7   | 90,9 | 80,4 | 334                |
| Lipt. Mara | 91,9     | 81,7 <sup>+</sup> | 75,5  | 75,1   | 74,2 | 67,7 | 360                |
| Orava      | 76,6     | 68,0 <sup>+</sup> | 67,1  | 67,1   | 70,2 | 61,6 | 345                |

Pozn.: \* - GISSprep, + - WPB

Pri VN Vihorlat by očakávaná redukcia rovnomerného odberu nemala presiahnuť 10% (okrem klimatického scenára WPL), a podľa klimatického scenára GISSprep by bolo dokonca možné dosiahnuť nadlepšenie v pomere k súčasnej schopnosti riadenia odtoku. Podľa klimatického scenára WPL zabezpečenosť konštantného odberu výrazne klesá pre všetky štyri vodné nádrže. V zásade by sa zmena klímy mala najmenej prejaviť v regulovaní odtoku v povodí Bodrogu (VN Vihorlat a VN V. Domaša) a tiež v povodí VN Lipt. Mara.

#### **c. Zabezpečenosť reálneho odberu z vodnej nádrže po aplikácii nových verzií klimatických scenárov**

V snahe zistiť vplyv klimatických zmien v prípade zložitejšej manipulácie na nádržiach, sme použili rady skutočných odberov z VN Vihorlat (1971–1998) a VN Orava (1951–1980). Tieto rady je možné považovať za reálne požadované odbery vody. Modelované prítoky do nádrže podľa GCM scenárov a ich transformácia nádržou, poskytujú scenáre hypotetických odberov a ich zabezpečenosť, čo do objemu a doby s bezporuchovou prevádzkou, v porovnaní s požadovaným (historickým) odberom vody z nádrže. Pri modelovaní prítoku do nádrží v zmenených klimatických podmienkach boli použité najnovšie verzie klimatických scenárov – CCCM2000 a GISS1998.



V prípade VN Vihorlat, pri vypracovaní alternatív manipulácie na nádrži CCCM/GISS-1/2M-E, bola do úvahy braná skutočnosť, že nádrž je v letnom období intenzívne využívaná na rekreáciu. Pri absencii obmedzenia prevádzky vzhľadom na rekreáciu (alternatívy výpočtu CCCM/GISS-1/2M), VN Vihorlat bude podľa scenára GISS1998 takmer na 100% schopná zabezpečiť požadovaný (historický) odber vody čo do objemu, aj čo do doby bezporuchovej dodávky vody. Scenár CCCM2000 je menej optimistický, ale aj tak dosť priaznivý: zníženie zabezpečenia čo do objemu je len 2,5%, čo do trvania bezporuchovej prevádzky sú to 4%. V čase rekreačnej prevádzky v letnom období (hladina do 2 m pod max. prevádzkovou hladinou) zabezpečenie dodávky vody podľa klimatického scenára CCCM2000 čo do objemu, aj čo do trvania bezporuchovej prevádzky dosahuje hodnoty nad 95%. Po aplikácii scenára GISS1998, ktorý predpokladá nižšie hodnoty zmeny teploty vzduchu a zrážok, zabezpečenie požadovaného objemu vody dosahuje ešte vyššie hodnoty (Tab. 5).

O niečo odlišnejšia je situácia na VN Orava. Pri najoptimistickejších alternatívach výpočtu CCCM/GISS-1/2M, kedy je na manipuláciu na nádrži k dispozícii celý zásobný objem (t.j. objem medzi min. a max. prevádzkovou hladinou), je zrejmy výrazný pokles zabezpečenia odberu vody čo do objemu, aj čo do trvania po aplikácii scenára CCCM2000. Pre časový horizont 2030 zabezpečenie nedosahuje ani 90%, pre časový horizont 2075 je zabezpečenie objemu 81,5% a zabezpečenie bezporuchovej prevádzky iba 79%. Klimatický scenár GISS1998 je výrazne optimistickejší (2030 - takmer 99%, 2075 - okolo 95%). V prípade obmedzenia minimálnej hladiny pre letnú prevádzku na úroveň nie nižšiu ako 4 m pod maximálnu prevádzkovú hladinu, aj scenár GISS1998 pre časový horizont 2030 naznačuje pokles zabezpečenia objemu na 94,4% a zabezpečenia trvania 93,1%, zatiaľ čo scenár CCCM2000 pre časový horizont 2030 udáva pokles zabezpečenia objemu na takmer 84% a trvania na takmer 83%. Hodnoty zabezpečenia sú pre časový horizont 2075 a oba klimatické scenáre približne o 4% nižšie ako pre horizont 2030 (Tab. 6).

**Tab. 5 Zabezpečenie danej manipulácie v objeme (ZZO) a trvaní bezporuchovej prevádzky (ZZT) VN Vihorlat pre časový horizont 2030 a 2075**

**Tab. 5 Dependability of the WR Vihorlat to ensure a given water supply in the volume (ZZO) and in duration of trouble-free (non-failure) operation (ZZT) for the time horizons 2030 and 2075**

| časový<br>klim. scenár | Horizont<br>ZZO | 2030<br>ZZT | time<br>klim. scenár | Horizont<br>ZZO | 2075<br>ZZT |
|------------------------|-----------------|-------------|----------------------|-----------------|-------------|
| CCCM-1M                | 0,982           | 0,963       | CCCM-2M              | 0,975           | 0,960       |
| CCCM-1A                | 0,798           | 0,764       | CCCM-2A              | 0,794           | 0,761       |
| CCCM-1B                | 0,879           | 0,851       | CCCM-2B              | 0,873           | 0,851       |
| CCCM-1C                | 0,962           | 0,966       | CCCM-2C              | 0,957           | 0,950       |
| CCCM-1D                | 0,971           | 0,957       | CCCM-2D              | 0,966           | 0,957       |
| CCCM-1E                | 0,978           | 0,960       | CCCM-2E              | 0,972           | 0,957       |
| GISS-1M                | 0,996           | 0,994       | GISS-2M              | 0,996           | 0,991       |
| GISS-1A                | 0,873           | 0,854       | GISS-2A              | 0,856           | 0,835       |
| GISS-1B                | 0,938           | 0,941       | GISS-2B              | 0,927           | 0,935       |
| GISS-1C                | 0,983           | 0,991       | GISS-2C              | 0,981           | 0,988       |
| GISS-1D                | 0,987           | 0,988       | GISS-2D              | 0,985           | 0,984       |
| GISS-1E                | 0,992           | 0,991       | GISS-2E              | 0,993           | 0,991       |

**Tab. 6 Zabezpečenosť danej manipulácie v objeme (ZZO) a trvaní bezporuchovej prevádzky (ZZT) VN Orava pre časový horizont 2030, 2075**

**Tab. 6 Dependability of the WR Orava to ensure a given water supply in volume (ZZO) and in duration of trouble-free (non-failure) operation (ZZT) for the time horizons 2030 and 2075**

| časový       | horizont | 2030  | time         | Horizont | 2075  |
|--------------|----------|-------|--------------|----------|-------|
| klim. scenár | ZZO      | ZZT   | klim. scenár | ZZO      | ZZT   |
| CCCM-1M      | 0.883    | 0.870 | CCCM-2M      | 0.815    | 0.793 |
| CCCM-1A      | 0.780    | 0.782 | CCCM-2A      | 0.730    | 0.729 |
| CCCM-1B      | 0.816    | 0.804 | CCCM-2B      | 0.766    | 0.789 |
| CCCM-1C      | 0.838    | 0.829 | CCCM-2C      | 0.790    | 0.798 |
| GISS-1M      | 0.988    | 0.986 | GISS-2M      | 0.956    | 0.943 |
| GISS-1A      | 0.889    | 0.869 | GISS-2A      | 0.841    | 0.821 |
| GISS-1B      | 0.919    | 0.913 | GISS-2B      | 0.877    | 0.864 |
| GISS-1C      | 0.944    | 0.931 | GISS-2E      | 0.903    | 0.884 |

Výsledky simulácií riadenia odtoku v podmienkach zmien klímy VN Vihorlat a VN Orava boli spracované z pohľadu nárokov na odber vody a priority jej užívateľov v obdobiach 1971–1998 a 1951–1980. Do akej miery sa tieto nároky a priority v budúcnosti zmenia, sa v práci neriešilo. Vyvinutý model WBMOD môže byť použitý pre alternatívne hypotetické manipulácie s rôznymi variantmi režimu odberu vody z nádrže, definovanými ako časový rad hodnôt. Vypracovať alternatívne scenáre odberu vody pre rôzne alternatívy vývoja vodohospodárskych potrieb vody a následne vyčíslit ich zabezpečenosť, by bolo potrebné urobiť pre významné nádrže, predstavujúce hlavný vodný zdroj v určitej oblasti.

## 5. RÁMCOVÉ ADAPTAČNÉ OPATRENIA VO VODNOM HOSPODÁRSTVE NA ZMENU KLÍMY

Dnes sa už všeobecne začína uznávať, že hrozba klimatickej zmeny je dostatočne vážna. I keď sa aspoň čiastočne začína dariť odstraňovať jej príčiny, zotrvačnosťou dejov zrejme dôjde k nepriaznivým dôsledkom globálneho otepľovania na ľudstvo. Z rozboru problematiky mnohých predchádzajúcich prác (napr. Pekárova a Szolgay, eds., 2005) vyplynulo, že v oblasti posudzovania vplyvu zmeny klímy na hydrologický režim a vodné hospodárstvo nie je v súčasnosti k dispozícii všeobecne použiteľná metodika ani normalizovaný alebo odporúčaný postup. V oblasti posudzovania impaktov zmeny klímy ako základu pre návrhy adaptačných opatrení vo VH navrhujeme preto nasledovnú postupnosť krokov:

- vytvoriť scenáre možných zmien hydrologického režimu ako vedecký podklad pre adaptáciu,
- hydrologické scenáre je potrebné odvodiť z viacerých klimatických scenárov a je potrebné použiť niekoľko nie príliš zložitých hydrologických modelov,
- pred samotným návrhom reaktívnych a proaktívnych adaptačných opatrení je potrebné vyhodnotiť robustnosť povodia, t.j. preveriť účinnosť zmien využívania krajiny na kompenzovanie negatívnych zmien v hydrologickom režime,
- samotnú adaptáciu navrhnuť proaktívne rámcovo pre vyššiu úroveň ako samotné povodie,
- konkrétnu adaptáciu v povodí navrhnuť na základe scenárov a analýzy súčasnej a výhľadovej vodnej bilancie.

Značný rozptyl možností budúceho vývoja klímy a neistoty zmien jej regionálnych prejavov však sťažujú samotný odhad impaktov, ako aj následný návrh adaptačných opatrení na zmiernenie negatívnych dôsledkov. Popri neistotách hodnotenia impaktov by bolo potrebné vnímať aj širšie politické, spoločenské, ekologické, ekonomické, technologické a iné súvislosti. Neistoty v odhade vzájomných väzieb týchto prepojených systémov a prípadnej projekcie ich budúceho rozvoja sú všade značné. Klimatická zmena sa dotkne zrejme širokého komplexu javov, pričom dnes ešte ani v rámci



štúdií Národného klimatického programu zatiaľ nevznikla komplexná štúdia zameraná primárne na synergické pôsobenie zmien a adaptačné opatrenia na zmiernenie ich dôsledkov. Ani tu sa preto nemôžeme otázke venovať komplexne, sústredíme sa len na otázky dotýkajúce sa vodného komponentu životného prostredia, a to tiež len z hľadiska zmien odtoku v tokoch, ktoré determinujú nielen možnosti hospodárskeho využívania vody, ale aj ekologické podmienky v tokoch a prírodných zónach. Ich ochrana je z hľadiska jeho využívania dnes spoločenskou prioritou, tiež umocnenou prebiehajúcou implementáciou Rámcovej smernice EÚ o vode.

Vplyvy zmeny klímy na využívanie vôd budú však zrejme zložitejšie, než sme ich naznačili len v súvislosti s očakávanými zmenami hydrologického režimu. Komplexnosť úloh si vyžiada riešenia, ktoré majú interdisciplinárny charakter. Preto by sa mali riešiť dôsledky klimatických zmien na socio-ekonomické sektory, a tieto by sa mali stať rovnocenným východiskovým materiálom prognóz, akými sú scenáre klimatické, resp. hydrologické. Z uvedeného je zrejmé, že pri riešení dôsledkov klimatických zmien je stupeň neurčitosti vo vzťahu k vode niekoľkonásobne vyšší, než sme naznačili, a takisto bude aj rásť množina alternatívnych výsledkov. Dnešný stav vedomostí preto nemôžeme považovať za dostačujúci. Preto bude treba ďalej podporovať výskum v klimatológii, v oblasti kvantifikovania zmien vyvolaných klimatickými zmenami, adaptácii vodohospodárskych sústav a výsledky tohto výskumu zaviesť do prognóz a plánovania.

Smerovanie adaptačných opatrení na nepriaznivé dôsledky zmeny klímy vo vodnom hospodárstve na Slovensku sa dnes dá formulovať len pomerne všeobecne. Popri neistotách hodnotenia dôsledkov zmeny klímy je potrebné vnímať aj širšie politické, spoločenské, ekologické, ekonomické, technologické a iné súvislosti. Neistoty v odhade vzájomných väzieb týchto prepojených systémov a prípadnej projekcie ich budúceho vývoja sú všade značné a u nás, s ohľadom na súčasný vývoj, ešte väčšie. V súčasnosti preto odporúčame ako vhodný postup, ktorý preferuje rozhodnutia, ktoré vo svojom dôsledku znižujú hrozbu negatívnych dôsledkov klimatickej zmeny a zároveň zohľadňujú súčasné preferencie trvalo udržateľného rozvoja spoločnosti, tvorbu a ochranu životného prostredia a integrované hospodárenie s vodou. Pre tento spôsob adaptácie sa zaužíval názov "no regret policy". Jeho aplikácia si vyžaduje, aby decízna sféra bola oboznámená aj s možnými dôsledkami klimatickej zmeny vo vodnom hospodárstve, neistotami v ich určovaní a koordinovala svoje postupy. Takýmto smerom boli v podstate formulované aj závery v našich predošlých prácach.

Tu preto iba zhrnieme doteraz navrhované opatrenia. Základné opatrenia na zmiernenie možných negatívnych dôsledkov na vodné hospodárstvo sa dotýkajú viacerých oblastí:

- priame opatrenia na riadenie spotreby vody,
- nepriame nástroje ovplyvňujúce správanie spotrebiteľov,
- inštitucionálna zmena zabezpečujúca lepšie hospodárenie s vodou,
- zlepšenie prevádzky existujúcich vodohospodárskych sústav.

V prvej oblasti by mohlo ísť napr. o redukcii špecifickej potreby pitnej vody na obyvateľa technickými prostriedkami, znižovanie strát vo výrobe a rozvoze pitnej vody, podporovanie zavádzania nových technológií v priemysle, využívanie zrážkovej a inej vody na úžitkové ciele, budovanie delených vodovodov v malých sídliskách, a pod.

Druhá oblasť by mala tieto opatrenia podporiť aj v oblasti subvencií a daní, poplatkov a pokút vo vodnom hospodárstve. Zároveň bude potrebné posilniť informovanosť verejnosti o dôsledkoch klimatických zmien na kvalitu života všeobecne a na problematiku vodných zdrojov a následné opatrenia zvlášť. Informačná politika by mala byť spojená s výchovou k zvýšenému ekologickému povedomiu spotrebiteľov voči vodným zdrojom.

V tretej oblasti by sa mal riešiť problém, že dosiaľ nedošlo k úplnému priamemu premietnutiu nového zákonodarstva v oblasti životného prostredia do vodohospodárskej legislatívy. Tak isto sa s možnou potrebou adaptácie priamo nezaoberali doteraz vytvárané koncepčné dokumenty v oblasti vodného hospodárstva a podľa našich vedomostí ani v územno-plánovacom procese a pri tvorbe a ochrane krajiny. V týchto oblastiach by bolo vhodné posilniť koordináciu. Viackrát sa už upozorňovalo na to, že v koncepcii rozvoja vodného hospodárstva by sa mala posilniť existujúca ochrana všetkých zdrojov vody (podzemných aj povrchových). Pri vodných zdrojoch, ktoré sú už vybudované, bude navyše pot-

rebné prehodnotiť ich udržateľné využívanie v nových klimatických podmienkach. Navrhujeme zväziť zosilnenú legislatívnu ochranu vodných zdrojov v oblastiach, o ktorých sa dá predpokladať, že ich vodné zdroje budú najmenej dotknuté klimatickými zmenami a explicitne chrániť všetky miesta doteraz plánovaných nádrží a stanoviť spôsoby dočasného využívania týchto území. Ďalej odporúčame zvlášť sa venovať ochrane unikátnych zdrojov podzemných vôd Žitného ostrova, ktorých potenciál zostane pravdepodobne aj v budúcnosti blízky dnešnej úrovni. V predstihu by bolo vhodné vstúpiť do kontaktu so susednými krajinami, ktoré budú "tangované" zmenou hydrologického cyklu a potrebou zvýšenej miery regulovania odtoku z nášho územia a vytvoriť organizačné opatrenia na spoločné riešenie problému možných dôsledkov klimatickej zmeny.

Štvrtú oblasť môžeme rozdeliť do niekoľkých častí. Prvá sa týka optimalizácie využívania a riadenia existujúcich vodohospodárskych a vodárenských sústav. Zabezpečenosť dodávky vody podľa dnešných predstáv sa málokedy určovala pre vodohospodárske sústavy ako celok. Preto by bolo potrebné preskúmať zraniteľnosť existujúcich vodohospodárskych sústav ako celku v kritických situáciách.

Druhá časť sa špeciálne týka diskusie okolo potreby výstavby vodných nádrží u nás. Doteraz odhadnuté tendencie zmien hydrologického režimu poukazujú na zvýšenú potrebu prerozdeľovať odtok v priestore medzi severom a juhom, prerozdeľovať odtok medzi jednotlivými rokmi a prerozdeľovať odtok v priebehu roka. Musíme preto počítať aj s možnosťou potreby kompenzovať pokles výdatnosti zdrojov vody, najmä v nížinných častiach na strednom a východnom Slovensku. Odporúčame preto nevylučovať možnosť výstavby vodných nádrží z koncepcie rozvoja vodného hospodárstva. Potrebné môžu byť najmä nádrže s dlhodobým regulovaním odtoku a pri plánovaní ich umiestnenia treba vychádzať z priestorovo diferencovaných účinkov klimatickej zmeny. Bude potrebné tiež vykonať inventúru stavu tzv. malých vodných nádrží a prehodnotiť ich využívanie v nových podmienkach nielen ako krajinotvorného prvku, ale aj ako zdrojov vody pre závlahy v južných častiach územia.

Tretia časť sa týka monitorovania prebiehajúcich procesov v hydrosfére. Je potrebné posilniť existujúce systematické sledovania vodohospodárskej bilancie kvantity a kvality vody aj v menších povodiach, aby bola možnosť identifikovať tendencie v možnom úbytku vody v čase a aby bola možnosť formulovať strategické rozhodnutia nových priorít vodného hospodárstva, najmä počas sucha.

Štvrtá časť sa týka hospodárenia s vodou v krajine. V spolupráci s rezortmi by bolo vhodné systematicky realizovať opatrenia v povodiach s plošným účinkom, zamerané na všeobecné a trvalé zlepšenie podmienok odtoku a na zadržanie vody v krajine, zníženie možných negatívnych prejavov extrémnych prietokov a na zlepšenie kvality vôd.

**PodĎakovanie:** Príspevok bol spracovaný vďaka finančnej podpore grantového projektu VEGA 2/0096/08. Autori týmto ďakujú grantovej agentúra VEGA za podporu výskumu.



## LITERATÚRA

- BERGSTRÖM, S., HARDELIN, M., HOLST, B., SAELTHUN, N. R.:** Sensitivity of hydropower production to climate change- example from northern Europe, (Hydropower into the next century conf. 15-17/9, Slovenia), 1997.
- DANIHLÍK, R., HLAVČOVÁ, K., KOHNOVÁ, S., PARAJKA, J., SZOLGAY, J.:** Scenarios of the change in the mean
- DOORENBOS J., PRUITT W.O.:** Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 24. FAO, Rome 1997.
- HALMOVÁ, D.:** Vplyv zmien klímy na zabezpečenosť odberu vody z vodného diela Orava. Acta Hydrologica 2, 2000, 3-12.
- HALMOVÁ, D.:** Conflicts between the reservoir water demand and climate changed inflow. J. Hydrol. Hydromech., ÚH SAV, 4, 2004a, 329-341.
- HALMOVÁ, D.:** Vplyv potenciálnych klimatických zmien na zabezpečenie požadovanej dodávky vody vodnou nádržou Vihorlat. Acta Hydrologica Slovaca, ÚH SAV, 1, 2004b, 42-51.
- HALMOVÁ, D.:** Dopady očakávaných zmien klímy na využitie zásobných objemov významných nádrží SR. Dizertačná práca. Ústav hydrológie SAV, Bratislava 2005.
- HALMOVÁ, D.:** Vplyv potenciálnych klimatických zmien na zabezpečenie požadovanej dodávky vody vodnou nádržou Orava. Acta Hydrologica Slovaca, 2, 2005a, 218-226.
- HALMOVÁ, D.:** Vplyv klimatickej zmeny na využitie zásobného objemu vodnej nádrže Orava. In: P. Pekárová, J. Szolgay, eds.: Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry v povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny, Bratislava, VEDA, 2005b, 253-282.
- HALMOVÁ, D., MELO, M.:** Climate change impact on reservoir water supply reliability. IAHS-AISH Publication, Wallingford, 2006, 308, 407-412.
- HALMOVÁ, D.:** Impact of expected climate change on storage volume utilisation of important water reservoir of the Slovak Republic. Eds. Stevan Bruk, Tioslav Petkovic. XXIII. Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological bases of water management, Belgrade - Serbia, 2006, 10 pp.
- HLAVČOVÁ, K., SZOLGAY, J., ČUNDERLÍK, J., PARAJKA, J., LAPIN, M.:** Impact of climate change on the hydrological regime of rivers in Slovakia. Publication of the Slovak Committee for Hydrology No. 3. Vydavateľstvo STU a SVH MHP UNESCO, Bratislava 1999, 101 pp.
- HLAVČOVÁ, K., SZOLGAY, J., K., PARAJKA, J., ČUNDERLÍK, J., LAPIN, M., DAMBORSKÁ, I., MELO, M.:** Vplyv očakávanej zmeny klímy na odtokové pomery a výdatnosť vodných zdrojov v SR, II. Etapa – stredoslovenský kraj. Záverečná správa pre MP SR, KVHK SvF STU, Bratislava 2000a.
- HLAVČOVÁ, K., SZOLGAY, J., PARAJKA, J., ČUNDERLÍK, J.:** Modelovanie vplyvu zmeny klímy na režim odtoku v regióne stredného Slovenska. Zväzok č. 9 Národného klimatického programu SR. MŽP SR a SHMÚ, Bratislava 2000b, 15-38.
- HLAVČOVÁ, K., SZOLGAY, J., K., PARAJKA, J., ČUNDERLÍK, J., LAPIN, M., DAMBORSKÁ, I., MELO, M.:** Vplyv očakávanej zmeny klímy na odtokové pomery a výdatnosť vodných zdrojov v SR, III. etapa – západoslovenský kraj. Záverečná správa pre MP SR, KVHK SvF STU, Bratislava 2002.
- HLAVČOVÁ, K., SZOLGAY, J., LAPIN, M., K., PARAJKA, J., DANIHLÍK, R., KALAŠ, M., MELO, M., DAMBORSKÁ, I.:** Vplyv očakávanej zmeny klímy na odtokové pomery a výdatnosť vodných zdrojov v SR, IV. etapa – celé Slovensko, Záverečná správa pre MŽP SR, KVHK, SvF STU, Bratislava 2003.
- HLAVČOVÁ, K., KOHNOVÁ, S.:** Návrh rámcových adaptačných opatrení. In: Pekárová, P., Szolgay, J., eds.: Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny. Veda – Vydavateľstvo SAV, Bratislava 2005, 419-492. ISBN 80-224-0884-0.
- HLAVČOVÁ, K., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S., PARAJKA, J.:** Hydrological scenarios of changes in the mean annual and monthly runoff in Slovakia. In: Bruk, S., Petkovic, T., eds.: 23<sup>rd</sup> Conference of the Danube Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management. National Committee of Serbia for the IHP of UNESCO, Belgrade 2006a. CD, 11 s.
- HLAVČOVÁ, K., PARAJKA, J., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S.:** Grid-based and conceptual approaches to modeling impact of climate change on runoff. Slovak Journal of Civil Engineering, XIV, 2006b, 1, 19-29.
- HLAVČOVÁ, K., LAPIN, M., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S.:** A simple model for estimation of climate change induced extreme daily precipitation changes. In: Heinonen, M., ed.: Proceedings of the Third International Conference on Climate and Water. Finish Environment Institute SYKE, Helsinki 2007, 188-193.
- IPCC:** IPCC Supplement: Scientific Assessment of Climate Change. IPCC, WMO, UNEP 1992, 24 pp.

**IPCC:** Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Bruce, J., Hoesung Lee, Callander, B. A., Haites, E., Harris, N., Maskell, K. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK 1994, 339 pp.

**IPCC:** Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Xiaosu, D. (eds.). Cambridge Univ. Press, UK 2001, 944 pp.

**IPCC:** IPCC Fourth Assessment Report. Working Group I Report "The Physical Science Basis". <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>, 2007, 996 s.

**LAPIN M., DAMBORSKÁ I., FAŠKO P., MELO M., ŠTASTNÝ P.:** Scenarios of Climatic Extremes for Slovakia. In: Proceedings of the International Conference "Millennium...", Images of Weather and Climate, Cracow, September 20-22, 2000a, 159-170.

**LAPIN, M., MELO, M., DAMBORSKÁ, I., GERA, M., FAŠKO, P.:** Nové scenáre klimatickej zmeny pre Slovensko na báze výstupov prepojených modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry. In: Národný klimatický program SR. MŽP SR, SHMÚ, Bratislava 2000b, 8, 5-34.

**LAPIN, M., DAMBORSKÁ, I., MELO, M.:** Downscaling of GCM outputs for precipitation time series in Slovakia. Meteorologický časopis, roč. 4, 2001a, č. 3, 29-40. ISSN 1335-330X.

**LAPIN, M., MELO, M., DAMBORSKÁ, I.:** Scenáre súboru viacerých vzájomne konzistentných klimatických prvkov. In: Nové scenáre klimatických prvkov a ich využitie. Zväzok č. 11 Národného klimatického programu SR. MŽP SR a SHMÚ, Bratislava 2001b, 5-30.

**NOVÁK V.:** Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. Veda, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava 1995, 253 s.

**PARAJKA, J.:** Mapping long-term mean annual precipitation in Slovakia using geostatistical procedures. In: Proceedings of the Int. Conf. "Problems in Fluid Mechanics and Hydrology", Institute of Hydrodynamics AS CR, 1999, 424-430.

**PARAJKA, J.:** Mapovanie dlhodobého priemerného ročného odtoku s využitím empirických modelov. Acta Hydrologica Slovaca, Roč. 1, 2000, č.2, 51-59.

**PARAJKA, J.:** Mapovanie dlhodobého priemerného ročného odtoku na území Slovenska. Dizertačná práca. SvF STU, Bratislava, 2001, 149 s.

**PARAJKA, J., KALAŠ, M., HLAVČOVÁ, K., DANIHLÍK, R., SZOLGAY, J.:** Hydrologické scenáre možných zmien priemerných mesačných prietokov v budúcich desaťročiach. Acta Hydrologica Slovaca, 5, 2004a, 1, 87-94.

Parajka, J., Szolgay, J., Hlavčová, K., Zvolenský, M.: Priestorové scenáre budúcich možných zmien dlhodobého priemerného ročného odtoku na Slovensku. Acta Hydrologica Slovaca, 5, 2004b, 1, 95-103.

**PARAJKA, J., KUBEŠ, R., KALAŠ, M., SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., KOHNOVÁ, S.:** Matematické modely pre modelovanie vplyvu zmeny klímy na odtokové procesy. In: Pekárová, P., Szolgay, J., eds.: Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry povodia Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny. Veda – Vydavateľstvo SAV, Bratislava 2005, 419-492. ISBN 80-224-0884-0.

**PEKÁROVÁ P., SZOLGAY J., EDS.:** Assessment of Climate Change Impact on Selected Components of the Hydrosphere and Biosphere in the Hron and Váh River Basins. VEDA, Bratislava 2005, 419-492, ISBN 80-224-0884-0.

**SVOBODA, A.:** Možný vplyv globálnych zmien klímy na zásobovanie vodou nádrže Vihorlat. Zb. II. Ved. seminára "Vplyv antropogénnej činnosti na vodný režim nížinného územia", Michalovce, Zemplínska Šírava, ÚH SAV, Bratislava 1996, 104-107.

**SZOLGAY, J., PARAJKA, J.:** Hydrologické scenáre zmeny odtoku v dôsledku klimatickej zmeny v oblastiach s malými vodnými nádržami. Vodohospodársky spravodajca, 40, 1997, 11, 12-13.

**SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., PARAJKA, J., ČUNDERLÍK, J.:** Vplyv klimatickej zmeny na odtokový režim na Slovensku. In: Klimatické zmeny - hydrológia a vodné hospodárstvo SR. Zväzok č. 6 Národného klimatického programu. MŽP SR a SHMÚ, Bratislava 1997, 11-110.

**SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., PARAJKA, J., ČUNDERLÍK, J., LAPIN, M., DAMBORSKÁ, I., MELO, M., SVOBODA, A., HALMOVÁ, D., MOSNÝ, V.:** Vplyv očakávanej zmeny klímy na odtokové pomery a výdatnosť vodných zdrojov v SR, I. etapa. Záverečná správa pre MP SR, KVHK SvF STU, Bratislava 1999.

**SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K.:** Modelové riešenie odhadov vplyvu zmeny klímy na hydrologický cyklus a vodné hospodárstvo. Životné prostredie, XXXIV, 2000, č. 2, 75-80.

**SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., KALAŠ, M.:** Určovanie vplyvu klimatickej zmeny na odtokový proces. Journal of Hydrology and Hydromechanics, roč. 50, 2002, č. 4., s. 341-371.

**SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., DUŠIČKA, P.:** Klimatická zmena a hydroenergetický potenciál SR. Životné prostredie, XXXVIII, 2004, 5, 257-261.



SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., PARAJKA, J., KOHNOVÁ, S., BÁLINT, G.: Combined grid-based and conceptual approach to climate change impact estimation for water resources planning. In: Heinonen, M., ed.: Proceedings of the Third international conference on Climate and Water. Finish Environment Institute SYKE, Helsinki 2007, 449-454.

TOMLAIN J., DAMBORSKÁ I.: Fyzika hraničnej vrstvy atmosféry. [Vysokoškolské skriptá.] Matematicko-fyzikálna fakulta UK, Bratislava 1999, 132 s.

THORNTHWAITE C. W.: An approach toward a rational classification of climate. Geograph. Rew. 38, 1948, 55-94.

## CHANGES IN HYDROLOGIC REGIME OF SLOVAK RIVERS AND BASIC ADAPTATION MEASURES TO REDUCE CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER MANAGEMENT

<sup>(1)</sup>Kamila Hlavčová, <sup>(1)</sup>Ján Szolgay, <sup>(2)</sup>Dana Halmová, <sup>(3)</sup>Juraj Parajka, <sup>(1)</sup>Silvia Kohnová

<sup>(1)</sup>Dept. of Land and Water Resources Management of SvF STU in Bratislava

<sup>(2)</sup>Institute of Hydrology of SAS in Bratislava

<sup>(3)</sup>Institute for Hydraulic and Water Resources Engineering, VUT Vienna

**Summary:** The potential impact of climate change on the long-term mean annual and the mean monthly runoff in Slovakia and on the capacity of selected water reservoirs were evaluated. For modelling the spatial distribution of changes in the long-term mean annual runoff in Slovakia, an empirical raster-based model was developed. The model is based on the hydrological balance equation between the long-term mean annual runoff, the long-term mean annual precipitation totals, the index of the potential evapotranspiration and the regional parameters. For estimating the changes in the seasonal runoff distribution, a conceptual water balance model developed at the Slovak University of Technology was used. This model simplifies a river basin into two nonlinear reservoirs, and it simulates water accumulation in the basin, snowmelt, evapotranspiration, runoff from impermeable areas in the basin, surface and subsurface runoff and baseflow. The inputs required for the modelling water balance in a monthly time step is the mean monthly precipitation for the basin, the mean monthly discharges in the outlet of the basin and the mean monthly potential evapotranspiration. The ability of water reservoirs to supply future demands for water was estimated by the WBMOD rainfall-runoff balance model in a monthly time step. The input data series of precipitation and air temperature and the observed reservoir outflows were used to express the expected changes in the total runoff and the required reservoir capacity.

Several climate change scenarios have been applied to test the sensitivity of the basins to climate change. The regionally downscaled outputs of the CCCM97, CCCM2000 and GISS98 coupled ocean and atmosphere general circulation models and, as alternative scenarios, the WP and SD scenarios published by the Slovak National Climate Program were used. The scenarios were given as changes in the long-term mean values of the monthly and annual precipitation and the temperature for the time horizons 2010, 2030 and 2075. These horizons represent the centres of the 50-year time frames of 1986–2035, 2006–2055, and 2051–2100. Downscaling was performed in the climatic stations using the methodology recommended by the Slovak National Climate Programme.

As already indicated by the results of the previous impact studies, a decrease in the long-term mean annual runoff can be expected in the future in Slovakia. The southern part of Slovakia and the lowland areas will be more sensitive to the decrease in runoff. The effects of an increase in air temperature will be decisive for such changes, even in cases when an increase in precipitation is expected. The results of the changes in the seasonal runoff distribution indicate future changes in the long-term mean monthly runoff in the selected basins in Slovakia. In the winter and early spring period, an increase in the long-term mean monthly runoff can be assumed. On the other hand, a decrease in the long-term

mean monthly runoff in the summer period can occur. The decrease in summer runoff will be more extreme for later time horizons, for the WP and SD scenarios, and for the southern basins. The results of estimating changes in the capacity of selected water reservoirs indicate that expected climatic change would influence the certainty of the water supply from reservoirs and one would expect rather significant changes in management of the utilised water.

However today, due to several uncertainties, it is rather difficult to present quantitative adaptation guidelines and estimate their cost. Uncertainties in the boundary conditions for the long-term development and management of water resources in Slovakia include: the not-quite-clear priorities for the economic transformation, the energy policy, and the gradually changing water legislation in the near future; the changing, but unsettled, priorities for institutional, industrial, agricultural and urban developments; and the possibility of the privatisation of the water supply, water power and irrigation sectors.

Further uncertainties could be introduced into the planning by the gradual decrease in the regulation of prices for electric energy, gas, petrol and water. Special care will have to be paid to these uncertainties in the future supply-demand balance. The supply side is obviously better understood and can be interpreted as a limit on growth. The demand side will very probably undergo substantial changes.

A “no regret” policy based on environmental protection priorities, which is incorporating adaptation measures for the mitigation of the effects of climate changes, is therefore seen here as a solution for the near future. To eliminate the effects of the possible negative trends in the hydrological cycle and the development of water resources in Slovakia, the adaptation strategies addressed on the national level will have to incorporate a number of legislative, organisational and technical actions aimed at protecting the country’s water resources and their source areas.

**Key words:** hydrological scenarios of long-term mean annual runoff, long-term mean monthly runoff and capacity of water reservoirs, hydrological modelling



# SIMULÁCIA RASTU TEPLOTY VODY DUNAJA V BRATISLAVE V ZÁVISLOSTI NA OČAKÁVANOM RASTE TEPLOTY VZDUCHU

<sup>(1)</sup>Pavla Pekárová, <sup>(1)</sup>Milan Onderka, <sup>(2)</sup>Peter Škoda, <sup>(3)</sup>Ján Pekár

<sup>(1)</sup>Ústav hydrológie SAV, Račianska 75, 831 02 Bratislava, [pekarova@uh.savba.sk](mailto:pekarova@uh.savba.sk)

<sup>(2)</sup>Slovenský hydrometeorologický Ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava, [peter.skoda@shmu.sk](mailto:peter.skoda@shmu.sk)

<sup>(3)</sup>Katedra ekonomických a finančných modelov, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK  
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, [pekar@fmph.uniba.sk](mailto:pekar@fmph.uniba.sk)

**Abstrakt:** V prvej časti štúdie je zhodnotený dlhodobý vývoj teploty vody Dunaja v stanici Bratislava za 75-ročné obdobie 1931–2005. Zhodnotené sú hodinové, denné, mesačné a ročné rady teploty vody. Druhá časť je venovaná analýze závislosti mesačných hodnôt teploty vody od mesačných hodnôt teploty vzduchu, priemerných mesačných prietokov a antropogénnej činnosti človeka. V tretej časti sú viacnásobnou regresnou analýzou odvodené empirické vzťahy na nepriame určenie mesačných hodnôt teploty vody v Dunaji v stanici Bratislava z mesačných hodnôt teploty vzduchu vo Viedni a mesačných prietokov v Bratislave. Pomocou týchto vzťahov sú simulované mesačné hodnoty teploty vody pre časový horizont 2075. Na základe výsledkov simulácií môžeme očakávať, že priemerná ročná teplota vody v Dunaji v časovom horizonte 2075 stúpne od 1,83 °C do 2,6 °C.

**Kľúčové slová:** Dunaj, Bratislava, teplota vody, klimatická zmena, scenáre

## ÚVOD

Teplota vody patrí k základným fyzikálnym charakteristikám povrchových vôd, ktorá priamo ovplyvňuje faunu a flóru tokov. Teplota vody v tokoch je mimoriadne dôležitá pri chove rýb, pri posudzovaní samočistiacej schopnosti tokov, pri zavlažovaní, pri využívaní tokov na rekreačné účely, i v energetike pri posudzovaní chladiacej schopnosti tokov. Na výslednú teplotu vody v riekach má vplyv predovšetkým (Caissie, 2006):

- teplota vzduchu v povodí (styk vody s okolitým prostredím, t.j. vzduchom, brehmi, dnom)
- účinok slnečnej energie, výpar a kondenzácia vodnej pary
- orografické podmienky povodia (napr. nadmorská výška povodia, veľkosť povodia, výskyt prírodných nádrží v povodí, zatienenie koryta vegetáciou)
- hydrologický režim toku (prietok, rýchlosť a hĺbka toku, hladina a teplota podzemných vôd, teplota a množstvo zrážkových vôd, a pod.)
- antropogénna činnosť v povodí (umelé nádrže a derivačné kanály, zaústenie odpadových a chladiacich vôd do toku).

Prvé kontinuálne merania teploty vody slovenských tokov pochádzajú z rokov 1924 až 1926 (Dunaj: Bratislava – 1926, Hron: Banská Bystrica – 1925, Starohorský potok: Motyčky – 1924, Nitra: Nitrianska Streda – 1925, Váh: Sered' - 1930). Po prvýkrát základné charakteristiky teploty vody Dunaja v stanici Bratislava spracovali Dmitrijeva a Pacl (1952). Teplota vody slovenských tokov z údajov do roku 1960 bola spracovaná Horváthovou a Vanetianerovou (1963), Horváthovou (1964) a Horváthovou a Dávidom (1969). Komplexne bola teplota vody Československých tokov do roku 1960 vyhodnotená Čermákom (1965) a Čermákom a kol. (1967). V roku 1989 Dulovič spracoval dlhodobé charakteristiky teploty vody slovenských tokov z pravidelných meraní teploty vody vo vodomerných staniciach do roku 1980. Teplotu vody v tokoch čoraz viac ovplyvňuje i činnosť človeka v povodí – výstavba vodných nádrží, výstavba tepelných a jadrových elektrární alebo odvádzanie kanalizačných vôd do tokov (Stančíková a Capeková,

1993; Pekárová 2007). V posledných rokoch sa vývojom teploty vody v slovenských tokoch zaoberali a Lešková a Škoda (2003). Denné rady teploty vody v Dunaji v Bratislave spracovali Lisický a Mucha (2003). Autori vo svojej práci konštatujú, že teplota vody je – okrem prietokov Dunaja – ďalším z ekologických faktorov, vplývajúcich na rozhodovanie o simulovaní umelých záplav a tiež že teplota vody závisí od sezóny záplav (jarné a letné záplavy) a má priamy vzťah k neresu rýb. Tepelný tok vody Dunaja bratislavským profilom zhodnotili Pekárová a Halmová (2007) a Pekárová a kol. (2007).

V posledných desaťročiach sa dostáva do popredia otázka zvyšovania sa teploty vzduchu v dôsledku zosilňovania skleníkového efektu atmosféry, ako aj otázky vplyvu fenoménov NAO (Severoatlantická oscilácia) a AO (Arktická oscilácia) na kolísanie teplôt. Vplyv Severoatlantickej oscilácie (NAO) na viacročnú variabilitu teploty vody v Dunaji študovali Webb a Nobilis (2007).

Očakávané zvyšovanie sa teploty vzduchu (Lapin a Melo, 2006) bude mať odraz i vo zvyšovaní sa teploty vody v tokoch (Bonacci, 2008). Keďže voda má rádovo vyššiu tepelnú kapacitu ako vzduch, zvýšenie teploty vody v toku by mohlo byť výrazným signálom otepľovania sa povodia. Nakoľko na Slovensku máme k dispozícii kontinuálne merania teploty vody na Dunaji v tejto stanici už od roku 1926, rozhodli sme sa prehodnotiť dlhodobý teplotný režim Dunaja v stanici Bratislava za 80-ročné obdobie 1926–2005 a zostaviť multiregresný model, pomocou ktorého by sme mohli simulovať vplyv zvýšenia teploty vzduchu na zvýšenie teploty vody v toku. Regresné modely na nepriamy výpočet teploty vody z teploty vzduchu použili napr. Morrill a kol. (2001, 2005).

Ciele štúdie sú nasledovné:

1. Zhodnotenie hodinových, denných a mesačných meraní teploty vody rieky Dunaj v stanici Bratislava;
2. Analýza závislosti teploty vody od ovplyvňujúcich činiteľov;
3. Simulácia rastu teploty vody v závislosti od rastu teploty atmosféry.

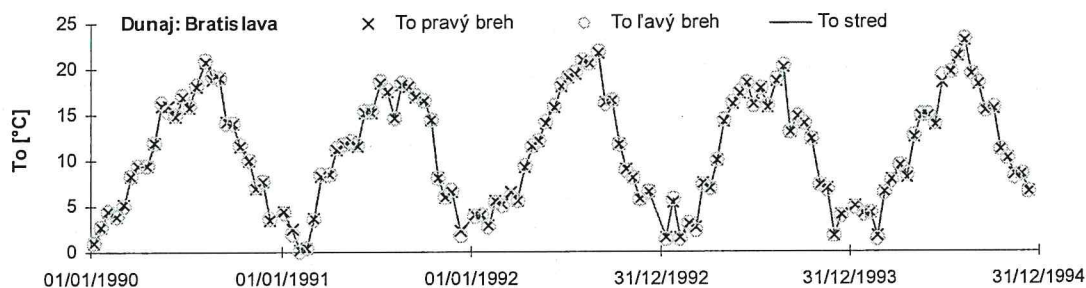
## POUŽITÉ ÚDAJE

Pri analýze teplotného režimu Dunaja sme použili rad teploty vody Dunaja meranej o 7.00 h. ráno vo vodomernej stanici Bratislava. Tento rad sa vo všeobecnosti považuje za rad denných hodnôt teploty vody. Teplota vody v Bratislave sa kontinuálne pozoruje už od roku 1925. Meranie teploty vody bolo do roku 1993 vykonávané 1x denne medzi 7.00 - 8.00 hod. Nádoba na meranie teploty vody s teplomerom bola ponorená do prúdiacej vody čo najďalej od brehu na asi 2 minúty a teplota bola odčítaná s presnosťou na desatinu °C. Merania teploty vody v Bratislave po prvýkrát zhodnotili a výpadky v meraní za niektoré mesiace za obdobie 1926–1950 doplnili Dmitrijeva a Pacl (1952). (Pozn. Rady teploty vody budeme v celom texte označovať ako *To* (teplota odtoku), rady teploty vzduchu budeme označovať ako *Ta* (teplota atmosféry)).

Od 1.11.1992 je v prevádzke automatická stanica a teplota vody je zaznamenávaná v polhodinových intervaloch teplotným snímačom, pripevneným pri dne toku v mieste vodomernej stanice v Bratislave, na ľavom brehu Dunaja. Reprezentatívnosť meraní z jedného bodu na ľavom brehu Dunaja sme preverili použitím meraní teploty vody Dunaja v profile Bratislava na ľavom brehu, v strede toku a na pravom brehu (za obdobie 5 - tich rokov 1990 – 1994 - 120 meraní), ktoré sa vykonávajú pri odberoch vzoriek vody na analýzu kvality vody Dunaja (obr. 1). Priemerná nameraná teplota v danom období bola na ľavom brehu 11,22 °C; v strede 11,20 °C a na pravom brehu 11,20 °C, čo je nepodstatný rozdiel. Voda v toku Dunaja je vzhľadom na teplotu vody premiešaná a odber vzoriek vody z jedného brehu dostatočne reprezentuje teplotu vody v celom priečnom profile toku.

V tejto práci sme pri niektorých analýzach použili aj merania teploty vody Dunaja zo staníc Devín, Medveďov, Komárno a Štúrovo.



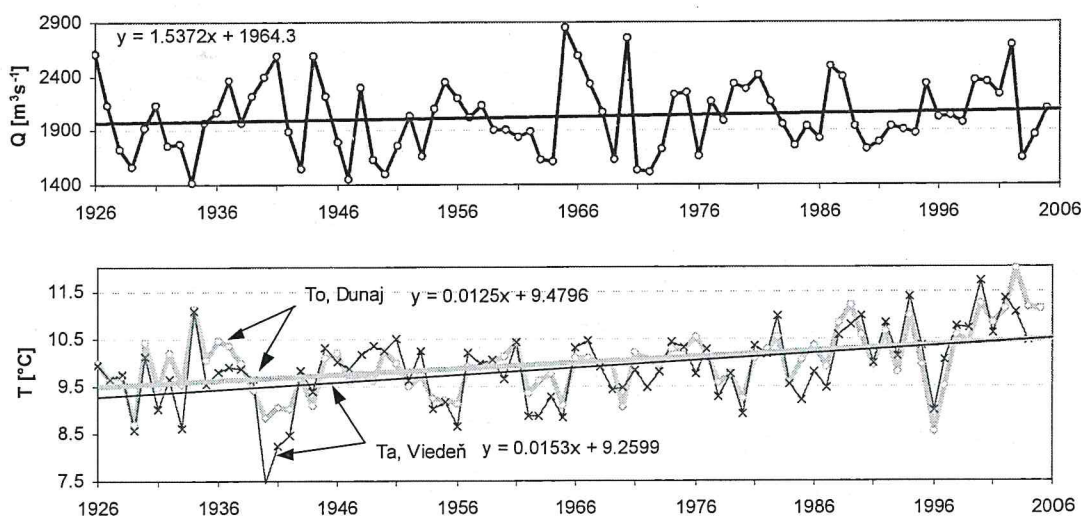


Obr. 1 Teplota vody Dunaja  $T_o$  meraná na pravom brehu, v strede a na ľavom brehu (1990–1994). Databáza kvality vody.

Fig. 1 Water temperature  $T_o$  in the Danube River – measured at the right bank, in the middle, and at the left bank; (1990–1994). Water quality database.

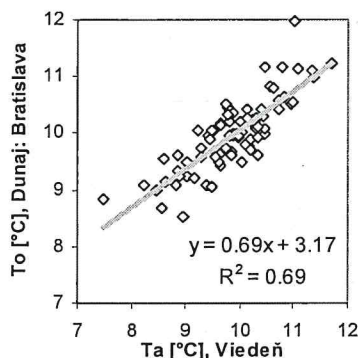
Pri hodnotení hydrologického režimu Dunaja sme použili priemerné denné prietoky vyhodnocované vo vodomernej stanici Bratislava za obdobie 1926–2005. Z výsledkov analýz denných prietokov vyplýva, že dlhodobý priemer ročných prietokov Dunaja v stanici Bratislava sa nemení (obr. 2), v posledných rokoch sa zmenil ročný chod prietokov – oteká viac vody v zimnom období a menej v letných mesiacoch (Pekárová a kol., 2007a; Pekárová a Pekár, 2007).

Pri výbere klimatickej stanice sme analyzovali homogenitu meraní teploty vzduchu z viacerých staníc (napr. Bratislava: letisko, Hurbanovo, Praha: Klementinum, Budapešť, Viedeň). Vzhľadom na to, že Dunaj preteká Viedňou (a vzhľadom na najvyššiu koreláciu medzi teplotou vody a teplotou vzduchu, pozri obr. 3 a korelačnú maticu) sme ako najvhodnejšiu stanicu s homogénnym radom pozorovaní vybrali stanicu Viedeň, Hohe-Warte. Merania teploty vzduchu (mesačné priemery) zo stanice Viedeň sú k dispozícii už od roku 1875.



Obr. 2 Pribeh priemerných ročných prietokov Dunaja v stanici Bratislava (hore) a priemerných ročných hodnôt teploty vzduchu v stanici Viedeň, Hohe-Warte ( $T_a$ ) a teploty vody ( $T_o$ ) Dunaja v Bratislave (dole) a lineárny trend za obdobie 1926–2005

Fig. 2 Time course annual discharge in the Danube at Bratislava and course of average annual air temperature at Vienna, Hohe-Warte ( $T_a$ ), and temperature of water in the Danube River at Bratislava ( $T_o$ ), a linear trend for the period 1926–2005



Kros-korelačná matica medzi ročnými teplotami vody v Dunaji  $T_o$  a ročnými teplotami vzduchu  $T_a$  v rôznych staniách

| 1931-2005                  | 1.   | 2.   | 3.   | 4.   | 5.   | 6.   | 7.   |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1. $T_o$ , Dunaj           | 1.00 |      |      |      |      |      |      |
| 2. $T_a$ , Bratislava-let. | 0.81 | 1.00 |      |      |      |      |      |
| 3. $T_a$ , Viedeň          | 0.82 | 0.95 | 1.00 |      |      |      |      |
| 4. $T_a$ Hurbanovo         | 0.78 | 0.94 | 0.95 | 1.00 |      |      |      |
| 5. $T_a$ Budapešť          | 0.74 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 1.00 |      |      |
| 6. $T_a$ Praha             | 0.81 | 0.93 | 0.97 | 0.94 | 0.92 | 1.00 |      |
| 7. $T_a$ L. Hrádok         | 0.73 | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 0.94 | 0.92 | 1.00 |

Obr. 3 Závislosť priemernej ročnej teploty vody  $T_o$  v stanici Bratislava na teplote vzduchu a  $T_a$  vo Viedni (vľavo), 1931 – 2005

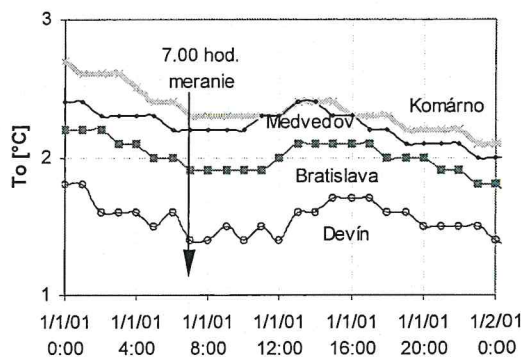
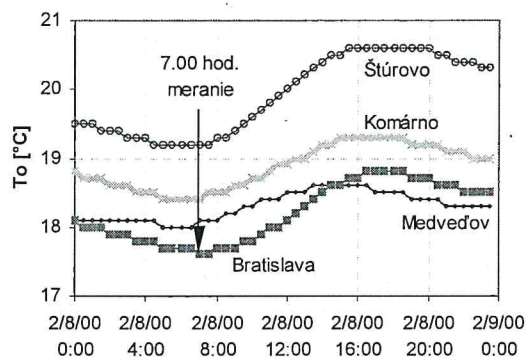
Fig.3 Relation between the average annual temperature of water  $T_o$  at Bratislava station and air temperature  $T_a$  at Vienna (left), 1931 – 2005

## 1. ZHODNOTENIE HODINOVÝCH, DENNÝCH A MESAČNÝCH MERANÍ TEPLoty VODY RIEKY DUNAJ

Od roku 1993 sú k dispozícii merania teploty vody Dunaja v polhodinovom, resp. hodinovom intervale v staniách Devín, Bratislava, Medveďov, Komárno a Štúrovo. Preto je možné zhodnotiť denný vývoj teploty vody pozdĺž slovenského úseku Dunaja.

### 1.1. Zmeny teploty vody pozdĺž slovenského úseku Dunaja a využitie satelitných snímok

Na obr. 4a je vykreslený priebeh teploty vody Dunaja v štyroch staniách dňa 2. augusta 2000 v 30-minútových intervaloch. Priemerná denná teplota v Bratislave bola 18,0 °C, v Medveďove 18,2 °C. Priemerná denná teplota vody v Komárne sa v dôsledku vyššej teploty vzduchu v Podunajskej nížine zvýšila na 18,89 °C a v Štúrove na 19,92 °C. V stanici Medveďov sú denné výkyvy teploty vody vyrovnávané Hrušovskou zdržou. V úseku Medveďov – Štúrovo sa teplota vody Dunaja opäť prispôbuje prirodzenému režimu v toku a vplyv Hrušovskej zdrže vymizne. Rozdiel medzi minimálnou a maximálnou dennou teplotou vody v Bratislave 2.8.2000 bol 1,2 °C, v Medveďove 0,6 °C, v Komárne 0,9 °C a v Štúrove až 1,4 °C. Teplota vody v stanici Bratislava je mierne vyššia ako v stanici Devín, pravdepodobne v dôsledku mestského tepelného ostrova a zaústenia odpadových vôd do toku Dunaja (obr. 4b).

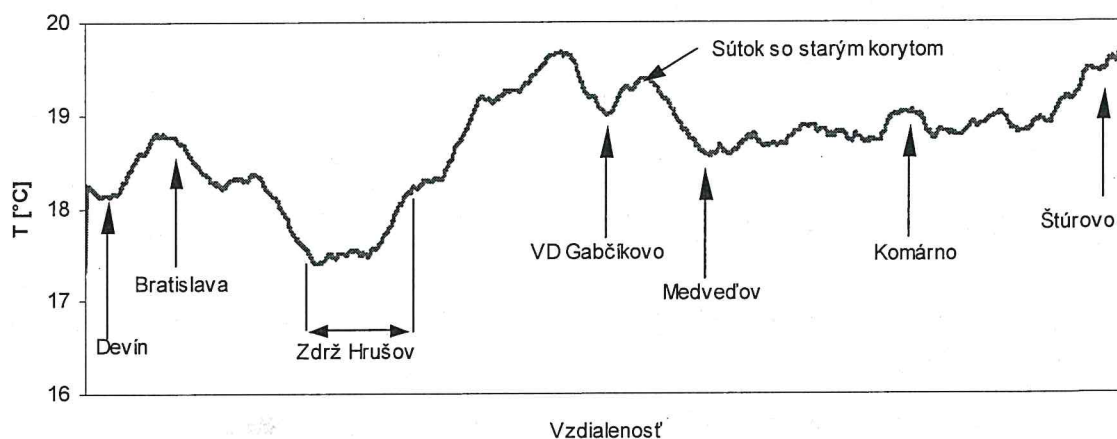


Obr. 4 Priebeh hodinových a 30-minutových hodnôt teploty vody v staniách na Dunaji.

Fig. 4 Time course of hourly and 30-minute temperature readings as measured at gage stations along the Danube.



Zmeny teploty povrchovej vrstvy vody pozdĺž toku Dunaja je možné vyhodnotiť pomocou satelitných snímok z diaľkového prieskumu Zeme. Na obr. 5 je spracovaná snímka zo satelitu Landsat 7 TM zo dňa 2.8.2000, čas 11.30. (autor grafu M. Onderka). Snímka bola spracovaná v programe Idrisi32. Korekcia na atmosferické efekty bola vykonaná použitím algoritmu „Radiative Transfer Equation - RTE“. Vstupné parametre potrebné na spustenie RTE sa brali do úvahy pre tri klimatické stanice: Bratislava – letisko, Gabčíkovo a Komárno. Obr. 5 reprezentuje hodnoty teploty vody v strede toku, z Hrušovskej zdrže sú vyznačené len hodnoty zo stredu nádrže (staré koryto Dunaja nie je na tomto obrázku zobrazené). Na obrázku je možné vizuálne posúdiť aj vplyv miest Bratislava a Komárno na zvýšenie teploty povrchovej vrstvy vody Dunaja.



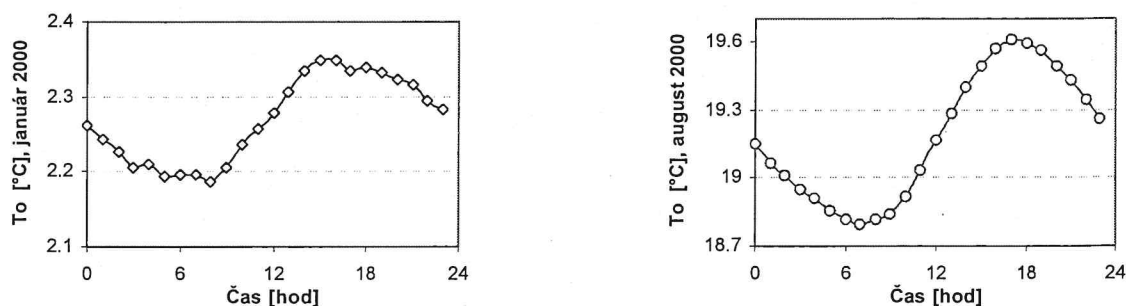
**Obr. 5** Zmeny teploty povrchovej vrstvy vody po dĺžke toku Dunaja od Devína po Štúrovo zo dňa 2.8.2000, o 11,00 hod. Spracované podľa satelitnej snímky zo satelitu Landsat 7 TM

**Fig. 5** Changes in surface water temperature along the Danube River from Devín downstream to Štúrovo on August 2, 2000, 11:00 AM. Data retrieved from Landsat 7 TM

## 1.2. Hodinové zmeny teploty vody v stanici Bratislava v priebehu dňa

Hodinový chod teploty vody v priebehu dňa sme analyzovali na údajoch zo stanice Bratislava z roku 2000. V zimných mesiacoch teplota vody v priebehu dňa má menšiu amplitúdu v porovnaní s letnými mesiacmi. V januári 2000 bol rozdiel medzi maximálnou a minimálnou dennou teplotou vody iba 0,16 °C, v auguste 2000 bol rozdiel 0,81 °C (pozri obr. 6). Minimálna teplota vody bola v januári nameraná o 8.00 h., maximálna denná teplota bola nameraná o 16.00 h. V auguste 2000 bola minimálna teplota nameraná o 7.00 hod., maximálna o 17.00 hod. Dôvodom denných výkyvov je slnečné žiarenie a denný chod teploty vzduchu.

V letných mesiacoch priemerná denná teplota je približne o 0,3 °C vyššia a maximálna denná teplota je v priemere o 0,6 °C vyššia ako hodnota meraná o 7.00 hod. V zimných mesiacoch je priemerná denná teplota o 0,1 °C vyššia a maximálna denná teplota je v priemere o 0,2 °C vyššia ako hodnota meraná o 7.00 hod. Priemerná ročná teplota vody v roku 2000 vypočítaná z meraní o 7,00 hod. bola 11,25 °C, priemerná ročná teplota vody vypočítaná z hodinových údajov bola 11,43 °C, t.j. o 0,18 °C vyššia. **Teplotu meraní o 7.00 hod. môžeme považovať v prípade rieky Dunaj za minimálnu dennú teplotu vody**, v ďalšom texte pod pojmom denná teplota vody budeme označovať teplotu vody meraní o 7.00 hod. Dôvodom je fakt, že pred rokom 1993 máme merania iba o 7.00 hod.

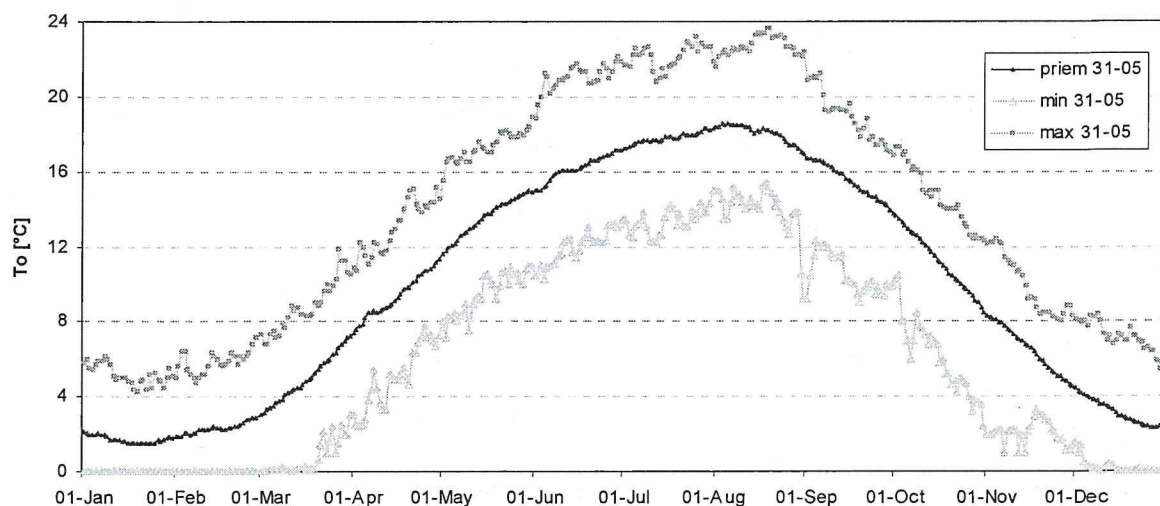


Obr. 6 Denný chod (hodinový krok) teploty vody, priemery za január a august 2000, Dunaj: Bratislava  
 Fig. 6 Diurnal course (hourly time step) of water temperature. Average values for January and August 2000, Danube – Bratislava

### 1.3. Vyhodnotenie denných hodnôt

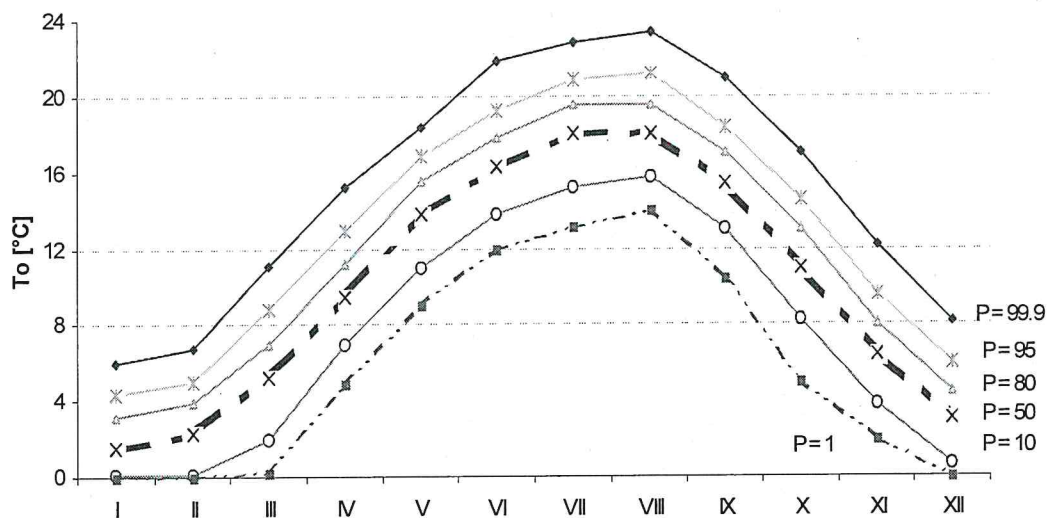
Pri vyhodnotení ročného chodu teploty vody sme použili 75-ročný rad denných meraní o 7.00 h. za obdobie 1931–2005. Priebeh priemernej, minimálnej a maximálnej teploty vody v jednotlivých dňoch roka je znázornený na obr. 7. Najvyššia teplota vody v stanici Bratislava bola nameraná 18. augusta 2003 – 23,6°C. Na obr. 8 sú vykreslené rôzne percentily teploty vody pre jednotlivé mesiace roka vypočítané z denných hodnôt. Tieto mesačné hodnoty by mali byť používané pri zatriedovaní vody Dunaja do jednotlivých tried kvality vody vzhľadom na teplotu vody.

Dlhodobé zmeny teploty vody sme identifikovali na dvoch 30-ročných obdobiach: 1931–1961 a 1975–2005. Základné štatistické charakteristiky vybraných dvoch období sú uvedené v tab. 1. Priemerná teplota vody vzrástla za sledované obdobia o 0,485 °C. Histogramy, hustoty rozdelenia a empirické čiary prekročenia denných hodnôt teploty vody pre dve 30-ročné obdobia: 1931–1961 a 1975–2005 sú vykreslené na obr. 8. Histogram má dva vrcholy – najčastejšie sú hodnoty teploty vody medzi 15 až 18 °C a potom medzi 2 až 4 °C. Štatistické charakteristiky sa v novom hodnotenom období (obr. 9b,d) mierne posunuli smerom k vyšším hodnotám (Lapin a Damborská, 2007). Extrémne hodnoty vzrástli výraznejšie – o 0,9 °C (99-ty percentil), čo má nepriaznivý vplyv na biologický režim Dunaja v letných mesiacoch.



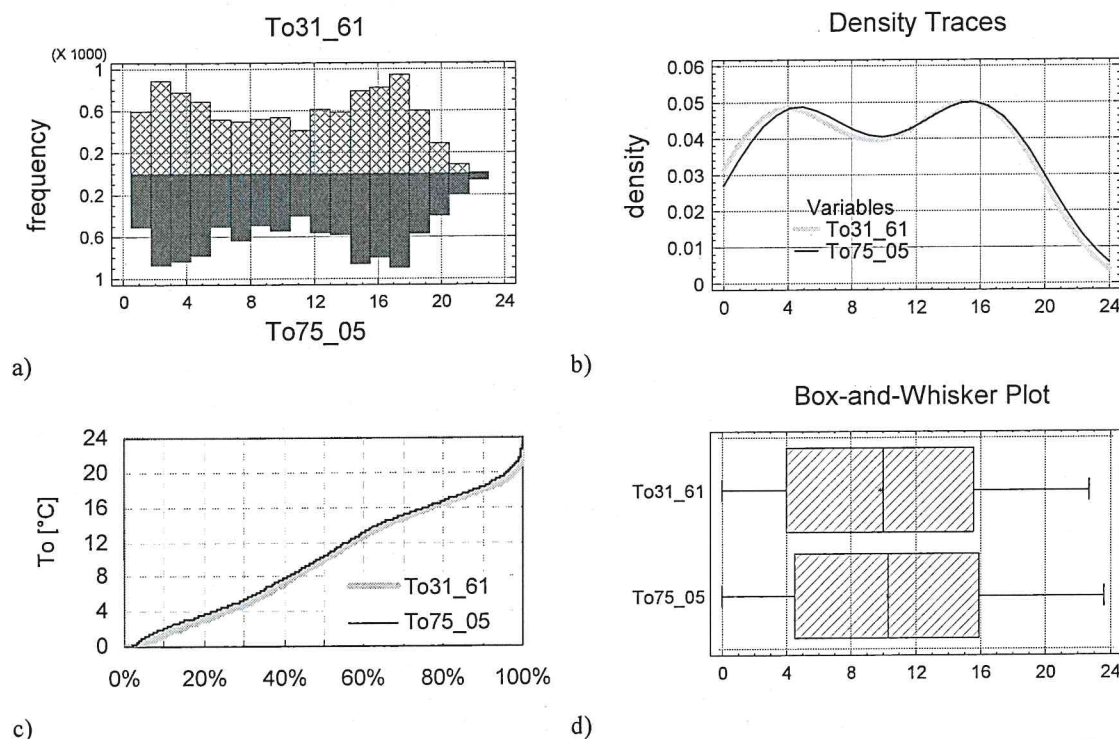
Obr. 7 Priebeh dlhodobého priemeru denných hodnôt teploty vody  $T_o$  (Dunaj-Bratislava) v období: 1931–2005 a priebeh minimálnych a maximálnych hodnôt  $T_o$  meraných v jednotlivých dňoch roka  
 Fig. 7 Long-term average of daily water temperature  $T_o$  (Danube-Bratislava) over the period: 1931–2005, and in course of minimum and maximum water temperature  $T_o$  recorded during the year





Obr. 8 Percentily denných hodnôt teploty vody  $T_o$  (Dunaj-Bratislava) pre jednotlivé mesiace, obdobie 1931 – 2005

Fig. 8 Percentiles of daily water temperature  $T_o$  (Danube-Bratislava) for individual months, period: 1931 – 2005



Obr. 9 a) Histogramy; b) hustota rozdelenia; c) empirické čiary prekročenia a d) zmeny štatistických charakteristík denných hodnôt teploty vody pre dve 30-ročné obdobia To31\_61 - 1931–1961 a To75\_05 - 1975–2005

Fig. 9 a) Histograms; b) distribution density; c) empirical curves of exceedance; d) changes in statistical characteristics of daily water temperature for two 30-year periods To31\_61 - 1931–1961 and To75\_05 - 1975–2005

**Tab. 1 Základné štatistické charakteristiky denných hodnôt teploty vody Dunaja v Bratislave za obdobie 1931–2005. Porovnanie dvoch období 1931–1961 a 1975–2005**

**Tab 1 Basic statistical characteristics of daily water temperatures in the Danube River at Bratislava over 1931–2005. Comparison of two periods: 1931–1961 and 1975–2005**

|                                          | 1931–2005 | 1931–1961 | 1975–2005 |
|------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Priemer / Average                        | 10,02     | 9,824     | 10,309    |
| Medián / Median                          | 10,1      | 10,0      | 10,3      |
| Štandardná odchýlka / Standard deviation | 6,23      | 6,25      | 6,22      |
| Minimum                                  | 0,0       | 0,0       | 0,0       |
| Maximum                                  | 23,6      | 22,7      | 23,6      |
| Dolný decil (10-ty percentil)            | 1,6       | 1,4       | 2,1       |
| Horný decil (90-ty percentil)            | 18,0      | 18,0      | 18,3      |
| 99-ty percentil                          | 21,0      | 20,5      | 21,4      |

#### 1.4. Analýza zmien priemernej mesačnej teploty vody

Zmeny rozdelenia teploty vody v stanici Dunaj: Bratislava v priebehu roku za posledných 75 rokov sme analyzovali na troch 25-ročných obdobiach: 1931–1955, 1956–1980 a 1981–2005. Priemerné mesačné hodnoty boli vypočítané z denných meraní o 7.00 h.

Ročné rozdelenie teploty vody pre hodnotené tri obdobia je znázornené na obr. 10a. V prvých dvoch obdobiach 1931–1955 a 1956–1980 sa dlhodobé mesačné priemery teploty vody výraznejšie nezmenili, v období 1981–2005 sa zvýšila teplota vody v mesiacoch júl až december.

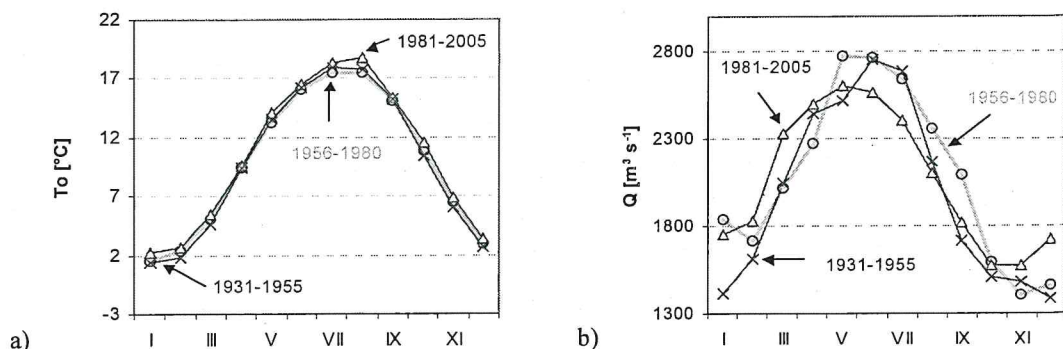
V ročnom rozdelení odtoku za posledných 25 rokov došlo k oveľa výraznejším zmenám ako je tomu v prípade teploty vody. V Dunaji sa v posledných rokoch zvýšili prietoky v zimnom období a znížili sa prietoky v letných mesiacoch (obr. 10b). Priemerné mesačné prietoky a teplota vody v stanici Dunaj-Bratislava za tri 25-ročné obdobia: 1931–1955, 1956–1980 a 1981–2005 sú uvedené v tab. 2. Pri hodnotení dlhodobých trendov teploty vody by sme mali používať rad vážených hodnôt vzhľadom na prietoky (Pekárová a Halmová, 2007; Pekárová a kol. 2007).

**Tab. 2 Priemerné mesačné prietoky  $Q$ , teploty vody  $T_o$  (Dunaj-Bratislava) a teploty vzduchu vo Viedni**

**Tab. 2 Average monthly discharge  $Q$ , water temperature  $T_o$  (Danube-Bratislava) and air temperature at Vienna**

| Q Dunaj             |      | [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ročný   | letný    | zimný   |
|---------------------|------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|----------|---------|
|                     | 1    | 2                                  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | priemer | IV-IX    | X-III   |
| 1906-1930           | 1747 | 1523                               | 1889 | 2264 | 2945 | 2847 | 2816 | 2365 | 2105 | 1614 | 1446 | 1491 | 2091    | 2557     | 1619    |
| 1931-1955           | 1409 | 1614                               | 2049 | 2440 | 2518 | 2753 | 2685 | 2172 | 1719 | 1507 | 1476 | 1381 | 1977    | 2381     | 1573    |
| 1956-1980           | 1443 | 1768                               | 2002 | 2366 | 2727 | 2959 | 2754 | 2316 | 1717 | 1464 | 1411 | 1571 | 2042    | 2473     | 1610    |
| 1981-2005           | 1758 | 1827                               | 2333 | 2500 | 2605 | 2563 | 2402 | 2103 | 1819 | 1574 | 1572 | 1726 | 2065    | 2332     | 1798    |
| 1931-2005           | 1537 | 1736                               | 2128 | 2436 | 2617 | 2758 | 2614 | 2197 | 1752 | 1515 | 1487 | 1559 | 2028    | 2395     | 1660    |
| To Dunaj-Bratislava |      | [°C]                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ročný   | letný    | zimný   |
|                     | 1    | 2                                  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | priemer | apr-sept | okt-mar |
| 1931-1955           | 1,5  | 2,0                                | 4,9  | 9,9  | 13,5 | 16,1 | 17,7 | 17,7 | 15,3 | 10,1 | 5,9  | 3,0  | 9,8     | 15,0     | 4,6     |
| 1956-1980           | 1,5  | 2,4                                | 5,1  | 9,4  | 13,3 | 16,1 | 17,4 | 17,5 | 15,1 | 10,9 | 6,4  | 2,9  | 9,8     | 14,8     | 4,8     |
| 1981-2005           | 2,2  | 2,6                                | 5,5  | 9,6  | 14,1 | 16,5 | 18,3 | 18,7 | 15,4 | 11,6 | 6,9  | 3,3  | 10,4    | 15,5     | 5,3     |
| 1931-2005           | 1,7  | 2,3                                | 5,2  | 9,6  | 13,6 | 16,2 | 17,8 | 18,0 | 15,3 | 10,8 | 6,4  | 3,0  | 10,0    | 15,1     | 4,9     |
| Ta Viedeň           |      | [°C]                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ročný   | letný    | zimný   |
|                     | 1    | 2                                  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | priemer | apr-sept | okt-mar |
| 1931-1955           | -1,7 | 0,3                                | 4,4  | 10,0 | 14,5 | 17,9 | 19,7 | 19,0 | 15,5 | 9,6  | 4,7  | 0,7  | 9,5     | 16,1     | 3,0     |
| 1956-1980           | -1,0 | 1,1                                | 4,8  | 9,8  | 14,4 | 17,8 | 19,4 | 18,7 | 15,0 | 9,8  | 4,9  | 0,8  | 9,6     | 15,9     | 3,4     |
| 1981-2004           | 0,1  | 1,6                                | 5,7  | 10,4 | 15,6 | 18,5 | 20,6 | 20,3 | 15,4 | 10,3 | 4,8  | 1,0  | 10,4    | 16,8     | 3,9     |
| 1931-2005           | -0,9 | 1,0                                | 5,0  | 10,1 | 14,8 | 18,1 | 19,9 | 19,4 | 15,3 | 9,9  | 4,8  | 0,8  | 9,8     | 16,3     | 3,4     |





Obr. 10 Zmeny rozdelenia: a) teploty vody  $T_o$  a b) odtoku  $Q$ ; rieky Dunaj v stanici Bratislava za posledných 75 rokov v priebehu troch 25-ročných období: 1931–1955, 1956–1980 a 1981–2005

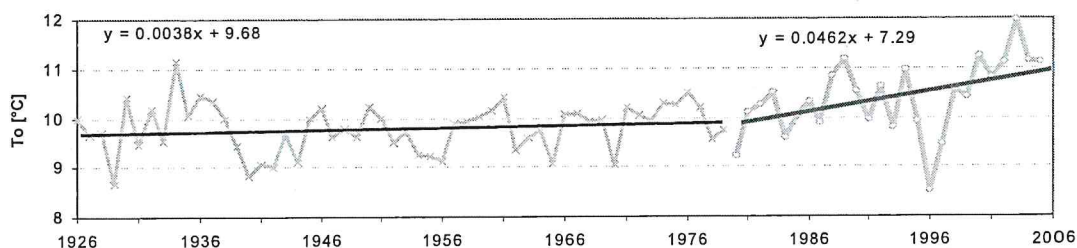
Fig. 10 Changes in distribution of: a) water temperature  $T_o$  and b) discharge  $Q$ ; of the Danube River at Bratislava over the past 75 years for three 25-year periods: 1931–1955, 1956–1980 a 1981–2005

### 1.5. Analýza dlhodobých trendov

Teplota vody (rad priemerných ročných hodnôt  $T_o$ ) Dunaja v období 1980–2005 stúpala. Rast teploty vody je miernejší než rast teploty vzduchu vo Viedni (pozri obr. 2). Teplota vody sa za 80-ročné obdobie zvýšila o 0,6 °C, teplota vzduchu vo Viedni sa zvýšila o 0,8 °C.

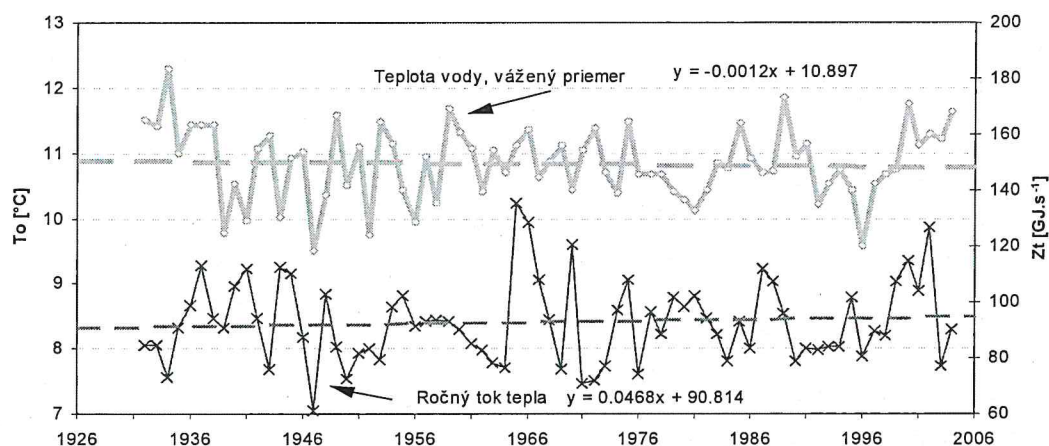
Do roku 1980 bol rast teploty vody minimálny. K zlomu trendu došlo okolo roku 1980. Na obr. 11 je graficky znázornený dlhodobý vývoj priemernej ročnej teploty vody  $T_o$  v Dunaji: Bratislava do roku 1980 a po roku 1980. Dlhodobá priemerná ročná teplota vody (aritmetický priemer hodnôt meraných o 7.00 h.) Dunaja v stanici Bratislava (1926–2005) je 10,0 °C. Najvyššia priemerná teplota vody za celé obdobie meraní bola vypočítaná v roku 2003 (12,0 °C), najnižšia v roku 1996 (8,55 °C).

Z priemerných denných prietokov a denných priemerov teploty vody sme vypočítali priemernú ročnú teplotu vody váženú vzhľadom na prietok ( $T_{ov}$ ). Takto vytvorený rad pre obdobie 1931–2005 je vykreslený na obr. 12. Dlhodobý trend tohto radu je nulový, vážené priemerné teploty vody sa nemenia. Je to pozoruhodný výsledok, nakoľko indikuje, že priemerné zaťaženie vody teplom sa počas 75-ročného obdobia nezmenilo, mení sa ročné rozdelenie mesačných prietokov Dunaja v stanici Bratislava. V posledných 25-tich rokoch odtekalo viac studenej vody (zvýšili sa priemerné mesačné prietoky Dunaja v decembri až apríli, pravdepodobne v dôsledku vyšších zrážkových úhrnov) a odtekalo menej teplejšej vody (znížili sa prietoky v letných mesiacoch jún, júl a august). Na tento fakt upozorňujú i Webb a Nobilis, (2007). Dlhodobá vážená priemerná ročná teplota vody (vzhľadom na denné prietoky) bola 10,8 °C. Najvyššia vážená priemerná ročná teplota vody za celé obdobie meraní bola v roku 1934 (12,3 °C), najnižšia v suchom roku 1947 (9,5 °C), druhá najnižšia priemerná vážená teplota vody bola v roku 1996 (9,57 °C). Najvyššie ročné teplotné znečistenie vody Dunaja v Bratislave bolo vo veľmi vodnom roku 1965, najnižšie vo veľmi suchom roku 1947.



Obr. 11 Dlhodobý vývoj priemernej ročnej teploty vody  $T_o$  (Dunaj-Bratislava) za obdobie 1926–2005

Fig. 11 Long-term evolution of average annual water temperature  $T_o$  (Danube - Bratislava) over 1926–2005



Obr. 12 Dlhodobý vývoj váženej priemernej ročnej teploty vody  $T_{ov}$  v stanici Dunaj-Bratislava, tepelný tok  $Z_t$

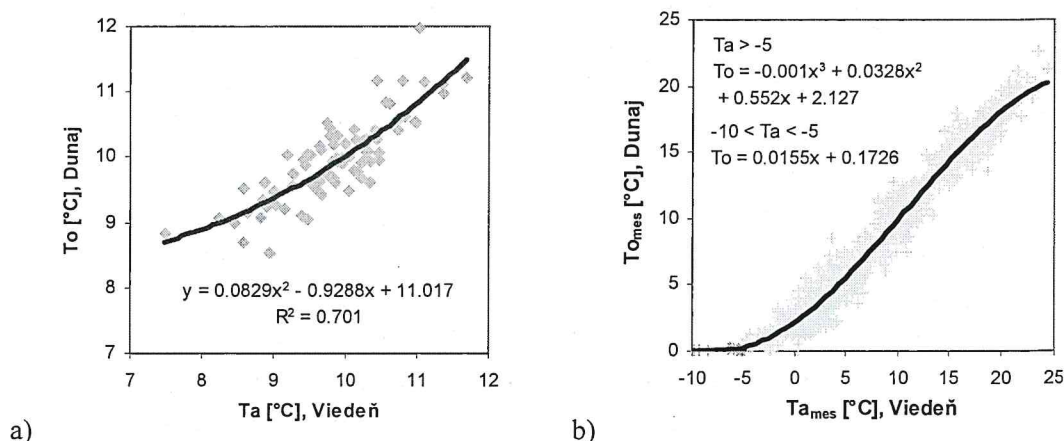
Fig. 12 Long-term evolution of weighted average annual water temperature  $T_{ov}$  at Bratislava, heat load  $Z_t$

## 2. ANALÝZA ZÁVISLOSTI TEPLoty VODY NA OVPLYVNÚJÚCICH ČINITEĽOCH

### 2.1. Závislosť teploty vody od teploty vzduchu

Priemerná ročná teplota vody má najvyššiu závislosť od teploty vzduchu. Teplota vody v toku sa vyrovnáva s teplotou prostredia, ktorým preteká. Závislosť teploty vody  $T_o$  v stanici Dunaj-Bratislava od teploty vzduchu vo Viedni  $T_a$ , bola vyhodnotená na radoch ročných i radoch mesačných údajov (aritmetický priemer denných hodnôt). Koeficient  $R^2$  ročných hodnôt pri použití kvadratického vzťahu dosahuje hodnotu 0,7 čo dokazuje vysoký vplyv teploty vzduchu na teplotu vody (obr. 13a). Na obr. 13b je vykreslená závislosť konkrétnych mesačných hodnôt  $T_o$  od  $T_a$ . Závislosť teploty vody od teploty vzduchu sme aproximovali polynómom 3. stupňa. Koeficient  $R^2$  dosiahol hodnotu 0,97.

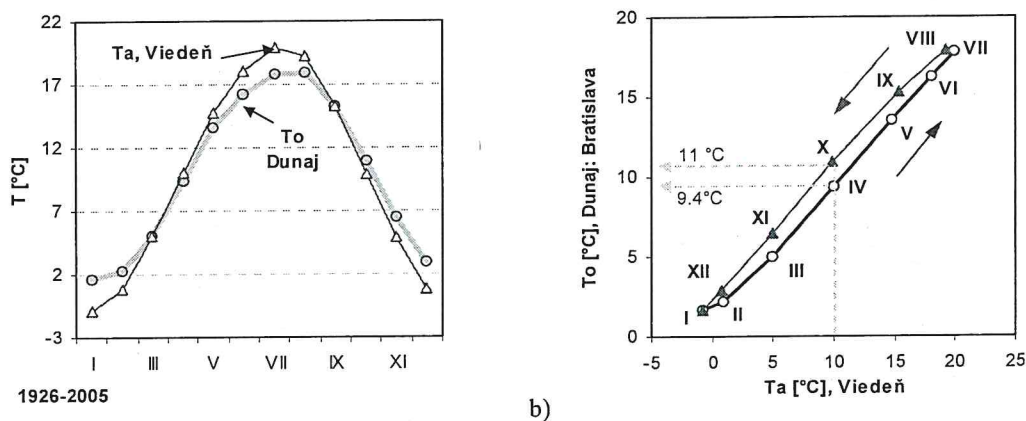
V ročnom priebehu môžeme na obr. 14a pozorovať zaostávanie mesačných hodnôt teploty vody za mesačnou teplotou vzduchu. Obr. 14b znázorňuje hysteréznú krivku medzi mesačnou teplotou vody a vzduchu. Pri raste teploty vzduchu v prvom polroku roka je teplota vody o asi 1,6 °C nižšia, ako pri poklese teploty v druhej polovici roka. Dlhodobá najvyššia priemerná teplota vzduchu bola meraná v júli (19,9 °C), dlhodobá najvyššia priemerná teplota vody v auguste (18,0 °C).



Obr. 13 Závislosť priemernej teploty vody  $T_o$  v stanici Dunaj: Bratislava a priemernej teploty vzduchu  $T_a$  vo Viedni  $T_a$  a) ročné hodnoty; b) mesačné hodnoty



Fig. 13 Relationship between average water temperature  $T_o$  at Bratislava and average air temperature  $T_a$  at Vienna  $T_a$  a) annual values, b) monthly values



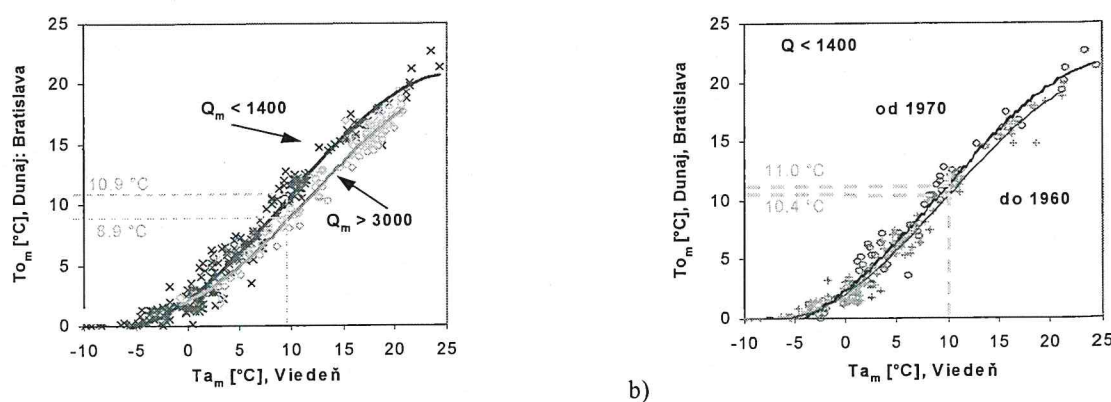
Obr. 14 a) Dlhodobé mesačné teploty vody  $T_o$  a vzduchu  $T_a$ , obdobie 1926–2005. b) Závislosť teploty vody na teplote vzduchu ( $T_o$ ,  $T_a$ ) a dlhodobé mesačné priemery, hysterézná slučka.

Fig. 14 a) Long-term monthly water temperatures  $T_o$  and air temperatures  $T_a$ , period 1926–2005. b) Relationship between water temperature and air temperature ( $T_o$ ,  $T_a$ ) in terms of long-term monthly averages, hysteresis loop.

## 2.2. Identifikácia vplyvu prietokov a antropogénnej činnosti na teplotu vody

Pri identifikovaní vplyvu človeka na teplotu vody Dunaja je potrebné najskôr odseparovať vplyv prietokov na teplotu vody. Pri vysokých mesačných prietokoch (a pri kladných teplotách vzduchu) je mesačná teplota vody nižšia ako pri nízkych prietokoch (obr. 15a). Rozdiel pri 10  $^{\circ}\text{C}$  teploty vzduchu vo Viedni je okolo 2  $^{\circ}\text{C}$ . Vplyv zvýšenia teploty vody Dunaja vplyvom činnosti človeka sme sa pokúsili identifikovať len pre nízke prietoky (pod 1400  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Pri nízkych prietokoch a pri vysokých teplotách by mal byť vplyv ohrevu vody v toku najmarkantnejší a preto ľahšie identifikovateľný. Na obr. 15b je znázornená závislosť medzi teplotou vody a vzduchu pri mesačných prietokoch nižších ako 1400  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  za dve obdobia: pred rokom 1960 a po roku 1970.



Obr. 15 a) Vplyv veľkosti mesačných prietokov Dunaja  $Q_m$  na teplotu vody v toku  $T_o$ ; b) Vplyv činnosti človeka v povodí na zvýšenie teploty vody Dunaja v Bratislave pri nízkych mesačných prietokoch (pod 1400  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 15 a) Effect of the magnitude of monthly discharge of the Danube River  $Q_m$  on water temperature  $T_o$ ; b) Effects of anthropogenic activity within the river basin on water temperature in the Danube River at Bratislava for low monthly discharge (below 1400  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

Pri teplote vzduchu vo Viedni 10 °C je teplota vody približne o 0,6 °C vyššia. Tento rast by sme mohli pripísať činnosti človeka v povodí Dunaja nad Bratislavou (nádrže, odpadové vody). Tento výsledok však nepovažujeme za jasne preukázaný.

### 3. SIMULÁCIA RASTU TEPLoty VODY V ZÁVISLOSTI NA RASTE TEPLoty VZDUCHU

Za účelom simulácie priemerných mesačných teplôt vody v stanici Bratislava sme viacnásobnou regresiou odvodili empirické vzťahy pre nepriamy výpočet teploty vody na základe meraných mesačných teplôt vzduchu v stanici Viedeň a prietokov v stanici Bratislava. Odvozené vzťahy majú tvar:

$$T_o = 0.5504 T_a + 0.03407 T_a^2 - 0.001050 T_a^3 - 0.000307 Q + 0.988 sez + 1.23; \quad \text{pre } T_a > -5 \text{ °C} \quad (1)$$

$$T_o = 0.0155 T_a + 0.17; \quad \text{pre } -10 \text{ °C} < T_a < -5 \text{ °C}, \quad (2)$$

kde:

- $T_o$  - priemerné mesačné teploty vody v stanici Bratislava [°C],
- $T_a$  - priemerné mesačné teploty vzduchu v stanici Viedeň [°C],
- $Q$  - priemerné mesačné prietoky Dunaja v stanici Bratislava [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],
- $sez$  - parameter vyjadrujúci sezónu (pre mesiace I-VII,  $sez=1$ , pre VIII-XII,  $sez=2$ ).

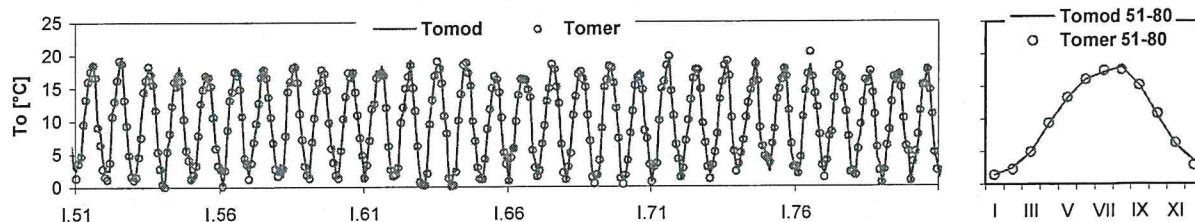
Priebeh modelovaných a meraných priemerných teplôt vody za obdobie 1951–1980 je vykreslený na obr. 16. Štatistická analýza meraných a modelovaných hodnôt potvrdzuje veľmi dobrú zhodu. Preto môžeme vzťahy (1,2) použiť na simuláciu mesačných hodnôt teploty vody. Na základe klimatických scenárov zmien teploty atmosféry pre jednotlivé mesiace a na základe scenárov zmien mesačných prietokov Dunaja v stanici Bratislava (pre horizont 2075), určíme scenárové zmeny teploty vody v Dunaji.

#### 3.1. Teplotné a prietokové scenáre pre časový horizont 2075

Klimatické scenáre zmien mesačných teplôt vzduchu pre územie Slovenska pre časový horizont 2075 v porovnaní s obdobím 1951–1980 sme prevzali z práce Lapin a kol. (2007). V tabuľke 3 sú uvedené scenárové prírastky teplôt vzduchu podľa jednotlivých scenárov v °C. Tieto scenáre boli spracované pre územie Slovenska, môžeme si dovoliť aplikovať ich bez zmien pre stanicu Viedeň.

Získanie scenárov zmien mesačných prietokov pre vodomernú stanicu Bratislava je podstatne zložitejšie. Študovali sme výsledky viacerých globálnych i regionálnych modelov odtoku za posledných 6 rokov (napr. Nijssen a kol., 2000 – VIC model; Arnell, 2003 – Macro-scale model; Lehner a kol. 2006 – Water GAP; Nohara, 2006 – GRiveT model, Dankers a kol. 2007 – LISFLOOD model), založených na celom rade globálnych alebo aj regionálnych klimatických modelov. Samotní autori jednotlivých modelov vo všeobecnosti konštatujú, že odtok v povodí Dunaja bol doteraz globálnymi modelmi simulovaný s veľkými chybami. Preto sme vytvorili dva scenáre percentuálnych zmien mesačných prietokov Dunaja. Prvý - Qscen I. - na základe prác Arnella (2003) a Noharu (2006), podľa ktorého dôjde k výraznému ročnému poklesu prietokov o ca o 20 % (obr. 17a). Druhý - Qscen II. s teplotným scenárom H12A2 - podľa práce Dankersa a kol. (2007), kde nedochádza k zmene ročného prietoku, ale dochádza k výraznej zmene ročného chodu. Vytvorené scenáre zmien prietokov v % sú uvedené v tabuľke 3. Prietoky majú podstatne nižší vplyv na teplotu vody v toku s porovnaním s teplotou vzduchu. Napríklad, ročný pokles prietokov v Bratislave o 20% ( $400 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ ) spôsobí nárast teploty vody o cca 0,12 °C.





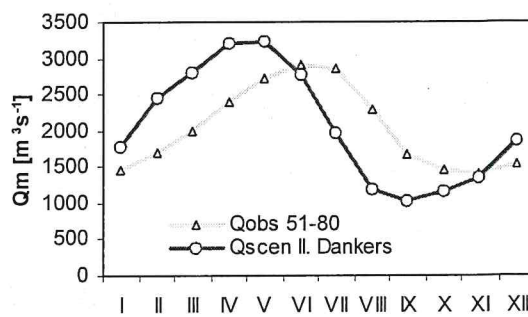
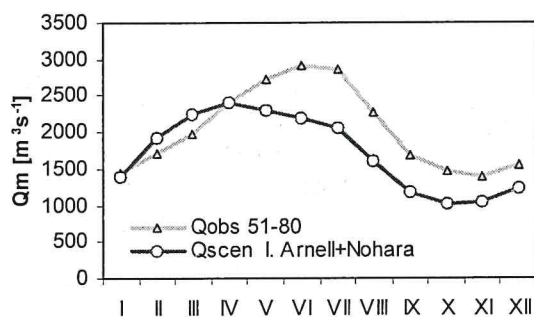
Obr. 16 a) Priebeh meraných a modelovaných mesačných hodnôt teploty vody v Dunaji v stanici Bratislava, obdobie 1951–1980.

Fig. 16 a) Measured and modeled monthly water temperature in the Danube River at the Bratislava station, period 1951–1980

Tab. 3 Scenárové prírastky teploty vzduchu podľa jednotlivých modelov (CCCM 1997, CCCM 2000, GISS 1998 a H12A2) v °C pre časový horizont 2075 a dva scenáre pre zmenu Q pre 2071–2100

Tab. 3 Projected air temperature increase (CCCM 1997, CCCM 2000, GISS 1998 and H12A2) in °C for 2075 and two scenarios for change in Q for 2071–2100

| Scenár          | I    | II   | III   | IV   | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI   | XII  | priem |
|-----------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
| To, mer 51-80   | 1.41 | 2.27 | 4.93  | 9.30 | 13.23 | 16.02 | 17.41 | 17.48 | 15.13 | 10.76 | 6.28 | 2.87 | 9.76  |
| Qmer 51-80      | 1449 | 1704 | 1984  | 2393 | 2717  | 2920  | 2853  | 2279  | 1675  | 1457  | 1403 | 1545 | 2031  |
| Tscen CCCM 1997 | 2.2  | 2.9  | 2.8   | 2.3  | 2.3   | 2.9   | 3.4   | 3.6   | 3.6   | 3     | 2    | 1.8  | 2.73  |
| Tscen CCCM 2000 | 3.5  | 4.2  | 4.8   | 3.8  | 3.2   | 2.7   | 3.5   | 3.4   | 3.3   | 3     | 2.2  | 2.6  | 3.35  |
| Tscen GISS 1998 | 2.7  | 2.4  | 2.3   | 2.2  | 1.9   | 1.8   | 2.1   | 2.4   | 2.3   | 2.3   | 2.6  | 2.8  | 2.32  |
| Qscen I. (%)    | -5   | +13  | +12.6 | 0    | -15   | -25   | -28   | -30   | -30   | -30   | -25  | -20  |       |
| Tscen H12A2     | 2.8  | 2.7  | 2.7   | 2.9  | 2.9   | 3.7   | 4.4   | 4.3   | 4.3   | 4.3   | 4.0  | 2.3  | 3.45  |
| Qscen II. (%)   | +23  | +44  | +41   | +34  | +19   | -5    | -31   | -48   | -39   | -21   | -3   | 20   |       |



Obr. 17 Scenáre mesačných prietokov Dunaja v Bratislave, časový horizont 2071–2100 podľa: a) hydrologických modelov Arnella a Noharu - pokles prietokov, Qscen I.; b) Dankersa - zmena ročného chodu, Qscen II

Fig. 17 Scenario changes in discharge of the Danube River, Bratislava, projected for 2071–2100 according to: a) Arnell and Nohara - decrease of discharge, Qscen I.; b) Dankers - changes in annual regime, Qscen II

### 3.2. Výsledky simulácií

Priemerné mesačné teploty vzduchu za obdobie 1951–1980 sme upravili podľa štyroch scenárov. Mesačné prietoky Dunaja sme upravili podľa scenárov I a II uvedených v tabuľke 3. Podľa vzťahov (1, 2) so scenárovými vstupmi sme simulovali mesačné teploty vody Dunaja pre časový horizont 2075. Výsledné dlhodobé simulované mesačné teploty vody sú uvedené v tabuľke 4.

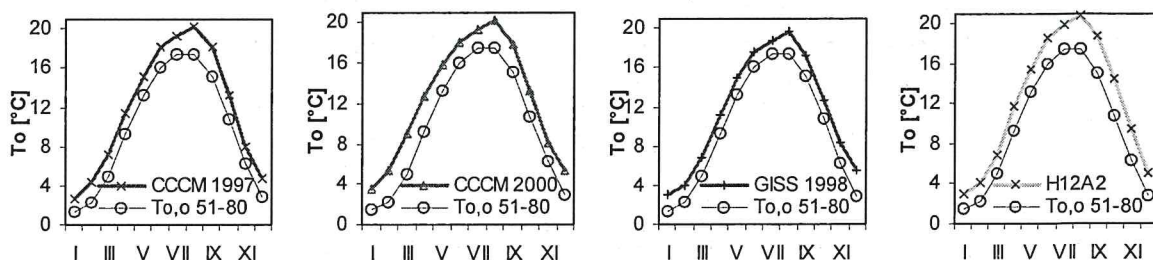
Priemerná ročná teplota vody Dunaja v stanici Bratislava v časovom horizonte 2075 podľa prietokového scenára I v kombinácii s tromi teplotnými scenármi vzrastie: podľa CCCM 1997 o 2,1 °C, podľa CCCM 2000 o 2,6 °C a podľa scenára GISS 1998 o 1,83 °C. Priemerné ročné vážené teploty vody (vzhľadom na

prietoky) stúpnu menej: podľa scenára CCCM 1997 o 1,36 °C, podľa scenára CCCM 2000 o 1,95 °C a podľa scenára GISS 1998 o 1,05 °C. Mesačné simulované (časový horizont 2075) a merané teploty (obdobie 1951–1980) vody sú vykreslené na obr. 18.

**Tab. 4 Simulované mesačné teploty vody Dunaja podľa jednotlivých scenárov v °C pre časový horizont 2075, aritmetický priemer (P) a vážený priemer vzhľadom na prietoky (VP)**

**Tab. 4 Simulated monthly water temperature according to selected scenarios in °C projected for 2075, annual arithmetic average and weighted average calculated against discharge**

| Scenár    | I    | II   | III  | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI   | XII  | P     | VP    |
|-----------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| CCCM 1997 | 2.69 | 4.37 | 7.17 | 11.28 | 15.18 | 18.25 | 19.38 | 20.29 | 18.15 | 13.30 | 7.90 | 4.76 | 11.89 | 12.23 |
| CCCM 2000 | 3.54 | 5.36 | 8.94 | 12.63 | 15.89 | 18.13 | 19.42 | 20.19 | 17.94 | 13.30 | 8.07 | 5.33 | 12.39 | 12.82 |
| GISS 1998 | 3.00 | 4.01 | 6.74 | 11.19 | 14.86 | 17.56 | 18.72 | 19.65 | 17.18 | 12.67 | 8.42 | 5.48 | 11.62 | 11.92 |
| H12A2     | 2.96 | 4.07 | 6.92 | 11.62 | 15.42 | 18.55 | 19.80 | 20.73 | 18.69 | 14.42 | 9.57 | 4.93 | 12.31 | 12.55 |



**Obr. 18 Mesačné simulované (časový horizont 2075) a merané teploty (obdobie 1951–1980) vody Dunaja v stanici Bratislava podľa štyroch scenárov**

**Fig. 18 Monthly simulated (projected for 2075) and observed water temperature (1951–1980) of Danube in Bratislava according to four scenario**

## ZÁVERY

V zmysle Rámcovej smernice o vode (Directive 2000/60/EC) je potrebné do roku 2015 zabezpečiť dobrý ekologický stav povrchových vôd. Teplota vody je jedným zo základných fyzikálno-chemických ukazovateľov, pre ktorý je potrebné stanoviť triedy kvality a urobiť opatrenia na dosiahnutie dobrého stavu vôd. Z výsledkov tejto práce vyplýva, že teplota vody v tokoch je závislá predovšetkým na teplote vzduchu. Pri očakávanom zvýšení teploty vzduchu musíme preto počítať so zvyšovaním sa teploty vody, a teda s následným zhoršovaním kvality vody v Dunaji. Podľa výsledkov simulácie priemerný ročný nárast teploty vzduchu o cca 2,7 °C v časovom horizonte roku 2075 spôsobí nárast teploty vody v Dunaji v stanici Bratislava v priemere o cca 2,0 °C. Aj keď je očakávaný nárast teploty vody miernejší, ako nárast teploty vzduchu, aj tak sú tieto hodnoty (predovšetkým v letných mesiacoch) alarmujúce.

V tejto štúdii sme uvažovali s dvoma scenármi zmien mesačných prietokov Dunaja pre stanicu Bratislava: I. podľa výsledkov Arnella (2003) a Noharu a kol. (2006), II. podľa Lehnara a kol. (2006) a Dankersa a kol. (2007). V ročnom priemere podľa scenára I možno očakávať pokles prietokov Dunaja v Bratislave v priemere o cca 300 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, z 2030 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> na 1710 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Podľa scenára II sa dlhodobé ročné prietoky nezmenia, dôjde k výraznej zmene v ročnom chode a extrémoch. Tieto scenáre boli vytvorené globálnymi modelmi odtoku v rozlíšení 1°x1°, resp. 12x12 km. Chyba v rozlíšení napr. územných zrážok v týchto modeloch je stále veľmi vysoká, v porovnaní s prácou Petrovič a kol. (2006).

V budúcich prácach by bolo potrebné použiť najnovšie výsledky scenárov vývoja teploty vzduchu, zrážok a prietokov riek, spracované pre jednotlivé slovenské toky v mierke povodí (Szolgay a kol., 2007).

**PodĎakovanie:** This study was supported by projects MVTs „Flood Regime of Rivers in the Danube River Basin“ and VEGA-0096/08. Satellite data provided by the European Space Agency.



## LITERATÚRA

- ARNELL, N., W., 1999: The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environ. Change*, 9, 5–23.
- ARNELL, N., W., 2003: Effects of IPCC SRES\* emissions scenarios on river runoff: a global perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(5), 619–641.
- BONACCI, O., TRNINIC, D., ROJE-BONACCI, T., 2008: Analyses of water temperature regime at Danube and its tributaries in Croatia. *Hydrolog. Process.* 22(7), 1014–1021.
- CAISSIE, D., 2006: The thermal regime of rivers: A review. *Freshwater Biology*, doi:10.1111/j.1365-2427.2006.01597.
- ČERMÁK, M., 1965: Teploty vody Československých toků. *Vodohosp. Čas.*, 13(3), 296–304.
- ČERMÁK, M., A KOL. 1967: Teploty vody Československých toků. *Hydrologické pomery ČSSR. II. Díl*, HMÚ, Praha.
- DANKERS, R., CHRISTENSEN, B., O., FEYEN, L., KALAS, M., DE ROO, A., 2007: Evaluation of very high-resolution climate model data for simulating flood hazards in the Upper Danube Basin. *J. of Hydrol.*, 347, 319–331.
- DIRECTIVE 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of the 23 October 2000, establishing a framework for Community action in the field of water policy.
- DMITRIJEVA, M., PACL, J., 1952: Príspevok k poznaniu vodného režimu Dunaja v Bratislave. *Zemepisný zborník SAV*, roč. IV, 1–2., 63–88.
- DULOVIČ, L., 1989: Dlhodobé charakteristiky teploty vody. *Zborník prác SHMÚ 29/I*, ALFA Bratislava, 381–413.
- HLAVČOVÁ, K., PARAJKA, J., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S., 2006: Grid-based and conceptual approaches to modelling impact of climate change on runoff. *Slovak Journal of Civil Engineering*, XIV, 2006, 1, 19–29.
- HORVÁTHOVÁ, B., 1964: Teplotný režim slovenských tokov. *Vodohosp. Čas.* 12(1), 5–15.
- HORVÁTHOVÁ, B., DÁVID, A., 1969: Ročný rytmus zmien teploty riečnej vody. *Vodohosp. Čas.* 17(2), 117–130.
- HORVÁTHOVÁ, B., VANETIANEROVÁ, M., 1963: *Teplota vody slovenských tokov*, Praha.
- LAPIN, M., DAMBORSKÁ I. 2007: Methods of extreme weather events selection and some results of elaboration. *Int. Conf.: Bioclimatology and natural hazards*. Sept. 2007.
- LAPIN, M., MELO, M., FAŠKO, P., PECHO, J., 2007: Snow cover changes scenarios for the Tatra mountains in Slovakia. 4str.
- LEHNER, B., DÖLL, P., ALCAMO, J., HENRICHS, T., KASPAR, F., 2006: Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Climatic Change* 75: 273–299.
- LEŠKOVÁ, D., ŠKODA, P., 2003: Temperature series trends of Slovak rivers. *Meteorologický časopis*, 6(2), 13–17.
- LISICKÝ, M. J., MUCHA, I., 2003: Optimalizácia vodného režimu ramennej sústavy v úseku Dunaja Dobrohošť – Sap z hľadiska prírodného prostredia. ISBN 80-968211-2-1.
- MORRILL, J. C., BALES, R. C., CONKLIN, M. H., 2001: The relationship between air temperature and stream temperature. *American Geophysical Union, Spring Meeting* 2001.
- MORRILL, J. C., BALES, R. C., CONKLIN, M. H., 2005: Estimating stream temperature from air temperature: implications for future water quality. *J. Envir. Engrg.*, 131(1), pp. 139–146.
- NIJSSEN, B., O'DONNELL, G., M., LETTENMAIER, D., P., LOHMANN, D., WOOD, E., F., 2001: Predicting the discharge of global rivers. *J. Climate*, 14, 3307–3323.
- NOHARA, D., KITO, A., HOSAKA, M., OKI, T., 2006: Impact of Climate Change on River Discharge Projected by Multimodel Ensemble. *JHM*, 7, 1076–1089.
- PEKÁROVÁ, P., HALMOVÁ, D., MIKLÁNEK, P., PEKÁR, J. 2007B: Analýza zmien maximálnych objemov odtoku Dunaja za dve obdobia 1876–1940 a 1941–2005. *Acta Hydrologica Slovaca*, ISSN 1335-6291, 8(2), 164–172.
- PEKÁROVÁ, P., PACL, J., ŠKODA, P., MIKLÁNEK, P. 2007A: Doplnenie priemerných denných prietokov Dunaja v Bratislave za historické obdobie 1876–1890. *Acta Hydrologica Slovaca*, ISSN 1335-6291, 8(1), 3–12.
- PEKÁROVÁ, P., PEKÁR, J. 2007: Viacročná variabilita charakteristik odtoku Dunaja v Bratislave. *Acta Hydrologica Slovaca*, ISSN 1335-6291, 8(1), 12–21.
- PETROVIČ, P., NACHTNEBEL, H., KOSTKA, Z., HOLKO, L., MIKLÁNEK, P. ET.AL., 2006: Basin-wide water balance in the Danube river basin. *The Danube and its basin - Hydrological monograph Part VIII-3*, ISBN 80-89062-49-0, IHP UNESCO & VÚVH, Bratislava, 161 pp.+4 maps.

STANČÍKOVÁ, A., CAPEKOVÁ, Z., 1993: Teplota vody Dunaja – ukazovateľ ľudských zásahov na toku. VÚVH, Veda a výskum v praxi, 83, 84 str.

SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., LAPIN, M., PARAJKA, J., KOHNOVÁ, S., 2007: Vplyv zmeny klímy na odtokový režim na Slovensku. Key Publishing, Ostrava, 158 str.

WEBB, B. W., NOBILIS, F., 2007: Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. Hydrological Sciences–Journal, 52(1), 74–85.

## **SIMULATION OF TEMPERATURE INCREASE IN THE DANUBE RIVER AT BRATISLAVA AS A RESPONSE TO THE PROJECTED RISE IN AIR TEMPERATURE**

*Pavla Pekárová<sup>1</sup>, Milan Onderka<sup>1</sup>, Peter Škoda<sup>2</sup>, Ján Pekár<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Institute of Hydrology, SA S, Racianska 75, 831 02 Bratislava 3, [pekarova@uh.savba.sk](mailto:pekarova@uh.savba.sk)*

<sup>2</sup> *Slovak Hydrometeorological Institute, Jeseniova, 833 15 Bratislava, [peter.skoda@shmu.sk](mailto:peter.skoda@shmu.sk)*

<sup>3</sup> *Department of Applied Mathematics and Statistics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University Bratislava, Mlynska dolina, 842 48 Bratislava, Slovakia, [pekar@fmph.uniba.sk](mailto:pekar@fmph.uniba.sk)*

### **Summary**

Water temperature and the rate how it changes over time may be regarded as a fundamental indicator of water quality in a stream. Temperature of water has a direct impact on aquatic life in streams. In accordance with the Water Framework Directive (Directive 2000/60/EC) it is inevitable to ensure good ecological status of surface waters by 2015. Water temperature is one of the basic physico-chemical indicators for which quality classes need to be created. It is therefore necessary to adopt measures for achieving good ecological status of surface waters.

The first part of the study evaluates the long-term evolution of water temperature in the Danube River at the Bratislava gage station over the past eighty years 1926 – 2005. Hourly, daily, monthly and yearly time series of water temperature have been evaluated. In the second part of the study we have analyzed how monthly water temperatures affect monthly air temperatures, average monthly discharges, calculating with the contribution of anthropogenic activity. The third part of the study is dedicated to multiple regression analysis by means of which an empirical relationship was established. This empirical relationship was employed for indirect assessment of monthly water temperatures in the Danube River at Bratislava station using monthly average air temperature at Vienna. This relationship was deployed in simulation of monthly water temperatures for 2075 according to three climatic models and scenarios. Results of the simulation reveal that average increase in monthly air temperature by ca 2.7 °C in 2075 will possibly cause an increase in water temperature in the Danube River at Bratislava station by 2.0 °C, on average.

The outcomes of this study indicate that stream water temperature depends strongly on air temperature. Every increase in air temperature must therefore result in increased stream water temperatures. Even though the expected increase in water temperature will be less profound than that of air temperature, such changes in water temperatures (especially in summer months) will be alarming.



# DÔSLEDKY KLIMATICKEJ ZMENY NA PODMIENKY RASTLINNEJ VÝROBY NA SLOVENSKU

Bernard Šiška

Katedra biometeorológie a hydrológie, SPU Nitra, SK, bernard.siska@uniag.sk

## ÚVOD

V rámci impaktových štúdií vplyvu zmien klímy na rastlinnú produkciu sa rozoznáva tzv. priamy, nepriamy a kombinovaný vplyv zvýšenej koncentrácie CO<sub>2</sub> na tvorbu fytomasy rastlín. **Priamy** vplyv, často označovaný ako CO<sub>2</sub>-fertilizačný efekt (DHAKHWA et al., 1997) sa vzťahuje k zvýšenej intenzite fotosyntézy a následne zvýšenej využiteľnosti vody rastlinou. Experimentálne bolo dokázané, že na dvojnásobné zvýšenie koncentrácie CO<sub>2</sub> rastliny reagujú zvýšením rýchlosti fotosyntézy v rozpätí 30 - 50 % (WOODWARD et al., 1991, IDSO, IDSO, 1994), pričom stimulačný efekt nie je viazaný len na prostredie radiačne nasýtené (LONG, DRAKE, 1991). Zvýšenie rýchlosti fotosyntézy sa potom prejavuje i v náraste fytomasy.

Za **nepriamy** vplyv sa považuje vplyv zmeny meteorologických prvkov (klimatického systému), vyvolaných skleníkovým efektom CO<sub>2</sub> – klimatickej zmeny (MEARNS et al., 1997). Najvhodnejším prostriedkom na štúdium klimatického systému a jeho zmien sú klimatické modely všeobecnej cirkulácie atmosféry (General Circulation Models – GCMs). Regionálne výstupy GCMs neumožňujú tvorbu podrobných scenárov zmeny klímy v lokálnom meradle a preto na regionálnej úrovni sú dopĺňané scenármi získanými štatistickými metódami (MELO, 2004).

Pre štúdium dôsledkov klimatickej zmeny je potrebné vyhodnotiť oba účinky spoločne, nakoľko rastlinná výroba je ovplyvňovaná nielen fyzikálnymi, ale aj chemickými dôsledkami zvýšenej koncentrácie najmä CO<sub>2</sub> v atmosfére. Spoločný vplyv zvýšenej koncentrácie CO<sub>2</sub> na fotosyntézu i zmeny chodu meteorologických prvkov je potom vplyvom **kombinovaným**. Hodnotenia dôsledkov klimatickej zmeny v oblasti poľnohospodárstva je preto potrebné stanoviť k časovým horizontom definovaným podľa predpokladanej koncentrácie skleníkového aktívnych plynov. Prakticky jedinou komplexnou možnosťou ako stanoviť reakciu rastlín na zmenu klimatických podmienok bez realizácie nákladných pokusov, je využitie rastových simulačných modelov. Tieto odhady majú význam predovšetkým pre dlhodobé strategicko-ekonomické plánovanie produkčných procesov. V Slovenskej republike boli možné dôsledky zmeny klímy na produkčný proces vyhodnotené vo viacerých prácach riešených v rámci U.S. COUNTRY STUDIES PROGRAM (ŠPÁNIK et al., 1997.), resp. Národného klimatického programu SR (ŠIŠKA, MALIŠ, 1997, ŠPÁNIK, ŠIŠKA et al., 2004).

Najnovšie výsledky impaktových štúdií sa získali v rámci riešenia projektu 2004 SP 20/06K 0A 03/000 00 10: Prebiehajúca klimatická zmena a jej dopady na rozvoj spoločnosti, ako aj s čiastočnou podporou projektov VEGA 1/4427/07: návrh agroklimatickej rajonizácie rastlinnej výroby v podmienkach meniacej sa klímy.

Cieľom príspevku je rámcovo zhodnotiť možné dôsledky zmeny klímy, definované scenármi klimatickej zmeny, na produkčné podmienky rastlinnej výroby na Slovensku, s využitím GIS.

## MATERIÁL A METÓDY

Meteorologické a fenologické údaje k riešeniu etapy boli hodnotené pre dve obdobia s definovanou koncentráciou CO<sub>2</sub> v atmosfére podľa tabuľky 1.

**Tab. 1** Predpokladané zmeny koncentrácie CO<sub>2</sub> pre hodnotené časové horizonty

**Tab. 1** Supposed change in the CO<sub>2</sub> concentration for selected time frames

| Koncentrácia CO <sub>2</sub> |         | Časový horizont |
|------------------------------|---------|-----------------|
| 1xCO <sub>2</sub>            | 330 ppm | 1961 – 1990     |
| 2xCO <sub>2</sub>            | 660 ppm | 2061 – 2090     |

Klimatické údaje pre riešenie úlohy za referenčný rad rokov (pre úroveň koncentrácie 1xCO<sub>2</sub>) boli získané z databázy SHMÚ v Bratislave. Pre stanovenie energetickej a vlhovej zabezpečnosti, fenologických pomerov a agroklimatického produkčného potenciálu bolo vybrané trvanie veľkého vegetačného obdobia. Veľké vegetačné obdobie (VVO) je ohraničené biologickým teplotným minimom (denným priemerom teploty vzduchu  $T \geq 5,0$  °C). VVO svojim trvaním determinuje aj obdobie vegetačného pokoja (OVP), ktoré ohraničuje priemerná denná teplota vzduchu nižšia ako biologické teplotné minimum ( $T < 5,0$  °C). Nástup a ukončenie VVO boli stanovené numerickou metódou podľa Noseka, (1972). V tomto intervale bolo spočítané: fotosynteticky aktívne žiarenie (*PAR* v kWh.m<sup>-2</sup>), suma priemerných denných teplôt (*TS5* v °C), úhrn atmosférických zrážok (*R* v mm), evapotranspirácia (*E* v mm) a z nich odvodené charakteristiky.

K analýzam vplyvu klimatickej zmeny na fenologické pomery VVO na Slovensku boli vytypované klimatické stanice tak, aby plošne rovnomerne pokrývali územie Slovenska do nadmorskej výšky ohraničujúcej možnú poľnohospodársku výrobu – 900 m n.m. Tieto analýzy reprezentujú približne 45000 km<sup>2</sup> územia SR.

Výber klimatických staníc pre hodnotenie zmien fenologických pomerov a zabezpečenia vegetačného obdobia poľných plodín klimatickými prvkami je uvedený v tab. 2. Stanice reprezentujú územie SR z hľadiska v súčasnosti definovaných výrobných typov rastlinnej výroby.

Klimatické údaje z vybraných klimatických staníc pre obdobie rokov s koncentráciou 2xCO<sub>2</sub> podľa scenárov klimatickej zmeny boli spracované podľa výsledkov modelu všeobecnej cirkulácie atmosféry CCCM20 (SRES B2) (LAPIN et al., 2001).

**Tab. 2** Zaradenie vybraných klimatických staníc pre hodnotenie zmien fenologických pomerov poľných plodín podľa výrobných typov rastlinnej výroby

**Tab. 2** List of selected climatologic stations for evaluation of changes in phenologic conditions of field crops according to the growing types

| Výrobná oblasť | Nadmorská výška<br>v m n. m. | Klimatická stanica | Nadmorská výška<br>v m n.m. |
|----------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Kukuričná      | <200                         | Somotor            | 100                         |
|                |                              | Hurbanovo          | 115                         |
|                |                              | Nitra              | 143                         |
|                |                              | Piešťany           | 165                         |
|                |                              | Kamenica n/C.      | 178                         |
| Repárska       | 200 – 350                    | Rimavská Sobota    | 214                         |
|                |                              | Prievidza          | 260                         |
|                |                              | Košice             | 230                         |
|                |                              | Sliač              | 330                         |
| Zemiakarská    | 300 – 650                    | Bardejov           | 304                         |
|                |                              | Sliač              | 330                         |
|                |                              | Liptovský Hrádok   | 640                         |
| Horská         | >600                         | Telgárt            | 901                         |



Vstupné údaje pre GIS analýzy tvorilo bodové pole, predstavujúce sieť meteorologických staníc na území SR. Pomocou interpolačnej techniky boli vypočítané priestorové zmeny jednotlivých priemerných hodnôt klimatických údajov. Pri spracovávaní daných podkladov bola využitá interpolačná technika regularizovaný spline s tenziou a kriging. Na základe plošnej analýzy pomocou GIS boli vyhodnotené priestorové zmeny klimatických ukazovateľov pre podmienky klímy 1xCO<sub>2</sub> a 2x CO<sub>2</sub>.

## VÝSLEDKY

### Trvanie vegetačného obdobia

Z výsledkov riešenia vyplýva, že extrémny nástup, ukončenia a trvania VVO na území Slovenska ohraničujú južné – najnižšie polohy Slovenska, obvyčajne reprezentované klimatickou stanicou Hurbanovo a najvyššie položené polohy, reprezentované klimatickou stanicou Telgárt.

Na základe analýzy jednotlivých rokov vyplýva, že ku koncu hodnoteného obdobia môže v podmienkach Podunajskej nížiny veľké vegetačné obdobie pretrvávajúť aj počas celej zimy. Táto skutočnosť môže nepriaznivo ovplyvniť prezimovanie niektorých ovocných drevín. Smerom na sever, hlavne vplyvom vzostupu nadmorskej výšky, sa nástup VVO postupne urýchľuje, ukončenie oneskoruje a trvanie výrazne mení. Z priebehu trendových čiar nástupu a ukončenia VVO vyplýva (obr. 1), že výraznejším zmenám budú podliehať termíny začiatku VVO, keď v celom výškovom profile možno očakávať v podmienkach klímy 2xCO<sub>2</sub> uskorenie asi o 28 dní, v porovnaní s podmienkami klímy 1xCO<sub>2</sub>.

Táto skutočnosť má závažné dôsledky pre prezimujúce porasty poľných plodín (pšenica letná forma ozimná (*Triticum vulgare* L.), kapusta repková pravá forma ozimná (*Brassica napus* L.), nakoľko posúva ich vegetačné obdobie do mesiacov s nižším príkonom žiarenia, čo negatívne ovplyvňuje potenciál tvorby ich biomasy.

Trvanie VVO typického pre kukuričnú výrobnú oblasť, v referenčnom období 1xCO<sub>2</sub> - 235 dní a viac, reprezentovalo asi 34 % celkovej plochy výrobných oblastí, v podmienkach klímy 2xCO<sub>2</sub> sa bude vyskytovať prakticky na celej ploche, pričom trvanie VVO v najnižších polohách Podunajskej nížiny, Východoslovenskej nížiny a Záhoria presiahne v priemere 275 dní.

### Zmeny teplotných pomerov vo VVO

Teplota, ako základná charakteristika energetickej zložky prostredia, podmieňuje fotosyntézu, dýchanie, príjem živín, a iné procesy, ktoré rozhodujú o produkcii organickej hmoty – úrody. Charakteristiky teploty boli preto povýšené do kategórie ukazovateľov rajonizácie poľnohospodárskej rastlinnej výroby.

Predpokladané otepľovanie výrazne ovplyvní aj súčasnú regionalizáciu poľnohospodárskej výroby a pásmovitosť rozmiestnenia poľných i záhradníckych plodín. V južných, najnižšie položených častiach Slovenska, sa TS5 zvýši v podmienkach klímy 2xCO<sub>2</sub> (Stanica Hurbanovo) o 22 %, smerom k vyššie položeným oblastiam Slovenska však relatívne zabezpečenie VVO teplotnými sumami rastie a dosahuje zvýšenie až o 45 %. Z priestorových zmien rozloženia TS5 na Slovensku pre podmienky klímy 1xCO<sub>2</sub> a 2xCO<sub>2</sub> vyplýva, že v podmienkach klímy 1xCO<sub>2</sub> TS5>3200 °C bola dosahovaná na ploche 12 880 km<sup>2</sup> (27 %). V podmienkach klímy 2xCO<sub>2</sub> tieto parametre bude spĺňať viac ako 35 000 km<sup>2</sup> územia SR, čo predstavuje viac ako 80 % hodnoteného územia. To umožní posun pestovania teplotne náročnejších plodín z dnešných podmienok Podunajskej a Východoslovenskej nížiny až do polôh kotlín Liptova a Turca (posun z 200 m na 650 m).

Tab. 3 Zabezpečenie VVO fotosynteticky aktívnym žiarením (PAR), teplotnou sumou (TS5) a zrážkami (R) pre výrobné oblasti rastlinnej výroby a podmienky klímy 1xCO<sub>2</sub> a 2xCO<sub>2</sub>

Tab. 3 Assurance of Long Growing Period (VVO) by active photosynthetic radiation (PAR) by sum of daily temperatures (TS5) and by precipitation (R) in the growing regions of crop production under 1xCO<sub>2</sub> a 2xCO<sub>2</sub> conditions

| Výrobná oblasť | PAR<br>[kWh.m <sup>-2</sup> ] |                   | R<br>[mm]         |                   | TS5<br>[°C]       |                   |
|----------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                | 1xCO <sub>2</sub>             | 2xCO <sub>2</sub> | 1xCO <sub>2</sub> | 2xCO <sub>2</sub> | 1xCO <sub>2</sub> | 2xCO <sub>2</sub> |
| Kukuričná      | 460 – 500                     | 510 – 560         | 400 - 460         | 500 – 530         | 3200 - 3400       | 4000 - 4400       |
| Repárska       | 435 – 460                     | 485 – 510         | 460 - 510         | 530 - 580         | 2900- 3200        | 3650 – 4000       |
| Horská         | <400                          | <465              | >560              | >650              | <2300             | <3150             |

#### Príkon fotosynteticky aktívneho žiarenia (PAR)

Slnčné žiarenie fotochemickými účinkami vyvoláva v rastlinných orgánoch syntetické reakcie, v procese fotosyntézy podmieniajúce tvorbu úrod a fyzikálnymi účinkami tieto procesy urýchľuje, alebo spomaľuje. Z fyziologického hľadiska k najúčinnjším charakteristikám sa radí fotosynteticky aktívne žiarenie (PAR), ktoré sa v podstate zhoduje s viditeľným žiarením – svetlom.

V zmysle použitých regionálnych výstupov scenárov klimatickej zmeny, príkon žiarenia, v podmienkach meniacej sa klímy, nepodlieha tak dramatickým zmenám ako iné klimatické prvky. Všeobecne platí, že sumy PAR za VVO na Slovensku v podmienkach klímy 2xCO<sub>2</sub> narastajú. Vplýva na to hlavne faktor času, teda predlžovanie VVO vplyvom uskorenia nástupu a oneskorenia ukončenia, ale tiež zmena oblačnosti spôsobená zmeneným režimom vlhkosti vzduchu.

V južných, najnižších polohách Slovenska sa PAR za VVO v podmienkach klímy 2xCO<sub>2</sub> zvýši o 49 kWh.m<sup>-2</sup>, t.j. o 10 %, v najvyšších poľnohospodársky využívaných polohách o 60 kWh.m<sup>-2</sup>, t.j. o 15 %.

V podmienkach klímy 1xCO<sub>2</sub> v najteplejších oblastiach SR boli dosahované hodnoty PAR>475 kWh.m<sup>-2</sup> na ploche 13 573 km<sup>2</sup> (30 %), v podmienkach klímy 2xCO<sub>2</sub> tieto parametre bude spĺňať viac ako 28 300 km<sup>2</sup> územia SR, čo predstavuje viac ako 63 % hodnoteného územia. Všetky poľnohospodárske výrobné typy by v podmienkach klímy 2xCO<sub>2</sub> mali byť zabezpečené počas VVO príkonom PAR>450 kWh.m<sup>-2</sup>.

#### Zmena zabezpečenia rastlinnej výroby atmosférickými zrážkami (R)

Voda je základnou stavebnou zložkou rastlinných orgánov v ktorých plní významné životné funkcie. V bunkách rastlín vytvára disperzné prostredie pre koloidné plazmy, v ktorých prebiehajú všetky biochemické procesy látkovej výmeny, rastu a ďalšie procesy ich životnej činnosti. Voda sprostredkováva transport živín i vznikajúcich zlúčenín. Významnou je tiež jej termoregulačná funkcia. Voda má preto v agroklimatickej rajonizácii nezastupiteľnú funkciu.

Podľa modelu CCCM20 predpoklady zmien zrážkových úhrnov jednotlivých mesiacov roka nie sú rovnaké. Rozdiely v úhrnoch zrážok sú tiež určené nadmorskou výškou hodnoteného územia. Pri hodnotení zrážkových úhrnov za VVO pôsobí však, podobne ako aj pri ostatných charakteristikách, faktor času. Za predlžujúce sa vegetačné periódy nahromadí sa vyšší zrážkový úhrn.

V podstate platí na Slovensku vzrast zrážkových úhrnov pre podmienky klímy 2xCO<sub>2</sub>, na nížinách južného a východného Slovenska je to o 65 - 80 mm, t.j. o 15 - 20 % na severnom Slovensku o 65 - 128 mm, t.j. o 12 -20 %.

Zabezpečenie VVO zrážkami rastie a v podmienkach klímy 2xCO<sub>2</sub> by mali všetky výrobné oblasti dostávať atmosférické zrážky Z>480 mm. Táto skutočnosť by mala priaznivo ovplyvniť produkčný potenciál plodín využívajúci teplotné podmienky VVO (napr. hustosiate obilniny, krmoviny a trvalé trávne porasty).



## Zmeny charakteristík evapotranspirácie

Evapotranspirácia ako významná zložka vodnej bilancie prostredia je vhodným ukazovateľom pre posúdenie vlhkových pomerov územia v časopriestorovom vyjadrení. Zatiaľ čo potenciálna evapotranspirácia môže byť využitá ako ukazovateľ pre stanovenie potreby vody pri maximálnej produktivite ekosystémov (ŠÍŠKA, 1992), presné stanovenie aktuálnej evapotranspirácie môže viesť k veľmi presným stanoveniam produkcie biomasy (Vidovič, Novák 1985). Predpokladané zvyšovanie teploty vzduchu, ale aj predlžovanie VVO spôsobujú jednoznačne rast  $E_0$  v podmienkach klímy  $2xCO_2$  na celom území Slovenska. Na juhu Slovenska vzrastie  $E_0$  za VVO o 150 mm, t.j. o 23 %, v podhorských oblastiach až o 127 mm, t.j. o 30 % (Telgárt). Na celom poľnohospodársky využiteľnom území možno očakávať  $E_0 > 500$  mm, v najteplejších územiach SR (juh Podunajskej nížiny a najnižšie polohy Východoslovenskej nížiny) možno očakávať úhrny  $E_0$  prevyšujúce 800 mm. Tak vysoké úhrny  $E_0$  vyvolávajú potrebu efektívneho hospodárenia s vodnými zdrojmi a budovanie závlah na väčšine územia SR, ak sa má eliminovať nepriaznivý dosah zvýšeného výparu na tvorbu úrod.

Tab. 4 Úhrny potenciálnej evapotranspirácie ( $E_0$ ) a ukazovateľa zavlaženia ( $E_0-R$ ) vo VVO pre výrobné oblasti rastlinnej výroby a podmienky klímy  $1xCO_2$  a  $2xCO_2$

Tab. 4 Sums of potential evapotranspiration ( $E_0$ ) and moisture parameter ( $E_0-R$ ) in VVO for growing regions of crop production under  $1xCO_2$  and  $2xCO_2$  conditions

| Výrobná oblasť | $E_0$<br>[mm] |           | $E_0-R$<br>[mm] |           |
|----------------|---------------|-----------|-----------------|-----------|
|                | $1xCO_2$      | $2xCO_2$  | $1xCO_2$        | $2xCO_2$  |
| Kukuričná      | 600 – 660     | 720 – 810 | 150 – 220       | 200 – 300 |
| Repárska       | 550 – 600     | 650 – 720 | 50 – 150        | 110 – 200 |
| Horská         | <450          | <570      | <-80            | <-50      |

## Klimatický ukazovateľ zavlaženia a jeho zmeny

Dostupnosť vody pre poľnohospodársku prvovýrobu je v krajinnom priestore možno hodnotiť viacerými ukazovateľmi. V rámci agroklimatického členenia Slovenska bol pre účely agroklimatickej rajonizácie zavedený klimatický ukazovateľ zavlaženia, ktorý je rozdielom medzi potenciálnou evapotranspiráciou a zrážkami v troch letných mesiacoch (KURPELOVÁ et al., 1975). Vzhľadom k skutočnosti, že v podmienkach meniacej sa klímy sa výskyt letných dní posúva v závislosti od nadmorskej výšky ako do jarných, tak aj jesenných mesiacov, rozdiel medzi potenciálnou evapotranspiráciou a zrážkami bol hodnotený počas celého trvania vegetačného obdobia. Vo VVO sa tento ukazovateľ vo výškovom profile SR výrazne mení tak, ako sa menia úhrny  $E_0$  a  $R$ . V podmienkach klímy  $2xCO_2$  boli zistené rozdiely v náraste tohto ukazovateľa v teplejších podmienkach južného Slovenska v priemere o 70 mm (t.j. +30 %). Nulové hodnoty ukazovateľa sa posunú z úrovne 550 na 650 m n. m. Vývoj sucha definovaného týmto ukazovateľom dobre popisuje obr. 2. Ak v referenčnom časovom intervale rokov 1961 -1990 boli nedostatkom vody počas VVO postihované územia na ploche 21 300 km<sup>2</sup>, tak v podmienkach zmenenej klímy ( $2xCO_2$ ) sa takéto územia vyskytnú na ploche 30300 km<sup>2</sup>, čo je nárast o 42%. V podmienkach zmenenej klímy významná časť územia (8800 km<sup>2</sup>) v poľnohospodársky najvýznamnejších oblastiach bude charakterizovaná priemerným deficitom  $E_0-R > 250$  mm. Takéto deficity sa v podmienkach klímy  $1xCO_2$  prakticky nevyskytovali.

## ZÁVERY - ADAPTAČNÉ OPATRENIA

Na základe vyššie uvedených závislostí je možné stanoviť pravdepodobné nástupy, ukončenia a trvania VVO v podmienkach klímy  $1xCO_2$  a  $2xCO_2$  pre jednotlivé poľnohospodárske výrobné

oblasti, ako aj zabezpečenie období fotosynteticky aktívnym žiarením (*PAR*), sumami aktívnych teplôt (*TS5*), atmosférickými zrážkami (*R*), potenciálnou evapotranspiráciou (*E<sub>0</sub>*) a ukazovateľom zavlaženia (*E<sub>0</sub>-R*), tak ako sa uvádza v tab. 3 a 4.

Rastové modely sú nielen nástroje pre posúdenie účinkov zmien klímy, ale súčasne sú využívané aj ako prostriedok pre stanovenie účinných adaptačných opatrení. Len štyri agrotechnické opatrenia je možné aplikovať ako účinné adaptačné mechanizmy pre zmiernenie negatívnych a pre využitie pozitívnych účinkov zmeny klímy (Rosenzweig, Parry, 1994, Špánik et al., 2000):

- zmenu pestovanej plodiny
- zmenu odrody
- posun termínu sejby
- využitie závlahových systémov.

V posledných rokoch boli v tejto oblasti uskutočnené mnohé štúdie (CUCULEANU et al., 1999; EASTERLING et al., 1998, SAMUHEL, ŠIŠKA, 2007, ŠPÁNIK et al., 2000) využiteľné v oblasti strategického plánovania v rastlinnej výrobe na úrovni regiónov i štátov.

- Zmena pestovanej plodiny

Takýto radikálny krok bude možný v regiónoch s vyššou nadmorskou výškou, kde zvýšenie teplotného komfortu umožní pestovanie plodín, ktoré sú dnes typické pre najteplejšie regióny Slovenska. Reálne sa dá predpokladať výraznejšie zastúpenie kukurice satej a repy cukrovej v osevných postupoch, prípadne iných teplomilných rastlín.

- Zmena odrody

Ako reálna sa ukázala možnosť využitia nových odrôd kukurice satej s vyšším FAO číslom v regiónoch, kde kukurica bola pestovaná, nakoľko termické podmienky determinujúce trvanie hlavného vegetačného obdobia umožnia pestovanie tejto plodiny. Potenciál kukurice satej prekonávať obdobia s nedostatkom vlhky počas vegetačného obdobia, ako aj široké možnosti jej zaradenie do osevných postupov, je predpokladom pre rastúci význam v rastlinnej výrobe v podmienkach klimatickej zmeny na Slovensku. Hustosiate obilniny, ktoré dnes dominujú rastlinnej výrobe na Slovensku budú tiež vyžadovať zmenu odrôd. Súčasné typy odrôd pšenice letnej formy ozimnej by v podmienkach klimatickej zmeny dozrievali asi o 4 týždne skôr. Tento posun sa premietá aj do zníženého príkonu radiačnej energie počas vegetačného obdobia a tým aj potenciálu tvorby úrody.

Rizikovým sa pravdepodobne stane aj obdobie prezimovania, nakoľko v podmienkach teplejšej klímy sa toto skráti a mladé rastliny na to nemusia byť dobre pripravené. Poklesy teplôt počas vegetačného obdobia pod bod mrazu budú veľmi pravdepodobne častejšie (kvôli posunu začiatku vegetačného obdobia k začiatku kalendárneho roka na jar pri nezmenených predpokladoch výskytu mrazov v dôsledku trvania dňa a noci) a tak poškodenie mrazmi, alebo chladom budú musieť byť zohľadnené aj pri výbere (šľachtení) nových odrôd. Lepšie využitie príkonu žiarenia počas vegetačného obdobia je možné dosiahnuť aj výberom odrôd s dlhším vegetačným obdobím. Tu sa však objavuje riziko posunu vegetačného obdobia do mesiacov s vysokou pravdepodobnosťou výskytu teplôt, ktoré môžu zabrániť presunu látok z rastliny do hospodárskej úrody. Takéto výsledky už boli v rámci modelových simulácií s ozimnou pšenicou pre podmienky klímy 2xCO<sub>2</sub> zistené (ŠIŠKA, MALIŠ, 1997). Výsledkom tak môže byť tvorba vysokých úrod biomasy s malým podielom hospodárskej úrody. Výber vhodnej odrody pšeníc tak bude musieť zohľadniť nielen meniace sa podmienky prezimovania, ale aj podmienky dozrievania.

- Posun termínu sejby

Modelové situácie ukázali, že v agroklimatických podmienkach Slovenska termín výsevu jačmeňa sateho formy jarnej je výhodné prispôbiť nástupom priemernej dennej teploty  $T \geq 5^{\circ}\text{C}$ . Zachovanie súčasných termínov sejby by mohlo priniesť riziko vysokej teploty počas ontogenézy porastu najmä počas citlivých fenofáz, ako aj vysušený povrch pôdneho profilu v oblasti osivového lôžka a tým malého počtu klíčiacych semien ako aj nepravidelného vzchádzania a následného vývinu porastu (ŠIŠKA, 1997). Nástup jari v zmysle scenárov klimatickej zmeny bude pravdepodobne veľmi rýchly



v porovnaní dnešnými podmienkami. Podobne ako pre pšenicu platí, že lepšie využitie príkonu žiarenia počas vegetačného obdobia je možné dosiahnuť aj výberom odrôd s dlhším vegetačným obdobím. Tu sa však takisto objavuje riziko posunu vegetačného obdobia do mesiacov s vysokou pravdepodobnosťou výskytu teplôt, ktoré môžu zabrániť presunu látok z rastliny do hospodárskej úrody.

- Využitie závlahových systémov

Predpoklad rozšírenia závlahových systémov je v súčasnosti jedným z najčastejšie uvažovaných adaptačných opatrení na zmiernenie negatívnych dôsledkov meniacej sa klímy. Využitie závlahových systémov však vyžaduje dostatok vody a je pravdepodobné, že potreby poľných plodín budú uspokojené len čiastočne.

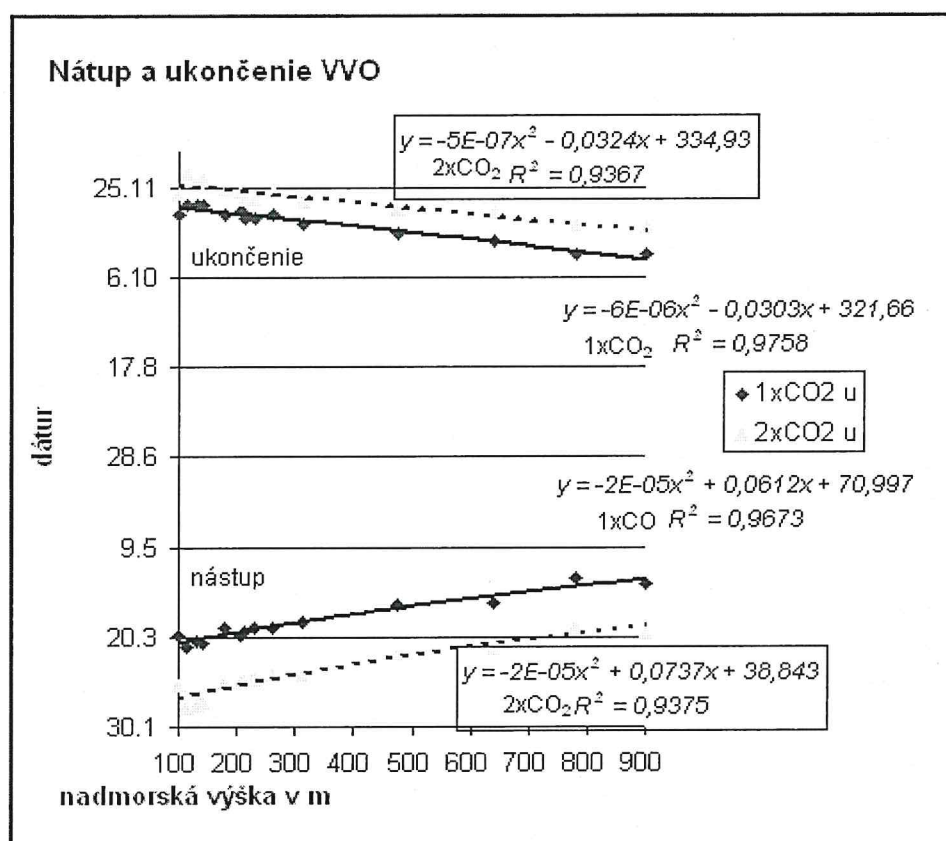
## LITERATÚRA:

- CUCULEANU, V., MARICA, A., SIMOTA, C. 1999: Climate change impact on agricultural crops and adaptation options in Romania. *Climate Research* 12: 153-160.
- DHAKHWA, G. B., CAMPBELL, C. L., LEDUC, S. K., COOTER, E. J. 1997: Maize growth: assessing the effect of global warming and CO<sub>2</sub> fertilization with crop models. *Agricultural and Forest Meteorology* 87: 253-272.
- EASTERLING, W.E., WEJSS, A., HAYS, C.J., MEARNNS, L.O. 1998: Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: the case of the US Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology* 90: 51-63.
- IDSO, K.E., IDSO, S.G. 1994: Plant responses to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 years research. *Agricultural and Forest Meteorology* 69: 153-203.
- KURPELOVÁ, M., COUFAL, J., ČULÍK, J. 1975: Agroklimatické podmienky ČSSR. Bratislava, Príroda, 1975.
- LAPIN, M., MELO, M., DAMBORSKÁ, I. 2001: Scenáre súborov viacerých vzájomne fyzikálne konzistentných klimatických prvkov. In: Nové scenáre klimatickej zmeny a ich využitie, Národný klimatický program SR, VI, No. 11, Bratislava : SHMÚ a MŽP SR, s. 5-30.
- LONG S.P., DRAKE B.G. 1991: Effect of the long-term elevation of CO<sub>2</sub> concentration in the field on the quantum yield of photosynthesis of the C3 sedge *Scirpus olneyi*. *Plant Physiology* 96: 221-226.
- MATEJKA, F., HUZULÁK J. 1995: Analysis of relationships between winter wheat leaf water potential and atmospheric factors. *Biology* 50(1): 105-114.
- MEARNNS, L. O., ROSENZWEIG, C., AND GOLDBERG, R. 1997: Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. *Climatic Change* 35(4): 367-396.
- MELO, M. 2004: Teplota vzduchu, atmosférické zrážky a merná vlhkosť vzduchu v Hurbanove podľa pôvodných emisných scenárov „IS92a“ a nových emisných scenárov „A2-SRES“ A „B2-SRES“. In: „Zmeny podnebia – extrémny počasie – organizmy a ekosystémy“ [CD-ROM]. Viničky (Bioklimatologické pracovné dni 2004).
- NOSEK, M. 1972: Metody v klimatológii. Praha : Academia, 1972. s. 1-434.
- ROSENZWEIG C., PARRY M.L. 1994: Potential Impact of Climate Change on World Food Supply. *Nature* 367: 13-138.
- SAMUHEL, P., ŠIŠKA, B. 2007: Parametrization of Crop Simulation Model “CERES-MAIZE” in Nitra-Dolná Malanta. *Journal of environmental engineering and landscape management : Research Journal of Vilnius Gediminas Technical University* 15(1): 1-16. ISSN 1648-6897.
- ŠIŠKA, B. 1997: Supposed impacts of increased concentration of CO<sub>2</sub> on yields of spring barley in region of Danubian lowland up to year 2075. *Acta Horticulturae et Regiotecturae* 2: 107-120. ISBN 80-7137-435-0.
- ŠIŠKA, B., MALIŠ J. 1997: Slovak Agricultural University, Nitra, Slovakia: Supposed Changes in Production of Winter Wheat in Consequence of Climate Change in Danubian Lowland up to Year 2075. Bratislava, 1997, NKP 7: 84-92.
- ŠKVARENINA, J., KRÍŽOVÁ, E., TOMLAIN, J. 2004: Impact of the climate change on the water balance of altitudinal vegetation stages in Slovakia. *Ecology* 23, Supplement 2: 13-29.
- ŠPÁNIK, F., ANTAL, J., TOMLAIN, J., ŠKVARENINA, J., REPA, Š., ŠIŠKA, B., MALIŠ, J. 2000: Aplikovaná agrometeorológia. 3. opravené vydanie. Nitra, 2000. 194 s.. ISBN 80-7137-795-3.
- ŠPÁNIK, F., ŠIŠKA, B. 2004: Biometeorológia. Nitra : VES SPU Nitra, 2004. 227 s. ISBN 80-8069-315-3.
- ŠPÁNIK, F., TOMLAIN, J., ŠIŠKA, B., REPA, Š., MALIŠ, J. 1997: Klimatické zmeny a ich dopad na poľnohospodárstvo. Nitra : SPU v Nitre, 1997. 154 s. ISBN 80-7137-345-1.

**TOMLAIN, J., 1997:** Rozloženie evapotranspirácie na území Slovenska za obdobie 1961 - 1990. [Distribution of evapotranspiration in the territory of Slovakia in the period 1961-1990]. Podzemná voda 3(1): 5-23., SAH Bratislava. (in Slovak with English resume).

**VIDOVIČ, J., NOVÁK, V. 1987:** Závislosť úrody kukurice od evapotranspirácie porastu. Rostlinná výroba 33(6): 663-670.

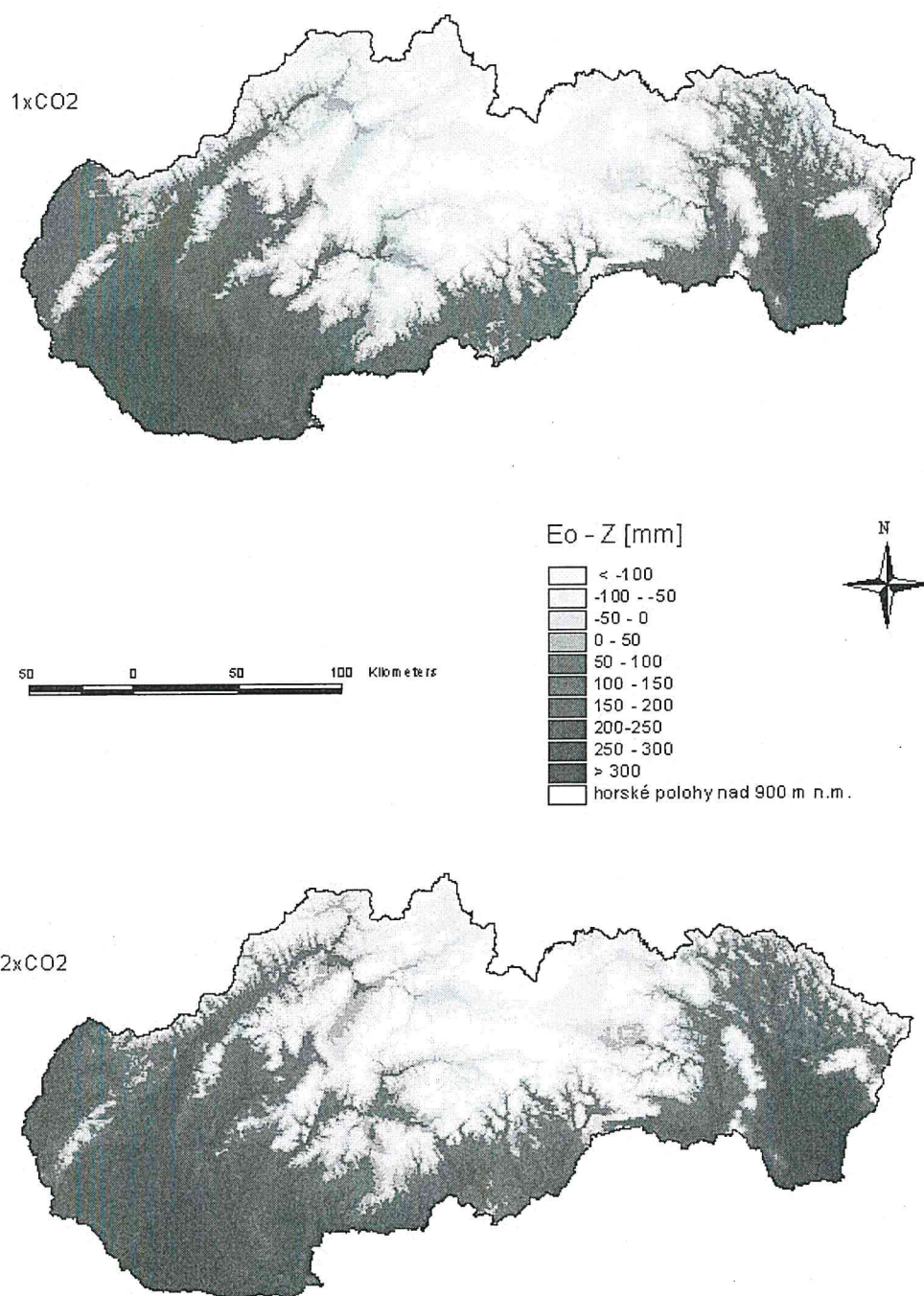
**WOODWARD, F.I., THOMPSON, G.B., McKEE, I.F. 1991:** The effect of elevated concentrations of carbon dioxide on individual plants, population communities and ecosystems. Annals of Botany 61 (Supl.): 23-38.



**Obr. 1** Závislosť nástupu a ukončenia VVO od nadmorskej výšky pre podmienky klímy  $1xCO_2$  a  $2xCO_2$  vo výškovom profile SR

**Fig. 1** Dependency of start and end of VVO period on altitude under  $1xCO_2$  and  $2xCO_2$  conditions in the altitudinal profile of Slovakia.





Obr. 2 Ukazovateľ zavlaženia ( $E_0-Z$ ) v mm vo veľkom vegetačnom období (VVO) pre podmienky klímy 1xCO<sub>2</sub> a 2xCO<sub>2</sub> (podľa CCCM20) na území SR

Fig. 2 Moisture parameter ( $E_0-Z$ ) in mm in Long Growing Period (VVO) under 1xCO<sub>2</sub> and 2xCO<sub>2</sub> conditions (according to scenario CCCM20) in Slovakia

# THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON PLANT PRODUCTION CONDITIONS IN SLOVAKIA

Bernard Šiška

Department of Biometeorology and Hydrology, Slovak Agricultural University Nitra, Slovakia,  
[bernard.siska@uniag.sk](mailto:bernard.siska@uniag.sk)

Energy and water sufficiency (balance) were evaluated for growing season limited by daily mean air temperature  $T > 5,0$  °C. Climatic data from the database of SHMI in Bratislava (1961 – 1990) and regional outputs from climate change scenarios CCCM20 were used for evaluation of photosynthetically active radiation ( $PAR$  in  $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ), daily mean air temperature sums ( $TS5$  in °C), precipitation totals ( $R$  in mm), potential evapotranspiration ( $E_0$  in mm) and climatic index of drought ( $E_0 - R$  in mm) in altitudinal profile of Slovak Republic. Climatic stations used for GIS analyses were selected both from the point of view of altitudes limiting plant production areas (up to 900 m a.s.l. – this altitude represents acreage 45 000  $\text{km}^2$ ) and spatial distribution in this study. Effective adaptive measures to reduce loss of plant production in condition of climate change were analyzed too.

**Key words:** climate change, plant production



# DÔSLEDKY KLIMATICKEJ ZMENY NA ÚRODY POĽNÝCH PLODÍN NA PODUNAJSKEJ NÍŽINE

Jozef Takáč<sup>1</sup> - Bernard Šiška<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Výskumný ústav pôdozvedectva a ochrany pôdy, Bratislava, [takac@vupu.sk](mailto:takac@vupu.sk)

<sup>2</sup> Katedra biometeorológie a hydrológie, SPU Nitra, SK, [bernard.siska@uniag.sk](mailto:bernard.siska@uniag.sk)

**Abstrakt:** Dôsledky zmeny klímy na úrody poľných plodín na Podunajskej nížine boli vyhodnotené na základe výsledkov simulácií agroekologickým matematickým modelom DAISY. Numerické simulácie boli vykonané pre referenčné obdobie 1966 – 1985 a pre emisné scenáre klimatickej zmeny SRES A2 a SRES B2 podľa výstupov modelu všeobecnej cirkulácie atmosféry CCCM (2000). Pre scenáre klimatickej zmeny bol do parametrizácie modelu zabudovaný aj postupný nárast koncentrácie CO<sub>2</sub> v atmosfére. Potvrdilo sa urýchlenie vývoja poľných plodín v dôsledku zvýšenia teplôt vzduchu. Vypočítané úrody hustosiatych obilnín podľa scenárov boli primárne determinované koncentráciou CO<sub>2</sub> v atmosfére, na úrodách kukurice sa fertilizačný účinok zvýšenej koncentrácie CO<sub>2</sub> neprejavil. Niektoré negatívne tendencie vo vývoji klimatických prvkov v scenároch zmeny klímy viedli často k depresii vypočítaných úrod. Hlavným limitujúcim faktorom úrod poľných plodín v nížinných oblastiach bola voda. Závlaha sa ukázala ako výrazný stabilizačný faktor výšky hospodárskych úrod.

**Kľúčové slová** klimatická zmena, modelovanie, GCM, úroda

## ÚVOD

Poľnohospodárska produkcia je jedným zo sektorov, ktoré môžu byť významne ovplyvnené rastúcou koncentráciou CO<sub>2</sub> v atmosfére a zmenou klímy, pričom jej dôsledky môžu byť pozitívne aj negatívne. Rôzne plodiny reagujú rozdielne na zvýšenú koncentráciu CO<sub>2</sub> v atmosfére a na zmenu klimatických činiteľov. Vyššia koncentrácia CO<sub>2</sub> v atmosfére môže mať pozitívny vplyv na fotosyntézu a za optimálnych svetelných, teplotných, výživových a vlhkostných podmienok môže zvýšiť produkciu biomasy, hlavne u plodín s fotosyntetickým metabolizmom C3. Plodiny s fotosyntetickým metabolizmom C4 sú omnoho menej citlivé, alebo dokonca necitlivé na zvýšenie koncentrácie CO<sub>2</sub> v atmosfére. Na druhej strane, plodiny C4 reagujú lepšie ako plodiny C3 na vyššie teploty, ktoré môže zredukovať pozitívny efekt zvýšenej koncentrácie CO<sub>2</sub> na úrodu plodín. Je zrejmé, že dôsledky klimatickej zmeny na rastlinnú výrobu budú výsledkom kombinovaného efektu jednotlivých faktorov. Je potrebné, aby do hodnotenia tohto efektu okrem klimatických scenárov bol zahrnutý aj vplyv koncentrácie CO<sub>2</sub> v atmosfére, pôdných vlastností a spôsobu hospodárenia.

Prakticky jedinou komplexnou možnosťou, ako stanoviť reakciu plodín na zmenu klimatických podmienok bez realizácie nákladných pokusov, je využitie simulačných modelov. Modelové hodnotenia úrod boli v minulosti na území Slovenska zamerané predovšetkým na obilniny. Najčastejšie modelovanou plodinou rastlinnými simulačnými modelmi bola pšenica, nakoľko patrí na našom území k strategickým plodinám, a je zaradovaná do nosných výrobných programov väčšiny subjektov rastlinnej výroby. Jarný jačmeň je hodnotený z pohľadu možných dôsledkov zmeny klímy zriedkavejšie, analýzy však boli zamerané aj na vyhodnotenie možného aklimačného efektu (Šiška, 1997). Dôsledky zmeny klímy na slovenské poľnohospodárstvo boli v minulosti hodnotené vo viacerých prácach riešených v rámci U.S. Country Study Program (Špánik et al., 1997), resp. Národného klimatického programu SR (Šiška a Mališ, 1997, Šiška a Špánik, 1999, Takáč, 2001). Všetky úrody boli simulované na úrovni živinami nestresovaných úrod.

## MATERIÁL A METÓDY

Hodnotenie dôsledkov klimatickej zmeny na rastlinnú výrobu bolo založené na numerických simuláciách agroekologickým modelom DAISY. DAISY je jednorozmerný model agroekosystému,

ktorý na základe informácie o spôsobe hospodárenia a údajov o počasí simuluje rast plodiny, vodný režim, tepelný režim, bilanciu organickej hmoty a dynamiku dusíka v poľnohospodárskych pôdach. Zvláštny dôraz je kladený na režim dusíka v agroekosystémoch. V rámci rastlinnej produkcie je simulovaný rast a vývoj rastliny, vrátane akumulácie sušiny a dusíka v rôznych častiach rastliny. Model umožňuje budovanie komplexných scenárov hospodárenia. Popis modelu, jeho konštrukcia a algoritmy sú uvedené v publikáciách autorov modelu Hansen et al. (1990), Hansen (2000) a Abrahamsen a Hansen (2000).

Plodinové moduly modelu DAISY boli pôvodne kalibrované pre slovenské podmienky v rámci projektu PHARE/EC/WAT/1. Plodinové parametre boli optimalizované na základe experimentálnych údajov z poľného stacionárneho pokusu na VPS VÚZH v Moste pri Bratislave z rokov 1981 – 1987 a overené boli na základe údajov z RD Lehnice, z poľných pokusov na VPS vo VÚZH v Moste pri Bratislave (Takáč a Košč, 1995, Bízik et al., 2002). Na kalibráciu zemiakov pre model DAISY boli využité výsledky analýz z poľného pokusu založeného v rámci projektu FertOrgaNic na VPS v Moste pri Bratislave v rokoch 2003 – 2005 (Heidmann et al., 2008).

Pre scenáre klimatickej zmeny bol do parametrizácie zabudovaný aj postupný nárast koncentrácie  $\text{CO}_2$  v atmosfére prostredníctvom maximálnej rýchlosti fotosyntézy pri svetelnom nasýtení  $F_m$  [ $\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ] a počiatocnej účinnosti využitia svetla  $\epsilon$  [ $(\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ ]. Podľa predpokladanej koncentrácie  $\text{CO}_2$  v atmosfére boli vypočítané koeficienty využitia žiarenia, resp. odozvy zvýšenej koncentrácie  $\text{CO}_2$  na fotosyntézu plodín. Emisné scenáre SRES A2 a SRES B2 predpokladajú odlišný nárast koncentrácie  $\text{CO}_2$  (IPCC, cit in Melo, 2004), čo podmieňuje okrem fyzikálnych aj fyziologické procesy. Na základe zmien koncentrácie  $\text{CO}_2$  je potom možné zostrojiť krivky potenciálneho vplyvu  $\text{CO}_2$  na produkciu biomasy poľných plodín. Z uvedeného vyplýva, že vhodné načasovanie vegetačného obdobia poľných plodín, ktoré vedie k optimálnemu využitiu príkonu žiarenia, môže byť účinným adaptačným opatrením na zmiernenie negatívnych dôsledkov zmeny klímy. Predpokladaná koncentrácia  $\text{CO}_2$  v atmosfére a koeficienty využitia žiarenia, resp. odozvy zvýšenej koncentrácie  $\text{CO}_2$  na fotosyntézu vybraných plodín vo vybraných rokoch sú uvedené v tab. 1.

Numerické simulácie modelom DAISY boli vykonané pre referenčné obdobie 1966 – 1985 a pre emisné scenáre klimatickej zmeny SRES A2 a SRES B2 (ďalej A2 a B2) podľa výstupov modelu všeobecnej cirkulácie atmosféry CCCM 2000. Pre numerické simulácie boli využité 20 – ročné rady denných hodnôt globálneho žiarenia, teploty vzduchu a atmosférických zrážok z meteorologickej stanice Hurbanovo, ktorá je všeobecne považovaná za reprezentatívnu pre oblasť Podunajskej nížiny. Pre simulácie podľa obidvoch emisných scenárov boli vytvorené rady denných hodnôt globálneho žiarenia, teploty vzduchu a atmosférických zrážok pre obdobie 2001 – 2100 (Lapin a kol., 2005).

Hodnotené plodiny (kukurica siata na zrno (*Zea mays*); jačmeň jarný (*Hordeum vulgare*); lucerna siata (*Medicago sativa*); pšenica ozimná (*Triticum aestivum*); cukrová repa (*Beta vulgaris*); zemiaky (*Solanum tuberosum*)) boli usporiadané do osevných postupov s rôznymi variantmi hnojenia a závlahy. V simuláciách so závlahou boli závlahové dávky aplikované v automatickom závlahovom režime pri poklese zásoby pôdnej vody v koreňovej zóne plodiny pod 50 % využiteľnej vodnej kapacity. Frekvencia aplikácie závlahovej dávky bola limitovaná hranicou 10 dní, pri zemiakoch 7 dní. Tento reštrikčný predpoklad bol zvolený preto, lebo v budúcnosti v súvislosti so zmenou klímy sa očakáva obmedzenie zdrojov vody pre závlahu. Nebol simulovaný variant s neobmedzeným prísunom živín a vody, nakoľko v minulosti už bol hodnotený (napr. Šiška, Takáč a Igaz, 2004). Začiatok a koniec závlahovej sezóny bol definovaný vývojom fázou plodiny. Cieľom nebolo pokrytie vlhovej potreby plodiny počas jej celého vegetačného obdobia, ale len v dôležitých fázach tvorby hospodárskej úrody.

Pri zostavení režimov hnojenia boli zohľadnené informácie z poľnohospodárskej praxe, ako aj odporúčania odborníkov. Dodané množstvá minerálneho N na hnojenom variante v simuláciách modelom DAISY sú uvedené v tab. 2. Okrem minerálneho N bolo v simuláciách aj v hnojenom, aj v nehnojenom variante aplikované  $24 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  v maštalnom hnoji na jeseň pred cukrovou repou. Okrem toho bola vo všetkých simulovaných variantoch zaorávaná kukuričná slama. Zostavenie simulácií a nastavenie modelu umožnilo hodnotenie interaktívneho vplyvu koncentrácie  $\text{CO}_2$



v atmosfére, klimatických podmienok, vodného režimu pôdy a výživy dusíkom na jednotlivé hodnotené charakteristiky.

**Tab. 1 Predpokladaná koncentrácia CO<sub>2</sub> v atmosfére a koeficienty využitia žiarenia plodinami vo vybraných rokoch podľa scenárov SRES A2 a SRES B2**

**Tab. 1 Atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and crop radiation efficiency coefficients according to the SRES A2 and SRES B2 scenarios**

| Rok  | Koncentrácia CO <sub>2</sub> [ppm] |     | Zemiaky |       | Ozimná pšenica |       | Jarný jačmeň |       | Kukurica |       |
|------|------------------------------------|-----|---------|-------|----------------|-------|--------------|-------|----------|-------|
|      | A2                                 | B2  | A2      | B2    | A2             | B2    | A2           | B2    | A2       | B2    |
| 1990 | 336                                | 336 | 1.001   | 1.002 | 1.004          | 1.004 | 1.002        | 1.002 | 1.001    | 1.001 |
| 2000 | 365                                | 365 | 1.008   | 1.011 | 1.022          | 1.022 | 1.011        | 1.015 | 1.003    | 1.004 |
| 2010 | 396                                | 396 | 1.017   | 1.020 | 1.047          | 1.047 | 1.024        | 1.028 | 1.007    | 1.008 |
| 2020 | 428                                | 428 | 1.029   | 1.030 | 1.078          | 1.080 | 1.041        | 1.041 | 1.012    | 1.012 |
| 2030 | 473                                | 461 | 1.043   | 1.040 | 1.117          | 1.107 | 1.061        | 1.056 | 1.017    | 1.016 |
| 2040 | 530                                | 496 | 1.061   | 1.050 | 1.164          | 1.136 | 1.085        | 1.070 | 1.024    | 1.020 |
| 2050 | 597                                | 532 | 1.081   | 1.061 | 1.219          | 1.166 | 1.113        | 1.086 | 1.032    | 1.025 |
| 2060 | 674                                | 570 | 1.104   | 1.073 | 1.282          | 1.196 | 1.146        | 1.102 | 1.042    | 1.029 |
| 2070 | 762                                | 609 | 1.131   | 1.085 | 1.353          | 1.229 | 1.183        | 1.119 | 1.052    | 1.034 |
| 2080 | 860                                | 650 | 1.161   | 1.097 | 1.434          | 1.262 | 1.225        | 1.136 | 1.064    | 1.039 |
| 2090 | 971                                | 693 | 1.194   | 1.110 | 1.524          | 1.297 | 1.272        | 1.154 | 1.078    | 1.044 |
| 2100 | 1094                               | 737 | 1.231   | 1.123 | 1.625          | 1.333 | 1.324        | 1.173 | 1.093    | 1.049 |

**Tab. 2 Aplikované množstvá minerálneho dusíka v simuláciách modelom DAISY**

**Tab. 2 Amount of mineral nitrogen used in the simulations**

| plodina          | Pred sejbou [kg N.ha <sup>-1</sup> ] | Po sejbe [kg N.ha <sup>-1</sup> ] | Spolu [kg N.ha <sup>-1</sup> ] |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Ozimná pšenica   | 80                                   | 40                                | 120                            |
| Jarný jačmeň     | 40                                   | 20                                | 60                             |
| Kukurica na zrno | 120                                  | 0                                 | 120                            |
| Cukrová repa     | 40                                   | 60                                | 100                            |
| Lucerna          | 30                                   | 0                                 | 0                              |
| Zemiaky          | 80                                   | 20                                | 100                            |

## VÝSLEDKY

Podunajská nížina je najúrodnejšou poľnohospodárskou oblasťou Slovenska. Úrody poľných plodín v Podunajskej nížine sú v súčasnosti priaznivo ovplyvňované pôdnymi vlastnosťami a klimatickými činiteľmi (teplota, slnečný svit), limitované sú dostatkom vody. Zrážkové úhrny vo vegetačnom období sú nepostačujúce na pokrytie vlhovej potreby plodín. Podľa výsledkov simulácií bude voda aj v podmienkach klimatickej zmeny limitujúcim faktorom rastlinnej produkcie, hlavne u plodín s vegetačným obdobím v letných mesiacoch. Ďalšie uvažované faktory prostredia sa podľa týchto výsledkov budú prejavovať v priebehu uvažovaného obdobia na úrodách jednotlivých plodín rozdielne.

Simulované úrody jarného jačmeňa podľa oboch scenárov kolísali. Vypočítané úrody podľa scenárov boli primárne determinované koncentráciou CO<sub>2</sub> v atmosfére. V scenároch sa však prejavili niektoré negatívne tendencie vo vývoji klimatických prvkov, čo v konečnom dôsledku viedlo často k depresii vypočítaných úrod, napríklad v období 2031 – 2050 podľa scenára B2 a v období 2041 – 2060 podľa scenára A2 (tab. 3).

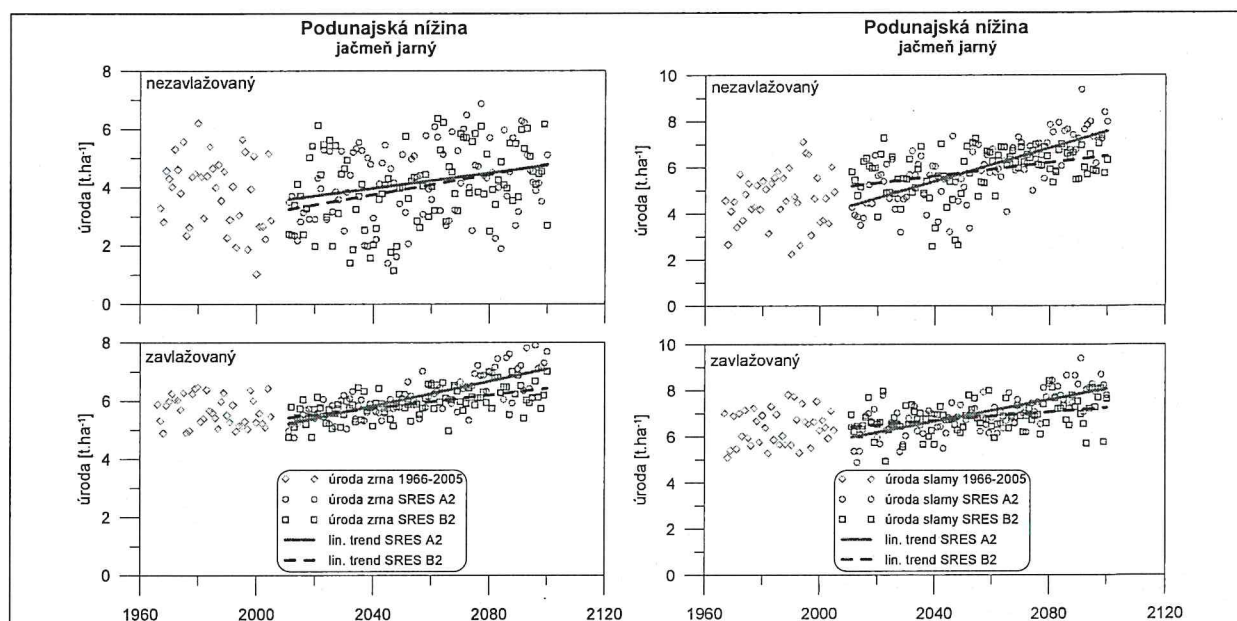
Výsledky simulácií preukázali, že pôsobenie jednotlivých uvažovaných faktorov na úrody je interaktívne. Nedostatok vody alebo dusíka, resp. s nedostatkom vody spojená nedostupnosť dusíka,

sa prejavila poklesom úrod. Variačný koeficient úrod na nezavlažovanej pôde sa v jednotlivých desaťročiach pohyboval medzi 20 – 40 %, kým na zavlažovanej pôde dosahoval len 5 – 8 %.

Tab. 3 Priemerné simulované úrody jarného jačmeňa [t.ha<sup>-1</sup>] na Podunajskej nížine v jednotlivých desaťročiach podľa scenárov klimatickej zmeny SRES A2 a SRES B2

Tab. 3 Average decennial simulated yields of rainfed and irrigated spring barley [t.ha<sup>-1</sup>] in Danubian Lowland according to the scenarios SRES A2 and SRES B2

| Obdobie   | nezavlažovaný |       |       |         |       |       | Zavlažovaný |       |       |         |       |       |
|-----------|---------------|-------|-------|---------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------|-------|-------|
|           | SRES A2       |       |       | SRES B2 |       |       | SRES A2     |       |       | SRES B2 |       |       |
|           | zrno          | slama | spolu | zrno    | slama | spolu | zrno        | slama | spolu | zrno    | slama | spolu |
| 2011-2020 | 3.22          | 4.57  | 7.79  | 3.41    | 5.58  | 8.99  | 5.57        | 6.43  | 12.00 | 5.47    | 6.64  | 12.10 |
| 2021-2030 | 4.01          | 4.97  | 8.97  | 4.43    | 5.57  | 10.00 | 5.77        | 6.29  | 12.06 | 5.67    | 6.47  | 12.15 |
| 2031-2040 | 4.44          | 5.73  | 10.17 | 2.74    | 5.02  | 7.76  | 5.77        | 7.02  | 12.79 | 6.08    | 6.42  | 12.51 |
| 2041-2050 | 3.70          | 5.07  | 8.78  | 3.13    | 4.92  | 8.04  | 5.82        | 6.68  | 12.50 | 5.96    | 6.75  | 12.70 |
| 2051-2060 | 4.04          | 5.95  | 9.99  | 3.89    | 6.21  | 10.10 | 6.18        | 6.83  | 13.01 | 5.94    | 7.09  | 13.03 |
| 2061-2070 | 4.42          | 6.12  | 10.54 | 4.60    | 6.34  | 10.94 | 6.16        | 6.91  | 13.07 | 6.06    | 6.82  | 12.88 |
| 2071-2080 | 4.98          | 6.44  | 11.42 | 4.80    | 6.44  | 11.25 | 6.60        | 7.29  | 13.89 | 6.15    | 6.94  | 13.09 |
| 2081-2090 | 3.84          | 7.09  | 10.93 | 4.28    | 6.26  | 10.53 | 6.82        | 8.00  | 14.82 | 6.42    | 7.34  | 13.76 |
| 2091-2100 | 4.92          | 7.74  | 12.66 | 4.89    | 6.36  | 11.25 | 7.10        | 8.16  | 15.26 | 6.17    | 7.11  | 13.28 |



Obr. 1 Simulované úrody zrna a slamy jarného jačmeňa [t.ha<sup>-1</sup>] na Podunajskej nížine v období 1966–2005 a podľa scenárov zmeny klímy SRES A2 a SRES B2

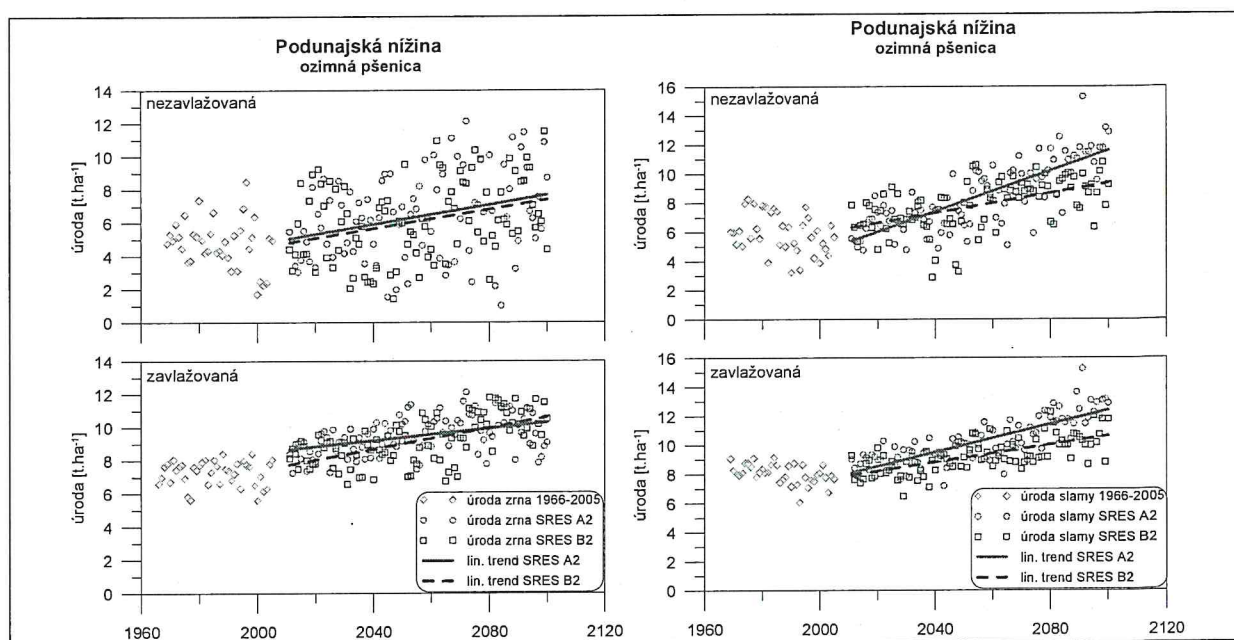
Fig 1 Simulated rainfed (top) and irrigated (bottom) spring barley grain (left) and straw (right) yields [t.ha<sup>-1</sup>] in Danubian Lowland in the period 1966–2005 and according to the scenarios SRES A2 and SRES B2

Podľa výsledkov simulácií je fertilizačný účinok CO<sub>2</sub> na úrody nadzemnej biomasy jarného jačmeňa výraznejší podľa scenára A2, ktorý predpokladá väčší nárast koncentrácie CO<sub>2</sub> v atmosfére (obr. 1). Nárast úrody biomasy podľa scenárov zmeny klímy je na nezavlažovanej pôde tvorený hlavne nárastom úrody slamy. Na nezavlažovanej pôde bol simulovaný pokles podielu zrna na úrode o 10 % v porovnaní s referenčným obdobím. Nižší podiel zrna na úrode pravdepodobne súvisí s výskytom vysokých teplôt v období dozrievania, čo spôsobuje predčasné dozrievanie a zabraňuje účinnému presunu asimilátov z tela rastliny do zrna (Šiška, 1997).



Tab. 4 Priemerné simulované úrody ozimnej pšenice [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] na Podunajskej nížine v jednotlivých desaťročiach podľa scenárov klimatickej zmeny SRES A2 a SRES B2  
Table 4 Average decennial simulated yields of rainfed and irrigated winter wheat [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] in Danubian Lowland according to the scenarios SRES A2 and SRES B2

| Obdobie   | nezavlažovaná |       |       |         |       |       | zavlažovaná |       |       |         |       |       |
|-----------|---------------|-------|-------|---------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------|-------|-------|
|           | SRES A2       |       |       | SRES B2 |       |       | SRES A2     |       |       | SRES B2 |       |       |
|           | zrno          | slama | spolu | zrno    | slama | spolu | zrno        | slama | spolu | zrno    | slama | spolu |
| 2011-2020 | 4.62          | 6.19  | 10.82 | 5.36    | 6.70  | 12.06 | 8.53        | 8.72  | 17.25 | 8.20    | 8.30  | 16.50 |
| 2021-2030 | 6.22          | 6.51  | 12.73 | 6.72    | 7.25  | 13.96 | 9.18        | 8.91  | 18.09 | 8.91    | 8.36  | 17.27 |
| 2031-2040 | 5.85          | 7.28  | 13.13 | 3.70    | 6.24  | 9.93  | 9.19        | 9.34  | 18.53 | 8.65    | 8.80  | 17.46 |
| 2041-2050 | 5.93          | 7.02  | 12.95 | 5.10    | 6.59  | 11.70 | 9.75        | 9.32  | 19.07 | 9.42    | 9.06  | 18.48 |
| 2051-2060 | 6.14          | 8.84  | 14.98 | 5.23    | 8.23  | 13.46 | 9.50        | 10.07 | 19.57 | 8.65    | 9.65  | 18.30 |
| 2061-2070 | 6.82          | 8.59  | 15.41 | 7.26    | 8.74  | 16.00 | 10.12       | 9.95  | 20.07 | 8.39    | 9.46  | 17.85 |
| 2071-2080 | 7.60          | 9.42  | 17.02 | 7.32    | 8.95  | 16.27 | 10.13       | 10.96 | 21.09 | 10.45   | 9.73  | 20.18 |
| 2081-2090 | 5.92          | 10.58 | 16.50 | 6.57    | 8.83  | 15.41 | 10.40       | 12.02 | 22.42 | 10.73   | 10.38 | 21.11 |
| 2091-2100 | 8.21          | 12.01 | 20.22 | 7.75    | 9.00  | 16.76 | 9.48        | 12.79 | 22.27 | 10.38   | 10.33 | 20.71 |



Obr. 2 Simulované úrody zrna a slamy ozimnej pšenice [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] na Podunajskej nížine v období 1966 – 2005 a podľa scenárov zmeny klímy SRES A2 a SRES B2

Fig 2 Simulated rainfed (top) and irrigated (bottom) winter wheat grain(left) and straw (right) yields [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] in Danubian Lowland in the period 1966 – 2005 and according to the scenarios SRES A2 and SRES B2

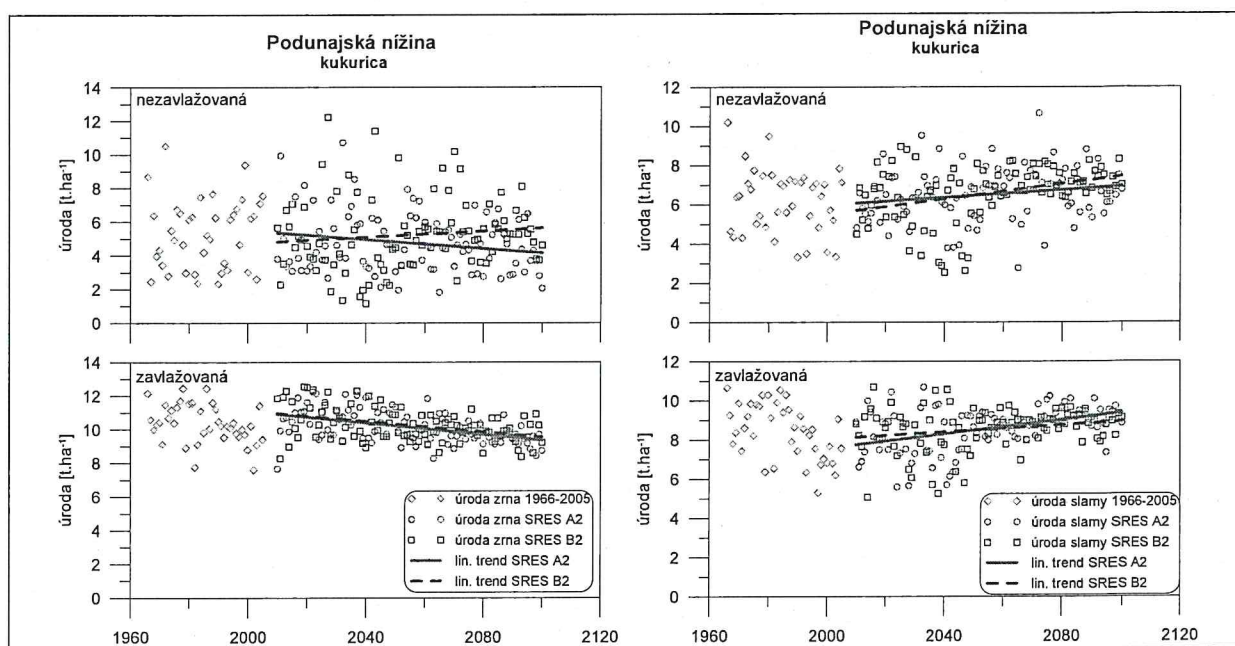
Simulované úrody ozimnej pšenice podľa scenárov zmeny klímy podobne ako u jarného jačmeňa podľa oboch scenárov kolísali (tab. 4). Rozptyl simulovaných hospodárskych úrod sa podľa scenárov výrazne zvýšil (obr. 2). Variačný koeficient úrod na nezavlažovanej pôde sa v jednotlivých desaťročiach pohyboval od 30 do 45 %, kým v referenčnom období bol menší ako 20 %. Na zavlažovanej pôde kolísal variačný koeficient okolo 10 %.

Vypočítané úrody podľa scenárov boli primárne determinované koncentráciou  $\text{CO}_2$  v atmosfére. Trend narastania úrod biomasy sa výrazne spomalil po dosiahnutí úrovne dvojnásobnej koncentrácie  $\text{CO}_2$  v atmosfére v porovnaní so súčasným stavom. Nárast úrody biomasy podľa scenárov zmeny klímy je na nezavlažovanej pôde tvorený hlavne nárastom úrody slamy. Na nezavlažovanej pôde bol simulovaný pokles podielu zrna na úrode biomasy o 3 - 6 % v porovnaní s referenčným obdobím.

Tab. 5 Priemerné simulované úrody kukurice [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] na Podunajskej nížine v jednotlivých desaťročiach podľa scenárov klimatickej zmeny SRES A2 a SRES B2

Table 5 Average decennial simulated yields of rainfed and irrigated maize [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] in Danubian Lowland according to the scenarios SRES A2 and SRES B2

| Obdobie   | nezavlažovaná |       |       |         |       |       | zavlažovaná |       |       |         |       |       |
|-----------|---------------|-------|-------|---------|-------|-------|-------------|-------|-------|---------|-------|-------|
|           | SRES A2       |       |       | SRES B2 |       |       | SRES A2     |       |       | SRES B2 |       |       |
|           | zrno          | slama | spolu | zrno    | slama | spolu | zrno        | slama | spolu | zrno    | slama | spolu |
| 2011-2020 | 5.09          | 6.20  | 11.28 | 5.13    | 6.41  | 11.54 | 10.67       | 9.16  | 19.82 | 10.84   | 9.16  | 20.00 |
| 2021-2030 | 4.89          | 5.95  | 10.84 | 5.41    | 6.76  | 12.17 | 10.60       | 9.00  | 19.60 | 10.93   | 8.97  | 19.89 |
| 2031-2040 | 5.90          | 7.17  | 13.07 | 3.99    | 4.73  | 8.72  | 11.04       | 9.71  | 20.76 | 10.39   | 8.97  | 19.36 |
| 2041-2050 | 4.29          | 5.57  | 9.86  | 4.49    | 5.56  | 10.05 | 10.48       | 8.93  | 19.40 | 10.83   | 9.32  | 20.15 |
| 2051-2060 | 5.46          | 6.86  | 12.33 | 5.18    | 6.81  | 11.99 | 9.85        | 8.74  | 18.59 | 9.97    | 8.83  | 18.80 |
| 2061-2070 | 4.24          | 6.38  | 10.62 | 6.64    | 7.30  | 13.94 | 9.95        | 8.53  | 18.48 | 10.02   | 8.66  | 18.68 |
| 2071-2080 | 4.33          | 7.32  | 11.65 | 5.22    | 7.39  | 12.60 | 9.81        | 9.32  | 19.13 | 9.92    | 8.87  | 18.79 |
| 2081-2090 | 4.66          | 6.50  | 11.16 | 5.56    | 7.10  | 12.66 | 9.63        | 9.38  | 19.01 | 9.94    | 9.03  | 18.97 |
| 2091-2100 | 4.00          | 6.80  | 10.80 | 5.41    | 7.34  | 12.75 | 9.30        | 9.10  | 18.39 | 9.60    | 8.67  | 18.27 |



Obr. 3 Simulované úrody zrna a slamy kukurice [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] na Podunajskej nížine v období 1966 – 2005 a podľa scenárov zmeny klímy SRES A2 a SRES B2

Fig 3 Simulated rainfed (top) and irrigated (bottom) maize grain (left) and straw (right) yields [ $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] in Danubian Lowland in the period 1966 – 2005 and according to the scenarios SRES A2 and SRES B2

Výsledky simulácií teda ukázali okrem už avizovaného vplyvu fertilizačného účinku zvýšenej koncentrácie  $\text{CO}_2$  a klimatických faktorov (Šiška, Takáč a Igaz, 2004), aj významný vplyv dusíka na tvorbu hospodárskych úrod pšenice. V období po dosiahnutí dvojnásobnej koncentrácie  $\text{CO}_2$  v atmosfére sa vo výsledkoch simulácií na zavlažovanej pôde začal objavovať aj dusíkový stres, ako dôsledok zvýšených nárokov plodiny na dusík vplyvom väčšieho objemu biomasy.

Kukurica je v porovnaní s inými hodnotenými plodinami špecifická, nakoľko podľa typu fotosyntézy patrí do skupiny rastlín C4, ktoré sú menej citlivé na zmeny koncentrácie  $\text{CO}_2$ . Priemerné simulované úrody kukurice v jednotlivých desaťročiach sú zhrnuté v tab. 5. Výška hospodárskych úrod bola v prvom rade ovplyvnená dostatkom vody. Vyššia variabilita hospodárskych úrod kukurice bola na základe simulácií zistená na nezavlažovanej pôde, kde sa variačný koeficient v jednotlivých



desaťročiach pohyboval od 23 do 60 %. Závlaha prispievala k stabilizácii výšky hospodárskych úrod, keď variačný koeficient úrod zrna v jednotlivých desaťročiach dosahoval 5 – 15 %.

Na základe výsledkov hospodárskych úrod kukurice bol pri nezavlažovanej kukurici podľa scenára A2 zistený pokles úrod zrna, naopak, podľa scenára B2, nepatrný nárast. Na zavlažovanej pôde bol simulovaný mierny pokles úrod. Fertilizačný účinok koncentrácie CO<sub>2</sub> vzhľadom na typ fotosyntézy kukurice sa na simulovaných úrodách neprejavil. Pokles hospodárskych úrod možno pripísať rýchlejšiemu dozrievaniu, keď termín zberu sa podľa výsledkov simulácií urýchlil ku koncu hodnoteného obdobia o viac ako mesiac.

## ZÁVER

Dôsledky zmeny klímy na úrody poľných plodín boli hodnotené agroekologickým modelom DAISY. V simuláciách bolo zohľadnené postupné zvyšovanie koncentrácie CO<sub>2</sub> v atmosfére podľa emisných scenárov SRES A2 a SRES B2. Meteorologické údaje boli podľa emisných scenárov generované modelom všeobecnej cirkulácie atmosféry CCCM.

Výsledky simulácií potvrdili predpokladané urýchlenie vývoja poľných plodín v dôsledku zvýšenia teplôt vzduchu. Vypočítané úrody hustosiatych obilnín podľa scenárov boli primárne determinované koncentráciou CO<sub>2</sub> v atmosfére. Na simulovaných úrodách kukurice sa fertilizačný účinok zvýšenej koncentrácie CO<sub>2</sub> neprejavil. Niektoré negatívne tendencie vo vývoji klimatických prvkov v scenároch zmeny klímy viedli často k depresii vypočítaných úrod ako aj k nárastu ich variability. Bol vypočítaný pokles podielu zrna na úrode biomasy.

Hlavným limitujúcim faktorom úrod poľných plodín v nížinných oblastiach bola voda. Závlaha sa ukázala ako výrazný stabilizačný faktor výšky hospodárskych úrod. Obmedzenie závlahy v simuláciách na 10-dňový interval sa ukázalo ako postačujúce na zabezpečenie stabilizácie úrod, neumožnilo však plné využitie interakcie s fertilizačným účinkom atmosféry.

Prezentované výsledky boli získané v rámci riešenia úlohy č. 2004 SP 20/06K0A03/0000010 „Prebiehajúca klimatická zmena a jej dopady na rozvoj spoločnosti“ Štátneho programu výskumu a vývoja „Aktuálne otázky rozvoja spoločnosti“.

## LITERATÚRA

- ABRAHAMSEN, P., HANSEN, S., 2000. Daisy: An Open Soil – Plant - Atmosphere System Model. *Environmental Modelling & Software*, 15. 313-330.
- BÍZIK, J., ZÁPOTOČNÝ, V., MALÁ, Š., ĎURIGA, K., MUCHA, V., 2002. Racionálne využívanie závlahovej vody a zdrojov živín v intenzívnom poľnohospodárstve. Záverečná správa výskumnej úlohy. SVP, š. p. Hydromeliorácie, Bratislava.
- HANSEN, S., 2000. DAISY, a Flexible Soil – Plant - Atmosphere System Model. Equation Section 1. The Royal Veterinary and Agricultural University. Copenhagen. 1-47.
- HANSEN, S., JENSEN, H. E., NIELSEN, N. E., SVENDSEN, H. 1990. DAISY – A Soil Plant System Model. Danish simulation model for transformation and transport of energy and matter in the soil-plant-atmosphere system. National Agency for Environmental Protection, Copenhagen, 272 p. ISBN 87-503-8790-1.
- HEIDMANN, T., TOFTENG, C., ABRAHAMSEN, P., PLAUBORG, F., HANSEN, S., BATTILANI, A., COUTINHO, J., DOLEŽAL, F., MAZURCZYK, W., RIUZ, J. D. R., TAKÁČ, J., VACEK, J. 2008. Calibration Procedure for a Potato Crop Growth Model Using Information from across Europe. *Ecol. Model.* 211, 2008, 209-223.
- LAPIN, M. a kol., 2005. Spracovanie regionálnych scenárov klimatickej zmeny a metodické postupy pre ich aplikáciu. In: TAKÁČ, J., LAPIN, M., ŠÍŠKA, B., VALŠÍKOVÁ, M., 2005. Očakávané dôsledky klimatickej zmeny na poľnohospodárstvo a adaptačné opatrenia zahrňujúce technológie pestovania plodín, riadenie poľnohospodárskej výroby a reguláciu vodného a energetického režimu. Úloha štátneho programu výskumu a vývoja Aktuálne otázky rozvoja spoločnosti. Záverečná správa za ČÚ 01. Hydromeliorácie, š. p., Bratislava, 20-41.
- MELO, M. 2004. Teplota vzduchu, atmosferické zrážky a merná vlhkosť vzduchu v Hurbanove podľa pôvodných emisných scenárov „IS92a“ a nových emisných scenárov „A2-SRES“ A „B2-SRES“. In: „Zmeny podnebia – extrémny počasie – organizmy a ekosystémy“ [CD-ROM]. Viničky (Bioklimatologické pracovné dni 2004).
- ŠÍŠKA, B., 1997. Predpokladané dopady zvýšenej koncentrácie CO<sub>2</sub> na úrody jarného jačmeňa v oblasti Podunajskej nížiny. *Acta horticulturae et regio tecturae* 2: 107-120.
- ŠÍŠKA, B., MALÍŠ J., 1997. Slovak Agricultural University, Nitra, Slovakia: Supposed Changes in Production of Winter Wheat in Consequence of Climate Change in Danubian Lowland up to Year 2075., Bratislava 1997, NKP 7: 84-92.
- ŠÍŠKA, B. – ŠPÁNIK, F. 1999. Predpokladané zmeny fenologických pomerov pšenice letnej formy ozimnej a jarného jačmeňa v oblasti Podunajskej nížiny do roku 2075 ako dôsledok klimatickej zmeny. *Meteorologický časopis*, 2, 1999, 2, s 9.
- ŠÍŠKA, B., TAKÁČ, J., IGÁZ, D. 2004. Môžeme očakávať zmeny v rozdelení výšky úrod obilnín v oblasti Podunajskej nížiny v dôsledku klimatickej zmeny? In: Bioklimatologické pracovné dni. Medzinárodná vedecká konferencia. Viničky. SPU Nitra, 2004, 16 s. ISBN 80-8069-402-8.
- ŠPÁNIK, F., ŠÍŠKA, B., KOSTREJ, A., LIŠKA, E., TAKÁČ, J., 1997. Climate Change Impacts on Plant Production and Adaptive Measures. Final Report. Slovak Republic's Country Study, AgTU (VŠP) Nitra, 1-41.
- TAKÁČ, J. 2001. Dôsledky zmeny klímy na bilanciu vody v poľnohospodárskej krajine. NKP SR, 2001, zv. 10, Bratislava, s. 16-26.
- TAKÁČ, J., KOŠČ, V. 1995. Nenasýtená zóna a poľnohospodárstvo. Záverečná správa za podporný projekt k projektu PHARE/EC/WAT/1 Danubian Lowland Ground Water Model. Bratislava : VÚZH, 1995. 64 s.



# CLIMATE CHANGE IMPACTS ON CROP YIELDS ON DANUBIAN LOWLAND

Jozef Takáč<sup>1</sup> - Bernard Šiška<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Soil Science and Conservation Research Institute Bratislava, [takac@vupu.sk](mailto:takac@vupu.sk)

<sup>2</sup> Horticulture and Landscape Engineering Faculty, Slovak University of Agriculture in Nitra,  
[bernard.siska@uniag.sk](mailto:bernard.siska@uniag.sk)

## SUMMARY

Climate change impacts on crop yields in conditions of Danubian Lowland were evaluated by agroecological model DAISY. Effect of gradual increase of CO<sub>2</sub> concentration was taken into account both for yield simulation and climate change scenarios. Emission scenarios SRES A2 and SRES B2 for the period 2001 - 2100 were applied. Daily meteorological data for the climate change scenarios were generated according to general circulation model CCCM 2000. Meteorological data for the reference period 1966 - 1985 came from climatic station Hurbanovo.

Rainfed as well as irrigated crop rotation were simulated. Irrigation was applied automatically after decreasing of soil water content below 50 % of available water capacity. Interval between irrigation was set up to 10 days. This restriction assumption was chosen because limited irrigation water supply is expected. Nitrogen non stressed full irrigated variant was not simulated as this one was evaluated in the past.

Acceleration of crop development was found as a consequence of increasing air temperatures. Simulated yields of spring barley and winter wheat were influenced first of all by CO<sub>2</sub> concentration defined by emissions and climate change scenarios. Increase of CO<sub>2</sub> concentration and consequent increase of photosynthesis rate will positively affect the yields of spring barley and winter wheat, especially towards more distanced time horizons. Effect of CO<sub>2</sub> concentration on formation of maize yields was not found. Course of meteorological elements generated by general circulation models caused some negative effects which frequently led to the fall of simulated yields.

Top dry biomass yield will be formed mainly by straw yield in future climate according to the climate change scenarios. Simulated harvest index dropped as compared with reference period. Grain yields would be probably reduced by high temperatures during ripening.

Soil water content was the main limiting factor of crop yields. Irrigation was confirmed as an effective adaptive measure reducing yield loss and significant factor stabilizing yields. If compare rainfed and irrigated crop rotation variants, variability of yields is significantly smaller in irrigated ones. Despite the fact that shortage of water does not allow fully to utilize positive effect of CO<sub>2</sub> concentration on yield formation the 10-day irrigation interval was found as the sufficient interval for yield stabilisation.





# VÝSKYT SUCHÝCH A VLNKÝCH OBDOBÍ VO VEGETAČNÝCH STUPŇOCH ZÁPADNÝCH KARPÁT NA SLOVENSKU: ANALÝZA ČASOVÉHO RADU 1951-2005 A PROGNOZA OČAKÁVANÝCH ZMIEN KLÍMY

Jaroslav Škvarenina,<sup>1)</sup> Ján Tomlain,<sup>2)</sup> Ján Hrvol,<sup>2)</sup> Jana Škvareninová,<sup>3)</sup> Helena Hlavatá<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, Technická univerzita Zvolen

<sup>2)</sup>Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave

<sup>3)</sup>Fakulta ekológie a environmentalistiky, Technická univerzita vo Zvolene

<sup>4)</sup>Slovenský hydrometeorologický ústav, pobočka Košice

## 1. ÚVOD

Meteorologický a bioklimatologický slovník definujú sucho z viacerých hľadísk. V princípe však ako stav nedostatku vody v pôde, rastlinách a atmosfére (KREČMER 1980). Predstavuje zložitý komplex činiteľov, ktorých pôsobením vzniká nedostatok vlhky. V krajine inak s dostatkom vody, sa chápe ako mimoriadny jav, prípadne sa považuje až za živelnú pohromu. Sucho v lesníctve predstavuje významný poveternostný stresový faktor lesných ekosystémov. Možno povedať, že až najvýznamnejší, nakoľko okrem priamych škôd prísuškami rastlín, vyvoláva celý rad ďalších synergicky podmienených efektov (nadmerná transpirácia, úpal kôry, úhyn zmladenia a obnovy, predčasný opad asimilačných orgánov, predčasný nástup jesenných fenofáz rastlín, nedostatočný vývoj budúcoročných vegetatívnych a generatívnych púčikov, poškodzovanie a narušovanie jemných koreňových systémov, blokovanie mykorízy, obmedzenie mikrobiálnej činnosti pôdy a jej zakysľovanie, nadmernú eutrofizácia vôd, premnoženie biotických škodcov, lesné požiare a pod. (DITMAROVÁ *et al.* 2006, HAYES *et al.* 1999, HEIM 2002, HOLÉCY 2004, PAGANOVÁ 2007, STŘELCOVÁ *et al.* 2004,).

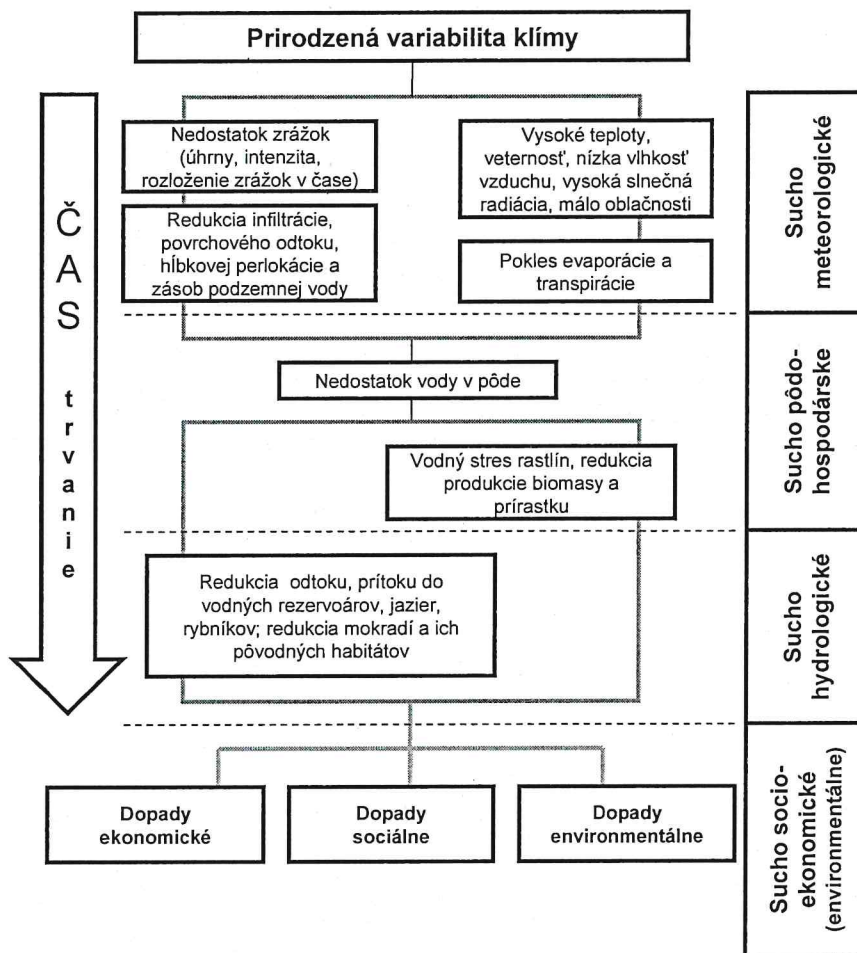
Sucho je normálna, rekurentná črta klímy mierneho klimatického pásma. Sucho sa môže vyskytovať skoro všade, hoci jeho prejavy môžu byť odlišné od oblasti k oblasti (HAYES *et al.* 1999, Kharel - Bruins 2004). Definovanie sucha je zložitá, závisí od regionálnych rozdielov, a od potrieb jednotlivých disciplín. Sucho je prechodná odchýlka a nie je totožné s pojmom aridita, ktorý je obmedzený na oblasti s nízkymi zrážkami a predstavuje trvalú črtu klímy.

Sucho predstavuje neočakávateľné prírodné riziko. Sucho vyjadruje relatívne krátkodobú zápornú odchýlku vodnej bilancie od normálu a výrazne ovplyvňuje celý rad aktivít ľudskej spoločnosti (HAYES *et al.* 1999, HEIM 2002, DUBROVSKÝ *et al.* 2005, ŠIŠKA a SAMUHEL 2007, ŠIŠKA *et al.* 2005). Väčšina autorov rozlišuje sucho meteorologické, poľnohospodárske, hydrologické a socioekonomické (obrázok 1). Primárnou príčinou sucha na Slovensku je bez výnimky deficit zrážok v určitom časovom intervale, ako napr. v priebehu vegetačného obdobia, alebo jeho časti. Spolupôsobenie ostatných meteorologických faktorov, napr.: vysoká teplota, intenzívne prúdenie vzduchu, nízka relatívna vlhkosť vzduchu, môžu tiež významne prispieť k prehĺbeniu tohto javu.

Nadmorská výška a reliéf terénu, ako silne diferencujúce faktory klímy, zohrávajú v orograficky členitom území Slovenska mimoriadne významnú úlohu. So stúpajúcou nadmorskou výškou sa podstatne mení radiačná, termická i vodná bilancia krajiny. Na prvoradý význam klímy z hľadiska prirodzenej vegetácie upozorňuje už ZLATNÍK (1976). Opisuje vegetačné stupne (vs) ako základné jednotky pre nepriame vyjadrenie výškovej klímy (vertikálnej stupňovitosti) pomocou vegetácie (biocenózy). Ich rozmanitosť je podmienená klimatickými rozdielmi vplyvom nadmorskej výšky, expozície a reliéfu, ktoré vyplývajú z konfigurácie terénu. Pôsobením týchto činiteľov vznikli biogeocenózy zoskupené do 9 vegetačných stupňov. Na území Slovenska sa vyskytujú podľa ZLATNÍKA (1976) vegetačné stupne nazvané podľa zastúpenia, čiže dominancie významných stromových alebo krovitých edifikátorov, nie teda podľa ich optima výskytu vo vegetačných stupňoch. Sú to vegetačné stupne (vs): 1. dubový (db), 2. bukovo-dubový (bk-db), 3. dubovo-bukový (db-bk), 4.

bukový (bk), 5. jedľovo-bukový (jd-bk), 6. smrekovo-bukovo-jedľový (sm-bk-jd), 7. smrekový (sm), 8. kosodrevinový (ks), 9. alpínsky (nelesný vs).

Vegetačné stupne nižších polôh, 1. vs dubový, 2. vs bukovo-dubový a 3. vs dubovo-bukový, sú vo vegetačnom období (marec - september) pomerne suché. Deficit zrážok dosahuje 100 až 300 mm vo vegetačnom období. Až 4. vs bukový je charakteristický vyrovnanou klimatickou vodnou bilanciou. Vo vyšších vegetačných stupňoch (5. vs jedľovo-bukový a 6. vs smrekovo-bukovo-jedľový), humidita klímy narastá. Humidnosť klímy patrí k základným ekologickým podmienkam horských lesov. Vodná bilancia dosahuje najvyšších hodnôt v 8. vs kosodrevinovom a 9. vs alpínskom, kde množstvo zrážok výrazne prevyšuje evaporačné nároky atmosféry. V ročnej bilancii dosahuje nadbytok vody zo zrážok cca 1000 mm (ŠKVARENINA *et al.* 2004).



Obr. 1 Definovanie chápania sucha pre rôzne sektory činností a jeho časová postupnosť (podľa HAYES *et al.* 1999, HEIM 2002)

Fig. 1 Definition understanding drought for different sector activities and time sequence of drought (according to HAYES *et al.* 1999, HEIM 2002)

Experimentálne bolo dokázané, že v optimálnych podmienkach rastu rastlín aktuálna evapotranspirácia dosahuje hodnoty potenciálnej evapotranspirácie (maximálne možnej evapotranspirácie v daných klimatických podmienkach pri dostatočnej vlhkosti pôdy –  $E_0$ ). Preto podiel  $E/E_0$  (relatívna evapotranspirácia) a index sucha ( $E_0/P$ ),  $P$  – zrážkový úhrn, umožňujú kvantifikovať deficit vody v koreňovej zóne pre optimálny rast rastlín (Budyko, Zubenok 1961).

Uvedené dva indexy ponúkajú charakteristiku celkových environmentálnych podmienok a procesov na zemskom povrchu. Aproximujú schopnosť zrážok poskytnúť prirodzenej vegetácii vodu potrebnú pre neprerušovaný proces evapotranspirácie. Preto sú často využívané v ekologických štúdiách (NOVÁK 1995, TOMLAIN 1991, ŠPÁNIK, ŠIŠKA 2000, ARORA, 2002, GONGALSKY *et al.* 2004).



## 2. MATERIÁL A METODIKA

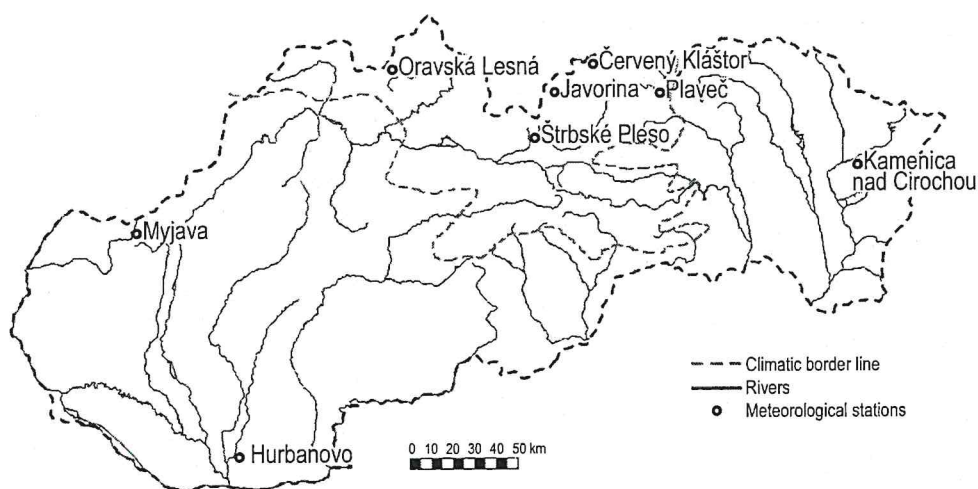
Relatívna evapotranspirácia a index sucha vyjadrujú funkčnú závislosť medzi zložkami rovnice vodnej a energetickej bilancie povrchu (celková bilancia žiarenia, teplota a vlhkosť vzduchu, turbulentný stav atmosféry, rozdiel v napätí nasýtenia pri teplote vyparujúceho sa povrchu a napätím vodnej pary vo vzduchu, atmosférické zrážky, zmena kritickej vlhkosti pôdy počas roka a tok tepla v pôde). Model vychádzajúci zo spoločného riešenia rovníc energetickej a vodnej bilancie povrchu bol aplikovaný pre 8 staníc na území Slovenska. Vstupnými údajmi modelu sú: teplota a vlhkosť vzduchu, oblačnosť, zrážky a počet dní so snehovou pokrývkou. Podľa Budyka a Zubenokovej (Budyko 1980) potenciálna evapotranspirácia bola počítaná z rovnice turbulentnej difúzie vodnej pary v atmosfére a aktuálna evapotranspirácia je úmerná potenciálnej evapotranspirácii podľa vzťahu

$$E = E_o \cdot W_p / W_o,$$

$W_p$  je priemerný obsah vody v najvyššej 1 m hrubej povrchovej vrstve pôdy a  $W_o$  je kritická vlhkosť pôdy, pri ktorej  $E = E_o$ .  $W_o$  nadobúda spravidla 100 až 200 mm vody, pričom táto hodnota sa počas roka mení. Priemerná vlhkosť pôdy  $W_p = (W_1 + W_2) / 2$  je určovaná z rovnice vodnej bilancie metódou postupných priblížení.  $W_1$  je vlhkosť pôdy na začiatku mesiaca a  $W_2$  na jeho konci.

Tab.1 udáva priemerné ročné hodnoty indexu sucha ( $E_o/P$ ), potenciálnej evapotranspirácie ( $E_o$ ), zrážok ( $P$ ), aktuálnej evapotranspirácie ( $E$ ) a relatívnej evapotranspirácie ( $E/E_o$ ) za obdobie 1951-2005 na vybraných staniciach Slovenska, ako aj ich zatriedenie do jednotlivých vegetačných stupňov (vs). Plošné rozloženie staníc prezentuje obrázok 2, ktorý zároveň podáva polohu hlavnej klimatickej čiary podľa ZLATNÍKA (1959).

Vzhľadom na skutočnosť, že v súčasnosti disponujeme len obmedzeným počtom klimatických staníc, pre ktoré je vykalkulovaná potenciálna evapotranspirácia, pristúpili sme k zobrazeniu klimaticko-hydrických pomerov príslušného vs metódou reprezentatívnej klimatickej stanice pre daný vegetačný stupeň. Za pomoci mapy vegetačných stupňov (RAUŠER - ZLATNÍK 1966) a typologických máp skupín lesných typov (mierka 1:200 000) sme klimatické stanice zaradili do príslušných vegetačných stupňov: 1. - 8. vs (pre 9. vs neboli získané podklady).



Obr. 2 Mapa SR s polohou jednotlivých meteorologických staníc reprezentujúcich príslušné vegetačné stupne. Na mape je čiarkovane zobrazená aj klimatická deliaca čiara (climatic border line) a riečna sieť – plná čiara

Fig. 2 The map of Slovakia with particular meteorological stations that represent conditions in the vegetations stages. In the map there is displayed the climatic border line (dashed line) and rivers (solid line)

Tab. 1 Nadmorská výška staníc, priemerné hodnoty zrážok (P) v mm, potenciálnej evapotranspirácie ( $E_o$ ) a aktuálnej evapotranspirácie (E) v mm, relatívnej evapotranspirácie ( $E/E_o$ ) v % a indexu sucha ( $E_o/P$ ), pre vybrané meteorologické stanice zaradené do príslušných vegetačných stupňov, pre časové obdobie rokov 1951-2005

Tab. 1 Average annual values of precipitation (P), potential ( $E_o$ ), actual evapotranspiration (E), drought index ( $E_o/P$ ), in mm and relative evapotranspiration ( $E/E_o$ ) in % at chosen localities of Slovakia for the period 1951-2005

| Meteorologická stanica | H (m n.m.) | P    | $E_o$ | E   | $E/E_o$ | $E_o/P$ | Vegetačný stupeň                |
|------------------------|------------|------|-------|-----|---------|---------|---------------------------------|
| Hurbanovo              | 115        | 537  | 748   | 432 | 58      | 1,44    | 1. dubový                       |
| Myjava                 | 375        | 671  | 627   | 450 | 72      | 0,96    | 2. bukovo-dubový                |
| Kamenica n. C.         | 178        | 722  | 644   | 501 | 78      | 0,92    | 3. dubovo-bukový                |
| Plaveč                 | 488        | 693  | 522   | 451 | 87      | 0,78    | 4. bukový                       |
| Červený Kláštor        | 474        | 755  | 507   | 457 | 90      | 0,69    | 5. jedľovo-bukový               |
| Oravská Lesná          | 780        | 1114 | 456   | 432 | 95      | 0,42    | 6. smrekovo-bukovo-jedľový      |
| Tatranská Javorina     | 1020       | 1253 | 422   | 412 | 97      | 0,35    | 7. smrekový                     |
| Štrbské Pleso          | 1360       | 995  | 435   | 407 | 94      | 0,45    | 7. smrekový<br>8. kosodrevinový |

### 3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

#### 3.1 Dlhodobé priemerné hodnoty relatívnej evapotranspirácie a indexu sucha

Tabuľka 1 udáva priemerné ročné hodnoty indexu sucha ( $E_o/P$ ), potenciálnej evapotranspirácie ( $E_o$ ), zrážok (P), aktuálnej evapotranspirácie (E) a relatívnej evapotranspirácie ( $E/E_o$ ) za obdobie 1951-2005 na vybraných staniciach Slovenska.

V priemere najmenej ročné hodnoty  $E/E_o$  za spracované obdobie 1951-2005 boli zaznamenané na Podunajskej nížine (1. vs dubový), t.j. v oblasti s vysokými úhrnmi potenciálnej evapotranspirácie (nad 700 mm) a s ročnými zrážkami menšími ako 550 mm. V horských oblastiach Slovenska, ktoré sa vyznačujú dostatočne vysokými úhrnmi zrážok počas celého roka, sa aktuálna evapotranspirácia len málo líši od potenciálnej evapotranspirácie (menej ako 4 %). Rastom zrážok sa aktuálna evapotranspirácia sa s nadmorskou výškou zväčšuje až po určitú hranicu (cca po 3. vs dubovo – bukový), potom ako výsledok poklesu celkovej bilancie žiarenia (zväčšovanie oblačnosti, relatívnej vlhkosti vzduchu, počtu dní so snehovou pokrývkou, poklesom teploty povrchu pôdy a vzduchu) úhrny aktuálnej evapotranspirácie sa s výškou zmenšujú. Priemerné ročné hodnoty potenciálnej evapotranspirácie sa menia od 750 mm v južnej časti Podunajskej nížiny (1. vs dubový), do 350 mm a menej v najvyšších horských polohách (smrekový, kosodrevinový až alpínsky stupeň).

Obrázky 3 a 4 prinášajú regresnú závislosť ročných hodnôt relatívnej evapotranspirácie  $E/E_o$  a indexu sucha  $E_o/P$  od nadmorskej výšky za obdobie 1951-2005.

**Relatívna evapotranspirácia  $E/E_o$ .** je výborný ukazovateľ vlhového zabezpečenia rastlín. Dosahuje v najnižších oblastiach hodnoty okolo 60 %. Smerom k vyšším vegetačným stupňom hodnota tohto pomeru rastie, pričom vo 4 vs už dosahuje 90 % a viac. V horských polohách však tento ukazovateľ čiastočne stráca na presnosti. Od 5 vs je rozlišovacia schopnosť  $E/E_o$  už len minimálna (1 - 5 %), a to v dôsledku vyrovnávania sa hodnôt potenciálnej a skutočnej evapotranspirácie. Obrázok 3 podáva vzťah relatívnej evapotranspirácie od rastúcej nadmorskej výšky.



**Index sucha  $E_0/P$**  vyjadruje vzťah medzi energetickými možnosťami a zrážkovými vstupmi v uvažovanom vegetačnom stupni. Tento index bol použitý pre hodnotenie bioklimatologických regiónov v celoplanetárnom merítku (BUDYKO 1955, 1971, LARCHER 1984, BAUMGARTNER a LIEBSCHER 1990). Index  $E_0/P$  nad očakávanie dokázal veľmi citlivo reagovať na výškové zmeny bioklimatologických podmienok aj na relatívne malom území Slovenska (obrázok 4). BUDYKO (1980) uvádza, že ak je  $E_0/P > 1$ , územie začína mať arídny charakter (lesostep, step). Ak je hodnota indexu v intervale  $0,3 < E_0/P < 1$ , charakterizuje sa bióm ako lesný. Pri hodnote  $E_0/P < 0,3$  má ekosystém charakter tajgy (tundry), v našom ponímaní aj horského lesa temperátnej zóny. Vidíme, že uvedené rozdelenie plne platí aj na Slovensku.

BOCHENEK *et al.* (2005) zhodnotili index sucha vo vegetačnom období (apríl – september) pre územie Poľska. Zistili hodnoty od 1,6 (v centrálnej časti krajiny) do hodnoty 1,0 pre oblasti, kde letné zrážky boli vyššie ako potenciálna evapotranspirácia, t.j. horské polohy v južných regiónoch Poľska.

### 3.2 Dlhodobý priebeh relatívnej evapotranspirácie a indexu sucha

Ako sme už popísali v metodologickej časti, vyhodnotili sme ročné hodnoty **relatívnej evapotranspirácie** za obdobie 1951-2005. Zistili sme nasledovné hraničné hodnoty: v Hurbanove sa hodnoty  $E/E_0$  menili od 38 % v roku 1990 ( $P = 422$  mm) do 86 % v roku 1965 ( $P = 827$  mm), v Myjave od 54 % v roku 2003 ( $P = 445$  mm) do 92 % v roku 1965 ( $P = 785$  mm), v Kamenici nad Cirochou od 58 % v roku 1961 ( $P = 400$  mm) do 95 % v roku 1985 ( $P = 911$  mm), v Plavči od 70 % v roku 1964 ( $P = 627$  mm) do 98 % v roku 1997 ( $P = 780$  mm), v Červenom Kláštore od 71 % v roku 1964 ( $P = 530$  mm) do 99 % v roku 1975 ( $P = 850$  mm), v Oravskej Lesnej od 74 % v roku 1992 ( $P = 980$  mm) do 99 % v roku 1958 ( $P = 1389$  mm), v roku 1965 ( $P = 1320$  mm), v roku 1968 ( $P = 1133$  mm), v roku 1979 ( $P = 1051$  mm), v roku 1991 ( $P = 986$  mm), v roku 2004 ( $P = 1256$  mm), v roku 2005 ( $P = 1342$  mm), v Ždiari-Javorine od 84 % v roku 2000 ( $P = 1389$  mm) do 100 % v roku 1997 ( $P = 1516$  mm) a na Štrbskom Plese od 84 % v roku 2003 ( $P = 794$  mm) do 100 % v roku 1958 ( $P = 1160$  mm).

Ročné hodnoty **indexu sucha** sa v danom období menili od 0,81 v roku 1965 ( $P = 827$  mm) do 2,65 v roku 2003 ( $P = 333$  mm) v Hurbanove, od 0,69 v roku 1965 ( $P = 785$  mm) do 1,71 v roku 2003 ( $P = 445$  mm) v Myjave, od 0,69 v roku 1952 ( $P = 718$  mm) do 1,33 v roku 2003 ( $P = 556$  mm) v Kamenici nad Cirochou, od 0,50 v roku 1985 ( $P = 930$  mm) a v roku 2005 ( $P = 883$  mm) do 1,28 v roku 1961 ( $P = 477$  mm) v Plavči, od 0,46 v roku 1980 ( $P = 908$  mm) do 1,03 v roku 1971 ( $P = 548$  mm) v Červenom Kláštore, od 0,28 v roku 1974 ( $P = 1463$  mm) do 0,55 v roku 1959 ( $P = 860$  mm) v Oravskej Lesnej, od 0,20 v roku 1980 ( $P = 1630$  mm) do 0,51 v roku 1951 ( $P = 903$  mm) a v roku 1961 ( $P = 972$  mm) v Ždiari-Javorine a od 0,28 v roku 2004 ( $P = 1299$  mm) do 0,73 v roku 1986 ( $P = 690$  mm) na Štrbskom Plese.

Rozdiely vo výskyte extrémnych ročných hodnôt  $E/E_0$  a  $E_0/P$  sú spôsobené časovou a priestorovou variabilitou energetických možností evapotranspirácie a poľa zrážok na území Slovenska. Obrázky 5 - 20 prinášajú dlhodobý chod ročných hodnôt relatívnej evapotranspirácie a indexu sucha na vybraných staniciach Slovenska za obdobie 1951 až 2005. Z obrázkov vidíme, že na Podunajskej a Záhorskej nížine (1. vs dubový a 2. vs bukovo-dubový) ročné hodnoty  $E/E_0$  majú klesajúcu tendenciu a  $E_0/P$  sa postupne zväčšujú. V kotlinách a na severe Východoslovenskej nížiny ročné hodnoty  $E/E_0$  postupne rastú. Dostatok zrážok v horských oblastiach Slovenska pozorujeme počas celého roka, a preto priemerné ročné hodnoty  $E/E_0$  vykazujú len malé kolísanie.

V tabuľke 2 podávame výsledky Studentovho  $t$  testu významnosti korelačných koeficientov pre  $E/E_0$  (relative evapotranspiration) and drought index ( $E_0/P$ ), ako aj trend lineárnej regresie. Významne signifikantný trend k aridite sme zaregistrovali len v južných častiach Slovenska, na staniciach Hurbanovo a sčasti aj Myjava. Vysoko signifikantný trend k humidite sa ukázal na stanici Plaveč (severovýchod Slovenska), a to pre obidva hodnotiace indexy. Vysoko signifikantný rast humidity za 55 ročné obdobie sa vykazuje aj na severnej (náveternej) strane Tatier, na stanici Javorina. Pokles indexu sucha, rast humidity je tu podmienený hlavne rastom zrážok. Na stanici Kamenica nad Cirochou (sever Východného Slovenska), ale aj v Oravskej Lesnej (sever Stredného Slovenska) počas hodnoteného 55 ročného obdobia sa signifikantný trend nepreukázal ani v jednom z hodnotených indexov.

Tab. 2 Test významnosti korelačných koeficientov Studentovho t testu pre relatívnu evapotranspiráciu  $E/E_o$ , index sucha ( $E_o/P$ ) a ich trendy lineárnej regresie (pravdepodobnosť  $\alpha = 0.1$  \* málo významný,  $\alpha = 0.05$  \*\* významný,  $\alpha = 0.01$  \*\*\* veľmi významný,  $\alpha = 0.001$  \*\*\*\* vysoko významný, stupeň voľnosti  $n = 53$ )

Tab. 2 Results of the trend analysis performed on yearly data (1950 – 2005) for selected meteorological stations.  $E/E_o$  (relative evapotranspiration), drought index ( $E_o/P$ ) probability level \* $p < 0.1$ , \*\* $p < 0.05$ , \*\*\* $p < 0.01$ , \*\*\*\* $p < 0.001$ , n.s. - not significant

| Meteorologická stanica | $E/E_o = f(\text{rok})$ | $E_o/P = f(\text{rok})$ | Trend    |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| Hurbanovo              | **                      | ***                     | aridita  |
| Myjava                 | **                      | -                       | aridita  |
| Kamenica n. C.         | -                       | -                       | -        |
| Plaveč                 | ****                    | ****                    | humidita |
| Červený Kláštor        | *                       | **                      | humidita |
| Oravská Lesná          | -                       | -                       | -        |
| Tatranská Javorina     | -                       | ****                    | humidita |
| Štrbské Pleso          | -                       | *                       | humidita |

### 3.3 Odras humídnosti a arídnosti klímy vo vegetačno - bioklimatických pomeroch Slovenska

Územie Slovenska sa z hľadiska vegetačných pomerov delí na oblasť panonskú (oblasť panonskej nížiny), ovplyvňovanú klímou Stredozemného mora a na oblasť vnútrokarpatskú, ovplyvňovanú suboceánskou klímou horskou a klímou Severného a Baltického mora. Rozhranie týchto oblastí vytýčil ZLATNÍK (1959) tzv. hlavnou klimatickou čiarou Slovenska (climatic border line), ktorou karpatský oblúk oddeľuje dve významné európske klimatické oblasti, obrázok 2. Oblasť na sever od čiar je nápadne vlhšia a chladnejšia, oblasť južná je suchšia a teplejšia. V severnej časti sa mimoriadne uplatňuje napríklad smrek. V južnej časti sa takto smrek neprejavuje vôbec, alebo len v smrekovom stupni.

Z výsledkov v tabuľke 2 a v obrázkoch 5-20 vidíme, že meteorologické stanice na juhu Slovenska (Hurbanovo, Myjava) majú prevažne trend arídny. Stanice na sever od klimatickej deliacej čiar majú v časovom rade 1951 - 2005 trend prevažne humídny. Podobné výsledky uvádza aj LAPIN *et al.* (1997), ŠÚTOR *et al.* (2002) pri hodnotení zrážkového režimu na Slovensku.

Výrazné klimatické a pestré petrograficko-geologické pomery a tým i pôdne pomery, majú odraz v mnohotvárnej vegetácii. Územie Slovenska sa delí na oblasť panonskú (oblasť panonskej nížiny), ovplyvňovanú klímou Stredozemného mora a na oblasť vnútrokarpatskú, ovplyvňovanú suboceánskou klímou horskou a klímou Severného a Baltického mora. Rozhranie týchto oblastí vytýčil Zlatník (1959) tzv. hlavnou klimatickou čiarou Slovenska, ktorou karpatský oblúk oddeľuje dve významné európske klimatické oblasti.

Oblasť na sever od čiar je nápadne vlhšia a chladnejšia, oblasť južná je suchšia a teplejšia. Fytogeograficky je toto rozdelenie zaujímavé a veľmi dôležité. V severnej časti sa mimoriadne uplatňuje smrek na akomkoľvek podklade, i na pôdach z vápencov a vedľa smrekovca vyskytuje sa ako solitér aj v najnižších polohách. V južnej časti sa takto smrek neprejavuje vôbec, alebo len v smrekovom stupni. Nápadná je sviežosť lúk a pastvín v severnej časti, aj v druhej polovici leta, kým na juhu sú lúky a pastviny v tejto dobe už suché, s výnimkou tých, ktoré sú ovplyvňované spodnou vodou.

Hlavná klimatická čiara (obr. 2) je výrazným odlíšením šírenia sa druhov a lesných spoločenstiev. Na sever od nej dominuje spoločenstvo zaradené do skupiny lesných typov *Abieto – Fagetum* (Jedľová



bučina) (sensu Zlatník), v ktorej pôvodné drevinové zloženie buk, jedľa, smrek bolo umelo značne zmenené v prospech smreka. Vo vyšších polohách ustupuje buk, vyššie tiež jedľa, takže najvyššie porasty (aj pôvodné) tvorí smrek s jarabinou či smrekovcom alebo javorom horským v spoločenstvách skupín lesných typov *Sorbetum* – *Piceetum* (Jarabinová smrečina), *Laricetum* – *Piceetum* (Smrekovcová smrečina) a *Aceretum* – *Piceetum* (Javorová smrečina). Najvyššie položené uvoľnené smrečiny prechádzajú cez pásma boja so skupinami smrekov a jednotlivých solitérov – smrekov do pásma kosodrevín (skupina lesných typov *Mughetum* (Kosodrevina). V najvyšších vrstvách, s výnimkou Vysokých Tatier, sú kosodrevinové porasty silne rozrušené, miestami zničené a premenené na horské pastviny – hole.

Na juh od hlavnej klimatickej čiary je rozšírená skupina lesných typov *Fagetum pauper* (Bučina), spoločenstvá bučín, ktoré s klesajúcou nadmorskou výškou prechádzajú v spoločenstvá dúbav (skupiny lesných typov *Quercetum* – *Fagetum* (Dubová bučina), *Fageto* – *Quercetum* (Buková dúbava), *Carpinetum* – *Quercetum* (Hrabová dúbava). Zásah človeka v týchto oblastiach sa prejavil nielen zmeneným drevinovým zložením, ale aj prevodom na výmladkové lesy hlavne dubové, hrabové a agátové.

Na pôdach z karbonátových hornín, hlavne na rendzinách, sú dealpínske spoločenstvá. Na juh od klimatickej čiary ostrovkovite sa vyskytujú spoločenstvá skupiny lesných typov *Cornetum* – *Quercetum* (Drieňová dúbava) s dubom plstnatým, jaseňom manovým (*Fraxinus ornus*) a hojnými krovinami hlavne rodu *Cornus* (Drieň). Hojné sú dealpínske spoločenstvá bukovo – dubové, dubovo – bukové, borovicové, smrekovo – bukové, vyskytujúce sa aj na sever od klimatickej čiary. Tieto na eróziu veľmi citlivé spoločenstvá tam, kde došlo k odlesneniu, devastovali nie zriedka na kamenné stepi (Slovenský kras).

Súčasný drevinový zloženie oproti pôvodnému má značné rozdiely. Vyznačuje sa hlavne zvýšením zastúpenia smreka a znížením zastúpenia duba (rod *Quercus*) a cenných listnáčov. Zväčšil sa podiel hraba (*Carpinus betulus*), agátu (*Robinia pseudoacacia*), duba cerového (*Quercus cerris*) v zmiešaných lesoch i zmiešaných porastoch. S odvolaním sa na práce ŠKVARENINA *et al.* (2004), ŠKVARENINA – TOMLAIN (2000), MINĐÁŠ *et al.* (1996) a i., prinesie očakávaná zmena klímy ďalšie dramatické zmeny v vegetačnom zložení spoločenstiev. Vážnym environmentálnym dôsledkom, z pohľadu ochrany biodiverzity, bude aj zavlečenie inváznych druhov a ich expanzia do zmenou klímy oslabených pôvodných areálov.

### 3.4 Vplyv globálnych zmien klímy na hodnoty relatívnej evapotranspirácie a indexu sucha na Slovensku vo vybraných vegetačných stupňoch

V tabuľke 3 podávame výsledky modelových výstupov zmien relatívnej evapotranspirácie a indexu sucha pre tri časové horizonty: referenčné obdobie (1951-80), rok 2030 a rok 2075. Scenáre klimatickej zmeny boli spracované podľa modelu CCCM (Canadian Climate Centre) (Kolektív 2005, LAPIN *et al.* 2000).

Tab. 3 Relatívna evapotranspirácia E/Eo a index sucha Eo/P pre podmienky referenčnej klímy (1951-1980) a pre podmienky človekom podmienenej zmeny klímy podľa modelu CCCM pre rok 2030 a 2075  
 Tab. 3 Relative evapotranspiration E/Eo and drought index Eo/P for period 1951-80 (current climate) and years 2030 2075 - model CCCM (scenario of climate changes)

| Meteorologická stanica | E/Eo    |      |      | Eo/P    |      |      |
|------------------------|---------|------|------|---------|------|------|
|                        | 1951-80 | 2030 | 2075 | 1951-80 | 2030 | 2075 |
| Hurbanovo              | 63      | 58   | 54   | 1,32    | 1,45 | 1,53 |
| Myjava                 | 77      | 73   | 69   | 0,90    | 0,97 | 1,01 |
| Kamenica nad Cirochou  | 84      | 78   | 74   | 0,86    | 0,94 | 0,98 |
| Plaveč                 | 91      | 85   | 79   | 0,80    | 0,87 | 0,95 |
| Červený Kláštor        | 97      | 92   | 88   | 0,69    | 0,75 | 0,80 |
| Oravská Lesná          | 99      | 98   | 96   | 0,40    | 0,44 | 0,47 |
| Žiar - Javorina        | 99      | 98   | 99   | 0,36    | 0,41 | 0,45 |
| Štrbské Pleso          | 98      | 94   | 91   | 0,46    | 0,52 | 0,54 |

Zistené poznatky môžeme zhodnotiť nasledovne. V nižších vegetačných stupňoch môžeme v podmienkach globálnej zmeny klímy očakávať pomerne silný nárast aridity, predovšetkým to dokumentujú hodnoty E/Eo pre 1. až 5. vegetačný stupeň. Ukazuje sa, že ani mierny nárast zrážok predpokladaný pre roky 2030 a 2075, nedokáže pokryť rastúce požiadavky „novej“ klímy na výpar. Nastane pravdepodobne posun bioklimatologických podmienok z hľadiska bilancie vlahy cca o jeden až jeden a pol vegetačného stupňa. Na severe Slovenska, Orava a severné polohy Tatier preukazujú iba minimálnu zmenu pomeru E/Eo. Je to pravdepodobne dôsledok skutočnosti, že ani v podmienkach otepľujúcej sa klímy nebude evapotranspirácia limitovaná nedostatkom vody. Zo zažitej schémy sa vymyká stanica Štrbské Pleso, kde nastane pokles E/Eo, avšak tento stav je pravdepodobne daný dôsledkom zrážkového tieňa, ktorý vplýva na vodnú bilanciú južných svahov Tatier.

Ak hodnotíme očakávanú zmenu z pohľadu druhého ukazovateľa, indexu sucha Eo/P, zisťujeme mierne odlišné fakty, ktoré vyplynuli z modelového riešenia. Nárast sucha je evidentný v rozsahu 1. až 7. vegetačného stupňa (posun až dva stupne smerom nahor), avšak najvýraznejší bude cca do 5. vegetačného stupňa. Je to dôsledok konštrukcie indexu, nakoľko tento hodnotí pomer potenciálnej evapotranspirácie (ktorá bude mať v teplejšej atmosfére vyššie hodnoty) a zrážok, ktorých nárast je pre podmienky zmeny klímy pomerne slabý. Aj u tohto indexu vidíme u severoslovenských staníc istú anomáliu, podmienenú hlavne „náveternosťou a záveternosťou“ v členitých orografických podmienkach Oravy a Tatier.

#### 4. ZÁVER

Práca analyzuje dlhodobé charakteristiky a trend výskytu suchých a vlhkých období vo vegetačných stupňoch západných Karpát na Slovensku, zameriava sa na analýzu časového radu 1951-2005, ako aj na prognózu očakávaných zmien klímy podľa scénárov CCCM.

Boli použité dve charakteristiky: relatívna evapotranspirácia (E/Eo) a index sucha (Eo/P), a to pre 8 vybraných meteorologických staníc reprezentujúcich hlavne vegetačné stupne Slovenska.

Relatívna evapotranspirácia (E/Eo) vyjadruje funkčnú závislosť medzi jednotlivými zložkami rovnice vodnej a energetickej bilancie povrchu, a index sucha (Eo/P) vyjadrujúci vzťah medzi energetickými možnosťami aktuálnej (E) a potenciálnej evapotranspirácie (Eo) a zrážkovými úhrnmi (P) vo vybraných lokalitách, sa veľmi často používajú pri charakterizovaní vlhkostných pomerov. Tieto indexy umožňujú charakterizovať vlhkostné pomery a majú využitie pri mapovom spracovaní a modelovaní biologických procesov.

Index sucha sa pohyboval v intervale 1,44 na nížinách juhu Slovenska (xerothermné dubové spoločenstvá), až po 0,35 v náveterných častiach horských polôh severného Slovenska v siedmom –



smrekovom vegetačnom stupni. Relatívna evapotranspirácia sa pohybovala od 97 % (horský smrekový vegetačný stupeň) a po 58 % (dubový vegetačný stupeň).

Analýzou dlhodobého časového radu (1951 – 2000) sme zistili významne signifikantný trend k aridite v južných častiach Slovenska, v nížinách a pahorkatinách 1 až 2 vegetačného stupňa. Vysoko signifikantný trend k humidite sa ukazuje na severovýchode Slovenska, ako aj v horských polohách 7. vegetačného stupňa, na severnej (návetiernej) strane Tatier.

Vplyv globálnych zmien klímy na hodnoty relatívnej evapotranspirácie a indexu sucha sme modelovali pre časové horizonty 2030 a 2075, podľa scenára klimatickej zmeny CCCM. Simulácia ukázala významné zmeny vo vodnej bilancii, predovšetkým v nižších vegetačných stupňoch.

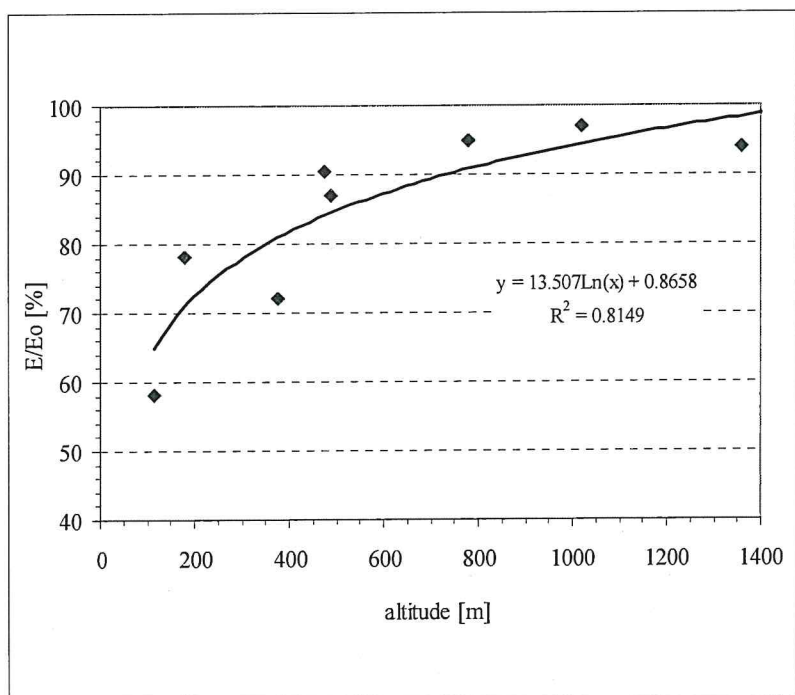
**Pod'akovanie:** Autori ďakujú za podporu: Národnému klimatickému programu SR a grantovej agentúre VEGA MŠ SR projekty č. 1/0515/08, 1/4393/07, 1/3528/06, 1/2357/05.

## LITERATÚRA

- ARORA, V. (2002): The use of aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *J. Hydrol.* 265:164-177.
- BAUMGARTNER, A., LIEBSCHER, H. (1990): *Allgemeine Hydrologie*. Bd 1, Gebrüder Bornträger, Berlin.
- BOCHENEK, Z., DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA, K., CIOŁKOSZ, A., DRUPKA, S., BOKEN, V. (2005): Monitoring Agricultural Drought in Poland. In: Boken, VK, Cracknell, AP, and Heathcote, RL (eds) *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study*, published by Oxford University Press, New York.
- BUDYKO, M. (1955): *Atlas of the heat balance* (in Russian). Gridometeoizdat, Leningrad.
- BUDYKO, M. (1971): *Climate and life* (in Russian). Gridometeoizdat, Leningrad.
- BUDYKO, M. (1980): *Climate in the Past and in the Future* (in Russian). Gridometeoizdat, Leningrad.
- BUDYKO, M., ZUBENOK, L. (1961): The determination of evaporation from the land surface (in Russian). *Izv Ak Nauk SSR Se Geog* 6:3–17.
- DITMAROVÁ, I., KMEŤ, J., STŘELCOVÁ, K., GÓMÖRY, D. (2006): Effects of drought on selected physiological parameters of young beech trees under stress conditions. *Ekológia (Bratislava)* 25:1-11.
- DUBROVSKÝ, M., TRNKA, M., SVOBODA, M., HAYES, M., WILHITE, D., ZALUD, Z., SEMERADOVA, D. (2005): Drought Conditions in the Czech Republic in Present and Changed Climate. In: *Proceedings of the European Geophysical Union*, Vienna, pp 25-29.
- GONGALSKY, K., POKARZHEVSKII, A., FILIMONOVA, Z., SAVIN, F. (2004): Stratification and dynamics of bait-lamina perforation in three forest soils along a north-south gradient in Russia. *Applied Soil Ecology* 25:111-122.
- HAYES, M., SOVOBODA, M., WILHITE, D., VANYARKO, O. (1999): Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. *American Meteorological Society* 80:429-438.
- HEIM, R. (2002): A review of Twentieth - century drought indices used in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 83: 1149-1165.
- HOLÉCY, J. (2004): *Matematický model poistenia lesov Slovenska proti požiarom*. Technická univerzita vo Zvolene.
- HRVOJ, J., LAPIN, M., TOMLAIN, J. (2001): Changes and Variability in Solar Radiation and Evapotranspiration in Slovakia in 1951-2000. *Acta Meteorologica Universitatis Comenianae* 30:31-58.
- HRVOJ, J., TOMLAIN, J., HORECKÁ, V. (2003): Total Radiation Balance of Active Surface on the Territory of Slovakia for Period 1951 - 2000. *Acta Meteorologica Universitatis Comenianae* 32:1-15.
- KOLEKTÍV (2005): Štvrtá národná správa SR o zmene klímy a správa o dosiahnutom pokroku pri plnení Kjótskeho protokolu. MŽP SR, SHMÚ, Bratislava.
- KREČMER, V. (ED.) (1980): *Bioklimatologický slovník terminologický a explikativní*. Academia, Praha.
- LAPIN, M., ZÁVODSKÝ, D., MAJERČÁKOVÁ, O., MINĐÁŠ, J., ŠPÁNIK, F. (1997): *Vulnerability and Adaptation Assessment for Slovakia. Final Report of the Slovak Republic's Country Study, Element 2*, U.S. Country Studies Program, Slovak Ministry of the Environment, Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava.
- LAPIN, M., MELO, M., DAMBORSKÁ, I., GERA, M., FAŠKO, P. (2000): *Nové scenáre klimatickej zmeny pre Slovensko na báze výstupov prepojených modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry*. Národný klimatický program SR 8:5-24.
- LARCHER, W. (1984): *Ökologie der Pflanzen auf physiologischer Grundlage* (in German). Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).

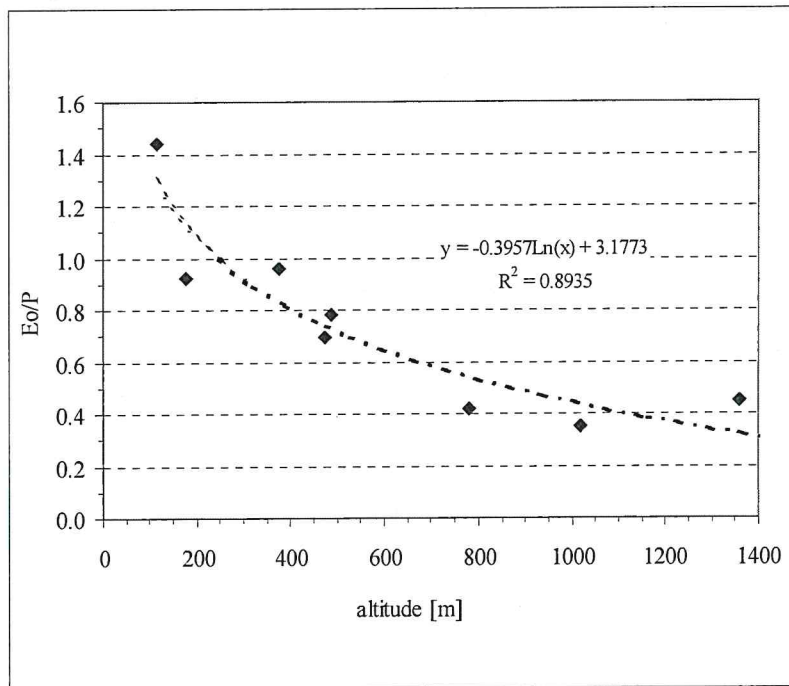
- LITSCHMANN, T., KLEMENTOVÁ, E., ROŽNOVSKÝ, J. (2002):** Palmer's index and its utilization in conditions of Czech Republic (in Czech). In: X<sup>th</sup> International Poster Day, Transport of Water, Chemicals and Energy in the system Soil – Crop Canopy – Atmosphere, CD, UH SAS, Bratislava .
- MINDÁŠ, J., LAPIN, M., ŠKVARENINA, J. (1996):** Klimatické zmeny a lesy Slovenska. Národný klimatický program SR 5:1-96 .
- NOVÁK, V. (1995):** Evapotranspiration and its estimation (in Slovak). Veda, Bratislava .
- PAGANOVÁ, V. (2000):** Water stress impact on growth of Wild pear progenies. *Folia Oecologica* 27:35-48
- RAUŠER, J., ZLATNÍK, A. (1966):** Biogeography (map No. 21), (in Czech). Atlas ČSSR, Kartografický a reprodukční ústav, Praha.
- REBETEZ, M., MAYER, H., DUPONT, O., SCHINDLER, D., GARTNER, K., KROPP, J., MENZEL, A. (2006):** Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Ann. For. Sci.* 63:569-577.
- ROŽNOVSKÝ, J., JANOUŠ, D. (2001):** Drought, valuation and prediction (in Czech and Slovak). SHMI, Brno .
- STŘELCOVÁ, K., MATEJKA, F., KUČERA, J. (2004):** Beech stand transpiration assessment – two methodical approaches. *Ekológia (Bratislava)* 23, (Suppl. 2/2004):147-162.
- ŠIŠKA, B., TAKÁČ, J., IGÁZ, D. (2005):** Climate change impacts on winter wheat yield on Danubian lowland in Slovak republic. *Contemporary agriculture (Savremena poljoprivreda)*: 324-328.
- ŠIŠKA, B., SAMUHEL, P. (2007):** Modeling Climate Change Impact on Maize (*Zea Mays* L.) Yields in Conditions of the Danubian Lowland. *Meteorological Journal* 10: 81-84.
- ŠKVARENINA, J., KRIŽOVÁ, E., TOMLAIN, J. (2004):** Impact of the climate change on the water balance of altitudinal vegetation stages in Slovakia. *Ekológia* 23 (Suppl. 2/2004): 13-19.
- ŠKVARENINA, J., TOMLAIN, J. (2000):** Posúdenie dôsledkov zmeny klímy na vodnú bilanciu lesných vegetačných stupňov. Národný klimatický program SR 9:47-56.
- ŠPANIK, F., ŠIŠKA, B. (2007):** Biometeorology (in Slovak). SPU Nitra.
- ŠÚTOR, J., ŠTEKAUEROVÁ, V., MAJERČÁK, J. (2002):** Water balance in agriculture ecosystems. In: Proceedings of 19<sup>th</sup> European Regional Conference of ICID “Sustainable Use of Land and Water”, Brno-Prague, 8 p., CD.
- TOMLAIN, J., 1996:** Model computation of the climatic change impacts on potential and actual evapotranspiration changes on the territory of Slovakia (in Slovak). National Climate Programme of Slovak Republic, No. 4, Slovak Ministry of Environment, SHMI, Bratislava, pp. 45-74.
- TOMLAIN, J. (2004):** Contribution to humid conditions of Slovakia. *Acta Meteorologica Universitatis Comenianae* 33:21-30.
- TRNKA, M., DUBROVSKÝ, M., SEMERÁDOVÁ, D., ŽALUD, Z. (2007):** Drought, precipitation index, Palmer drought indices in Moravia and Silesia (in Czech). In: Brázdil R, Kirchner, K. (eds.): Selected natural extremes and their impacts in Moravia and Silesia. Masarykova universita, Český hydrometeorologický ústav, Ústav geoniky Akademie věd ČR Brno, Praha, Ostrava .
- ZLATNÍK, A. (1959):** Waldtypengruppen der Slowakei. VŠZ, Brno.
- ZLATNÍK, A. (1976):** Lesnícka fytocenológia. SZN, Praha.





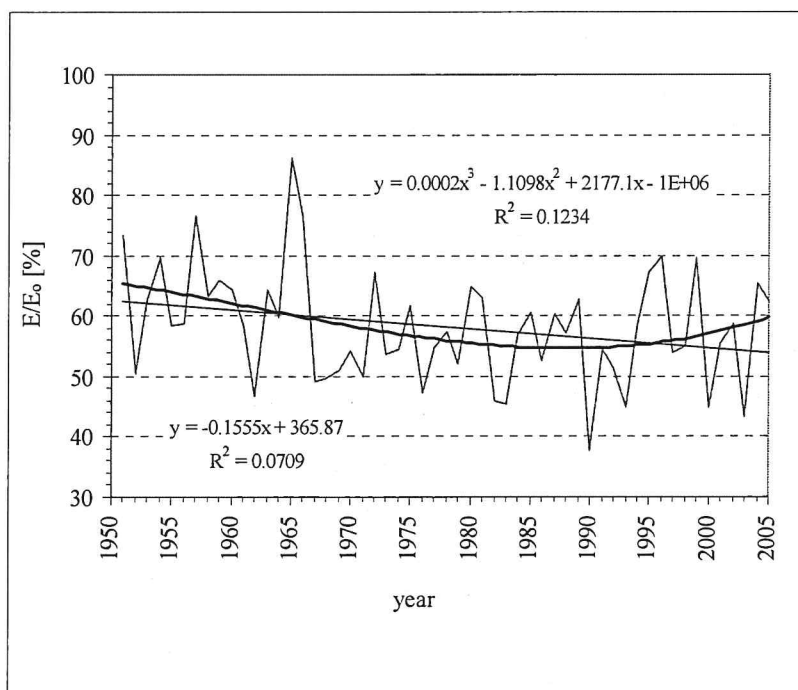
Obr. 3 Logaritmická regresná závislosť ročných hodnôt relatívnej evapotranspirácie (E/Eo) od nadmorskej výšky (altitude [m]) na území Slovenska za obdobie rokov 1951-2005

Fig. 3 Logarithmic regression dependence of relative evapotranspiration annual values (E/Eo) on altitude [m a.s.l.] in Slovak territory for the period 1951-2005



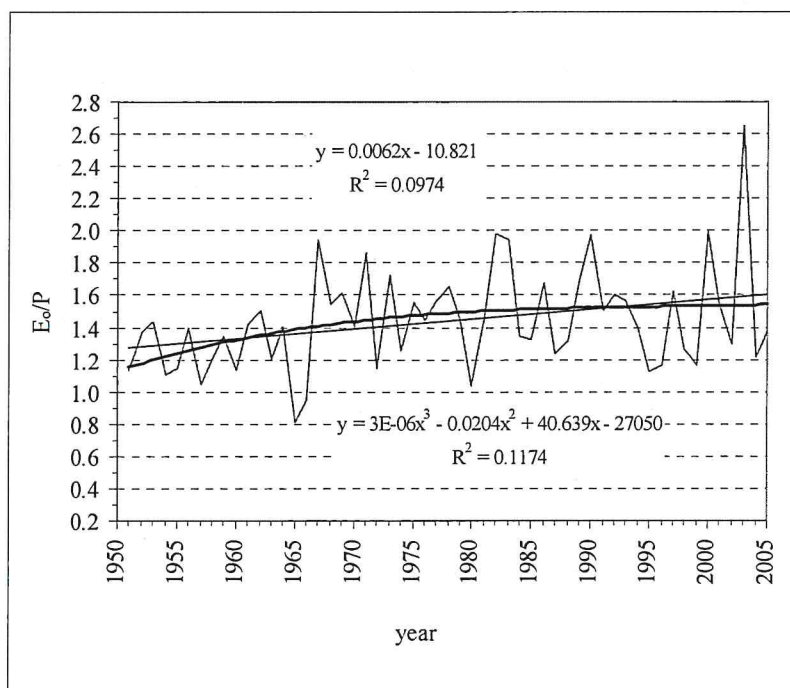
Obr. 4 Logaritmická regresná závislosť ročných hodnôt indexu sucha (Eo/P) od nadmorskej výšky (altitude [m]) na území Slovenska za obdobie rokov 1951-2005

Fig. 4 Logarithmic regression dependence of drought index annual values (Eo/P) on altitude [m a.s.l.] in Slovak territory for the period 1951-2005



Obr. 5 Dlhodobý priebeh relatívnej evapotranspirácie ( $E/E_o$ ) v Hurbanove v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

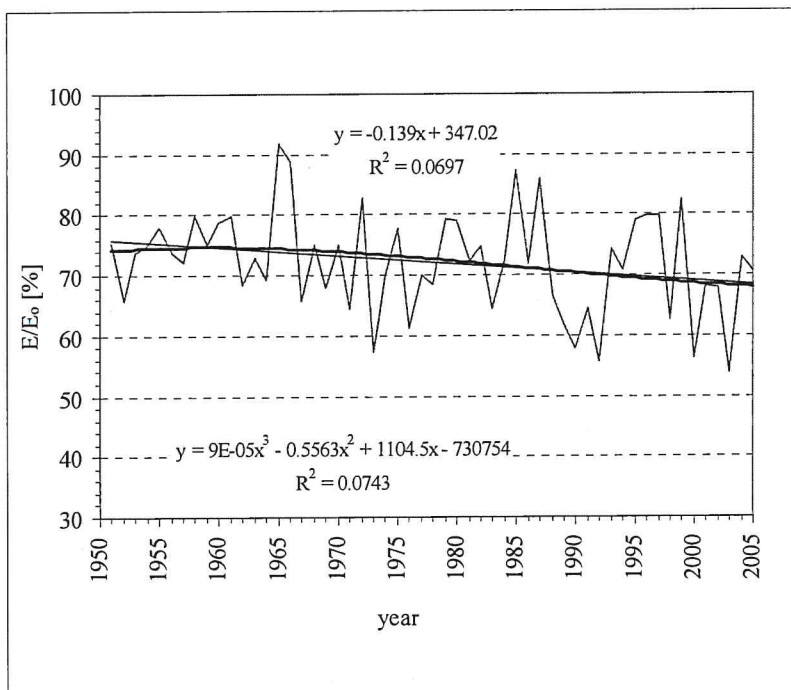
Fig. 5 Long-term course of relative evapotranspiration annual values ( $E/E_o$ ) at Hurbanovo for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



Obr. 6 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E_o/P$ ) v Hurbanove v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

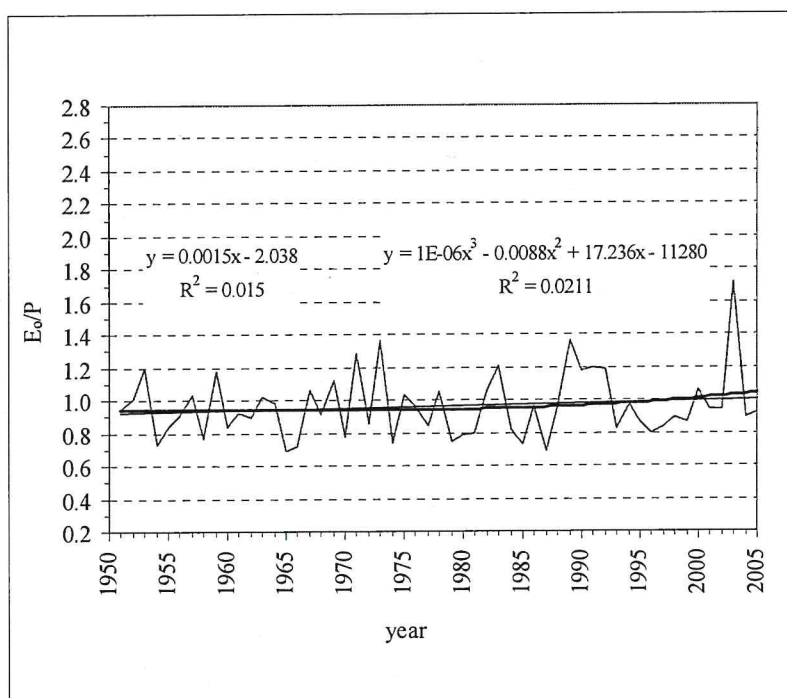
Fig. 6 Long-term course of drought index annual values ( $E_o/P$ ) at Hurbanovo for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order





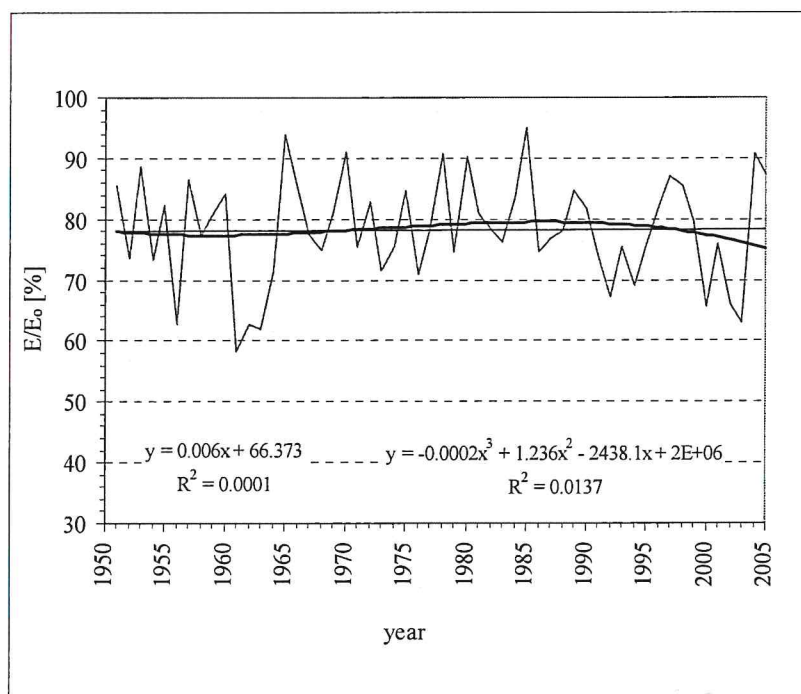
Obr. 7 Dlhodobý priebeh relatívnej evapotranspirácie (E/Eo) v Myjave v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

Fig. 7 Long-term course of relative evapotranspiration annual values (E/Eo) at Myjava for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



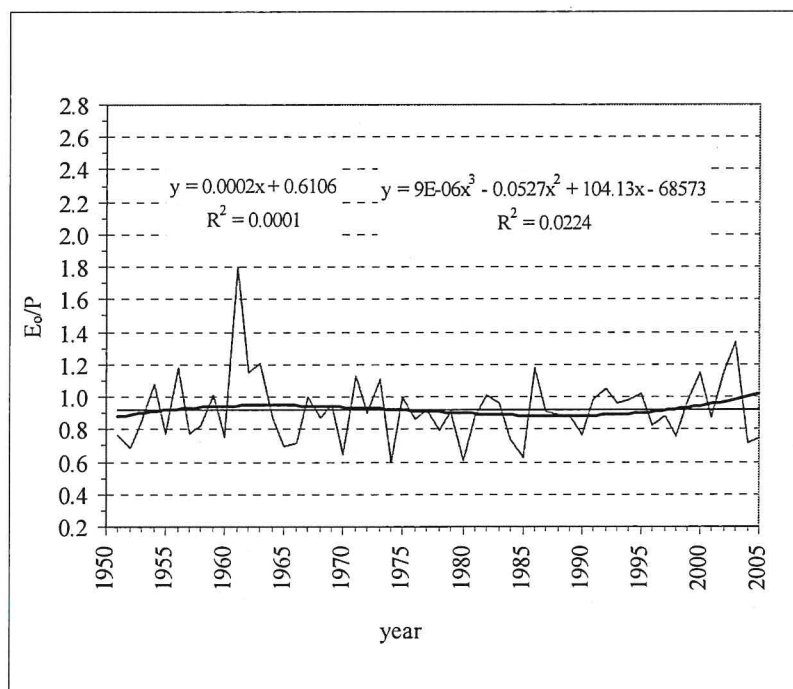
Obr. 8 Dlhodobý priebeh indexu sucha (Eo/P) v Myjave v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

Fig. 8 Long-term course of drought index annual values (Eo/P) at Myjava for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



Obr. 9 Dlhodobý priebeh relatívnej evapotranspirácie ( $E/E_o$ ) v Kamenici nad Cirochou v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

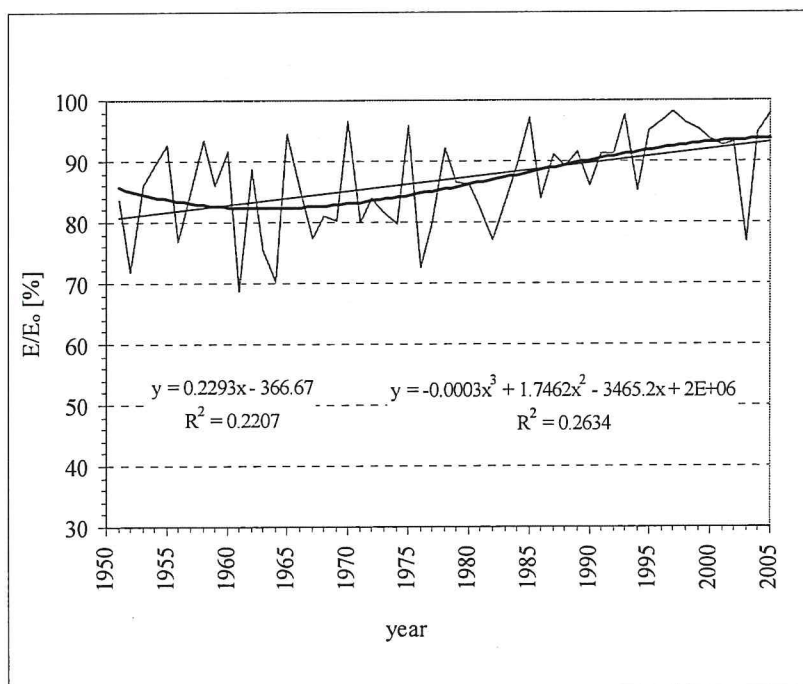
Fig. 9 Long-term course of relative evapotranspiration annual values ( $E/E_o$ ) at Kamenica nad Cirochou for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



Obr. 10 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E_o/P$ ) v Kamenici nad Cirochou v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

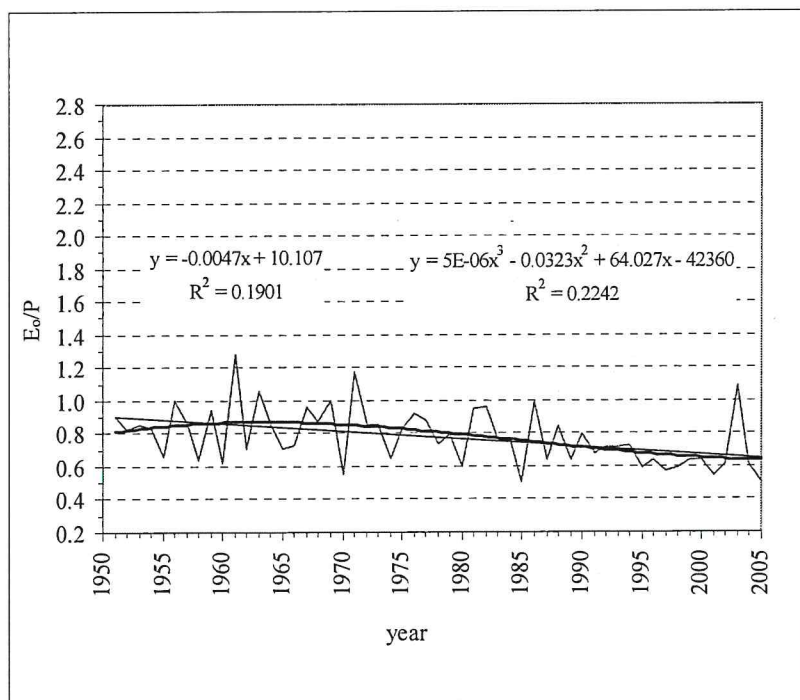
Fig. 10 Long-term course of drought index annual values ( $E_o/P$ ) at Kamenica nad Cirochou for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order





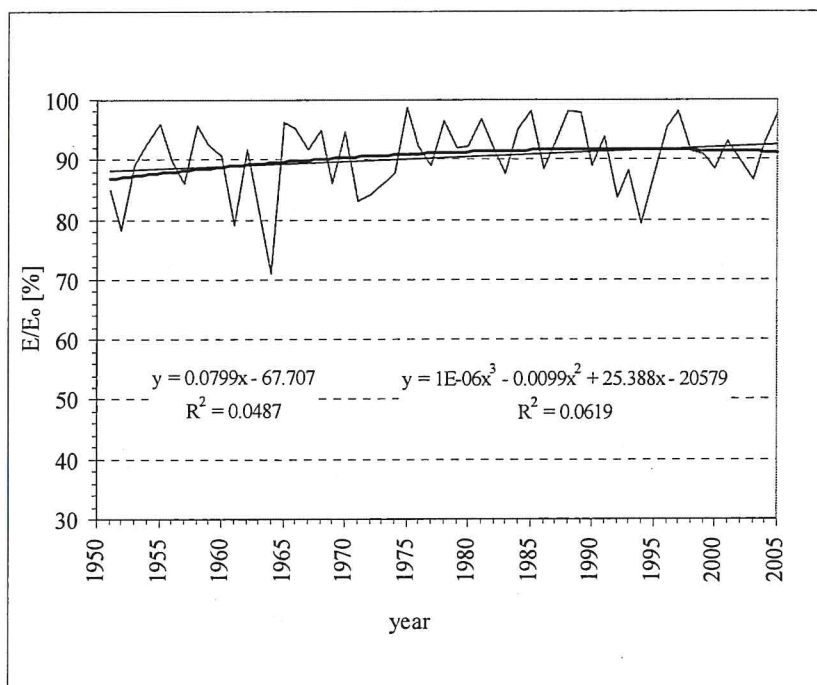
Obr. 11 Dlhodobý priebeh relatívnej evapotranspirácie (E/Eo) v Plavči v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

Fig. 11 Long-term course of relative evapotranspiration annual values (E/Eo) at Plaveč for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



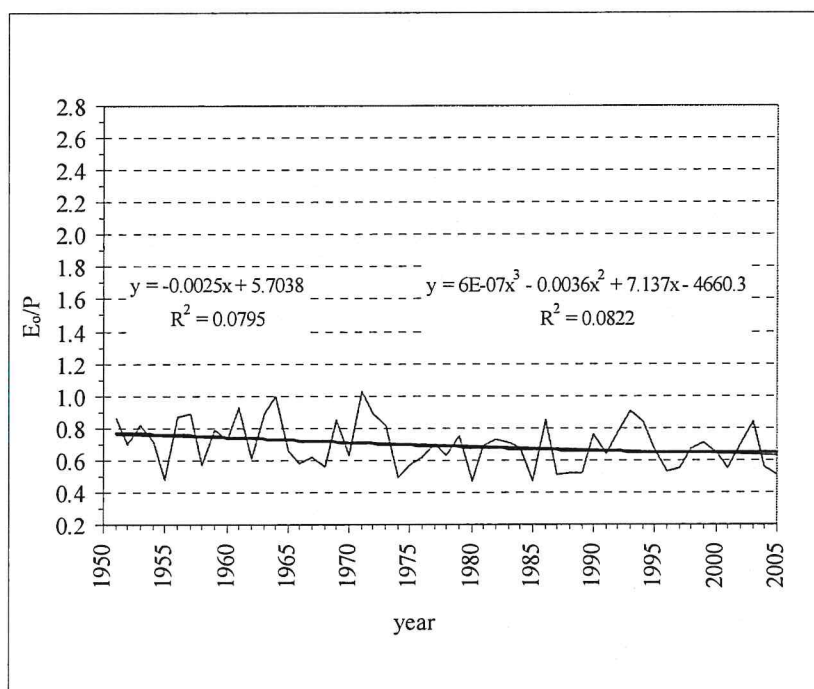
Obr. 12 Dlhodobý priebeh indexu sucha (Eo/P) v Plavči v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

Fig. 12 Long-term course of drought index annual values (Eo/P) at Plaveč for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



Obr. 13 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E/E_o$ ) v Červenom Kláštore v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

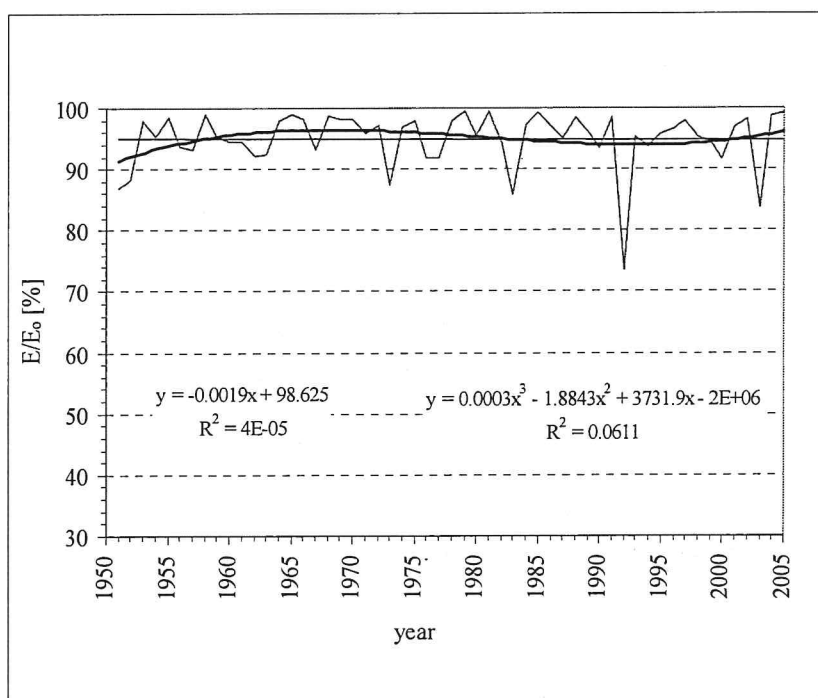
Fig. 13 Long-term course of relative evapotranspiration annual values ( $E/E_o$ ) at Červený Kláštor for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



Obr. 14 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E_o/P$ ) v Červenom Kláštore v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

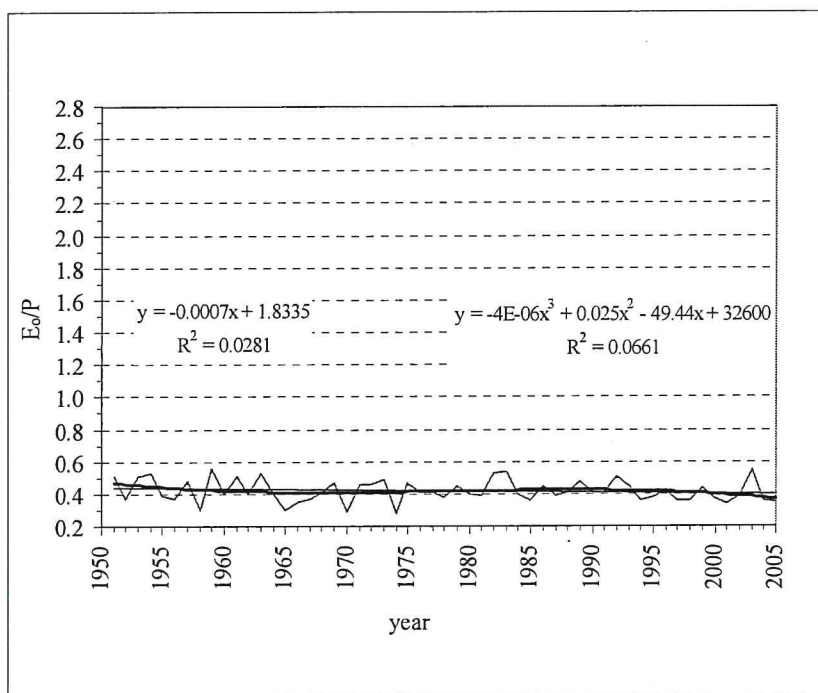
Fig. 14 Long-term course of drought index annual values ( $E_o/P$ ) at Červený Kláštor for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order





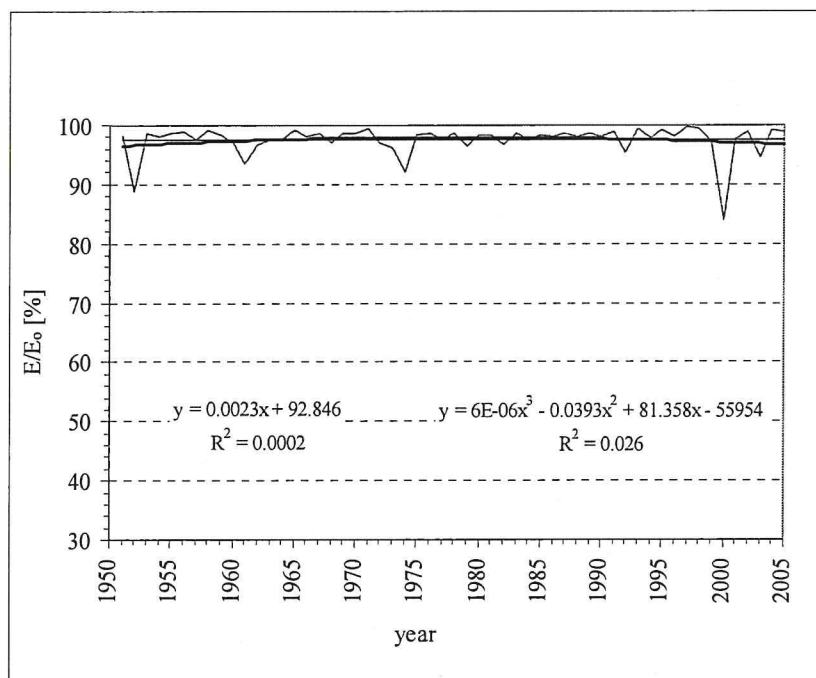
Obr. 15 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E/E_o$ ) v Oravskej Lesnej v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

Fig. 15 Long-term course of relative evapotranspiration annual values ( $E/E_o$ ) at Oravská Lesná for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



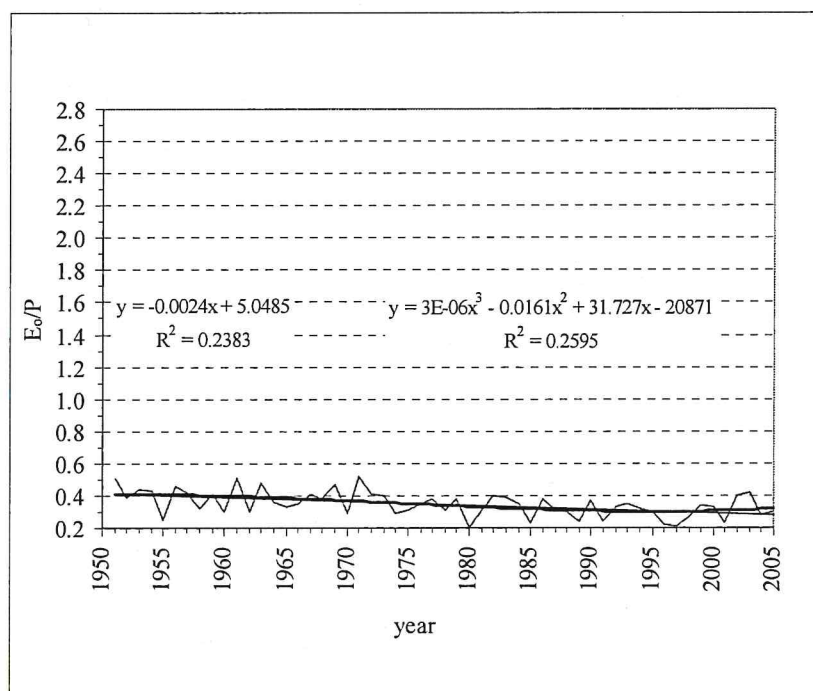
Obr. 16 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E_o/P$ ) v Oravskej Lesnej v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

Fig. 16 Long-term course of drought index annual values ( $E_o/P$ ) at Oravská Lesná for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



Obr. 17 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E/E_o$ ) v Žiari – Javorine v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

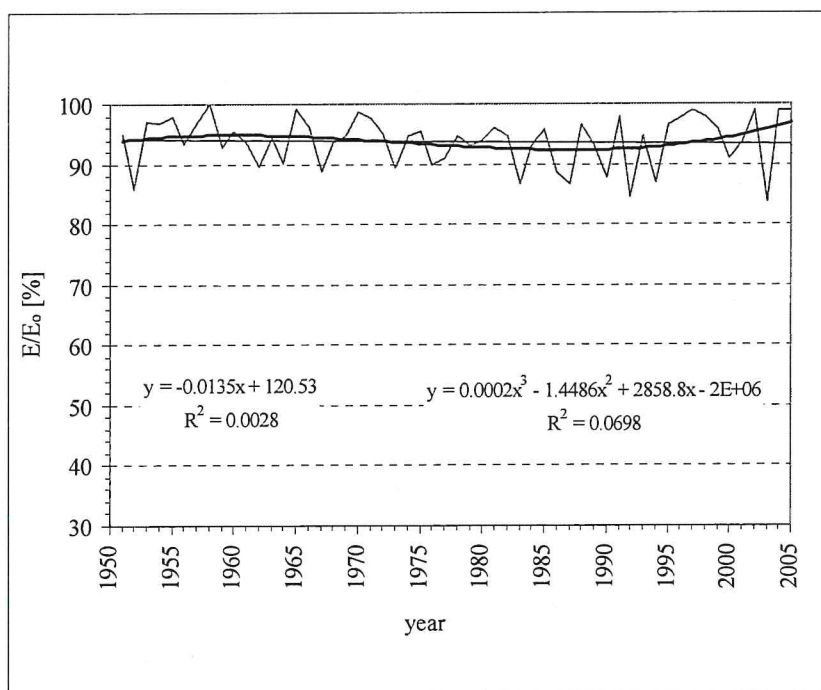
Fig. 17 Long-term course of relative evapotranspiration annual values ( $E/E_o$ ) at Ždiar-Javorina for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order



Obr. 18 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E_o/P$ ) v Žiari – Javorine v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

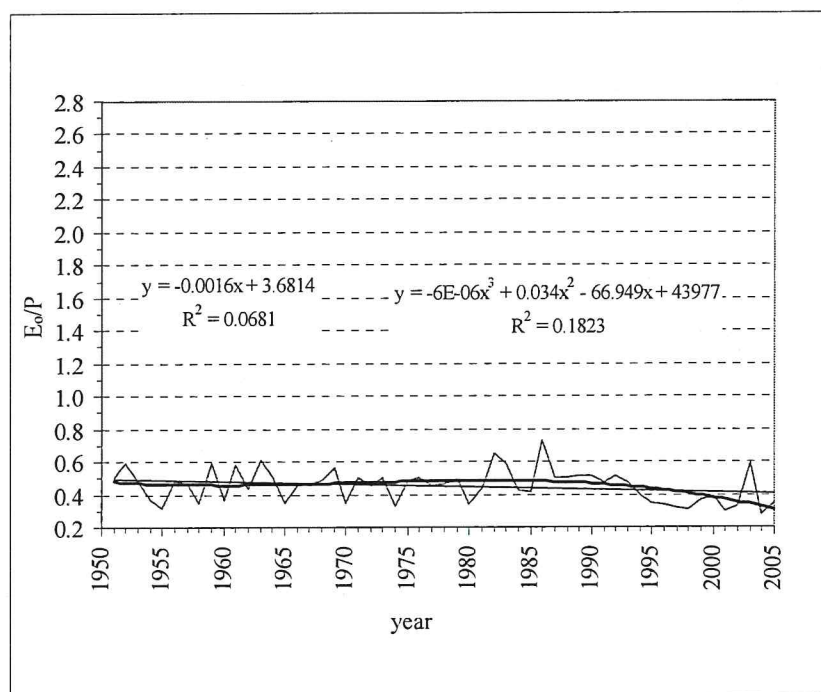
Fig. 18 Long-term course of drought index annual values ( $E_o/P$ ) at Ždiar - Javorina for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order





Obr. 19 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E/E_o$ ) na Štrbskom Plese v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

Fig. 19 Long-term course of relative evapotranspiration annual values ( $E/E_o$ ) at Štrbské Pleso for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of 3<sup>rd</sup> order



Obr. 20 Dlhodobý priebeh indexu sucha ( $E_o/P$ ) na Štrbskom Plese v rokoch 1951-2005 (lineárny a polynomický trend tretieho stupňa)

Fig. 20 Long-term course of drought index annual values ( $E_o/P$ ) at Štrbské Pleso for the period 1951-2005 with the linear trend and polynomial of the 3<sup>rd</sup> order

# OCCURRENCE OF DRY AND WET PERIODS IN ALTITUDINAL VEGETATION STAGES OF WEST CARPATHIANS IN SLOVAKIA: TIME-SERIES ANALYSIS 1951-2005 AND PROGNOSIS OF EXPECTED CLIMATIC CHANGES

Jaroslav Škvarenina, Ján Tomlain, Ján Hrvol', Jana Škvareninová, Helena Hlavatá

<sup>1</sup>Department of Natural Environment, Faculty of Forestry, Technical University of Zvolen

<sup>2</sup>Faculty of Mathematics, Physics and Informatics of Comenius University in Bratislava

<sup>3</sup>Faculty of Ecology and Environmental Sciences, Technical University of Zvolen

<sup>4</sup>Slovak Hydrometeorological Institute in Košice

This work analyses the trends in occurrence of dry and wet periods in altitudinal vegetation stages in Slovakia between 1951 and 2005. We have used the relative evapotranspiration ( $E/E_o$ ) and drought index ( $E_o/P$ ). We have used meteorological data from 8 meteorological stations representing the predominant vegetation stages of Slovakia.

The relative evapotranspiration expresses functional dependences among particular energy and water balance equations components as well as drought index, which denote relation between energetic possibilities of evapotranspiration and precipitation totals in chosen locality, are used very often for humid conditions characterization. These ratios enable characterize humid condition so as can be used in mapping and modelling of biological processes.

The drought index ranges from 1.44 for the area heavily prone to drought (southern part) to 0.35 for the mountainous areas (northern part) where sum of precipitation exceeds potential evapotranspiration. The relative evapotranspiration shows values as high as 97 % in northern mountainous regions, to 58 % in the Danubian lowland.

A significant increase in the severity of drought was identified from 1951 to 2000 only in the Danubian lowland (1<sup>st</sup> Oak vegetation stage) and in Zahorská lowland (2<sup>nd</sup> Beech-Oak vegetation stage). We determined a significant trend in increase of humidity in mountains and in the northern part of East Slovakia.

Effect of expected climatic changes on attributes relative evapotranspiration ( $E/E_o$ ) and drought index ( $E_o/P$ ) we were modelling to date 2030 and 2075, according to script climatic changes CCCM. Simulation indicates important changes at water balance in lower altitudinal vegetation stages.



# MODELOVANIE PRODUKCIE LESA POD VPLYVOM KLIMATICKÝCH ZMIEN POMOCOU MODELU SIBYLA

Fabrika, M.

Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Technická univerzita vo Zvolene

**Abstrakt:** Článok sa zaoberá metodikou hodnotenia vplyvu klimatických zmien na produkciu lesných porastov. Pre tento účel sa využíva rastový model SIBYLA. Model bol vyvinutý na Katedre hospodárskej úpravy lesov a geodézie vo Zvolene. Model je senzitívny na klimatické faktory (dĺžka vegetačného obdobia, priemerná teplota vo vegetačnom období, ročná teplotná amplitúda a úhrn zrážok počas vegetačného obdobia). Klimatické faktory modifikujú výškový a hrúbkový rastový potenciál a následne aj prírastok. Klimatické faktory majú zároveň vplyv na odumieranie stromov. Metodika bola preverená na vybraných príkladoch modelových lesných porastov. Porastové modely boli vytvorené ako typické porastové monokultúry smreka (nižších a vysokohorských polôh), jedle, borovice, buka a duba. Rovnako boli využité typické porastové zmesi (smrek-jedľa, smrek-buk-jedľa, buk-dub, borovica-dub). Stromové údaje boli generované z údajov rastových tabuliek Slovenska pre stredné bonity, 30 rokov a kritické zakmenenie. Porasty boli umiestnené do typických vegetačných lesných stupňov, typických lesných oblastí s vhodnou nadmorskou výškou, expozíciou a sklonom. Boli pripravené klimatické scenáre na 90 rokov (s intervalom 1 rok) Národným lesníckym centrom a Slovenským hydrometeorologickým ústavom. Bol vytvorený scenár pre zmenenú klímu a referenčný scenár bez zmeny klímy. Rastové prognózy boli prevedené ako prirodzený vývoj porastov (len s prirodzenou mortalitou). Na záver boli porovnané rozdiely vývoja porastových modelov pri zmenenej a referenčnej klíme.

## 1. ÚVOD

V lesnícky vyspelých Európskych krajinách je badať prechod od modelov založených na priemerných a sumárnych porastových charakteristikách k modelom, založených na stromových údajoch. Takéto modely berú do úvahy konkurenčné vzťahy stromov, proces odumierania stromov a rozdielne prebierkové a ťažbové koncepty. Pritom sú úzko zviazané s kvalitou stanovišťa a klimatickými faktormi. Modely pracujú na detailnejšej úrovni, a sú omnoho flexibilnejšie, hlavne z hľadiska ich využiteľnosti. Ponúkajú možnosti pre modelovanie rovnovekých rovnorodých porastov rovnakou mierou ako pre zmiešané rôznoveké porasty. Je pritom možné využívať nielen statické prebierkové režimy a kvalitu stanovištných podmienok, ale aj dynamické prebierky a stanovište. Modely produkujú široký rozsah výstupných charakteristík, od produkčných aspektov cez ekologické a ekonomické výstupné parametre. Tento charakter ich predurčuje pre strategické plánovanie a multikriteriálne hodnotenie rizík v lesných ekosystémoch. Široká paleta vstupných a výstupných charakteristík vyžaduje, aby boli modely vyhotovené vo forme počítačových programov, ktoré nazývame stromové rastové simulátory. Bohatá tradícia a silné zázemie spolu so sofistikovanými stromovými rastovými simulátormi (SILVA, MOSES, PROGNAUS, BWIN, STAND) je v nemeckých hovoriacich krajinách a v Škandinávii (PRETZSCH 1992, HASENAUER 1994, STERBA 1995, NAGEL 1996, PUKKALA a MIINA 1997, SLOBODA a PFREUNDT 1989).

Nevyhnutnou zložkou stromových rastových simulátorov je systém matematických rovníc pre modelovanie prírastku veličín stromov (hrúbka, výška, prípadne parametre korún stromov). Mnohé z týchto simulátorov využívajú definíciu stanovišťa priamo na základe klimatických a pôdnych faktorov. Tomuto prístupu hovoríme **ekologická stanovištná bonitácia**. Tento prístup má dôležitý význam pre hodnotenie citlivosti prírastku na odlišné podmienky stanovišťa. Bežné rastové modely, ako sú napríklad rastové tabuľky, nie sú schopné uspokojiť tieto aspekty. Na druhej strane sú však tieto modely omnoho náročnejšie, vzhľadom k ich tvorbe, a hlavne k potrebe empirického materiálu a využívaných modelovacích techník.

Cieľom článku je navrhnúť model ekologickej stanovištnej bonitácie v rámci modelu SIBYLA a preskúšať ho pre účely modelovania produkcie lesa pod vplyvom klimatických zmien. Model SIBYLA bol vyvinutý na základe výskumného projektu 5. rámcového programu Európskej únie s názvom: „Implementing Tree Growth Models as Forest Management Tools“. Jedným z cieľov projektu bol vývoj algoritmov a softvérového riešenia, plne prispôbeného slovenským produkčným a ekonomickým podmienkam. Prvý nevyhnutný predpoklad je zostrojenie systému ekologickej stanovištnej bonitácie pre hlavné dreviny Slovenska (smrek, jedľa, borovica, buka a dub). Takýto systém doposiaľ na Slovensku neexistoval. V rámci toho bolo potrebné vyriešiť nasledujúce úlohy:

- odvodenie hlavných klimatických a pôdných faktorov nazývaných *stanovištné premenné* ( $s_i$ ) s rozsahom  $n$ , ktoré majú signifikantný vplyv na hrúbkový a výškový prírastok stromov,
- kvantifikáciu individuálneho vplyvu faktorov ( $r_i$ ) na hrúbkový a výškový prírastok vo forme *transformačných funkcií*:

$$r_i = f(s_i); i = 1..n; r_i \in \langle 0,1 \rangle, \quad (1)$$

- odvodenie komplexného vplyvu faktorov  $s_i$  na prírastok pomocou agregovania ich individuálneho vplyvu  $r_i$  do celkového vplyvu  $r$  pomocou *agregačných funkcií*,
- odvodenie produkčných rámcov pre hrúbkový a výškový rast stromov (minimálna a maximálna úroveň pri ekologickom optimu a pesimu),
- vývoj modelu regionalizácie klimatických a pôdných údajov ako referenčný klimatický model a jeho odvodenie z údajov bežnej lesníckej prevádzky,
- vývoj softvérového riešenia pre ekologickú stanovištnú bonitáciu v rastovom simulátore SIBYLA.

Následne sme využili simulátor pre modelovanie produkcie lesa pri klimatických zmenách. V rámci toho bolo potrebné riešiť nasledujúce úlohy:

- prípravu reprezentatívnych porastových modelov ako vzorky pre ekologickú a druhovú amplitúdu Slovenska,
- prípravu klimatických scenárov pre porastové modely pri zmenenej klíme,
- prevedenie rastových prognóz a interpretáciu produkčných zmien porovnaním scenára zmeny klímy a referenčného scenára.

## 2. MATERIÁL

Ako matematický základ pre slovenskú ekologickú stanovištnú bonitáciu boli použité algoritmy rastového simulátora SILVA 2.2 (PRETZSCH 1992, KAHN 1994). Rastový simulátor SILVA 2.2 bol vyvinutý na Technickej univerzite v Mníchove tímom nemeckých vedcov (PRETZSCH, KAHN, BIBER, POMMERENNING, SEIFERT). Táto voľba vyplývala z faktu, že model SILVA 2.2 je jeden z najpodrobnejších modelov v Európe a fakt, že členovia nášho výskumného tímu na Technickej univerzite vo Zvolene (ĎURSKÝ, FABRIKA) priamo spolupracovali s nemeckým tímom pri vývoji modelu a softvéru SILVA 2.2. Niektoré časti slovenského modelu SIBYLA boli plne prebrané z modelu SILVA 2.2 kvôli nedostatku empirických údajov na Slovensku. Ide o riešenie prvých troch úloh z úvodnej kapitoly (výber stanovištných premenných, odvodenie transformačných a agregačných funkcií). Ostatné komponenty modelu SIBYLA boli odvodené na základe domáceho empirického materiálu, pričom naše algoritmy využívajú modelovací princíp publikovaný KAHNOM (1994).

Dátový materiál pre odvodenie spomenutých súčastí modelu SIBYLA sa skladá z rozsiahlej zahraničnej a slovenskej dátovej základne:

1. Sieť dlhotrvajúcich Bavorských experimentálnych plôch, založených Katedrou Náuky o výnose lesa v Mníchove je primárnym materiálom pre odvodenie vplyvu klimatických a pôdných faktorov na prírastok stromov. Súčasne boli použité aj ďalšie experimentálne plochy: plochy v Rínsku-Faltsku a Dolnom Sasku. Model je založený na 404 výskumných plochách s 578 meranými časovými bodmi, s viac než 150000 stromami. Tieto údaje sa skladajú z informácie



o hrúbke, výške a parametroch korún stromov pri odlišných klimatických a stanovištných podmienkach, ako aj z pozície stromov na plochách (súradnice).

2. Rastové tabuľky (HALAJ ET AL. 1987), hlavne výškové a hrúbkové rastové krivky, boli základom pre odvodenie ekologickej stanovištnej bonitácie modelu SIBYLA podľa metodiky KAHNA (1994). Rastové tabuľky sú odvodené z údajov výskumných plôch z rokov 1964 – 1973. Celkový počet meraní je 2199 pre smrek, 436 pre jedľa, 724 pre borovicu, 1239 pre buk a 746 pre dub. Popis plôch je publikovaný v práci HALAJ a ŘEHÁK (1979).
3. Ďalším dôležitým zdrojom pre odvodenie spomínaných modelov sú údaje z inventarizácie hrúbkovej a výškovej štruktúry slovenských lesných porastov (HALAJ 1957, 1978). Tieto údaje boli použité na odvodenie vzťahov medzi maximálnou výškou porastu (resp. maximálnou hrúbkou) a hornou výškou porastu (resp. strednou hrúbkou). Vzťahy boli potrebné na konštrukciu modelu ekologickej stanovištnej bonitácie. Hrúbkový prieskum sa zakladal na 740 porastoch smreka, 370 porastoch jedle, 380 porastoch borovice, 420 porastoch buka a 370 porastoch duba. Výšková štruktúra bola skúmaná na 85 trvalých výskumných plochách smreka, 57 plochách jedle, 55 plochách duba a 75 plochách buka.
4. Regionalizácia klimatických charakteristík bola odvodená z publikovaných klimatických údajov pokrývajúcich územie celého Slovenska. Údaje boli získané z rôznych období (1901-1950, 1901-1970, 1931-1960, 1951-1980 a 1901-1980) a boli transformované do referenčnej periódy 1951-1980 pre teploty a 1901-1980 pre zrážky. Transformácia údajov bola prevedená na základe referenčných meteorologických staníc s najlepšou kvalitou dlhotrvajúcich meraní a pozorovaní. Konečná verzia klimatickej databázy bola zložená z 522 meteorologických staníc pre údaje zrážok a zo 175 staníc pre údaje teplot.

### 3. METODIKA

#### 3.1 Výber stanovištných premenných

Na základe experimentálneho materiálu a podrobného výskumu bolo vybraných 9 stanovištných premenných:

- $s_1$  ... obsah  $N_2O$  v ovzduší (ppb)
- $s_2$  ... obsah  $CO_2$  v ovzduší (ppm)
- $s_3$  ... obsah živín v pôde (relatívna hodnota z intervalu 0 - 1)
- $s_4$  ... dĺžka vegetačného obdobia (počet dní s priemernou dennou teplotou vyššou ako  $10^{\circ}C$ )
- $s_5$  ... ročná teplotná amplitúda (rozdiel medzi minimálnou a maximálnou teplotou počas roka v  $^{\circ}C$ )
- $s_6$  ... priemerná denná teplota počas vegetačného obdobia v  $^{\circ}C$
- $s_7$  ... pôdna vlhkosť (relatívna hodnota z intervalu 0 - 1)
- $s_8$  ... úhrn zrážok počas vegetačného obdobia v mm
- $s_9$  ... index aridity podľa DE MARTONE v  $mm \cdot ^{\circ}C^{-1}$  odvodený na základe vzťahu:

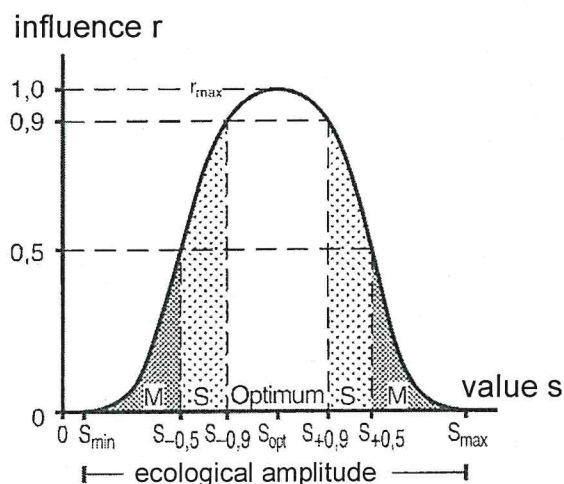
$$s_9 = \frac{s_8}{s_6 + 10} \quad (2)$$

#### 3.2 Odvodenie transformačných funkcií

Transformácia stanovištných premenných  $s_i$  na relatívne hodnoty vplyvu  $r_i$  sa prevádza pomocou transformačnej funkcie (vzťah 1). Funkcia vychádza z analytického princípu a je založená na princípe fuzzy množín. Princíp je znázornený na obr.1. Ekologická amplitúda premennej  $s$  je zobrazená na osi  $x$ . Ide o rozsah medzi minimálnou a maximálnou hodnotou premennej (napríklad priemerná teplota alebo úhrn zrážok), v ktorom dokáže drevina prežiť. Transformovaná hodnota  $r$  je zobrazená na osi  $y$ . Ide o hodnotu z rozsahu 0 až 1. Ak má premenná  $s$  vplyv na prírastok dreviny v rozsahu 0,9 až 1,0, potom je drevina v optimálnych podmienkach. Interval 0,5 až 0,9 znamená sub-optimálne podmienky a interval od 0 do 0,5 znamená pesimálne podmienky. Zmiený princíp je použitý na všetky dreviny (smrek, jedľa, borovica, buk a dub) a všetkých 9 stanovištných premenných. V každej funkcii boli identifikované lomové body ( $c_j$ ) a boli vytvorené lineárne vektory:

$$r(s) = \begin{cases} (s \geq c_1) \wedge \left(s < c_1 + \frac{c_2 - c_1}{2}\right) \Rightarrow 2 \cdot \left(\frac{s - c_1}{c_2 - c_1}\right)^2 \\ \left(s \geq c_1 + \frac{c_2 - c_1}{2}\right) \wedge (s < c_2) \Rightarrow 1 - 2 \cdot \left(\frac{s - c_2}{c_2 - c_1}\right)^2 \\ (s \geq c_2) \wedge (s < c_3) \Rightarrow 1 \\ (s \geq c_3) \wedge \left(s < c_3 + \frac{c_4 - c_3}{2}\right) \Rightarrow 1 - 2 \cdot \left(\frac{s - c_3}{c_4 - c_3}\right)^2 \\ \left(s \geq c_3 + \frac{c_4 - c_3}{2}\right) \wedge (s < c_4) \Rightarrow 2 \cdot \left(\frac{s - c_4}{c_4 - c_3}\right)^2 \\ (s < c_1) \vee (s \geq c_4) \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (3)$$

Popísaná funkcia je veľmi flexibilná a dokáže zobrazit' tvar variabilných transformačných funkcií s optimom v strede, okolo stredu, až po okraje ekologickej amplitúdy  $\langle s_{\min}; s_{\max} \rangle$ . Flexibilita je zabezpečená lomovými bodmi  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  a  $c_4$ . Body sú definované ako absolútne hodnoty stanovištnej premennej ( $^{\circ}\text{C}$ , mm, ppb, ppm atď.). Hodnoty  $c_j$  sú publikované PRETZSCHOM a KAHNOM (1998).



Obr. 1 Princíp transformačnej funkcie

Fig. 1 The principle of transformation function

### 3.3 Odvodenie agregačných funkcií

Odvodenie komplexného vplyvu všetkých stanovištných premenných na prírastok stromov je ďalším krokom. Princíp vychádza z agregáčnej funkcie. Funkcia spája jednotlivé vplyvy  $r_i$  do komplexného vplyvu  $r$ . Musíme brať do úvahy, že niektoré faktory sú limitujúce a niektoré sú kompenzačné. Limitujúce faktory sa spájajú predovšetkým pomocou logickej spojky „a“, to znamená, že všetky musia byť uspokojené. Kompenzačné faktory sa spájajú predovšetkým pomocou logickej spojky „alebo“, to znamená, že aspoň jeden z nich musí byť dostatočný. Najčastejšie sa vyskytuje prípad, keď spolupôsobenie faktorov je niekde medzi oboma extrémami „a - alebo“. V súvislosti s tým sa využíva agregáčna funkcia podľa ZIMMERMANA a ZYSNU (1980), ktorá sa chová veľmi flexibilne. Funkcia bola aplikovaná aj v modeli SILVA 2.2 (KAHN 1994) a je aplikovaná aj v našom modeli SIBYLA. Algoritmus je založený na výpočte celkového **nutričného** ( $r_N$ ), **termálneho** ( $r_T$ ) a **humidného** ( $r_H$ ) efektu:



$$r_N = \left( \prod_{i=1}^3 r_i \right)^{1-\gamma_3} \cdot \left( 1 - \prod_{i=1}^3 (1-r_i) \right)^{\gamma_3} \quad (4)$$

$$r_T = \left( \prod_{i=4}^6 r_i \right)^{1-\gamma_4} \cdot \left( 1 - \prod_{i=4}^6 (1-r_i) \right)^{\gamma_4} \quad (5)$$

$$r_H = \left( \prod_{i=7}^9 r_i \right)^{1-\gamma_5} \cdot \left( 1 - \prod_{i=7}^9 (1-r_i) \right)^{\gamma_5} \quad (6)$$

Nutričný efekt kombinuje faktory: obsah  $N_2O$  a  $CO_2$  v ovzduší a obsah živín v pôde. Termálny efekt kombinuje faktory: počet dní vegetačného obdobia, ročná teplotná amplitúda a priemerná teplota počas vegetačnej periódy. Humidný efekt kombinuje faktory: pôdna vlhkosť, úhrn zrážok vo vegetačnej perióde a index aridity. Efekty sú potom agregované do vplyvu na redukciu asymptoty ( $r_A$ ) a redukciu veku kulminácie ( $r_{tkulm}$ ) pre krivku výškového rastového potenciálu a vplyvu na redukciu prírastku kruhovej základne ( $r_g$ ):

$$r_A = (r_N \cdot r_T \cdot r_H)^{1-\gamma_1} \cdot (1 - (1-r_N)(1-r_T)(1-r_H))^{\gamma_1} \quad (7)$$

$$r_{tkulm} = (r_N \cdot r_T \cdot r_H)^{1-\gamma_2} \cdot (1 - (1-r_N)(1-r_T)(1-r_H))^{\gamma_2} \quad (8)$$

$$r_g = (r_N \cdot r_6 \cdot r_8)^{1-\gamma} \cdot (1 - (1-r_N)(1-r_6)(1-r_8))^{\gamma} \quad (9)$$

Na základe nesignifikantného vplyvu sa vo vzťahu 9 uvažuje iba s priemernou teplotou vo vegetačnom období ( $r_6$ ) ako termálny efekt a úhrnom zrážok vo vegetačnom období ako ( $r_8$ ) ako humidný efekt. Parametre  $\gamma$  boli odvodené regresnou analýzou z údajov experimentálnych plôch (KAHN 1994) a sú publikované v práci PRETZSCHA A KAHNA (1998).

### 3.4 Produkčné rámce pre odvodenie prírastku stromov

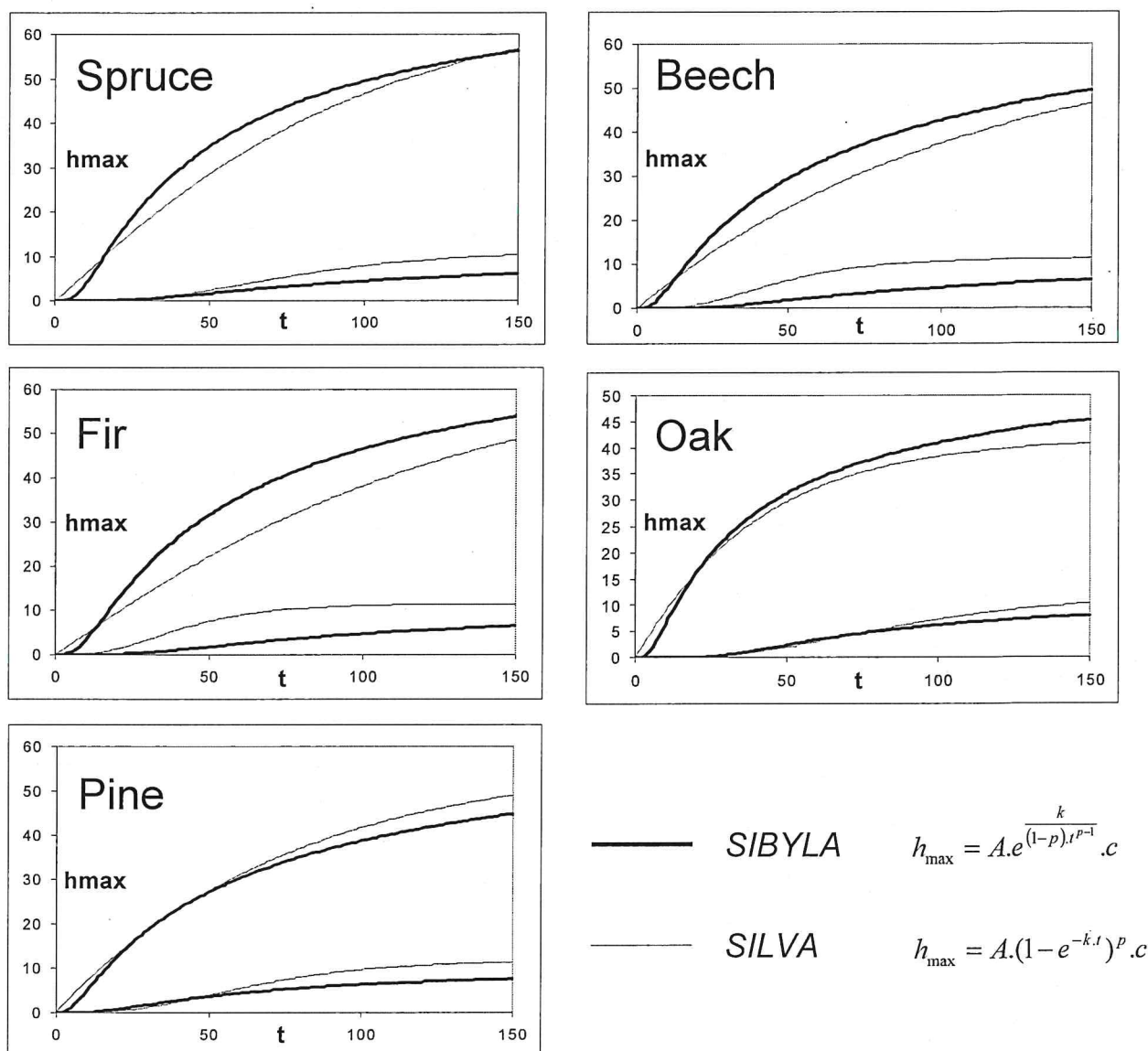
Nové produkčné rámce pre hrúbkový a výškový prírastok boli odvodené podľa metodiky KAHNA (1994). Pritom boli použité údaje zo slovenských rastových tabuliek. Výsledkom sú horné a spodné obalové krivky pre rast výšky a hrúbky stromov. Výškové krivky boli modelované na základe minimálnej a maximálnej asymptoty výškového rastu a minimálneho a maximálneho veku kulminácie výškového prírastku. Pre tieto účely bola použitá KORFOVÁ funkcia:

$$h_{\max} = c \cdot A \cdot e^{\frac{k}{(1-p) \cdot t^{p-1}}} \quad (10)$$

Funkcia popisuje vývoj výškového potenciálu stromu ( $h_{\max}$ ) v závislosti od jeho veku ( $t$ ). Koeficienty modelu ( $A$ ,  $k$ ,  $p$ ) boli odvodené z rastových tabuliek (HALAJ ET AL. 1987) a koeficient  $c$ , ktorý popisuje vzťah medzi maximálnou a hornou výškou, bol odvodený z prieskumu výškovvej štruktúry slovenských lesných porastov HALAJ (1978). Potenciál hrúbkového prírastku ( $i_{d\max}$ ) závisí od hrúbky stromu ( $d_{1.3}$ ) podľa funkcie:

$$i_{d\max} = d_{1.3} \cdot \frac{k}{\left( \frac{-k}{\ln\left(\frac{d_{1.3}}{c \cdot A}\right) \cdot (p-1)} \right)^{\frac{p}{p-1}}} \quad (11)$$

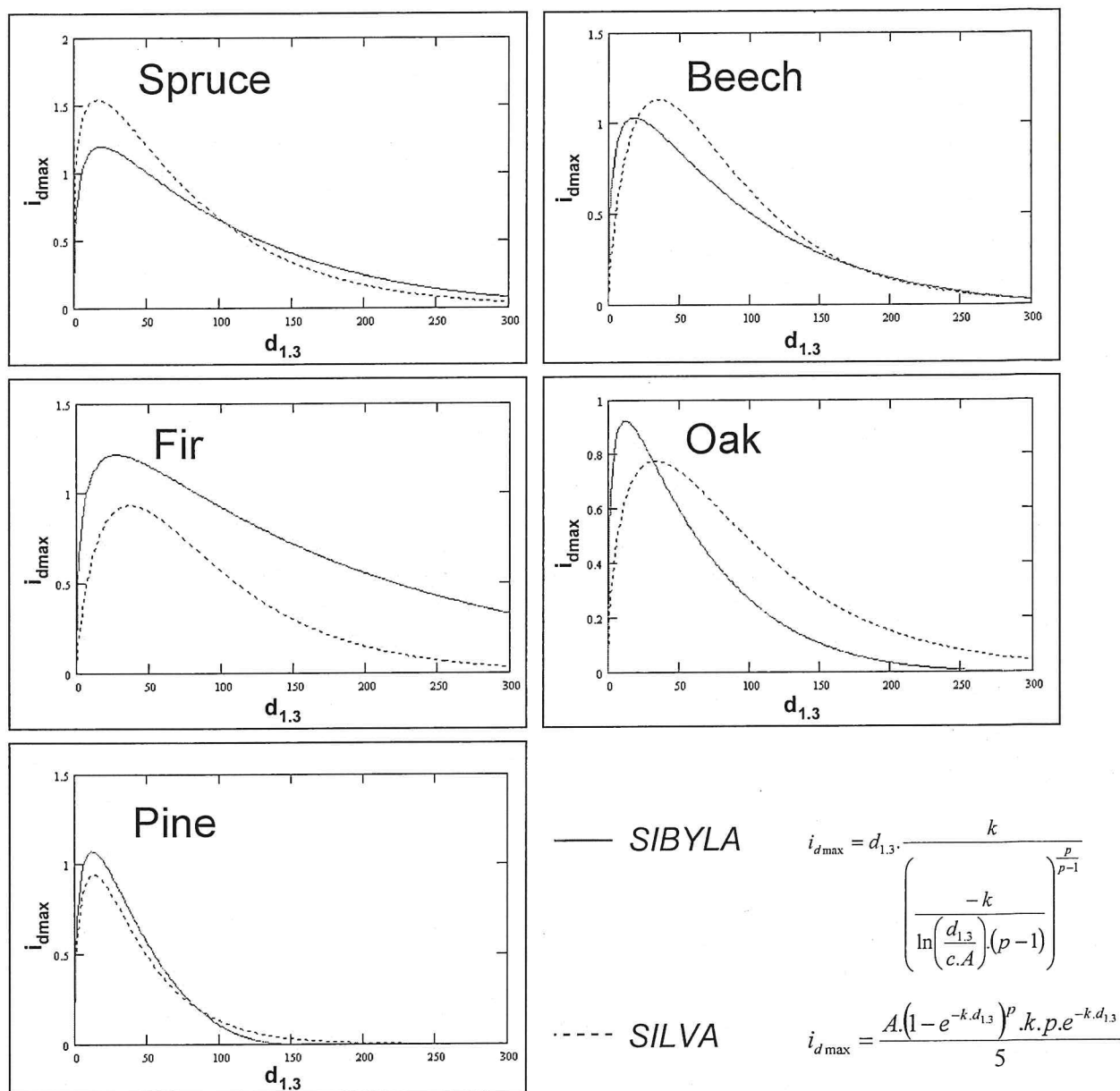
Koeficienty modelu ( $A, k, p$ ) boli odvodené z rastových tabuliek (HALAJ ET AL. 1987) a koeficient  $c$ , ktorý popisuje vzťah medzi maximálnou a strednou hrúbkou je odvodený z prieskumu hrúbkovej štruktúry slovenských lesných porastov (HALAJ 1957). Odvodené funkcie v porovnaní s funkciami modelu SILVA sú zobrazené na obr.2. a 3.



Obr. 2 Vývoj maximálneho výškového rastového potenciálu pri optimálnych a pesimálnych stanovištných podmienkach – porovnanie modelu SIBYLA a SILVA

Fig. 2 The development of maximal tree height under optimal and pessimal stand conditions - comparison of SIBYLA and SILVA model), spruce = smrek, fir = jedľa, pine = borovica, beech = buk, oak = dub





Obr. 3 Vývoj maximálneho hrúbkového prírastku pri optimálnych stanovištných podmienkach – porovnanie modelu SIBYLA a SILVA

Fig. 3 The development of maximal tree diameter increment under optimal stand conditions – a comparison of SIBYLA and SILVA model), spruce = smrek, fir = jedľa, pine = borovica, beech = buk, oak = dub

### 3.5 Model regionalizácie klimatických premenných

Ekologická stanovištná bonitácia je veľmi flexibilná a progresívna metóda pre modelovanie rastu stromov. Okrem vysokých nárokov na konštrukciu modelu, však vyžaduje aj veľmi detailné vstupy (klimatické údaje). Toto zamedzuje širokému využitiu v bežnej lesníckej praxi. Klimatické údaje sú často neprístupné alebo veľmi drahé. Preto sme pristúpili k ďalšiemu logickému kroku. Ide o odvodenie zjednodušeného modelu klimatických charakteristík. Vstupom do modelu sú potom bežné údaje inventarizácie lesa a geografie. Bolo potrebné vyriešiť nasledujúce dve úlohy:

- vytvoriť detailný priestorový model klimatických premenných pomocou metód regionalizácie klímy nástrojmi geografických informačných systémov (GIS),

- vytvoriť zovšeobecnený databázovo-matematický model pre odvodenie klimatických premenných z bežných lesníckych informácií (lesná oblasť, nadmorská výška, expozícia, sklon).

Z údajov meteorologických staníc boli najprv vypočítané stanovištné premenné ( $S_i$ ). Stanovištné premenné sú nevyhnutné pre ekologickú bonitáciu stanovišťa. Ide o premenné: počet dní v roku s priemernou dennou teplotou vyššou ako  $10^{\circ}\text{C}$  ( $S_1$ ), ročná teplotná amplitúda ( $S_2$ ), priemerná teplota v období od začiatku apríla do konca septembra ( $S_3$ ) a úhrn zrážok v období od začiatku apríla do konca septembra ( $S_4$ ). Na tieto účely bola použitá metodika Svetovej meteorologickej organizácie (WMO). Ďalej boli odvodené regresné funkcie závislosti klimatickej premennej ( $\bar{s}_i$ ) na nadmorskej výške meteorologickej stanice ( $Alt$ ). Funkcie boli potrebné pre regionalizáciu klimatických charakteristík v prostredí GIS (obr.4):

$$\bar{s}_i = f(Alt). \quad (12)$$

Potom boli vypočítané rozdiely medzi skutočnými hodnotami ( $S_i$ ) a modelovanými hodnotami ( $\bar{s}_i$ ) na všetkých meteorologických staniciach:

$$\Delta s_i = S_i - \bar{s}_i. \quad (13)$$

Následne boli odvodené klimatické rastre pomocou funkcie (12) v prostredí softvéru IDRISI32. Proces bol prevedený pomocou mapovej algebry na všetkých obrazových prvkoch (pixeloch) digitálneho modelu reliéfu Slovenska (DTM). Výškový raster (GRID) bol odvodený z vrstevnic topografickej mapy v mierke 1:50000 a ich priestorovou interpoláciou. Odvodený raster bol potom použitý ako DTM. Priestorové rozlíšenie rastra je 90 krát 90 m. Potom boli vypočítané bodové informácie rozdielov skutočných a modelových údajov na meteorologických staniciach podľa vzťahu (13). Diferencie  $\Delta s_i$  boli následne interpolované pomocou recipročnej exponenciálnej funkcie  $1/x^2$ , kde „ $x$ “ je vzdialenosť pixla k meteorologickej stanici. Pre interpoláciu boli použité údaje zo 6 najbližších staníc ku každému pixlu. Na záver bola použitá operácia prekrytia klimatických rastrov a rastrov diferencií so sumačným operátorom.

$$s_i = \bar{s}_i + \Delta s_i. \quad (14)$$

Výsledkom sú korigované klimatické rastre (MINĐÁŠ a ŽURSKÝ 2002) s priestorovým rozlíšením 90 krát 90 m. Rastre sú odvodené pre všetky potrebné klimatické premenné.

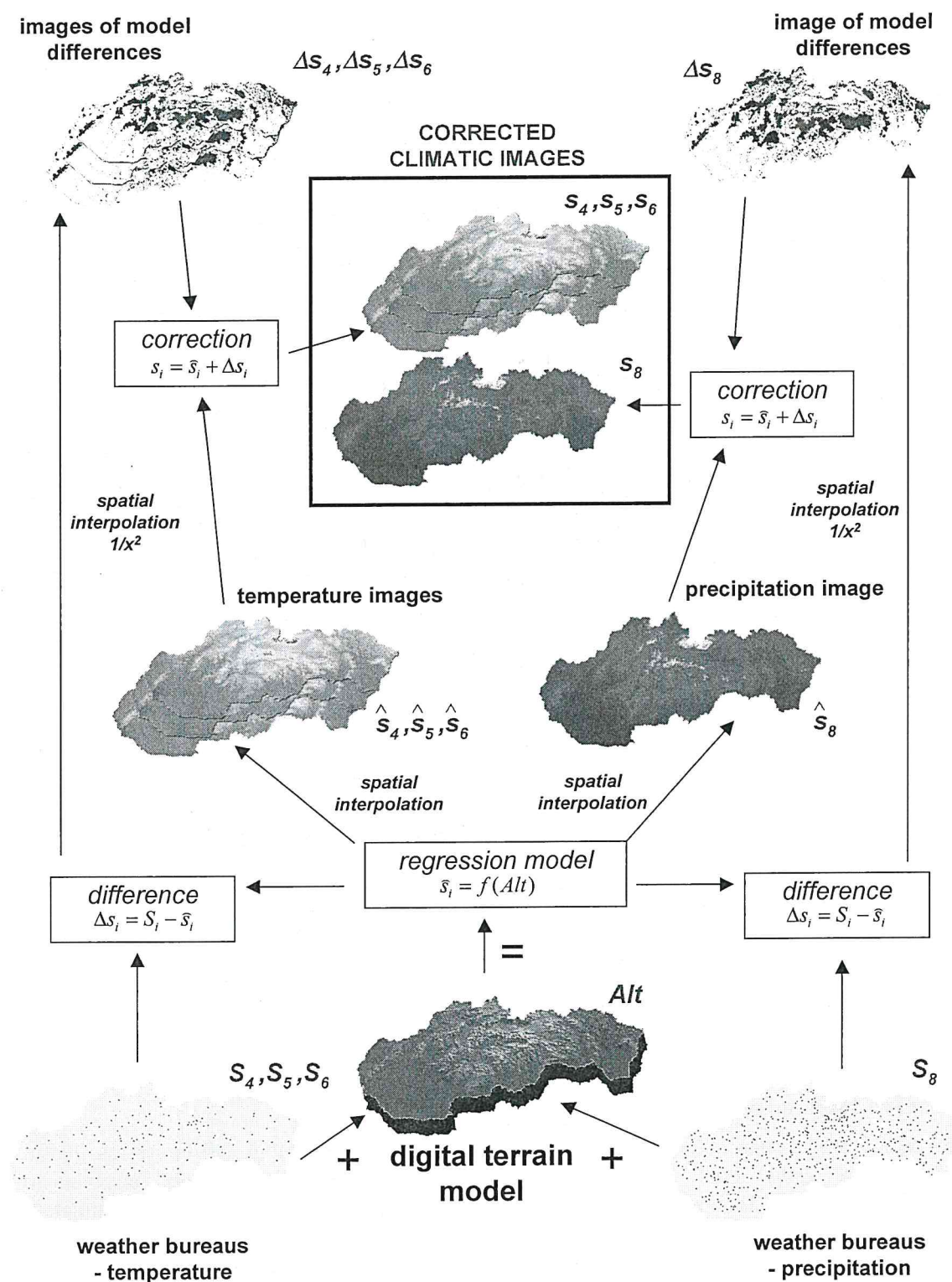
Regionalizované klimatické charakteristiky tvoria základ pre ekologickú stanovištnú bonitáciu. Sú však aplikovateľné v lesníckej praxi prevažne s problémami. Potreba softvéru typu GIS a prepojenie rastového simulátora na takýto nástroj môže byť v praxi neprekonateľnou prekážkou. Táto prekážka bola dôvodom zjednodušiť model tak, aby bol ľahko aplikovateľný v praxi. Model sme tak prepojili na bežne údaje, ako sú: lesná oblasť, nadmorská výška, expozícia a sklon. Postup odvodenia modelu spočíva z nasledujúcich krokov:

1. Bola vytvorená rastrová mapa slovenských lesných oblastí a bol extrahovaný digitálny model reliéfu každej lesnej oblasti.
2. Boli extrahované spodné a dolné výškové stupne na základe nadmorskej výšky pre každú lesnú oblasť. Spodný výškový stupeň pozostáva z pixlov, ktoré majú nadmorskú výšku v rozpätí  $\langle \min; \min + 25 \rangle$  a horný výškový pozostáva z rozpätia  $\langle \max - 25; \max \rangle$ .
3. Boli odvodené priemerné hodnoty z korigovaných klimatických rastrov pre horné a spodné výškové stupne lesných oblastí pomocou programu IDRISI 32. Výsledkom procesu je **tabuľka klimatickej amplitúdy (TCA)**.
4. Požadované klimatické hodnoty sú potom odvodené z tabuľky TCA, na základe príslušnosti lesného porastu do lesnej oblasti a jeho priemernej nadmorskej výšky. Pre tento účel je aplikovaný algoritmus interpolácie:

$$s' = s_{\downarrow} + (s_{\uparrow} - s_{\downarrow}) \cdot \frac{Alt - Alt_{\min}}{Alt_{\max} - Alt_{\min}}, \quad (15)$$



kde  $Alt_{min}$  a  $Alt_{max}$  sú minimálna a maximálna nadmorská výška použitej lesnej oblasti,  $s_{\downarrow}$  a  $s_{\uparrow}$  sú stanovištné premenné pre minimálnu a maximálnu nadmorskú výšku a  $Alt$  je aktuálna nadmorská výška porastu.



Obr. 4 Regionalizácia klimatických premenných v prostredí GIS  
Fig. 4 Regionalisation of climatic values in GIS environment

5. Interpolované stanovištné (klimatické) premenné sú potom modifikované pomocou modifikátorov odvodených KAHNOM (1994):

$$s_4(DAYS) = s'_4 + \rho \cdot 10, \quad (16)$$

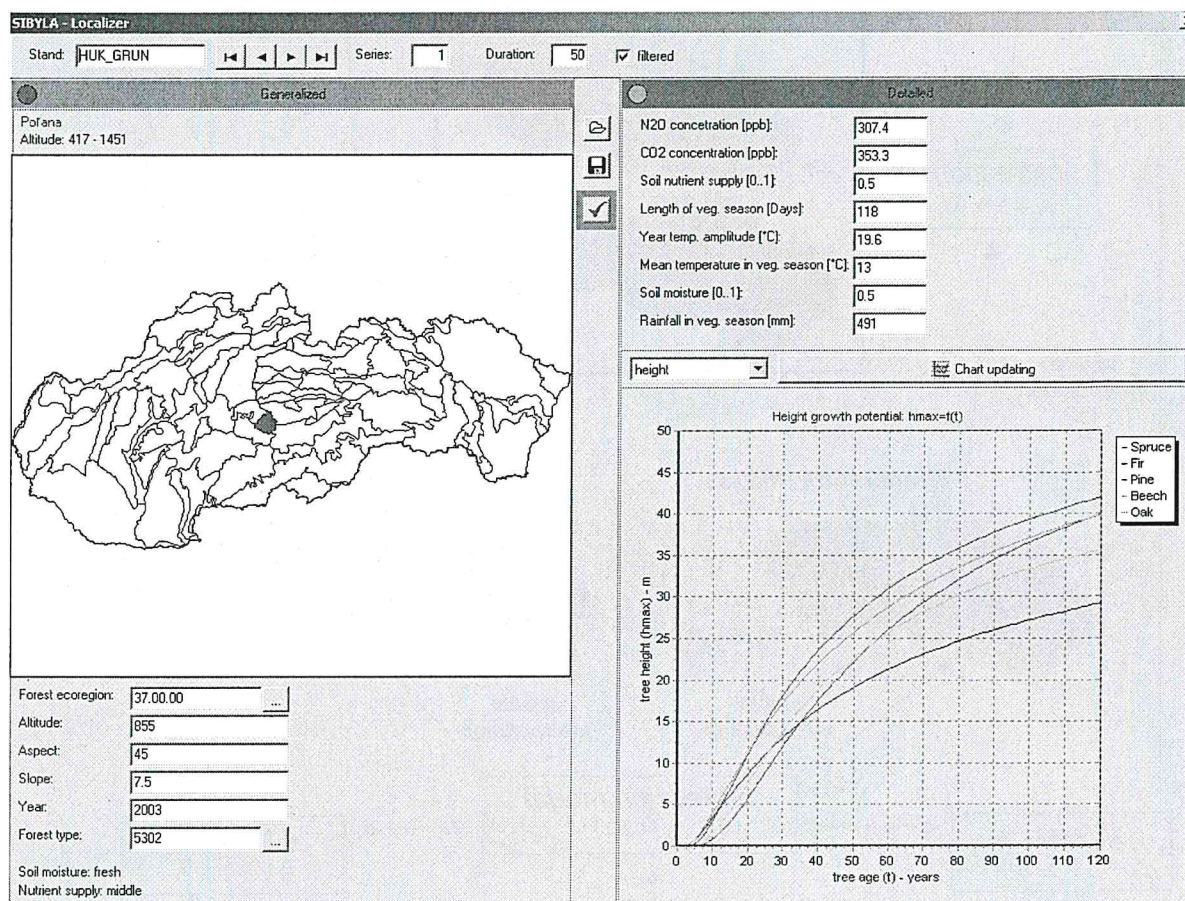
$$s_5(TAMPL) = s'_5 + \rho, \quad (17)$$

$$s_6(TEMP) = s'_6 + \rho, \quad (18)$$

$$s_8(PRECIP) = s'_8 + \rho \cdot 50, \quad (19)$$

kde  $\rho$  je základný modifikátor závislý na sklone (*slope*) a expozícii (*aspect*):

$$\rho = \sin(slope) \cdot (-\cos(aspect)). \quad (20)$$



Obr. 5 Dialóg programu SIBYLA Lokalizátor  
Fig. 5 Dialog of the software unit SIBYLA Localizer

### 3.6 Softvérová implementácia

Popísané metódy a odvodené algoritmy pre ekologickú stanovištnú bonitáciu drevín (smrek, jedľa, borovica, buk a dub) boli prevedené do podoby softvérového modulu nazývaného SIBYLA Lokalizátor (obr.5) a boli integrované s programovým riešením rastového simulátora SIBYLA Suite. Programová jednotka umožňuje špecifikovať podrobné alebo zovšeobecnené stanovištné vstupy (klíma, pôda, ovzdušie) a modelovať úroveň výškového a hrúbkového rastu drevín na základe vstupných údajov. V prípade ak poznáme podrobné stanovištné premenné ( $s_1$  až  $s_9$ ) môžeme ich špecifikovať priamo v pravej časti programového okna. Ak podrobné údaje nie sú známe, tak môžeme navoliť lesnú oblasť, expozíciu, sklon, kalendárny rok a lesný typ v ľavej časti programového okna. Lesnú oblasť môžeme vybrať zo zoznamu alebo z geografickej mapy. Po špecifikovaní podrobných alebo zovšeobecnených stanovištných premenných môžeme aktualizovať



graf výškového rastového potenciálu alebo graf maximálneho hrúbkového prírastku pre všetky modelované dreviny (smrek, jedľa, borovica, buk a dub). Graf je poskytnutý vo forme obrázku, ako aj vo forme tabuľkových údajov. Ďalším variantom je zobrazenie algoritmov (rovníc a koeficientov). Algoritmická časť reprezentuje najužitočnejšiu vlastnosť programu, pretože poskytuje možnosť použiť algoritmy pre účely prognóz aj v iných programoch a robí proces simulácie transparentnejším. Rastový simulátor SIBYLA sa tak nejaví ako „čierna skrinka“, čo je častý neduh iných modelov. Hlavnou výhodou programového riešenia je prepojenie na štruktúrovanú databázu typu Microsoft Access. To umožňuje zozbierať veľký počet lesných porastov, eventuálne ich importovať z iných databáz. Toto riešenie, spolu s prepojením na iné programové jednotky simulátora SIBYLA, ho robí mohutným a sofistikovaným nástrojom pre rastové prognózy. Z toho vyplýva, že je vhodným prostriedkom pre objektívne analýzy spravovania rizík lesných ekosystémov pod vplyvom klimatických zmien. Najdôležitejším faktom je, že na Slovensku doposiaľ nebol vytvorený systém ekologickej stanovištnej bonitácie, integrovaný do efektívneho softvérového nástroja pre rastové prognózy.

### 3.7 Reprezentatívne lesné porasty pre hodnotenie klimatických zmien

Bolo pripravených 9 reprezentatívnych lesných porastov. Reprezentatívne porasty sú pripravené ako porastové modely pokrývajúce všetky lesné vegetačné stupne na Slovensku a ich typické drevinové zloženia. Dreviny smrek, jedľa, borovica, buk a dub boli umiestnené do typických lesných oblastí a nadmorských výšok. Zoznam reprezentatívnych porastových modelov je zobrazený v tabuľke 1. Pri tvorbe modelov boli aplikované priemerné bonity a priemerná zásobová úroveň podľa slovenských rastových tabuliek (HALAJ ET AL. 1987). Použili sme 30 ročné lesné porasty, okrem modelu 4 pre vysokohorský smrek, kde sme zvolili vek 45 rokov. Použili sme kritické zakmenenie porastov definované HALAJOM (1985). Na tvorbu porastových modelov bol použitý generátor štruktúry lesa z modelu SIBYLA (FABRIKA 2005). Boli generované nasledujúce údaje jednotlivých stromov: hrúbky, výšky, korunové parametre a súradnice na ploche. Na generovanie týchto údajov sme použili údaje z rastových tabuliek: zásoba na hektár, stredná hrúbka a stredná výška. Porastové modely boli umiestnené na reprezentatívny terén, s vhodným sklonom a expozíciou. Každý model bol reprodukován 3 krát, vďaka stochastickému princípu generátora štruktúry.

**Tab. 1 Porastové modely použité pre analýzu vplyvu klimatických zmien na produkciu lesa**  
**Tab. 1 Forest stand models used for analysis of climate change influence on forest production**

Porastový model 1

| lesná oblasť      | nadm. výška | vek    | zakmenenie  | expozícia | sklon |
|-------------------|-------------|--------|-------------|-----------|-------|
| 37.00.00 - Poľana | 900         | 30     | 0,9         | juh       | 20°   |
| drevina           | zastúpenie  | bonita | zás. úroveň |           |       |
| smrek             | 100%        | 28     | 2,2         |           |       |

Porastový model 2

| lesná oblasť                   | nadm. výška | vek    | zakmenenie  | expozícia | sklon |
|--------------------------------|-------------|--------|-------------|-----------|-------|
| 17.01.00-Zvolenská pahorkatina | 400         | 30     | 0,8         | východ    | 15°   |
| drevina                        | zastúpenie  | bonita | zás. úroveň |           |       |
| buk                            | 100%        | 24     | 2,2         |           |       |

Porastový model 3

| lesná oblasť               | nadm. výška | vek    | zakmenenie  | expozícia | sklon |
|----------------------------|-------------|--------|-------------|-----------|-------|
| 12.00.00 - Košická kotlina | 300         | 30     | 0,9         | rovina    | 0°    |
| drevina                    | zastúpenie  | bonita | zás. úroveň |           |       |
| dub                        | 100%        | 24     | 2,2         |           |       |



Porastový model 4

| lesná oblasť               | nadm. výška | vek    | zakmenenie  | expozícia  | sklon |
|----------------------------|-------------|--------|-------------|------------|-------|
| 47.01.00 - Liptovské Tatry | 1300        | 45     | 0,9         | juhovýchod | 25°   |
| drevina                    | zastúpenie  | bonita | zás. úroveň |            |       |
| smrek                      | 100%        | 20     | 2,2         |            |       |

Porastový model 5

| lesná oblasť            | nadm. výška | vek    | zakmenenie  | expozícia | sklon |
|-------------------------|-------------|--------|-------------|-----------|-------|
| 46.03.01 - Kráľová hoľa | 1000        | 30     | 0,9         | juhozápad | 20°   |
| drevina                 | zastúpenie  | bonita | zás. úroveň |           |       |
| smrek                   | 59%         | 28     | 2,2         |           |       |
| buk                     | 27%         | 24     | 2,2         |           |       |
| jedľa                   | 14%         | 26     | 2,2         |           |       |

Porastový model 6

| lesná oblasť             | nadm. výška | vek    | zakmenenie  | expozícia   | sklon |
|--------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|-------|
| 20.01.00 - Slanské vrchy | 400         | 30     | 0,8         | severozápad | 10°   |
| drevina                  | zastúpenie  | bonita | zás. úroveň |             |       |
| buk                      | 61%         | 24     | 2,2         |             |       |
| dub                      | 39%         | 24     | 2,2         |             |       |

Porastový model 7

| lesná oblasť           | nadm. výška | vek    | zakmenenie  | expozícia | sklon |
|------------------------|-------------|--------|-------------|-----------|-------|
| 35.00.00 - Veľká Fatra | 800         | 30     | 0,8         | východ    | 15°   |
| drevina                | zastúpenie  | bonita | zás. úroveň |           |       |
| buk                    | 65%         | 24     | 2,2         |           |       |
| jedľa                  | 35%         | 26     | 2,2         |           |       |

Porastový model 8

| lesná oblasť             | nadm. výška | vek    | zakmenenie  | expozícia | sklon |
|--------------------------|-------------|--------|-------------|-----------|-------|
| 01.00.00 - Borská nížina | 200         | 30     | 0,9         | rovina    | 0°    |
| drevina                  | zastúpenie  | bonita | zás. úroveň |           |       |
| borovica                 | 100%        | 20     | 2,9         |           |       |

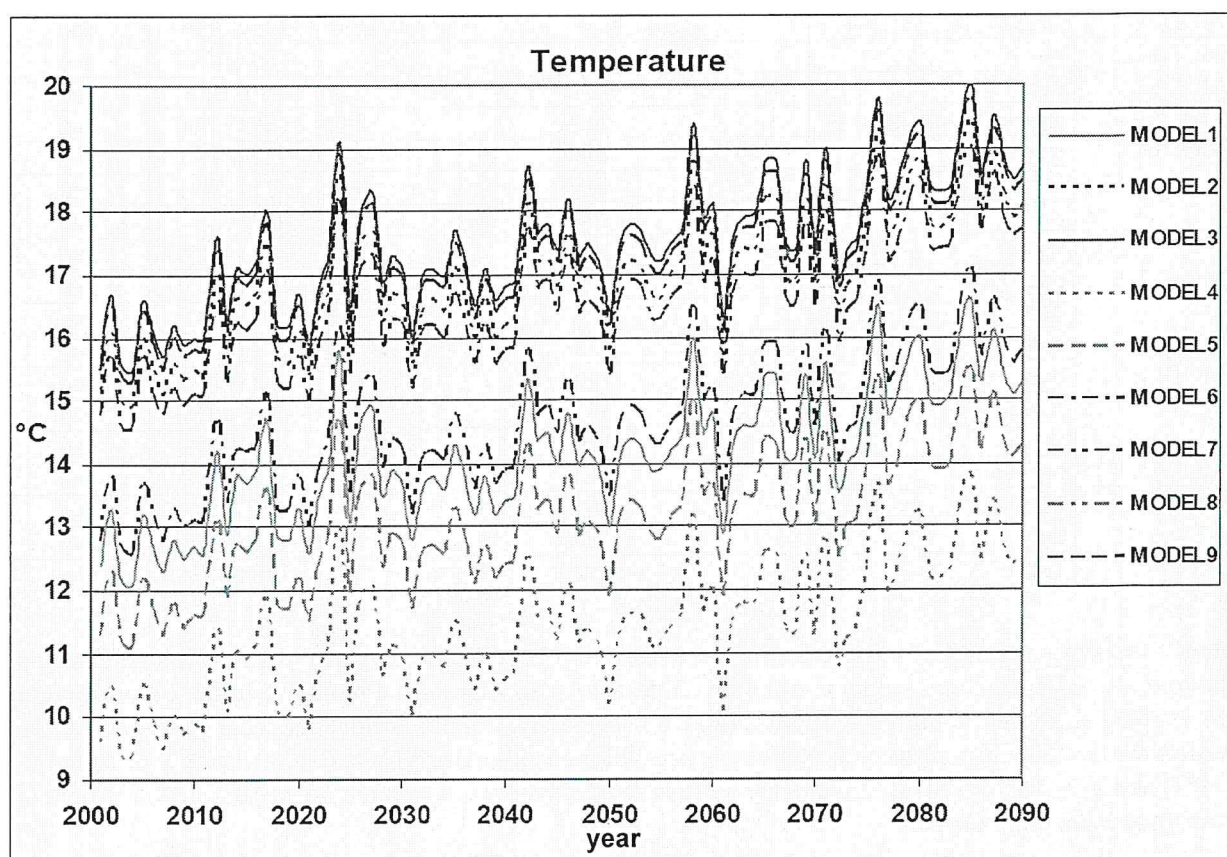
Porastový model 9

| lesná oblasť             | nadm. výška | vek    | zakmenenie  | expozícia | sklon |
|--------------------------|-------------|--------|-------------|-----------|-------|
| 01.00.00 - Borská nížina | 200         | 30     | 0,9         | rovina    | 0°    |
| drevina                  | zastúpenie  | bonita | zás. úroveň |           |       |
| borovica                 | 43%         | 20     | 2,9         |           |       |
| dub                      | 57%         | 24     | 2,2         |           |       |

### 3.8 Referenčná klíma, klimatická zmena a rastové prognózy

Boli pripravené scenáre zmeny klímy pre všetkých 9 porastových modelov. Klimatické scenáre obsahujú vývoj všetkých potrebných klimatických a pôdných charakteristík spomínaných v kapitole 3.1 a boli pripravené na 90 rokov od roku 2000, s ročným intervalom. Scenáre boli pripravené pracovníkmi Národného lesníckeho centra (MINDÁŠ 2006). Príklad prognózy priemernej dennej teploty vo vegetačnom období (v °C) je na obr.6. Následne boli spustené rastové prognózy pre všetky porastové modely a výsledky z prognóz boli spracované. Pri prognózach bol zvolený prirodzený vývoj

porastov, bez zásahu človeka, iba s prirodzenou mortalitou stromov. Prognózy boli prevedené pre dva varianty: a) klimatický scenár a b) referenčná klíma. Referenčná klíma obsahuje vývoj bez klimatickej zmeny a bola popísaná v kapitole 3.5. Boli vypočítané následné výstupné parametre z priebehu oboch variantov: stredná hrúbka a stredná výška porastových modelov, ich zásoba na hektár a celková objemová produkcia. Rastové prognózy boli prevedené trikrát, pre všetky tri generované štruktúry porastových modelov, vďaka stochastickému princípu rastového modelu SIBYLA. To znamená, že celkovo sme mali k dispozícii 9 výstupných prípadov pre všetky porastové modely. Boli vypočítané priemerné hodnoty z opakovaných výsledkov, spolu so smerodajnými odchýlkami, ktoré boli použité na štatistické testovanie diferencií medzi oboma variantmi na konci prognózovaného cyklu.



Obr. 6 Scenár priemernej dennej teploty počas vegetačného obdobia pre 9 reprezentatívnych porastových modelov

Fig. 6 Scenario of mean daily temperature in vegetation season for all nine representative stand models

#### 4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Ako indikátor vplyvu klimatických zmien na produkciu lesa sme použili celkovú objemovú produkciu (COP), teda sumu zásoby jednotlivých porastových modelov ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) na konci prognózy a zásoby všetkých mŕtvych stromov počas prognózy. Celková objemová produkcia bola porovnaná medzi scenárom klimatickej zmeny a referenčným scenárom bez klimatickej zmeny. Boli vypočítané diferencie v absolútnych a relatívnych hodnotách a tie boli podrobené štatistickým testom (tabuľka 2). Následne bola analyzovaná zmena zastúpenia drevín vzhľadom k obom variantom (tabuľka 3).

**Smrek** má v súčasnosti svoje prirodzené rozšírenie v dvoch vegetačných lesných stupňoch: šiestom a siedmom. Smrek často rastie v zmiešaných porastoch 6. vegetačného stupňa spolu s bukom a jedľou. Tento porastový typ reprezentuje model 5. Smrek taktiež veľmi často rastie v monokultúrach v 6. a 7. lesnom vegetačnom stupni. Model 1 reprezentuje 6. vegetačný stupeň (nižšie polohy) a model 4 reprezentuje 7. stupeň (vysokohorské polohy). Klimatické zmeny indikujú významné zníženie



produkcie smrekových porastov v monokultúrach 6. vegetačného stupňa (-22%) a signifikantné zvýšenie produkcie vysokohorských smrečín 7. vegetačného stupňa (+7%). Produkcia smreka v zmiešaných lesných porastoch 6. vegetačného stupňa sa signifikantne znížila (-4%), ale nie tak výrazne ako v monokultúrach rovnakého vegetačného stupňa. Percentuálne zastúpenie smreka sa zvýšilo na úkor jedle vďaka produkčnej zmene a zmene mortality stromov počas klimatických zmien.

**Tab. 2 Celková objemová produkcia (COP) na konci prognózy**

**Tab. 2 Total volume production (TVP) in the end of the prognosis**

| porastový model | drevina              | COP (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> ) |                  | rozdiel m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> (%) | štatistický významný |
|-----------------|----------------------|-----------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|----------------------|
|                 |                      | zmena klímy                             | referenčná klíma |                                              |                      |
| MODEL 1         | smrek                | 1157                                    | 1488             | -331 (-22%)                                  | áno                  |
| MODEL 2         | buk                  | 942                                     | 1131             | -189 (-17%)                                  | áno                  |
| MODEL 3         | dub                  | 729                                     | 813              | -84 (-10%)                                   | áno                  |
| MODEL 4         | smrek (vysokohorský) | 902                                     | 842              | +60 (+7%)                                    | áno                  |
| MODEL 5         | smrek                | 468                                     | 490              | -22 (-4%)                                    | áno                  |
|                 | buk                  | 445                                     | 470              | -25 (-5%)                                    | nie                  |
|                 | jedľa                | 194                                     | 283              | -89 (-31%)                                   | áno                  |
|                 | spolu                | 1107                                    | 1243             | -136 (-11%)                                  | áno                  |
| MODEL 6         | buk                  | 693                                     | 866              | -173 (-20%)                                  | áno                  |
|                 | dub                  | 185                                     | 186              | -1 (-1%)                                     | nie                  |
|                 | spolu                | 878                                     | 1052             | -174 (-17%)                                  | áno                  |
| MODEL 7         | buk                  | 790                                     | 855              | -65 (-8%)                                    | áno                  |
|                 | jedľa                | 341                                     | 394              | -53 (-13%)                                   | áno                  |
|                 | spolu                | 1131                                    | 1249             | -118 (-9%)                                   | áno                  |
| MODEL 8         | borovica             | 712                                     | 967              | -255 (-26%)                                  | áno                  |
| MODEL 9         | borovica             | 164                                     | 190              | -26 (-14%)                                   | áno                  |
|                 | dub                  | 478                                     | 592              | -114 (-19%)                                  | áno                  |
|                 | spolu                | 642                                     | 782              | -140 (-18%)                                  | áno                  |

**Jedľa** má svoje prirodzené rozšírenie hlavne v 5. lesnom vegetačnom stupni v zmiešaných porastoch s bukom a v 6. vegetačnom stupni v zmiešaných porastoch so smrekom a bukom. Model 7 reprezentuje 5. vegetačný stupeň a model 5 reprezentuje 6. vegetačný stupeň. Produkcia jedle je signifikantne redukovaná v oboch porastových modeloch pod vplyvom klimatických zmien, ale viac v 6. stupni (-31%) ako v 5. stupni (-13%). Zastúpenie jedle je redukované v 6. vegetačnom stupni, ale v 5. stupni si zachováva pôvodnú úroveň.

**Borovica** má svoje prirodzené rozšírenie takmer vo všetkých vegetačných stupňoch (od prvého po piaty), ale typický sa vyskytuje v 1. a 2. lesnom vegetačnom stupni. Tu rastie borovica často ako monokultúra (model 8), alebo v zmiešaných porastoch s dubom (model 9). Produkcia monokultúr sa pod vplyvom klimatickej zmeny signifikantne znížila (-26%). Táto redukcia je výraznejšia ako redukcia produkcie v zmesi s dubom (-14%). Súčasne sa zastúpenie borovice zvýšilo na úkor duba (+4%).

**Buk** má svoje prirodzené rozšírenie vo viacerých vegetačných lesných stupňoch a viacerých porastových typoch (rovnorodé aj zmiešané). Typické sú zmiešané porasty s dubom v 2. a 3. vegetačnom stupni (model 6), monokultúry v 4. vegetačnom stupni (model 2, *fagetum typicum* a *pauper*), zmiešané porasty s jedľou v 5. vegetačnom stupni (model 7) a zmiešané porasty so smrekom a jedľou v 6. vegetačnom stupni (model 5). Produkcia buka počas klimatických zmien sa signifikantne znížila vo všetkých vegetačných stupňoch okrem šiesteho, kde rozdiel produkcie nie je štatisticky významný. Rozdiel je výraznejší v nižších vegetačných stupňoch (2. + 3. stupeň = -20%, 4. stupeň = -17%, 6. stupeň = -8%). Percentuálne zastúpenie buka sa zvýšilo v 6. vegetačnom stupni (model 5) a znížilo v 2. a 3. vegetačnom stupni (model 6). Zastúpenie buka v 5. vegetačnom stupni (model 7) je na tej istej úrovni, ak porovnáme klimatickú zmenu a referenčnú klímu.

**Dub** má svoje prirodzené rozšírenie v nižších lesných vegetačných stupňoch (prvý až tretí). Typický sa vyskytuje v zmesi s borovicou (model 9) a v monokultúrach (model 3) v 1. a 2. vegetačnom stupni ako aj v zmiešaných porastoch s bukom v 3. vegetačnom stupni (model 6). Produkcia duba v 1.

vegetačnom stupni v zmesi s borovicou sa signifikantne znížila (-19%) v porovnaní s produkciou duba v čistých porastoch 2. vegetačného stupňa, kde sa redukovala menej signifikantne (-10%). Produkcia duba v 3. vegetačnom stupni, kde rastie v zmesi s bukom sa nezmenila (rozdiel -1% je štatisticky nevýznamný). Percentuálne zastúpenie duba sa zvýšilo v zmiešaných porastoch s bukom (model 6) a znížilo v zmiešaných porastoch s borovicou (model 9).

**Tab. 3 Zmena percentuálneho zastúpenia drevín v zmiešaných porastoch**  
**Tab. 3 Change of tree species percentage in mixed representative stands**

| porastový model | percentuálne zastúpenie dreviny (%)       |                                           |
|-----------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                 | referenčná klíma                          | zmena klímy                               |
| MODEL 5         | SM 59, BK 27, JD 14 → SM 38, BK 37, JD 25 | SM 59, BK 27, JD 14 → SM 41, BK 40, JD 19 |
| MODEL 6         | BK 61, DB 39 → BK 83, DB 17               | BK 61, DB 39 → BK 77, DB 23               |
| MODEL 7         | BK 65, JD 35 → BK 70, JD 30               | BK 65, JD 35 → BK 69, JD 31               |
| MODEL 9         | BO 43, DB 57 → BO 17, DB 83               | BO 43, DB 57 → BO 22, DB 78               |

Poznámka: SM – smrek, JD – jedľa, BO – borovica, BK – buk, DB – dub

## 5. ZÁVER

Rastové prognózy pomocou modelu SIBYLA pri porovnaní klimatických zmien a referenčného klimatického scenára potvrdili nasledovné hypotézy:

1. Ak má drevina svoju amplitúdu rozšírenia vo viacerých vegetačných stupňoch, potom sa bude pod vplyvom klimatických zmien presúvať optimum jej produkcie z nižších vegetačných stupňov do vyšších.
2. Zraniteľnosť zmiešaných porastov je menšia ako zraniteľnosť monokultúr, to znamená, že pod vplyvom klimatických zmien budú zmiešané porasty menej atakované ako rovnorodé porasty.
3. Vysokohorské lesy budú mať optimálnejšie podmienky pre svoj rast počas klimatických zmien ako doteraz a horná hranica lesa bude mať tendenciu posúvať sa do vyšších nadmorských výšok (samozrejme, iba v prípade ak budú uspokojené aj iné ako klimatické faktory, napríklad pôdne podmienky).

Predložená práca demonštruje, že model SIBYLA je veľmi vhodný nástroj pre skúmanie vplyvu klimatických zmien na rast a produkciu lesných porastov. Táto experimentálna štúdia potvrdila niektoré hypotézy lesníckeho výskumu, ktoré sa dotýkajú problematiky klimatických zmien. Je nevyhnutné pokračovať aj v budúcnosti pri aplikácii modelu SIBYLA v tejto oblasti. Pritom bude potrebné naplniť aj ďalšie požiadavky a námety na upresnenie a zdokonalenie výskumu:

1. Je potrebné implementovať model škodlivých činiteľov, kalamít a lesných škôd (ako napríklad vietor, sneh, podkôrny hmyz a podobne). Tieto činitele majú významné postavenie a ich frekvencia sa zvyšuje počas klimatických zmien. Ich výsledkom je rapídne zvyšovanie mortality stromov. V súčasnosti sa vyvíja sub-model s názvom SIBYLA Agresor, ktorý bude slúžiť na tieto účely. Momentálne je vo fáze testovania (FABRIKA a VACULČIAK 2007) a pripravuje sa jeho budúce použitie.
2. Bude dôležité rozšíriť rozsah testovaných porastov a umiestniť ich nielen do typických polôh ale aj do polôh, ktoré sú pre ne momentálne menej typické a priaznivé. Napríklad, môžeme posunúť umiestnenie lesných porastov nad ich doterajšiu hornú hranicu prirodzeného rozšírenia a skúmať vplyv klimatických zmien na produkciu takto umiestnených lesných porastov.
3. Bude nevyhnutné vyhľadať optimálne hospodárske stratégie pre elimináciu negatívnych vplyvov klimatických zmien na rast a produkciu lesných porastov. Táto experimentálna štúdia skúma iba prirodzený vývoj lesných porastov. Model SIBYLA má však aj rozsiahle možnosti pre zapojenie prebierkových a ťažbových režimov.

**Pod'akovanie:** Prvá časť tejto práce bola financovaná vďaka projektu EÚ (5. rámcový program) s názvom ITM (Implementing Tree Growth Models as Forest Management Tools), číslo projektu QLRT 1999-31349. Ďakujem Prof. Dr. Hubertovi Hasenauerovi za manažment projektu ITM a Prof. Dr. Hansovi Pretzschovi za povolenie využiť model SILVA 2.2 ako modelové pozadie pre vývoj



slovenského modelu SIBYLA. Druhá časť tejto práce bola financovaná projektom VEGA číslo 1047 (1/3531/06) - „Inventarizácia stavu lesa a prognózovanie jeho vývoja“. Na záver chcem poďakovať všetkým kolegom, programátorom a študentom, ktorí participovali na projektoch, menovite: Dr. habil. Ing. Ján Ďurský, doc. RNDr. Ing. Jozef Miňdáš, CSc., a Ing. Vendelín Gežo.

## LITERATÚRA

- FABRIKA, M., 2005: Simulátor biodynamiky lesa SIBYLA, koncepcia, konštrukcia a programové riešenie. Habilitačná práca. Technická univerzita vo Zvolen, 238 p.
- FABRIKA, M., VACULČIAK, T., 2007: Modeling of natural hazards in tree growth model SIBYLA. In: STŘELCOVÁ, K., ŠKVARENINA, J. & BLAŽENEC, M. (EDS.): "Bioclimatology and natural hazards", International Scientific Conference, Poľana nad Detvou, Slovakia, September 17-20, ISBN 978-80-228-17-60-8, 9 s.
- HALAJ, J., 1957: Matematicko-štatistický prieskum hrúbkovej štruktúry slovenských porastov. Lesnícky časopis, III/1, p.39-74.
- HALAJ, J., 1978: Výškový rast a štruktúra porastov. Veda Bratislava, 284 p.
- HALAJ, J., 1985: Kritické zakmenenie porastov podľa nových rastových tabuliek. Lesnícky časopis, 31, č. 4, p. 267-276.
- HALAJ ET AL., 1987: Rastové tabuľky hlavných drevín ČSSR. Príroda Bratislava, 361 p.
- HALAJ, J., ŘEHÁK, J., 1979: Vyhodenie rastových tabuliek hlavných drevín ČSSR. Lesnícke štúdie, č.30, 174 p.
- HASENAUER, H., 1994: Ein Einzelbaumsimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. Forstliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur, Wien, Band 8, 152 s Nagel, J., (1996): Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung. Forst ind Holz, 3, p.76-78.
- KAHN, M., 1994: Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Forstliche Forschungsber. München, Vol. 141, 221 p.
- MINĐÁŠ, J., 2006: Scenarios of climate change for representative forest stand and individual climate values. Unpublished results of the research.
- MINĐÁŠ, J., ĎURSKÝ, J., 2002: Climate rasters for ecological site classification. Unpublished results of geographic analysis in IDRISI32 environment in frame of scientific co-operation.
- NAGEL, J., 1996: Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung. Forst ind Holz, 3, p.76-78.
- PRETZSCH, H., 1992: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München, Nr.115, 332 p.
- PRETZSCH, H., KAHN, M., 1998: Konzeption und Konstruktion des Wuchsmodells SILVA 2.2 - Methodische Grundlagen. *Abschlußbericht Projekt W 28*, Teil 2, München, 277 p.
- PUKKALA, T., MIINA, J., 1997: A method for stochastic multiobjective optimization of stand management. Forest and Ecology Management. 98, p.189-203.
- SLOBODA, B., PFREUNDT, J., 1989: Tree and stand growth. A system analytical spatial model with consequences for test planning for thinning and single tree development. In: Proceedings: Artificial intelligence and growth models for forest management decision. School of Forestry and Wildlife Resources, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, p.119- 153.
- STERBA, H., 1995: Prognaus – ein absandsunabhängiger Wachstumssimulator für ungleichaltrige Mischbestände. DVFF – Sektion Ertragskunde, Joachimstahl, p.173-183.
- ZIMMERMANN, H.J., ZYSNO, P., 1980: Latent connectives in human decision making. Fuzzy Sets and Systems, H.4, p.37-51.

# MODELLING OF FOREST PRODUCTION AT CLIMATE CHANGE BY GROWTH MODEL SIBYLA

M. Fabrika

Department of Forest Management and Geodesy, Technical University in Zvolen

## Abstract

The paper presents methodology of climate change influence on forest stand production. The tree growth model SIBYLA is utilized for this purpose. The model has been developed at the Department of Forest Management and Geodesy in Zvolen. The model is sensitive to climate factors (days of vegetation season, mean temperature during vegetation season, year temperature amplitude, and total precipitation during vegetation season). The climate factors modify height and diameter growth potential, and consequently tree increment. The climatic factors make influence to tree mortality model at the same time.

The methodology has been examined by examples of forest stand models. Stand models are created as typical stand structures of spruce (lower and mountain sites), fir, pine, beech, and oak. Typical stand mixtures are used at the same time (spruce-fir, spruce-beech-fir, beech-oak, pine-oak). Tree values have been generated by data of Slovak yield tables for middle site indices, 30 year, and critical stand density. The stands have been placed into typical forest vegetation zone, and typical forest eco-regions with appropriate elevation, aspect, and slope. Climate scenarios for 90 years period (with interval 1 year) have been prepared by research of National Forest Center, and Slovak Hydrometeorological Institute. Scenario for changed climate, and reference scenario without climate change have been prepared. Growth prognosis has been produced with natural development (only natural tree reduction). Results have been compared between different climate scenarios.

**Keywords:** growth modelling, growth potential, climatic value influence, climate regionalisation, climate scenario





## REDAKČNÁ RADA

---

### **Predseda:**

*Ing. Ľubomír Žiak, MŽP SR*

### **Členovia:**

*RNDr. Pavol Faško, CSc., SHMÚ*

*Prof. RNDr. Milan Lapin, CSc., OMK, KAFZM FMFI UK*

*RNDr. Oľga Majerčáková, CSc., SHMÚ*

*Irena Michlíková, SHMÚ*

*RNDr. Pavol Nejedlík, CSc., SHMÚ*

*Prof. Ing. Jaroslav Škvarenina, CSc., TU Zvolen*

## NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM SLOVENSKEJ REPUBLIKY

### **Zväzok 12**

### **Vydáva:**

Ministerstvo životného prostredia SR, Nám. Ľ. Štúra 1, 812 35 Bratislava

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

Odborní redaktori: Milan Lapin, Pavol Nejedlík

Tlač: COPY CENTRUM PACI, tel.: 0903 753129, v roku 2008

Účelová publikácia, 162 s., náklad 250 výtlačkov

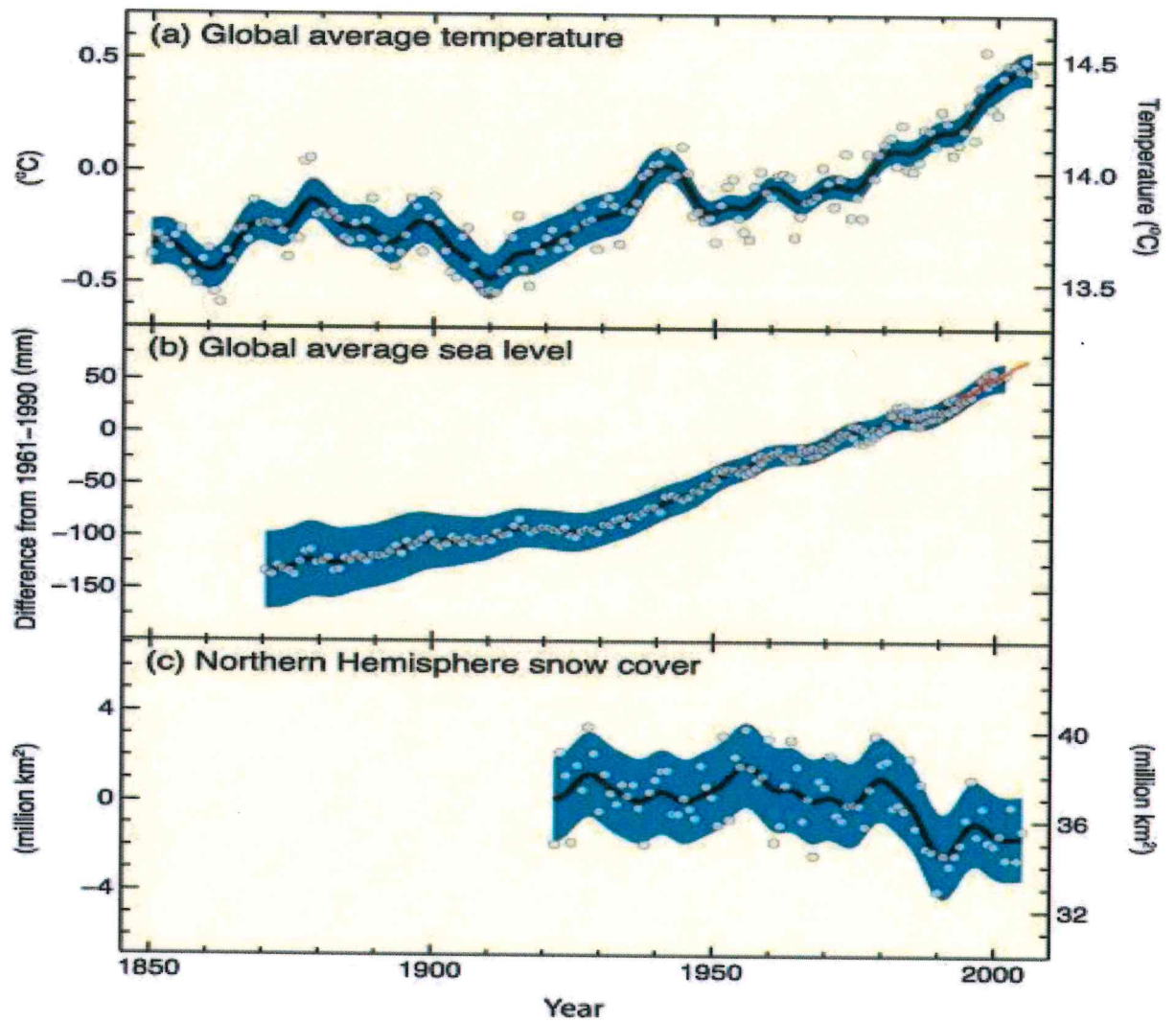
Všetky príspevky prešli odborným lektorovaním

Za jazykovú úroveň príspevkov zodpovedajú autori

**ISBN 978 – 80 – 88907 – 63 – 3**







©IPCC 2007: WG1-AR4

ISBN 978-80-88907-63-3