

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování



Hydrologické sucho a jeho monitorování

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Tereza Vrbová

Bakalant: Helena Kavková

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Helena Kavková

Územní technická a správní služba

Název práce

Hydrologické sucho a jeho monitorování

Název anglicky

Hydrological drought and its monitoring

Cíle práce

Cílem práce je sepsání literární rešerše o hydrologickém suchu a jeho monitorování v České republice a v zahraničí.

Metodika

1. Vysvětlete pojem sucho a s ōm související hydrologické sucho
2. Popište vybrané metody stanovení hydrologického sucha
3. Porovnejte monitorování hydrologického sucha v České republice a v zahraničí
4. Popište konkrétní situaci spojenou s hydrologickým suchem v České republice

Doporučený rozsah práce

Standardní bakalářská práce cca 40stran

Klíčová slova

nízké průtoky, podzemní voda, základní odtok, hydrologické modely

Doporučené zdroje informací

- DINGMAN, S L. *Physical hydrology*. Long Grove, Ill.: Waveland, 2008. ISBN 978-1-57766-561-8.
- Duan K., Mei Y., 2014: Comparison of Meteorological, Hydrological and Agricultural Drought Responses to Climate Change and Uncertainty Assessment. *Water Resources Management*, pp. 5039-5054. DOI: 10.1007/s11269-014-0789-6.
- Hamel P., Fletcher T. D., 2014: Modelling the impact of stormwater source control infiltration techniques on catchment baseflow. *Hydrological Processes*, pp. 5817–5831. DOI: 10.1002/hyp.10069.
- Trambauer P., Maskey S., Winsemius H., Werner M., Uhlenbrook S., 2013: A review of continental scale hydrological models and their suitability for drought forecasting in (sub-Saharan) Africa. *Physics and Chemistry of Earth, Parts A/B/C*, pp. 16-26. DOI:10.1016/j.pce.2013.07.003.
- Van Loon, A. F., 2015: Hydrological drought explained. *WILEY INTERDISCIPLINARY REVIEWS-WATER* 2 (4), pp. 359-392. DOI: 10.1002/wat2.1085.
-

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Tereza Vrbová

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 7. 9. 2016

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 10. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 03. 02. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Terezy Vrbové a že jsem uvedla všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze 25. 4. 2017

.....

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucí této bakalářské práce Ing. Tereze Vrbové za ochotnou spolupráci, užitečné připomínky a doporučení zdrojů při vypracování bakalářské práce.

V Praze 25. 4. 2017

.....

Abstrakt

Sucho je jedním z extrémních projevů klimatu, které jsou ovlivněny jednak přirozenými procesy v atmosféře tak i antropogenní činností. Předmětem této práce je popsat sucho jako takové, vysvětlit a shrnout současné poznatky o problematice sucha a s tím související hydrologické sucho. Dále uvést metody monitorování a vyhodnocování hydrologického sucha v zahraničí a v České republice. Věnování se problematice hydrologického sucha, snaha o komplexní rozvoj a vhodné metody stanovení výsledků pro jednotlivá území ve směru této problematiky je velice důležitým nástrojem hlavně z hlediska hospodaření s vodou a zmírnění negativních dopadů sucha. Závěrečná část práce je zaměřena na popis konkrétní situace v České republice spojená s projevy hydrologického sucha, která se týká roku 2015.

Klíčová slova:

- hydrologické sucho, podzemní voda, základní odtok, hydrologické modely, minimální průtoky

Abstract

Drought is one of the extreme climate show, which is affected by natural processes in the atmosphere and human activities. The subject of this thesis is to describe such as drought, explain and summarize the current knowledge about the problems of drought and associated with hydrological drought. Further indicating the methods of monitoring and evaluation of hydrological drought abroad and in the Czech Republic. Dedicate the issue of hydrological drought, efforts to develop a complex development and appropriate determination results for each area in the course of this issue is a very important tool especially in terms of water management and mitigating the negative impacts of drought. The final part is focused on describing the specific situation in the Czech Republic associated with show of hydrological drought, which refer the year 2015.

Key words:

- hydrological drought, groundwater, basic outflow, hydrological models, minimal flow

Obsah

1. ÚVOD	11
2. CÍLE PRÁCE	13
3. METODIKA	14
4. SUCHO	15
4.1 Typy sucha	16
4.1.1 Klimatické sucho.....	17
4.1.2 Hydrologické sucho	18
4.1.3 Půdní sucho	18
4.1.4 Zemědělské sucho	19
4.1.5 Socioekonomické sucho.....	19
4.2 Dopady sucha	19
4.3 Hydrologický cyklus, vodní bilance a složky odtoku	20
4.3.1 Hydrologický cyklus	20
4.3.2 Vodní bilance	22
4.3.3 Hydrologická bilance a odtokový proces v povodí.....	23
4.3.4 Minimální průtoky	24
4.4 Výskyt sucha	25
5. METODY STANOVENÍ SUCHA	27
5.1 Indexy sucha.....	28
5.1.1 Standardized Precipitation Index (SPI).....	30
5.1.2 Palmer Drought Severity Index (PDSI)	30
5.1.3 Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI)	31
5.1.4 Baseflow index (BFI).....	31
5.2 Metoda dálkové detekce	32
6. MONITOROVÁNÍ SUCHA V ZAHRANIČÍ.....	33
6.1 Predikce hydrologického sucha.....	33

6.1.1	Hydrologické modely.....	34
6.1.2	Monitorovací systémy.....	34
6.2	Sledování ve světě.....	35
6.2.1	Systémy včasného varování.....	36
6.2.2	Monitorování podzemní vody v přímořských oblastech.....	37
6.2.3	Monitorování v Indonésii.....	38
6.2.4	Monitorování v Německu.....	39
6.2.5	Příklady monitorování v dalších státech.....	39
7.	MONITOROVÁNÍ SUCHA V ČESKÉ REPUBLICE.....	41
7.1	Výskyt a ohroženost suchem v ČR.....	41
7.1.1	Předpověď sucha.....	42
7.1.2	Problematika podzemní vody.....	43
7.1.3	Integrovaný systém sledování sucha (ISSS).....	45
7.2	Hydrologická sucha v historii.....	46
7.2.1	Největší sucha zaznamenaná v ČR v letech 1875-2010.....	47
7.3	Konkrétní případ sucha, rok 2015.....	48
7.3.1	Spojitosť hydrologického sucha se zemědělstvím.....	51
7.3.2	Opatření proti suchu.....	51
8.	DISKUSE.....	54
9.	ZÁVĚR.....	55
10.	PŘEHLED LITERATURY A ZDROJŮ.....	56

Seznam použitých zkratk:

ADI	Aggregate Dryness Index
BFI	Baseflow index
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
EP	Efektivní srážka
GDEWS	Global Drought Early Warning System
GDM	German Drought Monitor
GRI	Groundwater Resource Index
ISSS	Integrovaný systém sledování sucha
MSVT	Meteorologický slovník výkladový a terminologický
NDMC	National Drought Mitigation Center
NDVI	Normalizovaný diferenční vegetační index
PDSI	Palmer Drought Severity Index
SDI	Streamflow Drought Index
SMRI	Standardized Snowmelt and Rain Index
SPEI	Standardizovaný Srážkový Evapotranspirační Index
SPI	Standardized Precipitation Index
SRI	Standardized Runoff Index
SSFI	Standardized Streamflow Index
SWSI	Surface Water Supply Index
VÚV TGM	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka
WMO	World Meteorological Organization

1. ÚVOD

Na naší planetě proti sobě stojí dva extrémy související s hydrologickým režimem. Jedním z nich jsou povodně a tím druhým je sucho. Oba dva jevy jsou pravým opakem, jsou nahodilé a jen stěží se dají předvídat. Jsou to přírodní překážky, které nejsou omezeny pouze na některé oblasti, ale vyskytují se po celém světě a mají vliv na vysoký počet lidí. Se suchem i povodněmi se lidé potýkají od začátku své existence, projevovalo se snížením zemědělské produkce a v dalších hospodářských činnostech, nedostatkem pitné vody a v extrémních případech vedlo až k hladomoru (Pozzi et al., 2013).

V poslední době se jeho výskyt stal mnohem větším problémem po celém světě, za který může změna klimatu a ke které přispívá svou činností i člověk. Sucho má vliv na všechny živé organismy na Zemi a je projevem změny klimatu a následně celého vodního koloběhu na naší planetě. Globální oteplování může vést ke zvýšenému výparu z povrchu či změně ve srážkovém režimu, což má za následek nižší průtoky ve vodních tocích. Sucho je přírodní riziko, kterému se dá stěží zabránit natož ho ovlivňovat. Škody vzniklé následkem sucha působí na celá společenstva a následně se s ním potýká i člověk. Sucho může probíhat během určitého období, ale následky pro společnost mohou přetrvávat následně po několik let a liší se oblast od oblasti (Wilhite et Glantz, 1985).

Příčinami vzniku sucha jsou přirozené procesy v atmosféře a zásahy člověka do krajiny. Lidé svou činností zasahují do přirozeného oběhu vody na Zemi a to zejména změnou koryta řek, jejich napřimování, vysoušením mokřadů, odvodněním zemědělských pozemků a jinými činnostmi. V posledních několika letech si lidé svou chybu uvědomili a začali navracet, co způsobili. Místo odvodnění pozemků se snaží o závlahy, navracejí koryta řek do svých přirozených stavů a další (Punčochář et al., 2015).

V našich zeměpisných podmínkách se sucho projevuje zejména v souvislosti se zásobou podzemních vod. Problematika nedostatku vod ve studních, které se nestačí doplňovat ani při delším období výskytu srážek je stále diskutovanější. V posledních deseti letech se začal objevovat v odborných publikacích pojem hydrologické sucho, který souvisí s hydrologickým režimem krajiny i s klimatickými změnami. Hydrologické sucho je celek s mnoha faktory dopadajícími na ekosystémy

a společnost. Celkové objasnění tohoto jevu je pro vědce výzvou a jeho zkoumání v různých vědních oborech může přispět k jeho pochopení a tím zajistit do budoucnosti zmírnění či dokonce zabránění tohoto jevu (Van Loon, 2015).

2. CÍLE PRÁCE

Cílem práce rešeršního charakteru je na základě sucha vysvětlit problematiku hydrologického sucha a procesy s ním související. Popsat některé vybrané možnosti a metody jeho monitorování. Dále pak zmínit konkrétní případy monitorování hydrologického sucha v zahraničí a v České republice. Nakonec popsat konkrétní případ týkající se hydrologického sucha.

3. METODIKA

Literární rešerše je zpracována pomocí českých i zahraničních zdrojů zahrnujících odbornou literaturu. Z českých zdrojů bylo využito zejména sborníků a zápisů z odborných seminářů týkajících se dané problematiky a z literárních zdrojů Městské knihovny v Praze. Ze zahraničních zdrojů bylo čerpáno především z databáze Web Of Knowledge a Scopus z řady nejrůznějších článků, dále pak například z webových stránek Světové meteorologické organizace.

Nejprve je vysvětleno, co to vlastně sucho je a jak je možné tento jev vymezit. Poté jsou vyjmenovány typy sucha, které se vyskytují po celém světě a jejich souvislost. Dále byly popsány metody, jakými se hydrologické sucho stanovuje a přiblížen výskyt sucha a jeho možné projevy v budoucnosti. V další části je popsáno monitorování sucha v zahraničí a v České republice. Jsou zmíněny nejvýznamnější historické události spojené s výskytem sucha a poslední část byla věnována konkrétní situaci a to roku 2015, jako nedávným významným problémem se suchem.

4. SUCHO

Zcela obecná a všeobecně přijímaná definice sucha neexistuje. Nejjednodušším vymezením pojmu sucho je říci že „Sucho je nedostatek vody“. Je to velmi široké a mnoha způsoby vyložitelná definice (Blinka, 2002). Nebo můžeme říci „Sucho je deficit vody ve srovnání s normálními podmínkami“ (Sheffield et Wood, 2012). Při této definici mohou vyvstat otázky jako například: jaké jsou normální podmínky? Jak dlouhý musí být tento deficit, aby byl považován za sucho? Vztahuje se pouze na přírodní podmínky nebo zde hraje roli i člověk (Van Loon, 2015)?

Sucho je deficit, který nastává, když půdní vlhkost nestačí pokrýt požadavky půdní potenciální evapotranspirace (celkový výpar). Ve světě můžeme rozlišit tři skupiny such: a) stálé sucho spojené s aridními podnebími; b) sezónní sucho, které se vyskytuje v podobě zřetelných každoročních období suchého počasí; c) sucho způsobené proměnlivostí srážek. (Critchfield, 1983)

Sucho je déletrvající období s podnormální dostupností vody a jedná se o opakující se celosvětový jev s prostorovými a časovými vlastnostmi, které se podstatně liší oblast od oblasti. (Tallaksen et Van Lanen, 2004)

Další specifikace pojmu sucho je uvedena v Meteorologickém slovníku výkladovém a terminologickém (MSVT, 1993) a zní: „Sucho - velmi neurčitý, avšak v meteorologii často užívaný pojem, znamenající v zásadě nedostatek vody v půdě, rostlinách nebo i v atmosféře“.

Jeho specifikování je obtížné, jelikož je ovlivňováno mnoha faktory a to zejména meteorologickými, hydrologickými, zemědělskými, pedologickými, bioklimatologickými a mnoha dalšími. Definice sucha nejde proto přímo vymežit. Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) dle příčin vzniku a jeho dopadů sucho člení na základní tři typy a to klimatické, půdní a hydrologické. (ČHMÚ, 2017)

Sucho je projevem klimatu a projevuje se nejen ve vodním hospodářství a v zemědělství ale ovlivňuje celý koloběh vody na Zemi, působí na organismy a v neposlední řadě i na člověka. Vyjadřujeme ho pomocí klimatologických indexů. (Rožnovský et al., 2012)

Sucho je z velké většiny případů nahodilý jev vyskytující se nepravidelně s délkou trvání několika dnů až měsíců. Je doprovázeno vyššími teplotami vzduchu, nižší

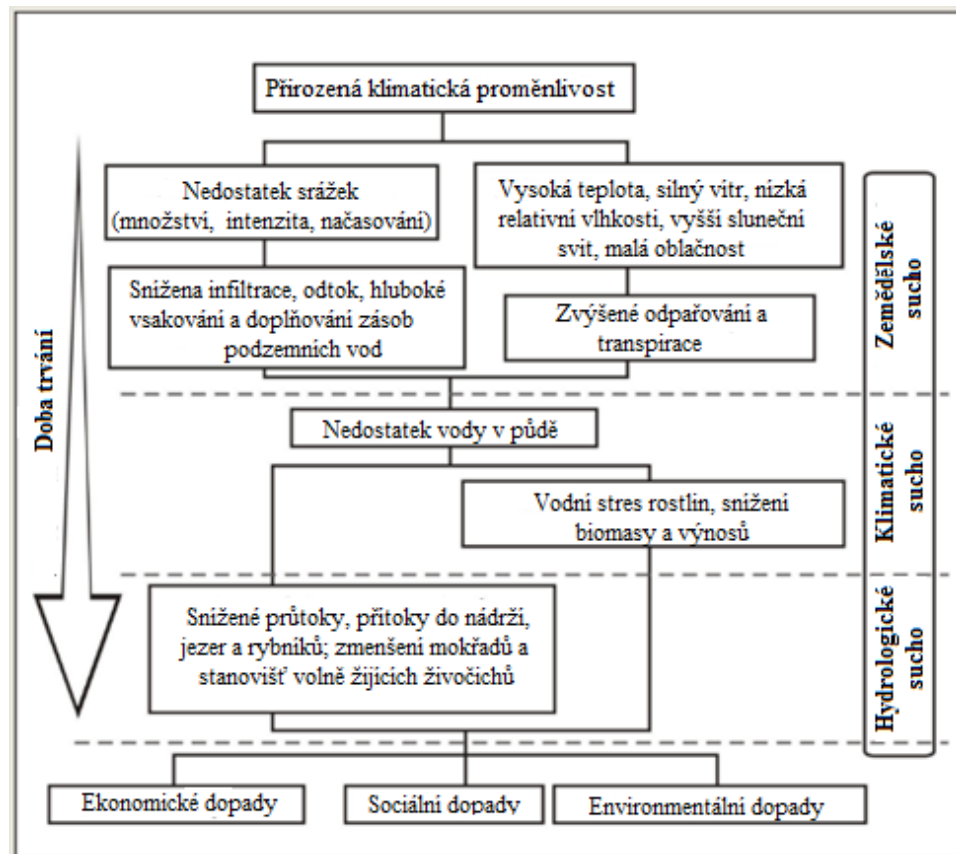
relativní vlhkostí vzduchu, nižší oblačností s větším počtem hodin slunečního svitu. To vede k vyššímu výparu, čili evapotranspiraci, což je celkový výpar z určitého území. Tento výpar má část fyzikální i fyziologickou (výdej vody vegetací) a tím dochází k rostoucímu nedostatku vody. (ČHMÚ, 2017)

Dle Thornthwaiteovy klasifikace podnebí (1947) se rozlišují tři základní typy sucha a to: stálé sucho nejsušších klimatických pásem, sezónní sucho některých klimatických pásem a v oblastech monzunového podnebí a za třetí sucho nahodilé v důsledku nepravidelných a proměnlivých četností a intenzit výskytu srážek. Sucho nahodilé může trvat několik týdnů, měsíců i let. Je nebezpečné svým nepředvídatelným výskytem. Ve střední Evropě se to děje především kvůli výskytu blokujících anticyklón (tlakových výší) působící pro srážky jako překážka v pohybu, příčiny výskytu těchto jevů nejsou doposud známy (Rožnovský et al., 2012).

Základní parametry pro popsání samotného sucha jsou začátek, délka jeho trvání a konec, intenzita společně s účinky a dopady. V klimatických podmínkách České republiky máme čtyři základní typy sucha a to jsou: klimatické (meteorologické), zemědělské, hydrologické a socioekonomické. (Sobíšek et al., 1993)

4.1 Typy sucha

Sucho se podle svého projevu dělí na několik základních typů. Dle MSVT (1993), je sucho rozděleno na atmosférické, meteorologické, klimatologické, fyziologické, agronomické, hydrologické a nahodilé. V různých publikacích můžeme nalézt několik různých typů sucha a jeho kategorizace. Všechny kategorie sucha se navzájem prolínají (obr. 1) a jejich příčinou je nedostatek srážek (meteorologické sucho), který má za následek nedostatek vody. Může se shodovat s obdobím s vysokou teplotou, nízkou vlhkostí vzduchu nebo s vysokou rychlostí větru oproti dlouhodobému normálu. Níže jsou podrobněji popsány základní z nich. (Sobíšek et al., 1993; Wilhite et Glantz, 1985)



Obrázek 1: Prolínání sucha v čase

4.1.1 Klimatické sucho

Klimatické sucho bývá prvotní příčinou vzniku všech typů sucha. Jeho projevem je nedostatek atmosférických srážek. Další typy sucha se tedy mohou objevit s menším či větším odstupem času. Je definováno na určitém území jako porovnání srážkových poměrů období aktuálního ku období dlouhodobému (s dlouhodobým průměrem) za časové období. Tento poměr je nutno porovnávat v časovém rozložení srážek v daném období. Hraje zde roli množství a intenzita spadlých srážek a porovnání s dlouhodobým průměrem pro danou lokalitu a roční období. Meteorologické prvky jako je výpar, teplota vzduchu, rychlost větru, vlhkost vzduchu, sluneční svit atd. mohou klimatické sucho zmírnit či prohloubit. Základem pro stanovení velikosti klimatického sucha je tedy porovnání hodnot meteorologických prvků v určitém časovém úseku s dlouhodobým průměrem v období v dané oblasti. (ČHMÚ, 2017)

4.1.2 Hydrologické sucho

Nejsnazším pojetím hydrologického sucha je celkový nedostatek srážek a s tím spojený problém nedostatku zdrojů s vodou podzemní ale i povrchovou. Projevuje se úbytkem vodních zásob v řekách, změnou hladiny ve vodních nádržích i podzemních vod. Průtoky jsou vzhledem k dlouhodobým průměrům měsíčním či ročním relativně nízké. Může se projevit s odstupem většího časového horizontu po odeznění sucha klimatického a to poklesem hladin v přehradních nádržích, průtocích ve vodních tocích a úrovní hladin vod podzemních. Projev hydrologického sucha předznamenává očekávání velkých škod způsobené suchem. Je to přírodní fenomén, který je ovlivňován i lidskou činností v rámci celého povodí. (Wilhite, 2010)

Hydrologické sucho se dále dá rozdělit dle příčin vzájemného působení teploty a srážek v povodí v různých ročních obdobích na:

- Sucho způsobené deficitem srážek v kapalném stavu
- Sucho v období smíšených srážek
- Sucho přechodného období, přičemž se střídají vlhká a suchá období (v ČR se nevyskytuje)
- Sucho v období zmrzlého sněhu
- Sucho v období tání
- Smíšené sucho

(Vlnas et al., 2015)

4.1.3 Půdní sucho

Půdní sucho lze definovat jako nedostatek vody v kořenové vrstvě půdního profilu, který má za příčinu poruchy vodního režimu zemědělských i volně rostoucích rostlin. Působí na jednotlivé druhy rostlin odlišně a závisí na náročnosti rostliny na vodu a na fázi vývoje rostliny. Půdní vlhkost je nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím vývoj rostlin a je závislá na mnoha faktorech jako je výpar, rozložení srážek atd. Jak je již zmiňováno výše, předchází půdnímu suchu sucho klimatické, které způsobuje nedostatek vody ve svrchních částech půdního horizontu. Vlhkost půdy se v České republice měří ve stanicích a doplňuje se modelovými hodnotami. (ČHMÚ, 2017; Heim, 2002)

4.1.4 Zemědělské sucho

Je vlastně sucho půdní v zemědělské praxi. Způsobuje ho nedostatek vody v povrchové vrstvě půdy, která je nezbytná pro růst a vývoj plodin. Je ovlivňováno hlavně technickými a biologickými faktory jako je využití technologie zpracování půdy, odolnost vysetých rostlin a náročnost na vláhu. Zemědělství je zároveň prvním ekonomickým sektorem, kde se projevuje sucho. (Heim, 2002)

4.1.5 Socioekonomické sucho

Sucho socioekonomické můžeme jednoduše shrnout jako nedostatek užitkové a pitné vody potřebné pro obyvatele, zemědělství a průmysl a to souvisí s uspokojováním lidských potřeb. Socioekonomické sucho dělá problém hlavně v chudých zemích, kde dochází k degradaci půdy, což znamená ztrátu její úrodnosti, snížení ekologických funkcí a využitelnosti. K degradaci dochází při špatném hospodaření s půdou, nadměrné pastvě a odlesnění krajiny. (Trnka, 2010)

4.2 Dopady sucha

Výskyt sucha má dopady negativní, dopady s ním spojené se projevují nejčastěji v horizontu tří měsíců i déle, záleží na počátku vzniku nedostatku srážek. Potýkají se s ním oblasti v různých částech světa a může se vyskytnout prakticky kdekoli. Sucho dělá problémy v oblastech chudých i rozvinutých. Hlavními problémy jsou nedostatek vody podzemní i povrchové, pokles průtoků, snížení kvality vody a s ní spojená eutrofizace stojatých vod. V oblasti zemědělství jsou to nízké výnosy a tím možný nedostatek plodin, eroze půdy, zhoršení fyzikálně chemických vlastností půdy. Problém s energetickým využitím vody a jiné. Ke zmírnění dopadů sucha bude třeba mnoho výzkumů a opatření, hlavně jeho včasná identifikace. (Duan et Mei, 2014; Trnka, 2010)

Dopady sucha lze rozdělit do tří skupin a to ekonomické, environmentální a sociální. Mezi ekonomickými dopady je nejdůležitější zmínit ztrátu výnosů a to je důsledkem přímým. Pro zemědělce znamená ztrátu příjmů z důvodu malé úrody či dokonce úroda může být znehodnocena nebo nemusí být žádná. Tento jev spolu nese další s ním spojené finanční problémy. V další řadě je nutno zmínit dopady na lesnictví a rybářství, přičemž lesy mají své místo pro své vodoochranné funkce. Lesy zadržují vodu a zamezují jejímu odtoku po povrchu. Voda se vsakuje

do půdy a je zadržována, to je důležité hlavně při povodňových srážkách, protože neodtéká naráz a nepřispívá tak ke zvyšování stavů vody v tocích. Svým stinným prostředím zabraňují vysychání půdy, která je vystavena slunečnímu záření až dvojnásobně oproti zemědělské půdě. Další ekonomické dopady se projevují v průmyslu, energetice a v neposlední řadě ve službách. (Brázdil et al., 2015)

Environmentální dopady jsou velkým problémem z hlediska biodiverzity neboli biologické rozmanitosti organismů. Přímo ovlivňují stanoviště a přirozený výskyt jednotlivých druhů, které se stěží nebo dokonce vůbec nedokážou přizpůsobovat výskytu sucha. Sucho má vliv na kvalitu vody a na její znečištění, stejně jako snížený obsah rozpuštěného kyslíku, zvýšenou teplotu a nárůst vodních řas. Je příčinou degradace půdy, eroze a požárů. Na všech environmentálních dopadech se spolupodílí člověk svou činností. (Trnka, 2010)

Antropogenní zásahy do krajiny a jejího vodního režimu jsou znatelné. Prvním významným zásahem je napřimování vodních toků, opevňování a změna přirozeného koryta vodních toků z různých důvodů. Vysoušení a odvodnění nejen zemědělských pozemků, vysoušení mokřadů aj. Dochází k vysoušení krajiny a ztrátě jejich retenčních vlastností, klesá hladina podzemní vody. (Punčochář et al., 2015)

Největší ničivé následky má sucho v rozvojových státech, protože tam nejsou tak rozvinuty monitorovací systémy pro jeho sledování nebo zde zcela chybí (Wilhite, 2010). Voda je neustále v pohybu v rámci hydrologického cyklu a pro život na Zemi je nezbytná.

4.3 Hydrologický cyklus, vodní bilance a složky odtoku

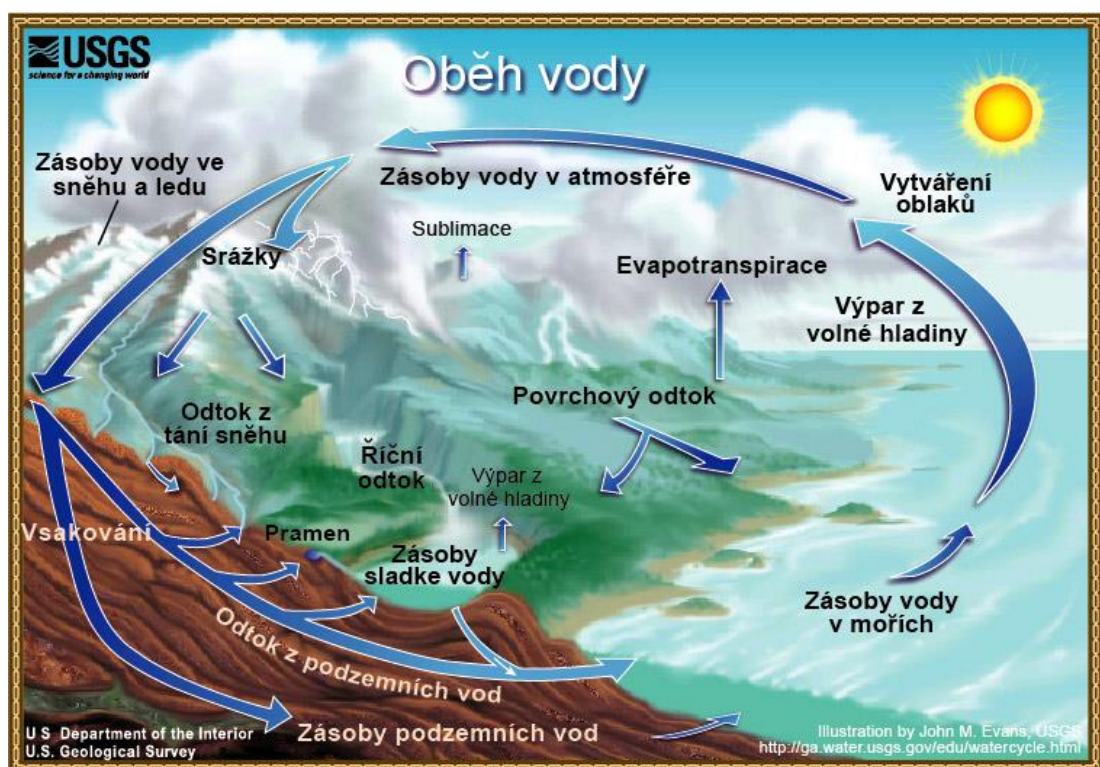
4.3.1 Hydrologický cyklus

Hydrologický cyklus je koloběh vody na Zemi. Je to jev přirozený, při kterém dochází k cirkulaci vody na Zemi (obr. 2), způsobené sluneční energií a zemskou gravitací. Nejvíce vody se nachází v mořích a oceánech jako voda slaná. Sladká voda na pevninách je ve vodních tocích, jezerech, nádržích, ledovcích, sněhové pokrývce, v půdě jako půdní vlhkost a v horninách jako tvořící vodu podzemní. (Trizna, 2004)

Voda je stále v pohybu, mění se její skupenství a vyskytuje se tak v podobě kapalné, plynné či pevné. Voda se vypařuje do atmosféry pomocí slunečního záření, vodní pára je unášena vzdušnými proudy nad kontinenty a postupně se akumuluje

do oblak, kde se voda sráží a následně dopadá na zemský povrch zpět ve formě srážek dešťových či sněhových. Srážky se vsakují do půdy a tvoří podpovrchovou a podzemní vodu nebo vytváří povrchový odtok a dostávají se do řek a oceánů. To tvoří tzv. velký koloběh vody (cyklus v globálním měřítku). Malý koloběh vody (cyklus v lokálním měřítku) nezahrnuje povrchový odtok vypařené vody z oceánu nebo naopak vypařující se voda ze zemského povrchu je unášena nad oceán či pevninu. (Synáčková, 2014)

Voda vsakující se do půdy vytváří zásoby podzemní sladké vody a napájí řeky a jezera v době sucha. Tento jev je velice důležitý protože představuje spolehlivý zdroj vody. Mělká podzemní voda je využívána rostlinami a následně se listy vypařuje do atmosféry. Koloběh je závislý právě na srážkách, které se v jednotlivých částech světa odlišují jak výskytem, tak intenzitou. (Dingman, 2008; Trizna, 2004)



Obrázek 2: Hydrologický cyklus na Zemi

4.3.2 Vodní bilance

Dle zákona o vodách je vodní bilance jednou z hlavních činností pro zjišťování a následnému zhodnocení stavu povrchových a podzemních vod. Samotná vodní bilance se skládá z bilance hydrologické a bilance a vodohospodářské. Hydrologická bilance zaznamenává a srovnává přírůstek a úbytek vody a změnu vodních zásob na určitém území za daný časový interval a dělí se na bilanci množství vody a jakosti vody. Vodohospodářská bilance srovnává požadavky na odběry povrchových a podzemních vod a vypouštění vod odpadních s využitelnou kapacitou vodních zdrojů z hlediska množství, jakosti a ekologického stavu těchto odpadních vod. (Zákon č. 254/2001 Sb.)

Hydrologickou bilanci sestavuje na základě vyhlášky Ministerstva zemědělství Český hydrometeorologický ústav a vodohospodářskou bilanci sestavují správci pro dané povodí. Hydrologická bilance je podkladem pro zpracování vodohospodářské bilance. (Dingman, 2008; Vlnas et al., 2005)

Vodní bilanci je možno vyjádřit jednoduchou rovnicí, kterou je možno aplikovat na kterékoli území v jakémkoli čase. Například pro dané povodí za jeden rok. Na základě podstaty koloběhu vody na Zemi lze rovnici vyjádřit takto:

$$E_o = S_o + O$$

$$E_p = S_p - O$$

$$S_o + S_p = E_o + E_p$$

Příčemž:

E_o – výpar ze světového oceánu

E_p – výpar z pevniny

S_o – srážky spadlé na hladinu světového oceánu

S_p – srážky spadlé na povrch pevniny

O – odtok z pevniny

Rovnici hydrologické bilance je možno využít pro jakékoli území pro daný rok nebo jako průměrnou bilanci pro několikaletý časový úsek. Oběh vody v konkrétním povodí vyjadřujeme následující rovnicí:

$$H_z = H_E + H_O \pm R$$

Příčemž:

H_z = výška srážek

H_E = výška evapotranspirace

H_O = výška odtoku

R = změna zásob vody v povodí

Tuto rovnici lze využít pro výpočet hydrologické bilance v uzavřeném povodí pro jakýkoli časový úsek. (Trizna, 2004)

4.3.3 Hydrologická bilance a odtokový proces v povodí

Sestává se z přírůstků vody a úbytků. Do přírůstků zahrnujeme údaje o atmosférických srážkách, přítoky vody z jiných povodí a to povrchové a podzemní i umělé převody vody. Úbytky vody jsou pak především povrchový a podzemní odtok vody z povodí, umělé převody vody a výpar neboli evaporace. Podklady pro zjištění vodní bilance v České republice jsou výsledky pozorování ve stanicích Českého hydrometeorologického ústavu. Patří mezi ně údaje o atmosférických srážkách včetně informací o sněhové pokrývce, teplota vzduchu včetně naměřeného výparu, průtoky ve vodních tocích, hladiny podzemních vod, vydatnost pramenů (průtok vody za vteřinu). Dalšími nezbytnými údaji jsou odběry vod podzemních i povrchových, vypouštění (odpadních) vod a akumulace povrchových vod vodními díly. (ČHMÚ, 2017)

První detailní hydrologická bilance byla zpracována pro rok 2002 a to i kvůli následkům povodní z tohoto roku. Výpočet se provádí každý měsíc a sestavuje se každoročně jako vyhodnocení oblasti povodí a hydrologického roku. Každé tři roky se pak posuzuje dlouhodobý vývoj hydrologické bilance množství vody. Výstupními informacemi jsou pak údaje o atmosférických srážkách, celkovém odtoku, základním odtoku, zásobách vody ve sněhové pokrývce, změnách zásob podzemní vody a přirozených průtocích vody ve vodních tocích. (Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 431/2001 Sb.)

Celkový odtok z určitého povodí je objem vody, který odečte z povodí za jednotku času a dělí se na další dílčí odtoky jako je povrchový, podpovrchový a podzemní. Povrchový a podpovrchový, který probíhá při vzniku srážky, jsou odtoky přímými. Podzemní odtok je ztížen zpožděním, tvoří ho voda infiltrovaná do půdy, společně s podpovrchovým tvoří odtok základní a je hlavním zdrojem vody pro vodní toky v období bez srážek. (Pavelková Chmelová et Frajer, 2014; Dingman, 2008)

Základní odtok tedy zásobuje podzemní vodou toky v období sucha, je součástí celkového odtoku z profilu. Měří se v litrech za sekundu na kilometr čtvereční a stanovují se jeho průměrné hodnoty pro období roční či měsíční jednotlivých povodí, tedy oblasti, ze které odtéká voda do jedné konkrétní řeky nebo jezera. (Pavelková Chmelová et Frajer, 2014; Dingman, 2008)

K metodám stanovení základního odtoku využívá ČHMÚ v dnešní době nejvíce Kliner-Kněžkovu metodu z roku 1974, doplněnou výpočtem odvozeným z výtokových čar. Výtoková čára představuje postupný pokles odtékajícího množství vody v čase a využívá se při rozčlenění hydrogramu (čára průtoku) v jeho celém průběhu. Obecně řečeno Kliner-Kněžkova metoda je závislá na výšce hladiny povrchové vody v tocích a na výšce hladiny přilehlého vrtu. Konstruuje tzv. „obalovou“ křivku rozdílu mezi úrovněmi těchto hladin. Předpokládá se v podobnost hydraulickému sklonu k velikosti zásoby podzemních vod zásobujících určitý tok. Výhodou je využití i v kratších časových úsecích. K zaznamenání výtokových čar je zapotřebí dostatečně dlouhé bezsrážkové období, střídající se s obdobími se srážkami pro stanovení několika fází a tím i spolehlivému výsledku. V podmínkách České republiky se delší bezsrážková období příliš nevyskytují a proto lze tuto metodu použít pro povodí o velikosti do 500 km². Tato metoda je nejpoužívanější metodou pro stanovení základního odtoku v České republice. Ročně se takto stanoví základní odtok pro až 84 profilů a výsledné hodnoty slouží jako vstupní údaje o zdrojích podzemních vod pro státní vodohospodářskou bilanci. (ČHMÚ, 2017; Kněžek et Kessler, 2000)

4.3.4 Minimální průtoky

Průtoky v období hydrologického sucha se snižují, protože evapotranspirace je vyšší než průměrná srážka spadlá na povodí v daném období. Pokud toto období trvá déle

nebo se krátce po sobě vyskytne několik takovýchto období, je veškerý odtok z povodí dotován ze zásob podzemní vody to znamená z výše zmíněného základního odtoku. Tím dochází i k poklesu hladin vod podzemních. (Vlnas et al., 2015)

Zmenšující se průtoky mají vliv na jakost povrchových vod, protože dochází ke změně fyzikálních a chemických vlastností vody. Největší riziko to obecně představuje pro malé toky, na kterých také často chybí měřicí stanice. Může dojít k vyschnutí toku, kdy zbydou jen malé izolované tůň. Velice nízké průtoky nebo dokonce nulové mohou mít velmi špatný dopad na životní prostředí, protože přímo ovlivňují organismy, žijící v tocích nebo blízkém okolí. (Zahrádková et al., 2015)

Je však důležité poznamenat, že sucho bychom se neměli plést s minimálním průtokem, vyprahlostí, s nedostatkem vody (obecně) s desertifikací ani s vlnami veder. Nedostatek vody se užívá ve spojení s nedostatkem zásobování obyvatelstvo vodou, nebo v situaci, kdy vlivem lidského zásahu na vodní systémy se sníží úroveň dostupnost vodního zdroje. Nedostatek vody a sucho je někdy velice těžké rozlišit, jsou totiž úzce spojeny a často se vyskytují současně. K nejhorší situaci ve vodním hospodářství dochází během sezony minimálních průtoků po dobu suchého klimatu, které samotné trpí nedostatkem vody. Desertifikace je poté pojem spojený se špatným hospodařením s půdou v oblastech se suchým klimatem, což vede k degradaci půdního krytu. Vlny veder se vyvíjí v důsledku vysokých teplot v určité oblasti. (Van Loon, 2015)

4.4 Výskyt sucha

Je mnoho podstatných procesů, které jsou základem pro rozvoj a znovuoobnovení hydrologického sucha. Příčiny jsou složité, protože jsou závislé jak na atmosférických procesech tak na hydrologických. Šíření sucha závisí na klimatu a obecně lze říci, že hydrologické sucho nastává odlišně v oblastech za relativně stálého klimatu v porovnání s oblastmi se silnou sezónností. Ve stálém klimatu je hlavním faktorem pro výskyt sucha pokles srážek pod normál s možnou vyšší evapotranspirací. V oblastech se sezónním střídáním klimatu v souvislosti s dalšími procesy se vyskytuje letní a zimní období sucha. V zimním období se voda zadržuje ve sněhové pokrývce a ledu a to znemožňuje vsakování a doplňování zásob podzemních vod to vede ke snížení jejich hladin a průtoku v zimním období. Po oteplení a tání se hladiny podzemních vod opět postupně začnou doplňovat.

V monzunových oblastech se střídá období sucha a srážek a v těchto klimatických podmínkách je to normální stav a sucho nastává, pokud se období dešťů zpozdí. (Van Loon, 2015; Sheffield et Wood, 2012)

Do budoucna lze předpokládat, že se bude sucho vyskytovat ve větší míře, nahodileji a jeho následky budou stále horší. Hladiny jezer a podzemních vod klesají, snižují se průtoky ve vodních tocích. Stále častější a delší období bez srážek a intenzivní využívání vodních zdrojů ve všech ekonomických sektorech vede k problematice vodních zásob. Souvisí to i s kvalitou vodních zdrojů, protože voda se méně zředuje a tím dochází k většímu znečištění. Dochází k narušení celého hydrologického oběhu. Určení výskytu hydrologického sucha vyplývá ze sledování stavu průtoků ve vodních tocích u vod povrchových a monitorování výšky hladiny ve vrtech u vod podzemních. Zjištěné hodnoty se porovnávají s dlouhodobými průměry pro dané oblasti. Z údajů pak vyplývá možné ohrožení hydrologickým suchem. (Brázdil et al., 2015)

5. METODY STANOVENÍ SUCHA

V důsledku prohlubujících se klimatických výkyvů a s ním spojených problémů jak s výskytem sucha či v opačném případě povodní a čím dál tím častějšími extrémními výkyvy teplot je nutné sucho sledovat a dokázat ho předvídat. Jeho dopady na lidskou společnost mohou mít obrovské následky a to nejen v zemědělství ale sucho se dřív či později projeví ve všech ekonomických sektorech a samozřejmě i v přírodě. Je nutné si uvědomovat tato rizika a i když je těžko ovlivníme, můžeme je alespoň sledovat a počítat s jejich výskytem. (Brázdil et al., 2015)

U sucha sledujeme intenzitu, výskyt v prostoru a čas. Jeho plošný rozsah je od několika stovek čtverečních kilometrů až do rozsahu kontinentálního tj. několik stovek tisíc kilometrů čtverečních. Z hlediska času se rozumí začátek, délka trvání a konec sucha což je ovlivněno i vedlejšími faktory: větrem, vlhkostí vzduchu, množstvím slunečního svitu. Ke stanovení sucha slouží indexy, zpracovávající naměřená meteorologická data a přeměňují je v čísla, která se dají dále porovnávat (Blinka, 2002).

Hydrologické sucho je charakterizováno jako málo vodné období. Mezi nejčastější metody jeho stanovení patří dosažení minimálních průtoků či pokles průtoků pod určitou mez. Nejčastěji se udává Q95%, tedy průtok s pravděpodobností překročení 95% nebo Q355, který značí průtok s pravděpodobností překročení 355 dní v roce. Využívají se také naměřené údaje o dosažení minimálních průtoků z průměrů v rozmezí týdne až měsíce (7-30 dní). Další metodou je metoda nedostatkových objemů, ta spočívá ve zjištění deletrvajících objemových nedostatků pod určitou hranici průtoků a velikost této odchylky od normálu. Hodnota tohoto nedostatku vyjadřuje množství vody, které by bylo potřeba pro zajištění limitního průtoků. Stejně tak je možno využít ke stanovení znatelný pokles hladiny podzemních vod a vydatnost pramenů od dlouhodobého normálu. (Vlnas et al., 2015)

Pro stanovení sucha složí indikátory a indexy. Indikátory jsou parametry k popisu stavu sucha. Jsou jimi teplota, srážky, průtok, hladiny podzemních vod, hladiny nádrží, půdní vlhkost a sněhová pokrývka. Indexy jsou hodnoty vypočítané a ztvárňují závažnost sucha pomocí klimatických či hydrometeorologických vstupů včetně indikátorů. Jejich cílem je změřit kvalitativní stav sucha v krajině za dané časové období, posouzení závažnosti, místa výskytu a trvání sucha. Závažnost se

posuzuje na základě odchylky od normálu. Prahová hodnota určuje počátek a konec (datem) a velikost ovlivnění oblasti suchem. Sledování klimatu v různém časovém vymezení umožňuje identifikaci krátkodobých deštivých období v rámci dlouhodobého sucha nebo krátkodobých výskytů sucha v přetrvávajícím deštivém období. Indexy poskytují užitečné nástroje pro odlišné příznivce i pro veřejnost. Stejně jako neexistuje jednotná definice sucha, není ani jediný index či ukazatel, který lze aplikovat na všechny typy sucha a klimatické režimy. Indikátory se liší kombinacemi vstupních dat. Na stránkách National Drought Mitigation Center (NDMC) je zveřejněna příručka, která doporučuje jednotlivé indexy podle kritérií a dostupnosti dat. (WMO et GWP, 2016)

5.1 Indexy sucha

Během posledních dvou století se vyvinuly indexy pro sledování sucha a to od nejjednodušších, které sledují nedostatek srážek až po ty složitější modely. Tyto modely se stále vyvíjejí s dostupností stále lepších datových zdrojů. Jakýkoli index, který má být aplikován na národní úrovni, musí řešit celkový stav vlhkosti v prostředí (Heim, 2002).

Indexy sucha obecně slouží ke srovnání výskytu sucha v různých obdobích na určité ploše a jeho vyhodnocení. Umožňují porovnat závažnost výskytu sucha v jednotlivých klimatických regionech s odlišným hydrologickým režimem. Časovým úsekem pro porovnávání jsou roky popřípadě měsíce. Vstupními informacemi pro výpočet indexů jsou zejména srážky, teplota, odtok, půdní vláhka, evapotranspirace, zásoby vody v řekách a vodních nádržích, sněhové zásoby a jiné. V současnosti používané indexy mají i své slabé stránky. Problémy mohou nastat u stanovení indexů kvantifikace intenzity a určení délky trvání sucha tedy jeho přesný začátek a konec, protože indexy pracují s průměrnými měsíčními naměřenými hodnotami. Nepočítají s úbytkem vodních zásob v čase tedy s odtokem a evapotranspirací. Další nevýhodou je, že mají omezené využití při dlouhotrvajícím suchu opět proto, že počítají s měsíčními hodnotami. Jsou celkově náročné na vstupní údaje a některé se musí dokonce odhadovat a to například právě evapotranspirace. (Heim, 2002; Byun et Wilhite, 1999)

Základem všech odhadovaných vstupních dat jsou srážky, a jak zmiňuje Blinka (2002), někteří z autorů se domnívají, že využití pouze srážek ke stanovení

a zhodnocení klimatického sucha je předmětnější, než stanovení za pomoci složitých indexů. Indexy také nezohledňují dopady sucha na krajinu se zpožděním a s jejími případnými zásobami podzemní či podpovrchové vody. Volba indexu a jeho užití je velice důležité, protože může vést k různým závěrům. Každý index se zaměřuje na určitou část hydrologického cyklu nebo užití určité metodiky a má své opodstatnění. Vícenásobné indexy by měly být užity k vyčíslení rozmanitosti dopadů sucha.

Indexy se dělí podle využití v různých oblastech. Jsou jimi meteorologické, hydrologické, kombinované nebo modelové indexy dále pak indexy k zjištění půdní vláhý a dálkový průzkum Země. Jsou dvě základní skupiny indexů stanovení sucha a to skupina standardizovaných indexů a indexy prahových úrovní. Standardizované představují odchylku od normálního stavu běžným způsobem. Nevýhodou je užívání pouze relativních hodnot místo absolutních, které jsou potřeba pro řízení vodních zdrojů. Zmíněná druhá Metoda prahové úrovně (nebo také deficitní index) spočívá v odvození z časové řady sledovaných hydrologických proměnných s předem definovanou prahovou úrovní. Když se proměnná ocitne pod úrovní, jedná se o sucho a je snadné vypočítat délku jeho trvání a závažnost. (Van Loon, 2015)

Jako základní index pro monitorování meteorologického sucha, se kterým počítají i některé další indexy je Standardized Precipitation Index (SPI) využívaný Světovou meteorologickou organizací (World Meteorological Organization, ve zkratce WMO) a doporučován pro všechny meteorologické a hydrologické služby po celém světě. Pro hydrologii to jsou například Palmer Drought Severity Index (PDSI), ke kterému jsou zapotřebí veškerá data, se kterými pracuje. Standardized Streamflow Index (SSFI) užívá data SPI a průtoku. Dále Streamflow Drought Index (SDI), jehož vstupními daty je průtok a historické časové řady, čím delší, tím přesnější výsledky. Byly navrženy některé souhrnné indexy pro zjištění a zachycení funkcí sucha, ale jen velmi málo indexů je zaměřeno na monitorování stavu zdrojů podzemních vod (Mendicino et al., 2008).

Dále se ještě užívají například tyto indexy: Aggregate Dryness Index (ADI), Standardized Snowmelt and Rain Index (SMRI) a Surface Water Supply Index (SWSI), který využívá data o stavu hladin vrtů podzemních vod k posouzení dopadu sucha na podzemní vody a je vhodný pro oblasti se sezónním kolísáním průtoků větších řek a potoků. (WMO et GWP, 2016)

5.1.1 Standardized Precipitation Index (SPI)

Základním indexem, ze kterého vycházejí i další indexy je SPI. Využívá záznamy o srážkách v kterémkoli území pro predikci výskytu srážek v časovém měřítku jednoho měsíce a delší. Pro výpočet stačí klimatická data za 20 let, v ideálním případě 30 ti letá řada. Lze jej aplikovat i za podmínek, kdy chybí některá data v řadě. Vstupními parametry jsou pouze srážky. Hodnoty s 12-ti měsíční periodou jsou vhodné k sledování hydrologických dopadů, kratší období jako je měsíc pro sledování základního sucha. Index SPI může být aplikován kdekoli na světě, a lze porovnávat výsledné hodnoty z odlišných klimatických podmínek. Jeho nevýhodou může být fakt, že na základě krátké časové řady vstupních údajů nebo větší množství údajů chybějících může chybovat. Dále také to, že není schopen zohlednit akumulaci podzemních vod v hornině, půdní typy ani teplotní výkyvy. Přesto se stal velice používaným a oblíbeným indexem pro svou jednoduchost a časovou flexibilitu. (WMO et GWP, 2016; Duan et Mei, 2014; Mendicino et al., 2008)

5.1.2 Palmer Drought Severity Index (PDSI)

Nejznámější a nejpoužívanější index je PDSI navržen W. C. Palmerem v roce 1965, kdy se poprvé použilo pro vyhodnocení sucha více vstupních dat než jen srážkových. Vstupními daty jsou srážky, evapotranspirace, odtok infiltrace. Je to index meteorologický, ale v USA je využíván i ke stanovení sucha hydrologického, modeluje vodní bilanci systému pro určité území za jeden měsíc. Vyhodnocuje abnormálně mokré či suché období. Počítá s rozdílnými typy půd a jejich vlhkostí, zohledňuje bilanci předchozích měsíců a je možné porovnat sucho v oblastech s rozdílným klimatem. Na druhou stranu nezapočítává sněhové srážky. Index byl vynalezen prioritně pro sledování sucha a jeho vliv na zemědělství v USA, dnes se používá po celém světě. Mapa s hodnotami indexu je zveřejňována měsíčně na stránkách Amerického Ministerstva zemědělství. (Wilhite et Glantz 1985; Palmer, 1965)

Dalším indexem je Palmerův Z-index, který je součástí výpočtu PDSI indexu. Ukazuje rozdíl mezi naměřenými hodnotami v daném měsíci a dlouhodobým průměrem. Popisuje tedy krátkodobé sucho. (WMO, 2017; Palmer, 1965)

5.1.3 Standardizovaný srážkový evapotranspirační index (SPEI)

Dalším indexem je SPEI. Novější index využívá základ SPI a zahrnuje teplotu, díky které se dá určit vliv teploty na sucho. Umožňuje zhodnocení sucha denním meteorologickým měřením. Vypočítá se rozdílem úhrnu srážek a potenciální evapotranspirace travního porostu pomocí statistického rozdělení pravděpodobnosti. Zjištěné hodnoty se dají porovnávat z časového hlediska v různých obdobích i pro různé oblasti. Jeho využití je všestranné stejně jako SPI. Použití tohoto indexu je doporučováno WMO a je počítán pro jeden měsíc až půl roku. Je využíván i ČHMÚ v oblasti klimatického sucha. (ČHMÚ, 2017; WMO et GWP, 2016; Stagge et al., 2014)

5.1.4 Baseflow index (BFI)

Jedním z indexů sloužícím pro stanovení minimálních průtoků vody v povodí a tím i následnému indikování nastávajícího sucha je BFI. Vyjadřuje objem základního odtoku ku celkovému objemu v toku. Byl původně vyvinut ve studii nízkých průtoků ve Velké Británii pro charakterizaci hydrologické reakce na geologii a půdy v povodí. Tento index je citlivý na data, jeden chybějící údaj může přinést jiné výsledky v následujícím čase, proto se také doporučuje vyhodnocovat data pro každý celý rok zvlášť. Je možné ho přizpůsobit pro výpočet proudění například i v nádržích a jezerech. V tropických oblastech je však ovlivňován sezónním klimatickým režimem a naopak jeho vysoké hodnoty a to více než 0,95 (standartní hodnoty se pohybují mezi 0,15 až 0,2) mohou vykazovat oblasti s podložím s vysokou infiltrační kapacitou a ustáleným vodním režimem. Počítá s propustností podloží, tedy s geografickými faktory a se sklonem. (Gustard et al., 2009)

Autoři Byun z univerzity ze Severní Koreje a Wilhite z univerzity z Nebrasky navrhli nové indexy sucha, které se zabývají i nedostatky stávajících indexů. Pracují s efektivní srážkou (EP), která řeší denní úbytek vodních zdrojů a tak se dá přesně určit délka trvání sucha a mohou být popsány i rozdílné způsoby nadcházejícího sucha. Za pomoci této efektivní srážky je možno využít dalších indexů například ke stanovení srážkového deficitu. Výhodou EP je také nenáročnost na vstupní data a snadná interpretace výsledků. Metoda ještě není zcela propracována, ale pro svou jednoduchost by ji bylo možné použít na rozdíl od ostatních indexů pro velká území a to například i pro celou ČR (Byun et Wilhite, 1999).

5.2 Metoda dálkové detekce

Je jednou z metod monitorování sucha a jeho výskytu, stejně jako se využívá v meteorologii, monitorování životního prostředí nebo mapování krajinného pokryvu. Data pro monitorování půdní vlhkosti jsou využívána ve spojení s daty z meteorologických družic (údaje o srážkách, obsahu vody v oblacích) a to napomáhá nejen předpovědi sucha, povodní nebo dokonce požárů. Výhodou je získání množství informací komplexně z rozsáhlého území v určitém čase. Metoda dálkového průzkumu Země spočívá v zaznamenávání intenzity elektromagnetického záření v intervalech spektra a to například teplotu zemského povrchu, která je okem nezaznamenatelná. Jde o záznam odraženého krátkovlnného slunečního záření nebo intenzity dlouhovlnného, tato metoda je pasivní. Aktivní metoda spočívá ve využití umělého zdroje energie, jako je například mikrovlnné záření a množství odraženého záření. To přináší informace o zemském povrchu. Tyto metody využívají radarové systémy a jejich výstupem je datová řada. Výsledky mají podobu družicových snímků složených z jednotlivých pixelů, přičemž každý z nich nese informaci o části zemského povrchu. Těmito metodami lze nepřímo monitorovat zemědělské sucho, protože usychání vegetačního krytu se projeví poklesem odrazivosti na snímcích v infračervené části spektra, stejně jako obsah půdní vláhy se projeví na snímku zvýšenou radiační teplotou. (Brázdil et al., 2015)

Družicové pozorování přináší mnoho nástrojů pro pozorování sucha a jeho dopadu na ekosystémy. Mikrovlnné monitorování společně s optickým nabízí do budoucna možnost vyvinout nové ukazatele pro posuzování půdní vlhkosti a obsahu vody ve vegetaci prostřednictvím mikrovlnného vyzařování. To povede k lepšímu pochopení reakce ekosystémů na klimatickou proměnlivost a s tím spojených dopadů sucha na celkovou změnu biomasy a obsahu uhlíku v rostlinách. Metoda dálkového monitorování země má svou budoucnost, je však poměrně nová a řada družicových dat nese pouze desetileté sady záznamů, proto nemůžou být data využita k posouzení vývoje klimatu z historického hlediska. Je třeba zlepšit propojení s družicovým měřením, která nejsou doposud používány v detekci sucha a to například družici sledující vodní páry. (AghaKouchak et al., 2015)

6. MONITOROVÁNÍ SUCHA V ZAHRANIČÍ

Pozorování sucha a zdroje informací pro jeho studování se získávají na datových stanicích, kterými jsou meteorologické stanice, výpustné stanice, sledování podzemních vod nebo rastrová data (analýzy, satelitní data). Nejčastěji používaná data v hydrologii jsou průtoky. (Van Loon, 2015)

6.1 Predikce hydrologického sucha

Ve vodním managementu jsou předpovědi důležité. Znalosti o šíření sucha jsou nezbytně nutné v nejrůznějších sektorech předpovědi hydrologického sucha. Systémy sledování sucha a včasného varování jsou určeny k zjištění vodního deficitu v klimatických či hydrologických veličinách. Jejich cílem je rozpoznat vznik, pravděpodobnost výskytu rozsah a případnou závažnost sucha a tak zmírnit dopady tohoto jevu. (WMO, 2006)

Problémem je nedostatek měřících sítí přímo v daném místě. Tím dochází k malému odhadu v mnoha regionech a nedostatečnou infrastrukturu pro převedení dat do užitečných informací. Je zde zmíněn i problém s různorodostí proměnných, které je třeba sledovat pro stanovení vývoje hydrologického sucha a jeho dopadu na hospodářská odvětví související s vodou. A to je základním předpokladem pro sezónní provozní činnost hospodaření s vodou, jako je zavlažování, provoz nádrží, nebo dokonce mokřadů. Sezónní předpovědi jsou významné hlavně v zemědělství. (Pozzi et al., 2013)

Sucho má každoročně za následek socioekonomické ztráty po celém světě a hlavně v chudších zemích s ohledem na neustálý růst populace. V 80. letech vlivem sucha ve východní Africe zahynulo na následky hladomoru téměř milion lidí. V roce 2010 se problém opakoval, ekologický problém nastal i v jihovýchodní Asii. Zabránění potravinové krizi a následnému hladomoru vyžaduje vývoj systémů včasného varování a předpovědi před suchem. Globální systém by měl napomoci regionům, kde se z ekonomických a klimatických důvodů opakuje potravinová krize. V současné době existuje několik systémů, které se snaží o globální monitorování, nejsou však doposud propracované tak, aby dokázaly předpovídat sucho. Jsou to například Global Drought Monitor od Univerzity College v Londýně nebo

Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index Global Drought Monitor. (Hao, et al., 2014; Trambauer et al., 2013)

Jak zde několik bodů, které jsou výzvou k výzkumu hydrologického sucha. Je to celkové porozumění této problematice – zvýšená znalost fyzikálních procesů, kterými se řídí hydrologické sucho, nezbytné pro předpovídání jeho výskytu a dlouhodobé plánování v hydrologii. Je důležité porozumět výskytu sucha v minulosti, sledovat a modelovat jeho stav a přizpůsobit tak předcházení jeho negativním účinkům. Stále jsou zde některé zásadní otázky, které musí být pochopeny například v řízení povodí. Dalším bodem je lepší kvantifikace hydrologického sucha, která souvisí se správným výběrem indexů, modelů a dat. Velmi důležité je se zajímat o šíření sucha včetně působení lidských aspektů, které mají vliv na hydrometeorologické faktory a koloběh vody. Mezi přímé dopady na koloběh vody se řadí čerpání vod nebo stavby nádrží. Mezi nepřímé pak změny ve využívání půdy, které vedou k povrchovému odtoku. Posledním zmiňovaným bodem je aplikace výzkumu sucha ve vodním hospodářství a politice. Je to krok k překlenutí mezi vědou, řízením a politikou. (Van Loon, 2015)

6.1.1 Hydrologické modely

Hydrologické modely sucha pomáhají k rozšíření a získání chybějících informací v datových řadách a přizpůsobení a zaplnění mezer časových řad. Modelování je v hydrologii běžně používané jak ve vědě, tak v praxi. Skládá se z hydrologických procesů jako je zadržení vody, akumulace a tání sněhové pokrývky, infiltrace, pohyb půdní vody, úroveň podzemní vody a její uchování. Výsledným model zahrnuje přímý odtok, základní odtok, pomalého a rychlého odtoku. Hlavním nástrojem pro řízení sucha v povodí slouží koncepční srážkoodtokové modely. V povodích po celém světě vykazují hydrologické modely dobré výsledky. Jsou vhodné pro simulaci středních až vysokých toků. Problém nastává u simulace menších toků, které nesplňují průtoky pro vytvoření modelů. Stejně tak jako data vyvozená pozorováním, hydrologické modely jsou nejisté. (Hamel et Fletcher, 2014; Trambauer et al., 2013; Sheffield et Wood, 2012; Engeland, et al., 2006)

6.1.2 Monitorovací systémy

Existuje několik monitorovacích systémů, které vyhodnocují rozsáhlejší oblasti a jsou veřejně publikovány. Užívají různá vstupní data, prostorové i časové rozlišení

a indexy. V kontinentálním měřítku existují systémy monitorování nebo předvídání sucha pro Severní Ameriku, pro Evropu a Afriku. V národním měřítku pak Indii, Českou republiku a USA. Systémy zřízené pro sledování v Indii a Africe jsou založeny na datech vykreslujících srážkovým satelitem se schopností sezónní předpovědi. Systém poskytuje indexy srážek, vlhkosti půdy a průtoků. Evropská observatoř pro sledování sucha zveřejňuje aktuální stav v desetidenních intervalech na základě SPI a hydrologického modelu odvodí půdní vlhkost. Stav vegetace je odhadnut na základě podílu absorbované fotosynteticky aktivního záření, získaného pomocí satelitu z dálkové detekce. Je zde i snaha o sledování a předvídání sucha v globálním měřítku. (Zink et al., 2016; Hao et al., 2014; Pozzi et al., 2013)

Cílem globálního monitoring včasného varování před suchem Global Drought Early Warning System (GDEWS) je zlepšit stávající schopnost regionálního a národního monitorování sucha a jeho předpovědi. Užít informace v globálním měřítku a usnadnit tak chybějící kontinentální monitorování a předvídání a vylepšovat tyto nástroje vedoucí ke zlepšení provázanosti a informovanosti národních a regionálních institucí či zavedení dalších systémů včasného varování tam, kde doposud nejsou. To vše vyžaduje celosvětovou spolupráci v této problematice. Jsou důležité potřebné zdroje, rozvíjení schopností pro sledování a sjednocené metody při posuzování a k identifikaci kritické oblasti zranitelné suchem. To vše je velice náročné dát dohromady. Klíčové pro tento systém jsou spolehlivé informace na světové úrovni a dostatečné pokrytí meteorologickými a hydrologickými stanicemi. Monitorovací a předpovídající technologie musí mít dostačující rozlišení a identifikovat prostorovou variabilitu případného sucha. Fyzikální procesy v hydrologickém cyklu se liší v různých oblastech stejně jako dopady sucha na podzemní a povrchové vody. To vyžaduje lepší sledování průtoků, srážek, vlhkosti půdy, sněhové pokrývky, evapotranspirace a podzemních vod společně se zemědělskou produktivitou a ekosystémem. Získání takových dat je složité zejména v monzunových částech světa, kde se dají těžko měřit. (Pozzi et al., 2013)

6.2 Sledování ve světě

Celosvětově nejznámější a nejstarší monitorovací systém provozuje Národní Centrum pro Zmírnění Dopadů Sucha - The National Drought Mitigation Centre,

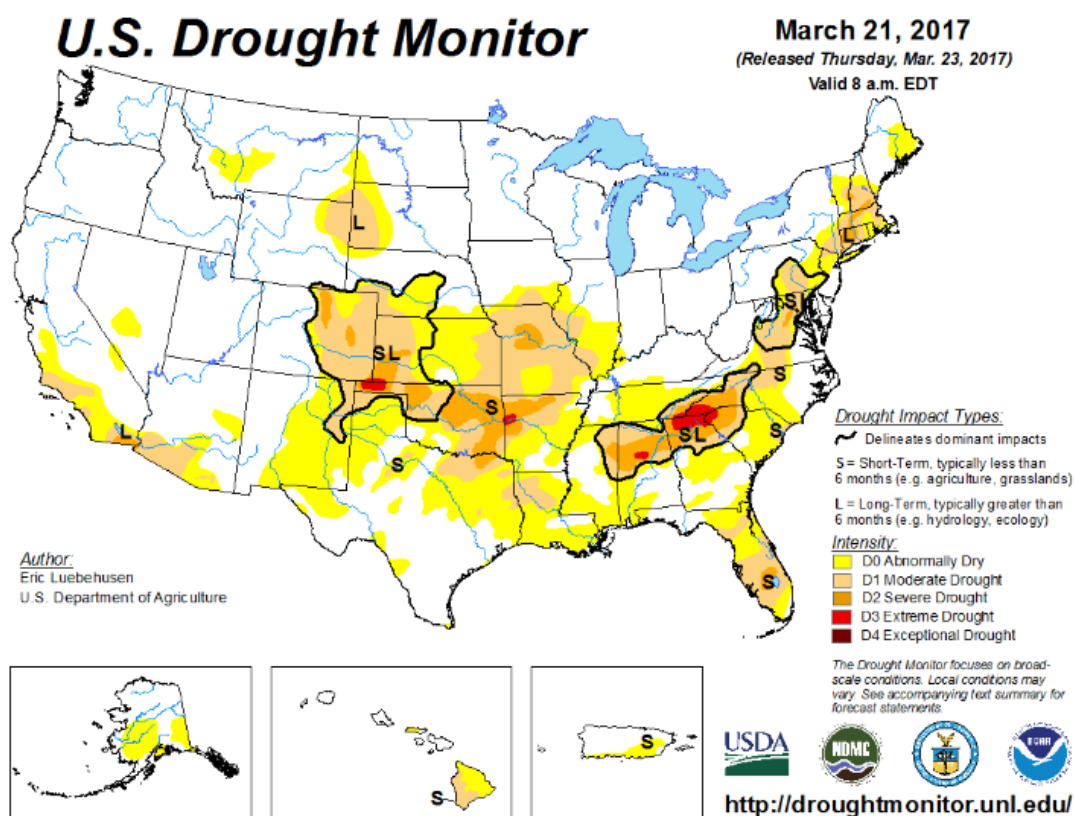
ve státě Nebraska v USA. NDMC se zmiňuje o suchu ekologickém, které definuje jako déletrvajícím a rozsáhlým deficitem přirozeně dostupných vodních zdrojů a to včetně změn v přírodní a řízené hydrologii, která vytváří výrazný tlak na ekosystémy. Zmiňuje se o narůstání tohoto problému zejména v Severní Americe s očekávanou zvyšující se globální teplotou. Sucho se v USA monitoruje a výsledky se zveřejňují prostřednictvím National Integrated Drought Information System, jehož cílem je prostřednictvím dostupných informací posouzení potenciálních dopadů sucha a jejich zmírnění systémem včasného varování veřejnosti. Využívají výše zmíněné indexy jako PDSI, SPI a dálkové pozorování země k identifikaci stavu podzemních vod, průtoků, stavu zemědělské půdy a její vláhly, kvalitě vody, celkovému klimatickému stavu a potenciálnímu ohrožení suchem. Vyhodnocení aktuální situace a mapy zveřejňuje týdně. (NDMC, 2017)

6.2.1 Systémy včasného varování

Připravit se na období sucha po celém světě se snaží systémy včasného varování sucha (Effective drought early warning systems), spolupracující s WMO, pro jejichž účinnost jsou nutné spolehlivé informace. Vzhledem ke složitosti a náročnosti jednotlivých indexů a ukazatelů pro spolehlivé posouzení výskytu sucha má největší úspěch a zároveň je provozován nejdéle U.S. Drought Monitor. Byl zahájen roku 1999 jako výsledek úsilí sjednocení a centralizování kontroly nad suchem. (Zink et al., 2016)

Zpracovává hodnoty o průtocích pro vyhodnocení sucha, ale převládajícími daty jsou meteorologická data a půdní vlhkost vyvozené z hydrologických modelových simulací. Dále pak sněhová pokrývka, úroveň hladin nádrží, hladiny podzemních vod. Pracuje s indexy SPI a PDSI, výsledná mapa pro USA zahrnující i Aljašku, Hawai a Portoriko se vyhodnocuje týdně ve spolupráci s dalšími americkými úřady, odráží reálný stav a obsahuje pět kategorií sucha (obr. 3) včetně informací, která odvětví mohou být ovlivněna. Jediné omezení spočívá v tom, že se Monitor pokouší zobrazit sucho v několika jeho časových měřítkách a to od krátkodobého po dlouhodobé v jedné výsledné mapě. Cílem však zůstává objektivní zhodnocení současného stavu sucha po celých Spojených státech s ohledem na všechny indikátory, které jsou k dispozici, aby výsledky mohly být využívány všemi uživateli. (Heim, 2002; Svoboda et al., 2002)

V roce 2002 byl zrealizován Severoamerický monitor sucha jako návaznost na U.S.Drought Monitor a rozšíření sledování sucha na Kanadu a Mexiko a poskytuje měsíční mapy výskytu sucha. (Zink et al., 2016; Thomas et al., 2014; Sivakumar et al., 2011)



Obrázek 3: U.S. Drought Monitor zobrazující stav sucha k 21. březnu 2017

6.2.2 Monitorování podzemní vody v přímořských oblastech

Na odezvu sucha ve středomořských oblastech proběhla, konkrétně v jižní Itálii studie, která ukazuje, že je velice důležitý systém včasného varování pro identifikaci nastávajícího sucha. Tato oblast se vyznačuje odlišnými geologickými podmínkami, které ovlivňují hydrologii povodí především v letních měsících. Účinnost je ovlivněna výběrem vhodných indexů pro monitorování, které musí brát v úvahu meteorologické, zemědělské a hydrologické aspekty. Vybraný index pro pozorování podzemní vody Groundwater Resource Index (GRI) tato kritéria splňuje a je vhodný pro posuzování zdrojů podzemní vody v letních měsících. Vykazuje model měsíční vodní bilance, obsahuje informace o klimatickém rozmístění, půdních typech

a geologické struktúre. Struktúra modelu není složitá a schopen včas detekovat kritický stav na daném povodí. Studie zároveň ukázala, že užití GRI indexu je v této oblasti vhodnější než index SPI, který vykazoval zbytečná varování před suchem. SPI nezohledňuje propustnost podloží a je zde problém s vhodným stanovením časového měřítka, zatímco GRI podmínky splňuje a výsledky byly přesnější i za předpokladu chybějícího údaje. Index GRI je citlivý na geologická vstupní data a proto je vhodným indexem právě pro tuto oblast. Na rozdíl od PDSI, který neumožňuje identifikaci sucha v krátkém časovém měřítku je také schopen GRI dobrých výsledků v různě stanovených časových řadách. GRI lze spolehlivě aplikovat na další středomořské oblasti. (Mendicino et al., 2008)

Následně proběhla v roce 2014 studie v Íránu, která vykazuje stejné výsledky použití indexu GRI jako studie v Itálii. S indexem GRI (ve statistickém období 20-ti let) byl současně použit index SPI v měsíčních, čtvrtletních a ročních časových řadách a výsledek ukazuje, že největší dopad meteorologického sucha na podzemní zdroje se projeví s odstupem průměrně dvou let, protože infiltrace do podzemních vod probíhá se zpožděním v závislosti na formaci geologického podloží v regionu. Zároveň bylo dokázáno, že při projevu meteorologického sucha a neřízeném hospodaření s vodou v zemědělství způsobuje hydrologické sucho. Vhodným opatřením proti prohlubování hydrologického sucha a lepším nakládáním se zdroji podzemních vod je optimalizace řízení užívání vody pro zemědělské účely zejména v jarních a letních měsících. (Chamanpira et al., 2014)

6.2.3 Monitorování v Indonésii

Hydrologické indexy sucha hrají důležitou roli při řízení vodního hospodářství v Indonésii. V této oblasti je to důležitá několikaměsíční předpověď s cílem vytvořit zásoby vody při dostatku srážek nebo naopak s cílem varovat zemědělce i širokou veřejnost, aby začali šetřit vodou. Jejich systém včasného varování je navržen za využití hydrologických indikátorů a satelitních přístupů. Srážkové údaje ze satelitů mohou být v predikci sucha využity dvěma různými způsoby a to jednak s využitím meteorologického indexu SPI nebo s využitím srážkoodtokového modelu vodních toků, který může být posléze převeden do hydrologického indexu odtoku Standardized Runoff Index (SRI). Vstupními údaji jsou měsíční průtoky. Systém pracuje s hydrologickou databází indikátorů a umožňuje vyhodnocení závažnosti, délku trvání a intenzitu předchozích suchých období. Aktuální situaci vodních toků

lze pozorovat prostřednictvím online režimu monitorovacího systému, stejně jako možné probíhající sucho či jeho předpokládaný budoucí výskyt. Výstupem systému je mapa s tzv. „zavlažovacími“ jezy, které ukazují stav hladiny s určitou prahovou úrovní, umožňuje porovnání stavů na několika jezích současně. Stejným způsobem lze sledovat i případné povodně. Simulátory předpovědi hydrologického sucha ukazují možnost předvídání v následujících 6 měsících. (Hatmoko et al., 2015)

6.2.4 Monitorování v Německu

V Německu využívají ke sledování sucha od roku 2014 German Drought Monitor (GDM), který poskytuje kvalitní informace na regionální i národní úrovni. Informace jsou zveřejňovány denně a hlavními skupinami uživatelů jsou zemědělci, regionální agentury a lesníci a v roce 2015 (v souvislosti s extrémním suchem) se stal všestranně využívaným i veřejností. Ukazuje, že sucho v roce 2015 zasáhlo více jak 75% území Německa (zvláště pak severní Bavorsko a východní Sasko). Meteorologická data jsou pozorována na více než 2200 srážkových a klimatických stanicích v Německu, převáděna do hydrologických modelů a následně porovnávána s historickými záznamy. Vyhodnocené údaje jsou publikovány se čtyřdenním zpožděním, což je ale prozatím pro zemědělské a vodohospodářské účely dostačující. Na vylepšení GDM se stále pracuje, zatím přináší krátkodobé a střednědobé předpovědi (max. 5 dní) a do budoucna se ještě plánuje propracování zobrazení map i údajů a to například ve spojitosti s indexy. (Zink et al., 2016)

6.2.5 Příklady monitorování v dalších státech

V Číně je sucho sledováno orgánem Beijing Climate Center prostřednictvím indexu SPI od roku 1995 nejprve v desetidenním rozestupu a nyní jsou údaje zveřejňovány denně. V Jižní Africe je sucho normálním projevem tamního klimatu, již v minulosti zde vedlo k četným environmentálním, socioekonomickým problémům avšak se změnou klimatu se zranitelnost této oblasti prohlubuje. Nejen zemědělci ale i veřejnost žádá data pro předpověď výskytu srážek pro své plánování. Na základě toho Jihoafrická Meteorologická Služba seskupila informace pro snadný přístup s možností srovnání s předchozími obdobími sucha s cílem napomoci tak lidem plánovat nejen v zemědělství. Využívá indexu SPI a datové řady nejméně 50 let. V roce 2005 postihlo téměř celou oblast Jižní Afriky sucho, při čemž přehrady dosahovaly pouze 36% své kapacity. V Portugalsku využívají především index PDSI

a výsledky jsou interpretovány v měsíčních mapách, ukazující prostorové rozložení sucha. Jsou důležité pro zemědělství a předcházení katastrof v Portugalsku. Zde v roce 2005 také nastalo sucho, které mělo značné dopady na zemědělství, energetiku i veřejné zásobování vodou. V Austrálii sledují výskyt srážek a vyhodnocují jejich deficit či přebytek, vzhledem k tomu v jaké geografické poloze se nachází. (WMO, 2006)

7. MONITOROVÁNÍ SUCHA V ČESKÉ REPUBLICE

7.1 Výskyt a ohroženost suchem v ČR

V České republice monitoruje hydrologické sucho Český hydrometeorologický ústav. Informace vztahující se k problematice sucha vodních zdrojů jsou dostupné zejména prostřednictvím tohoto portálu, dále pak ISVS-VODA v gesci MŽP spravované Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, v.v.i. (VÚV TGM) a zpracovávají data podniků Povodí. Zahrnují dvě kategorie vodoměrných stanic a to kategorii A základní hlásné profily, spravovanou ČHMÚ nebo s.p. Povodí a kategorii B s doplňkovými hlásknými profily zřizovanou krajskými úřady. (Vlnas et al., 2014)

Portál ČHMÚ Pravidelně zveřejňuje výsledky aktuálního stavu vodních toků a podzemních vod mělkých vrtů prostřednictvím Hlásné a předpovědní služby na internetových stránkách zhruba od poloviny roku 2014. Míra závažnosti sucha je zde rozdělena na sucho mírné, silné či mimořádné. (ČHMÚ, 2017)

Téměř všechny zdroje vody, které se vyskytují na území České republiky, na rozdíl od většiny států Evropy, pocházejí z atmosférických srážek. A to znamená, že by se s vodními zdroji mělo nakládat rozvážně a šetrně. S měnícím se klimatem dochází ke změně srážkového režimu typickému pro určité roční období. V letních měsících srážek ubývá a naopak v zimních přibývá. To znamená v létě se zvyšující se teplotou značný problém ve vodním režimu krajiny. Vymezení rizikových území ve spojitosti se suchem je na základě indexů, nejčastěji meteorologických. V evropském měřítku například klasifikace kombinovaných územních celků (tzv. NUTS) založených na indexu SPEI. Klasifikaci na základě několika indexů je možné nalézt v Atlasu podnebí Česka. (Zahrádková et al., 2015)

K nejohroženějším oblastem ČR patří regiony středních a severozápadních Čech a oblast střední a jižní Moravy. V povodích se projevuje vysycháním toků, to již zaznamenalo problém v povodí Rakovnického potoka, Blšanky, Rokytné, Jevišovky a dalších. (Vlnas et al., 2015)

Vlnas (2015) také zmiňuje, že je třeba sjednotit a zpřehlednit způsob hodnocení pro stanovení hydrologického sucha. To je možné mimo jiné realizací návrhu jednotného systému hodnocení povrchových a podzemních vod: Metodika

pro stanovení mezních hodnot indikátorů hydrologického sucha. Cílem zmíněné metodiky je návrh a popis systému indikátorů sucha pro jeho hodnocení a predikci. Je zaměřena na hydrologické sucho a to především na pokles zdrojů podzemních a povrchových vod. Indikátory popsané v metodice rozšiřují a sjednocují systém včasného varování před projevem hydrologického sucha a jeho průběhem. Část tohoto návrhu se již uplatnila ve stanovení stavu podzemních vod ČHMÚ. (Vlnas et al., 2015; Vlnas et al., 2014)

Informační systém sucha českého hydrometeorologického ústavu je založen na hodnocení extremity, pomocí standardizovaných indikátorů rozděleny dle pravděpodobnosti výskytu. Sledovanými veličinami jsou srážkové úhrny, evapotranspirace, průtok, stavy hladin ve vrtech a vydatnosti pramenů. Pro vyhodnocení hydrologické situace a možného sucha sleduje ČHMÚ průtoky vodních toků, stav hladiny mělkých a hlubokých vrtů a pramenů. Dále pak nasycení půdy a tím její retenční kapacity s vlivem na povrchový odtok při případných srážkách a množství vody ve sněhové pokrývce, které je velice důležité z hlediska doplňování zásob podzemních vod. Sněhová pokrývka se sleduje v době výskytu listopad až duben. Zároveň provozuje jedinou celoplošnou síť pro sledování podzemních vod na území ČR. (ČHMÚ, 2017)

7.1.1 Předpověď sucha

Možnostmi predikce hydrologického sucha jsou jednak metody na základě pozorované klimatologie nebo predikce odtoku hydrologickým modelem BILAN. Cílem předpovědi jsou hodnoty vybraných indexů a na základě toho můžeme metody predikce hydrologického sucha rozdělit na ty, které vycházejí ze statistiky indexu sucha například Streamflow Drought Index (SDI), statistiky klimatických veličin, odhadu velikosti zásob vody v povodí nebo předpovědi meteorologických veličin či jejich kombinace. Metody vycházející z odhadu zásob v povodí vyhodnocují zásoby vody v povodí s použitím hydrologického modelu a naměřených dat. Příkladem takovéto metody je Groundwater Resource Index (GRI) pro předpověď průtoků podzemních vod (Mendicino et al., 2008).

Predikce sucha modelem BILAN funguje na základě simulací odtoku a bilance povodí či určitého území. Využívá se v českých i evropských povodích v mnoha projektech pro výzkum a hydrologické studie. Vstupy modelu je časová

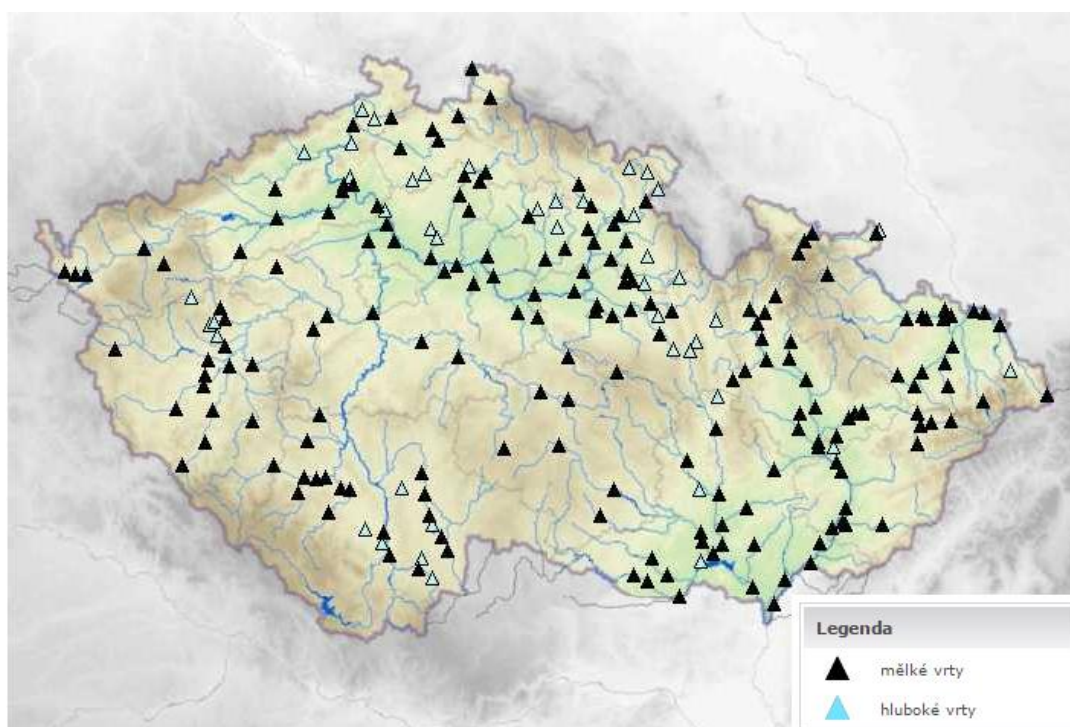
řada teploty vzduchu a srážkových úhrnů. Počítá hydrologickou bilanci povodí v denním či měsíčním kroku. Sucho je možno hodnotit pomocí srážek, vztahu srážek a evapotranspirace, průtoku, stavu hladina a vydatnosti pramenů. Odtok je modelován složkou přímého odtoku a základního. Tento model je více jak 15 let vyvíjen na oddělení hydrologie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka. (VÚV TGM, 2017; Vlnas et al., 2014)

7.1.2 Problematika podzemní vody

V České republice se nyní pozoruje přibližně 2000 objektů podzemních vod. Sledovány jsou prameny, u kterých se zjišťuje vydatnost a teplota, dále mělké zvodně a hluboké zvodně. Sucho je indikováno na stránkách Hlásné a předpovědní povodňové služby nedosažením limitu, který odpovídá 85% výskytu průměrných měsíčních stavů hladin ve vrtech či vydatností pramenů na čáře překročení. (Vlnas et al., 2014; Dingman, 2008)

Nejstarší pozorovaný vrt se nachází v oblasti vodního zdroje Březová nad Svitavou ve východních Čechách. Pozorování zde přetrvává od roku 1899. Využitelné podzemní vody jsou soustředěny zhruba na 30% území ČR (obr. 4). Odběry podzemní vody u nás činí 23% z celkových odběrů a z toho přes 80% představují odběry pro veřejné vodovody, poté pro průmysl a zemědělství. Přes 6% obyvatel je zásobováno vodou z vlastních zdrojů, tedy ze studní. (Soukalová et Muzikář, 2015)

Vliv na podzemní vody má v jarním období tání sněhu. Nedostatek sněhu může způsobit problém v období s nejvyššími průtoky. Kvůli zmrzlé půdě může dojít k rychlému povrchovému odtoku, kdy sníh začíná tát a zároveň prší a to znemožňuje vsakování vody do půdy. To může dokonce ovlivnit hydrologické podzemních vod v letním období. (Van Loon, 2015)



Obrázek 4: Mělké a hluboké vrty na území ČR (ČHMÚ, 2017)

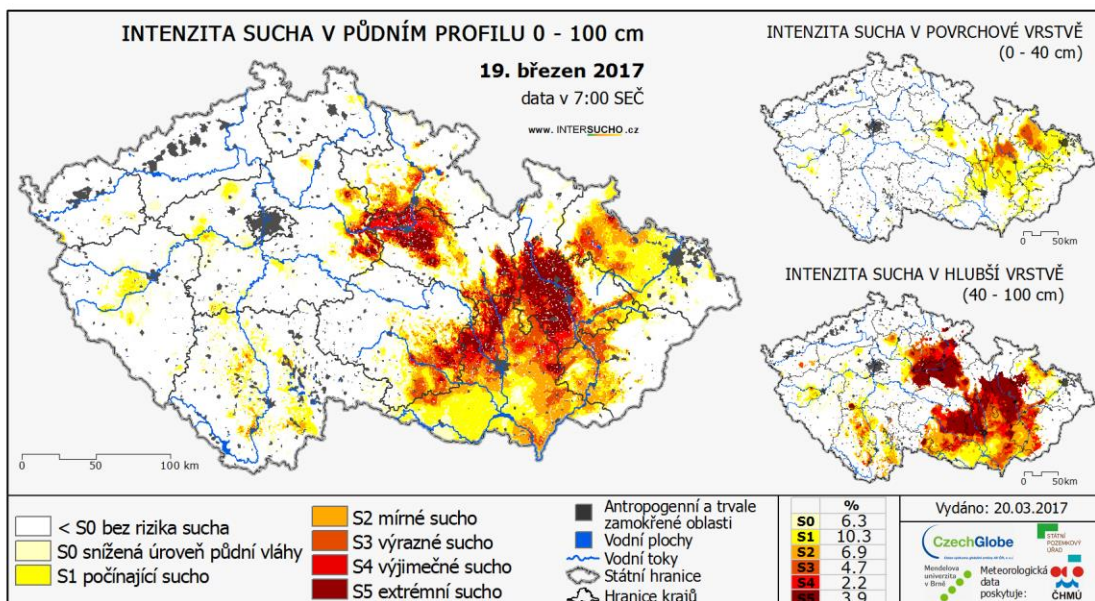
Pro sledování průběžného stavu hladin podzemních vod a jejich prognózy se využívá časových řad s 12 měsíčním cyklem, který koresponduje se sezónním doplňováním podzemních vod. Časové řady spočívají v chronologickém řazení naměřených hodnot v pravidelných intervalech. U minimálních hladin podzemní vody jde o řady minimálních ročních hladin. Na základě analýzy časové řady se dá předpokládat následný vývoj stavu hladiny. K sezónní předpovědi postačí časová řada měsíčních průměrných hladin, k dlouhodobé pak roční průměrné hladiny. Stav sucha je hodnocen podle pravděpodobnosti překročení hladiny ve vrtu v daném měsíci. Minimální stavy hladin se vyskytují u většiny vrtů přibližně každých deset let a absolutní minimum bylo naměřeno v roce 1993 ve vrtu v Baníně ve východních Čechách. Vyhodnocený stav sucha se dělí do tří kategorií a těmi jsou stav mírně podnormální, silně podnormální a mimořádný (ten odpovídá pouze 5% pozorování). Hodnotí se jednotlivý objekt i celá oblast povodí. Stav hladin podzemních vod je pravidelně publikován na portálu ČHMÚ. (Soukalová et Muzikář, 2015)

7.1.3 Integrovaný systém sledování sucha (ISSS)

Projekt intersucho působí od srpna roku 2012 a je založen na více než deseti letech výzkumu v oblasti monitoringu a klimatologie sucha v ČR, Evropě i USA. Vznikl ve spolupráci Českého hydrometeorologického ústavu ČHMÚ, Mendelovy univerzity v Brně (MENDELU) a Centra výzkumu globální změny AV ČR v.v.i. (CzechGlobe). Projekt se zabývá projevem sucha komplexně a na základě údajů o výskytu sucha v minulosti vyvinout nové metody pro jeho monitorování a popsat vývoj sucha do budoucnosti. Jde o mezioborový projekt, součástí týmu jsou i světoví vědci jako je dr. Michael Hayes z USA, ředitel NDMC. Integrovaný systém pro monitorování sucha se zaměřuje na zemědělské a meteorologické sucho, která jsou předstupněm sucha hydrologického a následně i socioekonomického. (ISSS, 2017)

Vstupní data jsou poskytována ČHMÚ na základě výsledků pozemních měření, modelů vodní bilance a dálkových snímků Země a jsou jimi minimální a maximální teploty vzduchu, intenzita slunečního záření, srážky, vlhkost, vzduchu a rychlost větru. Výsledkem je mapa s rozlišením intenzity vlhkosti a to procentuálně či obsahem v půdě v mm. Porovnáva aktuální hodnotu vlhkosti půdy od obvyklého stavu v období 1961-2010 a vyhodnocuje odchylku vyjádřenou stupněm sucha v půdní vrstvě 0-40cm a 0-100 cm a hodnotí mimořádně vzniklé situace. Výsledná hodnota vyjadřuje pravděpodobnost opakování vlhkosti půdy v určitý den. Barevná škála na mapě se přiřazuje ke stupnici od S0 do S5 (obr. 5). Parametry pro celé území se vypočítávají týdně souhrnně pro celé území ČR, pro každý okres zvlášť. (ISSS, 2017)

Jedná se o nový způsob monitorování sucha v ČR. Na webových stránkách nalezneme informace o aktuálním stavu sucha vždy za předešlý den. Z animací a mapových výstupů lze vyčíst a porovnat vývoj sucha na mapách pro jednotlivé týdny, které jsou doplněny různými informacemi jako je popis meteorologického vývoje nebo dokonce o dopadu na zemědělskou produkci. Do budoucna by se měl systém vylepšit ještě dvěma přístupy a to nezávislým družicovým pozorováním kdy budou sezónní odchylky srovnávány s monitorovými výstupy. Za další pak provázanost s monitorovacími sítěmi půdní vlhkosti. Na obrázku níže (obr. 5), je vidět výstup aktuálního stavu sucha pro 19. březen 2017. (ISSS, 2017)



Obrázek 5: Stav sucha v týdnu od 12.3. do 19.3.2017

7.2 Hydrologická sucha v historii

V minulosti nebyla Česká republika kategorizována jako země bezprostředně ohrožená suchem i když se zde sucha objevovala, situace se začala v průběhu posledních desítek let měnit a byla zde zaznamenána historická minima za celou dobu dosavadního přístrojového měření. (Zahrádková et al., 2016)

Sucho postihne téměř každým rokem menší či větší část České republiky. Hydrologické sucho v ČR nastává, pokud průtok ve vodoměrné stanici daného toku klesne pod limit Q_{355} . Od konce 19. století se sledovaly na vodoměrných stanicích údaje o úhrnu denních srážek, průměrné denní teploty vzduchu a denní průtoky. Na základě těchto údajů poskytnutých z ČHMÚ se Treml (2011) ve své práci snaží vymezit sucho. Pro vyhodnocení údajů byla použita metoda nedostatkových objemů, která spočívá ve stanovení období, kdy je průtok menší než stanovený limit na daném toku.

Zaznamenaná sucha z let 1746, 1790 a 1834-1836 jsou vyhodnocena na základě kronikářských zápisů, které byly vyhodnoceny jako spolehlivé a byly využity jako základ pro budoucí zpracování such v Čechách. První vědecké poznatky o suchu se objevují ve 40. letech 19. Století a první vědecká práce věnovaná

problematice sucha je spis Františka Augustina, který byl prvním profesorem meteorologie u nás. (Brázdil et al., 2015)

V letech 1825-1890 chybí denní záznamy pro Prahu, byly však zveřejňovány pravidelně v novinách a tak je možné stavy vypsát. Nejstarší záznamy o minimálních stavech lze u nás vyčíst například z Hladového kamene v Děčíně (obr. 6). (Vlnas et al., 2014)



Obrázek 6: Hladový kámen v Děčíně

7.2.1 Největší sucha zaznamenaná v ČR v letech 1875-2010

V první polovině 20. století byla významná sucha v ČR zaznamenaná v letech 1904, 1911, dále pak 1921, 1947 a 1953. V druhé polovině 20. století se pak díky výstavbě přehradních nádrží podařilo nadlepšovat průtoky vodních toků a tím zmírnit extrémní dopady sucha. V dalších letech se sucha projevila 1983, 1992 a 2003. (Brázdil et al., 2015)

Sucho roku 1904 je hodnoceno na základě informací z ročenky Hydrologické služby, která dosáhla vrcholu v letech 1892-1920. Obsahují informace o hlavních profilech, kterými jsou například Praha a Děčín pro které lze znázornit měrnou křivku. Rok 1904 je nejvýznamnějším případem sucha 20. století hlavně pro povodí Vltavy. Nelze však toto sucho hodnotit komplexně pro celé území ČR, vzhledem k množství chybějících klimatologických dat. V tomto roce se kromě sucha

vyskytovaly i přívalové povodně a nízké vodní stavy se projevily někdy v červnu. Jeho příčinou byl prudký nástup letních teplot a deficit srážek. Na některých úsecích se lze pouze domnívat a odhadovat minima, protože nebyla naměřena. Tento rok je zároveň nejextrémnějším projevem od existence Hydrografické komise, která byla založena roku 1875 jako odezva na sucho z předchozího roku tedy 1874. (Daňhelka et al., 2015; Vlnas et al., 2014)

Významným hydrologickým suchem je rok 1947, které začalo v červenci a to téměř ve stejné době jako meteorologické a skončilo v listopadu téhož roku. Následující roky byly výrazně sušší. V roce 1953 bylo za uplynulé století hydrologické sucho nejextrémnější a to i z důvodu několika předešlých obecně suchých let, kdy k limitnímu průtoku chybělo až 30% vody. Sucho trvalo od srpna do následujícího roku, kdy došlo v březnu k tání sněhu. Celkový počet dní přetrvávajícího sucha byl 229 a nejvíce vody chybělo v Děčíně na Labi. Od druhé poloviny 50. let patří k největším hydrologickým suchům to z roku 1983. Začátky a konce hydrologických such se liší od začátků a konců such meteorologických přibližně o týden, kromě těch hydrologických v zimním období, které jsou ukončeny dříve táním sněhu. (Treml, 2011)

Na základě pohledu do minulosti na výskyt sucha a jeho průběh, jsou informace o vodních stavech důležité pro posuzování sucha a jeho výskytu v budoucnosti. Výzkum hydrologického sucha je velice významný pro vybudování potřebných opatření a předcházení extrémních následků a to nejen budováním staveb ale poznat určitý potenciál rybníčních soustav v krajině. (Brázdil et al., 2015)

7.3 Konkrétní případ sucha, rok 2015

Neopomenutelným suchem, které nedávno postihlo prakticky celé území České republiky, je to z roku 2015. Tento rok byl mimořádně teplý a suchý. Množství spadlých srážek na území ČR byl téměř vyrovnaný. Vzhledem k historickým záznamům ohledně stavů vodních hladin, které jsou k dispozici za posledních zhruba sto let, není zcela možné tuto epizodu sucha porovnávat s těmi předešlými. (Daňhelka et al., 2015)

Srážkový deficit se začal projevovat již ke konci roku 2014, kdy byly na většině území srážkové úhrny podnormální a pokračoval až do léta roku 2015,

kdy již byla krajina dosti vysušená kvůli chybějícím obvyklým jarním srážkám. V průběhu hydrologického roku, který začíná v listopadu a končí v říjnu následujícího roku, spadlo v ČR pouze 500 mm srážek. To je společně s rokem 1973 nejméně za posledních zhruba 55 let. Tlakové výše způsobily, že se do střední Evropy nedostával vlhký vzduch nezbytný pro vznik dešťových srážek. Nedostatek vody v krajině se prohluboval vlnami veder a tím zvýšenou evapotranspirací. Teplota vzduchu byla nejvyšší a srážkový úhrn nejnižší po roce 2003 a to až o 60% oproti normálu. Průměrná roční teplota tohoto roku byla 9,4 °C, což je o 1,9 °C vyšší oproti dlouhodobému ročnímu průměru. V červenci a srpnu bylo mnoho tropických dní s rekordními teplotami. Vrcholem sucha byla polovina srpna, kdy bylo přerušeno vydatnými srážkami, které však nestačily na to, aby období sucha skončilo. Sucho tak pokračovalo až do poloviny října se srážkovým deficitem 180 mm oproti dlouhodobému průměru z let 1981-2010. Ve většině vodních toků se sucho projevilo poklesem hladiny pod úroveň 355denního průtoku již během několika týdnů. V některých regionech vyschly menší toky úplně (obr. 7). Hydrologické sucho bylo způsobeno nedostatkem srážek, velmi vysokou teplotou a výparem z vodních ploch i krajiny celkově. (Daňhelka et al., 2015; Fousová et al., 2015)

Díky vybudování přehrad v 50. letech 20. století se mohly minimální průtoky vodních toků nadlepšovat a to i s udržení minimálního odtoku z nádrží. Co se týče vod podzemních, byly na tom nejhůře severovýchodní Čechy (povodí Labe) a severovýchod Moravy (povodí Odry), kdy stav sucha byl značný až na 60% vrtů a pramenů. Deficit podzemních vod se projevila již na jaře. Sucho roku 2015 je z odtokového hlediska a s porovnáním s historickými suchy podobný tomu z roku 2003. (Daňhelka et al., 2015; Fousová et al., 2015)



Obrázek 7: Stav vodního toku Rusava v části obce Všetuly v povodí řeky Moravy

Vodní deficit ovlivnil hlavně obyvatele v obcích, kde se využívají lokální vodní zdroje pitné vody a individuální zdroje, kterými jsou studny. Zde nastává problém, protože studny nejsou schopny zajistit dostatečný zdroj vody při delším období přetrvávajícího sucha podobně jako vodní nádrže v horních částech toků, kde není dostatečná akumulace vody. Průtoky zde klesly mnohdy na historické minimum a to vedlo k obrovskému zásahu do vodních ekosystémů v okolí. (Punčochář et al., 2015)

Hydrologická situace na území povodí Moravy v červenci roku 2015 taková, že hranice sucha byla dosažena ve 40 profilech na vodních tocích (obr. 9), průtoky se pohybovaly až 30% pod dlouhodobým měsíčním normálem. Nejmenší průtoky byly zaznamenány v povodí řeky Bečvy, Rokytné či Želetavky. Největší pokles vodní hladiny zaznamenala nádrž Vranov a to během července až o 2 m a Vír, kde se pokles blížil ke 3 m. V srpnu se již stav nezhoršoval díky vydatným srážkám, došlo ke krátkodobému zlepšení situace. (Hanáková et al., 2015)



Obrázek 8: Stav hladiny Labe v Ústí nad Labem v červenci 2015

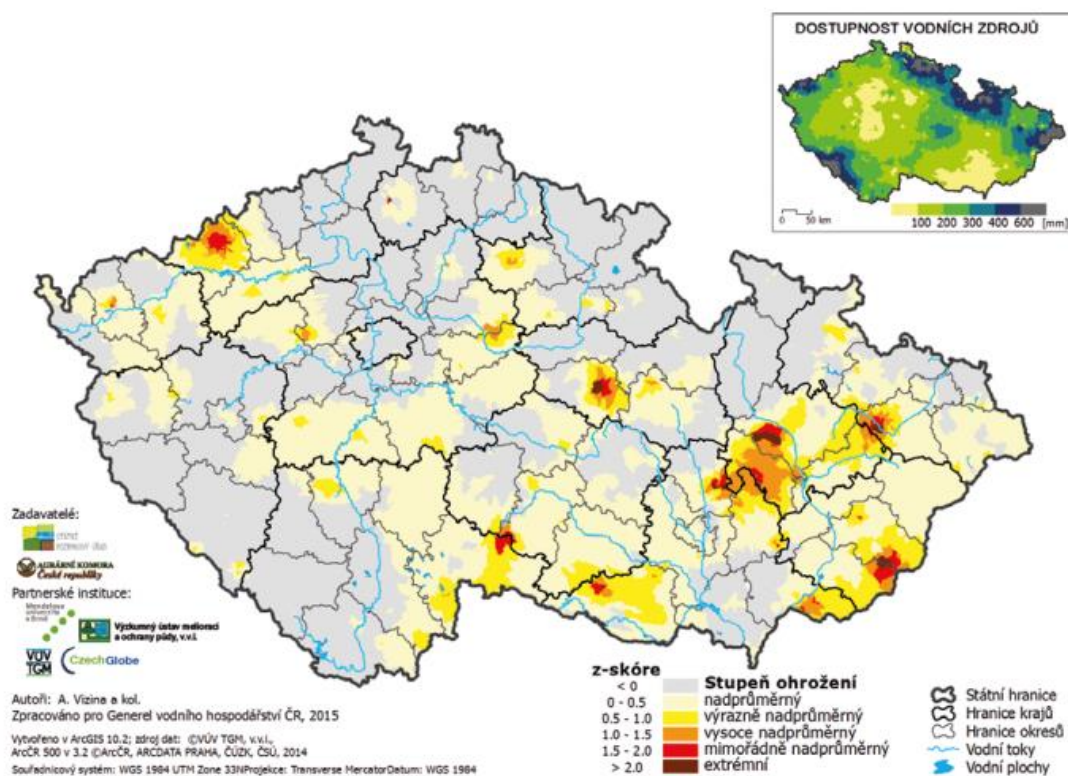
7.3.1 Spojitost hydrologického sucha se zemědělstvím

Veškeré plodiny jsou závislé na klimatických a hydrologických podmínkách jejich pěstování v dané lokalitě. Příčinou vzniku sucha na území ČR je nedostatek srážek v určitém období. V posledních letech roste průměrná teplota ve střední Evropě a to způsobuje hrozící riziko výskytu sucha do budoucna či jeho prohloubení. Dochází také k úbytku vody v půdě v jarních měsících. (Brázdil et al., 2009)

Dle výsledných map z ISSS vyplývá, že podprůměrnou zásobu vody v půdě oproti běžným hodnotám v červenci mělo 83% území jak v povrchové vrstvě, tak v profilu do 1 m. Intenzita sucha dosahovala 50leté až 100leté hodnoty. Po přívalu srážek v polovině srpna se situace na většině území zlepšila, avšak oblasti severní Moravy, Slezska a středních Čech zůstaly stále ohroženy suchem. Součástí ISSS je normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI), který spadá pod metody dálkové detekce pro sledování zemědělského sucha. (Bartošová et al., 2016)

7.3.2 Opatření proti suchu

Zranitelnost a ohroženost území suchem se odvíjí od fragmentace ekosystémů v území a na hustotě obyvatel. V České republice vykazují některé regiony větší riziko ohroženosti suchem a jsou jimi Jihomoravský, Ústecký a Karlovarský kraj a lze zde očekávat největší dopady (Brázdil et al., 2015). Oblasti ohrožené hydrologickým suchem (obr. 10) je na severu Čech okolí Chomutova, dále pak na východě Chrudimsko, na Moravě Olomoucko a Zlínsko a částečně i Znojensko.



Obrázek 9: Oblasti České republiky ohrožené hydrologickým suchem (Punčochář et al., 2015)

V reakci na výskyt jarního sucha roku 2014 začali ministři zemědělství a životního prostředí projednávat návrhy na jednotlivá opatření. Výsledný materiál, který byl vládou schválen v červenci roku 2015, kdy právě vrcholilo sucho, nese název „Příprava realizace opatření pro zmírnění negativní negativních dopadů sucha a nedostatku vody“. Tento materiál má za cíl zahájit dlouhodobé zpracování koncepce k zabezpečení ochrany ČR před ničivými následky sucha. Důležitými podklady je vyhodnocení vodohospodářské bilance, využití a potřeba závlah a odběrů a s tím možná potřeba vybudování akumulčních nádrží, omezení odběrů při určitém stupni sucha. Potřebné údaje pro pracování jsou v databázích s. p. Povodí a u výzkumných ústavů. Na základě toho budou veškeré podklady k této problematice předloženy vládě na konci června roku 2017. To by mělo pomoci v předcházení problémů zejména v zemědělství. (Punčochář et al., 2015; MZe, 2015)

Adaptační opatření proti suchu dle Evropské komise se rozlišují na šedá, zelená a měkká. Mezi šedá opatření lze zařadit technická opatření a stavební úpravy, které mají za cíl ochranu. Jde o budování nádrží, výstavba zařízení na recyklaci

odpadních vod, zařízení k zásobování vodou. Zelená opatření jsou přírodě blízká a patří sem zvýšení retenční kapacity krajiny zachováním remízků a mezí, posílení schopnosti krajiny zadržet vodu revitalizací mokřadů a údolních niv, zakládání zeleně v obcích za účelem zvýšení infiltrace vody do země a velice důležité je zlepšení hospodaření s půdou. Systémová opatření, plány a šíření informací patří do měkkých opatření, jsou to například zlepšení zavlažování, přesná hlásná služba, monitoring sucha, krizové plány a jiné. (Brázdil et al., 2015)

8. DISKUSE

Hydrologické sucho se dostalo do popředí v několika posledních letech, a to zejména vývojem nejrůznějších systémů pro jeho sledování a dostupnost dat i pro širokou veřejnost. V některých státech funguje monitorovací systém na národní úrovni jako například v České republice (Integrovaný systém sledování sucha), a Spojené státy americké (U.S. Drought Monitor). Ten je světově nejznámější a nejúspěšnější vzhledem ke složitosti a náročnosti jednotlivých indexů a ukazatelů pro spolehlivé posouzení výskytu sucha jak uvádí Zink et al. (2016). Jeho doposud jediným problémem je to, že se pokouší zobrazit sucho v několika časových měřítkách v jedné mapě. Systémy využívají i dálkové pozorování Země prostřednictvím nejrůznějších družic. To má svou budoucnost ale je třeba zlepšit propojení s družicovým měřením a to například zapojením družice sledující vodní páry jak ve své práci publikuje AghaKouchak et al. (2015).

Jak se zmiňuje ve své práci Pozzi et al. (2013) a Hao et al. (2014), nejúčinnější by bylo monitorování sjednocené do jednoho globálního systému pro sledování sucha ve všech jeho typech a včasné varování před ním. Pro objektivní fungování takového systému je však nutno sjednotit vhodné indikátory společně se vstupními daty a vytvořit dostatečně hustou síť monitorovacích stanic pro zaznamenávání hydrologických i klimatických údajů po celém světě. Monitorovací a předpovídající technologie musí mít dostatečné rozlišení a identifikovat prostorovou variabilitu případného sucha.

Výběr vhodných indikátorů bude zřejmě složitý a to i z důvodu, který Blinka (2002) zmínil a to, že někteří autoři se domnívají, že využití srážek jako vhodného indikátoru je předmětnější než využívání složitých indexů. Index, který má být aplikován na národní úrovni, musí řešit celkový stav vlhkosti v prostředí, na to upozorňuje Heim (2002).

Monitorování podzemních vod je ještě o něco složitější, protože se zde musí rozlišovat geologická struktura podloží, která značně ovlivňuje hydrologii. Vyvíjí se nové indexy jako například v práci Mendicino et al. (2008), kde byl využit zcela nový index GRI.

9. ZÁVĚR

Monitorování sucha a možnosti jeho předpovědi jsou velice důležité. V předchozím století se sledování hydrologického sucha nevěnovala příliš pozornost, do popředí se toto téma dostalo až přibližně v posledních více jak deseti letech jako odezva nejen na socioekonomické problémy, které sucho přineslo. Spolu s vývojem technologií si společnost uvědomila, že je třeba se výzkumem a projevy sucha zabývat a dosáhnout prostřednictvím nejrůznějších nástrojů počínaje preventivními opatřeními proti nastávajícímu suchu (budování nádrží, závlah atd.) až po ta radikálnější jako je omezení hospodaření s vodou s vidinou předejít tak nedostatku pitné vody pro obyvatelstvo. Tato opatření jsou důležitá hlavně v zemích, které jsou náchylné k výskytům déletrvajícího sucha a chudších státech, kde doposud chybí dostatečné technologie k monitorování sucha.

Práce popisuje některé možnosti sledování sucha, včetně indexů, které jsou využívány a systémy, které se snaží upozornit před možností výskytu hydrologického sucha. Na konkrétním příkladu je vidět, že sucho se projevuje stále a to možná ve větší intenzitě společně se změnou klimatu způsobeného mimo jiné i antropogenní činností. Je zřejmé, že lidé se s ním budou potýkat do budoucna a proto je důležité věnovat této problematice dostatečnou pozornost.

10. PŘEHLED LITERATURY A ZDROJŮ

- AGHAKOUCHAK A., FARAHMAND A., MELTON F. S., ANDERSON M. C. et al., 2015: *Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities*. Reviews of Geophysics, vol. 53, 452-480 s.
- BARTOŠOVÁ L., TRNKA M., HLAVINKA P., SEMERÁDOVÁ D., BALEK J., ŠTĚPÁNEK P., ZAHRADNÍČEK P., MOŽNÝ P., ŽALUD Z., 2016: *Monitoring zemědělského sucha v České republice – průběh suché epizody v roce 2015*. Listy cukrovarské a řepařské, 132 č. 9-10, VUC Praha, 280-284.
- BLINKA P., 2002: *Metoda hodnocení sucha*. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (eds.): XIV. Česko-slovenská bioklimatologická konference, Lednice na Moravě, 32-44, ISBN 80-85813-99-8.
- BRÁZDIL R., TRNKA M. et al., 2015: *Historie počasí a podnebí v českých zemích XI: Sucho v českých zemích: minulost, současnost a budoucnost*. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, v.v.i., Brno, 402 s., ISBN 978-80-87902-11-0.
- BRÁZDIL R., CHROMÁ K., DOBROVOLNÝ P., TOLASZ R., 2009: *Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961-2005*. Int. J. Climatol., 29: 223–242.
- BYUN H., et WILHITE D. A., 1999: *Objective Quantification of Drought Severity and Duration*. J. Climate, 12, 2747–2756.
- CRITCHFIELD, H. J., 1983: *General Climatology*. 4. vyd., Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 453 s., ISBN 0133492176.
- ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV (ČHMÚ), 2017: *Český hydrometeorologický ústav*. Praha, online: <http://portal.chmi.cz/>, cit. 10. 3. 2017.
- DAŇHELKA J., BERCHA Š., BOHÁČ M., CRHOVÁ L., ČERNÁ L., ELLEDER L., et al., 2015: *Vyhodnocení sucha na území České republiky v roce 2015*. Český hydrometeorologický ústav, Praha, 160 s.
- DINGMAN S. L., 2008: *Physical hydrology*. Long Grove, Ill.: Waveland, ISBN 978-1-57766-561-8.

- DUAN K. et MEI Y., 2014: *Comparison of Meteorological, Hydrological and Agricultural Drought Responses to Climate Change and Uncertainty Assessment*. Water Resources Management, 5039-5054.
- ENGELAND K., HISDAL H., BELDRING S., 2006: *Predicting low flows in ungauged catchments*. In: Demuth S, Gustard A, Planos E, Scatena F, Servat E, eds. Climate variability and Change, vol. 308. Wallingford, UK: IAHS Press, 163–168.
- FOUSOVÁ E., REIDINGER J. et al., 2016: *Zpráva o stavu vodního hospodářství České republiky v roce 2015*. Ministerstvo zemědělství, Odbor státní správy ve vodním hospodářství a správy povodí, Praha, 144 s, ISBN 978-80-7434-319-3.
- GUSTARD A., DEMUTH S., TALLAKSEN L., HISDAL H. et al., 2009: *Manual on Low-flow Estimation and Prediction*. Operational Hydrology Report, WMO, Geneva, vol. 50, 136 s.
- HAMEL P. et FLETCHER T. D., 2014: *Modelling the impact of stormwater source control infiltration techniques on catchment baseflow*. Hydrological Processes vol. 28(24), 5817–5831.
- HANÁKOVÁ L., URBÁNKOVÁ L., KUČEROVÁ et al., 2015: *Zpravodaj o vodě*. 3/2015, Povodí Moravy, s.p., Brno, 31 s.
- HAO Z., AGHAKOUCHAK A., NAKHJIRI N., FARAHMAND A., 2014: *Global integrated drought monitoring and prediction system*. Scientific data 1, vol. 140001, online: <http://www.nature.com/articles/sdata20141>, cit. 15. 2. 2017.
- HATMOKO W., RAHARJA B., TOLLENAAR D., VERNIMMEN R., RADHIKA, 2015: *Monitoring and Prediction of Hydrological Drought Using a Drought Early Warning System in Pemali-Comal River Basin, Indonesia*. Procedia Environmental Sciences, vol. 24, 56-24 .
- HEIM R. R., 2002: *A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83, 1149–1165.
- CHAMANPIRA G., ZEHTABIAN G., AHMADI H., MALEKIAN A., 2014: *Effect of Drought on Groundwater Resources; a Study to Optimize Utilization Management (Case Study: Alashtar Plain)*. Bull. Env. Pharmacol. Life Sci., vol. 3, 48-56.

- INTEGROVANÝ SYSTÉM SLEDOVÁNÍ SUCHA (ISSS), 2017: *Integrovaný systém sledování sucha*. Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Brno, online: <http://www.intersucho.cz/cz/>, cit. 19. 3. 2017.
- KNĚŽEK M. et KESSL J., 2000: *Metody výpočtu základního odtoku*. Podzemná voda VI. /2000, č. 2, Slovenská asociácia hydrogeológov, Bratislava, 52-58.
- MENDICINO G., SENATORE A., VERSACE P., 2008: *Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate*. Journal of Hydrology, 357, 282–302.
- MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ (MZe), 2015: *Příprava realizace opatření pro zmírnění negativních dopadů sucha a nedostatku vody*. Voda, eagri.cz, Ministerstvo zemědělství, Praha, online: <http://eagri.cz/public/web/mze/voda/legislativa/dalsi-metodicke-pomucky/zakon-o-vodach/priprava-realizace.html>, cit. 25. 3. 2017.
- NATIONAL DROUGHT MITIGATION CENTER (NDMC), 2017: *The National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln*. Lincoln, online: <http://drought.unl.edu/>, cit. 20. 3. 2017.
- PALMER W. C., 1965: Meteorological drought. Research paper no. 45, National Climatic Data Center, Office of climatology, U.S. Department of commerce, Weather Bureau, Washington, D. C.; 58 s.
- PAVELKOVÁ CHMELOVÁ R. et FRAJER J., 2014: *Základy fyzické geografie 1 - hydrologie*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 131 s., ISBN: 978-80-244-3843-6.
- POZZI W., SHEFFIELD J., STEFANSKI R., CRIPE D., PULTWARTY R., HEIM R. R., SVOBODA M. et al., 2013: *Toward Global Drought Early Warning Capability: Expanding International Cooperation for the Development of a Framework for Monitoring and Forecasting*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 94, 776–785.
- PUNČOCHÁŘ P., ROLEČKOVÁ E., FOUŠOVÁ E., 2015: *Sucho vážná hrozba pro Českou republiku*. Praha, Ministerstvo zemědělství, 22 s.
- SHEFFIELD J. et WOOD E. F., 2012: *Drought: Past Problems and Future Scenarios*. Routledge. New York, 192 s., ISBN 1136540407.

- SIVAKUMAR M. V. K., MOTHA R. P., WILHITE D. A., WOOD D. A., 2011: *Agricultural Drought Indices, Proceedings of an Expert Meeting*. World Meteorological Organization. AGM-11, WMO/TD No. 1572, WAOB-2011, Geneva, 197 s.
- SOBÍŠEK, B. et al., 1993: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Academia, Ministerstvo životního prostředí České republiky, Praha, 594 s., ISBN 80-85368-45-5.
- SOUKALOVÁ E. et MUZIKÁŘ R., 2015: *Hydrologické sucho v podzemních vodách*. VTEI 4-5/2015, VÚV TGM, v.v.i., online: <http://www.vtei.cz/2015/08/hydrologicke-sucho-v-podzemnich-vodach/>, cit. 3. 3. 2017.
- STAGGE J. H., TALLAKSEN L. M., VAN LANEN H. A. J., XU C. Y., 2014: *Standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI): Sensitivity to potential evapotranspiration model and parameters*. Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions Proceedings of FRIEND-Water, Montpellier, France, 367-373.
- SVOBODA M., LECOMTE D., HAYES R., HEIM K., et al., 2002: *The Drought Monitor*. Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 83, 1181–1190.
- SYNÁČKOVÁ M., 2014: *Vodárenství a stokování*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 99 s.
- TALLAKSEN, L. M. et VAN LANEN H. A. J., 2004: *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Developments in Water Science, vol. 48., Elsevier, Amsterdam, 579 s., ISSN 0167-5648.
- THOMAS A. C., REAGER J. T., FAMIGLIETTI J. S., RODELL M., 2014: *A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization*. Geophys. Res. Lett., vol. 41, 1537–1545.
- TRAMBAUER P., MASKEY S., WINSEMIUS H., WERNER M., UHLENBROOK S., 2013: *A review of continental scale hydrological models and their suitability for drought forecasting in (sub-Saharan) Africa*. Physics and Chemistry of Earth, Parts A/B/C; 16-26.

- TREML, P., 2011: *Největší sucha na území České republiky v období let 1875 – 2010*. Meteorologické zprávy, roč. 64, č. 6, 168—176, ISSN 0026-1173.
- TRIZNA M., 2004: *Klimageografia a hydrogeografia*. Geo-grafika, Bratislava, 154 s., ISBN 8096814672.
- TRNKA P., 2010: *Možné důsledky déletrvajících sucha v naší krajině a ve světě*. Ústav aplikované a krajinné ekologie, AF MENDELU, Brno, Online: http://user.mendelu.cz/xvlcek1/rrc/sucho/TRNKA_1.pdf, cit.: 10. 2. 2017.
- VAN LOON, A. F., 2015: *Hydrological drought explained*. WIREs Water 2, 359-392.
- VLNAS R., PAVLÍKOVÁ D., CHALUŠOVÁ J., NOVOTNÁ E. et al., 2005: *Hydrologická bilance množství a jakosti vody České republiky v roce 2004*. Český hydrometeorologický ústav, Úsek Hydrologie, Praha, 44 s.
- VLNAS R., NOVICKÝ O., KAŠPÁREK L., HASNÍK E., et al., 2010: *Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmínkách klimatické změny na území České republiky*. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, v.v.i., Praha, 160 s.
- VLNAS R., HANEL M., VIZINA A. et al., 2014: *Možnosti predikce sucha*. Projekt Návrh koncepce řešení krizové situace vyvolané výskytem sucha a nedostatkem vody na území ČR, VÚV, TGM, Praha, 22 s.
- VLNAS R., BERAN A., HANEL M. et al., 2015: *Návrh koncepce řešení krizové situace výskytu sucha a nedostatku vody v České republice*. Praha, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., 49 s.
- Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 431/2001 Sb., *o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci § 3*, Ministerstvo zemědělství, Praha, online: <http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/tematicky-prehled/100053313.html>, cit. 25. 3. 2017.
- VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA (VÚV TGM), 2017: *Hydrologický model Bilan*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.; online: <http://bilan.vuv.cz/bilan/modely-pro-vypocet-hydrologivke-a-vodohospodarske-bilance/hydrologicky-model-bilan/>, cit. 4. 3. 2017.

WILHITE D. A. et GLANTZ M. H., 1985: *Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions*. Water International, vol. 10, Iss. 3, Elsevier, The Netherlands 111–120.

WILHITE, D. A., 2000: *Drought as a natural hazard: concepts and definitions*. In: Wilhite D. A. (Ed.), *Drought: A Global Assessment*, vol. 1. Routledge, London, 3-18.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), 2006: *Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges*. World Meteorological Organization, WMO - No. 1006, Geneva, 24 s., ISBN 92-63-11006-9.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION et GLOBAL WATER PARTNERSHIP, 2016: *Handbook of Drought Indicators and Indices*. Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva, 45 s.

ZAHRÁDKOVÁ S., HÁJEK O., TREML P., PAŘIL P., STRAKA M., NĚMEJCOVÁ D., POLÁŠEK M., ONDRÁČEK P., 2015: *Hodnocení rizika vysychání drobných vodních toků v České republice*. VTEI 6/2015, VÚV TGM, v.v.i., online: <http://www.vtei.cz/2015/12/hodnoceni-rizika-vysychani-drobnych-vodnich-toku-v-ceske-republice/>, cit. 26. 2. 2017.

Zákon č. 254/2001 Sb., *o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)* § 22, v platném znění.

ZINK M., SAMANIEGO L., KUMAR R., THOBER S., MAI J., SCHÄFER D., MARX A., 2016: *The German drought monitor*. Environmental Research Letters, vol. 11.

Zdroje obrázků:

Obrázek 1: Prolínání sucha v čase. Upraveno dle: National Drought Mitigation Center. University of Nebraska, online: <http://drought.unl.edu/>, cit. 20. 2. 2017.

Obrázek 2: Hydrologický cyklus na Zemi, online: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kolob%C4%9Bh_vody#/media/File:Watercyclecezechhigh.jpg, cit. 20. 2. 2017.

Obrázek 3: U.S. Drought Monitor. United States Drought Monitor, 2017, online: <http://droughtmonitor.unl.edu/>, cit. 26. 2. 2017.

Obrázek 4: Mělké a hluboké vrty na území ČR. Český hydrometeorologický ústav, 2017, online: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_pzv.php.

Obrázek 5: Stav sucha v týdnu od 12. 3. do 19. 3. 2017. Integrovaný systém sledování sucha, online: <http://www.intersucho.cz/cz/o-suchu/jak-sucho-monitorujeme/>, cit. 21. 3. 2017.

Obrázek 6: Hladový kámen v Děčíně, Český hydrometeorologický ústav, online: <http://www.chmuul.org/aktuality/2015-07-hladove-kameny/>, cit. 30. 3. 2017

Obrázek 7: Stav vodního toku Rusava v části obce Všetuly v povodí řeky Moravy. Hanáková et al., 2015: Zpravodaj o vodě. 3/2015, Povodí Moravy, s.p., Brno, 31 s.

Obrázek 8: Stav hladiny Labe v Ústí nad Labem v červenci 2015. Nohl R., Aktuálně.cz, online: <https://zpravy.aktualne.cz/sucho-labe-v-usti-nad-labem-24-72015/r~9e9082f431e111e586d30025900fea04/r~ad6c8dd6385311e589c40025900fea04/>, cit. 30. 3. 2017.

Obrázek 9: Oblasti České republiky ohrožené hydrologickým suchem. Punčochář et al., 2015: Sucho vážná hrozba pro Českou republiku. Praha, Ministerstvo zemědělství, 22 s.