Vyhodnocení četnosti suchých období v České republice v podmínkách klimatické změny

Ing. Adam Vizina, Ph.D., Martin Hanel, Radek Vlnas, Ladislav Kašpárek

Abstrakt

Extrémní hydrologické situace, které lze pozorovat na přelomu 20. a 21. století, jsou reprezentovány rozsáhlými nebo bleskovými povodněmi a déle trvajícími periodami sucha. Z tohoto důvodu je velmi aktuálním tématem řešení dopadů klimatické změny na hydrologický režim. Dopady sucha je možné částečně zmírnit, nicméně k tomu je potřeba lépe pochopit jeho průběh. Ve výzkumu sucha stále existuje řada překážek. Vzhledem k tomu, že neexistuje jednotná definice sucha, není v současné době možné stanovit ani jednotný ukazatel či metodu vyhodnocení sucha. Metody vyhodnocení sucha se vždy odvíjí od použité definice a od podmínek na dané lokalitě. Příspěvek se zabývá problematikou modelování hydrologické bilance, generátory počasí, kvantifikací a analýzou sucha pro současná a výhledová období. Cílem práce je stanovení vhodného meteorologického indexu pro predikci hydrologického sucha v daném povodí.

První část příspěvku je věnována tvorbě generátorů počasí a následným generováním 500letých syntetických řad pomocí 4 generátorů. Jako zájmová území byla zvolena povodí Metuje, Orlice, Sázavy a Rakovnického potoka. Výstupy z generátorů byly dále vstupem do třech hydrologických modelů Bilan, GR4J a TUW-HBV. Na základě výsledků hydrologického modelování byly kvantifikovány nedostatkové objemy a jednotlivé indexy meteorologického a agronomického sucha. Tyto výsledky byly následně použity pro analýzu propagace sucha, která je založena na korelační analýze mezi meteorologickým indexem SPI a SPEI pro 1, 3, 6 a 12 měsíců s nedostatkovými objemy. Pro vyhodnocení bylo vybráno vždy 10 nejextrémnějších situací v 500leté řadě pro každý scénář a generátor. Touto kombinací vznikl dataset 400 událostí, které bylo touto analýzou vyhodnoceno každé období. Na základě výsledků byly pro každé povodí doporučeny meteorologické indexy.

Klíčová slova: sucho, hydrologie, meteorologie, změna klimatu, GEV

Úvod

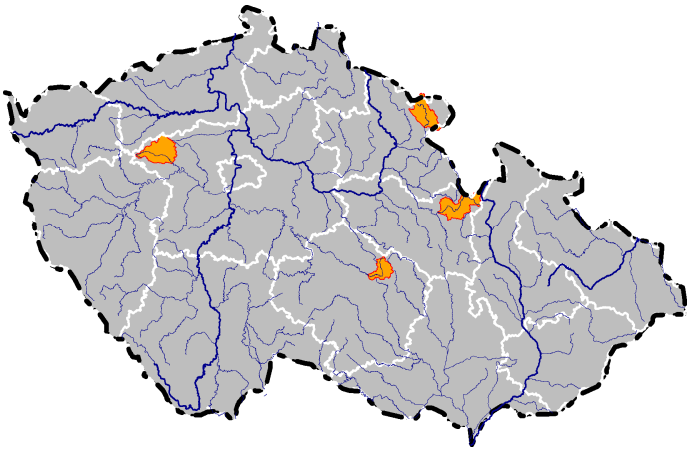
Za posledních třicet let se frekvence výskytu sucha nezměnila, ke změnám však došlo v průběhu sucha, v počtu lidí, kteří byli událostí ovlivněni a v plošném rozsahu. Stále se diskutuje o tom, jakým způsobem se projeví klimatická změna na výskyt sucha. Výsledky z klimatických modelů předpovídají, že klimatická změna povede ke zvýšení výskytu extrémních hydrologických situací. Některé oblasti budou čelit nižší dostupnosti vody, v některých oblastech srážky naopak vzrostou.

Není v lidských silách ovlivnit frekvenci výskytu sucha. Díky vhodnému monitoringu a strategii je však možné minimalizovat škody. Analýza politiky zvládání sucha, tak jak je v současnosti praktikována, ukázala, že při rozhodování během sucha je často používán přístup krizového managementu, spíš než příprava komplexních dlouhodobých plánů pro dostatečnou připravenost. Aby bylo možné snížit dopady na socioekonomickou sféru, je třeba zvolit metody risk-managementu (řízení rizika), které umožňují předcházet negativním dopadům nepříznivých okolností. Plán pro zvládání sucha je právě takovým vhodným nástrojem. Tyto plány však musí být založeny na kvalitních podkladech, jako je podrobná analýza propagace sucha skrze hydrologický cyklus.

Data

Výběr povodí proběhl dle návrhu metodiky na minimální zůstatkové průtoky [1]. Metoda vychází z rozdělení ČR podle hydrologické variability do 4 základních kategorií dle velikosti parametru K_{99}, který je definován poměrem mezi Q99% (průtok s pravděpodobností překročení 99%) a Q_a (dlouhodobý průměrný průtok). Tento poměr vyjadřuje rozkolísanost hydrologického režimu ve sledovaném profilu a byl použit jako hlavní parametr pro rozdělení ČR do jednotlivých kategorií. Pro návrh rozdělení území ČR do jednotlivých kategorií byly dále využity informace o hydrogeologických poměrech a údaje o ročním srážkovém úhrnu. Územní rozdělení bylo provedeno podle povodí, a to do úrovně čtvrtého řádu hydrologického pořadí. Základním parametrem byla hodnota K_{99}, která byla rozdělena do 4 kategorií (1. kategorie $K_{99} > 0{,}18$, 2. kategorie $K_{99} > 0{,}15$, 3. kategorie K_{99} 0,1-0,15, 4. kategorie $K_{99} < 0{,}1$).

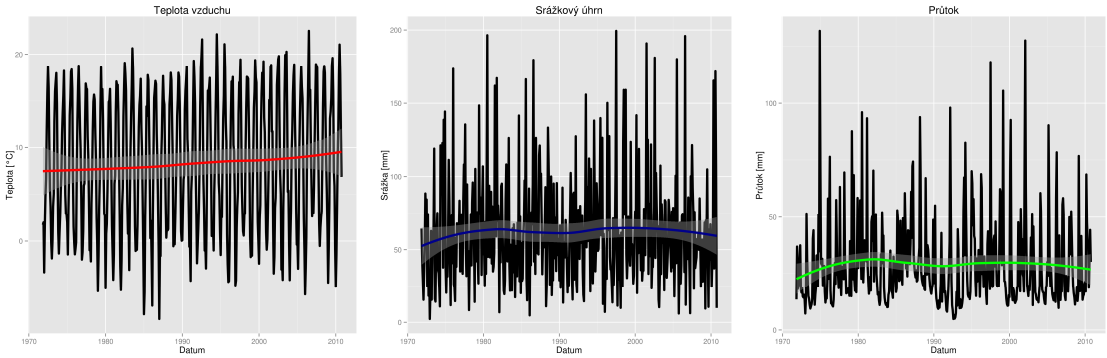
Pro vyhodnocení byly vybrány povodí 4 povodí, a to tím způsobem, aby byla reprezentována každá kategorie. Vybraná povodí jsou zobrazena na obrázku 1 a základní souhrn geomorfologických vlastností je uveden v tabulce 1. Vývoj teploty vzduchu, srážkových úhrnů a průtoků je uveden na obrázku 2.



Obrázek 1 Vyhodnocená povodí

Tabulka 1 Základní vlastnosti modelovaných povodích

DBC	DBCN	Název	Tok	Plocha [km^2]	Teplota [°C]	Srážka [mm]	Odtok [mm]
0180	018000	Hronov	Metuje	247.75	6.35	763	262
0340	034000	Dolní Libchavy	Orlice	303.94	6.79	834	390
1550	155000	Sázava u Žďáru	Sázava	131.88	6.45	755	296
1918	191800	Rakovník	Rakovnický p.	302.19	7.83	520	81



Obrázek 2 Vývoj teploty vzduchu, srážkových úhrnů a průtoků pro povodí Metuje za období 1971–2010

Metody

Nejprve jsou popsány syntetické generátory počasí, dále scénáře použité pro modelování hydrologické bilance se stručným popisem použitých hydrologických modelů a principy vyhodnocení sucha.

Generátory počasí

Stochastické generátory počasí jsou modely, které replikují statistické atributy lokálních klimatických proměnných, avšak nejsou schopny reprodukovat pozorované sekvence událostí [2]; [3]. Existuje mnoho důvodů pro vývoj stochastických generátorů počasí a pro využití syntetických meteorologických dat namísto dat pozorovaných. Prvním z nich je generování dat o libovolné délce, a to z toho důvodu, aby pomocí těchto dat bylo možno posoudit rizika v oblasti vodního hospodářství a zemědělství. Denní data jsou jedním z hlavních vstupů do matematických modelů, ale délka pozorovaných dat je často nedostatečná pro vyhodnocení mimořádných událostí. Navíc pozorovaná data představují pouze jednu realizaci v oblasti klimatu, zatímco generátor počasí může simulovat mnoho realizací, a tím pádem širší spektrum možných situací. Druhým důvodem je poskytnutí datových podkladů pro místa, pro která neexistují pozorovaná data, a to pomocí interpolace parametrů meteorologického generátoru. Třetí oblastí, pro kterou se generátory počasí využívají, je studium změn klimatu. Výstupy získané z globálních klimatických modelů (GCM) nelze přímo využít pro danou lokalitu z důvodu jejich velkého měřítka čili malého rozlišení modelů [3]. Podle typu generátoru počasí se dají tato data korigovat a revidovat tak soubor parametrů, které simuloval globální klimatický model [4, 5]. Zde byly zmíněny pouze základní oblasti, avšak je možno využít např. pro gridování meteorologických veličin v prostoru atd.

Modely pro generování stochastických syntetických řad klimatu obvykle operují ve dvou krocích. Prvním krokem je modelování denních srážkových úhrnů a druhým krokem je modelování zbývající proměnné, v našem případě průměrných denních teplot vzduchu, avšak dalšími typickými veličinami jsou například vlhkost vzduchu, rychlost větru, sluneční záření, atd. Parametry modelu jsou většinou pro každý měsíc, aby odrážely sezónní změny, jak v hodnotách samotných proměnných, tak v jejich křížových korelacích.

V tomto porovnání byly použity 4 generátory počasí, které mají pracovní názvy CADE, RMAW, LARS a BOOT. Každý z nich pro generování používá jiný algoritmus a kromě generátoru LARS (LARS-WG) byly naprogramovány v prostředí R. Jejich popis je však nad rámec tohoto příspěvku a podrobně jsou popsány v práci [6].

Scénáře použité pro hydrologickou analýzu

Prezentované výsledky vycházejí z velké části ze simulací regionálních klimatických modelů pocházejících z projektu ENSEMBLES v kombinaci se simulací regionálního klimatického modelu ALADIN-CLIMATE/CZ (provedena na ČHMÚ), jež mají srovnatelné horizontální rozlišení a pokrývají podobné časové období. Všechny tyto simulace byly řízeny globálními klimatickými modely s využitím emisního scénáře SRES A1B. Pro věrnější postižení nejistot spojených s modelováním klimatu by bylo vhodné uvažovat i s ostatními emisními scénáři. Na druhé straně, nejistota pramenící z modelování budoucího klimatu do jisté míry převyšuje nejistotu svázanou s volbou emisního scénáře. Pro odvození scénářů změny klimatu byla (není-li uvedeno jinak) využita jednoduchá přírůstková metoda [7], jež navazuje na předchozí studie, je jednoduše interpretovatelná a hodnotí dopady změny klimatu v duchu klasické citlivostní analýzy. Výhodou tohoto přístupu je i možnost přímého vztažení výsledků založených na případných budoucích scénářích změn klimatu [8]. Jako referenční období bylo standardně uvažováno období 1961–1990, pro odhady budoucích změn byla použita období 2010–2039, 2040–2069 a 2070–2099. Tyto časové horizonty jsou dále označovány pomocí jejich středů jako 2025, 2055 a 2085.

Modelování hydrologické bilance

BILAN

Jedním z modelů pro modelování hydrologické bilance byl použit model Bilan, který je vyvíjen více jak 15 let na oddělení hydrologie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka. Model počítá v denním či měsíčním časovém kroku chronologickou hydrologickou bilanci povodí či území. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí, v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí a v zóně podzemní vody. Jako ukazatel bilance energie, která hydrologickou bilanci významně ovlivňuje, je použita teplota vzduchu. Výpočtem se modeluje potenciální evapotranspirace, územní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Odtok je modelován jako součet tří složek: dvě složky přímého odtoku (zahrnující i hypodermický odtok) a základní odtok [9,10,11,12].

HYDROMAD

HYDROMAD [13] je koncept, který seskupuje dynamické, konceptuální nebo statistické hydrologické modely. Základním vstupem jsou srážkové úhrny a evapotranspirace. U některých modelů jsou použity další vstupy, například teplota vzduchu, vlhkost atd. Vstupy jsou ve formě časových řad nejčastěji v denním časovém kroku. Obsahuje dvě složky. Prvním je půdní komponenta (SMA-Soil Moisture Acounting) a druhým komponenta jednotkového hydrogramu. SMA modul transformuje srážkový úhrn a teplotu vzduchu na efektivní srážku. Druhý model převede efektivní srážku na odtok1. Tato struktura je v souladu s RRMT-Rainfall Runoff Modelling Toolbox [13,14]. V konečném výsledku není důležité, aby model měl strukturu popsanou výše (pouze z důvodu širokého spektra pokrytí modelů). Výsledný model může obsahovat pouze jednu komponentu, která nemusí být jednoduchého charakteru, ale může být například kompositní. V našem případě byl vybrán francouzský model GR4J (Ge nie Rural a‘ 4 parame‘tres Journalier). GR4J je srážko-odtokový model, který počítá celkový odtok v denním časovém kroku. Model GR4J má čtyři parametry X1 , X2 , X3 a X4 [15].

TUWmodel

Model HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning) je konceptuální hydrologický model, který byl vyvinut Švédským meteorologickým a hydrologickým institutem SMHI. Je standardně používán na predikci průtoků ve Švédsku a Norsku. Byl také testován v různých geografických podmínkách na povodích ve Švýcarsku [16], kde byl přizpůsoben podle specifických požadavků. Pro výpočet byl použit modifikovaný model TUW-HBV [17]. Struktura TUW-HBV modelu je tvořena čtyřmi základními složkami: povrchová složka (sníh, půda) je celistvá nebo distribuovaná, ostatní, podzemní složky jsou stejně jako u modelu Bilan pouze celistvé. Model určuje skupenství srážek podle prahové hodnoty teploty TR − TS [°C]; pokud je teplota pod touto hodnotou, srážkový úhrn se akumuluje ve sněhové pokrývce a v opačném případě jsou srážky v kapalném stavu.

Vyhodnocení sucha

SPI a SPEI

Tento ukazatel byl vyvinut v roce 1993 [18] k monitorování a určení suchých období. Na rozdíl od jiných indexů má několik výhod: ke kalkulaci jsou nutná pouze srážková data, výpočet je relativně snadný (zavádí se jen dva další parametry), a standardizovaný charakter. Posledně zmíněná věc však může být zároveň nevýhodou. Extrémně suchá období budou klasifikována se stejnou frekvencí jako extrémně vlhká období na různých lokalitách. Proto se doporučuje použít jako doplňující informace k jiným ukazatelům [19]. Jedná se vlastně o transformaci srážkových časových řad na normální rozdělení. Měsíční (nebo jiný časový interval) jsou aproximovány pravděpodobnostním rozdělením (nejčastěji se používá Gama rozdělení, ale v některých případech může být vhodnější Poissonovo nebo Log-normální). Česká povodí byla aproximována Gama rozdělením s obdobným nebo lepším výsledkem než log-normální rozdělení. Poissonovo rozdělení nereflektuje srážkové řady pro česká povodí.

Nedostatkové objemy

Jedním z hlavních kritérií pro posouzení hydrologického sucha jsou nedostatkové objemy. Průtok je popsaný časovou funkcí Z(t). Funkce Z(t) je v čase proměnná v požadavku na vodu. Pro časový integrál < tpi; tki >, pro který je splněné podmínka Z(ti) > Q(t) definujeme určitý integrál Wi:

$$W_i = \int_{tp_i}^{tk_i} [Z(t_i) - Q(t_i)] dt.$$

kde: i = 1, 2, 3,..., n, n - počet deficitů v řešeném období,

tpi - čas počátku i-tého deficitu,

tki - čas konce i-tého deficitu.

Rovnice definuje parametry náhodné veličiny Si i-tého sucha. Je to nedostatkový objem Wi a doba trvání nedostatku vody Ti = tki * tpi. Nejčastěji používaným přístupem je volba funkce Z(ti) = konst.

V tomto případě se jedná o metodě ořezání průtokové řady na konstantní úroveň průtoku [20]. Důležitým faktorem je úroveň hladiny ořezu (threshold level). Bývají to kvantily průměrného ročního průtoku Q80%, Q90%, ... a průtoky např. Q330, Q355 nebo Q364. V tomto případě jsou jako vstup použity denní průměrné průtoky. Avšak sucho lze posuzovat i v měsíčním časovém kroku. Měsíc je dost dlouhá doba na to, aby se daly postihnout regionální závislosti a specifika. [20], poukazuje na to, že sucho není způsobeno jen deficitem srážek, ale změnou rozdělení v průběhu roku. Měsíční krok také kompenzuje vliv užívání vod (v měsíčním kroku jsou ve vodním hospodářství udávány údaje na užívání vod). Měsíční průtokové řady jsou stejně přesné jako denní, pokud jsou vyhotoveny z původní denní řady.

Koncept propagace sucha

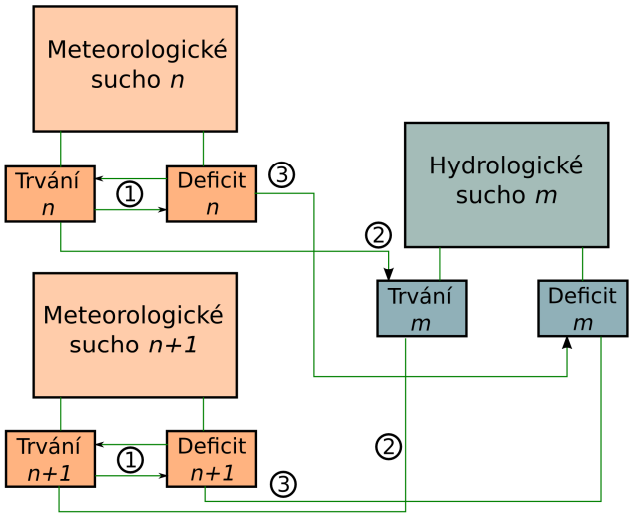
Monitoring sucha s sebou nese mnoho problémů a otázek. Jelikož se sucho vyvíjí postupně, je složité určit, zda sucho nastalo nebo ne, a proto je složité vytvářet prognózy těchto období s daným předstihem měsíců či sezón [21]. Predikci sucha lze rozdělit do dvou kroků, a to časoprostorového vývoje [9]:

- meteorologického sucha, které zahrnuje velké územní celky a je řízené chodem počasí [22] a
- hydrologického sucha, které na sucho meteorologické navazuje, avšak jeho distribuce je nerovnoměrná.

V posledních letech je věnována velká pozornost propagaci sucha mezi jednotlivými typy, kdy se pro jejich popis používají různé přístupy. Poznání křížových vazeb mezi jednotlivými typy je stále limitováno z těchto důvodů:

- časové zpoždění mezi suchem meteorologickým a hydrologickým je dáno komplexností celého hydrologického systému (zásobou vody v půdě a v podzemních vodách), odezva systému není konstantní,
- ne z každého meteorologického sucha je sucho hydrologické, naopak hydrologické sucho může vzniknout z řady předcházejících poněkud menších meteorologických such [23],
- [24] navrhl deterministický přístup, který však nevedl k uspokojivým výsledkům [25].

Výsledky práce využívají přístup, který je modifikací statistického přístupu [25] a je založen na principu, že každé hydrologické sucho bylo vyvoláno nějakým suchem meteorologickým v určité časové vzdálenosti (schéma je na obrázku 3).



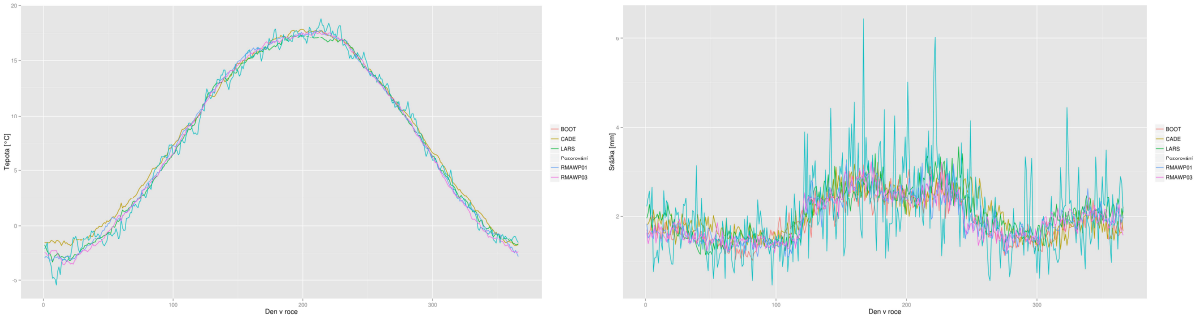
Obrázek 3 *Schéma propagace sucha*

Výsledky

Pro grafickou prezentaci jednotlivých výsledků bylo vybráno povodí Metuje.

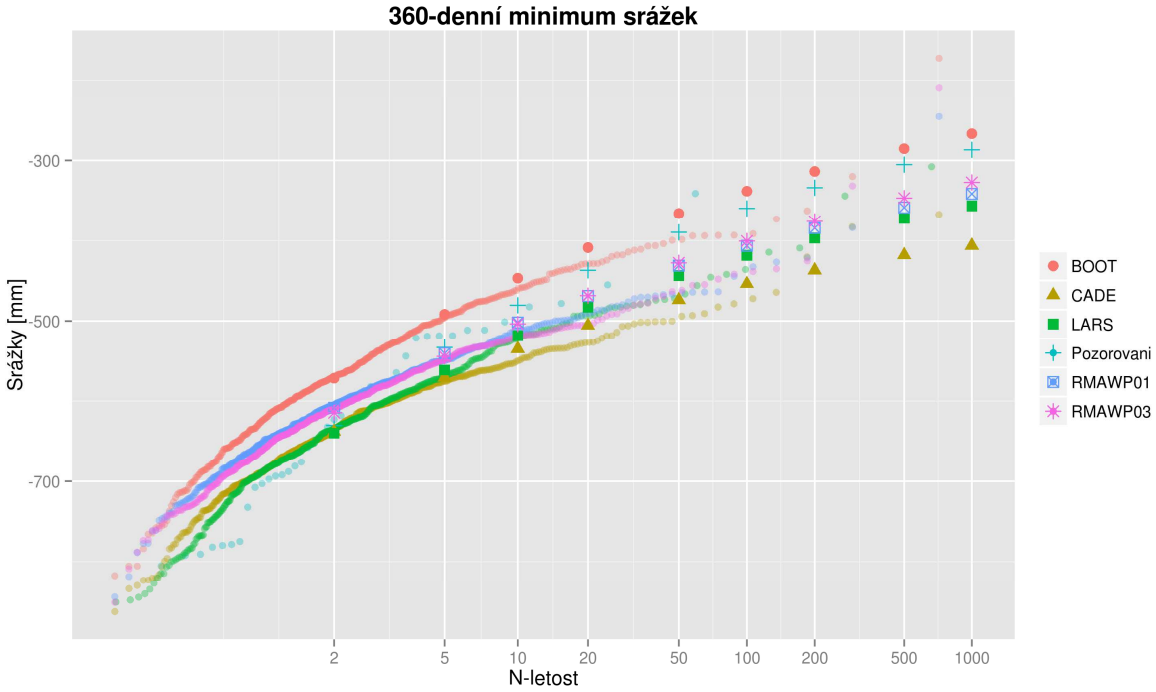
Vyhodnocení generátorů počasí pro současné podmínky

Pomocí generátorů byly vyhotoveny 500-leté denní řady teplot vzduchu a srážkových úhrnů. Tyto řady následně vstupovaly do modelování hydrologické bilance, která byla dále vyhodnocena pomocí metody nedostatkových objemů a jednotlivých indexů sucha. Na následujících obrázcích 4a a 4b jsou uvedeny roční chody teplot vzduchu a srážkových úhrnů. Rozkolísanost u pozorování je dáno délkou řady (30 let versus 500 let).



Obrázek 4 Průměrné denní teploty vzduchu a průměrné denní srážkové úhrny generované generátory počasí

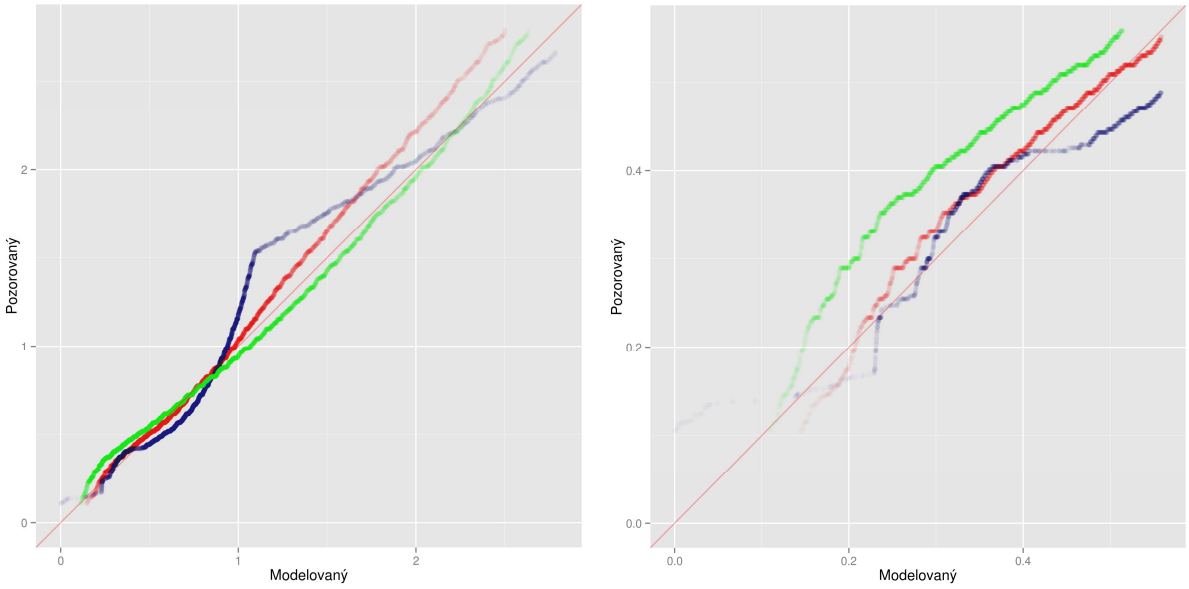
Obecně lze říci, že generované průměry jsou v toleranci pro všechna povodí. Pro další vyhodnocení byly vypočítány pro každý generátor a pozorování hodnoty směrodatné odchylky, variace a koeficient variace pro m-denní sumy srážkových úhrnů. Sumy byly napočítány pro 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 180 a 360 dní. Na obrázku 5 jsou zobrazeny N-letá minima 360-denních sum srážkových úhrnů. Tyto hodnoty minim srážkových úhrnů zásadně ovlivňují období nedostatku vody. Na obrázku lze pozorovat, že 360 denní minimální suma srážkových úhrnů s dobou opakování 2 roky je cca 600 mm (průměr 764 mm) a desetiletá již řádově 500 mm.



Obrázek 5 N-letá minima 360-denních sum srážkových úhrnů

Vyhodnocení hydrologie

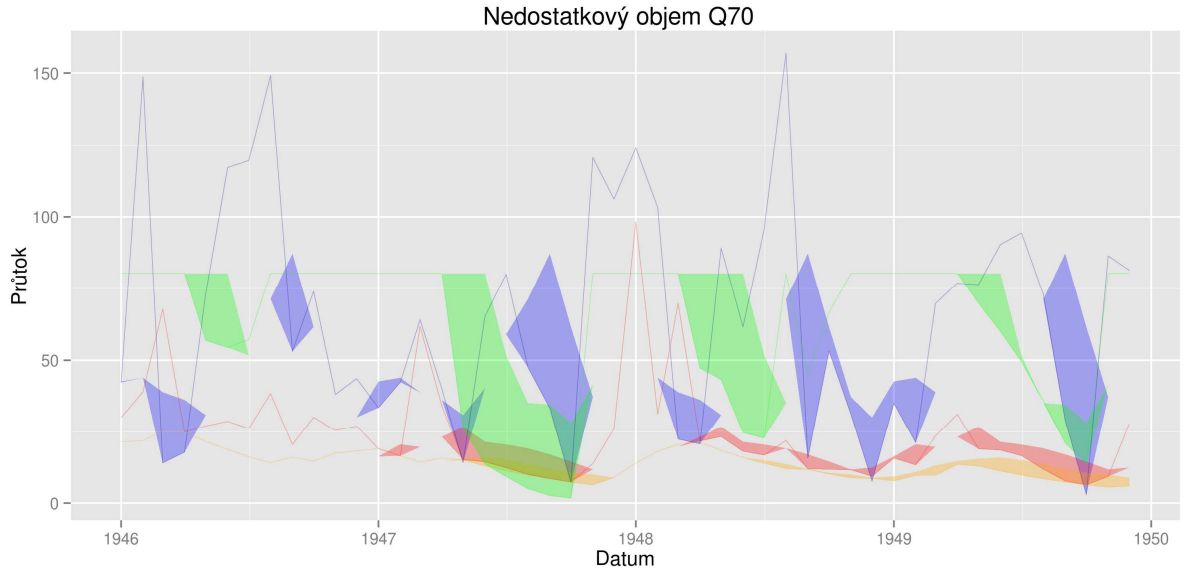
Pro následné modelování dopadů klimatických změn na hydrologický režim je nezbytné hydrologické modely porovnat a validovat. Porovnání byla provedena pro všechna čtyři povodí, která mají různý hydrologický režim a pro dostupná pozorovaná data (jedná se především o dostupnost průtokových dat). Dále je porovnání důležité z toho důvodu, jelikož jednotlivé modely mají různou strukturu a složitost. Pro některá povodí byla provedena separace základního odtoku, kde byly získané hodnoty použity pro kalibraci modelu Bilan. Pro porovnání byla použita tyto kritéria: NS (koeficient determinace), MSE (mean square error), koeficient korelace, roční průměr modelovaného a pozorovaného odtoku, měsíční průměry, minima a maxima modelovaného a pozorovaného odtoku. QQ graf modelovaných a pozorovaných odtoků je na obrázku 6.



Obrázek 6 QQ graf modelovaných (zeleně-TUW-HBV, modře-GR4J, červeně-Bilan) a pozorovaných odtoků (vlevo-celé modelované období, vpravo-detail na nízké odtoky)

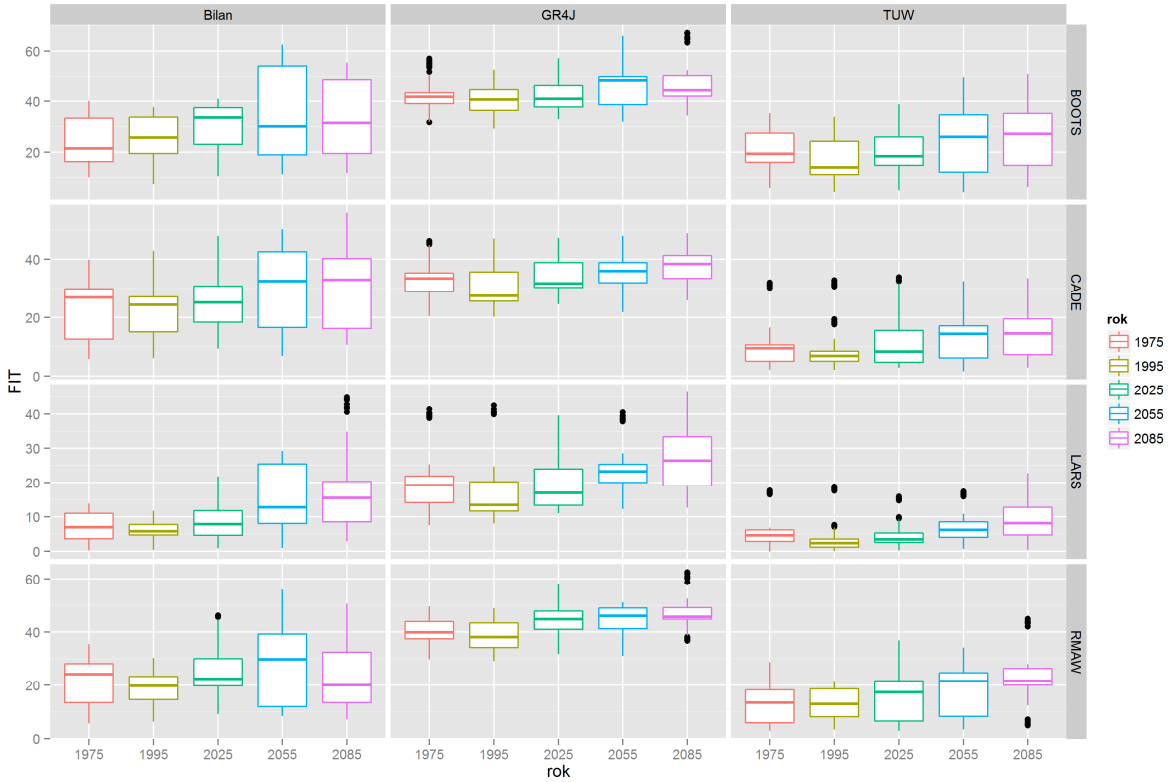
Vyhodnocení sucha

Na obrázku 7 jsou zobrazeny nedostatkové objemy jednotlivých složek hydrologického cyklu pro událost v roce 1947, která je jedna z nejextrémnější ve 20. století. Modré polygony ukazují nedostatek ve srážkových úhrnech, které se vyskytují ve více letech za sebou a následně se tento nedostatek kumuluje a je propagován do dalších let. Odtokové výšky (červená - celkový odtok, oranžová - základní odtok) a zásoby vody v půdě (zelený polygon) ukazují deficity s určitým zpožděním, které jsou výsledkem nedostatku srážek. Tento podklad může být použit pro grafické zpracování propagace (opoždění) nedostatku vody mezi jednotlivými složkami.



Obrázek 7 Nedostatkové objemy pro jednotlivé dílčí složky hydrologického cyklu

Na obrázku 8 jsou vyznačeny nedostatkové objemy odtoků ve formě boxplotů pro jednotlivé časové horizonty v kombinaci s hydrologickými modely a generátory počasí. Lze pozorovat nárůst těchto objemů pro výhledová období. Výsledky jsou v absolutních hodnotách a liší se především zvoleným hydrologickým modelem, avšak relativní změny (scénář/současnost) deficitních objemů jsou obdobné s rostoucím trendem, který je ve výhledech v desítkách procent.

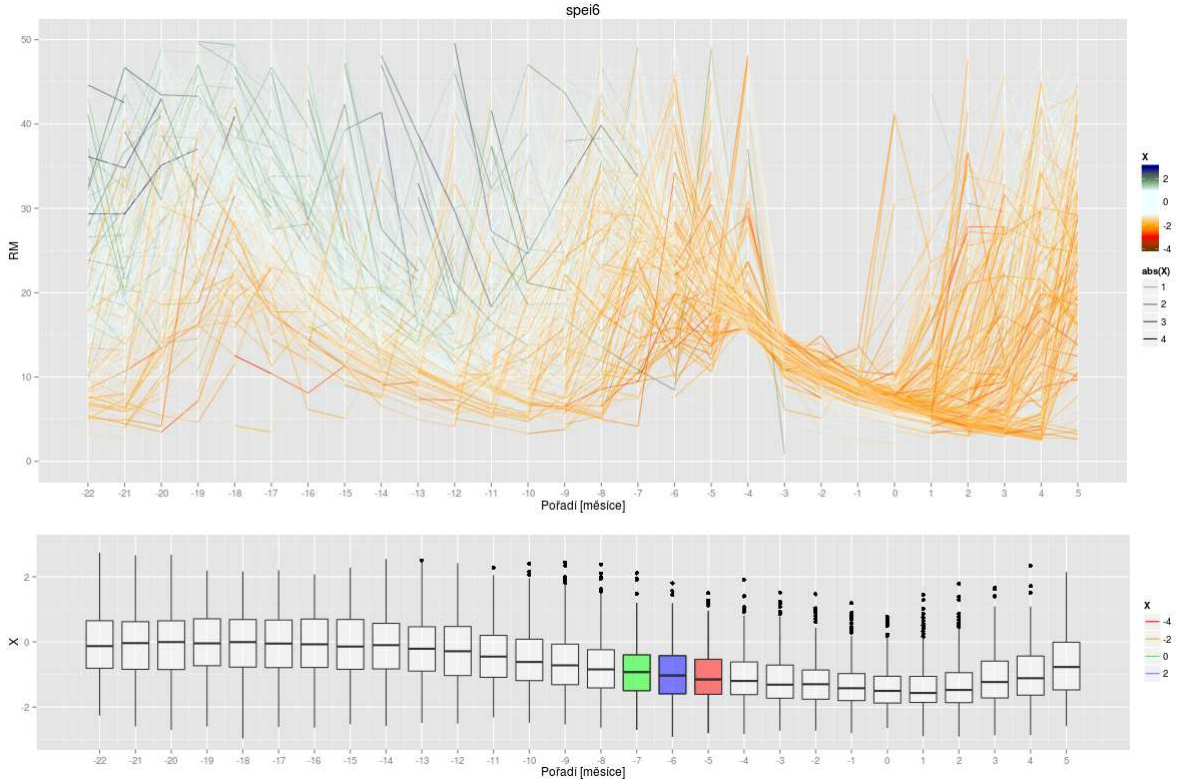


Obrázek 8 Nedostatkové objemy pro výhledová období

Pro vyhodnocení propagace sucha bylo vybráno řádově 400 událostí nedostatků vody (hydrologických), které byly seřazeny tak, že končily ve stejný okamžik. Samozřejmě každá událost má jinou délku a jiný celkový objem nedostatku, nicméně vzhledem k tomu, že bylo vybráno pouze deset událostí pro každý scénář z 500leté řady, jedná se o extrémní situaci v daném povodí a jejich charakteristiky se spíše liší podle období, kdy k této události došlo. Z velké většiny se jedná o události, které nastaly v letním a podzimním období (byl použit konstantní threshold).

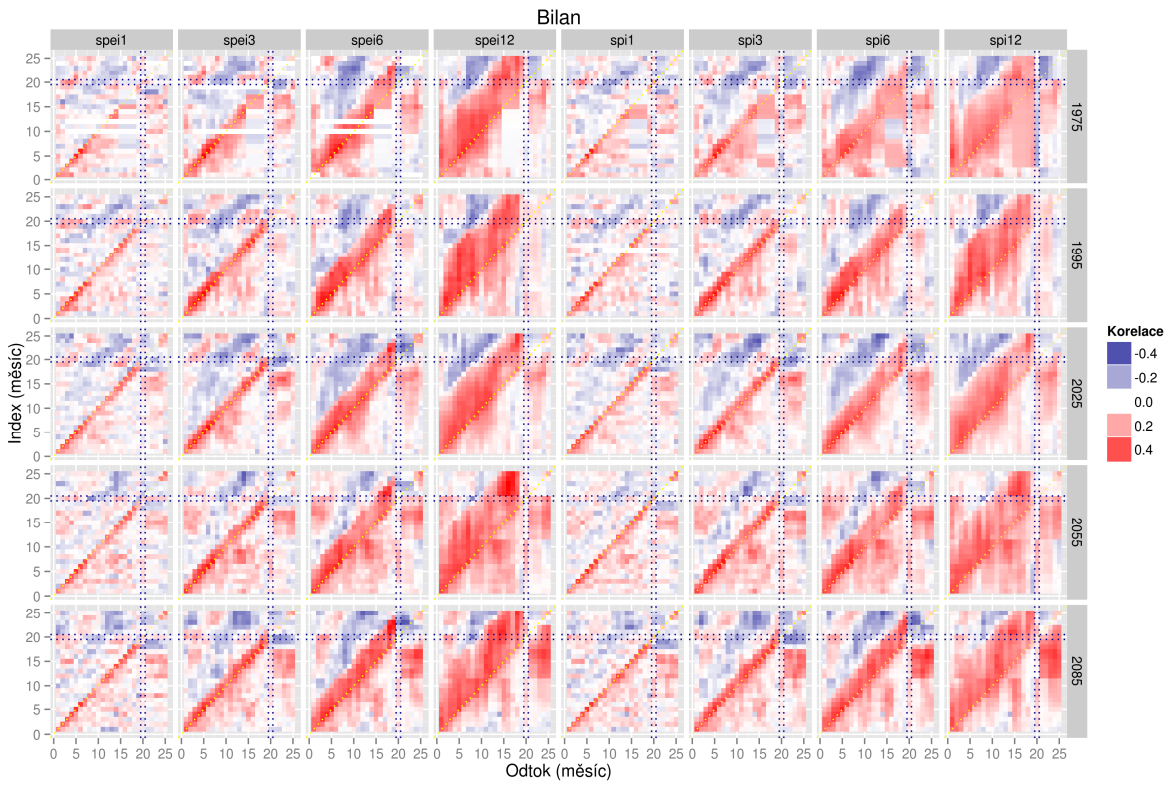
Na obrázku 9 je ukázka, jak výsledky tohoto typu chápat. Obrázek je složen ze dvou grafů, kdy jsou v horním grafu zobrazeny odtoky pro jednotlivé události. Na ose x jsou orientační hodnoty měsíce dané události (plusové hodnoty jsou po události a minusové před událostí), na ose y poté odtok, který je obarven v daném měsíci hodnotou zvoleného meteorologického indexu. Hodnota indexu se pohybuje v intervalu <-4; 4>. Spodní hranice udává suchá období a má červenou barvu, horní hranice je období nadměrného dostatku vody s modrou barvou, normální stav má barvu bílou a není v grafu moc zřetelný, protože nás především zajímají hodnoty indexu pod touto hranicí. Na spodním grafu typu boxplot jsou hodnoty indexů v jednotlivých měsících. Některé z nich jsou obarveny, což udává nejvyšší korelaci indexu k odtokům (v maximu události - červená, měsíc před maximem - modrá, dva měsíce před maximem - zelená).

Cílem bylo určit vhodný index pro každé povodí, který by nás upozornil na situaci, která může nastat v podobě nedostatku vody v dostatečném předstihu. Myšleno je tím, že by mohla být přijata určitá opatření nebo byl stanoven například stav "bdělosti", který by případnou situaci částečně řešil několik měsíců předem, i když odtokové hodnoty by tomu v té době nenapovídaly. Na obrázku 8 je uvedena varianta vybraného indexu SPEI 6 měsíců pro povodí Metuje. Na grafech lze vidět, jak událostem předcházelo meteorologické sucho kvantifikované zvoleným indexem a již před událostí tento index nabíral záporných hodnot (graf typu boxplot), avšak nijak extrémních. Také nejvyšší korelace indexu s odtokem se často nachází před danou epizodou.



Obrázek 9 Propagace sucha - rok: 1975, index: SPEI 6 měsíců, model: Bilan, povodí: Metuje

Z důvodu nepřehlednosti korelací mezi odtokem a indexy v jednotlivých měsících epizody, byly vytvořeny korelační matice indexů SPI a SPEI (1, 3, 6, a 12 měsíců) a odtoků (referenční období jsou v řádcích). Příklad těchto matic je na obrázku 10. Nás především zajímají korelace před danou událostí nebo korelace indexu před událostí s odtokem dané události. V tomto případě lze určitá shoda především u indexu SPEI 6. Na základě udělaných analýz byly vybrány indexy meteorologického sucha, které nejlépe reprezentují jednotlivá povodí. Doporučené indexy (spolu s doplňkovým indexem) jsou uvedeny v tabulce 2.



Obrázek 10 Korelační matice

Tabulka 2 Vybrané indexy pro jednotlivá povodí

DBC	DBCN	Název	Tok	Index I	Index II	Kategorie]
0180	018000	Hronov	Metuje	SPEI 6	SPI 3	1
0340	034000	Dolní Libchavy	Orlice	SPEI 3	SPI 3	2
1550	155000	Sázava u Žďáru	Sázava	SPEI 6	SPI 6	3
1918	191001	Rakovník	Rakovnický p.	-	SPI 12	4

Závěr

Modelování hydrologických veličin zahrnuje řadu přístupů. V kombinaci s modelováním výhledových období pomocí simulací regionálních klimatických modelů, je potřeba eliminovat velké množství počátečních nejistot. Důležitá je závěrečná interpretace získaných výsledků, do kterých je nutno zahrnout vzniklé nejistoty. V určitých kombinacích lze totiž dosáhnout výsledků, které nejsou věrohodné a tento fakt je potřeba okomentovat. Na druhou stranu se může nacházet tenká linie mezi reálným a nereálným výsledkem, a to především pokud se modelují extrémní události s velkými dobami opakování.

Vyhodnocení propagace sucha v České republice pro současné a výhledové podmínky s sebou nese spousty otázek. Avšak na základě získaných výsledků můžeme konstatovat, že v našich podmínkách lze očekávat nárůst událostí, kdy se může projevit nedostatek vody pro výhledová období, která reprezentují výstupy z regionálních klimatických modelů a emisního scénáře SRES A1B. Dále je možno říci, že je složité predikovat hydrologické sucho na základě hodnoty meteorologického indexu, avšak pro dílčí povodí je možno většinou nalézt index, který povodí reprezentuje. Na základě hodnoty

indexu lze poté přijmout určitá opatření, která by danou situaci eliminovala. Je velmi důležité tento index specifikovat a můžeme konstatovat, že zřejmě neexistuje pouze jeden pro Českou republiku, který by umožnil predikovat hydrologické sucho.

Poděkování

Příspěvek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu TA01020508 Udržitelné využívání vodních zdrojů v podmínkách klimatických změn, který je financován Technologickou agenturou České republiky.

Literatura

[1] Mrkvičková, M.Balvín, P. (2013) Stanovení minimálního zůstatkového průtoku pro nakládání, která nemění celkový hydrologický režim dotčeného vodního toku. *VUV T.G. Masaryka, 10.*
[2] Wilks, D. S., Wilby, R. L. (1999) The weather generation game: a review of stochastic weather models. Progress in Physical Geography, 23(3), 329–357, doi:10.1177/030913339902300302.
[3] Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., et al. (2004) Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. Technická zpráva.
[4] Wilks, D.S. (1992) Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climatic Change,* 22, 67-84.
[5] Semenov, M.A., Barrow, E.M. (1997) USE OF A STOCHASTIC WEATHER GENERATOR IN THE DEVELOPMENT OF CLIMATE CHANGE SCENARIOS. *Climatic Change,* 35(4), 397-414,doi:10.1023/a:1005342632279.
[6] Vizina, A. (2014) ANALÝZA PROPAGACE SUCHA V ČESKÉ REPUBLICE. *Disertační práce, Česká zemědělská univerzita v Praze,* 2014..
[7] Hanel, M., Vizina, A. (2010) Hydrologické modelování dopadů změn klimatu v denním kroku: korekce systematických chyb a přírůstková metoda. *VTEI,* 52 (mimořádné číslo II), 17-21, příloha Vodního hospodářství 2010(11).
[8] Prudhomme, C., Wilby, R.L., Crooks, S.,Kay, A.L.,Reynard, N.S. (2010) Scenario-neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk. *Journal of Hydrology,* 390, 198-209.
[9] Tallaksen, L.M.,van Lanen, H.A.J. (2004); *Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater.* Elsevier, Amsterdam.
[10] Horáček, S., Rakovec, O., Kašpárek, L., Vizina, A. (2009) Vývoj modelu hydrologické bilance BILAN. *VTEI,* 51(mimořádné číslo I), 2-5, příloha Vodního hospodářství 2009(11).
[11] Vizina, A., Hanel, M. (2010) Posouzení sucha pomocí syntetických řad v podmínkách ovlivněných změnou klimatu. *VTEI,* 52(2), 9-12, příloha Vodního hospodářství 2010(11).
[12] Vizina, A., Hanel, M. (2011) Eliminace ovlivnění průtoku pomocí propojeného modelu hydrologické a vodohospodářské bilance. *VTEI,* 53(3), 20-22, příloha Vodního hospodářství 2010(11).
[13] Andrews, F., Croke, B., Jakeman, A.(2011) An open software environment for hydrological model assessment and development. *Environmental Modelling Software,* 26(10), 1171-1185, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.04.006.
[14] Wagener, T., Boyle, D.P., Lees, M.J., et al. (1999) A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences,* 5(1), 13-26.
[15] Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V.(2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology,* 279(1), 275-289.
[16] Seibert, J. (1997) Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nordic Hydrology,* 28(4), 247-262.
[17] Parajka, J., Merz, R., Bloeschl, G. (2007) Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments. *HYDROLOGICAL PROCESSES,* 21(4), 435-466, doi:{10.1002/hyp.6253}.
[18] Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Conference on Applied Climatology,* 179-184.

[19] Lloyd, H.B., Saunders, M.A. (2002) A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology, 22.*
[20] Bonacci, O. (1993) Hydrological identification of drought. *Hydrological Processes, 7,* 249-262.
[21] van den Hurk, B., Jacob, D. (2009) The art of predicting climate variability and change. *Climate change adaptation in the water sector,* 9-21.
[22] Fleig, A.K., Tallaksen, L.M., Hisdal, H., Hannah, D.M. (2011) Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area Index with weather types. *Hydrological Processes,* 25(7), 1163-1179.
[23] van Lanen, H.A., Tallaksen, L.M. (2008) Drought in Europe. *Proceedings of water down under 2008,* 98.
[24] Peters, E. (2003) *Propagation of drought through groundwater systems: illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments.* Wageningen Universiteit.
[25] Wong, G., Van Lanen, H., Torfs, P. (2013) Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought. *Hydrological Sciences Journal,* 58(2), 253-270.