

Metodika pro stanovení mezních hodnot indikátorů hydrologického sucha

Radek Vlnas a kol.

Název a sídlo organizace:

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Podbabská 2582/30 Praha 6 160 00

Ředitel:

Mgr. Mark Rieder

Poskytovatel dotace:

Ministerstvo vnitra České republiky, Milady Horákové 5/133, 160 00 Praha 6

Zástupce poskytovatele:

Ing. Lydie Kotajná, M.A.

Projekt:

Návrh koncepce řešení krizové situace vyvolané výskytem sucha a nedostatkem vody na území ČR, VG20102014038

Zahájení a ukončení projektu:

říjen 2010–prosinec 2014

Náměstek ředitele pro výzkumnou a odbornou činnost:

Ing. Petr Bouška, Ph.D.

Vedoucí odboru:

Ing. Anna Hrabánková

Vedoucí oddělení:

RNDr. Josef V. Datel, Ph.D.

Vedoucí řešitel:

Ing. Radek Vlnas

Řešitelé:

VÚV T.G.M.: Ing. Adam Beran, Ing. Martin Hanel, Ph.D., Ing. Anna Hrabánková, RNDr. Tomáš Hrdinka, Ph.D., Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Mgr. Marta Martínková, Ing. Martina Peláková, Mgr. Pavel Treml, Ing. Adam Vizina, Ph.D

ČZU: Ing. Petr Bašta, Ing. Lukáš Jačka, Ing. Petr Máca, Ph.D., Ing. Jiří Pavlásek, Ph.D., prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Obsah

1	Úvod	5
2	Současný stav	5
3	Indikátory sucha	6
3.1	Charakteristika indikátorů	7
3.2	Koncept SPI	7
3.3	Časové měřítko dat a četnost jejich hodnocení	8
3.4	Aktuální stav sucha - indikátor typu S	9
3.5	Celkový stav sucha – indikátor typu DM	10
3.6	Sezonalita	10
3.7	Délka časové řady	11
3.8	Ovlivnění průtoků	11
3.9	Distribuční funkce	12
3.10	Empirická distribuční funkce	12
4	Hodnocení sucha	13
4.1	Hodnocení stavu vodních zdrojů	13
4.2	Doplňující indikátory	15
5	Seznam zkratk a pojmů	16
6	Právní předpisy	17

Seznam obrázků

1	Postup odvození indikátoru SPI. Transformace srážkových úhrnů proložených gamma rozdělením na standardní normální rozdělení	7
2	Klasifikace sucha podle SPI. V procentech je vyjádřena pravděpodobnost výskytu příslušné kategorie sucha	8

Seznam tabulek

1	Indikátory sucha založené na konceptu SPI	11
2	Klasifikace sucha podle indikátorů typu S a DM	13
3	Upozornění na výskyt hydrologického sucha z hlediska zdrojů povrchových vod pomocí hodnocení průtoků na základě indikátoru DMRI	13
4	Upozornění na výskyt hydrologického sucha z hlediska zdrojů podzemních vod pomocí hodnocení hladin ve vrtech a vydatností pramenů na základě indikátoru DMGI	14
5	Upozornění na nízký stav zásob vody v nádržích	14
6	Příklad scénáře vývoje sucha ve zdrojích povrchových a podzemních vod	14
7	Upozornění na výskyt klimatického sucha na základě hodnocení srážek pomocí indikátoru DMPI a DMPEI	15

1 Úvod

Cílem metodiky je návrh a popis systému indikátorů sucha pro jeho hodnocení a predikci.

Metodika je zaměřena především na hodnocení hydrologického sucha s ohledem na sucho klimatické, které je, spolu s antropogenním ovlivněním, hlavní příčinou poklesu zdrojů povrchových a podzemních vod.

Postupy stanovení a vyhodnocení indikátorů sucha popsané v metodice jsou určeny organizacím, které zajišťují státní správu v oblasti monitoringu na poli klimatologie a hydrologie (ČHMÚ), popř. organizacím zajišťujícím správu povodí (s.p. Povodí), při zpracování sledovaných hydrometeorologických veličin za účelem doplnění jejich stávajícího vyhodnocení.

Upozornění na ohrožení suchem vydané ČHMÚ na základě této metodiky slouží krajským vodoprávním úřadům jako podklad pro informování bezpečnostní rady kraje za účelem varování před možností výskytu krizové situace v důsledku nedostatku vody. Navrhovaný systém indikátorů sucha by měl přispět ke zvýšení bezpečnosti státu a občanů v oblasti zajištění efektivního krizového managementu na krajské úrovni.

Klasifikace stavu vodních zdrojů podle této metodiky slouží při přijímání vhodných aktivit a opatření vedoucích k předejití vzniku a zmírnění dopadů krizové situace způsobené vlivem dlouhodobého nedostatku vody. Soubor těchto opatření představuje připravovaná *Metodika pro sestavení hierarchie opatření pro jednotlivé fáze ohrožení suchem*.

Metodika respektuje řídicí principy uvedené v doporučujícím dokumentu WMO ([WMO, 2012](#)).

Metodika obsahuje přehled použitých veličin a jejich časového rozlišení, indikátorů a jejich mezních hodnot pro určení stavu těchto veličin a z toho vyplývajícího ohrožení nedostatkem vody, doporučení týkající se vhodných teoretických distribučních funkcí a zjednodušenou variantu vhodnou pro použití empirických funkcí. Uvedené postupy mohou být využity i pro charakterizaci extremity jiných spojitých dat se symetrickým i asymetrickým rozdělením.

Navržené indikátory rozšiřují a sjednocují systém včasného varování před výskytem hydrologického sucha a o jeho průběhu. Pro vyčíslení a prezentaci indikátorů byl současně připraven software a mapová aplikace, které mohou po úpravě pro rutinní provoz sloužit v systému hlásné služby ČHMÚ. Ekonomický přínos je dán ušetřením prostředků provozovatele při vývoji těchto nástrojů a především umožněním včasné přípravy na epizodu sucha přijetím vhodných mitigačních opatření a tím zmírnění následků sucha a snížení nákladů na odstranění vzniklých škod.

2 Současný stav

Informace vztahující se k problematice sucha z hlediska vodních zdrojů jsou v současné době dostupné především prostřednictvím portálu ČHMÚ ([ČHMÚ, 2012](#); [HPPS, 2012](#)) a ISVS Voda ([ISVS, 2012](#)). Uvedené systémy kombinují data ČHMÚ a podniků Povodí. Poskytují základní přehled o stavu a vývoji srážek, průtoků, stavu podzemních vod, vody v nádržích a stavu sněhové pokrývky.

Z hlediska průtoků je rozlišován normální stav, tři až čtyři stupně povodňové aktivity a jeden stav sucha. Ten je dán nedosažením Q_{355d} , tedy průtoku, který je v dlouhodobém měřítku překročen po 355 dní v roce, popř. nedosažení vodního stavu, který tomuto průtoku odpovídá podle měrné křivky průtoků.

Sucho v podzemních vodách je na stránkách HPPS indikováno nedosažením limitu, který odpovídá 85% výskytu průměrných měsíčních stavů hladin ve vrtech nebo vydatností pramenů na čáře překročení.

Sněhová pokrývka je pojednána jako plošná mapa stavu zásob v ní obsažené vody. Neodpovídá tedy zcela problematice sucha, kdy kromě této informace je dále vhodné znát množství vody již uvolněné ze sněhové pokrývky vlivem tání, které může doplnit stav zásob podzemní vody nebo zásoby v nádržích.

Srážky jsou na ISVS Voda vyjádřeny jako 1denní úhrny, tedy v časovém kroku, který zcela neodpovídá problematice sucha, které se vyvíjí v řádech týdnů až měsíců.

Na portálu ČHMÚ je charakteristika klimatického sucha pojednána podrobně. Lze zde nalézt mapu týdenních srážkových úhrnů v % dlouhodobého průměru za období 1961–2010, mapu týdenního srážkového deficitu, mapu naměřených hodnot denního výparu, mapu potenciální evapotranspirace a základní vláhové bilance travního porostu a mapu indikátoru SPI v měsíčním kroku.

Portál ISVS Voda uvádí aktuální stav vody v nádržích spolu s grafickou informací, zda je úroveň hladiny v zásobním nebo ochranném prostoru nádrže nebo nad kótou přelivu, popř. nad maximální hladinou, tedy spíše z hlediska povodňových rizik.

Oba systémy kombinují data ČHMÚ a podniků Povodí s.p. To znamená, že by měly v případě průtoků obsahovat vodoměrné prognózní stanice kategorie A a B, ISVS VODA dále obsahuje i některé další stanice podniků Povodí. Stanice kategorie A představují základní hlášené profily, které zřizuje a provozuje stát prostřednictvím ČHMÚ nebo s.p. Povodí, kategorie B představuje doplňkové hlášené profily, zřizované krajskými úřady, většinu provozuje po dohodě ČHMÚ nebo s.p. Povodí, ostatní provozují místně příslušné obce. V současné době dochází v důsledku nedostatečné provázanosti systémů ČHMÚ a MZe k situacím, kdy především u stanic provozovaných podniky Povodí je sucho signalizováno pouze v jednom ze systémů.

3 Indikátory sucha

Navržené indikátory kvantifikují následující typy sucha: (1) klimatické, (2) hydrologické z hlediska povrchových vod a (3) hydrologické z hlediska podzemních vod.

Každý z těchto typů sucha je možné charakterizovat pomocí typické veličiny. K popisu sucha z hlediska dostupnosti vodních zdrojů jsou tedy vhodné (1) srážkové úhrny, popř. v kombinaci s teplotou vzduchu, (2) stav průtoků ve vodních tocích a (3) stav hladin ve vrtech nebo vydatností pramenů. Ukazateli stavu a vývoje těchto veličin v čase jsou indikátory.

Z hlediska pozorovatelných vlivů rozvíjejícího se sucha na stav vodních zdrojů je vhodné soustředit se zejména na indikátory *hydrologické* – snížená dostupnost vodních zdrojů se projevuje v poklesech průtoků vodních toků a zásob podzemní vody.

Indikátory sucha byly navrženy s ohledem na možnost doplnění informačního a předpovědního systému České republiky. Použité veličiny jsou běžně dostupné a pravidelně aktualizované v rámci informačních systémů státní správy jakými jsou ISVS Voda pod hlavičkou Ministerstva zemědělství ČR (ISVS, 2012) nebo internetový portál Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ, 2012).

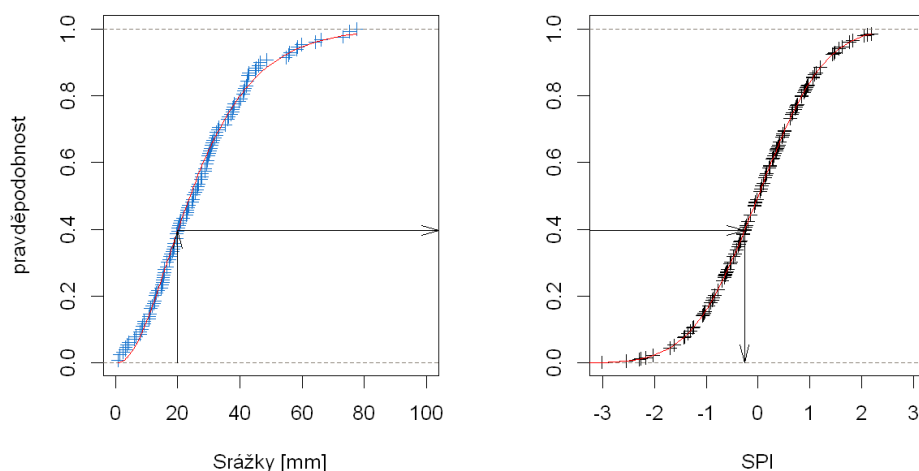
3.1 Charakteristika indikátorů

Účelem indikátorů je zprostředkovat popis a mapování případů sucha. Indikátory tedy musí umožnit stanovení hlavních charakteristik sucha: (i) délku trvání, počátek a konec, (ii) velikost, (iii) intenzitu, (iv) četnost výskytu, příp. (v) plošný rozsah.

Indikátory nejčastěji reprezentují vztah mezi pozorovanými hodnotami a jejich dlouhodobým normálem. Nejjednodušším takovým indikátorem je stanovení procent normálu (%NORM). O stupeň složitějším indikátorem je metoda decilů (Gibbs a Maher, 1967). Tento typ indikátorů je často používán pro svoji jednoduchost a srozumitelnost. Je vhodný pro všechny typy klimatických i hydrologických dat.

3.2 Koncept SPI

Další stupeň v podrobnosti popisu odchylek sledované veličiny pak představuje indikátor typu Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee et al., 1993).



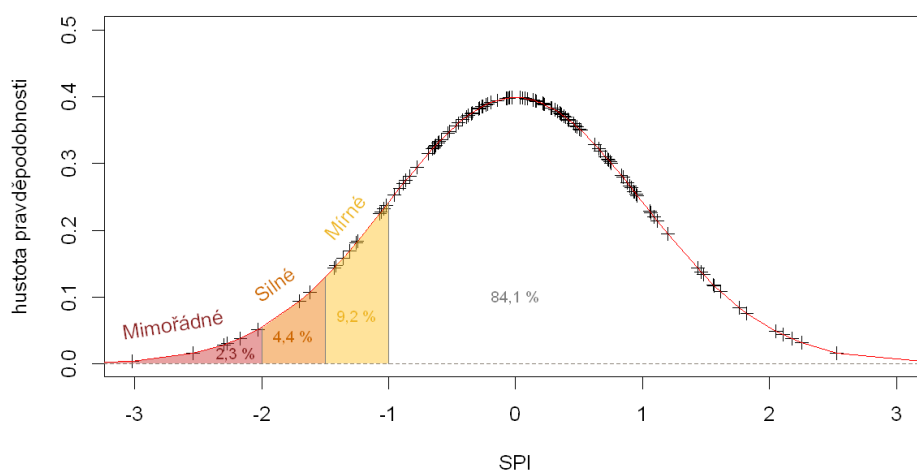
Obrázek 1: Postup odvození indikátoru SPI. Transformace srážkových úhrnů proložených gamma rozdělením na standardní normální rozdělení

Indikátor SPI je široce využíván mnoha systémy monitoringu sucha např. na území Spojených států (NDMC, 2008), ale i v Evropě (EDO, 2013; DMCSEE, 2013). WMO vydala doporučení pro

národní meteorologické a hydrologické služby využívat kromě již zavedených indikátorů sucha také index SPI [WMO \(2012\)](#).

SPI byl původně založený výhradně na pozorování srážkových úhrnů [McKee et al. \(1993\)](#). Indikátor představuje transformaci šikmého rozdělení pravděpodobnosti časových řad srážkových úhrnů na standardní normální rozdělení se střední hodnotou rovnou nule a směrodatnou odchylkou rovnou jedné, tedy tzv. z-rozdělení (**Obr. 1**). Hodnoty indikátoru jsou klasifikovány do kategorií, které určují charakter období (**Obr. 2**).

Návrh skupiny indikátorů sucha vhodných pro podmínky ČR vychází z konceptu tohoto indikátoru. Ten umožňuje vyjádření extremity aktuálního stavu dané veličiny v rámci použitého časového rozlišení (časového měřítka dat) – řada indikátorů typu **S**, i extremitu vývoje veličiny v čase – řada indikátorů typu **DM**.



Obrázek 2: Klasifikace sucha podle SPI. V procentech je vyjádřena pravděpodobnost výskytu příslušné kategorie sucha

Z hlediska obecnějšího využití konceptu indikátoru SPI je důležité, že postup používaný pro stanovení SPI je možno použít i pro popis jiných veličin, jakými jsou např. velikost průtoku v povrchových tocích nebo kolísání zásob podzemní vody. Tyto varianty indexu jsou značeny analogicky jako **SRI** (Standardized Runoff Index) a **SGI** (Standardized Groundwater Index). Indikátor SRI použili k hodnocení modelovaných řad odtoku např. [Shukla a Wood \(2008\)](#).

Výčet doplňuje indikátor **SPEI** (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), modifikace indexu SPI s korekcí srážek o ztráty vlivem evapotranspirace. Ukazuje se, že tento indikátor je vhodnější než SPI pro hodnocení množství skutečně využitelných srážek a tedy charakterizaci sucha z hlediska nároků ([Vicente-Serrano et al., 2010](#)).

3.3 Časové měřítko dat a četnost jejich hodnocení

Sucho je jev, který nastupuje pozvolna a jeho trvání dosahuje několika měsíců. Rychlost s jakou epizoda sucha obvykle končí, se do značné míry liší podle sledované veličiny. V případě srážek

může skončit se změnou typu povětrnostní situace, příchodem frontálních srážek nebo lokálně vznikem konvektivní srážkové činnosti. Tyto události probíhají řádově v rozmezí dnů. Výrazná srážková činnost a tání sněhu podmiňuje vzestup průtoků na povrchových tocích, což se projevuje v rozmezí dnů až týdnů. Teprve, když podíl infiltrované vody z atmosférických srážek doplní zásoby podzemní vody, může dojít k vzestupu vydatnosti pramenů a hladin ve vrtech. K tomu dochází v rozmezí týdnů až měsíců.

S ohledem na uvedené skutečnosti lze vyjádřit doporučení, aby *vyhodnocování stavů sucha* probíhalo v *týdenním*, popř. *denním* kroku. Navrhované indikátory byly testovány v týdenním kroku, ale případný přechod na denní krok umožňují zohlednit.

Časové měřítko vstupních veličin je odvozeno od jejich variability v čase, četnosti jejich pořízení a četnosti stanovení indikátoru. Konkrétně to tedy znamená použití průměrných *týdenních* průtoků, průměrných *týdenních* stavů hladin ve vrtech a vydatností pramenů. Delší časové měřítko postrádá u těchto veličin uplatnění. Vzhledem k vysoké nespojitosti a proměnlivosti srážek kratších časových měřítek (dnů až týdnů) je vhodné u srážek respektovat původní doporučení autorů indikátoru SPI. Pro hodnocení srážek je tedy doporučeno použití *měsíčních* úhrnů srážek, s ohledem na potřebu týdenního vyhodnocení vývoje srážek se jedná o *klouzavé měsíční* úhrny. Užitečným doplněním této základní varianty může být zpracování úhrnů za delší období, nejčastěji 3, 6, 12, popř. i 9, 24 a 48 měsíců (**Tab. 1**). Pro indikátor SPEI platí stejná specifikace časového měřítka dat jako pro SPI.

3.4 Aktuální stav sucha - indikátor typu S

Indikátor typu **S** (SPI, SPEI, SRI, SGI) je ukazatelem *aktuálního stavu sucha za období časového měřítka dané veličiny*. V případě srážek (P) a vztahu srážky–evapotranspirace (PE) je to jeden či více měsíců, pro průtoky (R) a podzemní vody (G) pak týden. Indikátor porovnává hodnoty veličiny v rámci jejich časového měřítka (měsíce nebo týdny) s jejich dlouhodobým normálem typickým pro daný měsíc. Porovnání spočívá v proložení teoretickým pravděpodobnostním rozdělením a poté transformaci na standardní normální rozdělení.

Indikátor *aktuálního stavu sucha* je v případě hodnocení srážek značen symbolicky **SPI** (Standardized Precipitation Index), v případě průtoků **SRI** (Standardized Runoff Index) nebo pro stavy hladin ve vrtech a vydatnosti pramenů **SGI** (Standardized Groundwater Index) a stejně tak pro hodnocení kombinace srážek a evapotranspirace **SPEI** (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) (**Tab. 1**).

Tento typ indikátoru nehodnotí vliv doby předchozího trvání stavu sucha. Podle původního návrhu indikátoru SPI (McKee et al., 1993) je tato skutečnost částečně řešena právě použitím delších časových měřítek než jeden měsíc. Tyto varianty indexu (SPI3, SPI6, SPI12, ...) však mají z hlediska varovného systému a operativního řešení situace sucha jeden výrazný nedostatek – v důsledku jejich klouzavého charakteru epizody sucha podle těchto variant indexu začínají a především končí se zpožděním, které narůstá s velikostí časového měřítka dat.

3.5 Celkový stav sucha – indikátor typu DM

Hodnocení *celkového stavu sucha v závislosti na jeho trvání od začátku suchého období* umožňují indikátory typu **DM** (Drought Magnitude). Stanovení indikátoru spočívá v prvním kroku v postupné integraci hodnot indikátoru typu S v období sucha. Období sucha je definováno jako období, kdy je indikátor aktuálního stavu (typ S) menší než -1 . Suché období končí návratem indikátoru typu S do kladných hodnot. Tak jsou získány hodnoty DM (všechny postupnou integrací získané hodnoty). Jedná se v podstatě o analogii postupu při stanovení velikosti nedostatkových objemů (Vlnas et al., 2010), která bývá používána na povrchových tocích pro odvození hodnot nadlepení průtoků apod. Tento ukazatel zmiňuje také původní práce McKee et al. (1993).

Ze samotných hodnot DM však není zřejmé, jak jsou tyto hodnoty extrémní. V dalším kroku je tedy třeba hodnoty DM podrobit podobnému procesu standardizace jako v případě stanovení indexu typu S, tzn. proložit teoretickým pravděpodobnostním rozdělením a poté transformovat na standardní normální rozdělení.

Pro potřeby prognózy, z hlediska hrozby vzniku sucha apod., je dobré znát i extremitu nadnormálních hodnot. Podobným způsobem jako DM je tedy vhodné zpracovat i hodnoty indikátoru typu S považované za nadnormální, tedy naopak větší než 1.

Standardizací transformované podnormální hodnoty DM pak představují *indikátor celkového stavu sucha od začátku suché epizody*, jehož rozsah a pravděpodobnost výskytu odpovídá rozsahu a pravděpodobnosti výskytu hodnot indikátoru typu S. Indikátor umožňuje vytvořit ucelený přehled nejen o vývoji sucha, ale zároveň i o vývoji kladné složky vodní bilance (v případě vyhodnocení i nadnormálních hodnot stejným postupem). Indikátor je tedy vhodný pro posouzení stavu vodních zdrojů z hlediska nebezpečí vzniku krizové situace.

Tento kumulativní indikátor je v případě hodnocení srážek značen symbolicky **DMPI** (Drought Magnitude Precipitation Index), v případě průtoků **DMRI** (Drought Magnitude Runoff Index) nebo pro stavy hladin ve vrtech a vydatnosti pramenů **DMGI** (Drought Magnitude Groundwater Index) a stejně tak pro hodnocení kombinace srážek a evapotranspirace **DMPEI** (Drought Magnitude Precipitation Evapotranspiration Index) (**Tab. 1**).

3.6 Sezonalita

Klimatické i hydrologické veličiny mají v podmínkách ČR výrazně sezónní charakter. Pro indikátory typu S (SPI, SPEI, SRI, SGI) podle navrhovaného systému je proto vhodné příslušné veličiny hodnotit podle jejich zatřídění zvlášť k jednotlivým měsícům (WMO, 2012). V praxi to znamená, že je třeba stanovit distribuční funkce a jejich parametry pro jednotlivé měsíce roku.

V případě indikátorů typu DM (DMPI, DMPEI, DMRI, DMGI), jejichž odvození je založeno na kumulaci hodnot indikátoru typu S a jejich následné standardizaci, lze provádět proložení jednou společnou distribuční funkcí bez ohledu na sezónu, protože u těchto hodnot již byla sezonalita potlačena způsobem odvození indikátoru typu S.

Tabulka 1: Indikátory sucha založené na konceptu SPI

Veličina	Srážky (P)	Srážky– Evapotranspirace (PE)	Průtok (R)	Vrty, prameny (G)
Časové měřítko dat	1, (3, 6, 12) měsíců	1, (3, 6, 12) měsíců	týden	týden
Indikátor aktuálního stavu sucha – typ S (stav za časové měřítko dat)	SPI1 (SPI3, SPI6, SPI12)	SPEI1 (SPEI3, SPEI6, SPEI12)	SRI	SGI
Doporučený typ distribuční funkce	Gamma log-Pearson III	General Logistic	log-Gamma log-normal	General Logistic Gamma Gen. Ext. Value *
Indikátor celkového stavu sucha – typ DM (stav za celé období trvání sucha)	DMPI1 (DMPI3, DMPI6, DMPI12, DMPI24)	DMPEI1 (DMPEI3, DMPEI6, DMPEI12, DMPEI24)	DMRI	DMGI
Distribuční funkce	Gamma	Gamma	Gamma	Gamma
Aktualizace indikátorů	týdně (s možností přechodu na denní krok)			

* *individuálně podle typu režimu*

3.7 Délka časové řady

Vhodná délka řady pro stanovení normálu se různí, minimálně se udává 30 let. Delší řady spolehlivého záznamu jsou však ojedinělé. S ohledem na dostupnost dat ČHMÚ a vzájemnou porovnatelnost indikátorů srážek, odtoku, podzemních vod atd. lze pro stanovení parametrů distribučních funkcí použít jednotné srovnávací období 1981–2010. Použití delších období je možné, např. pro srážky zavedené normálové období 1961–2010. Výhodou je jednoznačně podstatně větší množství dat pro proložení distribuční funkce. Nevýhodou pak představuje nejistota při srovnání extremity jevu napříč veličinami či stanicemi v rámci jedné veličiny při použití rozdílných normálových období. Možné projevy dopadů změny klimatu v posledních desetiletích by se neměly do výsledných hodnot indikátorů promítnout zásadním způsobem a výhody dané větším množstvím vstupních dat při použití delšího normálového období převažují.

3.8 Ovlivnění průtoků

Evidence ovlivnění průtoků odběry a vypouštěním vody a manipulacemi na nádržích je k dispozici od roku 1979. Tato skutečnost má vliv na volbu délky srovnávacího období. Je totiž vhodné, aby hodnocení stavu průtoků pomocí indikátoru SRI probíhalo vůči pokud možno neovlivněným datům.

Průtoky za období 1981–2010, které slouží k odvození parametrů distribučních funkcí, je tedy třeba korigovat o údaje z evidence ovlivnění. Evidence je vedena v měsíčním kroku, pro týdny příslušející jednotlivým měsícům je řešením ovlivnění uvažovat jako konstantní v rámci příslušného měsíce.

3.9 Distribuční funkce

Na základě testů provedených v rámci řešení projektu *Návrh koncepce řešení krizové situace vyvolané výskytem sucha a nedostatkem vody na území ČR* pro 11 pilotních povodí lze pro vyčíslení indikátorů typu S pro jednotlivé veličiny doporučit následující typy distribučních funkcí:

Srážky – Gamma a log-Pearson III

Srážky–Evapotranspirace – General Logistic (obecné logistické rozdělení)

Průtok – log-Gamma a log-normální rozdělení

Stav podzemní vody – individuálně podle typu režimu hodnot General Logistic, Gamma a General Extreme Value (obecné extrémální rozdělení)

Pro indikátory typu DM lze pro všechny veličiny doporučit Gamma rozdělení (**Tab. 1**).

3.10 Empirická distribuční funkce

V případě, že není možné teoretickou distribuční funkcí s dostatečnou přesností modelovat průběh měřených hodnot, lze výše uvedený postup nahradit stanovením empirických pravděpodobností výskytu. K tomu účelu se v hydrologii často používá rovnice poskytující nevychýlený medián ve tvaru (Hyndman a Fan, 1996):

$$p_i = (i_i - \frac{1}{3}) / (n + \frac{1}{3}) \quad (1)$$

kde p_i je empirická pravděpodobnost výskytu hodnoty, i_i je pořadí hodnoty v souboru všech hodnot setříděných podle velikosti a n je celkový počet hodnot. Výhodou takového postupu je eliminace obtíží spojených s tvarem distribuční funkce na chvostech rozdělení – pravděpodobnost výskytu krajních hodnot je dána celkovým počtem hodnot. Stanovení pravděpodobnosti mezilehlých hodnot je jednoznačně dáno pořadím v rámci příslušného měsíce. Nevýhodou je pak skutečnost, že hodnoty menší (větší), než se vyskytly ve srovnávacím období, mají všechny stejnou pravděpodobnost výskytu – jejich pořadí při setřídění společně se srovnávacím normálovým obdobím je rovno 1, resp. n (pro minimální, resp. maximální hodnoty). Skutečnou pravděpodobnost výskytu těchto hodnot však neznáme ani při modelování řady distribučních funkcí, pouze ji s různou mírou přesnosti odhadujeme, přičemž nepřesnost na chvostech rozdělení řádově narůstá.

4 Hodnocení sucha

Kategorie sucha v systému navržených indikátorů zůstávají prakticky shodné s původním návrhem McKee et al. (1993) pro klasifikaci srážek pomocí SPI. Liší se jen, v souladu s běžnou statistickou praxí, zatřídění hodnot kolem normálu, kdy hodnoty v rozmezí ± 1 směrodatná odchylka jsou považovány za normální a nejsou tedy klasifikovány jako sucho (Tab. 2). Kategorie sucha jsou kompatibilní s hodnocením sucha pomocí indikátoru SPI v sousedních státech i ve světě. Tato kategorizace v praxi znamená, že jako mírné sucho je průměrně klasifikováno 48 případů (týdnů) za 10 let, jako silné sucho 23 a jako mimořádné sucho průměrně 12 případů.

Tabulka 2: Klasifikace sucha podle indikátorů typu S a DM

Hodnota indikátoru	Sucho	Kategorie sucha	Pravděpodobnost výskytu
> -1	-	0	84,1 %
-1 až $-1,49$	Mírné	1	9,2 %
$-1,5$ až $-1,99$	Silné	2	4,4 %
≤ -2	Mimořádné	3	2,3 %

4.1 Hodnocení stavu vodních zdrojů

Indikátory typu DM umožňují klasifikaci sucha s ohledem na jeho celkové trvání a představují tedy *hlavní a určující nástroj* pro posouzení stavu vodních zdrojů z hlediska nebezpečí vzniku krizové situace. Hodnocení stavu vodních zdrojů se provádí v rámci větších územních celků, krajů nebo jejich částí, přičemž určující je průměrná hodnota indikátoru typu DM z vybrané sítě stanic, které se na jejich území nacházejí. Situace může být klasifikována některým ze *stavů bdělosti nebo pohotovosti* pouze na základě indikátoru typu DM. Pro hodnocení stavu zdrojů povrchových vod je vhodným ukazatelem hrozícího nedostatku vody indikátor DMRI (Tab. 3), pro hodnocení stavu zdrojů podzemních vod je to indikátor DMGI (Tab. 4). Upozornění na nastávající stav sucha ČHMÚ vydá za předpokladu, že předpověď vývoje meteorologické situace pro následující hodnocené časové období (týden) neukazuje, že by se stav hodnocených veličin mohl výrazně zlepšit.

Tabulka 3: Upozornění na výskyt hydrologického sucha z hlediska zdrojů **povrchových vod** pomocí hodnocení průtoků na základě indikátoru **DMRI**

Stav	DMRI stanic v kraji nebo jeho části	Sucho	Kategorie sucha
Bdělost	-1 až $-1,5$	Mírné	1
Pohotovost	$\leq -1,5$	Silné až mimořádné	2 až 3

Výrazným zlepšením v případě srážek se rozumí srážkový úhrn, který společně s úhrnem za předcházející tři týdny překročí dlouhodobý normál příslušného měsíce, jak vyplývá z definice indikátoru SPI (suché období končí návratem indikátoru typu S do kladných hodnot). Podobně i pro průtoky platí, že důvodem pro nevydání upozornění na výskyt sucha je prognóza průtoků,

jejichž týdenní průměr bude větší než dlouhodobý normál příslušného měsíce. Vzhledem k dlouhodobému charakteru vývoje změn zásob podzemní vody je výrazné zlepšení stavu podzemních vod v průběhu týdne málo pravděpodobné. Může k němu dojít pouze v případě výskytu výrazně nadnormálních srážek nebo intenzivního tání sněhových zásob.

Tabulka 4: Upozornění na výskyt hydrologického sucha z hlediska zdrojů **podzemních vod** pomocí hodnocení hladin ve vrtech a vydatností pramenů na základě indikátoru **DMGI**

Stav	DMGI stanic v kraji nebo jeho části	Sucho	Kategorie sucha
Bdělost	-1 až -1,5	Mírné	1
Pohotovost	<= -1,5	Silné až mimořádné	2 až 3

Stav naplnění vodních nádrží je hodnocen odlišně od stavu povrchových a podzemní vod, protože indikátory DMRI a DMGI nejsou vzhledem k hospodaření na nádržích vhodné. Sucho z hlediska zásob vody v nádržích je hodnoceno podle velikosti naplnění zásobního prostoru nádrže (**Tab. 5**) podle vztahu:

$$\%RES = \frac{V_t}{V_{RES,t}} * 100 \quad (2)$$

kde V_t je aktuální objem zásobního prostoru nádrže, $V_{RES,t}$ je maximální objem zásobního prostoru a t vyjadřuje časové měřítko dat.

Upozornění na sucho na vodní nádrži se vydává pro konkrétní vodní dílo. Upozornění je možné vydat až na základě souhlasu příslušného provozovatele vodního díla.

Tabulka 5: Upozornění na nízký stav zásob vody v nádržích

Stav	Indikátor naplnění nádrže RES	Sucho	Kategorie sucha
Bdělost	<= 50 %	Mírné	1
Pohotovost	<= 30 %	Silné až mimořádné	2 až 3

Tabulka 6: Příklad scénáře vývoje sucha ve zdrojích povrchových a podzemních vod

Indikátor DMRI (DMGI)		Indikátor SRI (SGI)		Vývoj sucha
0 až -1	+	-1 až -1,5		sucho by mohlo začít
-1 až -1,5	+	-1 až -1,5		sucho začíná a rozvíjí se
-1 až -1,5	+	<= -1,5		sucho se intenzivně rozvíjí
<= -1,5	+	<= -1,5		sucho trvá, aktuálně intenzivně
<= -1,5	+	-1 až -1,5		sucho trvá
<= -1,5	+	0 až -1		sucho trvá, zmírňuje se

Indikátory typu S mají *doplňkovou* funkci. Vzhledem k tomu, že hodnotí právě uplynulé období časového měřítka dat (týden), umožňují především hodnocení aktuálního stavu sucha a *v návaznosti* na odpovídající (ve smyslu shodné veličiny) indikátor typu DM pomáhají rozumět jeho vývoji. Vodítka jak vnímat vývoj sucha v povrchových a podzemních vodách poskytuje

Tab. 6, která odshora dolů představuje začátek, rozvoj, intenzivní rozvoj a odeznění epizody sucha na příkladu jednoduchého scénáře, jak by taková epizoda mohla proběhnout.

Indikátory hodnotící stav a vývoj srážek, popř. v kombinaci s teplotami vzduchu (SPI a DMPI, resp. SPEI a DMPEI) mají s ohledem na hodnocení hydrologického sucha rovněž *doplňkovou* funkci. V případě výrazného nedostatku srážek upozorňují na možnost jeho propagace postupně do povrchových a později i podzemních vod. Indikátory DMPI a DMPEI mohou indikovat stav *bdělosti* (**Tab. 7**). I v tomto případě je určující průměrná hodnota indikátoru z vybrané sítě stanic, které se nacházejí na území kraje nebo jeho části. Indikátory SPI a SPEI informují o aktuálním vývoji sucha za poslední uplynulé 4 týdny k datu hodnocení.

Tabulka 7: Upozornění na výskyt klimatického sucha na základě hodnocení srážek pomocí indikátoru DMPI a DMPEI

Stav	DMPI nebo DMPEI stanic v kraji nebo jeho části
Bdělost	$\leq -1,5$

4.2 Doplnující indikátory

Procenta normálu

Výše uvedené indikátory je vhodné doplnit o indikátor udávající procenta normálu (%NORM), který je obecně srozumitelný. Indikátor je jednoduchým vyjádřením poměru měřené veličiny a její dlouhodobé střední hodnoty (aritmetický průměr) v procentech podle vztahu:

$$\%NORM = \frac{V_{t,m}}{\bar{V}_{t,m}} * 100 \quad (3)$$

kde t vyjadřuje časové měřítko dat a m příslušný měsíc roku. Indikátor nelze použít pro veličiny, které nemají dolní mez, tedy pro vztah srážky–evapotranspirace (PE) a pro stavy hladin ve vrtech při sledování podzemních vod (G).

Minimální zůstatkový průtok a minimální hladina podzemních vod

Vhodným doplňujícím indikátorem pro průtoky (R) je minimální zůstatkový průtok (Q_z). Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách v § 36 definuje minimální zůstatkový průtok jako průtok povrchových vod, který ještě umožňuje obecné nakládání s povrchovými vodami a ekologické funkce vodního toku. Podle § 6 může vodoprávní úřad obecné nakládání s povrchovými vodami rozhodnutím nebo opatřením obecné povahy bez náhrady upravit, omezit, popřípadě zakázat.

Doplňujícím indikátorem pro stav podzemní vody (GW) je, je-li na konkrétním monitorovacím objektu definována, minimální hladina podzemních vod (H_{min}). Podle § 37 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách má minimální hladina podzemních vod zajišťovat udržitelné užívání vodního zdroje

a dosažení dobrého ekologického stavu souvisejících útvarů povrchových vod a tím vyloučit významné poškození suchozemských ekosystémů.

Minimální zůstatkový průtok a minimální hladina podzemních vod jsou tedy významnými limity, jejichž nedosažení by mělo být signalizováno v informačním systému státní správy, aby vodoprávní úřady měly k dispozici aktuální informace o jejich dodržení. Pro klasifikaci sucha jsou však určující indikátory DMRI a DMGI (**Tab. 3** a **Tab. 4**).

5 Seznam zkratek a pojmů

Sledované veličiny

P – Srážky (Precipitation) [mm]

PE – Srážky–Evapotranspirace (Precipitation–Evapotranspiration) [mm]

R – Průtok (Runoff) [m³/s]

G – Stav podzemní vody, tedy úroveň hladiny ve vrtech, popř. vydatnost pramenů (Groundwater) [m n.m., resp. l/s]

Indikátory

Indikátory aktuálního stavu – typ S

SPI – Standardized Precipitation Index

SPEI – Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

SRI – Standardized Runoff Index

SGI – Standardized Groundwater Index

Indikátory celkového stavu – typ DM

DMPI – Drought Magnitude Precipitation Index

DMPEI – Drought Magnitude Precipitation Evapotranspiration Index

DMRI – Drought Magnitude Runoff Index

DMGI – Drought Magnitude Groundwater Index

Doplňující indikátory

Dur – Trvání (Duration)

Int – Intenzita

APD – Srážkový deficit (Antecedent Precipitation Deficit)

%NORM – procenta měsíčního normálu

Q_z – minimální zůstatkový průtok

Ostatní

ISVS Voda – Informační systém VODA České republiky

HPPS – Hlásná a předpovědní služba Českého hydrometeorologického ústavu

6 Právní předpisy

Zákon č. 240/2000 Sb. ze dne 28. června 2000 o krizovém řízení a o změně některých zákonů (krizový zákon).

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon).

Předcházející publikace

Vizina A., Vlnas R. (2014) Aktivita VÚV využitelná v Drought Management Planning, příspěvek semináře *2. Národní konzultační dialog*, 12. 6. 2014, Průhonice.

Vlnas R., Havlíček V., Tremel P., Kašpárek L. (2013) Návrh systému monitoringu a hodnocení hydrologického sucha, příspěvek semináře *Sucho a jak mu čelit*, 15. 5. 2013, Praha, pp. 10–14. ISBN 978-82-02-02465-1.

Vlnas R., Beran A. (2014) A project of the hydrological drought monitoring for the CR, In: *HYPER Droughts: Hydrological, Precipitation, Evaporation, Runoff Droughts – Book of Abstracts of the 6th EGU Leonardo Conference*, 13–14 Nov 2014, Prague: Czech University of Life Sciences / T. G. Masaryk Water Research Institute, s. 124. <http://www.eguleonardo2014.com/abstracts/>

Vlnas R., Hrdinka T., Hrabánková A., Kašpárek L. (2014) Monitoring sucha a adaptační opatření, příspěvek semináře *Národní dialog o vodě 2014*, 10.–11. 6. 2014, Medlov.

Reference

DMCSEE (2013) *Drought bulletins and maps* [online]. © Drought Management Centre for Southeastern Europe, http://http://www.dmcsee.org/en/drought_monitor/, [cit. 2013-10-13].

- EDO (2013) *Factsheets of EDO Indicators* [online]. © European Drought Observatory. JRC European Commission, <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1101>, [cit. 2013-11-12].
- Gibbs, W. M., Maher, J. V. (1967) Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of Meteorology, Bulletin*, 48.
- ČHMÚ (2012) *Portál ČHMÚ: Home* [online]. © ČHMÚ, http://www.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P1_0_Home, [cit. 2012-10-15].
- HPPS (2012) *Hlásná a předpovědní povodňová služba* [online]. © ČHMÚ, <http://hydro.chmi.cz/hpps/>, [cit. 2012-10-15].
- Hyndman, R. J., Fan, Y. (1996) Sample quantiles in statistical packages. *American Statistician*, 50, 361–365.
- ISVS (2012) *Vodohospodářský informační portál - informační systém VODA České republiky* [online]. © MZe, <http://voda.gov.cz/portal/cz/>, [cit. 2012-10-15].
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Anaheim (CA), 17–22 January 1993, 179–184.
- NDMC (2008) *Climate Division Standardized Precipitation Index (SPI)* [online]. © National Drought Mitigation Centre, <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/ClimateDivisionSPI.aspx>, [cit. 2011-01-04].
- Shukla, S., Wood, A. W. (2008) Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic droughts. *Geophysical Research Letters*, 35, doi:10.1029/2007GL032487.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I. (2010) A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23, 1696–1718, doi:10.1175/2009JCLI2909.1.
- Vlnas, R., Kašpárek, L., Vizina, A., Hanslík, E., Šimek, P. (2010) *Časová a plošná variabilita sucha v podmínkách klimatické změny na území ČR*. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka v.v.i., Praha, vyd. 1. edition, ISBN 978-80-87402-11-5, <http://vufind.lib.cas.cz/ustav/KNAV/Record/000960928>.
- WMO (2012) *World Meteorological Organization: Standardized Precipitation Index User Guide*. World Meteorological Organization (Svoboda, M., Hayes, M., Wood, D.), Geneva, Switzerland, (WMO-No. 1090).