

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍCH  
VĚD

**POPIS INDEXŮ A INDIKÁTORŮ  
HYDROLOGICKÉHO SUCHA**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Filip Strnad

Bakalant: Petra Jedličková

2021

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Petra Jedličková

Environmentální vědy  
Aplikovaná ekologie

Název práce

Popis indexů a indikátorů hydrologického sucha

Název anglicky

Description of indices and indicators of hydrological drought

---

Cíle práce

Práce má za cíl sepsání literární rešerše zaměřené na komplexní popis hydrologického sucha. Rešerše bude zahrnovat definice sucha, popis a shrnutí indexů a indikátorů sucha a popis nejistot spojených s modelováním sucha.

Metodika

Úvod práce nabídne náhled na problematiku sucha.

V rešeršní části bude blíže popsána definice sucha, rozvedena charakteristika sucha a konkrétní členění sucha (hydrologické sucho, meteorologické sucho, agronomické sucho, socio-ekonomické sucho). Dále se zaměří na hodnocení sucha pomocí indexů a indikátorů a v neposlední řadě bude shrnuto modelování sucha.

V kapitolách diskuze a závěr budou jednotlivé popsané poznatky shrnuty a budou srovnány různé přístupy hodnocení sucha.

**Doporučený rozsah práce**

25-30

**Klíčová slova**

indexy a indikátory sucha, hydrologické sucho, členění sucha

---

**Doporučené zdroje informací**

- Lloyd-Hughes B., 2014 The impracticality of a universal drought definition. *Theor Appl Climatol*, 117:607–611. doi:10.1007/s00704-013-1025-7.
- Tallaksen LM, Van Lanen HAJ., 2004 Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. In: *Developments in Water Science*, vol. 48. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science B.V.
- Van Loon, A. F., 2015: Hydrological drought explained. *WILEY INTERDISCIPLINARY REVIEWS-WATER* 2 (4), pp. 359-392. DOI: 10.1002/wat2.1085.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) AND GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP), 2016. *Handbook of Drought Indicators and Indices: Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*

---

**Předběžný termín obhajoby**

2020/21 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Filip Strnad

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

---

Elektronicky schváleno dne 30. 3. 2021

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 30. 3. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2021

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Popis indexů a indikátorů hydrologického sucha vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne .....

podpis autorky práce

## **Poděkování**

Především chci poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Filipu Strnadovi za ochotu, podporu, trpělivost a čas, který mi při psaní věnoval. V neposlední řadě také děkuji své rodině a přátelům za podporu při psaní této práce.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce popisuje aktuální problematiku sucha v širším kontextu. Představuje běžné typy sucha a zaměřuje se na způsoby jeho hodnocení. Cílem práce bylo shrnout dostupné informace o tomto fenoménu, jeho možných definicích, bližší charakteristice, klasifikaci jeho typů a možnostech měření či predikce. První část práce se zabývá popisem známých typů sucha, jejich definici a projevu. V následující části se text věnuje metodám hodnocení sucha a popisuje vybrané indexy a indikátory a současné trendy ve vývoji modelování predikcí. Studované indexy jsou Standardizovaný index srážek (SPI), Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI), Standardizovaný index tání a srážek (SMRI) a Palmerův index závažnosti sucha (PDSI). Modelování sucha je popsáno v souvislosti s existujícími nejistotami jeho předpovědí. Důraz je kladen především na problematiku sucha hydrologického. Na závěr jsou výsledky rešerše kriticky zhodnoceny v kontextu klimatické změny a různé metody hodnocení sucha vzájemně porovnány.

**Klíčová slova:** indexy a indikátory sucha, hydrologické sucho, členění sucha

## **Abstract**

This thesis describes current issues of drought in a broader context. It presents common types of drought, and it focuses on ways of evaluating them. The objective of the thesis is to summarize the available information about this phenomenon, its possible definitions, closer characteristics, classification of its types, and options of measurement or prediction. The first part of the thesis discusses the description of well-known types of drought, their definitions, and the conditions under which they appear. In the following part, the text discusses the methodology of evaluation of drought, and it describes selected indexes and indicators, as well as current trends in development of drought modeling. The studied indexes are Standardised Precipitation Index (SPI), Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), Standardised Snowmelt and Rain Index (SMRI), and Palmer Drought Severity Index (PDSI). Drought modeling is described in correlation to existing uncertainties of its predictions. The emphasis is primarily on the problematics of hydrological drought. In the conclusion, the results of the research are evaluated in the context of climatic change, and different methods of evaluating drought are compared.

**Key words:** indexes and indicators of drought, hydrological drought, subdivision of drought

# Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce .....	2
3. Definice sucha.....	3
3.1. Základní členění sucha.....	4
3.1.1. Meteorologické sucho .....	5
3.1.2. Hydrologické sucho.....	6
3.1.3. Agronomické sucho – zemědělské sucho.....	7
3.1.4. Socioekonomické sucho .....	7
3.2. Další členění sucha.....	8
3.2.1. Nahodilé sucho .....	8
3.2.2. Fyziologické sucho .....	8
3.3. Termíny používané při hodnocení sucha .....	8
4. Hodnocení sucha .....	14
4.1. Index.....	14
4.2. Indikátor .....	15
4.3. Indexy a indikátory sucha .....	15
4.1. Standardizovaný index srážek (SPI) / Standardized Precipitation Index	18
4.2. Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI) / Standardized Precipitation Evapotranspiration .....	19
4.3. Standardizovaný index tání a srážek /The standardized melt and rainfall index (SMRI) .....	20
4.4. Palmerův index závažnosti sucha (PDSI) / Palmer Drought Severity Index	20
5. Modelování sucha .....	22
6. Diskuse.....	24
7. Závěr .....	26
8. Reference.....	27
8.1. Použitá literatura.....	27
8.2. Webové zdroje.....	34



# 1. Úvod

Tématem této bakalářské práce je popis indexů a indikátorů hydrologického sucha. Voda je nenahraditelný prvek nutný pro existenci jakékoliv formy života na Zemi. Pohlíží se na ni především jako na nezbytnou látku pro život lidské populace, zvířat, rostlin a jiných organismů. Kvalitní pitná voda je pro mnohé obyvatele nedostupným artiklem, i když se na Zemi nachází dostatek vody, nároky světové populace rostou a tím neúměrně ubývá její dostupnost. Na planetě Zemi je většina vody slaná. Sladká voda je vázána v ledovcích nebo je uložena pod zemským povrchem, zejména v pórech, kde je v přímém kontaktu s horninami. Nejenže je důležité tyto cenné přírodní zdroje sladké vody bedlivě chránit před znečištěním, ale je také nezbytné je udržitelným způsobem využívat.

Podzemní vody jsou největším a nejcitlivějším sladkovodním zdrojem. Pro trvale udržitelný rozvoj je nezbytné v současné době, ale i do budoucna efektivně zajistit vodní hospodářství jednotlivých států, aby se docílilo kýženého cíle. Ochrana vodních toků, správné zacházení s vodními toky a sladkovodními zdroji je zcela zásadní pro budoucí generace.

Sucho je vážná přírodní katastrofa s rozsáhlým dopadem na ekosystém a společnost. Dopad je pozorovatelný v mnoha odvětvích lidské činnosti. Mnoho z těchto dopadů jsou spojována s hydrologickým suchem, jimž jsou například vysychání řek, jezer a podzemních vod. Je proto zásadní pochopit rozvoj a obnovu hydrologického sucha. V této práci je uveden současný stav vědeckých poznatků, procesů a kvantifikací hydrologického sucha ostatních typů such. Zvláštní pozornost je zde věnována i využití a užitečnosti různých indikátorů sucha a jsou zde i zvýrazněny pokroky v monitorování a predikci sucha.

## **2. Cíle práce**

Cílem práce je sepsání práce rešeršního charakteru. Bakalářská práce shrne komplexní popis indexů a indikátorů spojené s hydrologickým suchem. Literární rešerše bude zahrnovat definice sucha, popis a shrnutí indexů a indikátorů sucha a popis nejistot spojených s modelováním sucha.

### 3. Definice sucha

Sucho je složitý jev, který lze definovat mnoha způsoby, avšak konkrétní definice k příkladnému popsání dle prostudovaných prací neexistuje. Škála odvětví zasazených suchem je natolik široká a rozmanitá, je jednoznačný a doslovný popis nenalezneme. Stejně závěry popisují Wilhit a Glantze (1985), Lloyd-Hughese (2013), ale i Yevjevich (1967), (Lloyd-Hughes, 2013), (Wilhite a Glantz, 1985), (Yevjevich, 1967).

V pracích (Palmer, 1965; Tallaksen a Van Lanen, 2004; Sheffield and Wood, 2011), je sucho definováno jako nedostatek vody ve srovnání s běžnými podmínkami, které se mohou vyskytovat v různých složkách hydrologického cyklu. Podle jiných pramenů se jedná o období neobvykle suchého počasí, dostatečně dlouhé na to, aby nedostatek vody způsobil vážnou hydrologickou rovnováhu v postižené oblasti (Glossary of Meteorology, 1959).

V mnoha případech je velmi obtížné nastavit jednotný model, který by zahrnul jednoduchou aplikaci ve všech různých oblastech. Sucho v tropických deštných lesech (např. Bali šest dní bez deště), nelze porovnávat se suchem v pouštních oblastech (Libye – roční srážky méně než 180 mm). V České republice dochází k suchu při nedostatku srážek během delšího časového období. Na území naší republiky hovoříme o řádech týdnů až měsíců (Wilhite, 2005).

I přes to zde sucho působí škody a velké problémy v lesnictví, zemědělství a hospodářství obecně. Opakující se normální projev klimatu, tak bychom mohli popsat sucho dle Blinka (Blink, 2002). Na základě dalších poznatků Blinka (2015) řadíme sucho mezi přírodní rizika. Protože i sucho má mnoho vedlejších vlivů, je jeho určitá podobnost s jinými přírodními riziky nepřekvapivá a v zásadě také nevyhnutelná

Převážná část přírodních rizik vzniká velmi rychle a má stejně rychlý průběh. Některá přírodní rizika často přicházejí bez jakéhokoliv varování. Oproti tomu pomalý vznik a vývoj trvající v řádech měsíců vždy poukazuje na přírodní riziko popisované v této práci – sucho. Tento dlouhotrvající, pro přírodu kritický stav se může vyskytovat v průběhu celé sezóny, několika let, a dokonce i desetiletí. Určení počátku a konce sucha je neobvykle obtížné a je k tomu zapotřebí detailních znalostí z oboru meteorologie, ale také hydrologie. Mimo znalostí je však také podstatnou částí tohoto procesu měření, které celý proces „odhadu“ sucha může značně komplikovat.

### 3.1. Základní členění sucha

Sucho lze rozčlenit dle sektorů na kterých se vyskytuje, ale důležité je pátrat po původu prvotních příčin sucha (Tremml, 2010).

Nejjednodušeji se sucho rozděluje na meteorologické, hydrologické, agronomické a socio-ekonomické. Každé z níže popisovaných jednotlivých typů má své specifické vlastnosti, ale velmi často se vyskytují současně. Setkat se můžeme i se suchem podzemní vody (Brázdil et al., 2015).

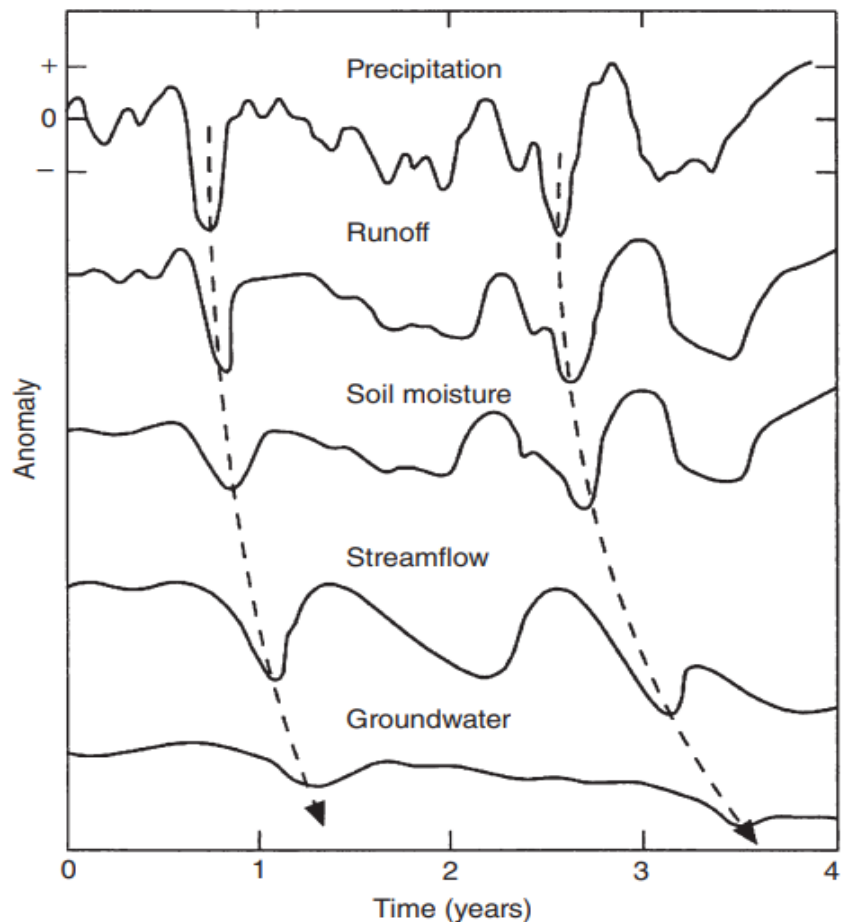
Potop (2008) klasifikuje sucho do tří skupin:

- Stálé = spojené s aridními podnebími
- Sezónní = vyskytuje se v podobě zřetelných každoročních období suchého počasí
- Sucho způsobené deficitem srážek

Vysoká evapotranspirace společně s kombinací nedostatku srážek jsou výsledkem přirozené nestálosti počasí. Tento případ je popsán jako meteorologické sucho. Při nedostatku půdní vlhkosti hovoříme o agronomickém suchu. Pro sucho v povrchových vodách je specifické nedostatek srážek, které mohou zapříčinit vznik nízkého povrchového odtoku. Agronomické sucho způsobuje pokles vody v půdě, pokles hladiny podzemních vod a snížení odtoku podzemních vod do systému povrchových vod. Tyto tři sucha jsou v důsledkem vzniku sucha socio-ekonomického. Socio-ekonomické sucho vzniká spojením dvou jmenovaných typů a ovlivňuje lidskou populaci napřímo.

Obrázek 1 zobrazuje postup šíření srážkové anomálie (sucha) na terestrické části hydrologického cyklu v čase a je z něj dobře patrný vliv těchto výkyvů na jeho jednotlivé složky. Platí, že čím je složka dále ve vodním cyklu, tím jsou v ní běžné menší výkyvy méně zřetelné. Nicméně se zde potvrzuje, že výrazné singularity se zpropagují až do cyklu podzemní vody, přestože ne v takové míře jako do stavu odtoku, půdní vlhkosti atd. Další významnou informací, kterou tento graf nese je časová prodleva v projevu. Srážky (precipitation) jako takové se tvoří v zásadě „šokově“, relativně rychle na ně reaguje množství odtékající vody (runoff), ale co se týče projevu anomálie ve vlhkosti půdy (soil moisture), ta je více rozložena v čase a její celková hodnota tedy není tak vysoká, ale trvá déle. Velikost odezvy obdobnou odtoku mají řeky (streamflow), ale tato je již znatelně časově posunuta a její nástup je oproti

předchozím zmíněným velmi pozvolný. Poslední linie znázorňuje vývoj podzemní vody (groundwater). Časové zpoždění oproti času dopadu srážek je největší a zároveň je velikost jejich anomálie nejmírnější – křivka jejich průběhu je nejvíce „odstíněná“.



Obrázek 1: Šíření srážkové anomálie terestrickou částí hydrologického cyklu zobrazen na syntetické časové řadě.

0 – průměr, + pozitivní anomálie, - negativní anomálie.

Zdroj: Van Loon, (2015)

### 3.1.1. Meteorologické sucho

Meteorologické sucho je popsáno, jako výsledek přechodného nepříznivého stavu atmosféry. Definováno je především na základě odchylek srážkových úhrnů od dlouhodobých průměrů nebo jako řada dní s určitou limitní hodnotou srážek danou pro klima regionu. Určujícími hlavními faktory jsou rychlost větru, rozložení a množství srážek, evapotranspirace a intenzita slunečního záření (Hladný, 2009). Elementárním zdrojem vody v suchozemském geobiocyklu jsou atmosférické srážky.

Popsaný fakt je zohledněn v Kakosově definici meteorologického sucha. Kde je popisované sucho definováno nejčastěji srážkovými, časovými a i prostorovými poměry. Množství a intenzita spadlých srážek přidružených k dlouhodobým srážkovým normálům pro dané místo a roční dobu, byli vědci určeny různé definice meteorologického sucha v úzké závislosti s dalšími meteorologickými prvky. Příkladem mohou být především teplota vzduchu, výpar, rychlost větru, vlhkost vzduchu nebo také prostřednictvím klimatologických indexů (Sobíšek, 1993).

Dále je třeba věnovat pozornost dalším meteorologickým prvkům, které je důležité zohlednit při vytváření definice sucha, jsou jimi přírůstky a ztráty vody v atmosféře. Množství srážek, výška a trvání sněhové pokrývky, počet srážkových dní a pravděpodobnost srážkových událostí patří k základním meteorologickým prvkům zohledňujícím meteorologické sucho.

### **3.1.2. Hydrologické sucho**

Definováno je prostřednictvím deficitu povrchových i podpovrchových zásob vody (Rožnovský a Litschann, 2004). Dále můžeme hydrologické sucho definovat podle hydrologických ukazatelů, zejména průtoku povrchových vodních toků. Důležité přitom je počítat nejen s jeho hodnotou, ale i s počtem dní o průtoku nižším než tzv. m-denní průtok (průtok který je v dlouhodobém průměru překročen po m dní v rámci hydrologického roku). Vyskytne-li se případ kratšího hydrologického sucha provádí se porovnání s měsíčními normály. Velmi podobně se hodnotí stav hladiny podzemní vody (Sobíšek, 1993).

Původ hydrologického sucha je ovlivněn užíváním vody. Důležité proto taky třeba je, brát hydrologické sucho jako přírodní fenomén, který může být do určité míry ovlivněn lidským působením (SUCHO; CHMI, 2017).

Výskyt hydrologického sucha je zpravidla po déle trvajícím období meteorologického sucha, s nedostatkem srážek a velmi často pokračuje i po jeho odeznění (Bednář et al., 1993). Další příčinou může být i akumulace tuhých srážek ve sněhové pokrývce a promrzání půdy (ČMeS, 2017). Dopad hydrologického sucha, se projeví až po delší době, stejně jako dopady sucha podzemní vody či socioekonomického sucha (Sobíšek et al., 1993)

### **3.1.3. Agronomické sucho – zemědělské sucho**

Popisováno je při nedostatku vody v půdě, projevující se nízkou půdní vlhkostí způsobenou meteorologickým suchem (ČMeS, 2017). Zpravidla je vztaženo k potřebám půdní vláhy pro konkrétní typ plodiny v daném čase (Rožnovský, Litschmann, 2004). Dramatický vliv má význam vlastnosti půdy, způsob jejího obhospodařování a nepochybně celá řada dalších faktorů. Za zmínku stojí používaná zemědělská technika a stav, ale i vlastnosti půdy. Nejdůležitější faktory ovlivňující vývoj rostlin jsou teplota půdy a teplota vzduchu. Společně s těmito faktory jsou tyto nároky na vláhu pro jednotlivé vývojové fáze rostlin nezbytné. Spadlé srážky jsou rostlinou využity jen po určitý časový úsek. Mezi primární faktory zahrnujeme fyzikální vlastnosti půdy, stav půdního povrchu, stupeň nasycení půdy vodou a svažitost terénu (Havlíček et al., 1986). Agronomické sucho neboli nedostatek vody v kořenové zóně půdního profilu, vyvolávající u rostlin stresové reakce. Tyto reakce mají nepříznivý dopad na produkci (Vašků, 2001).

Důležitým působícím faktorem je i využívání či nevyužívání zavlažovacích systémů (ČHMÚ, 2017). Agronomickým suchem nejsou zasaženy jen pole, ale také i lesní porosty. Trvání zemědělského sucha se pohybuje přibližně kolem 6-9 měsíců (Brázdil et al., 2009). Hodnocení agronomického sucha se věnuje obor agrometeorologie, kdy je za potřebí brát na poznat i z dalších oborů, příkladem hydrologie nebo fyziologie rostlin (ČMeS, 2017).

### **3.1.4. Socioekonomické sucho**

Socioekonomické sucho je definované pomocí ekonomických ukazatelů, kdy poptávka po různorodých produktech a službách nemůže být uspokojena kvůli nedostatku vody (ČMeS, 2014). Patří do jedné z posledních fází, kdy negativní dopady sucha ovlivní chod celé společnosti, krom vodního hospodářství, lesnictví a zemědělství (Rožnovský a Litschmann, 2004).

Výše popisované sucho je vyvoláno prolínajícími typy dalších such – vyvoláno může být meteorologickým, agronomickým nebo hydrologickým suchem. Klíčovou roli však ale hrají i antropogenní faktory, jmenovitě rychlost socioekonomického vývoje či vodohospodářská opatření atd. (ČMeS, 2014). Běžný občan potíže zaznamená třeba v dodávce pitné vody a celý proces se může projevit i po finanční stránce spotřebního zboží či potravin (Brázdil et al., 2015).

## **3.2. Další členění sucha**

Existují i další definice a členění sucha. V této části jsou popsány jejich známé varianty.

### **3.2.1. Nahodilé sucho**

Sobíšek, B. a kolektiv říkají, že o nahodilém suchu mluvíme v případě situace, kdy daný meteorologický jev je nepravidelně nastávající, trvající několik týdnů, měsíců i roků. Projevuje se odchylkami indexů sucha od klimatologického normálu pro danou oblast a fázi roku.

Sucho je vždy nahodilé v oblastech se stálým ročním chodem atmosférických srážek a také především v oblastech s humidním klimatem. Kvůli obtížné predikci, pozvolnému, a především jeho neočekávatelného nástupu, řadíme nahodilé sucho mezi sucha velmi nebezpečná. Nahodilé sucho v příslušném regionu může mít závislost na některých z klimatických oscilací (ČMeS, 2017).

### **3.2.2. Fyziologické sucho**

Sucho fyziologické je velmi podobné tomu agronomickému, pouze za rozdílu, kdy se hledí na jednotlivé druhy rostliny a jejich fyziologické potřeby (ČMeS, 2017). Jinými slovy se fyziologické sucho vztahuje přímo k rostlině (Bednář et al., 1993). Jednoduchou definicí ho můžeme popsat jako nedostatek vody v kořenové vrstvě půdního profilu, který naruší vodní režim volně rostoucích zemědělských plodin. Nedostupnost vody ve svrchních částech půdního horizontu je dopad předchozího nebo i nadále trvajícího meteorologického sucha (ČHM, 2017). Velmi důležitý je typ půdy, protože jednotlivé druhy rostlin jsou schopny odebírat vodu z rozličných hloubek. Příkladem může být těžká, soudržná jílovitá půda, kdy se v půdě může nacházet dostatek vody, ale rostliny nemají dostatek síly a nejsou schopny kvůli danému typu půdy vláhu kořeny absorbovat (Jůva, 1959).

## **3.3. Termíny používané při hodnocení sucha**

Šíření sucha i období sucha se obecně projevuje mnoha dílčími procesy. Mnohé charakteristické a objasněné jevy mu mohou předcházet. Níže jsou objasněny některé související základní pojmy a problematiky důležité k pochopení a postižení komplexnosti této problematiky z meteorologického a hydrologického hlediska.



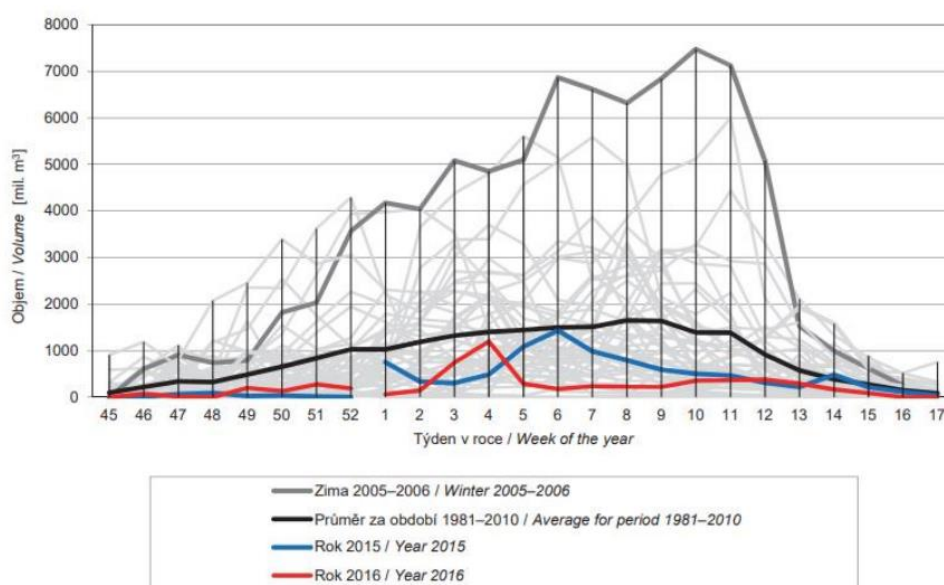
První část se zabývá spíše hydrologií a termíny jako evapotranspirace, zásoby sněhu či podzemní voda. V druhé části jsou rozvedeny některé fundamentální poznatky meteorologie (proudění vzduchu, srážky a další).

Výpar je množství vody evaporované za určitý čas (Penka, 1985). Evaporace je proces vypařování vody z povrchu země či hladiny vody nezakrytých vegetací (Sommer, 1985), podle Krešla (2001) se jedná o nejvýznamnější a nejvlivnější složkou bilance vody na většině povrchu Země. Výpar z vegetačního pokryvu se běžně označuje – transpirace. Spojením těchto slov je termín evapotranspirace, který značí fyzikální proces, během nějž se voda přeměňuje na vodní páru. Jednotky výparu se udávají v milimetrech jako vodní sloupec odpařený do atmosféry. V rámci evapotranspirace se dá rozlišit evapotranspirace aktuální a potenciální. Hodnota tohoto potenciálního výparu značí maximální možný výpar za předpokladu neomezených zdrojů vody (tedy množství vody, které je okolní vzduch schopen pojmout). Její správný výpočet je základem k určení zásob vody v půdě (Záník, 1997). Aktuální evapotranspirace vyjadřuje reálné množství vody, které se na daném místě vypaří. Je mnoho metod, kterými se evaporace a transpirace dají měřit, nejčastěji používaným nástrojem je lyzimetr. Jedná se o nádoby plné půdy, ve kterých jsou zkoumané plodiny. Měří se buď množství proteklé vody nebo změna váhy půdního vzorku. Vzájemný rozdíl evapotranspirace či evaporace a atmosférických srážek se nazývá vláhová bilance. V tomto vztahu vyjadřují srážky vstup a evapotranspirace spolu s odtokem výstupy z oběhu vody. Jelikož tato veličina závisí na evapotranspiraci, je její výpočet zatížen způsobem výpočtu hodnoty evapotranspirace, kterých je mnoho.

Definice půdní vlhkosti je mnoho v závislosti na oborech, které se jí zabývají. Z hlediska pedologie může být půdní vlhkost vyjádřena několika charakteristikami (např. bodem vadnutí, polní vodní kapacitou atd.), v agrometeorologickém pojetí toto sousloví značí pouze obsah vody v půdě. Tato proměnná se také dá více způsoby i vyjádřit. Relativní vlhkost půdy jako stanovení hmotnostního poměru vody a celého vzorku či procentuální objem vody v definovaném objemu (toto se používá především u vzorků půdy v přirozeném stavu) (Honsová, 2008).

Významným zdrojem vody, který se zásadně podílí na hydrologické bilanci jsou již výše zmíněné srážky. Jejich typem, který představuje spíše dlouhodobější rezervoár vody, než průběžné dodání vláhy je sněhová pokrývka. Kvůli následnému výpočtu sněhových zásob v povodí je monitorována sítí srážkoměrných stanic –

konkrétně její výška, vodní hodnoty sněhu a pozorování množství srážek či jiných potřebných meteorologických veličin (Ministerstvo zemědělství, 2001). Období sněhových zásob je v České republice mezi 45. a 17. týdnem v roce. Nástup je zpravidla pozvolný a vrcholu svého objemu sněhová pokrývka dosahuje mezi 4. a 10. týdnem v závislosti na celkovém množství sněhu v daném roce. Z grafu na obrázku č.1 je patrné, že distribuce sněhových srážek v zimním období je v čase stále méně rovnoměrná a zároveň i množství těchto srážek má spíše snižující se trend. Po zimě – v období tání sněhu tyto zásoby dotují vodní toky a při šokovém oteplení mohou způsobit záplavy. I přesto jsou však pro krajinu potřebné a nenahraditelné.



Obrázek 2: Vývoj zásob sněhu ČR za zimní období 1970-2016. Zdroj: Hydrologická ročenka

Mimo srážky a povrchovou vodou je velmi důležitým zdrojem voda podzemní. Jedná se o vodu, která se vyskytuje v pásmu saturace pod zemským povrchem, je tedy v přímém kontaktu s horninami. Vzhledem k tomu jsou tyto vody náchylné ke znečištění například průsaky, zároveň tvoří největší zdroj pitné vody. Jejich ochrana vyplývá ze vodního zákona (254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů) a za tímto účelem jsou prováděna hodnocení stavu podzemních vod doplňována o průběžný monitoring zprostředkovaný monitorovací sítí chemického stavu podzemních vod a monitorovací sítí kvantitativního stavu podzemních vod (Ministerstvo životního prostředí, 2008).

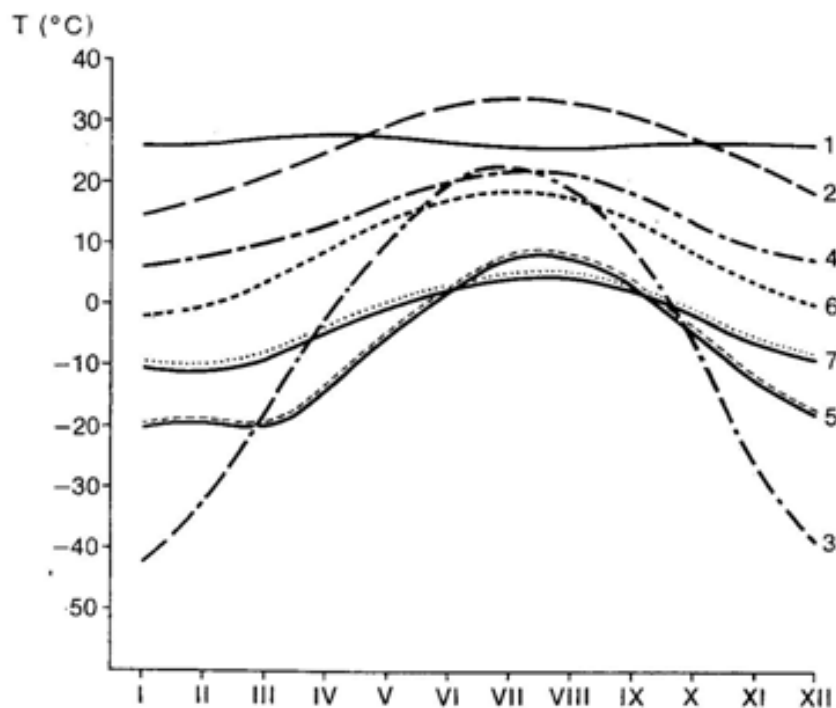
Meteorologické charakteristiky hodnocení sucha se částečně prolínají s proměnnými zmíněnými výše, avšak řadí se k nim i jiné děje, které se odehrávají pouze v atmosféře. Jednou z nich je sluneční záření, které je základním předpokladem existence života na Zemi. Sluneční radiace je elektromagnetické vlnění, které je hlavním energetickým zdrojem našeho systému planet. Dá se vyjádřit více způsoby – intenzitou (watt hodiny) či intenzitou vztahenou k ploše (watt na metr čtvereční). Intenzitu slunečního záření kolmo dopadajícího na jeden metr čtvereční horní hranice atmosféry nazýváme sluneční konstanta, ta se v průběhu roku mění spolu s množstvím dopadajícího záření obecně. Dále ji ovlivňují cykly slunce. Množství záření dopadajícího na povrch Země se značí insolace a dá se definovat jako množství přímého slunečního záření. Čím je slunce výše na obloze, tím více této energie na jednotku plochy Země dopadne. Termín solární klima označuje nepravidelný roční režim insolace na horní hranici atmosféry (tzv. extraterestrální insolace) (Ruda, 2014).

Elektromagnetické záření má široké spektrum, pro potřeby meteorologie se dělí na krátkovlnné (gama, rentgenové a ultrafialové) a dlouhovlnné záření (viditelné, infračervené, mikrovlnné a radiové). Při průchodu atmosférou je sluneční radiace „filtrována“ – její znatelná část je pohlcena, rozptýlena (procesem difúze – molekulární a aerosolový rozptyl) a ohnuta. Sluneční záření dopadající na Zemský povrch se dá dělit na přímé (krátkovlnné), rozptýlené (také krátkovlnné, intenzitu determinuje množství částic ve vzduchu), globální (termín spojující záření přímé a rozptýlené), odražené a dlouhovlnné (zpětně vyzařuje atmosféra a povrch Země). Zmíněné dlouhovlnné záření vyzařované Zemí atmosféra nepropouští a podporuje tak oteplování (skleníkový efekt) (Ruda, 2014).

Pro popis dějů v atmosféře je nezbytnou veličinou teplota. Její měření je podstatné pro mnoho dalších oborů, ale z meteorologického hlediska hovoříme o teplotě vzduchu, základní přízemní teplota se měří ve dvou metrech nad zemí. Z pohledu časových řad se základně monitoruje v rámci dnů (24 hodin) a let (např. z charakteristik denních či měsíčních). V rámci jednoho dne se atmosféra prohřívá odspodu směrem vzhůru, teplotní rozsah je závislý na mnoha faktorech (zeměpisná poloha, roční období, klima, tvar reliéfu a pokryvnosti vegetace). V rámci teplotních změn během roku se v celoplanetárním měřítku rozlišuje několik typů území s různou teplotní amplitudou. Při náhlém výkyvu – singularitě (zapříčiněné například vpádem odlišných vzduchových hmot) dochází k narušení zaběhlého trendu, které se projevuje nestandardní

teplotou (dobrým příkladem je babí léto či ledoví muži) (Vysoudil, 2013). Průměrný roční chod teploty vzduchu popisuje v různých oblastech obrázek 3.

„Rovníkový typ se vyznačuje malou amplitudou (5 °C) a přítomností dvou nevýrazných maxim v období slunovratů, (křivka 1). Tropický typ je charakteristický vyšší amplitudou (5 °C při pobřeží, 10–15 °C nad pevninou) a jedním teplotním maximem a minimem v období nejvyšší a nejnižší výšky Slunce nad obzorem, (křivka 2). Typ mírného pásu vykazuje extrémní teplotní hodnoty po letním a zimním slunovratu (na severní polokouli se maxima a minima objevují v červenci a lednu, nad oceány a v horských oblastech pak v srpnu a únoru – důsledek pomalejšího prohřívání a ochlazování oceánů a postupného prohřívání a ochlazování jednotlivých vrstev troposféry), amplitudy nad pevninami kolísají v rozmezí 10–15 °C u pobřeží a 60 °C uvnitř kontinentu), lze vymezit oblast subtropickou, vlastní mírnou a subpolární, (křivky 3, 4, 6, 7). Polární typ má vyšší teplotní amplitudy (30–40 °C nad pevninou, 20–25 °C nad oceány), přičemž maxima vrcholí v polárním létě a minima na konci polární noci, (křivka 5)“ (Ruda, 2014)



Obrázek 3: Průměrný roční chod teploty vzduchu. Zdroj: Netopil (1984)  
 1 – Batavie ( $\varphi = 6^{\circ}11'j.s.$ ), 2 – Asuán ( $\varphi = 25^{\circ}02's.s.$ ), 3 – Jakutsk ( $\varphi = 62^{\circ}01's.s.$ ), 4 – Londýn ( $\varphi = 51^{\circ}28's.s.$ ),  
 5 – Dikson ( $\varphi = 73^{\circ}30's.s.$ ), 6 – Brno ( $\varphi = 49^{\circ}12's.s.$ ), 7 – Lomnický štít ( $\varphi = 49^{\circ}12's.s.$ )

S teplotou dále souvisí vertikální teplotní gradient neboli změna teploty ve stupních na sto metrů výšky (Ruda, 2014). Adiabatickým se označuje takový děj, při

kterém nedochází k energetické výměně s okolní atmosférou (oteplování či ochlazení vzduchu). Vertikální pohyb vzduchových částic nenasycených vlhkostí za absence výměny energie s okolním vzduchem determinuje suchoadiabatický gradient (jeho hodnota je 1 °C na 100 m). Vlhkoadiabatický gradient je analogický, působí změnu 0,5 °C na 100 m výšky, rozdíl je, že vzduchové částice jsou vlhkostí nasyceny. V neposlední řadě s teplotou vzduchu souvisí i teplotní inverze, vertikální teplotní rozložení, ve kterém se teplota vzduchu s nadmořskou výškou zvyšuje. Základními typy jsou radiační, subsidenční, pasátová, frontální a turbulentní inverze (Vysoudil, 2013).

Voda je v atmosféře přítomna ve všech třech skupenstvích a účastní se hydrologického cyklu. Do atmosféry se dostává evaporací, transpirací a evapotranspirací či sublimací. Procesy znovunavrácení této vody na zem probíhají především prostřednictvím kondenzace (Ruda, 2014). Za tím stojí vodní páry srážející se na kondenzačních jádrech, čímž zapřičiňují vznik mikroskopických kapek, na to může navázat desublimace iniciující vznik ledových krystalů. Množství vodních par ve vzduchu vyjadřuje termín vlhkost vzduchu, k jejímu vyjádření se používají tyto proměnné – relativní a absolutní vlhkost vzduchu, sytostní doplněk, napětí vodních par, rosný bod, poměr směsi a měrná vlhkost vzduchu. Při vhodné konfiguraci pro kondenzaci vodních par (vysoká relativní vlhkost, teplota nižší rosného bodu atd.), se vytváří mlha.

Jsou definovány tři typy mlh – z vypařování, advekční a radiační. Srážky obecně vznikají pohybem vzduchu vzhůru, což vede k jeho ochlazení, a to ke kondenzaci. Dají se například dělit na orografické (ochlazení vzduchu důsledkem „přetékání“ terénní překážky), konvektivní (nerovnoměrným ohřevem zemského povrchu teplý vzduch stoupá a cestou je ochlazen) a cyklonální (vznik v oblastech tlakové níže) (Králová, 2004).

Dále je možné srážky definovat dle jejich denního cyklu (pevninský a mořský typ) ročního průběhu či směru (horizontální a vertikální) (Ruda, 2014). Jak bylo naznačeno výše, se srážkami přímo souvisí i oblačnost. Jedná se o míru pokrytí nebe oblaky a v meteorologii se vyjadřuje v osminách (0 značí jasno, 10/10 zataženo) (Jiřík, 2001). Její hodnota ovlivňuje teplotní režim zemského povrchu, čím vyšší oblačnost, tím menší amplituda teplot, poskytuje tedy jakýsi obal tlumící případné výkyvy a extrémy. Mimo dělení oblak dle tvaru, které je velmi rozsáhlé, se dají charakterizovat svým složením (vodní, smíšená a ledová), výškou základny a příčinou vzniku (Ruda, 2014).

V neposlední řadě je mnoho faktorů v atmosféře ovlivněno prouděním vzduchu čili větrem. Rozlišuje se především jeho směr a rychlost, pole proudění vzduchu lze vyjádřit pomocí proudnic. Jeho základní vlastností je tendence vyrovnávat rozdíly tlaku, proudění tedy vždy probíhá z oblastí tlaku vyššího do oblastí s tlakem nižším. Determinují ho tři faktory – velikost horizontálního tlakového gradientu, která způsobuje zrychlení, Coriolisova síla, která zapříčiňuje stáčení daným směrem v závislosti na polokouli a odstředivá síla zemské rotace (Vysoudil, 2013). Dalšími souvisejícími pojmy jsou Ekmanova spirála a síla tření, která zapříčiňuje zpomalení proudění (to je také důvod, proč je ve vyšších polohách atmosféry toto proudění rychlejší), mimo ně je proudění větru ovlivněno vertikálním reliéfem (vznik konfluence a difluence). Dvěma typy jsou laminární proudění vázané na hladký povrch a chaotičtější proudění turbulentní, zapříčiňené naopak hrubostí a členitostí povrchu. Jelikož je proudění vzduchu obecně ovlivněno tolika proměnnými, vznikají regionálně jedinečné cirkulace či větry závislé na místních specifických podmínkách. Z evropských lokálních názvů větrů lze uvést například fén, mistral či scirocco (Ruda, 2014). K těmto meteorologickým charakteristikám se řadí také sněhová pokrývka a dostupnost půdní vláhy – obě již zmíněné v první části této podkapitoly.

## **4. Hodnocení sucha**

V této části jsou popsány nejběžněji používané indikátory a indexy sucha. V rámci popisu jsou nejprve vymezeny základní pojmy spojené s jednotlivými druhy sucha, konkrétně meteorologické, hydrologické, agronomické a socioekonomické sucho. Následně jsou charakterizovány indikátory a indexy používané k popisu a kvantifikaci sucha.

### **4.1. Index**

Index neboli hodnotový ukazatel, jedná se o veličinu pro kvantitativní vyhodnocení sucha. Díky nejednoznačné definici sucha a různorodým faktorům pro hodnocení sucha existuje takových indexů velké množství. Často jsou založeny na zvolených prahových hodnotách úhrnů srážek. Pokročilejší indexy odrážejí časovou distribuci srážek nebo míru abnormality srážek (např. standardizovaný srážkový index – SPI). Dále existuje skupina indexů, které zohledňují kromě deficitu srážek i podmínky pro výpar a stav nasycení půdy vodou (např. Palmerův index intenzity sucha – PDSI). Tyto

indexy lze také využít k identifikaci vlhkých období. Indexy aridity mohou posloužit při vyhodnocování vegetačních období (ČMeS, 2017).

Indexy měří kvalitativní stav sucha v krajině pro dané časové období. Můžeme jim přiřknout přívlástek ukazatelů. Monitorují klima v různých časových intervalech a umožňují identifikaci krátkodobých vlhkých období v dlouhodobém suchu nebo naopak sledují krátkodobá sucha v dlouhodobém vlhkém období. Při správné aplikaci mohou indexy zjednodušit složité vztahy a mohou poskytnout užitečné nástroje při komunikaci. Vznik sucha v daném časovém období může být stejně významný jako závažnost dopadů sucha. Relativně nízkou závažnost můžeme sledovat během průběhu delšího suchého období. Pokud k němu dojde během období, kdy je rostlina nejvíce náchylná na vlhkost, může mít ničivější dopad na výnos plodiny než delší a závažnější sucho vyskytující se v méně kritické době během zemědělského cyklu (WMO, 2016)

Indexy sucha v kombinaci s dalšími informacemi jsou pro sledování a pro předpovídání dopadů nezbytné. Indexy mohou hrát klíčový historický odkaz. Tento náhled napomáhá k determinaci pravděpodobnosti výskytu sucha nebo jeho opakování. Změna klimatu tyto zavedené historické vzorce může upravit (WMO, 2016).

## **4.2. Indikátor**

Indikátory jsou parametry nebo proměnné používané k popisu sucha. Indikátorem jsou myšleny meteorologické charakteristiky jako jsou evapotranspirace, proudění, sněhová pokrývka, teplota, rychlost větru, sluneční radiace, nebo dostupnost půdní vláhy. Při hodnocení sucha jsme nuceni používat hydrologické indexy, ale i indexy z velmi blízkých oborů, které souvisí s hydrologickým suchem (WMO, 2016).

## **4.3. Indexy a indikátory sucha**

Abychom porozuměli hydrologickým procesům sucha a dopadům charakteristik sucha, jako je načasování, doba trvání, závažnost (nebo intenzita) a prostorový rozsah, je třeba identifikovat událost sucha (Tallaksen LM, Van Lanen, 2004; Wilhite, 2000; Seneviratne, 2012). Její pomalý nástup, dlouhotrvající obnova, různé kategorie sucha a zasažená místa znesnadňují kvantitativnímu stanovení období sucha, což vede k velkému počtu indexů (Lloyd-Hughes, 2014).

Volba indexu a jeho implementace je důležitá, protože mohou vést k různým závěrům, zejména s ohledem na trendy a globální změny (Burke, Brown, 2008), (Sheffield, Wood, Roderick, 2012).

Zdá se však, že existuje vědecká shoda, neexistuje žádný „nejlepší“ hydrologický index sucha, a tak další pátrání po „nejlepší“ indexu ztrácí smysl (Hayes, Svoboda, Wall, Widhalm, 2010). Každý typ indexu, který se zaměřuje na konkrétní část hydrologického cyklu nebo index používající svou specifickou metodiku, má své opodstatnění. Pro konkrétní aplikaci ke kvantifikaci rozmanitosti dopadů sucha by mělo být použito více indexů (Hayes, Svoboda, Wall, Widhalm, 2010).

V této části nenalezneme všechny typy existujících indexů sucha. Namísto toho zde zmíním jen několik široce používaných skupin indexů pro charakterizaci hydrologického sucha. Indexy sucha, lze zhruba rozdělit do standardizovaných indexů a prahových indexů (Van Loon, 2015).

Jak již bylo uvedeno, v tak rozsáhlých odvětvích není jednoho jediného ukazatele nebo indexu, které by přesně determinovali typ sucha. K určení indikátoru /indexu předchází detailní analýza. Velmi často se k finálnímu indexu vědci dopracovávají tzv., přístupem „pokus – omyl“ (WMO, 2016).

Níže publikované indikátory a indexy jsou rozděleny do kategorií podle typu a snadnosti použití a seskupeny jsou jednotlivých klasifikací. Pro přehlednost v našem případě, vždy uvedu pouze mnou vybrané typy.

**Meteorologie** – Aridity Anomaly Index (AAI), Keetch–Byram Drought Index (KBDI), Standardized Precipitation Index (SPI), Weighted Anomaly Standardized Precipitation Index (WASP)

**Vlhkost půdy** – Reclamation Drought Index (RDI), Soil Moisture Anomaly (SMA), Evapotranspiration Deficit Index (ETDI)

**Hydrologie** - Standardized Reservoir Supply Index (SRSI), : Streamflow Drought Index (SDI), Surface Water Supply Index (SWSI)

**Dálkový průzkum země** – Enhanced Vegetation Index (EVI), Evaporative Stress Index (ESI), Temperature Condition Index (TCI)



Ačkoliv bylo zmíněno, že jsou řazeny dle snadnosti použití, lišit se mohou díky znalostem uživatele a počítačových zdrojů dostupné k jejich implementaci (WMO, 2016). Takzvaná klasifikace „jednoduchosti použití“ je zde používána pro každý indikátor / index jako systém „semaforu“ (zelená nejjednodušší, červená nejsložitější).

Indexy se považují za zelené - „nejjednodušší“ pokud splňují jednotlivá kritéria:

- Kód nebo program pro spuštění indexu je snadno a volně dostupný
- Denní údaje nejsou vyžadovány
- Výsledný index je produkován operativně a je bezprostředně k dispozici on-line

Patří mezi ně:

SPI – Standardizovaný index srážek (Standardized Precipitation Index)

KBDI – Byramský index sucha (Byram Drought Index)

WASP – (Weighted Anomaly Standardized Precipitation)

Indexy považovány za oranžové „středně složité“ mají následující kritéria.

1. Je zapotřebí více proměnných nebo zdrojová data pro výpočty
2. Kód ke spuštění indexu není dostupný ve veřejné doméně
3. Složitost výpočtů k vytvoření indexu je minimální

Příkladem mohou být:

PDSI – Palmerův index závažnosti sucha (Palmer Drought Severity Index)

Palmer Z index – Palmerův Z index

EDI – Efektivní index sucha (Effective Drought Index)

SPEI – Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)

Indexy „červené“ se považují za nejsložitější při platných následujících kritériích

1. Pro výpočet indexu na základě dané metodiky je zapotřebí vytvoření kódu
2. Indexy nejsou běžně dostupné
3. Index je součástí výpočtů

Řadíme pod ně následující:

SMDI – Index deficitů půdní vlhkosti (Soil Moisture Deficit Index)

SMRI – Standardizovaný index tání sněhu a deště (Standardized Snowmelt and Rain Index)

Indexy se mohou dále rozdělit podle typu použitých dat:

1. **indexy komplexní** – PDSI (Palmer Drought Severty Index), indexy odvozené od PDSI, např. PMDI (Palmer Modified Drought Index), PHDI (Palmer Hydrological Drought Index), CMI (Crop Moisture Index), VegDRI (Vegetation Drought Response Index), SWSI (Surface Water Supply Index),
2. **indexy založené na denních srážkách** – RAI (Rainfall Anomaly Index), , SPI (Standardized Precipitation Index), EDI (Effective Drought Index), RDI (Reconnaissance Drought Index);
3. **indexy založené na sledování podzemní vody** – SWI (Standardized Water Level Index), GRI (Groundwater Resource Index);
4. **indexy založené na pozorování odtoku** – RDI (Regional Streamflow Deficiency Index), SDI (Streamflow Drought Index),

Dalšími typy mohou být indexy založené na modelech kompozitních (složených) nebo modelovaných (Composite or Modelled) nebo laboratorně stanovené indexy (Novický, 2011), (WMO,2016).

#### **4.1. Standardizovaný index srážek (SPI) / Standardized Precipitation Index**

Je široce používaným indexem k charakterizaci meteorologického sucha v řadě časových období. V krátkých časových intervalech SPI úzce souvisí s půdní vlhkostí, zatímco v delších časových intervalech může SPI souviset s podzemní vodou. SPI lze

porovnávat napříč regiony s výrazně odlišným podnebím. SPI kvantifikuje pozorované srážky jako standardizovaný odklon od vybrané distribuční funkce pravděpodobnosti, která modeluje surová data srážek.

Hodnoty SPI lze interpretovat, jako počet směrodatných odchylek, kterými se pozorování anomálie odchyluje od dlouhodobého průměru. Vytvořit SPI lze pro různá období v řádech od 1 až 48 měsíců, pomocí měsíčních vstupních údajů. Standardizovaný index srážek byl uznán jako standardní index, který by měl být celosvětově dostupný pro kvantifikaci a hlášení sucha (Djebbar, Goose, Klein, 2020).

Odborníci doporučili, aby SPI bylo využíváno všemi národními meteorologickými a hydrologickými službami (NMHSs) po celém světě k charakterizaci meteorologického sucha. Výhody SPI spočívají v jeho výsledku výpočtu normalizované hodnoty pro různé časové škály, jak bylo výše zmíněno (Sheffield, Wood, 2011). Objevily se obavy ohledně užitečnosti SPI, jako měřítka změn sucha související se změnou klimatu. Nezabývá se to totiž změnami evapotranspirace. Při výpočtu se berou v úvahu pouze srážky, což se v odborné literatuře zmiňuje jako jedna z nevýhod (Dia, 2011). Indexy započítávající evapotranspiraci, byly navrženy analogicky k SPI (kapitola SPEI) (Djebbar, Goose, Klein, 2020).

#### **4.2. Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI) / Standardized Precipitation Evapotranspiration**

SPEI je rozšířením široce používaného standardizovaného indexu srážek (SPI). (Vicente-Serrano et al., 2009), stojí za rozšířením a rozvinutím tohoto indexu. SPEI je navržen tak, aby při určování sucha zohledňoval jak srážení, tak potenciální evapotranspiraci. Na rozdíl od SPI tedy SPEI zachycuje hlavní dopad zvýšené teploty na potřebu vody. Stejně jako SPI lze SPEI vypočítat v rozsahu časových období od 1 do 48 měsíců (Masupha et al., 2018). SPEI zvažuje kumulované anomálie klimatické vodní bilance (srážky mínus potenciální evapotranspirace) a podobně jako SPI odpovídá pravděpodobností distribuci a transformuje ji do normální distribuce (Van Loon, 2015).

Denní úhrny srážek, průměrná denní rychlost větru, průměrný denní tlak vodní páry (vlhkost vzduchu), trvání slunečního svitu a průměrné denní teploty vzduchu jsou potřeba k výpočtu potenciální evapotranspirace. K výpočtu indexu SPEI je zapotřebí kvalitních a úplných datových řad všech zmíněných meteorologických prvků. Ke správnému výpočtu indexu SPEI je potřeba minimálně 30 roku úplných datových řad.

Výpočty se průměrně provádí pro 120 klimatologických stanic (ČHMÚ, CzechGlobe et MENDELU, 2014).

#### **4.3. Standardizovaný index tání a srážek /The standardized melt and rainfall index (SMRI)**

Staudinger v roce 2014, zohlednil explicitní tání sněhu. Index pojmenoval Melt and Rain Index (SMRI). SMRI kvantifikuje oba deficity, deště a tání sněhu (Staudinger et al., 2014). Nový index byl vypočítán podobně jako SPI, jen za použití denního součtu tání sněhu a deště. K získání denního množství tání sněhu se používá běžně používaný model, pracující pouze s údaji o teplotě. Zatímco k výpočtu indexu lze použít jakýkoliv model sněhu nebo odvození tání sněhu, zde použitý model sestává ze složky akumulace sněhu založené na prahové teplotě a složky sněhu roztavené na základě přístupu den / stupeň umožňujícího uložení až 10 % současného simulovaného ekvivalentu sněhové vody a opětovné zmrazení kapalné vody ve sněhové pokrývce (se sníženou rychlostí ve srovnání s roztáním) (Bergström et al., 1992).

#### **4.4. Palmerův index závažnosti sucha (PDSI) / Palmer Drought Severity Index**

V 60. letech 19. století Palmer začal s prvními pokusy k identifikaci sucha pomocí více než jen údajů o srážkách. Palmer vyvinul funkční metodu, kde dokázal začlenit údaje o teplotě a o srážkách s informacemi o vodní bilanci k identifikaci sucha (WMO, 2016).

Palmerův index závažnosti sucha (PDSI) využívá snadno dostupné údaje o teplotě a srážkách k odhadu relativní suchosti. Je využíván a celosvětově široce aplikován ke kvantifikaci sucha (Palmer, 1965). PDSI byl při kvantifikaci dlouhodobého sucha poměrně úspěšný. Jelikož využívá údaje o teplotě a model bilance vody, dokáže zachytit základní účinek globálního oteplování prostřednictvím potenciální evapotranspirace. Využití nalezneme i v dnešní době v mnoha oborech, například v meteorologii, zemědělství, lesním hospodářství, ale i v hydrologii nebo ekonomii (Alley, 1984).

PDSI se někdy klasifikuje jako index meteorologického sucha a někdy jako index sucha v půdní vlhkosti (Dai, 2011). (Djebbar et al., 2020) zmiňují i některé klady a zápory.

Klíčovou roli hraje PDSI hned v několika bodech:

- PDSI je efektivní při určování dlouhodobého sucha, zejména v nízkých a středních zeměpisných šířkách.
- Použitím teploty vzduchu a fyzikálního modelu vodní bilance, zohledňuje PDSI základní efekt globálního oteplování prostřednictvím evapotranspirace.
- Zohledňuje podmínky v rámci předchozího měsíce.

Avšak PDSI je i omezen:

- Nezohledňuje sníh nebo led. Model předpokládá, že jsou srážky ihned k dispozici.
- Nelze ho srovnávat napříč regiony jako např. SPI

#### **4.5. Standardizovaný index vodních toků / Standardized streamflow index (SSI)**

Definován v roce v článku (Modarres, 2007), SSI zkoumá stav vody v tocích a umožňuje kvantifikovat, identifikovat a sledovat období sucha. Jeho nevýhodou je, že neuvažuje žádné jiné vlivy, které sucho ovlivňují. Zaveden je analogicky k SPI, tedy jako rozdíl průtoku v daném časovém intervalu od dlouhodobého průměru normalizovaný standardní odchylkou. Obvykle se počítá z denních nebo měsíčních průměrných průtoků.

Jakožto standardizovaný index, je možné jej použít pro porovnání různých toků v prostoru i čase, což demonstroval (Telesca et al., 2012). Protože je počítán zvlášť pro jednotlivé měsíce v roce, není zatížen ani sezónními změnami.

#### **4.6. Standardizovaný index hladiny podzemních vod / Standardized groundwater level index (SGWI)**

Index SGWI byl definován v (Bloomfield et al., 2015), jakožto standardizovaná veličina, analogická k SPI či SSI pro hladiny podzemních vod. Autoři nejprve zavedli GWI, který byl později přijmut odbornou komunitou jakožto další z indexů pro zkoumání sucha. Následně jej úspěšně použili pro definování šesti skupin zdrojů podzemních vod v závislosti na jejich charakteristikách v souvislosti se suchem.

## 5. Modelování sucha

Modelování je způsob práce s daty, který je v současné hydrologii velmi využíván a škála komplexity hydrologických modelů je velmi široká. V případech, kdy nejsou k dispozici dokonalá pozorování – například při absenci dostatečně dlouhé datové řady, zanesení chyby do měření zapříčiněné lidským faktorem či při nedostatečném monitoringu některých proměnných, je vhodné použití hydrologických modelů. Jejich pomocí lze zmíněným chybám do určité míry předejít, jejich aplikace může v získaných datech zaplnit mezery, datové řady předpovědi rozšířit a vyčistit časové řady tak, že výstup je čitelnější.

S problematikou hydrologického sucha přímo souvisí srážko-odtokové modely (Van Loon, 2015). Tyto modely obvykle dokáží dobře predikovat vývoj středních a silných proudů, ale většinu nedokáží spolehlivě odhadnout a předpovídat toky malé (Staudinger et al., 2011; Mashari Eshghabad et al., 2018). Simulování malých proudů je v tomto odvětví tedy aktuální výzvou a v posledních letech se na lepší zahrnutí tohoto fenoménu do již existujících modelů zaměřilo mnoho vědců (Perrin, Michel et Andréassian, 2003; Romanowicz, 2007).

Díličními výsledky byla drobná vylepšení simulací, avšak žádný přístup neposkytl dokonalou úpravu. Základní procesy šíření sucha jsou obsažené několika standardními typy modelů (např. syntetický model, konceptuální model povodí a soubor velkoplošných fyzikálně založených modelů). Avšak jak již bylo v této práci zmíněno, existuje mnoho dalších fundamentálních proměnných, které také mají na propagaci sucha vliv. Ty však všechny modelové přístupy neobsahují či je přesně nedokáží predikovat a výsledné předpovědi tak nejsou příliš určující. Obecně se předpovědi různých modelů vzájemně znatelně liší a výchozí předpověď tak může být kvalitnější spíše při zprůměrování výstupů několika modelů, než když jsou jejich výsledky analyzovány samostatně (Gudmundsson et al., 2012; Stahl et al., 2012; Tallaksen et Stahl, 2014).

Výstižnost předpovědi modelů determinují především tyto faktory – přesnost vstupních dat, přesnost jejich kalibrace a model samotný. Nepřesnost modelů se dá dále dělit na strukturální, parametrickou a numerickou. Většina studií zkoumajících tuto problematiku se zabývá spíše průměrnými a vysokými průtoky (McMillan et al., 2010). Proto není relativní důležitost či efekt těchto zdrojů chyb (nepřesností) při

malému proudu či přímo suchu zcela kvantifikována a lze to vnímat jako další prostor pro výzkum. Z těchto důvodů je předpověď hydrologického sucha mnohem problematictější než výpočet sucha meteorologického. To ovlivňuje nevyzpytatelnost srážek, ale jeho předpověď je kvůli jeho obecně kratší trvání jednodušší. Hydrologické sucho se objevuje spíše ve větších časových měřítcích a do předpovědi tak zasahuje více proměnných (Van Loon, 2015).

Aktuální změny klimatu představují ohrožení pro veškerý život na planetě. Pozzi et al., (2013) ve své práci zkoumají potřebu systému včasného varování před globálním suchem. Komplikací potřebnou pro realizaci tohoto systému je podle nich absence dostatečného množství sítí pro měření *in situ*, v mnoha regionech nedostatečná schopnost kvalitní sezónní předpovědi a chybějící vhodná infrastruktura pro převod dat do použitelného formátu. Zároveň je pro komplexní zachycení vývoje hydrologického sucha nutné monitorovat velké množství proměnných (a to nemusí být možné vždy).

Předpověď hydrologického sucha je esenciální pro vhodné nakládání s vodními zdroji. Nicméně přesto se velká část současného vývoje předpovědi sucha zaměřuje na sucho meteorologické (Heddeland et al., 2011). Z těch, které se takto věnovaly vývoji predikcí sucha hydrologického lze zmínit studie Zaidman et al., (2011) a Wong et al., (2013), kteří se pokoušeli modelem predikovat hydrologické sucho na základě indikátorů meteorologického sucha a statistických metod. Jiné studie se zabývaly sezónní předpovědí hydrologických proměnných či vysycháním řek na základě výstupu z kombinace několika klimatických a hydrologických predikčních modelů (Luo et Wood, 2008; Fundel, Jörg-Hess et Zappa, 2013). Jiný myšlenkový přístup využil korelace oceánsko-atmosférických režimů a indexů hydrologického sucha (Ryu et. al., 2010) (Kingston et al., 2013). Avšak výsledky Chiew et al., (1998) naznačují, že korelace dostatečná ke konzistentnímu přesnému určování toku není. Tato problematika tedy není dokonale kvantifikována a pro použití předpovědi sucha k následné koordinaci nakládání se zdroji je třeba další výzkum.

## 6. Diskuse

Výkyvy počasí jsou pozorovány na všech místech planety Země. Meteorologické stanice po celém světě denně zachycují obrovské množství dat, které pak používáme nejen k lepší predikci počasí. Pomocí zaznamenaných různorodých hodnot jsme schopni nahlédnout do minulosti a odhadnout dopad klimatických změn, které se promítají do nynějších dní. Nebo jsme nasbíraná data schopni přetransformovat a můžeme jimi předjímat budoucí dění nejen z pohledu meteorologie, ale i jiných široce zaměřených vědních oborů. Příkladem může být hydrologie a pedologie.

V dnešních dnech se velmi často setkáváme s mnoha přírodními riziky, která byla v minulosti vidána na jednom území často během několika desítek let. Konkrétněji lze hovořit o záplavách, zvýšené četnosti hurikánů, rozsáhlých lesních požárů nebo dramatickému nárustu sucha. Tato přírodní rizika mají dalekosáhlý vliv nejen na přírodu a na naši planetu obecně, ale tyto pro populaci nežádoucí vlivy ovlivňují stabilitu lidského bytí nejen po ekonomické, environmentální, sociologické stránce.

Domnívám se, že v dnešní konzumní společnosti lidské pokolení nejvíce vnímají ekonomické dopady, hned za nimi dle mého názoru stojí dopady sociální. Válečné konflikty vedoucí k migraci jednotlivých národů, celosvětová pandemie. V dnešní převrácené době se široká veřejnost nemá zájem zaobírat environmentálními dopady. Pro ty více erudované jednotlivce musí být nynější stav přírodních rizik o to více zřejmější.

V práci zmiňované a popisové sucho, je bráno jako přírodní riziko. Není možné ho žádným významným způsobem ovlivnit, protože člověk svou činností výrazně přispívá k prohloubení tohoto fenoménu. Jediné, co je možné, při ovlivňování sucha, je proces adaptace na stávající situaci. Když se sucho v daných lokalitách objeví pak je opravdu nemožné, jakkoliv zasáhnout. Vznikající problémy nastávající s dopady dlouhodobého sucha a jsou velmi často podníceny lidskou činností, nejčastěji špatným hospodařením s vodními zdroji nebo nevhodnými zásahy při regulaci vodních toků. V tomto případě chybí jasný ukazatel (breaking point), který by nám řekl kdy a jak jednat. I Indexy mají své limitace tudíž je potřeba se věnovat i modelování sucha a bodům zlomu.

Epizody sucha se na Zemi objevovaly vždy. V budoucnu budou epizody sucha nedílnou součástí. Z hlediska stávající situace je velice pravděpodobné, že bude docházet k růstu intenzity sucha nebo zvýšení jeho četnosti. Proto považuji za vhodné



věnovat pozornost výskytu a projevům sucha a hájit správná opatření proti jeho negativním důsledkům.

Nedílným výsledkem práce bylo stručné popsání a porovnání indikátorů a indexů hydrologického sucha. Pomocí Standardizovaného srážkového indexu (SPI), se řídí většina národních meteorologických služeb. Jeho výhodou je výsledek výpočtu normalizované hodnoty pro různé škály. Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI) je rozšířenější variantou indexu SPI. Palmerova indexu závažnosti sucha (PDSI) si ceníme zvláště díky jeho funkčnímu začlenění údajů o teplotách a o srážkách společně s vodní bilancí. V dlouhodobé kvantifikaci si sucha je nejúspěšnějším.

I Česká republika zažívá dopady sucha. Současná epizoda na území ČR není jen výsledkem špatného hospodaření, největším problémem se jeví podoba naší krajiny. To souvisí s výše zmíněnými nevhodnými zásahy při regulaci vodních toků. Samozřejmě největší podíl na trvání nebo vzniku nových such je měnící se klima.

Je zapotřebí nastavit opatření, která dokáží zabraňovat a zpomalovat odtok vody z krajiny. Nejdůležitějším opatřením shledávám schopnost zadržet vodu v krajině na dostatečně dlouhou dobu. Je potřeba se aktivně podílet na zvyšování retence vody v krajině. Při delším setrvání vody v krajině, dochází k zvyšování vsaku do největších rezervoárů vody. Zajištění delšího setrvání vody na jednom místě bezpochyby pomáhá k přirozené obnově podzemních zdrojů. Důležité je také zmínit, že propagace sucha do podzemních vod je poměrně pomalý proces.

Největší rezervoár pitné vody tvoří právě podzemní vody. Dále je potřeba, aby se lidstvo zaměřilo na svou nadměrnou spotřebu tohoto vyčerpatelného zdroje. Prosažit opatření, která dokáží snížit spotřebu vody, jsou klíčem k úspěchu. Když už započne plnění rezervoáru sucha, tehdy jsme svědky procesu aktivace sucha. Na případné sucho je potřeba připravovat se dopředu, k tomu slouží modelování sucha viz. kapitola Modelování sucha.

## 7. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat, rozčlenit a konkrétně jmenovat jednotlivé indexy a indikátory hydrologického sucha, shrnout termíny vymežující hydrologické sucho a přiblížit modelování sucha.

Práce na základě odborné literatury shrnula termíny a kritéria pro popis známých typů sucha, jejich definici a projevu. Dále představila nejdůležitější indexy a indikátory současně používané odbornou komunitou k identifikaci a hodnocení intenzity a dopadů sucha, z těch nejzásadnějších Standardizovaný index srážek (SPI), Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI), Standardizovaný index tání a srážek (SMRI) a Palmerův index závažnosti sucha (PDSI).

V neposlední řadě se práce věnuje úspěchům na poli snah o modelování především hydrologického sucha, ale neopomíjí úskalí používaných metod. Je přiblížena motivace pro takové modelování a představen přehled existující odborné literatury.

Sucho je fenomén, který vážným způsobem ohrožuje ekosystémy i lidskou společnost. V přírodě se vyskytuje přirozeně, ale spíše sporadicky, bohužel v důsledku klimatických změn způsobených člověkem a neustálému zvyšování nároků na přírodní zdroje se intenzity a frekvence výskytů sucha budou jen zvyšovat. To může v budoucnu vést i k zásadním nedostatkům pitné vody po celém světě. Proto je důležité suchu rozumět a umět s informacemi o jeho možném budoucím výskytu správně naložit. Právě studium řízení rizik spojených se znalostí o předpovědích sucha by mohlo úspěšně navázat na tuto práci.

## 8. Reference

### 8.1. Použitá literatura

1. Lloyd-Hughes, B., 2013: The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 1965., 117, 607–611.
2. Palmer, W. C.: *Meteorological drought* (Vol. 30). Washington, DC, USA, US Department of Commerce, Weather Bureau.
3. Sheffield, J. and Wood, E., 2011: *Drought; Past Problems and Future Scenarios*, Earthscan, London, UK, Washington DC, USA, 233 pp.
4. Tallaksen, L. M. and Van Lanen, H. A. J. (Eds.), 2004: *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater*, *Developments in water science*, 48, Elsevier Science B.V., Amsterdam, the Netherlands.
5. Wilhite, D. A., Glantz, M. H. 1985: Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10, 111–120.
6. Yevjevich, V. M., 1994: *Floods and society, Coping with Floods*, 3–9, Springer, the Netherlands.
7. Sheffield J, Wood EF. *Drought, 2011: Past Problems and Future Scenarios*. London and Washington DC: Earthscan.
8. BLINKA, P., 2005: Klimatologické hodnocení sucha a suchých období na území České republiky v letech 1876-2002. *Meteorologické zprávy - Meteorological bulletin*, ročník 58/1: 9 stran
9. BLINKA, P., 2002: Metoda hodnocení sucha. Online: <http://www.cbks.cz/sbornik02/Blinka.pdf>, cit. 20.09.2012. In ROŽNOVSKÝ, J.,
10. LITSCHMANN, T. (ed.), 2002: XIV. Česko-slovenská bioklimatologická konference, Lednice na Moravě 2.- 4. září 2002, 13 stran.
11. HLADNÝ, J., 2009: Druhy sucha. In Němec, J., Kopp, J. (Eds.): *Vodstvo a podnebí v České republice*. Ministerstvo zemědělství České republiky, Consult Praha, s. 66.
12. Sobíšek, B. a kolektiv, 1993: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. 1. vyd., Ministerstvo životního prostředí České republiky, Praha, s. ISBN 80-85368-45-5

13. Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed), 2004: Seminář „Extrémy počasí a podnebí“, Brno, 11. března 2004.: Klimatologické hodnocení sucha a období na území ČR v letech 1876 – 2003, ISBN 80-86690-12-1
14. Brázdil, R., Trnka, M., Řezníčková, L., Balek, J., Bartošová, L., Bičík, I., Cudlín, P., Čermák, P., Dobrovolný, P., Dubrovský, M., Farda, A., Hanel, M., Hladík, J., Hlavinka, P., Janský, B., Ježík, P., Klem, K., Kocum, J., Kolář, T., Kotyza, O., Kyncl, T., Krkoška Lorencová, E., Macků, J., Mikšovský, J., Možný, M., Muzikář, R., Novotný, I., Pártl, A., Pařil, P., Pokorný, R., Rybníček, M., Semerádová, D., Soukalová, E., Stachoň, Z., Štěpánek, P., Štych, P., Tremel, P., Urban, O., Vačkář, D., Valášek, H., Vizina, A., Vlnas, R., Vopravil, J., Zahradníček, P., Žalud, Z., 2015 : Sucho v Českých zemích: minulost, současnost, budoucnost. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, V.V.I., Brno: 396s. ISBN 978-80-87902-11-0.
15. Bednář, J., Černava, S., Flux, J., Frühbauer, J., Gottwald, A., Hodan, L., Jurčovič, P., Kakos, V., Kalvová, J., Koldovský, M., Kopáček, J., Krejčí, J., Krška, K., Munzar, J., Nedelka, M., Otruba, A., Panenka, I., Papež, A. sen., Pícha, J., Podhorský, D., Popolanský, F., Pretel, J., Pribiš, J., Rein, F., Setvák, M., Schoberová, E., Slabá, N., Sládek, I., Sobišek, B., Strachota, J., Štekl, J., Táborský, Z., Trefná, E., Trhlík, M., Vesecký, A., Zeman, M., Zikmunda, O., 1993 : Meteorologický slovník výkladový & terminologický. Ministerstvo životního prostředí České republiky, Praha,: 594s. ISBN 80-85368-45-5.
16. Brázdil, R., Trnka, M., Dobrovolný, P., Chromá, K., Hlavinka, P., Žalud, Z. 2009: Variability of droughts in the Czech Republic, 1881–2006. *Theoretical and Applied Climatology*, 97, 297–315.
17. VAŠKŮ, Z., 2001: *Čekají nás sucha?* Vesmír: přírodovědecký časopis Akademie věd České republiky, Praha, ročník 80/3, 3 strany.
18. Havlíček, V., Coufal, V., Špánik, F., Uhrecký, I., Klabzuba, J., Kurfürst, J., Prošek, P., Bureš, R., 1986: *Agrometeorologie*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha,: 264 s.
19. Wilhite, D. A. (ed.) 2005: *Drought and Water Crises: Science, Technology and Management Issues*. CRC Press, Boca Raton, FL

20. TREML, P., 2010: Nejvýznamnější *období sucha v letech 1956-2009 na území České republiky*. VTEI: Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, Praha, ročník 52/II: 9 stran.
21. Tallaksen LM, Van Lanen HAJ., 2004: Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. In: *Developments in Water Science*, vol. 48. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science B.V.
22. Wilhite DA, ed., 2000: *Drought: A Global Assessment*. Routledge Hazards and Disasters Series, vol. I & II. London: Routledge.
23. Seneviratne SI, Nicholls N, Easterling D, Goodess CM, Kanae S, Kossin J, Luo Y, Marengo J, McInnes K, Rahimi M, et al., 2012: *Changes in Climate Extremes and Their Impacts on the Natural Physical Environment. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press
24. Lloyd-Hughes B., 2014: The impracticality of a universal drought definition. *Theor Appl Climatol*, 117:607–611. doi:10.1007/s00704-013-1025-7.
25. Burke EJ, Brown SJ., 2008: Evaluating uncertainties in the projection of future drought. *J Hydrometeorol*, 9:292–299
26. Sheffield J, Wood EF, Roderick ML., 2012: Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491:435–438. doi:10.1038/nature11575.
27. Hayes M, Svoboda M, Wall N, Widhalm M, 2010: The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bull Am Meteorol Soc*, 92:485–488. doi:10.1175/2010BAMS3103.1.
28. NOVICKÝ, O., 2011: *Návrh koncepce řešení krizové situace vyvolané výskytem sucha a nedostatkem vody na území ČR*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha, 84 stran.
29. FUNDEL, F., S. JÖRG-HESS a M. ZAPPA, 2013. Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 17(1), 395-407 [cit. 2021-03-29]. ISSN 1607-7938. Dostupné z: doi:10.5194/hess-17-395-2013
30. GUDMUNDSSON, Lukas et al., 2012. Comparing Large-Scale Hydrological Model Simulations to Observed Runoff Percentiles in Europe. *Journal of Hydrometeorology* [online]. 13(2), 604-620 [cit. 2021-03-29]. ISSN 1525-755X. Dostupné z: doi:10.1175/JHM-D-11-083.1

31. HADDELAND, Ingjerd et al., 2011. Multimodel Estimate of the Global Terrestrial Water Balance: Setup and First Results. *Journal of Hydrometeorology* [online]. 12(5), 869-884 [cit. 2021-03-29]. ISSN 1525-755X. Dostupné z: doi:10.1175/2011JHM1324.1
32. HANNAFORD, J. et al., 2011. Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit. *Hydrological Processes* [online]. 25(7), 1146-1162 [cit. 2021-03-29]. ISSN 08856087. Dostupné z: doi:10.1002/hyp.7725
33. CHIEW, F.H.S. et al., 1998. El Nino/Southern Oscillation and Australian rainfall, streamflow and drought: Links and potential for forecasting. *Journal of Hydrology* [online]. 204(1-4), 138-149 [cit. 2021-03-29]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-1694(97)00121-2
34. KINGSTON, Daniel G. et al., 2013. Ocean–Atmosphere Forcing of Summer Streamflow Drought in Great Britain. *Journal of Hydrometeorology* [online]. 14(1), 331-344 [cit. 2021-03-29]. ISSN 1525-755X. Dostupné z: doi:10.1175/JHM-D-11-0100.1
35. LUO, Lifeng a Eric F. WOOD, 2008. Use of Bayesian Merging Techniques in a Multimodel Seasonal Hydrologic Ensemble Prediction System for the Eastern United States. *Journal of Hydrometeorology* [online]. 9(5), 866-884 [cit. 2021-03-29]. ISSN 1525-7541. Dostupné z: doi:10.1175/2008JHM980.1
36. MASHARI ESHGHABAD, Somayeh et al., 2018. Evaluating a Continuous Hydrological Model's Ability to Simulate Peak Flows with Short Time Step (Case Study: Zoshk Basin-Mashhad). *Journal of watershed management research* [online]. 8(16), 1-10 [cit. 2021-03-29]. ISSN 2251-6174. Dostupné z: doi:10.29252/jwmr.8.16.1
37. MCMILLAN, Hilary et al., 2010. Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrological Processes* [online]. n/a-n/a [cit. 2021-03-29]. ISSN 08856087. Dostupné z: doi:10.1002/hyp.7587
38. PERRIN, Charles, Claude MICHEL a Vazken ANDRÉASSIAN, 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* [online]. 279(1-4), 275-289 [cit. 2021-03-29]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7

39. ROMANOWICZ, Renata J., 2007. Data based mechanistic model for low flows: Implications for the effects of climate change. *Journal of Hydrology* [online]. 336(1-2), 74-83 [cit. 2021-03-29]. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2006.12.015
40. RYU, Jae H. et al., 2010. Potential extents for ENSO-driven hydrologic drought forecasts in the United States. *Climatic Change* [online]. 101(3-4), 575-597 [cit. 2021-03-29]. ISSN 0165-0009. Dostupné z: doi:10.1007/s10584-009-9705-0
41. STAHL, K. et al., 2012. Filling the white space on maps of European runoff trends: estimates from a multi-model ensemble. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 16(7), 2035-2047 [cit. 2021-03-29]. ISSN 1607-7938. Dostupné z: doi:10.5194/hess-16-2035-2012
42. STAUDINGER, M. et al., 2011. Comparison of hydrological model structures based on recession and low flow simulations. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 15(11), 3447-3459 [cit. 2021-03-29]. ISSN 1607-7938. Dostupné z: doi:10.5194/hess-15-3447-2011
43. TALLAKSEN, Lena M. a Kerstin STAHL, 2014. Spatial and temporal patterns of large-scale droughts in Europe: Model dispersion and performance. *Geophysical Research Letters* [online]. 41(2), 429-434 [cit. 2021-03-29]. ISSN 0094-8276. Dostupné z: doi:10.1002/2013GL058573
44. VAN LOON, Anne F., 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* [online]. 2(4), 359-392 [cit. 2021-03-29]. ISSN 20491948. Dostupné z: doi:10.1002/wat2.1085
45. Lloyd-Hughes B. The impracticality of a universal drought definition. *Theor Appl Climatol* 2014, 117:607–611. doi:10.1007/s00704-013-1025-7.
46. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION AND GLOBAL WATER PARTNERSHIP, 2016. Handbook of Drought Indicators and Indices: Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2 [online]. Ženeva [cit. 2021-03-29]. ISBN 978-91-87823-24-4. Dostupné z: [https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP\\_Handbook\\_of\\_Drought\\_Indicators\\_and\\_Indices\\_2016.pdf?fbclid=IwAR06nUAeGhp\\_cbp3wkRNT-fqSp0e\\_KRf\\_0C3oNa-OenUH2cNpUth8uQQKNQI](https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf?fbclid=IwAR06nUAeGhp_cbp3wkRNT-fqSp0e_KRf_0C3oNa-OenUH2cNpUth8uQQKNQI)

47. Djebbar A., Goose H., Klein F., 2020: Robustness of the link between precipitation in North Africa and Standard Modes of Atmospheric Variability during the last Millennium, ResearchGate/ Find and share reasearch [on-line]. Copyright 2020 [cit. 25.03.2021] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/341192742\\_Robustness\\_of\\_the\\_Link\\_Between\\_Precipitation\\_in\\_North\\_Africa\\_and\\_Standard\\_Modes\\_of\\_Atmospheric\\_Variability\\_During\\_the\\_Last\\_Millennium](https://www.researchgate.net/publication/341192742_Robustness_of_the_Link_Between_Precipitation_in_North_Africa_and_Standard_Modes_of_Atmospheric_Variability_During_the_Last_Millennium)
48. Dai A. Drought under global warming: a review. *WIREs Clim Change* 2011, 2:45–65. doi:10.1002/wcc.81.
49. Masupha et al., 2018: Analysis of potential future droughts limiting maize production, in the Luvuvhu River catchment area, South Africa, ResearchGate/ Find and share reasearch [on-line]. Copyright 2020 [cit. 25.03.2021] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/324009822\\_Analysis\\_of\\_potential\\_future\\_droughts\\_limiting\\_maize\\_production\\_in\\_the\\_Luvuvhu\\_River\\_catchment\\_area\\_South\\_Africa](https://www.researchgate.net/publication/324009822_Analysis_of_potential_future_droughts_limiting_maize_production_in_the_Luvuvhu_River_catchment_area_South_Africa)
50. Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J Clim* 2009, 23:1696–1718. doi:10.1175/2009JCLI2909.1
51. Staudinger M, Stahl K, Seibert J. A drought index accounting for snow. *Water Resour Res* 2014, 5:7861–7872. doi:10.1002/2013WR015143
52. Bergström, S., J. Harlin, and G. Lindström (1992), Spillway design floods in Sweden: I. New guidelines, *Hydrol. Sci. J.*, **37**(5), 505– 519.
53. BLOOMFIELD, J. P. et al., 2015. Regional analysis of groundwater droughts using hydrograph classification. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. 19(10), 4327-4344 [cit. 2021-03-30]. ISSN 1607-7938. Dostupné z: doi:10.5194/hess-19-4327-2015.
54. MODARRES, Reza, 2007. Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* [online]. 21(3), 223-233 [cit. 2021-03-30]. ISSN 1436-3240. Dostupné z: doi:10.5194/hess-19-4327-2015
55. TELESKA, Luciano et al., 2012. Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index



- (SSI) time series in the Ebro basin (Spain). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 391(4), 1662-1678 [cit. 2021-03-30]. ISSN 03784371. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437111008211>.
56. HONSOVÁ, Dagmar, 2008. Vlhkost půdy a metody jejího měření. *PŘÍRODA.cz* [online]. Vrchlabí [cit. 2021-03-30]. ISSN 1801-2787. Dostupné z: <https://www.priroda.cz/clanky.php?detail=1101>.
57. KOHUT, Mojmír, Jaroslav ROŽNOVSKÝ a Filip CHUCHA, 2008. VLÁHOVÁ BILANCE ZEMĚDĚLSKÉ KRAJINY [online]. Brno: Česká bioklimatologická společnost, 2008 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <http://cbks.cz/sbornik08b/Kohut.pdf> KREŠL, J., 2001. *Hydrologie: Skriptum*. MZLU, Brno: Ústav vědecko-pedagogických informací a služeb.
58. SOMMER, Miroslav, 1985. *Hydrologie*. 3. přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. PENKA, Miroslav, 1985. *Transpirace a spotřeba vody rostlinami*. Praha: Académia
59. JIŘÍK, Miloš, 2001. Základní meteorologické pojmy. Amatérská meteorologická stanice [online]. Nová Paka: OK5AW [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://pocasi.ok5aw.cz/teorie.php>
60. KREŠL, J., 2001. *Hydrologie: Skriptum*. MZLU, Brno: Ústav vědecko-pedagogických informací a služeb.
61. KRÁLOVÁ, Magda, 2004. *ATMOSFÉRICKÉ SRÁŽKY*. Techmania Science Center: Eduportál [online]. Plzeň [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/atmosfericke-srazky>
62. PENKA, M., 1985. *Transpirace a spotřeba vody rostlinami*. Praha: Academia, 250 s.
63. RUDA, Aleš, 2014. Meteorologické prvky a jejich klimatologické charakteristiky. *Klimatologie a hydrografie pro učitele* [online]. Brno: Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz\\_geogr/web/pages/03-prvky.html#voda](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/03-prvky.html#voda)
64. NETOPIL, R. et al., 1984. *Fyzická geografie*, 1. vydání. Praha: SPN, 272 s.
65. Palmer W. C., 1965: *Meteorological drought*. Research Paper 45. U. S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington D. C. 58.

66. Alley M. W., 1984: *The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions*. Journal Of Climate and Applied Meteorology, 23. 1100 - 1109.

## 8.2. Webové zdroje

1. Meteorologický slovník – výklad pojmů - S. Meteorologický slovník [online]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/vyklad/cs/s>
2. Portál ČHMÚ : Aktuální situace : Monitoring sucha. Portál ČHMÚ : Home [online]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/sucho#>
3. Portál ČHMÚ : Aktuální situace : Monitoring sucha. Portál ČHMÚ : Home [online]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/sucho#SUCHO>. Portál ČHMÚ : Home [online]. Dostupné z: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/SUCHO/Definice\\_sucha.html](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/SUCHO/Definice_sucha.html)
4. Robustness of the Link Between Precipitation in North Africa and Standard Modes of Atmospheric Variability During the Last Millennium., ResearchGate/ Find and share research [on-line]. Copyright 2020 [cit. 25.03.2021] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/341192742\\_Robustness\\_of\\_the\\_Link\\_Between\\_Precipitation\\_in\\_North\\_Africa\\_and\\_Standard\\_Modes\\_of\\_Atmospheric\\_Variability\\_During\\_the\\_Last\\_Millennium](https://www.researchgate.net/publication/341192742_Robustness_of_the_Link_Between_Precipitation_in_North_Africa_and_Standard_Modes_of_Atmospheric_Variability_During_the_Last_Millennium)
5. SUCHO. Portál ČHMÚ : Home [online]. Dostupné z: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/SUCHO/Definice\\_sucha.html](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/SUCHO/Definice_sucha.html)
6. Ministerstvo životního prostředí, 2008. Podzemní vody. Ministerstvo životního prostředí [online]. Praha [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/podzemni\\_vody](https://www.mzp.cz/cz/podzemni_vody)
7. Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 431/2001 Sb., o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci. In: Sbírka zákonů. 13.12. 2001. ISSN 1211-1244. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-431>
8. ČHMÚ, CZECHGLOBE et MENDELU, 2014. Hodnocení velikosti sucha. PORTÁL MONITORING SUCHA: Rychlý přístup k informacím o aktuálním stavu výskytu sucha a jeho dopadů. [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <http://stavsucha.cz/about-indicators/>