

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování**

**Souvislost teplotních a srážkových charakteristik
letních sezón**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Kyselý, Ph.D.

Autorka: Ivana Dubová

2021

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ivana Dubová

Krajinářství
Vodní hospodářství

Název práce

Souvislost teplotních a srážkových charakteristik letních sezón

Název anglicky

Links between temperature and precipitation characteristics of summer seasons

Cíle práce

Cílem práce je vypracovat rešerši o této problematice a provést základní analýzu průměrné teplotní a srážkové řady pro ČR od r. 1961 s důrazem na letní období. Tato analýza by měla mj. naznačit odpověď na otázku, nakolik jde v případě kladných teplotních odchylek a nedostatku srážek o související jevy.

Metodika

V poslední době je pro střední Evropu typický častý výskyt teplotně výrazně nadnormálních a srážkově podnormálních letních období (např. roky 2013, 2015, 2018). Kombinace vysokých teplot a nedostatku srážek je přitom kritická a může mít velké negativní dopady např. pro zemědělskou produkci, zásobování vodou apod. Práce shrnuje základní poznatky v této oblasti formou rešerše a v praktické části ověřuje souvislost teplotních a srážkových charakteristik zpracováním dat.

Doporučený rozsah práce

40 s.

Klíčová slova

sucho, atmosférické srážky, teplota vzduchu, atmosférická cirkulace, střední Evropa

Doporučené zdroje informací

BRÁZDIL, R. – TRNKA, M. *Historie počasí a podnebí v Českých zemích. Svazek XI, Sucho v Českých zemích : minulost, současnost, budoucnost.* Brno: Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, v.v.i., 2015. ISBN 978-80-87902-11-0.

Hanel, M., Rakovec, O., Markonis, Y., Máca, P., Samaniego, L., Kyselý, J., & Kumar, R. (2018). Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective. *Scientific Reports*, 8(1), 9499. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27464-4>

Hänsel, S., Ustrnul, Z., Łupikasza, E., & Skalak, P. (2019). Assessing seasonal drought variations and trends over Central Europe. *Advances in Water Resources*, 127, 53–75. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.005>

Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y., Hanel, M., & Kumar, R. (2020). Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific Reports*, 10(1), 12207. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>

KOPÁČEK, J. – BEDNÁŘ, J. – ŽÁK, M. – UNIVERZITA KARLOVA. *Jak vzniká počasí.* Praha: Karolinum, 2020. ISBN 978-80-246-4424-0

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. RNDr. Jan Kyselý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Konzultant

Ing. Zuzana Bešťáková

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2021

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. RNDr. Jana Kyselého, Ph.D. Další informace mi poskytla Ing. Zuzana Bešťáková. Prohlašuji, 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 dne 30. 03. 2021

.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu doc. RNDr. Janu Kyselému, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky a motivaci při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji konzultantce Ing. Zuzaně Bešťákové za cenné rady. Zároveň bych chtěla poděkovat svým blízkým přátelům za dodanou podporu při psaní této práce.

V Praze dne 30. 03. 2021

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá souvislostmi mezi teplotními a srážkovými charakteristikami v kontextu problematiky sucha a jeho dopadů. Téma práce je rámováno situací výskytu teplotně výrazně nadnormálních a srážkově podnormálních letních období ve střední Evropě. Text je členěn na dvě hlavní části. První rešeršní část zabývá problematikou sucha v regionu střední Evropy, dále způsoby jeho vymezení a následného měření. Druhá empirická část se věnuje analýze dat naměřených teplot a úhrnu srážek v ČR v období 1961–2020 a to prostřednictvím analýzy datového souboru ČHMÚ. Výsledky z empirické části pak především ukazují, nakolik je významná korelace mezi kladnými teplotními odchylkami a nedostatkem srážek, a to s citlivostí na jednotlivé měsíce.

Klíčová slova: sucho, atmosférické srážky, teplota vzduchu, atmosférická cirkulace, střední Evropa

Abstract

This bachelor's thesis looks at the links between temperature and rainfall characteristics in the context of drought issues and their impacts. The theme of the work is framed by the situation of temperature-significantly above-normal and rainfall-sub-normal summers in Central Europe. The text is divided into two main parts. The first research part addresses the issue of drought in the Central Europe region, as well as ways to define it and then measure it. The second empirical part is devoted to analysing the data of measured temperatures and total precipitation in the Czech Republic during the period 1961-2020, through the analysis of the data set of the ČHMÚ. In particular, the results from the empirical section show the extent to which there is a significant correlation between positive temperature variations and lack of precipitation, with sensitivity to individual months.

Key words: drought, atmospheric precipitation, air temperature, atmospheric circulation, central Europe

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce	2
3	Literární rešerše	3
3.1	Klimatické prvky	3
3.1.1	Sluneční záření	4
3.1.2	Teplota vzduchu	5
3.1.3	Vlhkost vzduchu	6
3.1.4	Atmosférické srážky.....	7
3.1.5	Evapotranspirace	9
3.1.6	Globální cirkulace atmosféry	10
3.2	Definice sucha a jeho typy	10
3.3	Hlavní používané meteorologické indexy sucha.....	13
3.3.1	PDSI	13
3.3.2	Z-index	13
3.3.3	SPI.....	13
3.3.4	SPEI	14
3.4	Příčiny vzniku sucha	14
3.5	Dopady sucha	16
3.6	Shrnutí proměnlivosti charakteristik sucha v Evropě ve 20. století	17
3.7	Možné budoucí scénáře	20
3.8	Souvislost teplotních a srážkových charakteristik se zaměřením na Evropu	22
4	Metodika	23
4.1	Základní použité statistické charakteristiky	23
5	Data.....	24
5.1	Způsob zpracování dat.....	24
6	Výsledky	25
6.1	Proměnlivost teplotních a srážkových charakteristik v období 1961–2020	25
6.2	Modelování souvislosti mezi teplotou a úhrnem srážek.....	27
6.2.1	Měsíční data	27
6.3	Chod teplotních a srážkových charakteristik letních a zimních sezón	31
7	Diskuze	35
8	Závěr a přínos práce.....	37
9	Přehled literatury a použitých zdrojů.....	38

1 Úvod

Sucho a jeho dopady jsou stále častěji diskutované v odborné i veřejné sféře. Jeden z možných způsobů, jak zkoumat dopady sucha, se nabízí prostřednictvím zmapování teplotních a srážkových charakteristik. Tato bakalářská práce se proto zaměřuje na zmapování souvislostí mezi teplotními a srážkovými charakteristikami, a to právě v kontextu stále naléhavější a častěji diskutované problematiky sucha a jeho dopadů. Kontext zvoleného tématu práce je rámován situací výskytu teplotně výrazně nadnormálních a srážkově podnormálních letních období ve střední Evropě. Ačkoliv je tento stav primárně nahlížen jako problematika environmentální, předmětem výraznější pozornosti se mu v sociálním prostředí dostává především kvůli jeho přímým a závažným socioekonomickým dopadům.

Z hlediska struktury je text této bakalářské práce rozdělen do dvou hlavních ucelených částí. První část, pod názvem literární rešerše, podává přehled o aktuálním poznání dané problematiky, kterou je možné získat ze studia odborných publikací. Zaměřuje se pak zejména na uchopení pojmu sucho, jeho typologizaci a představení nejčastěji využívaných meteorologických indexů sucha. Pojednává o příčinách vzniku sucha a o jeho dopadech. Shrnuje proměnlivostní charakteristiky sucha v průběhu času na evropském kontinentu a zobrazuje možné predikce na základě možných modelových scénářů. V závěru pak shrnuje dostupné poznatky o souvislosti teplotních a srážkových charakteristik. Z geografického hlediska je část literární rešerše omezena na evropský kontinent se zaměřením na region střední Evropy.

Druhá část této bakalářské práce (empirická část), se pak věnuje deskriptivní statistické analýze datového souboru ČHMÚ obsahujícího údaje o teplotách a úhrnu srážek v ČR mezi lety 1961–2020. Nejprve je uvedena a popsána využívaná metodika, popis datového souboru a způsob zpracování dat, následně jsou prezentovány výsledky z analýzy datového souboru, na základě kterých je přistoupeno k diskusi stěžejních zjištění. Z geografického hlediska je empirická část zúžením oproti literární rešerši a analyzuje pouze data z území ČR. Výhodou geografického zúžení je homogenita datového souboru, ve kterém všechna data pocházejí z jednoho zdroje (jedné instituce), čímž je možné uvažovat vyšší srovnatelnost dat uvnitř datového souboru.

2 Cíle práce

Cíle této bakalářské práce lze rozpracovat a přehledně strukturovat do následujících bodů:

- vypracovat rešerši o problematice teplotních a srážkových charakteristik
- provést základní statistickou analýzu průměrné teplotní a srážkové řady pro území České republiky v časovém období mezi lety 1961 – 2020 se zaměřením na letní období.
- Na základě provedené analýzy naznačit odpověď na otázku, nakolik jde v případě kladných teplotních odchylek a nedostatku srážek o související (korelující) jevy.

3 Literární rešerše

3.1 Klimatické prvky

V zemské atmosféře neustále dochází k fyzikálním procesům, které ovlivňují veškerý život na planetě. Stav atmosféry na určitém místě v daném čase je označován jako *počasí* a charakterizuje jej vysoká proměnlivost (Kopáček et al., 2020). Pro popis počasí je zavedena meteorologická terminologie, jejímž prostřednictvím dochází především k bližšímu zkoumání teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu. Důležité je také věnovat se vzniku atmosférických srážek, evapotranspiraci¹, slunečnímu záření a slunečnímu svitu a v neposlední řadě také oblačnosti, rychlosti a směru větru (Vysoudil, 2013). Meteorologické prvky mohou být měřené nebo pozorované (meteorologické jevy). Vedle meteorologických prvků stojí prvky klimatické, na které se, vzhledem k povaze zkoumání klimatu, pohlíží z dlouhodobější perspektivy. Na základě klimatických prvků se určuje *podnebí*, tj. dlouhodobý (průměrný) režim počasí v dané oblasti (Kopáček et al., 2020). Jinak řečeno, podle meteorologického slovníku jsou klimatické prvky statistické charakteristiky odvozené z meteorologických prvků s využitím pro klimatologické účely (Meteorologický slovník, 2021).

Jedním z nejdůležitějších parametrů, který se zohledňuje při každém meteorologickém měření, je čas, respektive časový interval, ve kterém je daná veličina měřena. Pro možnost zachování komparace v dlouhodobém časovém horizontu je klíčová standardizace měření spolu s udržení ustálených konvencí a postupů. Spolu s důrazem na validitu a reliabilitu měření je možné naměřené výsledky adekvátně interpretovat včetně různých způsobů srovnání pozorovaných jevů.

V klimatologii se rozlišují tři druhy časů. Základní čas, který se využívá v běžném životě, se nazývá lokální pásmový čas (na našem území konkrétně středoevropský čas SEČ²). Lokální čas byl vytvořen pro usnadnění běžného života a je nastaven dle geografické polohy státu. Vzhledem k jeho účelné povaze je měření v lokálním pásmovém čase přibližné a slouží spíše k prvotní orientaci či interpretaci měření v jiných časech (ČHMÚ, 2003). Pro synoptická (synchronní) měření je však nezbytně

¹ Celkový výpar vody vztažený k určitému území. Více viz kapitola 3.1.5

² V mezinárodně užívané anglické terminologii pak CET- (Central European Time)

nutné, aby probíhala na celém světě ve stejný okamžik. Proto byl zaveden Světový koordinovaný čas (UTC³), který není ovlivněn rotací Země (Meteorologický slovník, 2021). U třetího způsobu práce s časem v klimatickém měření se primárně zohledňuje, aby měření probíhala ve stejné fázi dne (např. denní teplota). K tomu slouží místní střední sluneční čas (MSSČ) (ČHMÚ, 2003).

Klimatické prvky tedy ovlivňují nejen atmosféru, ke které jsou vztaženy, ale i hydrosféru, kryosféru, pevný povrch Země, biosféru a antroposféru. Tyto systémy spolu ve vzájemné interakci tvoří úplný klimatický systém (Vysoudil, 2013). Vzhledem k zaměření práce a stanoveným cílům se budu dále podrobněji věnovat slunečnímu záření, teplotě a vlhkosti vzduchu, atmosférickým srážkám, evapotranspiraci a také globální cirkulaci atmosféry.

3.1.1 Sluneční záření

Pro komplexnější pochopení klimatologického systému je třeba do uvažování zahrnout také energetickou bilanci Země, jejíž příčinou je záření. To může být dvojího typu: krátkovlnné a dlouhovlnné záření. Sluneční záření (krátkovlnné záření), využívá zdroj z energie v atmosféře. Naopak záření dlouhovlnné je způsobeno tepelným vyzařováním Země i atmosféry (Meteorologický slovník, 2021).

Intenzita slunečního záření je definována jako množství radiace, (vyzařované či dopadající), vztažená na kolmo orientovanou jednotkovou plochu za jednotku času. Při střední vzdálenosti Země od Slunce je celková intenzita slunečního záření na horním okraji atmosféry Země přibližně $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (Kopáček et al., 2020). Tato hodnota se nazývá solární (sluneční) konstanta. S intenzitou souvisí také insolace, respektive potenciální insolace. Potenciální insolace značí množství přímé sluneční radiace na horním okraji atmosféry dopadající na horizontální jednotkovou plochu. Na velikost potenciální insolace má vliv výška Slunce, resp. zenitový úhel Slunce. Čím větší je zenitový úhel Slunce (čím je Slunce výše na obloze), tím bude plocha, na kterou sluneční záření dopadá, menší, a tudíž bude celková potenciální insolace vyšší. Průměrnou insolaci na povrchu Země pak určíme jako průmět Země (zjednodušeně

³ Universal Time Coordinated

kouli) na plochu. Dostáváme tak průměrnou hodnotu potenciální insolace $342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (tamtéž). Tato hodnota je dále snížena o absorpci záření atmosférou (20 %), odraz a rozptyl (30 %) a k samotnému povrchu se dostává v průměru 50 %, tj. $171 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (tamtéž).

Zemský povrch i atmosféra sluneční radiací energii získávají a to prostřednictvím dlouhovlnného záření. V případě atmosféry se jedná o vyzařování záření do vesmíru a zpětné záření atmosféry. To je obvykle nižší než záření, které vyzařuje povrch Země. Rozdíl mezi zpětným zářením atmosféry a vyzařováním zemského povrchu označujeme jako efektivní vyzařování (Kopáček et al., 2020).

Průměrné množství energie na horním okraji atmosféry (po zohlednění ztrát souvisejících s albedem) je rovno přibližně $235 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (tamtéž). Při takové vstupní radiaci by průměrná teplota na Zemi byla $-18 \text{ }^\circ\text{C}$. Tato teplota bývá označována jako efektivní teplota Země. Důležitou roli zde proto hraje tzv. skleníkový efekt atmosféry, při kterém dochází k selektivní absorpci záření, což má dva významné následky – zvyšuje průměrnou teplotu na Zemi přibližně o $33 \text{ }^\circ\text{C}$ a zároveň snižuje denní amplitudu teploty (Kopáček et al., 2020).

Do energetické bilance atmosféry ještě vstupují dva neradiační toky energie – zjevné a latentní teplo, které souvisí s uvolňováním tepla při fázových přechodech vody (Vysoudil, 2013).

3.1.2 Teplota vzduchu

Teplota vzduchu udává tepelný stav ovzduší. Zdrojem energie pro ohřev vzduchu je přímá absorpce slunečního záření spolu s příjmem tepla od zemského povrchu. K ohřevu vzduchu, v důsledku slunečního záření, dochází zejména ve vyšších vrstvách atmosféry, zatímco u zemského povrchu je tento způsob v konečném důsledku nevýznamný. Většinový podíl energie získává vzduch od zemského povrchu. Mezi zemským povrchem a vzduchem dochází k radiační a tepelné výměně (Kopáček et al., 2020).

Kolísání teploty vzduchu se vyznačuje periodicitou, která může být na bázi denního či ročního chodu. Při denním chodu teploty rozlišujeme denní maximum a minimum.

Denní maximum nastává mezi 14. a 15. hodinou MSSČ, denní minimum pak obvykle kolem východu Slunce (Kopáček et al., 2020). Z klimatologického hlediska je roční chod teploty považován za jednu z nejvýznamnějších charakteristik daného místa (Kopáček et al., 2020). Pro střední Evropu je charakteristické rozložení teplot minimem v lednu a maximem v červenci. Na velikost roční amplitudy má vliv zeměpisná šířka, vzdálenost od moře, nadmořská výška a tvar reliéfu zemského povrchu (Kopáček et al., 2020).

Teplota vzduchu, jejíž měření se realizuje v meteorologické budce, se měří ve výšce 2 m nad zemí, přičemž teploměr musí být zajištěn tak, aby nebyl vystaven větru a přímému slunečnímu záření. Oproti tomu přízemní teplota vzduchu se měří ve výšce 5 cm nad zemským povrchem či sněhovou pokrývkou (Meteorologický slovník, 2021). Poté následuje vyhodnocení naměřených hodnot teploty vzduchu, v němž je pozornost soustředěna na průměrnou, maximální a minimální hodnotu teploty pro dané časové období (nejčastěji den, měsíc a rok) (Vysoudil, 2013). Jinak řečeno „základní charakteristikou teploty vzduchu je průměrná denní teplota t_d “ počítaná dle vzorce
$$t_d = \frac{T_7 + T_{14} + 2 \cdot T_{21}}{4}$$
, kde dolní indexy naměřené teploty odpovídají hodině jejího měření MSSČ (Vysoudil, 2013). Tento popsáný způsob výpočtu je užíván v ČR. Dále rozlišujeme také hrubý odhad průměrné denní teploty (průměr maximální a minimální denní teploty) a pravý denní průměr teploty, počítaný z hodinových záznamů měření (Meteorologický slovník, 2021).

3.1.3 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu vyjadřuje množství vodní páry v atmosféře (Vysoudil, 2013). Charakteristiky vlhkosti vzduchu mohou být jak závislé, tak i nezávislé na teplotě vzduchu. Mezi silně závislé charakteristiky vlhkosti spadá: tlak (napětí) vodních par, relativní (poměrná) vlhkost vzduchu a sytostní doplněk (deficit vlhkosti). Naopak mezi charakteristiky nezávislé na teplotě patří absolutní vlhkost vzduchu (hustota vodní páry), směšovací poměr a měrná specifická vlhkost. Významnou charakteristikou vlhkosti vzduchu je rosný bod, resp. teplota rosného bodu (Vysoudil, 2013). Kolísání vlhkosti vzduchu, ať už v denním či ročním chodu, je značně ovlivněno teplotou

vzduchu. Relativní vlhkost tedy závisí na teplotě, nicméně i v létě můžeme naměřit relativní vlhkost vysokou (pocit dusna).

Dalším prvkem, který spolu tvoří významnou složku vzduchu, je vodní pára. Vzduch může obsahovat až 4% vodní páry. Vodní pára je rovněž nejdůležitější skleníkový plyn. Kapacita vzduchu pro vodní páru (neboli tlak nasycené vodní páry) je exponenciálně závislá na teplotě vzduchu. K nasycení vodní páry ve vzduchu může dojít třemi způsoby; zaprvé izotermicky (tj. zvýšením množství vodní páry ve vzduchu), dále adiabatickým rozpínáním (kdy nenastává tepelná výměna mezi vodní párou a vzduchem) anebo posledním způsobem, a to izobaricky (za situace konstantního tlaku) na teplotu rosného bodu (Vysoudil, 2013).

Teplota rosného bodu je při relativní vlhkosti pod 100 % vždy menší než teplota vzduchu. Zároveň rozdíl mezi teplotami je nepřímo úměrný relativní vlhkosti vzduchu. Pokud by tedy teplota vzduchu klesla na teplotu rosného bodu, začne docházet ke kondenzaci vodní páry. Tímto způsobem dochází ke vzniku nízké oblačnosti, mlhy či rosy.

3.1.4 Atmosférické srážky

Atmosférické srážky, též nazývané hydrometeory, značí „*částice vzniklé následkem kondenzace vodní páry v ovzduší a vyskytující se v kapalně nebo pevné fázi v atmosféře, na povrchu země nebo předmětech v atmosféře*“ (Kopáček et al., 2020). Atmosférické srážky se dělí na padající (vertikální) a usazené (horizontální). Mezi nejběžnější vertikální srážky se řadí déšť. (Užívané je také dělení dle skupenství srážek). Srážky mohou být trvalého a plošného charakteru, tzn. vznikají ve stratiformní (vrstevnaté) oblačnosti (nimbostratus, altostratus), nebo mohou být náhle tvořené konvektivní oblačností (cumulonimbus) v podobě přeháněk či bouřek (Vysoudil, 2013).

Výskyt vertikálních srážek ve střední Evropě v období nízkých teplot, (tj. především v zimních měsících) můžeme sledovat v podobě sněhu, který může tvořit sněhovou pokrývku. Jelikož je tepelná vodivost sněhu nízká, slouží sněhová pokrývka jako ochrana půdy před silnými mrazy. Na druhou stranu sníh odráží vysoký podíl

krátkovlnného slunečního záření a zároveň sám vyzařuje dlouhovlnné záření, v důsledku čehož dochází k ochlazení povrchu sněhu i okolního vzduchu. (Kopáček et al., 2020). V posledních obdobích však přibývá dešťových srážek v zimním období na úkor těch sněhových, popřípadě dochází k tání sněhové pokrývky brzy na jaře (Barnett, et al. 2005). Důsledkem toho je pak nedostatečné zásobení vodních zdrojů pro následné vegetační období (Brázdil et al., 2015). Mezi vertikální srážky dále patří kroupy, mrholení, sněhové krupky, virga apod. (Vysoudil, 2013).

Příkladem horizontálních srážek je rosa, která vzniká kondenzací vodní páry radiačním ochlazením zemského povrchu, kdy teplota vzduchu klesne na teplotu rosného bodu. Mezi usazené srážky se rovněž řadí jinovatka, námraza, ledovka a jiné (Vysoudil, 2013).

Atmosférické srážky jsou tedy nedílnou součástí hydrologického cyklu a představují jeden z jeho nejvýznamnějších zdrojů vody. Pro střední Evropu, která spadá do mírného klimatického pásu, jsou charakteristické vydatnými letními srážkami. Oproti tomu v zimním období je úhrn srážek nižší (Kopáček et al., 2020).

Při měření srážek se zjišťuje především srážkový úhrn a intenzita. Úhrnem srážek se rozumí výška vodního sloupce v mm na jednotku plochy. Intenzita srážek pak vyjadřuje úhrn srážek za určitý časový interval. Měření atmosférických srážek probíhá staničním měřením (přízemní staniční měření) nebo distančně (pomocí radarů, družic, sodarů apod.). Jak již bylo zmíněno, na základě času dělíme přízemní staniční měření na synoptické (měření probíhá ve stejném okamžiku) klimatologické (ve stejné fázi dne) a srážkoměrné (měřen je úhrn srážek k předchozímu dni v 7 hodin MSSČ). (Kopáček et al., 2020).

Vznik vodních kapek v zemské atmosféře je podmíněn kondenzací vodní páry (Vysoudil, 2013). Z energetického hlediska je velmi náročné, vytvořit z vodní páry první kapku. Proto je nutná přítomnost kondenzačních jader například v podobě aerosolu či ledových krystalků (Kopáček et al., 2020). Aerosolem se rozumí prachové částice obsažené ve vzduchu, a to přírodního i antropogenního původu. Může jimi být například půdní či kosmický prach, vulkanický popel, produkty spalování apod (Kopáček et al., 2020).

Oblačnost tedy vzniká při nasycení vzduchu vodní párou a spolu s přítomností kondenzačních jader v atmosféře. Kopáček et al. (2020) na základě empirických zkušeností tvrdí, že „v reálné atmosféře dochází ke kondenzaci prakticky ve všech případech, kdy je dosaženo stoprocentního nasycení vodní páry vůči rovnému vodnímu povrchu“. V momentě, kdy oblačná částice dosáhne kritické velikosti, její pádová rychlost pak v důsledku tíhové síly „převýší rychlost vzestupných pohybů vzduchu v oblaku“ a částice pak padá směrem k zemskému povrchu ve formě vertikálních srážek (Kopáček et al., 2020).

3.1.5 Evapotranspirace

Evapotranspirace je souhrnné označení evaporace a transpirace, které představují výpar vody neboli fyzikální proces změny skupenství vody z kapalného na plynné. V případě transpirace mluvíme o výparu vody z rostlin, evaporace pak označuje výpar ze zemského povrchu. V našich zeměpisných šířkách převažuje transpirace nad evaporací (Máca, 2014). Evapotranspirace může být aktuální či potenciální. Aktuální evapotranspirace je skutečné množství odpařené vody, zatímco potenciální evapotranspirace udává maximální množství vody, které se může z půdy či vegetace odpařit. Potenciální evapotranspirace je vždy vyšší než evapotranspirace aktuální. Evapotranspirace spolu s atmosférickými srážkami jsou součástí hydrologického cyklu. Tento cyklus, někdy též zvaný hydrologický systém (Máca, 2014; Dooge, 1973), znázorňuje koloběh vody na zemi.

V konečném důsledku hydrologický systém popisuje koloběh vody na Zemi, kdy atmosférické srážky představují zdroj vody, jež ve formě deště či sněhu dopadnou na zemský povrch. Tato voda je poté svedena částečně do toků a následně zaústěna do oceánů, a částečně dochází k infiltraci vody do půdy, čímž se zásobují podzemní vody. Výparem, ke kterému dochází na zemském povrchu (evapotranspirace) i nad oceánem, se voda dostává zpět do atmosféry. Pokud omezíme hydrologický cyklus pouze na zemský povrch, jedná se o malý hydrologický cyklus (Máca, 2014; Dooge, 1973).

3.1.6 Globální cirkulace atmosféry

Globální cirkulaci atmosféry se rozumí souhrnné označení „*všech základních typů vzdušného proudění v atmosféře. Zahrnuje meridionální, zonální a vertikální výměnu vzduchu*“ (Vysoudil, 2013). Meridionální cirkulace probíhá podél poledníků, zonální (západní) cirkulace podél rovnoběžek.

Globální cirkulace atmosféry úzce souvisí s cirkulací oceánu. V důsledku toho dochází k přenosu tepla a vyrovnávají se potenciální rozdíly teplot mezi rovníkem a póly. Hlavními mechanismy cirkulace je právě geografická nerovnováha radiační bilance Země spolu s rotací Země, která je dále ovlivněna třením vzduchu o zemský povrch, nehomogenitou zemského povrchu a poklesem teploty s výškou (Vysoudil, 2013).

Pro střední Evropu je charakteristické, že převládá zonální typ atmosférické cirkulace nad meridionálním. Zonální proudění se projevuje přílivem relativně teplého a vlhkého vzduchu z Atlantiku v zimním období. V letních měsících z Atlantiku naopak přináší relativně chladný a vlhký vzduch. Samotná meridionální cirkulace, (v důsledku cirkulace v poledníkovém směru) může přinášet do Evropy jak velmi chladný arktický vzduch, tak i velmi teplý subtropický vzduch (Vysoudil, 2013).

3.2 Definice sucha a jeho typy

Základní a v široké veřejnosti nejrozšířenější definice sucha by mohla znít takto: Sucho je nedostatek vody. Uchopení tohoto pojmu ale není zdaleka tak jednoduché. Proto existuje celá řada přístupů, které se zabývají problematikou vymezení sucha. Ty nejčastější jsou níže popsány.

Mezi nejznámější a pravděpodobně nejpoužívanější definici pojmu sucha patří definice od Wilhite, & Glantz (1985), kteří sucho dělí do dvou kategorií – koncepční a provozní. Koncepční definice se snaží o vymezení hranic konceptu sucha, avšak nemůžeme ji aplikovat při posuzování stavu sucha v reálném čase. Oproti tomu provozní definice je založena na měřitelných hodnotách a definuje tak nástup,

závažnost a ukončení epizody sucha. Tyto hodnoty pak mohou být podkladem pro různé analýzy.

Odlišným způsobem nahlíží na problematiku formulace definice sucha Brázdil et. al. (2015), který definuje sucho jako „*zápornou odchylku vodní bilance od klimatického normálu v dané oblasti během určitého časového intervalu,*“ přičemž jako hlavní důvod vzniku sucha uvádí deficit srážek. Zohledňuje také ostatní meteorologické veličiny, jako například teplotu vzduchu, sluneční záření, evapotranspirace apod., které mají nezanedbatelný vliv na intenzitu sucha. Publikace také dodává, že dle Lloyd-Hughese (2013) se při definici pojmu sucha nesmí opomenout zásobu vody v půdě, aktuální potřebu vody a následné hospodaření s vodou.

Oproti tomu Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) definuje sucho jako „*neurčitý, avšak v meteorologii a klimatologii často užívaný pojem, znamenající v zásadě nedostatek vody v atmosféře, půdě či rostlinách*“. Poukazuje zároveň na fakt, že nahodilé sucho může být, díky své nepředvídatelnosti, velmi nebezpečné.

V této souvislosti můžeme zmínit také dokument Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky (2017), vydané Ministerstvem životního prostředí, ve kterém mají pojmy sucho a nedostatek vody odlišný význam. Pracuje se zde totiž s předpokladem, že rozdíl mezi nedostatkem vody a suchem spočívá ve faktu, že sucho je dočasný přirozený jev projevující se zápornou odchylkou od průměrného množství srážek, zatímco nedostatek vody je jev umělý, způsobený jejím nadměrným užíváním vzhledem k přirozené obnovitelnosti vodní kapacity. Krom různých přístupů k definicím sucha můžeme také uvažovat o typech sucha.

Tradičně je na prvním místě uváděno **Meteorologické sucho**, v některých publikacích označované jako klimatické. Způsobuje jej nedostatek atmosférických srážek, respektive je možné jej vyjádřit jako zápornou odchylku množství srážek od normálu (tj. dlouhodobého průměru počítaného z určitého období například z let 1961–2010), vztaženou k danému území. Meteorologické sucho nastává první a poté se samo stává příčinou vzniku a nástupu dalších typů sucha. Příčiny vzniku meteorologického sucha bývají zpravidla komplexního charakteru, jelikož jsou ovlivněny různými faktory. Jako jeden z možných příkladů vzniku meteorologického sucha je možné uvažovat kombinaci dlouhodobého výskytu tlakových výší, spolu s vyšší teplotou vzduchu a vyšším výparem. To má za následek nedostatek atmosférických srážek (MŽP, 2017).

Často skloňovaným termínem bývá **zemědělské sucho**, které Brázdil et al. (2015) definuje nedostatkem vláhy pro rostliny a lesní porosty, přičemž doba jeho trvání se pohybuje v řádech měsíců. Dodává, že zemědělské neboli půdní sucho, je charakterizováno dalšími meteorologickými prvky jako například teplotou vzduchu, rychlostí větru, slunečním zářením či retenční a infiltrační vlastností půdy. Naopak ČHMÚ (2021) zemědělské sucho a půdní sucho rozlišuje. Vychází totiž z předpokladu, že sucho půdní, je zároveň předpokladem výskytu sucha zemědělského. Na zemědělské sucho má přirozeně nezpochybnitelný vliv také člověk a jeho každodenní aktivita.

Dalším možným přístupem v typologii sucha je **Hydrologické sucho**, které se vyznačuje úbytkem vody ve vodních tocích, nádržích a zvodnělých vrstvách (Brázdil et al., 2015). Nástup hydrologického sucha je relativně pomalý, oproti suchu zemědělskému či meteorologickému. Stejně pomalá, ne-li pomalejší, je následná obnova vodního režimu oblasti zasažené hydrologickým suchem. V této fázi sucha začíná klesat kvalita vody a voda přestává být snadno dostupnou (Hanel & Vizina, 2014b).

V neposlední řadě je třeba zmínit také **Socioekonomické sucho**, které nastává jako poslední ze všech zmiňovaných typů sucha, přičemž ve své naléhavosti nabývá na čím dál větší intenzitě. Nedostatek vody se totiž stává již problémem společenským, a to v celosvětovém měřítku. Není náhoda, že v poslední době se ve veřejném prostoru čím dál častěji vyžadují environmentální témata, která upozorňují na rostoucí spotřebu vody, která není udržitelná vzhledem k obnovitelnosti přírodních zdrojů. Nedostatek vody (ať už uvažujeme o vodě pro zavlažování a průmysl, či nedostatek vody pitné) bude s největší pravděpodobností jedním z hlavních důvodů pro budoucí migrační krize z environmentálních důvodů (Maystadt & Mueller, 2012). Stále rostoucí míra globalizace bude tento jev ještě umocňovat.

3.3 Hlavní používané meteorologické indexy sucha

Pro lepší zmapování výskytu sucha s možnou detailnější analýzou bylo třeba hledat způsoby jeho vymezení a následného měření pro následné srovnání a standardizaci. V průběhu druhé poloviny dvacátého století bylo zavedeno více různých sumarizačních indexů. Nyní budou ty nejpoužívanější z nich blíže představeny.

3.3.1 PDSI

Palmerův index intenzity sucha PDSI vytvořil Palmer (1965). Základem Palmerova indexu je rozdělení půdního profilu na dvě vrstvy, přičemž nasycení spodní vrstvy, zvané kořenové, je podmíněno plným nasycením vrstvy svrchní neboli ornice. V momentu nasycení obou vrstev vodou dochází k povrchovému odtoku, který se tak promítne do výpočtu indexu (Palmer, 1965). Vstupními hodnotami jsou srážky, teplota a využitelná vodní kapacita. Hodnoty PDSI pohybují v intervalu od -4 do +4, kdy záporné hodnoty značí extrémně suchá období a kladné hodnoty extrémně vlhká období (Palmer, 1965). Nevýhodou PDSI je jeho odlišné chování na různých lokalitách. To vedlo Wells et al. (2004) k modifikaci Palmerova indexu. Vznikl tak SC-PDSI, který se automaticky kalibruje na základě empirických konstant dané lokality (Wells et al., 2004).

3.3.2 Z-index

Z-index vychází z Palmerova indexu. Jedná se o bezrozměrný index udávající aktuální půdní vlhkost, resp. její odchylku (Palmer, 1965). Z-index je tak nezávislý na předchozím stavu půdy a je proto vhodným indikátorem krátkodobého sucha. Využívá se zejména v případě sucha zemědělského (Brázdil et. al., 2015).

3.3.3 SPI

Standardizovaný srážkový index SPI vytvořil kolektiv autorů pod vedením McKee et al. (1993). Funguje na principu transformace srážkových úhrnů na normální rozdělení. Tomu předchází aproximace srážkových úhrnů, nejčastěji gama rozdělením (McKee

et al., 1993). Jedná se o relativně jednoduchý index, jehož jedinou vstupní hodnotou jsou zmiňované úhrny srážek. Jelikož tento index neuvažuje změny teploty vzduchu ani evapotranspiraci, nemůžeme jej aplikovat na měření sucha jako takového. Nicméně SPI je užitečným ukazatelem deficitu atmosférických srážek (Lloyd-Hughes et al., 2002). Hodnoty SPI se pohybují v intervalu od -2 do +2, kdy záporné hodnoty značí extrémně suchá období a kladné hodnoty extrémně vlhká období. SPI je možné použít v časovém měřítku 3, 6, 12, 24 a 48 měsíců (Brázdil et. al., 2015).

3.3.4 SPEI

Standardizovaný srážkový evapotranspirační index SPEI zavedli Vicente-Serrano et. al (2010) ve snaze vylepšit SPI. SPEI vychází z SPI a zahrnuje v sobě již také údaje o teplotě, díky čemuž je srovnatelný s SC-PDSI (Vicente-Serrano et. al, 2010).

3.4 Příčiny vzniku sucha

Při snaze objasnit příčiny sucha, před námi vyvstane velice komplexní a složitý fenomén, pro který není možné nalézt jednoduché a univerzálně platné řešení (Büntgen et al. 2021), jelikož se jednotlivá sucha vyznačují unikátním časoprostorovým vymezením jako například předcházející půdní vlhkost či charakteristika povodí (Parry. 2012). Nicméně jak již bylo dříve zmíněno, mezi hlavní faktory ovlivňující vznik, intenzitu a rozsah sucha je možné řadit teplotu vzduchu, atmosférické srážky, evapotranspiraci, půdní vlhkost a atmosférickou cirkulaci. Primární příčinou sucha je deficit atmosférických srážek, který se projevuje ve formě meteorologického sucha. S nízkými úhrny srážek souvisí jejich rozložení v průběhu roku. Spolu s čtenějším výskytem extrémních srážek ve střední Evropě (Berg et al., 2013; Rulfová et al., 2017; Knist 2020; Gvoždíková et Müller, 2021) dochází k vzniku suchých období (Brázdil et al., 2009). V souvislosti s příčinami vzniku sucha se nabízí uvažovat o následujících fenoménech.

Významný vliv na výskyt velmi suchých epizod má v první řadě atmosférická cirkulace (Lhotka et al., 2020). Například pro vegetační období v letech 1948-2018 byl patrný významný rostoucí trend výskytu suchých cirkulačních typů a zároveň

klesající trend vlhkých cirkulačních typů (tamtéž). Na území střední Evropy je v souvislosti se sledováním vlivů na teplotu vzduchu a srážkové úhrny pečlivě sledována Severoatlantská oscilace (North Atlantic Oscillation NAO) (Brázdil et al., 2015). Podstatou souvislosti NAO a rozložením srážek během roku se dále zabývají práce Yao & DeHai (2014), Ding et al. (2017) a Hao et al. (2018). Analogicky jako pacifické El Niño je NAO v Evropě i v Asii jedním z hlavních spolučinitelů změn klimatických prvků (Wang et al., 2019).

Spolu s mapováním příčin vzniku sucha se nabízí sledovat také výskyt těchto extrémních událostí. Ty mohou souviset s tzv. atmosférickým blokováním, které se ve střední Evropě projevuje vyššími teplotami, především na jaře (Brunner, 2017), a může zapříčinit vlny veder v letním období (Ionita 2017, Büntgen et al. 2021). Na základě synoptického vývoje nad Evropou v letech 1850–2015 uvedl Brázdil et al. (2015) jako vhodnou podmínku pro klasifikaci výskytu suchých období rozložení tlaku vzduchu v letních měsících.

Jako další faktor, ovlivňující sucho, bývá uváděna interakce mezi půdou a atmosférou (Whan et al., 2015; Zhou et al., 2019), zejména souběžně se vyskytující půdní sucho a atmosférická aridita (míra suchosti podnebí) mohou mít závažný dopad na intenzitu sucha (Zhou et al., 2019). Zároveň při extrémních teplotách roste potenciální evapotranspirace, což jen posiluje účinek již tak silného sucha (Whan et al, 2015, Spinoni et al, 2015, Hänsel et al, 2019, Ionita, 2017). Intenzita sucha v letním období je rovněž ovlivněna srážkovými poměry na jaře (Whan et al, 2015). V důsledku vysušení půdy již půda není schopna pojmout vodu (například prostřednictvím přívalových srážek). Proto tedy voda rychle odtéká z postiženého místa povrchovým odtokem a následně dochází k její absenci v inkriminovaných místech. (tamtéž).

V poslední době můžeme sledovat častější výskyt tzv. sdružených jevů a to v podobě extrémních suchých a zároveň horkých období (Sedlmeier et al., 2018.; Lanfredi et al., 2020; Mukherjee et al., 2020). Sdružené jevy je možné velmi dobře pozorovat například v České republice (Sedlmeier et al., 2018). Úvahám o souvislosti mezi výskytem suchých epizod v kombinaci s vlnami veder a atmosférickou cirkulací se věnuje práce Mukherjee et al., (2020) s názvem Compound drought and heatwave CDHW, a to rovněž v souvislosti s různými typy oscilací (El Nino Southern Oscillation ENSO, Pacific Decadal Oscillation PDO a NAO). Studie dochází k závěru, že NAO

souvisí s CDHW relativně slabě. Oproti tomu ENSO a CDHW vykazuje silnou spojitost během letního období na jižní polokouli. Tento vliv zasahuje v letním období i do střední Evropy (Mukherjee et al., 2020). K obdobnému závěru dospěli také Schubert et al. (2016).

O příčinách vzniku sucha není možné uvažovat bez lidské činnosti spolu s jejím zásahem do krajiny. Takový zásah může tendence ke vznikajícím obdobím sucha znatelně umocňovat. Příkladem může být úprava vodních toků (napřimování, prohlubování), meliorace zamokřeného území, snižování rozlohy lužních lesů či zatopení údolí v důsledku staveb vodních nádrží (Brázdil, et al. 2015). V této souvislosti má nezanedbatelný vliv na sucho rovněž nevhodné zemědělství, se kterým je spojená eroze půdy, dále odlesňování oblastí pro zemědělskou aktivitu a z toho následně také rostoucí spotřeba pitné vody (tamtéž). V globálním měřítku se zase uvažuje například o rostoucí koncentraci skleníkových plynů, jež umocňují sucho atmosférickým blokováním (Büntgen et al., 2021).

3.5 Dopady sucha

Sucho má řadu negativních ekologických, ekonomických i společenských dopadů na život na Zemi (Büntgen et al., 2021). Z ekologického hlediska se spolu s atmosférickou ariditou jedná o dva stěžejní fyziologické stresory, v jejichž důsledku dochází k vadnutí až usychání vegetace a s tím souvisejícímu snížení absorpce uhlíku na Zemi (Zhou et al., 2019). K vadnutí vegetace dochází rovněž v důsledku poklesu zásoby vody v půdě, což je kritické především pro vegetační období v zemědělském a lesnickém hospodářství (Brázdil et al., 2015). Zároveň nedostatečná půdní vláha vede k odumírání stromů i častějším požárům (Hänsel et al., 2019). Tento jev je problematické především proto, že stromy jsou důležitými zásobníky uhlíku na zemi, který se pak uvolňuje zpět do atmosféry.

Z pohledu zemědělství můžeme sledovat dopady sucha na snížení výnosů zemědělské produkce a dále na degradaci půdního prostředí, kdy půda není schopná plnit svoji funkci v maximální míře (Brázdil et al., 2015). Jedním z hlavních degradačních procesů je zasolení půd, při kterém se vlivem sucha zvyšuje koncentrace rozpuštěných solí. Přímoou úměrou tak roste osmotický tlak na kořenový systém rostlin, které

v důsledku toho usychají. Na zasolování půd nesou svůj podíl také nekvalitní průmyslová hnojiva, obsahující vyšší množství solí nebo závlahová voda spojená rovněž s nižší kvalitou. Dalším z faktorů degradující půdu je větrná či vodní eroze (tamtéž).

Dehumifikace je též nezanedbatelným procesem, znehodnocujícím zemědělskou půdu. Půda totiž přichází o svou organickou složku, která má význam pro její správné fungování, příznivě ovlivňuje například infiltrační schopnost půdy. Dehumifikace nastává intenzivním obděláváním půdy a je podporována vodní a větrnou erozí, odvodněním i mineralizací půdy. České půdy jsou středně ohrožené erozí z více než 60 %, vysoká až velmi vysoká erozní ohroženost půdy nastává v 7,6 % (Brázdil et al., 2015). Ohrožením zemědělské půdy je bezprostředně dále zasažen potravinářský průmysl a to primárně v důsledku výpadků sklizně (Ahmed et al., 2020; Fink et al., 2004; Hänsel et al., 2019).

Z pohledu vodního hospodářství se pak sucho projevuje snížením stavů vodních toků (Hänsel et al., 2019; Fink et al. 2004), což působí komplikace v oblasti vodní dopravy. Suchem je rovněž zasažena také řada odvětví průmyslu a výroba energie (Hänsel et al., 2019).

3.6 Shrnutí proměnlivosti charakteristik sucha v Evropě ve 20. století

Pro komplexnější popis charakteristiky sucha se nejčastěji volí vymezení prostřednictvím doby trvání, rozsahem a celkovou závažností suché události. V této souvislosti se jako nejvhodnější nástroj jeví souhrnné časoprostorové charakteristiky sucha (Vidal et al., 2012). Proto budeme následně postupovat chronologicky.

Jako nejextrémnější dlouhotrvající sucha v Evropě za posledních 250 let, která se zároveň projevují kombinací sucha meteorologického, zemědělského a hydrologického, označil Hanel et al. (2018) období 1945–1955. Jeho inovativnost spočívá v provedení analýzy, ve které srovnal charakteristiku such ze současnosti a historických dat. Doložil také, že rekonstrukce 250 let hydrologického a půdního

sucha v Evropě odpovídá historickým záznamům rozsáhlých such z let 1858-59, 1921-22 a 1953-1954 na alespoň 20 % studované oblasti.

Dalšími důležitými mezníky, v souvislosti s proměnlivostním charakterem sucha v Evropě, jsou považovány roky 2003 a 2015. Na základě hodnot ze dvou stanic s dlouhodobými měřeními – Hohenpeissenberg (jižní Německo) a Basel-Binningen (Švýcarsko) předložil Fink, et al. (2004) analýzu synoptické situace z léta 2003. Léto 2003 bylo dle studie nejteplejší od začátku pozorování, tj. od roku 1755, nicméně nebylo nejsušší. Přesto byl ale rok 2003 zasažený slabou úrodou a extrémně nízkými stavy toků v rozsáhlých částech Evropy. Abnormální sluneční svit v létě 2003 a výrazné snížení latentního tepla vlivem vysoké evapotranspirace zapříčinilo v srpnu 2003 vlny veder (Fink, et al., 2004). Rovněž lze uvažovat o existenci paralely mezi evropským suchem 2003 a kalifornským suchem v letech 2012–14 (Hanel et al., 2018).

Významná evropská sucha 2003 a 2015 i přes svůj extrémní rozsah v dlouhodobém měřítku markantně nevyčnívají (Hanel et al., 2018). Na stranu druhou však rok 2015 odstartoval sled událostí letních such v Evropě, který nemají za dvě tisíciletí obdoby (Büntgen et al., 2021). Z klimatologického hlediska je léto 2015 považováno za nejteplejší a nejsušší léto ve východní Evropě od roku 1950. Zároveň patří mezi šest nejteplejších a nejsušších let za stejné období na území celé Evropy. (Ionita, et al., 2017) Od roku 2000 je patrná rostoucí tendence výskytu nejsušších a nejteplejších letních období. Vlny veder v létě 2015 vykazují úzkou souvislost s atmosférickým blokováním a dráhami tlakových níží (Schär et al., 2004, Ionita, et al., 2017; Brunner et al., 2017).

Letní období sucha, zejména v jižní a východní Evropě, by mohla souviset s teplejším Středozezemním mořem (Ionita, M. et al., 2017). Tuto souvislost předkládá studie kompozitní analýzou, jejímž výsledkem byla úzká souvislost mezi povrchovou teplotou SST (Sea surface temperature) Středomoří a výskytem suchých a horkých letních sezón ve východní Evropě v období 1950–2015. Souvislost mezi teplejším Středozezemním mořem a letními suchy bylo možné pozorovat při použití indexu SPEI3, a to se zpožděním 25 dní. Tyto výsledky by mohly být využity i k předpovědi sucha v Evropě (Ionita et al., 2017).

Vztahem mezi atmosférickou cirkulací a četností sucha se zabývali také Trnka et al. (2009), Lhotka et. al. (2020). Jako možný předpoklad vzniku sucha předložili Trnka et al. (2009) souvislost mezi vyskytujícími se cirkulačními typy a týdenními anomáliemi indexů půdní vlhkosti. Nejvíce patrný je tento jev v raném vegetačním období duben-červen. Ve studii se autoři zaměřili na časové rozložení epizod sucha v České republice. Pro lepší porozumění interakcím mezi frekvencí výskytu sucha a atmosférickou cirkulací byl při výpočtu indexů sucha použit týdenní časový krok oproti měsíčnímu (Trnka et al., 2009).

V roce 2002 představili Lloyd-Hughes et al. (2002) odlišný pohled na prostorové rozlišení klimatologie evropského sucha 20. století. Tato studie mapuje sucho během let 1901-99 na území celé Evropy. Podle srovnání trendů hodnot SPI a PDSI bylo zjištěno, že časoprostorové charakteristiky sucha v Evropě se v minulém století nepatrně změnily. Zároveň větší náchylnost k suchu vykazuje vnitrozemí Evropy oproti přímořským oblastem. Výsledky této studie potvrzuje i Van der Schrier et al. (2006).

Severovýchodní Evropa vykazovala posun průměrných hodnot indexů SPI a PDSI k vlhčím podmínkám, zatímco Středovýchodní Evropa, spolu se západním Ruskem, měla tendence k častějšímu výskytu sucha. Významnost trendů byla nejvyšší během období zima-jaro, nejnižší naopak v období léto-podzim (Lloyd-Hughes et al., 2002). To odpovídá i výsledkům ve studii (Alexander et al. 2006).

V roce 2015 představili Brázdil et al., (2015) studii, která se zabývá výskytem jednotlivých období sucha v širších souvislostech spolu se zaměřením na Českou republiku. Autoři tvrdí, že *„lze identifikovat zvyšující se intenzitu výskytu sucha na našem území v posledních dekáдах.“* Ukazují, že trend jarních a letních teplot od 80. let 20. století má výrazně rostoucí tendenci (Brázdil et al., 2009), obdobně jako trend rychlosti tání ledovců (Fink et al., 2004). V důsledku toho pak tedy dochází k dřívějšímu nástupu jara (Cassou & Cattiaux 2016; Brunner, et al. 2017), což má negativní dopad nejen na vegetační období (Brunner et al., 2017; Hari et al. 2020). K oteplování jako takovému nicméně dochází v průběhu celého roku (Alexander et al., 2006).

Stoupající trend průměrné teploty ve střední Evropě podporuje zvyšující se potenciální evapotranspiraci, čímž dochází k závažnějším obdobím sucha. Dá se tak předpokládat zvýšený výskyt extrémních událostí, a to jak suchých, tak srážkových (Hänsel et al., 2019; Lanfredi et al. 2020).

Tomu odpovídají také závěry práce Hegerl et al. (2011). Kombinace deficitu srážek, extrémních teplot a vysychající půdy má velký význam při posuzování dopadů sucha. Vzájemným působením těchto charakteristik dochází k závažnějším dopadům, než kdyby tyto charakteristiky působily jednotlivě (Hegerl et al., 2011). Významné dopady potvrzuje studie Vidal et al. (2012), ze které vyplývá, že časoprostorové charakteristiky sucha budou během 21. století výrazně růst, zejména u zemědělského sucha. Hanel et al. (2018) Poukazují také na patrný rostoucí trend zemědělského sucha, naopak meteorologické sucho dle této studie vykazuje trend klesající.

Pro úvahy o reálném důsledku sucha je rovněž důležité uvažovat o jeho plošném rozsahu, kdy se meteorologické sucho projevuje rychleji, v návaznosti na množství a intenzitu srážek, a jeho průběh je dynamičtější. Oproti tomu sucho zemědělské se vyznačuje pomalejším nástupem, ale zároveň i delší dobou trvání (Hanel et al., 2018).

3.7 Možné budoucí scénáře

Jelikož je s fenoménem sucha úzce spjata kvalita života na zemi, nabízí se uvažovat o suchu v prognostické perspektivě, a to v souvislosti s jeho budoucím vývojem. Cílem je tvorba emisních scénářů, které by co nejspolehlivěji odhadly množství skleníkových plynů. Proto byly zavedeny tzv. emisní scénáře, které fungují jako modely budoucího vývoje při naplnění vstupních parametrů (jako například využívané zdroje energie a jejich dostupnost, sociodemografické charakteristiky atp.), které jsou v každé variantě scénáře odlišné. V současné době se uvažují reprezentativní směry vývoje koncentrací (Representative Concentration Pathways, RCP), které předpokládají různý (v závislosti na použitém scénáři) radiační ovlivnění (forcing) na energetickou bilanci Země v důsledku koncentrace CO₂ a dalších skleníkových plynů v atmosféře. Rozlišují se 3, resp. 4 hlavní RCP scénáře: RCP2.6, RCP4.5 a RCP8.5 (popř. RCP6),

kde hodnota RCP scénáře udává pravděpodobné radiační ovlivnění po roce 2100) (Hanel & Vizina, 2014a).

Hanel et al. (2018) uvádí, že mezi jednotlivými scénáři nedochází k významnému rozdílu růstu teploty do roku 2050. Ta v období 2021–2040 pravděpodobně stoupne přibližně o 1,0 °C oproti současným hodnotám. Naopak po roce 2050 jsou již prognózy znatelně odlišné v závislosti na použitém emisním scénáři. Ze scénářů RCP2.6, RCP4.5 a RCP8.5 vychází Hari et al. (2020) a Štěpánek et al. (2016). Dle scénáře RCP 8.5 se očekává podstatný nárůst četnosti extrémních událostí sucha po roce 2050 (Hari et al., 2020). Zajímavý pohled přináší také závěr Štěpánka et al. (2016), který tvrdí, že emisní scénář RCP8.5 pro období 2081–2100 předpovídá každoroční počet tropických dnů srovnatelný s rokem 2015 na území ČR, které je (jak již bylo zmíněno výše) považováno za nejteplejší a nejsušší léto ve východní Evropě od roku 1950 (Ionita et al., 2017).

Dle studie (Štěpánek et al., 2016) do konce 21. století stoupne teplota v České republice o 2,0 °C pro RCP4.5 a o 4,1 °C pro RCP8.5. Pro RCP2.6 autoři nepředpokládají růst teplot od roku 2060, naopak se objevují náznaky podporující klesání teploty (Štěpánek et al., 2016; Hari et al., 2020). Pro území střední Evropy navíc platí, že při mírných a středních scénářích (RCP2.6 a RCP4.5) je výskyt extrémních událostí sucha nižší, čehož by se dalo využít ve snaze eliminovat rizika budoucích such (Hari et al., 2020).

Spolu s vyššími teplotami vzduchu se očekává i nárůst srážkových extrémů (Štěpánek et al., 2016), z čehož dále vyplývá, v souvislosti se změnou rozložení srážek (Brázdil et al., 2009; Knist et al. 2020), i souběžný nárůst suchých epizod. V období 2021–2040 je předpovídán nárůst srážek 7 % vůči současném stavu pro RCP4.5 a 6 % pro RCP8.5, na konci 21. století pak 13 % (RCP4.5) a 16 % (RCP8.5). Nejvyšší růst teploty vzduchu a srážek je předpokládán v zimních obdobích (Štěpánek et al., 2016).

3.8 Souvislost teplotních a srážkových charakteristik se zaměřením na Evropu

S ohledem na předchozí shrnutí proměnlivosti charakteristik sucha v Evropě by se dalo uvažovat o hlubších souvislostech mezi srážkovými a teplotními charakteristikami. Při pohledu na průběžné výskyty období sucha a jejich analýzy lze důvodně předpokládat vzájemný vztah srážkových a teplotních charakteristik (Hegerl et al., 2011, Hänsel et al., 2019). Vzhledem k cílům práce se dále souvislost teplotních a srážkových charakteristik zaměřuje na oblast střední Evropy.

Pro území střední Evropy je v poslední době (zejména pro roky 2013, 2015 a 2018) z klimatologického hlediska patrný výskyt teplotně nadnormálních a zároveň srážkově podnormálních letních sezón. Nedávný sled evropských letních období sucha od roku 2015 nemá v posledních dvou tisíciletích obdoby (Büntgen et al., 2021). V současnosti trend úhrnu srážek sice mírně roste (Alexander et al., 2006; Brázdil et al., 2009; Knist et al., 2020), nicméně dochází k výrazným změnám v rozložení a frekvenci srážek (Brázdil et al., 2009; Knist et al., 2020). Přibývá tak extrémních událostí, a to v důsledku konvektivních srážek spolu se srážkově podnormálními obdobími (Knist et al. 2020, Brázdil et al., 2009). V souvislosti s výskytem extrémních srážek v Evropě se uvažuje o souvislosti mezi časoprostorovým rozložením extrémních srážek a toky vlhkosti (moisture fluxes) (Gvoždíková et Müller, 2021).

V této souvislosti lze uvést, že na rostoucí teplotu citlivěji reagují konvektivní srážky oproti stratiformním (Berg et al., 2013), jak je uvedeno výše i ve studiích Brázdil et al. (2009) a Knist et al. (2020). Rozdílům mezi stratiformními a konvektivními srážkami se v současné době věnuje práce Rulfová et al. (2021). V ní autoři dochází k závěrům, že stratiformní srážky, spojené především se severovýchodním typem atmosférické cirkulace, odpovídají teplým dnům a nocím v zimním období, zatímco po zbytek roku souvisejí s chladnými dny. Sdružené jevy (compound events) významných konvektivních srážek se vyskytují především spolu s teplými dny v letním období (Rulfová et al., 2021).

V současné době nic nenasvědčuje tomu, že by se rostoucí trend teploty spolu se změnami rozložení srážek měl markantně měnit (Štěpánek et al., 2016; Knist et al. 2020; Rulfová et al., 2021).

4 Metodika

4.1 Základní použité statistické charakteristiky

V následující empirické části této bakalářské práce jsou využity především základní zavedené nástroje deskriptivní statistiky⁴. Podrobněji jsou jednotlivé metody popsány například zde Hanel & Vizina (2014b).

Jako vstupní data byly použity průměrné měsíční hodnoty teploty a úhrnu srážek v letech 1961–2020 na území ČR. Vzhledem k charakteru používaných dat (především z hlediska jejich distribuce) se jeví jako vhodný nástroj pro vyrovnání časových řad klouzavý průměr.

V situaci, kdy se sleduje závislost mezi úhrnem srážek a teplotou, se jeví jako smysluplné (vzhledem k zaměření na střední Evropu) postupovat v analýze dle ročních sezón. Proto tedy v následné analýze dochází ke kategorizaci dat dle ročních období. V sezónním přehledu analýzy extrémů jsou využívané pojmy jako absolutní maximum, které určuje nejvyšší naměřenou hodnotu v časové řadě, a blokové maximum, jež rozděluje data do námi předem stanovených bloků, ve kterých se pak uvažuje o samostatných jednotlivých naměřených maximech (Hanel & Vizina, 2014b).

Souvislost mezi naměřenými teplotami a úhrnem srážek na sledovaném období byla prokazována prostřednictvím Pearsonova korelačního koeficientu (r), který může nabývat hodnot $\langle -1, 1 \rangle$ (v R–Studiu funkce *cor*). Ten byl také testován z hlediska jeho statistické významnosti, a to na základě stanovených testovacích kritérií. V tomto případě bylo použito pro ověření statistické významnosti obvyklé t-rozdělení (tzv. Studentovo rozdělení se stupni volnosti $n-2$, kdy je p hodnota stanovena v intervalu spolehlivosti při hladině významnosti $\alpha = 0,05$ pro následné kritérium zamítnutí nulové hypotézy o nezávislosti výše uvedených proměnných) (Hanel & Vizina, 2014b). K tomu byla v prostředí R–Studia použita funkce *cor.test*.

⁴ Aritmetický průměr, klouzavý průměr, medián, směrodatná odchylka, rozptyl, variační koeficient, mezikvartilové rozpětí IQR, variační rozptyl.

5 Data

Analýza souvislosti teplotních a srážkových charakteristik byla provedena datech na území České republiky. Podkladem pro analýzu byly naměřené průměrné měsíční teploty vzduchu a měsíční úhrny srážek za období 1961–2020. Při srovnání úhrnu srážek v čase využíváme srovnání s dlouhodobým srážkovým normálem 1981–2010. Pro práci byla použita volně dostupná data Českého hydrometeorologického ústavu.⁵

5.1 Způsob zpracování dat

Zpracování dat proběhlo v prostředí R-Studio, ze kterého byly též exportovány veškeré grafy uvedené v této práci. V datovém okně byly jako vstupující proměnné definovány rok (year), měsíc (month) spolu s následnou kategorizací, průměrná měsíční hodnota teploty vzduchu ve stupních Celsia (temp) a měsíční úhrn srážek v mm (precip). Pro každý měsíc/sezónu byl vytvořen graf souvislosti teplotních a srážkových charakteristik, přičemž bylo zachováno jednotné značení. Pro tvorbu přehlednějších tabulek byl následně využit kromě software R také MS Excel.

⁵ Dostupnost dat

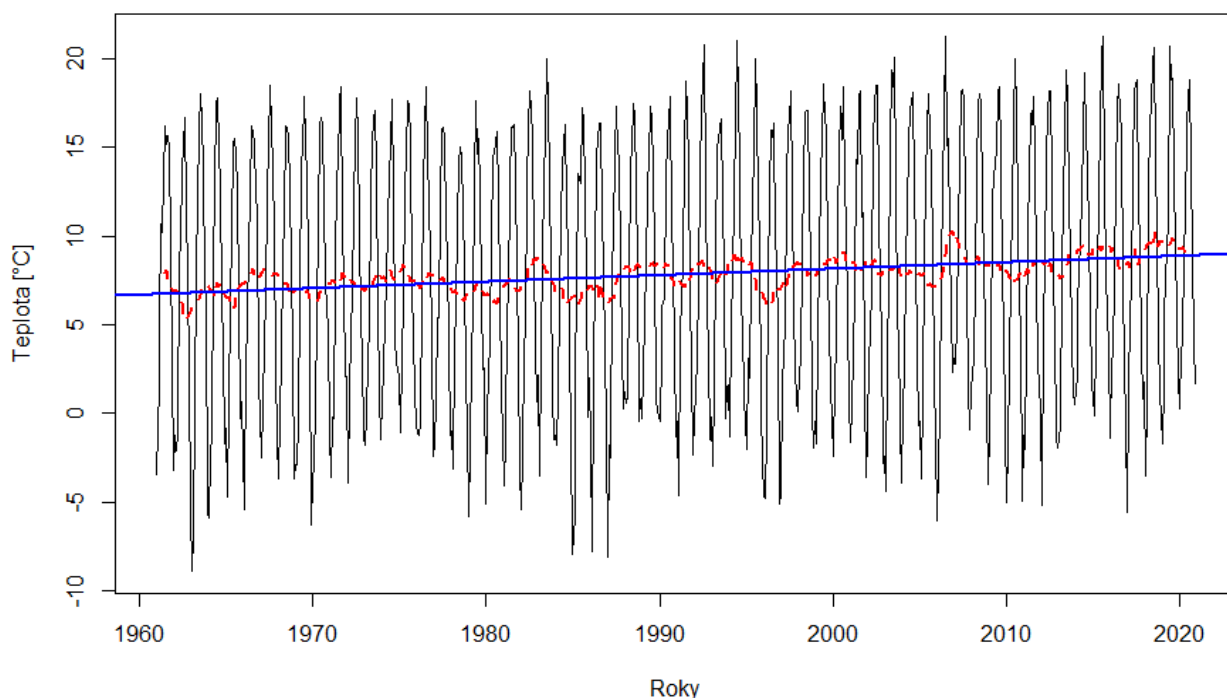
Data – Územní teploty: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty>

Data – Územní srážky: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky>

6 Výsledky

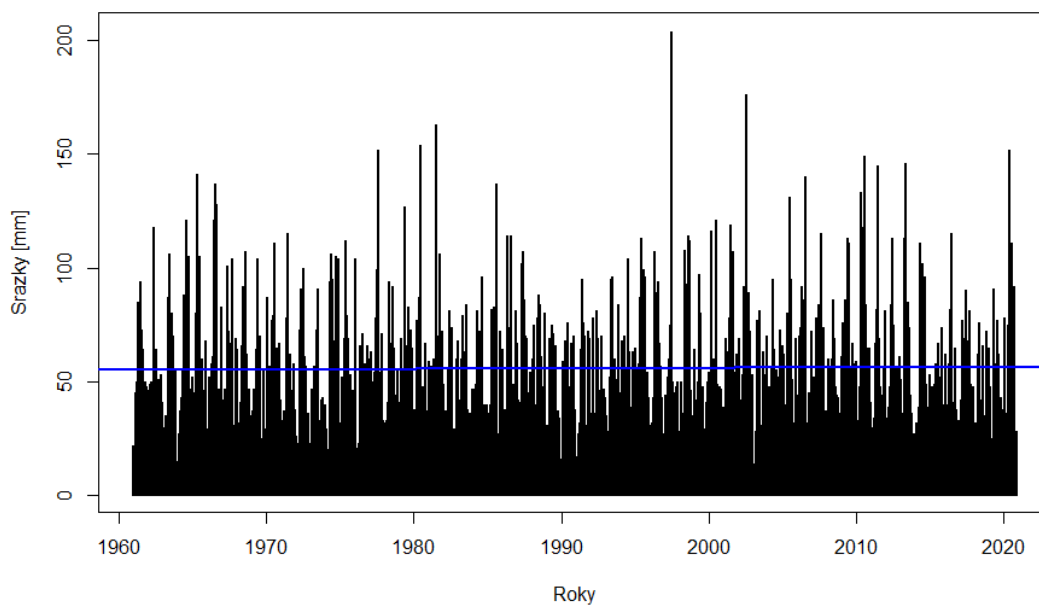
6.1 Proměnlivost teplotních a srážkových charakteristik v období 1961–2020

Primární analýza proměnlivosti teplotních a srážkových charakteristik spočívá v zobrazení průběhu jednotlivých charakteristik. Obr. 1 znázorňuje graf průběhu průměrných měsíčních teplot v období 1961–2020. Modrá přímka značí trend a červená křivka znázorňuje roční klouzavý průměr. Z grafu je patrné, že dochází k rostoucímu trendu teploty.



Obr. 1: Graf průběhu měsíčních teplot za období 1961–2020. Modrá přímka značí trend teploty, červená křivka značí roční klouzavý průměr délky 12.

Dále byl vytvořen hyetogram měsíčních úhrnů srážek za období 1961–2020 (Obr. 2). Úhrn srážek je ve zkoumaném období prakticky neměnný. Trend je pro ilustraci v grafu znázorněn modrou přímkou.



Obr. 2: Hyetogram měsíčních úhrnů srážek za období 1961–2020. Modrá přímka značí trend úhrnů srážek.

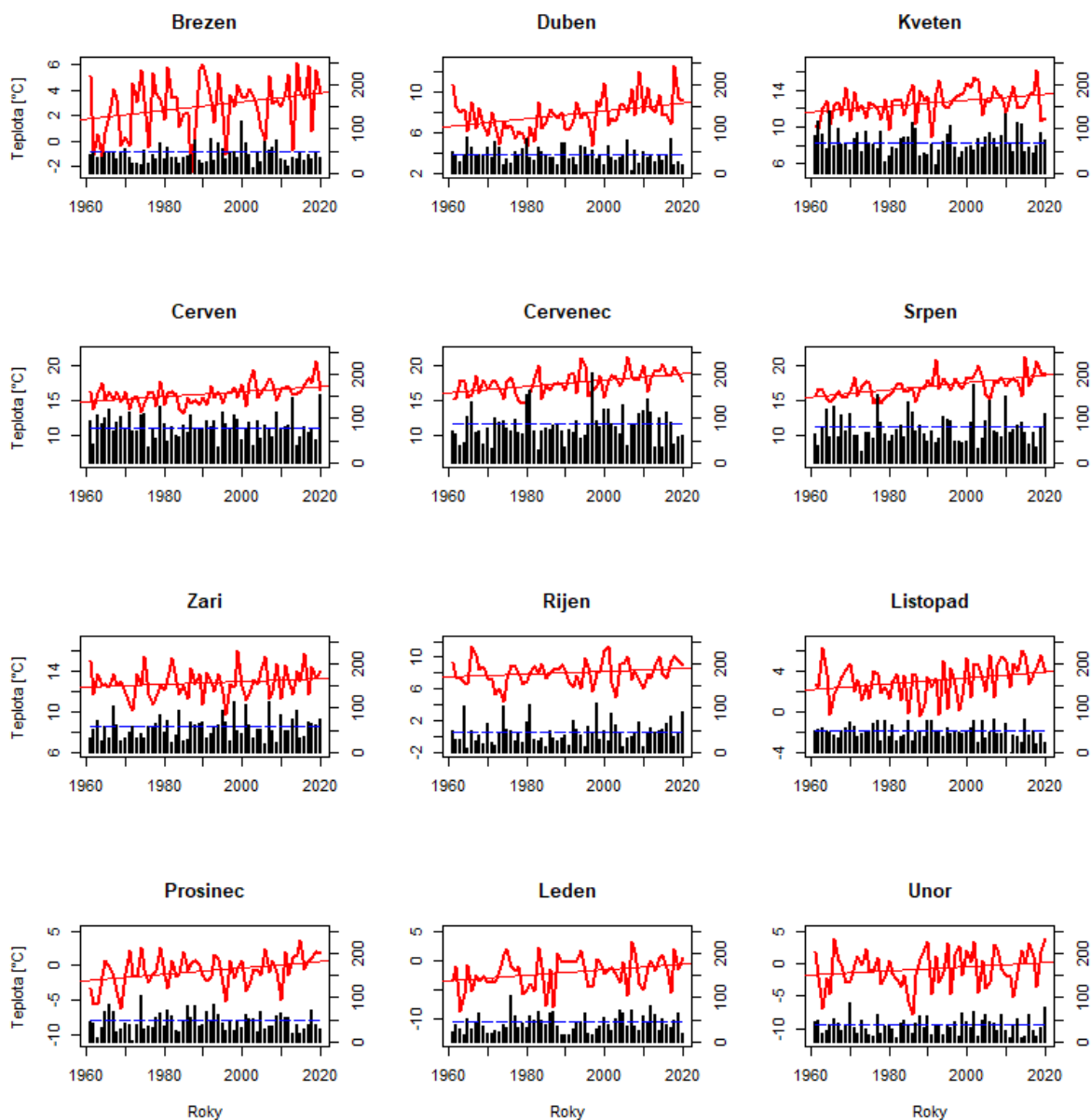
Pro konkrétní analýzu teploty a úhrnu srážek ve sledovaném období se nabízí sledovat jejich průběh za jednotlivá roční období, resp. měsíce. Jednak tím můžeme eliminovat vliv opakující se roční periodicity a zároveň lépe srovnáme charakteristiky naměřených teplot a srážek pro jednotlivá roční období, resp. měsíce.

6.2 Modelování souvislosti mezi teplotou a úhrnem srážek

Tato kapitola se zaměřuje na samotné srovnání teplotních a srážkových charakteristik. Nejprve je provedena analýza měsíčních dat a následně srovnání letní a zimní sezóny. Letní sezóna vymezuje období měsíců červen, červenec a srpen, kdy se teplotou rozumí průměrná teplota za tyto tři měsíce pro každý rok. Srážky značí sumu úhrnů letních měsíců v daném rok. Analogicky zimní sezónou se rozumí měsíce prosinec, leden a únor.

6.2.1 Měsíční data

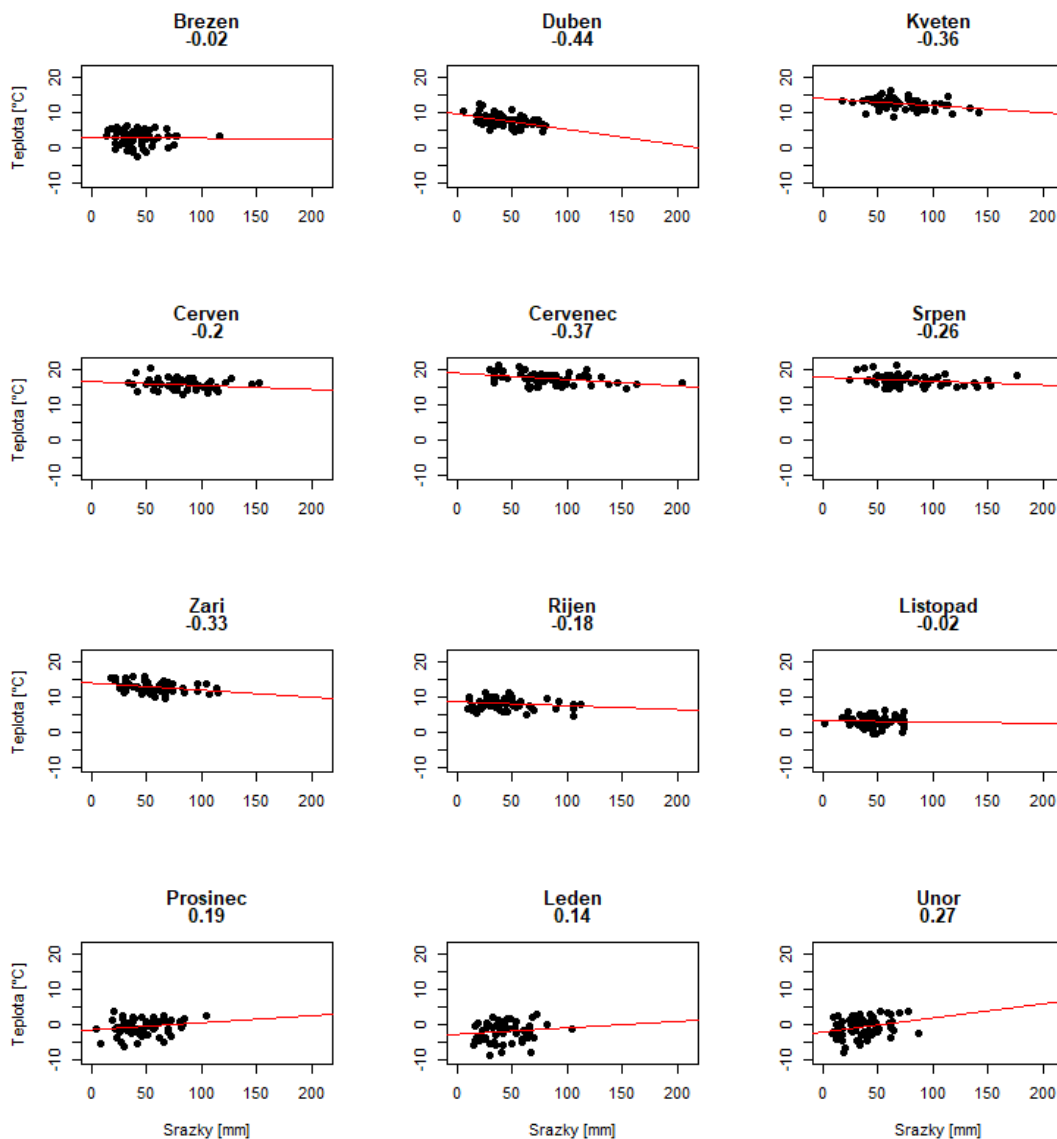
Pro sledování vývoje srážkových a teplotních charakteristik byly vytvořeny grafy pro jednotlivé měsíce ve sledovaném období 1961–2020. Na obrázku 3 je znázorněn souběžný měsíční průběh teplotních (červeně) a srážkových (černě) charakteristik. V každém z měsíců můžeme sledovat rostoucí trend teploty vzduchu a proměnlivé rozložení úhrnu srážek. Pro srovnání byl do každého měsíčního úhrnu srážek vložen dlouhodobý normál (modře).



Obr. 3: Průběh měsíčních teplotních a srážkových charakteristik v období 1961–2020. Černě je značen úhrn srážek, modrá přerušovaná příčka znázorňuje dlouhodobý normál. Červená křivka ukazuje průběh teploty, červená příčka pak značí trend teploty.

Pro souvislost mezi úhrnem srážek a naměřenou teplotou byla provedena analýza korelací v jednotlivých měsících (Obr. 4). Jejím prostřednictvím je možné pozorovat, že letní měsíce se vyznačují zápornými hodnotami korelačního koeficientu, zatímco v měsících zimních je hodnota korelačního koeficientu kladná. Z toho vyplývá, že v letních měsících sledovaného období s rostoucí teplotou klesá úhrn srážek, zatímco v zimních sezónách s rostoucí teplotou úhrn srážek naopak roste. Nejvýraznější

souvislost mezi teplotními a srážkovými charakteristikami je pro letní období patrná v červenci a pro zimní období v únoru.



Obr. 4: Korelace měsíčních teplotních a měsíčních srážkových charakteristik v období 1961–2020. U každého měsíce je uvedena hodnota korelačního koeficientu.

Hodnoty korelačního koeficientu nejbližší nule byly zjištěny v březnu a listopadu. V těchto měsících je tudíž pozorovaná souvislost mezi teplotou a srážkami minimální. Naopak nejvyšší korelace mezi úhrnem srážek a průměrnou teplotou byla pozorována v dubnu. Dále též vykazovaly vysoké hodnoty korelačního koeficientu měsíce červenec, květen a září.

V dalším kroku empirické části práce byl proveden test statistické významnosti Pearsonovy korelace pro měsíční souvislosti teplot a úhrnů srážek. Na hladině

významnosti $\alpha = 0,05$. Korelační koeficient je statisticky významný pro tyto měsíce: únor, duben, květen, červenec, srpen, září. P-value spolu s koeficientem korelace jsou pro jednotlivé měsíce zaznamenány v následující tabulce (Tabulka 2).

	<i>p value</i>	<i>cor</i>
Leden	0,29	0,14
Únor	0,04	0,27
Březen	0,86	-0,02
Duben	0,00046	-0,44
Květen	0,00483	-0,36
Červen	0,12	-0,20
Červenec	0,00332	-0,37
Srpen	0,05	-0,26
Září	0,01	-0,33
Říjen	0,17	-0,18
Listopad	0,85	-0,02
Prosinec	0,14	0,19

Tabulka 1: hodnoty P-value a korelační koeficient (cor) pro jednotlivé měsíce v období 1961–2020.

Následující graf se věnuje srovnání měsíčních korelačních koeficientů (Obr. 5). Korelace na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ byla prokázána v měsících, které jsou značeny zeleně. V červeně zobrazených měsících nebyla zamítnuta nulová hypotéza o nezávislosti sledovaných proměnných. Samotný roční chod korelačního koeficientu se vyznačuje kladnými hodnotami v zimním období, po zbytek roku naopak nabývá korelační koeficient hodnot záporných. Pozoruhodná je anomálie „prudkého skoku“ korelačního koeficientu mezi březnem (-0,02) a dubnem (-0,44). Korelační koeficient je statisticky nevýznamný pro měsíce: leden, březen, červen, říjen, listopad, prosinec.

Obecně se dá říct, že statisticky významná je korelace v těch měsících, ve kterých se výrazně lišila od nuly, zatímco korelace blíží se nule nejsou statisticky významné.

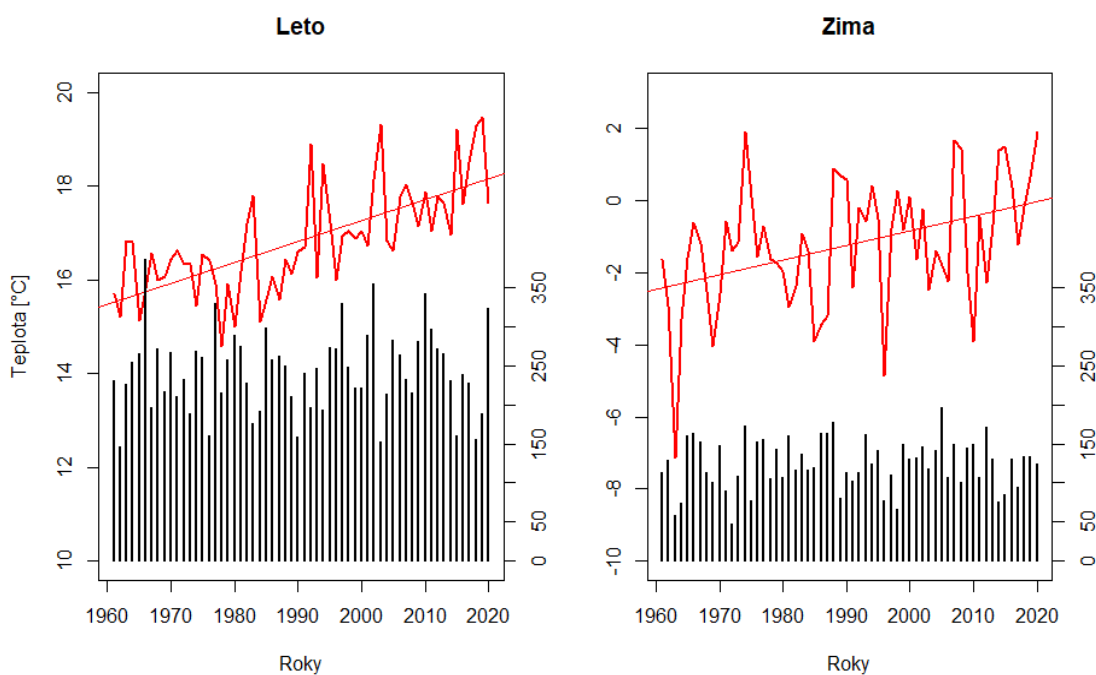


Obr. 5: Roční průběh korelačních koeficientů 1961–2020 (dle měsíců). Zelená značí hodnoty korelačního koeficientu významně odlišné od nuly ($p < 0,05$), červená naopak značí hodnoty korelačního koeficientu blízké nule ($p > 0,05$).

6.3 Chod teplotních a srážkových charakteristik letních a zimních sezón

Hodnoty korelačního koeficientu jarních a podzimních měsíců nabývají rovněž kladných hodnot. Tyto měsíce jsou však ovlivněny výrazným ročním chodem teploty, proto je obtížné grafy sezónních hodnot korelačních koeficientů spolehlivě interpretovat. Z toho důvodu se nyní zaměřím pouze na letní a zimní sezónu a jejich porovnání.

Na obrázku 6 je souběžně znázorněn průběh teplotních (červeně) a srážkových (černě) charakteristik pro letní a zimní období.



Obr. 6: Průběh sezónních teplotních a srážkových charakteristik v létě a zimě v období 1961–2020. Černě je značen úhrn srážek. Červená křivka ukazuje průběh teploty, červená přímka pak značí trend teploty.

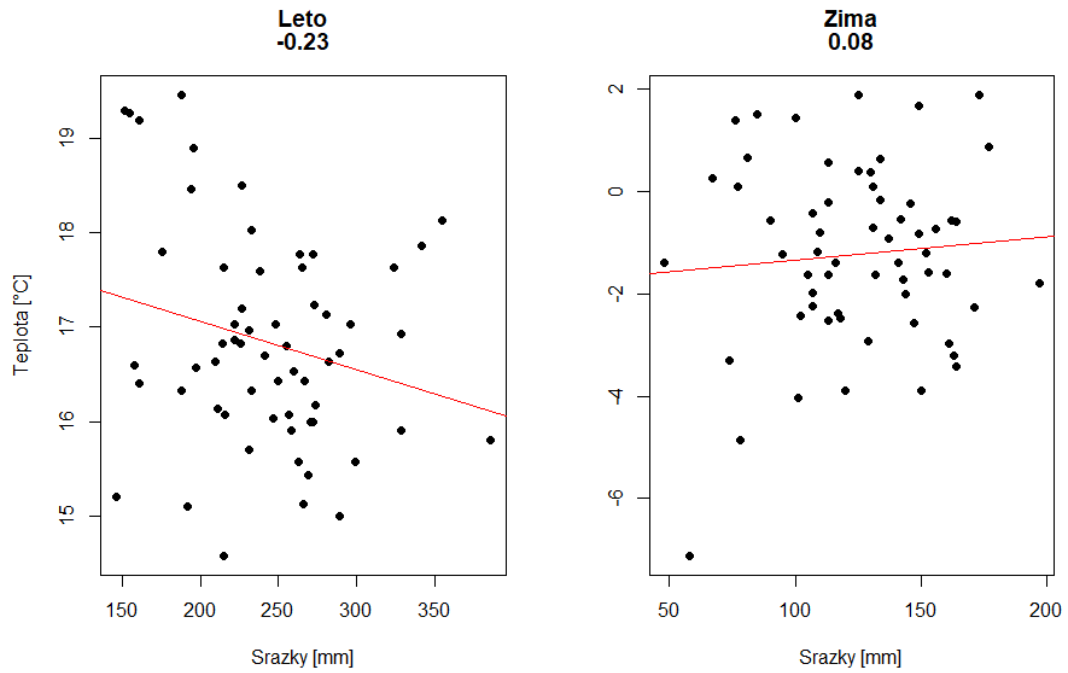
Letní sezóna se vyznačuje větší variabilitou dat teploty od sezóny zimní. Stejně je tak tomu i v případě variability rozptylu srážek. Pro teploty v zimním období je totožná hodnota průměru i mediánu, což značí symetrické rozdělení výběru. Symetrickému rozdělení se též blíží úhrny srážek pro letní i zimní období (Tabulka 3).

<i>Léto</i>	<i>Teplota [°C]</i>	<i>Úhrn srážek [mm]</i>
Průměr	16,84	243
Medián	16,72	244
Směr. Odchylka	1,1349	51,9251
Rozptyl výběru	1,29	2696
Špičatost	-0,0828	0,1489
Šikmost	0,4761	0,2984
Minimum	14,57	146
Maximum	19,47	386

<i>Zima</i>	<i>Teplota [°C]</i>	<i>Úhrn srážek [mm]</i>
Průměr	-1,22	125
Medián	-1,22	127
Směr. Odchylka	1,7620	32,1229
Rozptyl výběru	3,10	1032
Špičatost	1,0174	-0,3663
Šikmost	-0,5595	-0,2318
Minimum	-7,13	48
Maximum	1,9	197

Tabulka 2: Popisná statistika sezonních teplot a srážek pro období 1960–2020.

Následně byla provedena korelační analýza mezi úhrnem srážek a naměřenou teplotou pro letní a zimní období (Obr. 7). Letní sezóna se vyznačuje relativně vysokým záporným korelačním koeficientem, zatímco korelační koeficient pro zimní sezónu nabývá kladné hodnoty nepříliš vzdálených od nuly. Z hlediska statistické významnosti nemůžeme z provedené analýzy činit významné závěry, neboť se pohybujeme na hranici signifikantnosti.



Obr. 7: Korelace sezónních teplotních a srážkových charakteristik v létě a zimě v období 1961–2020. Pro obě sezóny je uvedena hodnota korelačního koeficientu.

	<i>p value</i>	<i>cor</i>
Léto	0,07	-0,23
Zima	0,54	0,08

Tabulka 3: Hodnoty *P-value* a korelační koeficient (*cor*) pro letní a zimní sezóny období 1960–2020.

7 Diskuze

Z korelační analýzy v jednotlivých měsících vyplývá, že se jarní, letní a podzimní měsíce se vyznačují zápornou hodnotou korelačního koeficientu, zatímco zimní měsíce mají korelační koeficient kladný. Nejvýraznější souvislost mezi teplotními a srážkovými charakteristikami je pro letní období patrná v červenci a pro období zimní v únoru. Z hlediska ročního chodu korelačního koeficientu byla zjištěna pozoruhodná anomálie „prudkého skoku“ korelačního koeficientu mezi březnem (-0,02) a dubnem (-0,44), kdy hodnota korelačního koeficientu v dubnu byla zároveň maximální. Tato anomálie by mohla souviset s prodlužováním dne, a tím pádem i slunečního záření, což ve dnech s malou oblačností vede k ohřívání zemského povrchu. Naopak oblačné aprílové počasí je často spojeno s ochlazením vzduchu v důsledku přízemní advekce. Právě jarní a podzimní měsíce jsou ovlivněny výraznou proměnlivostí teplotních a srážkových charakteristik během celého roku. Jako vhodnější pro pozorování se jeví sezóny.

Letní sezóny se vyznačují relativně vysokým záporným korelačním koeficientem, což lze interpretovat tak, že s rostoucí teplotou klesal úhrn srážek. Toto je možné uvést do souvislosti s výskyty anticyklon (srov. Ding et al., 2017). Zároveň by se dalo uvažovat o vlivu souvislosti vysokých teplot a evapotranspirací, která s teplotou vzduchu úměrně roste. Spolu s vysokými teplotami se rovněž pojí nedostatek srážek. Srážky se vyskytují minimálně (zato intenzivní a s krátkým průběhem) a v důsledku vysušení povrchu země nemají takový účinek, aby se jim podařilo eliminovat velké dopady sucha. Vysušená půda obtížně pojímá vodu, což následně vede k povrchovému odtoku a možným povodním (srov. Sedlmeier et al., 2018). Naopak chladné letní sezóny souvisí se zonálním prouděním, které je spojeno s přílivem studeného a vlhkého vzduchu z Atlantiku. S chladným průběhem léta může souviset častější cyklonální situace spojená s prouděním chladného vzduchu z oceánu (Lhotka et al., 2020).

Oproti letním sezónám se zimní charakteristiky teplot a srážek vyznačují společnou proměnlivostí. Růst úhrnu srážek spolu s růstem teploty vzduchu v zimním období je rovněž ovlivněn zonálním prouděním, které v zimním období souvisí s přílivem teplého a vlhkého vzduchu z Atlantiku, díky čemuž dochází k častějším srážkám. Také cirkulace atmosféry a oceánu ovlivňuje zimní teploty (ve smyslu vyšších teplot),

zejména kladná fáze NAO (Yao et al., 2014; Hao et al., 2018; Wang et al., 2019; Rulfová et al., 2017). S teplými zimními sezónami rovněž souvisí teplé fronty vyznačující se stratiformními srážkami, které by se mohly vyskytovat v důsledku přítomnosti výběžku Azorské výše nad střední Evropu. To by mohlo ve střední Evropě vést k mírnějším zimám. Zároveň vyšší zimní teploty mohou mít za následek, že vzduch pojme více vodní páry. Nicméně zemský povrch se nestihne přes den tolik ohřát, a tím pádem by mohlo dojít ke kondenzaci vodní páry a následné tvorbě oblačnosti. Naopak tendence k chladným zimním sezónám mohou vzniknout v důsledku kontinentálních situací, kdy je do Evropy přiveden suchý vzduch (což souvisí i s malým rozvojem oblačnosti). V neposlední řadě je vhodné uvážit výskyt chladných zimních sezón ve spojení s anticyklonální cirkulací (srov. Cassou a Cattiaux, 2016).

Je patrná souvislost mezi teplotními a srážkovými charakteristikami (Hegerl et al., 2011; Hänsel et al., 2019), nicméně průběh teplot a srážek v České republice je silně ovlivněn globálními klimatickými faktory (srov. Brázdil et al., 2015). Zároveň je nutné dodat, že korelační koeficienty letních i zimních sezón vyšly jako statisticky nevýznamné (léto se pohybuje „na hranici významnosti“).

Na tuto práci by se dalo navázat srovnáním teplotních a srážkových charakteristik v regionálním měřítku střední Evropy, čímž by se zvýšila velikost datového souboru. Na druhou stranu heterogenita datového souboru v rámci střední Evropy by mohla být limitujícím faktorem.

8 Závěr a přínos práce

Bakalářská práce (ve své literární i empirické části) zajistila dosažení cílů stanovených ve svém zadání. Přehled znalostí a informací k řešené problematice je zpracován v ucelené části literární rešerše. Výsledky empirické části pak především odpovídají na otázku, nakolik významná je korelace mezi kladnými teplotními odchylkami a nedostatkem srážek. Zjištění ze statistické analýzy datového souboru ČHMÚ z období 1961–2020 potvrzuje rostoucí trend průměrné teploty vzduchu v průběhu sledovaného období. Úhrn srážek pak v celkovém ročním objemu nevykazuje žádný významný trend, avšak je patrný nárůst výskytu extrémních srážek v letních obdobích. Z hlediska sucha se tedy zdá být významnějším faktorem nárůst rozptylu úhrnu srážek v jednotlivých sezónách než sledování trendu celkového ročních úhrnů srážek.

Kladnou korelaci mezi průměrnými teplotami a úhrny srážek letních sezón je možné uvést do souvislosti s výskyty anticyklon, vysokých teplot a vyšší evapotranspirací. S tím je zároveň spjat nedostatek srážek, v důsledku čehož je zvýšená pravděpodobnost výskytů suchých událostí. Oproti tomu chladné letní sezóny je možné spojovat se zonálním prouděním, které je spojeno s přílivem studeného a vlhkého vzduchu z Atlantiku. Zároveň mohou chladná léta souviset s častější cyklonální situací. Průběh srážek a teplot zimního období je rovněž ovlivněn zonálním prouděním, které v zimním období souvisí s přílivem teplého a vlhkého vzduchu z Atlantiku. Zároveň se na vyšších zimních teplotách podílí vliv globální cirkulace atmosféry a oceánu a teplé fronty. Naopak chladná zimní období mohou vzniknout v důsledku kontinentálních situací či anticyklonální cirkulace. Obdobně jako Hegerl et al. (2011) nebo také Hänsel et al. (2019) je možné uvažovat o souvislosti mezi teplotními a srážkovými charakteristikami, navzdory neprokázané signifikanci. Zároveň je možné předpokládat prokázání statistické významnosti na robustnějším výběru dat.

Z analyzovaných dat byly zjištěny úhrny srážek s citlivostí na jednotlivé měsíce, avšak v návaznosti na zjištění této práce by mohlo být užitečné volit i jemnější pozorovací škálu a sledovat extrémní hodnoty a jejich rozložení s vyšší citlivostí, například po jednotlivých dnech.

9 Přehled literatury a použitých zdrojů

Ahmed, M. (2020). Introduction to Modern Climate Change. Andrew E. Dessler: Cambridge University Press, 2011, 252 pp, ISBN-10: 0521173159. *Science of The Total Environment*, 734, 139397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139397>.

Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., ... & Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).

Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303–309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>

Berg, P., Moseley, C., & Haerter, J. O. (2013). Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geoscience*, 6(3), 181–185. <https://doi.org/10.1038/ngeo1731>

Brázdil, R., Chromá, K., Dobrovolný, P., & Tolasz, R. (2009). Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961-2005: Climate fluctuations in the czech republic. *International Journal of Climatology*, 29(2), 223–242. <https://doi.org/10.1002/joc.1718>

Brázdil, R., & Trnka, M. (2015). Historie počasí a podnebí v Českých zemích. Svazek XI, Sucho v Českých zemích: Minulost, současnost, budoucnost. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky

Brunner, L., Hegerl, G. C., & Steiner, A. K. (2017). Connecting Atmospheric Blocking to European Temperature Extremes in Spring. *Journal of Climate*, 30(2), 585–594. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0518.1>

Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P. J., Rybníček, M., Kolář, T., Kyncl, T., ... & Trnka, M. (2021). Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience*, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00698-0>

Cassou, C., & Cattiaux, J. (2016). Disruption of the European climate seasonal clock in a warming world. *Nature Climate Change*, 6(6), 589–594. <https://doi.org/10.1038/nclimate2969>

Česká meteorologická společnost [online]: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS) [cit 27.11.2020]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>

Ding, S., Chen, W., Feng, J., & Graf, H.-F. (2017). Combined Impacts of PDO and Two Types of La Niña on Climate Anomalies in Europe. *Journal of Climate*, 30(9), 3253–3278. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0376.1>

Dooge, J. (1973). Linear theory of hydrologic systems (No. 1468). Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický. (2020). Česká meteorologická společnost. <http://slovník.cmes.cz>

Fink, A. H., Brücher, T., Krüger, A., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., & Ulbrich, U. (2004). The 2003 European summer heatwaves and drought -synoptic diagnosis and impacts: European heatwave - impacts. *Weather*, 59(8), 209–216. <https://doi.org/10.1256/wea.73.04>

Gvoždíková, B., & Müller, M. (2021). Moisture fluxes conducive to central European extreme precipitation events. *Atmospheric Research*, 248, 105182. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105182>

Hanel M., Vizina A. (2014a). Hydrologické modelování dopadů klimatické změny. Česká zemědělská univerzita v Praze.

Hanel M., Vizina A. (2014b). Metody vyhodnocování vodohospodářských dat. Česká zemědělská univerzita v Praze.

Hanel, M., Pavlásková, A., & Kyselý, J. (2016). Trends in characteristics of sub-daily heavy precipitation and rainfall erosivity in the Czech Republic. *International Journal of Climatology*, 36(4), 1833–1845. <https://doi.org/10.1002/joc.4463>

Hanel, M., Rakovec, O., Markonis, Y., Máca, P., Samaniego, L., Kyselý, J., & Kumar, R. (2018). Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective. *Scientific reports*, 8(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27464-4>

Hänsel, S., Ustrnul, Z., Łupikasza, E., & Skalak, P. (2019). Assessing seasonal drought variations and trends over Central Europe. *Advances in Water Resources*, 127, 53–75. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.005>

Hao, X., He, S., Han, T., & Wang, H. (2018). Impact of Global Oceanic Warming on Winter Eurasian Climate. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35(10), 1254–1264. <https://doi.org/10.1007/s00376-018-7216-5>

Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y., Hanel, M., & Kumar, R. (2020). Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific Reports*, 10(1), 12207. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>

Hegerl, G. C., Hanlon, H., & Beierkuhnlein, C. (2011). Elusive extremes. *Nature Geoscience*, 4(3), 142-143. <https://doi.org/10.1038/ngeo1090>

Ionita, M., Tallaksen, L. M., Kingston, D. G., Stagge, J. H., Laaha, G., Van Lanen, H. A., ... & Haslinger, K. (2017). The European 2015 drought from a climatological perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1397-1419. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1397-2017>

Knist, S., Goergen, K., & Simmer, C. (2020). Evaluation and projected changes of precipitation statistics in convection-permitting WRF climate simulations over Central Europe. *Climate Dynamics*, 55(1), 325–341. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4147-x>

Koncepce ochrany před následky sucha pro území České republiky. (2017). Ministerstvo životního prostředí ČR. [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_170724_sucho/\\$FILE/koncepce_sucho_material.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_170724_sucho/$FILE/koncepce_sucho_material.pdf)

Kopáček J., Bednář J., Žák M. (2020). Jak vzniká počasí. *Karolinum*.

Lanfredi, M., Coluzzi, R., Imbrenda, V., Macchiato, M., & Simoniello, T. (2020). Analyzing Space–Time Coherence in Precipitation Seasonality across Different European Climates. *Remote Sensing*, 12(1), 171. <https://doi.org/10.3390/rs12010171>

Lhotka, O., Trnka, M., Kyselý, J., Markonis, Y., Balek, J., & Možný, M. (2020). Atmospheric circulation as a factor contributing to increasing drought severity in Central Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18)

Lloyd-Hughes, B. (2014). The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(3), 607–611. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1025-7>

Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571–1592. <https://doi.org/10.1002/joc.846>

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179–183).

Maystadt, J. F., & Mueller, V. (2012). Environmental migrants: a myth?. IFPRI-Research Brief, (18).

Máca, P. (2014). Hydrologie pro bakaláře. Česká zemědělská univerzita v Praze.

Mukherjee, S., Ashfaq, M., & Mishra, A. K. (2020). Compound Drought and Heatwaves at a Global Scale: The Role of Natural Climate Variability-Associated Synoptic Patterns and Land-Surface Energy Budget Anomalies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(11), <https://doi.org/10.1029/2019JD031943>

Návod pro pozorovatele meteorologických stanic. (2014). Český hydrometeorologický ústav. <http://www.cmes.cz/cs/node/143>

Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau.

Parry, S., Hannaford, J., Lloyd-Hughes, B., & Prudhomme, C. (2012). Multi-year droughts in Europe: Analysis of development and causes. *Hydrology Research*, 43(5), 689–706. <https://doi.org/10.2166/nh.2012.024>

Rulfová, Z., Beranová, R., & Kyselý, J. (2017). Climate change scenarios of convective and large-scale precipitation in the Czech Republic based on EURO-CORDEX data. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2451–2465. <https://doi.org/10.1002/joc.4857>

Sedlmeier, K., Feldmann, H., & Schädler, G. (2018). Compound summer temperature and precipitation extremes over central Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(3), 1493–1501. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2061-5>

Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A., & Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427(6972), 332–336. <https://doi.org/10.1038/nature02300>

Schubert, S. D., Stewart, R. E., Wang, H., Barlow, M., Berbery, E. H., Cai, W., ... & Zhou, T. (2016). Global meteorological drought: A synthesis of current understanding with a focus on SST drivers of precipitation deficits. *Journal of Climate*, 29(11), 3989–4019.

Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., & Barbosa, P. (2015). European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*, 127, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.012>

Sucho a jeho definice. (2021). Český hydrometeorologický ústav. <https://www.chmi.cz/aktualni-situace/sucho#>

Trnka, M., Balek, J., Zahradníček, P., Eitzinger, J., Formayer, H., Turňa, M., ... & Brázdil, R. (2016). Drought trends over part of Central Europe between 1961 and 2014. *Climate Research*, 70(2-3), 143–160. <https://doi.org/10.3354/cr01420>

Trnka, Miroslav, Kyselý, J., Možný, M., & Dubrovský, M. (2009). Changes in Central-European soil-moisture availability and circulation patterns in 1881–2005. *International Journal of Climatology*, 29(5), 655–672. <https://doi.org/10.1002/joc.1703>

Van der Schrier, G., Briffa, K. R., Jones, P. D., & Osborn, T. J. (2006). Summer Moisture Variability across Europe. *Journal of Climate*, 19(12), 2818–2834. <https://doi.org/10.1175/JCLI3734.1>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Vidal, J. P., Martin, E., Kitova, N., Najac, J., & Soubeyroux, J.-M. (2012). Evolution of spatio-temporal drought characteristics: Validation, projections and effect of adaptation scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22.

Vysoudil, M., Univerzita Palackého, & Přírodovědecká fakulta. (2013). *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a klimatologie*. Univerzita Palackého v Olomouci.

Wang, G., Zhang, N., Fan, K., & Palus, M. (2019). Central European air temperature: Driving force analysis and causal influence of NAO. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1), 1421–1427. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2676-1>

Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335–2351. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSI>2.0.CO;2)

Whan, K., Zscheischler, J., Orth, R., Shongwe, M., Rahimi, M., Asare, E. O., & Seneviratne, S. I. (2015). Impact of soil moisture on extreme maximum temperatures in Europe. *Weather and Climate Extremes*, 9, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.05.001>

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *WATER INTERNATIONAL*, 17.

Yao, Y., & Luo, D. (2014). Relationship between zonal position of the North Atlantic Oscillation and Euro-Atlantic blocking events and its possible effect on the weather over Europe. *Science China Earth Sciences*, 57(11), 2628–2636. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4949-6>

Zahradníček, P., Farda, A., Skalák, P., Trnka, M., Meitner, J., & Rajdl, K. (2016). Projection of drought-inducing climate conditions in the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. *Climate Research*, 70(2-3), 179-193.

Zhou, S., Williams, A. P., Berg, A. M., Cook, B. I., Zhang, Y., Hagemann, S., Lorenz, R., Seneviratne, S. I., & Gentine, P. (2019). Land–atmosphere feedbacks exacerbate concurrent soil drought and atmospheric aridity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(38), 18848–18853. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904955116>