

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Fyzická geografie a geoinformatika



Martin Laco

Sdružené hydrometeorologické události Compound hydrometeorological events

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Miloslav Müller, Ph.D.

Praha 2020

Zadání bakalářské práce

Název práce

Sdružené hydrometeorologické události

Cíle práce

Cílem práce je na základě rešerše zahraniční literatury představit nedávno zavedený koncept tzv. sdružených hydrometeorologických událostí, navrhnout jejich klasifikaci a na vybrané případové studii z území Česka demonstrovat charakteristické znaky tohoto fenoménu.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Práce bude mít převážně rešeršní charakter. K případové studii budou využita meteorologická data vybrané stanice ze sítě Českého hydrometeorologického ústavu, konkrétně průměrné denní a měsíční teploty vzduchu, denní a měsíční úhrny srážek a denní maxima nárazu větru za nejméně třicetileté období.

Datum zadání: 13. listopadu 2019

Jméno studenta: Martin Laco

Podpis studenta:.....

Jméno vedoucího práce: RNDr. Miloslav Müller, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně pod odborným vedením školitele a že jsem uvedl všechny informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne.....

.....

Martin Laco

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som sa chcel veľmi pod'akovať predovšetkým vedúcemu práce RNDr. Miloslavovi Müllerovi, Ph.D., za ponuku pracovať na tejto zaujímavej téme, venovaný čas a rady, ktoré pomohli dotvoriť prácu do finálnej podoby. Ďalej patrí moja vďaka Univerzite Karlovej v Prahe, bez ktorej by som nemohol čerpať informácie zo zahraničnej literatúry. Nakoniec sa chcem pod'akovať mojej rodine za podporu a ústretovosť počas celého štúdia.

Združené hydrometeorologické udalosti

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá združenými hydrometeorologickými udalosťami a poskytuje prehľad doterajších poznatkov o tomto významnom prírodnom fenoméne. V posledných rokoch vzniklo niekoľko definícií združených hydrometeorologických udalostí. Všetky definície spája podmienka súčasného výskytu dvoch, prípadne viacerých nebezpečných meteorologických alebo hydrologických javov. Príkladom môže byť súčasný výskyt sucha a vln horúčav. Jedným z cieľov práce bol aj pokus o klasifikáciu združených hydrometeorologických udalostí. Na základe doterajších poznatkov je možné pozerat' sa na tento druh ohrozenia z dvoch hlavných pohľadov. Pri prvom pohľade ide o náhodnú kombináciu nebezpečných meteorologických javov, zatiaľ čo v druhom prípade sú pôsobiacie nebezpečné javy vzájomne závislé. V praktickej časti sú pomocou stručných prípadových štúdií popísané niektoré príklady združených hydrometeorologických udalostí, ktoré sa vyskytli v Českej republike.

Kľúčové slová: združené hydrometeorologické udalosti, súčasný výskyt, vzdušná morská hladina spôsobená búrkou, silné zrážky, sucho, vlna horúčav

Abstract

This bachelor thesis deals with compound hydrometeorological events and provides overview of recent knowledge of this significant natural phenomena. There have risen several definitions of compound hydrometeorological events in recent years. All of these definitions are connected with condition of simultaneous occurrence of two, possibly more dangerous meteorological or hydrological threats. Examples are simultaneous occurrence of drought and heatwave. One of the aims of the study was to attempt classification of compound hydrometeorological events. Based on recent knowledge, it is possible to look at this type of threat from two main perspectives. The first perspective could be a description of a compound event as a random combination of dangerous threats, while the second perspective illustrates the dangerous phenomena as interdependent events. The practical part outlines some examples of associated hydrometeorological events that occurred in the Czech Republic with the help of brief case studies.

Key words: compound hydrometeorological events, simultaneous occurrence, storm surge, heavy precipitation, drought, heatwave

Obsah

Zoznam použitých skratiek.....	8
1 Úvod.....	9
2 Hydrometeorologické ohrozenia.....	10
2.1 Vymedzenie základných pojmov.....	10
2.2 Silné zrážky.....	11
2.3 Silný vietor.....	13
2.4 Vlny horúčav.....	15
2.5 Sucho.....	17
3 Koncept združených hydrometeorologických udalostí.....	20
3.1 Definícia združených hydrometeorologických udalostí.....	20
3.2 Štatistické metódy k hodnoteniu združených udalostí.....	23
3.2.1 Empirický prístup.....	24
3.2.2 Chvostová závislosť.....	25
3.2.3 Metóda kopúl.....	26
3.2.4 Metóda podmienenej pravdepodobnosti.....	28
3.2.5 Združená pravdepodobnosť, viacrozmerné doby opakovania.....	30
3.3 Klasifikácia združených hydrometeorologických udalostí.....	32
3.3.1 Klasifikácia na základe odlišného typu interakcie a dopadu spolupôsobiacich javov.....	33
3.3.2 Klasifikácia na základe extremity spolupôsobiacich javov.....	35
3.3.3 Zhodnotenie klasifikácií.....	37
3.4 Druhy združených hydrometeorologických udalostí.....	38
3.4.1 Združená povodeň v pobrežných oblastiach.....	38
3.4.2 Vlny horúčav a meteorologické sucho.....	42

3.5 Pravdepodobnosť združených hydrometeorologických udalostí v budúcej klíme.....	47
3.5.1 Združená povodeň v budúcej klíme.....	47
3.5.2 Vlny horúčav a meteorologické sucho v budúcej klíme.....	49
4 Združené hydrometeorologické udalosti na príklade stanice Churáňov.....	50
4.1 Druhy združených hydrometeorologických udalostí v Českej republike.....	50
4.2 Použité dáta.....	51
4.3 Nadnormálne teploty vzduchu a meteorologické sucho.....	51
4.3.1 Posúdenie závislosti.....	52
4.3.2 Výber konkrétnych udalostí.....	54
4.3.3 Prípadová štúdia leto 2017.....	60
4.4 Silný vietor a intenzívne zrážky.....	63
4.4.1 Posúdenie závislosti.....	63
4.4.2 Výber konkrétnych udalostí.....	65
4.4.3 Tlaková níz Kyrill.....	66
4.4.4 Povodne v decembri 1993.....	68
5 Zhrnutie poznatkov a ich diskusia.....	71
6 Záver.....	77
Zoznam použitej literatúry.....	78
Zoznam obrázkov a tabuliek.....	86
Prílohy.....	89

Zoznam použitých skratiek

AIC	Akaike Information Criteria – Akaikovo informačné kritérium
BIC	Bayesian Information Criteria – Bayesovo informačné kritérium
eMS	elektronický meteorologický slovník
ENSO	El Niño-Southern Oscillation – El Niño- južná oscilácia
HWD	Heat Wave Duration – dĺžka vlny tepla
HWI	Heat Wave Intensity – intenzita vlny tepla
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – Medzivládny panel pre zmenu klímy
MSDI	Multivariate Standardized Drought Index – viacrozmerný štandardizovaný index sucha
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration – národný úrad pre oceán a atmosféru
PDSI	Palmer Drought Severity Index – Palmerov index intenzity sucha
SD	Severity Diagrams
SDHI	Standardized Dry and Hot Index – štandardizovaný index sucha a tepla
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – štandardizovaný zrážkový a evapotranspiračný index
SPI	Standardized Precipitation Index – štandardizovaný zrážkový index
SSI	Soil Saturation Index – index pôdneho nasýtenia
STI	Standardized Temperature Index – štandardizovaný teplotný index

1 Úvod

Koncept združených udalostí sa v meteorológii a klimatológii objavil pomerne nedávno. Hlavnou myšlienkou tohto konceptu je súčasný výskyt dvoch alebo viacerých nebezpečných meteorologických, či hydrometeorologických javov.

Konvenčné metódy analýzy meteorologických extrémov sa väčšinou sústreďujú na jeden nebezpečný meteorologický jav, ako je napríklad extrémna teplota vzduchu či zrážky. Ukazuje sa však, že v mnohých prípadoch nie sú tieto metódy schopné adekvátne definovať a zachytiť všetky podmienky vedúce k závažným dopadom pôsobenia nebezpečných meteorologických javov (Leonard et al. 2014).

Známym príkladom, ktorý je často udávaný ako typický predstaviteľ tohto druhu prírodného ohrozenia, je vlna horúčav z Ruska 2010. Dlhotrvajúce nadnormálne teploty a sucho sa prejavili v podobe výrazných dopadov na ľudskú spoločnosť a prírodné ekosystémy.

Motiváciou pre písanie tejto práce bolo okrem všeobecného záujmu o meteorológiu a klimatológiu aj to, že extrémami počasia som sa zaoberal aj vo svojej stredoškolskej odbornej činnosti, rovnako aj to, že tomuto zvláštnemu prírodnému ohrozeniu sa v Česku a na Slovensku ešte nikto nevenoval. Hlavným cieľom práce je preto, pokúsiť sa pomocou rešerše zhrnúť najdôležitejšie poznatky o združených hydrometeorologických udalostiach a zároveň sa pomocou dostupnej literatúry pokúsiť sa o ich klasifikáciu. Druhým cieľom je pomocou stručných a jednoduchých prípadových štúdií popísať vybrané druhy združených hydrometeorologických udalostí, ktoré sa vyskytli v Českej republike.

V úvode práce sú krátko predstavené najčastejšie sa vyskytujúce hydrometeorologické ohrozenia. Hlavnou časťou práce je kapitola s názvom „Koncept združených hydrometeorologických udalostí“, v ktorej sú predstavené definície združených udalostí, vybrané štatistické metódy využívané na ich skúmanie a samotná klasifikácia združených udalostí. V závere kapitoly sú popísané, v súčasnej literatúre, najčastejšie skúmané druhy združených hydrometeorologických udalostí. Druhú časť práce predstavuje praktická časť, v ktorej boli na popis vybraných združených udalostí použité dáta zo synoptickej stanice Churáňov.

2 Hydrometeorologické ohrozenia

2.1 Vymedzenie základných pojmov

V tejto kapitole je uvedený prehľad definícií niektorých dôležitých pojmov, ktoré sú neskôr používané, hlavne v kapitole venujúcej sa definíciám združených hydrometeorologických udalostí.

Združené hydrometeorologické udalosti patria medzi zvláštny druh hydrometeorologického ohrozenia. Prehľad ich definícií je uvedený v kapitole 3.1. Samotné ohrozenie môžeme definovať ako potenciálny výskyt prírodných alebo človekom vyvolaných javov, ktoré môžu spôsobiť straty na životoch, zranenia alebo iné dopady na zdravie. Takisto môžu spôsobiť aj straty na majetku, poškodenie infraštruktúry alebo ekosystémov a environmentálnych zdrojov (Zscheischler et al. 2018). Medzi prírodné ohrozenia môžeme zaradiť napríklad zemetrasenie, tropickú cyklónu, výbuch sopky alebo silný vietor.

V tejto práci sa budeme ďalej venovať predovšetkým ohrozeniam hydrometeorologickým. Medzi hydrometeorologické ohrozenia zaraďujeme ohrozenia poveternostné, klimatické a ohrozenia hydrologické, ktoré majú pôvod v atmosfére (napr. povodeň, hydrologické sucho alebo vzduť spôsobené búrkou). Pôsobenie niektorého z hydrometeorologických ohrození alebo ich kombinácia môže viesť k negatívnym dopadom na ľudskú spoločnosť (straty na životoch, zranenia, škody na majetku, poškodenie prírodných zdrojov). Tento negatívny dopad sa označuje ako hydrometeorologická katastrofa. Podľa rôznych druhov hydrometeorologického ohrozenia sa rovnako rozlišujú katastrofy hydrologické, klimatické a poveternostné (eMS 2020).

Ako bolo spomenuté vyššie, ohrozenie je vo všeobecnosti podmienené výskytom určitých javov. V prípade, že tieto javy dosahujú mimoriadnu intenzitu, môžu byť označené ako extrém. Extrémom sa často rozumie výskyt hodnoty určitého klimatického alebo meteorologického prvku nad alebo pod určitou prahovou hodnotou, ktorá sa nachádza blízko k vrchnému alebo spodnému koncu rozsahu pozorovaných hodnôt určitého klimatického alebo meteorologického prvku (Leonard et al. 2014). V klimatológii sa za extrém označuje najvyššia (maximum) alebo najnižšia (minimum) hodnota meteorologického prvku, zaznamenaná počas určitého obdobia. Maximálna respektíve minimálna hodnota

meteorologického prvku za kratšie obdobie sa považuje za meteorologický extrém (eMS 2020).

Podľa Stephensona (2008) je extrémnu udalosť ľahké rozpoznať, avšak ťažké definovať. Je to hlavne kvôli tomu, že neexistuje jednotná definícia toho, čo sa myslí pod pojmom extrém. Ďalším problémom pri definovaní extrému je to, že koncept extrémnosti je relatívny a silno závisí od množstva faktorov, ktoré ovplyvňujú extremitu (Stephenson 2008). Medzi tieto faktory môžeme zaradiť napríklad dĺžku trvania, intenzitu, priestorový rozsah či socioekonomické dopady udalosti. Existujú tri rôzne spôsoby definovania extremity, a to na základe vzácnosti, intenzity a závažnosti (Polášek 2012).

Každé ohrozenie má potenciál negatívne ovplyvniť ľudskú spoločnosť. Tento potenciál sa označuje ako riziko. Miera rizika nezávisí iba na intenzite ohrozenia, ale takisto aj na miere expozície či zraniteľnosti osôb, majetku alebo prírodných zdrojov. Táto miera rizika môže byť vyjadrená nasledovne **Riziko=ohrozenie*expozícia*zraniteľnosť** (Leonard et al. 2014). Expozíciou sa rozumie prítomnosť ľudí, obydlí, ekosystémov, služieb, zdrojov či infraštruktúry v mieste potenciálneho výskytu ohrozenia. Zraniteľnosť vyjadruje určitý sklon alebo predispozíciu k negatívnemu ovplyvneniu. Táto vlastnosť je ovplyvnená citlivosťou voči poškodeniu alebo nedostatočnou schopnosťou vyrovnat' sa, prípadne adaptovať sa na negatívne vplyvy (Zscheischler et al. 2018).

2.2 Silné zrážky

Silné zrážky patria medzi hydrometeorologické ohrozenia, ktorým sa v Česku, ale aj vo svete venuje veľká pozornosť, a sú rozsiahlo študované hlavne kvôli ich dopadom na prírodu a ľudskú spoločnosť (Müller et al. 2015; Brázdil et al. 2007).

Príčinou silných zrážok sú hlavne výstupné pohyby vzduchu, ktoré sa vyskytujú pri búrkach, na atmosférických frontoch, alebo môžu byť podmienené orografiou. V tropických oblastiach sveta sú silné zrážky spôsobené hlavne tropickými cyklónami. V našich podmienkach sú častou príčinou silných zrážok búrky alebo kvazistacionárne tlakové nízke, či zvlnené fronty, ktoré obyčajne zostávajú nad daným územím aj niekoľko dní, v čom spočíva ich nebezpečnosť. Špeciálnym prípadom sú tzv. retrográdne cyklóny. Tieto cyklóny väčšinou vznikajú tak, že cyklóna, ktorá vznikne nad Atlantikom, sa dostane do oblasti

východného Stredomoria, kde sa opäť prehľbí a postupuje späť od juhovýchodu do Európy (Kulčár, Pribullová 2011).

Pri posudzovaní toho, či išlo o silnú zrážku, hrá dôležitú úlohu množstvo zrážok, ktoré spadne za určitú dobu, čiže intenzita zrážok, rovnako aj plocha územia, ktoré je zasiahnuté zrážkami. Existuje niekoľko možností, ako kategorizovať intenzitu zrážok podľa dĺžky trvania a ich množstva. Jednou z nich je napríklad Wussowov vzťah. Tento vzťah kategorizuje zrážky do troch hlavných skupín: a) Normálny dážď, b) Silný lejak, c) Katastrofický lejak. Hranice jednotlivých kategórií sú vyjadrené nerovnosťami

$$h \leq \sqrt{5t} \quad (1),$$

$$2\sqrt{5t} \geq h > \sqrt{5t} \quad (2),$$

$$h > 2\sqrt{5t} \quad (3),$$

kde h predstavuje množstvo spadnutých zrážok a t dobu ich trvania. Nerovnosť (1) predstavuje normálny dážď, nerovnosť (2) silný lejak a (3) vyjadruje katastrofický lejak. Uvedené nerovnosti platia pre zrážky, ktoré trvajú menej ako dve hodiny. Pre zrážky trvajúce viac ako dve hodiny sa vzťah pod odmocninou modifikuje na tvar $5t - \frac{1}{576} t^2$ (eMS 2020).

Z pohľadu sezonality extrémnych úhrnov zrážok v Česku môžeme tvrdiť, že najextrémnejšie zrážkové udalosti sa vyskytujú v letných mesiacoch, a to predovšetkým na prelome mesiacov júl a august (Müller et al. 2015). Tento fakt dokazujú napríklad aj rekordy denných úhrnov zrážok nielen z Česka, ale aj z okolitých krajín v strednej Európe. Ako príklad môžeme uviesť rekordný jednodenný úhrn zrážok pre Česko, ktorý má hodnotu 345,1 mm, a bol nameraný na stanici Nová Louka 29.7. 1897. Slovenský oficiálny rekord (231,9 mm) pochádza z 12.7. 1957 a bol nameraný v obci Salka na južnom Slovensku nedaľeko sútoku riek Ipeľ a Dunaj (Munzar et al. 2011).

Na hodnotenie a analyzovanie extremity zrážok sa využívajú rôzne metódy. Často sa využíva metóda prekročenia určitej prahovej hodnoty (napr. 95. percentil), vhodným a dobrým prístrojom na hodnotenie extremity zrážok sú tiež tzv. Severity Diagrams (SD diagramy), ktoré na popis extremity zrážkovej udalosti využívajú kombináciu doby opakovania, dĺžku trvania zrážky a plochu, ktorá bola pri zrážkovej udalosti zasiahnutá (Polášek 2012).

Silné zrážky sa môžu v krajine prejaviť v podobe povodní. Povodne patria z hľadiska strát na životoch a materiálnych škôd medzi najničivejšie hydrometeorologické ohrozenia a preto sa im venuje veľká pozornosť (Brázdil et al. 2007). Podľa eMS (2020) môžeme povodeň definovať ako „výrazné prechodné zvýšenie hladiny toku, spôsobené náhlým nárastom prietoku alebo dočasným zmenšením prietoku koryta, pričom môže dôjsť k rozlivu vody mimo koryto.“ Brázdil et al. (2005) rozdeľuje povodne podľa príčiny vzniku na a) dažďové, b) snehové, c) zmiešané a d) ľadové.

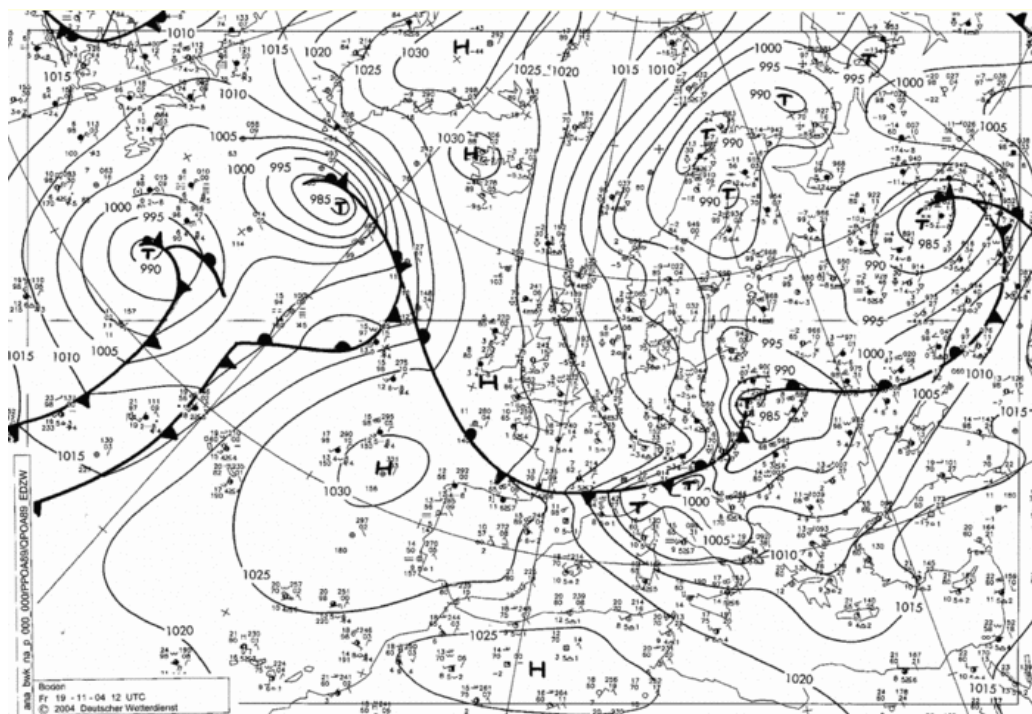
Špecifickým druhom povodní sú povodne, ktoré nevznikajú iba pôsobením intenzívnych zrážok, ale ich vznik je podmienený spolupôsobením viacerých faktorov. Príkladom môžu byť povodne v pobrežných oblastiach západnej Európy. Príčinou týchto povodní nemusia byť iba samotné zrážky, ale aj silný vietor, ktorý spôsobí vzdušný náraz hladiny. Kombinácia týchto javov môže mať vo výsledku ničivejšie účinky.

2.3 Silný vietor

Silný vietor je príčinou značných materiálnych škôd v lokálnej až regionálnej mierke a občas si vyžiada aj straty na ľudských životoch (Brázdil et al. 2007). Udalosti s výskytom silného vetra sa obyčajne spájajú buď so silným tlakovým gradientom v synoptickej mierke alebo môžu súvisieť s konvektívnymi búrkami (Kašpar et al. 2017).

Prvý typ udalostí s výskytom silného vetra je podmienený výskytom hlbokoj tlakovej níže, ktorá vznikne nad Atlantikom, a postupuje ďalej na východ, a často zasahuje oblasť Veľkej Británie, či Škandinávského polostrova. Niekedy môžu mať tieto cyklóny aj južnejšiu dráhu, a vtedy je silným vetrom zasiahnutá aj stredná Európa (Polášek 2015). Takáto situácia nastala napríklad v novembri 2004, kedy tlaková níž postupovala cez Česko a južné Poľsko ďalej na východ a spôsobila obrovské škody na lesoch vo Vysokých Tatrách (viď obr. 1). Výskyt udalostí tohto typu je viazaný na chladnú polovicu roka (október – marec) a obvykle zasahujú väčšiu plochu ako silný vietor spôsobený konvektívnymi búrkami. Na druhú stranu sa však, veterné udalosti vyskytujúce sa v chladnej polovici roka, často vyznačujú nižšími nárazmi vetra ako udalosti spojené s prejavmi konvektívnych búrok, ktoré sú typickejšie pre teplú polovicu roka (Kašpar et al. 2017). Vysoké rýchlosti vetra môžu byť takisto spôsobené lokálnymi cirkulačnými systémami, ktoré môžu zosilniť vetry synoptickej mierky. Medzi takéto vetry patria padavé vetry fén a bóra. Tieto vetry sa tiež

označujú ako vetry orografické, pretože ich vznik je podmienený orografiou (Kulčár, Pribullová 2011).



Obr. 1 Synoptická situácia nad Európou 19.11. 2004, 12 UTC (zdroj: wetter3.de).

V druhom prípade sa silný vietor viaže na sprievodné javy konvektívnych búrok, ako sú tzv. downburst, čo je označenie pre silný zostup studeného vzduchu, húľava, tromba či tornádo. Ich výskyt je častejší v období od apríla do septembra, čiže v teplej polovici roka (Polášek 2015).

Pre hodnotenie sily vetra bolo v minulosti vyvinutých viacero stupníc, ktoré kategorizujú silu vetra na základe jeho rýchlosti. Veľmi známou stupnicou je Beaufortova stupnica sily vetra, ktorá rozdeľuje vietor na základe jeho prejavov a účinkov do 13 kategórií. Pre tropické cyklóny sa najčastejšie využíva stupnica Saffir-Simpsonova, ktorá triedi tropické cyklóny na základe maximálneho nameraného minútového priemeru rýchlosti vetra pri zemskom povrchu do piatich kategórií (Kulčár, Pribullová 2011). Samotnú ničivosť veterných udalostí môžeme hodnotiť napríklad pomocou Storm Severity Index-u. Výsledná hodnota tohto indexu je úmerná zasiahnutej ploche a tretej mocnине normovanej kladnej odchýlky dennej maximálnej rýchlosti vetra od lokálnej prahovej hodnoty (Polášek 2012).

Silný vietor sa v krajine zväčša prejavuje negatívne, a to v podobe poškodenia budov, či lesných porastov. Niekedy môže silný vietor spôsobiť straty na živochoch. Na súši, hlavne v aridných oblastiach, sa silný vietor prejavuje v podobe prachových búrok. V pobrežných oblastiach dochádza pôsobením silného vetra k zvýšeniu hladiny oceánu, ktoré je spôsobené predovšetkým konfluentným prúdením. Obzvlášť nebezpečné je toto zvýšenie alebo vzduť hladiny v hlbokých zálivoch, či ústiach riek, kde môže dosiahnuť až niekoľko metrov (eMS 2020). Ďalším z prejavov silného vetra na pobreží je vlnobitie.

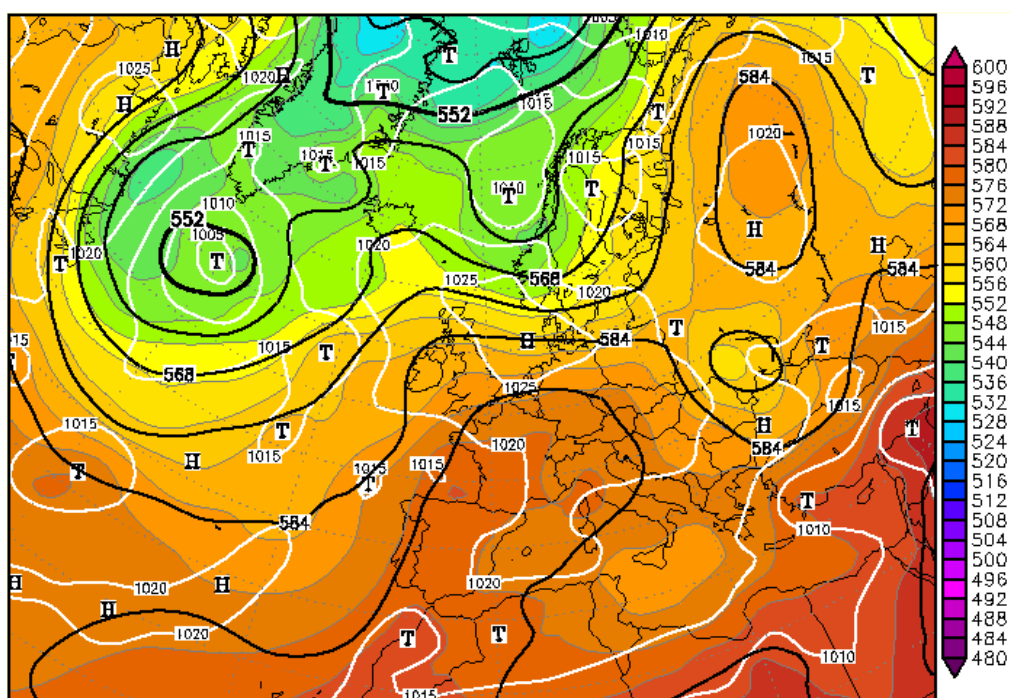
Keďže je výskyt silného vetra často podmienený hlbokou tlakovou nížou, dopady takejto situácie nemusia byť spôsobené iba pôsobením silného vetra. Tlaková níž sa môže v danej oblasti prejaviť nielen silným vetrom, ale aj silnými zrážkami. Ako bolo spomenuté vyššie, jedným z dopadov alebo prejavov silného vetra je zvýšenie hladiny oceánu. Toto vzduť spôsobené silným vetrom býva často spojené aj so silnými zrážkami. Z tohto dôvodu sa môžu oba extrémny vyskytnúť spoločne, čo môže viesť k ničivejším dopadom ako keby tieto javy pôsobili samostatne (Zheng, Westra, Sisson 2013). Silný vietor, ktorý súvisí s konvektívnymi zrážkami, sa často vyskytuje aj spoločne s krupobitím alebo bleskami, čo môže opäť znamenať závažnejšie dopady, oproti situácii, kedy by sa pri búrke nevyskytlo krupobitie.

2.4 Vlny horúčav

Vlny horúčav sú v dobe globálneho otepľovania veľmi často skúmanou problematikou. Obdobia s nadnormálne vysokými teplotami vzduchu môžu, hlavne počas leta, viesť k významným negatívnym ekonomickým, sociálnym a environmentálnym efektom (Della-Marta et al. 2007). Známymi príkladmi vln horúčav z minulosti sú napríklad vlny horúčav z rokov 2003 a 2010, ktoré zasiahli v prvom prípade Francúzsko a západnú Európu, v druhom prípade Rusko (viď obr. 2).

Definícia pojmu „vlna horúčav“ nie je doposiaľ jednotná a existuje viacero možností ako ho definovať (Kolláriková, Szolgay, Pecho 2013). Podľa Robinsona (2001, s.2) môžeme vlnu horúčav definovať ako „výrazne dlhšie obdobie teplotného stresu zapríčineného atmosférickými vplyvmi, ktorý spôsobuje dočasné zmeny v životnom štýle ľudí a môže spôsobiť nepriaznivé účinky na zdravie zasiahnutej populácie.“

Na identifikovanie vln horúčav sa často používa spôsob, pri ktorom sa sleduje, či maximálna denná teplota vzduchu vystúpila nad určitú stanovenú prahovú hodnotu. V našich podmienkach sa prevažne za túto hodnotu volí hodnota 30 °C. Kyselý, Květoň, Kalvová (2000) vo svojej definícii vlny horúčav zohľadňovali tri kritériá. Maximálna teplota vzduchu počas aspoň troch po sebe idúcich dní musí dosiahnuť minimálne 30 °C, priemerná denná maximálna teplota vzduchu celého obdobia musí dosiahnuť aspoň 30 °C, a maximálna teplota vzduchu počas celého skúmaného časového úseku nesmie klesnúť pod 25 °C. Stanovenie týchto hraníc sa líši v závislosti od klimatických pomerov daného územia. V chladnejších klimatických oblastiach by sa logicky mala voliť táto hodnota nižšia ako v teplých klimatických oblastiach. Pomerne často sa ako prahové hodnoty volia aj percentily štatistického rozdelenia maximálnej dennej teploty vzduchu. Bežnými hodnotami sú 80., 90. alebo 95. percentil z letných hodnôt (Kolláriková, Szolgay, Pecho 2013). Prác, ktoré sa venovali vlnám horúčav, je pomerne mnoho. Príklady prác, kde sa využil na definíciu vlny tepla určitý vybraný percentil, sú práce autorov Della-Marta et al. (2007) a Andrade, Leite, Santos (2012), ktorí použili na definovanie vlny horúčav 80. percentil, respektíve 90. percentil dennej maximálnej teploty vzduchu.



Obr. 2 Synoptická situácia nad Európou dňa 4.8. 2003, 12 UTC počas vlny horúčav v západnej Európe. Čierne línie označujú výšku hladiny 500 hPa biele línie označujú prízemný tlak vzduchu a farebná stupnica vyjadruje hrúbku vrstvy medzi hladinami 1000 a 500 hPa (zdroj: wetter3.de).

Príčinou vln horúčav je hlavne advekcia teplého vzduchu a radiačné ohrievanie vzduchu pri anticyklonálnom bezoblačnom počasí. Pre výskyt vln horúčav v Európe je dôležité, ak je zoslabený tzv. meridionálny tlakový gradient, čo znamená, že zonálne prúdenie je oslabené a prenos vzduchových hmôt z Atlantiku je blokovaný vysokým tlakom vzduchu (Andrade, Leite, Santos 2012). V Česku a priestore strednej Európy sa epizódy s výrazne nadpriemernými až extrémnymi teplotami vzduchu vyskytujú hlavne počas advekcie teplého vzduchu, ktorá je spojená s hrebeňom vysokého tlaku vzduchu, tiahnuceho sa od juhozápadu cez strednú Európu k severovýchodu. V priebehu roka sa vlny horúčav v Českej republike najčastejšie vyskytujú v druhej polovici júla a prvom týždni augusta (Valeriánová et al. 2017).

Pri hodnotení extremity vln horúčav sa sleduje hlavne dĺžka ich trvania a teplota vzduchu. Známymi indexami, ktoré sa používajú na popis extremity vln horúčav, sú napríklad HWD (Heat Wave Duration), alebo HWI (Heat Wave Intensity). Index HWD vyjadruje dobu trvania najdlhšej vlny, ktorá sa v danom období vyskytla, zatiaľ čo HWI kvantifikuje najväčší rozdiel medzi teplotou vzduchu, ktorá bola nameraná, a prahovou hodnotou spomedzi všetkých vln, ktoré sa v danom období vyskytli (Polášek 2012).

Vlny horúčav majú značný vplyv na človeka a ekosystémy. Obdobia s výskytom veľmi vysokých teplôt ovplyvňujú mnoho stránok ľudského života a sú spojené predovšetkým s vyššou úmrtnosťou hlavne starších ľudí, požiarimi a problémami s vodou (jej dostupnosťou a kvalitou), ktoré súvisia s častým spoločným výskytom sucha a vln horúčav. Počas vln horúčav sú časté výpadky elektrickej energie, v dôsledku zvýšeného používania klimatizácie. Negatívne vplyvy vln horúčav sú takisto pozorované v poľnohospodárstve, kde dochádza ku finančným stratám v dôsledku poškodenia plodín (Della-Marta et al. 2007; Zuo et al. 2015).

2.5 Sucho

S vlnami horúčav veľmi úzko súvisí výskyt sucha. Sucho sa môže vyskytnúť v ktorejkoľvek časti sveta a patrí medzi najničivejšie prírodné ohrozenia, ktorým čelí ľudská spoločnosť (Schubert et al. 2016).

Podľa časovej mierky a dopadov je možné sucho rozdeliť do štyroch kategórií a) sucho meteorologické, b) sucho hydrologické, c) sucho poľnohospodárske, d) sucho

socioekonomické. Meteorologické sucho je definované pomocou meteorologických prvkov, najbežnejšie pomocou deficitu úhrnu zrážok. Tento typ sucha predchádza všetkým ostatným druhom sucha. Nedostatok zrážok vedie, s určitým časovým odstupom, k nedostatku vody v riekach či nádržiach, čo má za následok sucho hydrologické. Poľnohospodárske sucho je charakterizované nedostatkom vody pre rast rastlín a môže trvať od niekoľkých týždňov až po obdobie niekoľkých mesiacov (Brázdil, Trnka et al. 2015).

Zrážkový deficit býva často v teplej polovici roka previazaný s nadnormálnymi teplotami vzduchu, preto sú aj synoptické situácie, vedúce k výskytu sucha, v podstate rovnaké ako pri vlnách horúčav. Vo všeobecnosti sa suché obdobia viažu na stabilné anticyklonálne bezoblačné počasie. V mnohých častiach sveta, ako je napríklad Južná Amerika alebo Austrália, súvisí výskyt sucha s variabilitou povrchovej teploty oceánu (Schubert et al. 2016).

Pre posudzovanie meteorologického sucha je používané veľké množstvo indexov sucha. Každý z nich má svoje výhody, ale rovnako aj nevýhody, preto je vhodné hodnotiť sucho z viacerých uhlov pohľadu a použiť na jeho hodnotenie viacero indexov. Pomerne rozšíreným indexom je štandardizovaný zrážkový index (SPI). Tento index sleduje odchýlky úhrnov zrážok od strednej hodnoty teoretickej funkcie, ktorou sú dáta preložené. Záporné hodnoty indexu znamenajú suché obdobie (viď tab. 1). Sucho identifikované podľa tohto indexu však neznamená, že by sa v danom období nevyskytli žiadne zrážky (Klimatický atlas Slovenska 2015).

Tab. 1 Hodnotenie období sucha podľa štandardizovaného zrážkového indexu (zdroj: Klimatický atlas Slovenska).

Hodnotenie období podľa SPI	
Hodnota SPI	Obdobie
2,0 a viac	extrémne vlhké
1,5<SPI<2,0	veľmi vlhké
1,0<SPI<1,5	mierne vlhké
-1,0<SPI<1,0	blízke normálnym podmienkam
-1,5<SPI<-1,0	mierne suché
-2,0<SPI<-1,5	veľmi suché
-2,0 a menej	extrémne suché

Iný prístup k hodnoteniu sucha predstavuje Palmerov index intenzity sucha (PDSI). Výpočet tohto indexu je založený na vodnej bilancii daného územia. Sleduje sa úhrn zrážok za určité sledované obdobie (typicky je to jeden mesiac), aktuálny obsah vody v pôde a evapotranspiračná zložka, ktorá je vypočítaná tzv. Thornwaitovou metódou (Brázdil, Trnka et. al. 2015). Z ďalších indexov používaných na hodnotenie sucha môžeme ďalej spomenúť napríklad štandardizovaný zrážkový a evapotranspiračný index (SPEI) alebo Langov dažďový faktor.

Zrejme najzávažnejšie sa sucho prejavuje v poľnohospodárstve. Mnoho analýz venujúcich sa väzbám medzi poľnohospodárskym suchom a výnosmi plodín dokázalo, že významné periódy sucha prispievajú k nízkym výnosom plodín. Sucho takisto zhoršuje fyziologický stav drevín a tie sú potom menej odolné voči škodcom (Brázdil, Trnka et al. 2015).

Vo vodnom hospodárstve sa sucho prejavuje znížením prietokov vodných tokov a poklesom zásob podzemnej vody alebo vody v nádržiach. Je namieste dodať, že sucho sa v krajine nemusí prejavovať zreteľne a jasne okamžite po vzniku deficitu zrážok. Ku škodám často dochádza s určitým časovým odstupom. Záleží napríklad na čase výskytu suchej periódy. Napríklad suchá perióda v decembri nemá až tak závažné prejavy ako suchá perióda v lete, pretože nepostihuje priamu poľnohospodársku produkciu. Avšak, pre vodohospodárov má suchá perióda aj počas zimy zreteľné prejavy v podobe postupného klesania výšky hladiny podzemnej vody. Tento fenomén sa zvykne označovať ako zelené sucho (Valach, Vido, Škvarenina 2016).

Suchu sa veľká pozornosť venuje obzvlášť v teplej polovici roka (apríl–september). Nakoľko sa výskyt sucha obvykle viaže na anticyklonálne počasie, je jeho výskyt v teplej polovici roka prevažne spojený s vysokými teplotami vzduchu. Vysoké teploty vzduchu napomáhajú k intenzívnejšiemu výparu vody z pôdy, a tým môžu prispieť k väčšej závažnosti hlavne poľnohospodárskeho sucha. Avšak, spoločnému pôsobeniu tepla a deficitu zrážok sa doposiaľ nevenovala veľká pozornosť. Vplyvy vln horúčav a sucha sa posudzovali skôr samostatne.

3 Koncept združených hydrometeorologických udalostí

3.1 Definícia združených hydrometeorologických udalostí

V predchádzajúcej kapitole boli stručne opísané hlavné hydrometeorologické ohrozenia, ktoré sa môžu vyskytnúť samostatne, avšak veľa štúdií, ktoré budú v texte ďalej citované, preukázali, že dopady extrémnych hydrometeorologických udalostí sú väčšinou spôsobené spolupôsobením viacerých hydrometeorologických ohrození. V tejto kapitole budú predstavené definície združených hydrometeorologických udalostí.

Zrejme prvá definícia, ktorá popisuje spolupôsobenie viacerých meteorologických alebo klimatických prvkov, definuje združené udalosti nasledovne: „Drsné počasie [severe weather] viažuce sa na určitý typ klimatického fenoménu, často vyžadujúci kombináciu meteorologických javov“ (IPCC 2001, s. 92). Táto definícia neoznačuje spolupôsobenie viacerých meteorologických činiteľov ako združené udalosti, ale ako komplexné extrémny. Ako príklady sú uvedené tropická cyklóna, suchá alebo udalosti spojené s ENSO. Ďalšia definícia podľa IPCC (2012, s. 118) už zavádza pojem združené udalosti a definuje ich nasledovne: „1) Dve alebo viac extrémnych situácií vyskytujúcich sa súčasne alebo postupne. 2) Kombinácia extrémnych udalostí s pôvodnými/aktuálnymi podmienkami [underlying conditions], ktoré zosilnia dopady týchto udalostí. 3) Kombinácia udalostí, ktoré nie sú extrémami, ale ich spolupôsobenie môže spôsobiť extrémnu udalosť.“ Táto definícia ako prvá predstavila koncept združených udalostí.

Táto definícia má však podľa Leonarda et al. (2014) niekoľko nejasností. Prvou z nich je úloha aktuálnych podmienok. Podľa tejto definície nie je jasné, či aktuálne podmienky už existujúcu združenú udalosť zosilňujú alebo či ich môžeme považovať za súčasť združenej udalosti. Ďalším problémom definície IPCC je nejasnosť v tom, či za združenú udalosť môžeme považovať jednu samostatnú udalosť, ktorá vznikla spolupôsobením dvoch, prípadne viacerých meteorologických javov, alebo je združená udalosť zložená z dvoch alebo viacerých odlišných udalostí (Leonard et al. 2014). Časť definície popisujúca postupné alebo súčasné pôsobenie, takisto nie je jednoznačne definovaná a jasná, pretože si pod ňou môžeme predstaviť odlišné časové a priestorové mierky (Martius, Pfahl, Chevalier 2016; Leonard et al. 2014).

Leonard et al. (2014) poukazujú na to, že kategorizovanie združených udalostí do jednotlivých tried vytvára umelé hranice, ktoré sú v prírode ťažko definovateľné. Preto navrhujú všeobecnejšiu definíciu združených udalostí, ktorá zdôrazňuje tri kľúčové charakteristiky združených udalostí, a to extrémnosť dopadu, spolupôsobenie viacerých činiteľov a štatistickú závislosť pôsobiacich činiteľov. Definícia podľa Leonarda et al. (2014, s. 3) znie „Združená udalosť je extrémny dopad, ktorý závisí na štatisticky závislých javoch alebo udalostiach.“ Dopad je funkcia všetkých prispievajúcich faktorov, či už vyplývajú z ohrozenia, zraniteľnosti alebo expozície. Táto definícia v sebe zahŕňa nutnosť štatistickej závislosti medzi javmi, ktoré spôsobujú extrémne dopady, pričom činitelia alebo premenné, ktoré pôsobia spoločne, nemusia byť samé o sebe extrémne, podobne ako je tomu v definícii od IPCC (2012).

Ako príklad združenej udalosti uvádzajú Leonard et al. (2014) pobrežnú povodeň. Zároveň na základe svojej definície vysvetľujú, prečo v tomto prípade išlo o združenú udalosť. Pobrežná povodeň je združenou udalosťou, pretože 1) metrika dopadu (úroveň hladiny mora) sa dá považovať za extrémnu, 2) dopad tejto udalosti (negatívne účinky povodne) je spôsobený dvomi, prípadne viacerými klimatickými alebo meteorologickými javmi (dážď a vzdušná morská hladina vetrom), 3) medzi javmi, ktoré spôsobili túto povodeň, existuje štatistická závislosť. Na druhú stranu však uvádzajú príklad, kedy by pobrežná povodeň nebola považovaná za združenú udalosť. Pobrežnú povodeň by sme nemohli označiť za združenú udalosť, ak by napríklad úroveň hladiny mora nebola extrémna aj napriek extrémnemu dažďu.

Najnovšia definícia združených udalostí túto štatistickú závislosť medzi procesmi, ktoré spôsobujú ohrozenie, nezahŕňa. Autori Zscheischler et al. (2018, s. 2) definujú združené meteorologické/klimatické udalosti ako „kombináciu viacerých hydrometeorologických ohrození alebo meteorologických javov, ktoré prispievajú k spoločenským alebo environmentálnym rizikám.“ V tomto prípade ide o ďalšie zjednodušenie vyššie uvedených definícií. Tým pádom by sme mohli na základe tejto definície za združené udalosti považovať aj náhodnú kombináciu udalostí, ktorá môže spôsobiť väčšie škody. Dôležitým spoločným znakom všetkých definícií je spolupôsobenie alebo interakcia viacerých meteorologických javov, ktoré sú buď rovnakého, alebo odlišného typu (Hao, Singh, Hao 2018).

Združené udalosti môžeme označiť ako zvláštny druh hydrometeorologického ohrozenia (IPCC 2012). Ohrozenie, ako bolo spomenuté v druhej kapitole, môže potenciálne

ohroziť ekosystémy, ľudský majetok, či dokonca ľudský život. Z tohto dôvodu im venujú pozornosť nielen meteorológovia, ale takisto aj politici, hasiči či záchranári. Z pohľadu politikov alebo záchranárov, v angličtine je zaužívaný pojem „stakeholders“ (zodpovedné osoby, doslovne tí, čo počas krízy udávajú smer), môžu byť za združené udalosti považované aj také situácie, keď jeden typ ohrozenia spôsobí viacero dopadov na spoločnosť, prípadne sa na území jedného štátu vyskytnú súčasne dve ohrozenia. Ako príklad je možné uviesť povodeň, ktorá je schopná spôsobiť poškodenie majetku a zároveň straty na životoch, alebo vlny horúčav, ktoré môžu spôsobiť straty na životoch, ale aj výpadky elektrickej energie v dôsledku jej vyššej spotreby na klimatizovanie budov, ako bolo uvedené v podkapitole 2.4. Druhým prípadom je napríklad súčasný výskyt požiarov na juhu a záplavy na severe krajiny (prípád Austrálie vo februári 2009). Všetky tieto prípady sú združenými udalosťami skôr z pohľadu politikov ako z pohľadu meteorologických podmienok, pretože spomínaná povodeň môže byť spôsobená iba jedným meteorologickým javom. Z tohto dôvodu by sa nejednalo o združenú udalosť z meteorologického, ale skôr z politického pohľadu (Leonard et al. 2014).

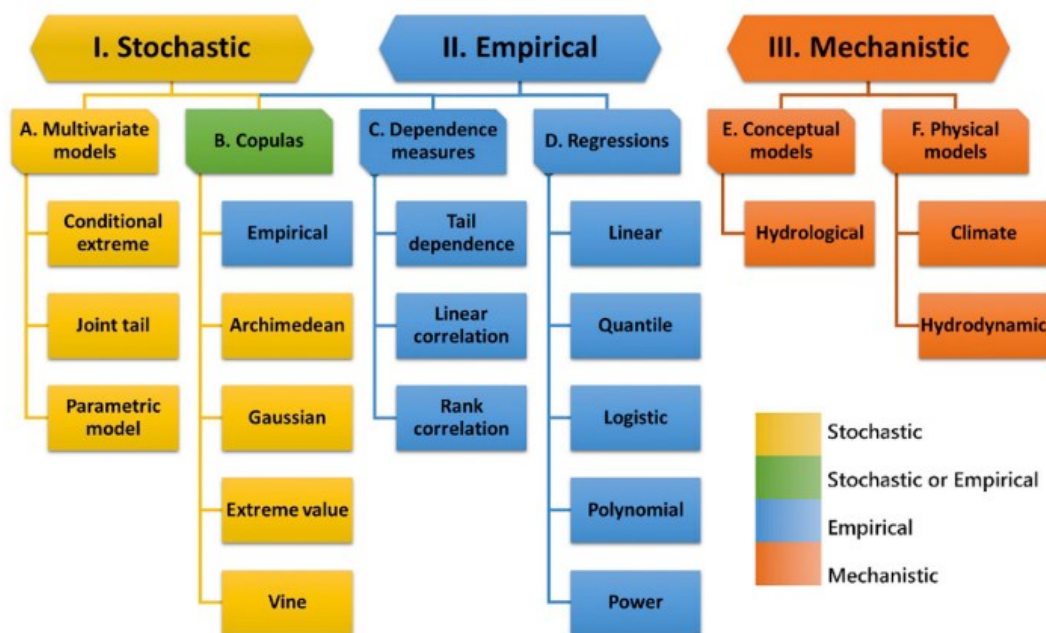
Z vyššie uvedených definícií asi najlepšie vystihuje podstatu združených hydrometeorologických udalostí definícia od autorov Leonard et al. (2014). Zohľadňuje totiž závislosť medzi meteorologickými javmi, ktoré spolupôsobia a vedú k určitému typu dopadu. Rovnako kladie dôraz na to, aby bol dopad spolupôsobiacich javov extrémny. Táto závislosť medzi spolupôsobiacimi javmi alebo udalosťami predstavuje základný aspekt združených meteorologických udalostí (Bevacqua et al. 2017). Ostatné definície túto závislosť pre definovanie združenej udalosti nevyžadovali. Zahrnutie štatistickej závislosti do definície združených udalostí by mohlo pomôcť pri rozhodovaní, či danú udalosť môžeme považovať za združenú, alebo či išlo len o náhodnú kombináciu udalostí vedúcich k združenému dopadu, avšak niektorí autori (napríklad Zscheischler et al. 2018) túto náhodnú kombináciu takisto zaraďujú medzi združené udalosti.

3.2 Štatistické metódy k hodnoteniu združených udalostí

V tejto kapitole budú opísané štatistické metódy, ktoré sa používajú na popis a analyzovanie združených hydrometeorologických udalostí. Týchto metód existuje pomerne veľa, z tohto dôvodu budú popísané iba niektoré z nich. Hao et al. (2018) rozlišuje päť základných metód:

- Empirická metóda
- Metóda viacrozmerného rozdelenia
- Metóda indikátora
- Kvantilová regresia
- Markovov reťazec

Tilloy et. al (2019) vytvoril tri hlavné skupiny metód na analyzovanie mnohonásobných ohrození. Značná časť z nich sa však používa aj na analyzovanie združených hydrometeorologických udalostí. Medzi spomínané tri hlavné skupiny patria stochastická metóda, empirická metóda a tzv. mechanická metóda. Obr. 3 ukazuje schému delenia jednotlivých metód do príslušných skupín.



Obr. 3 Tri hlavné skupiny metód analyzovania viacnásobných prírodných ohrození a ich ďalšie delenie na jednotlivé podskupiny (zdroj: Tilloy et. al , 2019).

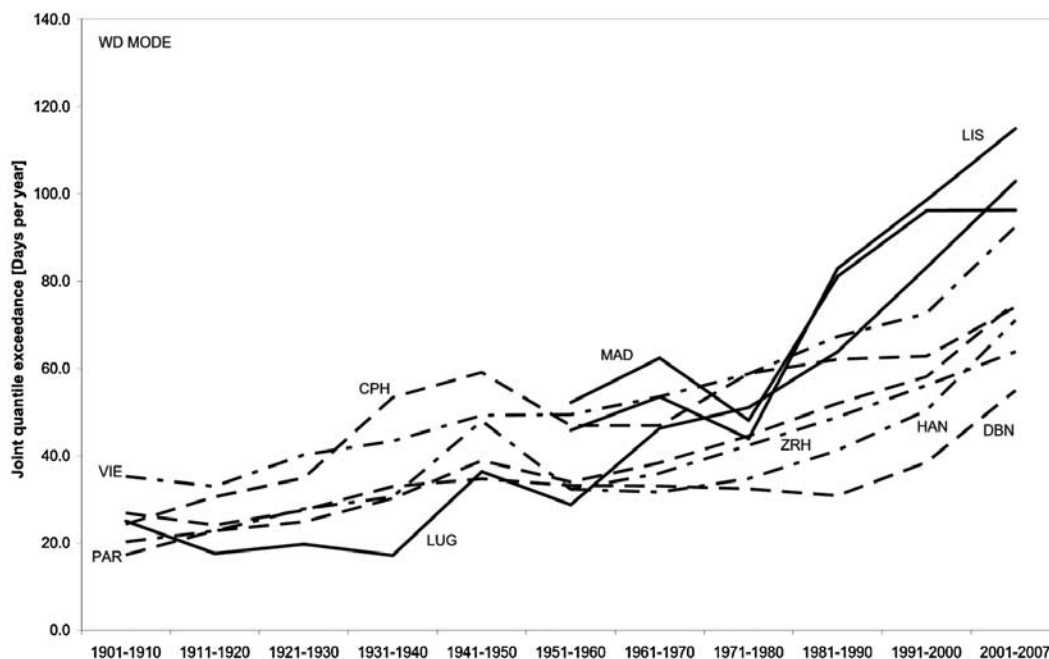
3.2.1 Empirický prístup

Empirický prístup analyzovania združených udalostí patrí medzi jednoduché prístupy k analyzovaniu združených udalostí. Tento prístup je založený na počítaní spoločného výskytu dvoch alebo viacerých extrémov (Hao, Singh, Hao 2018). Extrém je v tomto prístupe definovaný ako hodnota, ktorá sa vyskytuje nad, respektíve pod určitou prahovou hodnotou. Najčastejšie sa ako prahové hodnoty používajú 90., respektíve 10. percentily distribučnej funkcie skúmaného prvku (Beniston 2009), avšak v niektorých prácach sa môžeme stretnúť aj s použitím iných prahových hodnôt. Často ide o 75., respektíve 25. percentily (Hao, Aghakouchak, Phillips 2013). Prahovou hodnotou môžu byť aj určité charakteristické hodnoty nejakého meteorologického prvku, napríklad denný úhrn zrážok nad 20 mm (Miao et al. 2016). Prípadne sa môže za prahovú hodnotu zvoliť aj určitá kritická hodnota niektorého indexu. V prípade sucha by sme mohli uvažovať o extrémnosti, ak hodnoty štandardizovaného zrážkového indexu poklesnú pod -2.

Pri empirickom prístupe sa najprv podľa zvolenej prahovej hodnoty vypočíta počet extrémnych udalostí v rámci jedného meteorologického prvku (napríklad teplota vzduchu alebo zrážky). Následne sa zistí počet spoločných výskytov extrémov. Tento prístup sa často používa napríklad pre analyzovanie spoločného výskytu extrémnych zrážok a extrémnych teplôt.

Príkladom empirického prístupu je napríklad práca Benistona (2009), v ktorej autor posudzuje spoločný výskyt extrémnych teplôt a extrémnych zrážkových pomerov. Obr. 4 ukazuje vývoj spoločného prekročenia zvoleného percentilu (v dňoch za rok), konkrétne ide o súčasný výskyt sucha a vysokých teplôt.

Empirický prístup je bežne používaný na charakterizovanie variability združených udalostí, ako je napríklad frekvencia ich výskytu alebo trendová analýza, avšak nevýhodou tohto prístupu je požiadavka na veľké množstvo dát a dlhý rad pozorovaní (Hao, Singh, Hao 2018). Ďalšou nevýhodou je neschopnosť tohto prístupu zachytiť také udalosti, pri ktorých je iba jeden, prípadne žiadny zo spolupôsobiacich javov extrémny (Zheng et al. 2014).



Obr. 4 Priemerný počet dní za desaťročie, kedy bola prekročená zvolená prahová hodnota pre spoločný výskyt extrémne vysokých teplôt a extrémne nízkych úhrnov zrážok (zdroj: Beniston, 2009).

3.2.2 Chvostová závislosť

Pri hodnotení združených hydrometeorologických udalostí je často využívanou metódou meranie závislosti medzi pôsobiacimi javmi. Meranie závislosti slúži na vyjadrenie toho, ako sú dve premenné medzi sebou korelované, pričom túto koreláciu medzi premennými môžeme vyjadriť pomocou korelačných koeficientov, ako sú napríklad Pearsonov, Spearmanov alebo Kendallov. Pri hodnotení extrémov sa však často hodnotí závislosť na chvostoch rozdelenia. Použitie spomenutých korelačných koeficientov na hodnotenie tejto chvostovej alebo tzv. asymptotickej závislosti nie je úplne vhodné (Tilloy et al. 2019).

Koeficient vyjadrujúci chvostovú závislosť dvoch premenných X a Y sa dá vyjadriť vzorcom

$$\chi_p = \lim_{p \rightarrow 1} \Pr \{ F_Y(y) > p \mid F_X(x) > p \} \quad (4),$$

kde F_y a F_x sú marginálne distribučné funkcie premenných y a x , p je z intervalu $(0,1)$. Hodnota koeficientu χ_p vyjadruje mieru asymptotickej závislosti medzi premennými X a Y . Ak sa hodnota koeficientu rovná nule, potom môžeme tvrdiť, že premenné X a Y sú

asymptoticky nezávislé. Naopak ak sa hodnota koeficientu rovná jednej, môžeme tieto premenné označiť za ideálne asymptoticky závislé. Hodnota tohto koeficientu sa dá interpretovať ako pravdepodobnosť, že premenná X, napríklad úhrn zrážok, je extrémna (pre zvolenú prahovú hodnotu) pod podmienkou, že aj premenná Y, napríklad vzdušná morská hladina, je extrémna. Ak by napríklad $\chi_p=1$, a zároveň je premenná X extrémna, to znamená, že prekročila určitú prahovú hodnotu, potom je stopercentná pravdepodobnosť, že aj premenná Y je extrémna. Hodnota koeficientu 0,1 by znamenala, že existuje desaťpercentná pravdepodobnosť toho, že hodnota premennej X prekročí určitú prahovú hodnotu, za predpokladu, že aj premenná Y prekročí určitú prahovú hodnotu, ktorá je stanovená pre každú premennú individuálne (Klerk et al. 2015; Zheng, Westra, Sisson 2013).

Veľmi často sa tento prístup používa pri skúmaní spoločného pôsobenia silných zrážok a vzdušnej morské hladiny. Túto metódu použili napríklad Zellou, Rahali (2019). V prvom kroku však zisťovali závislosť medzi týmito prvkami aj pomocou klasického Spearmanovho korelačného koeficientu. Hodnota Spearmanovho koeficientu im vyšla 0,26, čo nesignalizuje príliš silnú koreláciu. Ako bolo spomenuté vyššie, bežne používané korelačné koeficienty nie sú úplne vhodné pre analyzovanie závislosti na chvostoch rozdelenia. Z tohto dôvodu sa Zellou, Rahali (2019) rozhodli použiť koncept chvostovej závislosti, pričom hodnota koeficientu chvostovej závislosti v tomto prípade vyšla 0,43.

Meranie závislosti medzi skúmanými premennými, či už pomocou klasických korelačných koeficientov alebo pomocou chvostovej závislosti, je často v prácach, zaoberajúcimi sa združenými hydrometeorologickými udalosťami, používané na prvotný odhad a posúdenie potenciálnej závislosti a takisto môže slúžiť na výber napríklad vhodnej kopule, ktorá sa ďalej používa na analyzovanie vzťahu medzi skúmanými premennými (Tilloy et al. 2019). Kopule budú popísané v nasledujúcej podkapitole.

3.2.3 Metóda kopúl

Na analyzovanie združených hydrometeorologických udalostí sa pomerne nedávno začali využívať prístupy využívajúce kopuly, ktoré umožňujú modelovať závislosť medzi dvomi premennými. Kopula je funkcia združeného rozdelenia, ktorá definuje závislosť medzi dvomi premennými nezávisle na ich marginálnom rozdelení (Tilloy et al. 2019). Pre dve

náhodné veličiny X a Y s kumulatívnymi distribučnými funkciami $F_X(x) = P(X \leq x)$ a $F_Y(y) = P(Y \leq y)$ môžeme združenú distribučnú funkciu premenných X a Y zapísať nasledovne

$$F(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (5),$$

kde C je združená/viacrozmerná distribučná funkcia transformovaných náhodných premenných $U = F_X(X)$ a $V = F_Y(Y)$ (Zscheischler, Seneviratne 2017).

Existuje niekoľko skupín kopúl a v rámci týchto skupín viacero typov kopúl, ako napríklad tzv. eliptické kopuly, medzi ktoré patria Gaussova alebo Studentova- t kopula, alebo Archimedovské kopuly (Frankova, Claytonova, Gumbelova) (Hao et al. 2017). Príklady niektorých kopúl sú uvedené v tab. 2.

Tab. 2 Ukážky vzorcov vybraných kopúl (zdroj: Hao, Singh, Hao 2018).

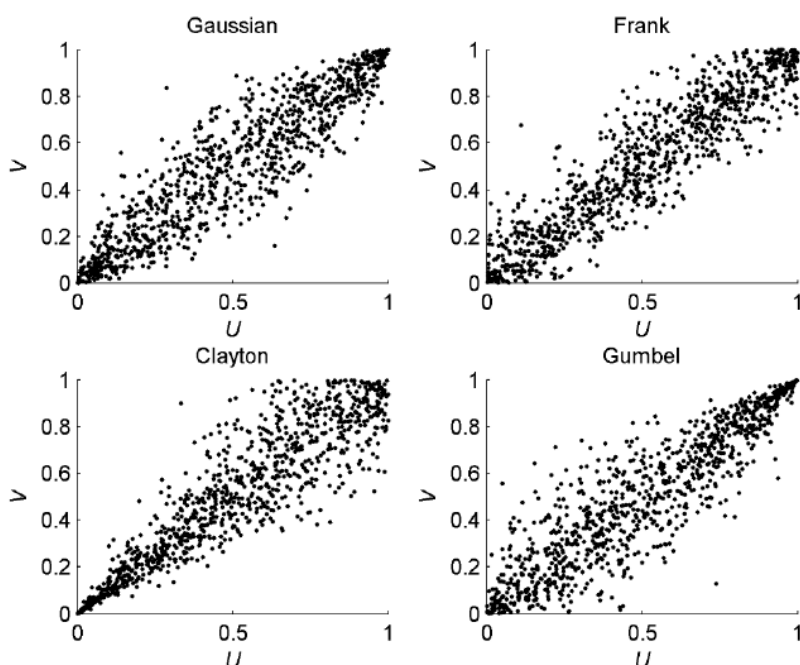
Copulas	$C(u, v)$	Parameter
Gaussian	$\Phi_2(\Phi^{-1}(u), \Phi^{-1}(v)) *$	$\theta \in [-1, 1]$
Clayton	$(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\theta \in (0, \infty)$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\theta \in (-\infty, \infty)$
Gumbel	$\exp \left\{ - \left[(-\log u)^{-\theta} + (-\log v)^{-\theta} \right]^{-1/\theta} \right\}$	$\theta \in [1, \infty)$

Výhodou kopúl je možnosť vyjadrenia vzájomnej závislosti dvojice premenných bez zmeny ich pôvodných marginálnych rozdelení. Pomocou kopúl dokážeme vytvoriť z marginálnych rozdelení združené rozdelenie a získať tak združenú funkciu hustoty, ktorá popisuje závislosť modelovaných náhodných premenných (Páleš 2017). Kopule, na rozdiel od napríklad lineárneho korelačného koeficientu, umožňujú skúmanie asymetrickej závislosti (Topçu Gülöksüz 2016).

Je veľmi dôležité poznamenať, že každá kopula je vhodná pre iný typ závislostnej štruktúry medzi dvomi premennými. Napríklad Gaussova kopula vykazuje silnejšiu závislosť na chvostoch rozdelenia oproti Frankovej kopule, ktorá naopak vykazuje silnejšiu závislosť uprostred rozdelenia. Obe tieto kopuly sú symetrické. Claytonova a Gumbelova kopula sú naopak asymetrické a využívajú sa na popis takých dvoch premenných, pri ktorých sa očakáva ich korelácia na spodnom (Claytonova), respektíve hornom (Gumbelova)

chvoste rozdelenia (Hao, Singh, Hao 2018). Ukážky rozdelenia náhodnej vzorky pozorovaní pomocou jednotlivých kopúl ilustruje obr. 5.

Použitie kopuly, ktorá nevhodne zachytáva závislostnú štruktúru medzi dvomi premennými, na analyzovanie združenej pravdepodobnosti dvoch premenných môže viesť k podhodnoteniu alebo naopak nadhodnoteniu združenej pravdepodobnosti týchto dvoch premenných (Tilloy et al. 2019). Na určenie toho, ktorá kopula je vhodná na analyzovanie konkrétnych dát, sa používajú rôzne kritériá. Medzi najznámejšie z nich patria tzv. AIC (Akaike information criteria) a BIC (Bayesian information criteria). Obidve kritéria využívajú princíp pravdepodobnosti, a takisto pre obidve kritéria platí, že čím menšia je hodnota týchto kritérií, tým je daná kopula vhodnejšia (Topçu Gülöksüz 2016).



Obr. 5 Ukážky rozdelenia vybraných typov kopúl (Gaussova, Frankova, Claytonova a Gumbelova)(zdroj: Hao, Singh, Hao 2018).

3.2.4 Metóda podmienenej pravdepodobnosti

Túto metódu analyzovania združených meteorologických udalostí môžeme podľa práce Hao et. al (2018) zaradiť do skupiny metód využívajúcich viacrozmerne rozdelenie, pretože na vytvorenie združeného rozdelenia je potrebné využitie niektorej z kopúl.

Metóda podmienenej pravdepodobnosti vychádza z predpokladu, že aktuálne podmienky sú ovplyvnené podmienkami predchádzajúcimi (Hao et al. 2017). Táto metóda kvantifikuje vplyv nejakej udalosti na pravdepodobnosť výskytu udalosti, ktorá po nej môže nastať na základe ich vzájomnej závislosti (Hao et al. 2020). Ako príklad môžeme uviesť posudzovanie hydrologického sucha na základe predošlého sucha meteorologického, alebo skúmanie teplotných extrémov na základe predošlého sucha. Touto problematikou sa zaoberalo niekoľko prác (Hao et al. 2016; Mueller, Seneviratne 2012; Wong, van Lanen, Torfs 2013).

Vo všeobecnosti sa dá podmienené rozdelenie dvoch premenných, kde Y závisí na X vyjadriť nasledovne

$$Y|X \sim N\left(\mu_{Y|X}, \Sigma_{Y|X}\right) \quad (6),$$

kde $\mu_{Y|X}$ znamená podmienenú strednú hodnotu a $\Sigma_{Y|X}$ znamená podmienenú kovariančnú maticu (Hao et al. 2016). Podobne ako aj v iných metódach analyzovania združených meteorologických udalostí, aj pri tejto metóde hrajú dôležitú úlohu kopule. Napríklad podmienená pravdepodobnosť výskytu extrémne vysokých teplôt, daná predošlým výskytom sucha, môže byť pomocou kopule vyjadrená nasledovne

$$P_{Y > y | X \leq x} = \frac{P(X \leq x, Y > y)}{P(X \leq x)} = \frac{u - C(u, v)}{u} \quad (7),$$

C v tomto prípade označuje funkciu konkrétnej kopule, ktorá popisuje štruktúru združeného rozdelenia, v tomto prípade dvoch premenných. Čitateľ (v tomto prípade $u - C(u, v)$) znamená pravdepodobnosť združeného výskytu sucha a vysokých teplôt (Hao et al. 2020).

Vyššie citované práce sa prevažne zaoberali vplyvom sucha na výskyt vysokých teplôt, prípadne na vzťah medzi meteorologickým a hydrologickým suchom. Určite by bolo vhodné skúsiť použiť túto metódu aj na iné typy združených udalostí.

3.2.5 Združená pravdepodobnosť, viacrozmerné doby opakovania

Doba opakovania je veľmi často využívaný koncept používaný na hodnotenie rizika (Serinaldi 2015). Je dobré pripomenúť, že doba opakovania je odhadovaný časový interval medzi dvomi udalosťami rovnakého rozsahu alebo intenzity. Avšak, táto definícia neznamená, že sa udalosť určitej intenzity (napríklad 100-ročná povodeň) musí vyskytnúť práve iba raz v určitom špecifikovanom časovom období (napr. 100 rokov). Táto metóda slúži skôr na kvantifikovanie pravdepodobnosti výskytu určitej udalosti, ktorá sa môže vyskytnúť v ktoromkoľvek roku bez ohľadu na to, kedy sa udalosť rovnakej intenzity vyskytla naposledy (Zellou, Rahali 2019).

V prípade, že je skúmaná iba jedna premenná, môžeme dobu opakovania vypočítať podľa vzťahu

$$T_x = \frac{1}{1-F_x(x^*)} \quad (8),$$

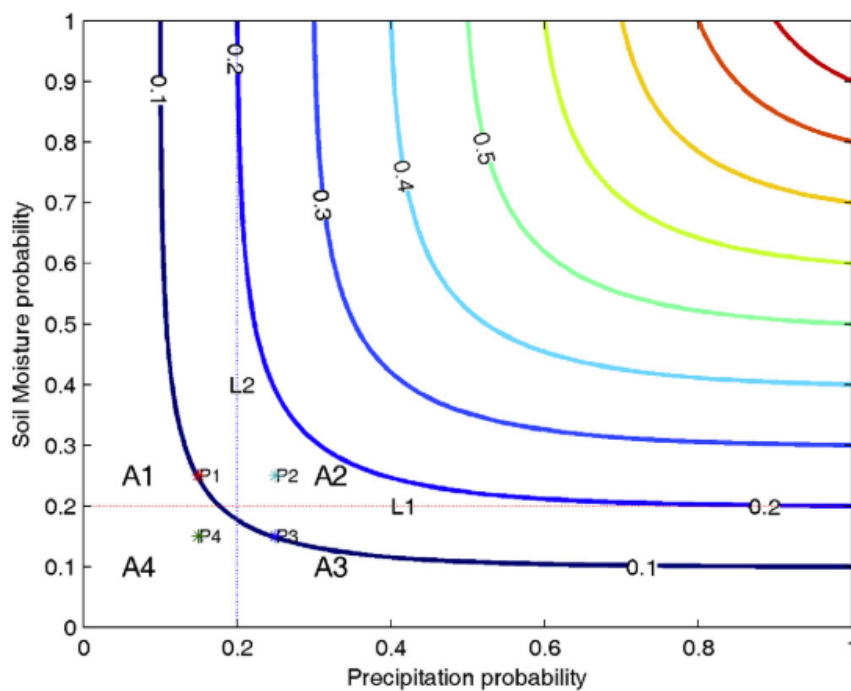
kde F_x označuje kumulatívnu distribučnú funkciu premennej X . Menovateľ $1-F_x(x^*)$ vyjadruje pravdepodobnosť prekročenia špecifickej hodnoty x (Moftakhari et al. 2017; Serinaldi 2015).

Rovnako ako aj v iných metódach, tak aj pri metóde viacrozmerných dôb opakovania hrajú kľúčovú úlohu kopule. Pomocou kopúl môžeme vytvoriť združenú pravdepodobnosť dvoch, prípadne viacerých premenných, popisujúcu ich vzájomnú závislosť. Výpočet tejto združenej pravdepodobnosti je dôležitý pre samotný výpočet viacrozmerných dôb opakovania.

Konštrukcia združenej pravdepodobnosti je užitočná pri popise spoločného výskytu extrémov. Ako bolo uvedené v definícii združených udalostí v správe od IPCC (2012), prvky alebo javy, ktoré sú vo vzájomnej interakcii, nemusia byť vždy extrémne. V podkapitole 3.3 budú združené hydrometeorologické udalosti kategorizované aj na základe toho, či pôsobiace javy boli extrémne alebo nie. Situácia, kedy by ani jeden z pôsobiacich javov nebol extrémny, by však nespádala ani do jednej kategórie v klasifikácii uvedenej v kapitole 3.3. Tento problém pomáha riešiť konštrukcia združenej pravdepodobnosti.

Obr. 6 ilustruje ukážku združenej pravdepodobnosti zrážok a pôdnej vlhkosti. Autori Hao a AghaKouchak (2013) použili tieto dva prvky na hodnotenie sucha za účelom vytvorenia indexu sucha MSDI, ktorý v sebe kombinuje indexy SPI a SSI (Soil Saturation

index). Index SSI vyjadruje deficit pôdnej vlhkosti a používa sa na hodnotenie poľnohospodárskeho sucha. Kombináciou týchto dvoch indexov sa autori snažili o celkovú charakteristiku sucha. V tomto prípade bol za prahovú hodnotu, ktorá vymedzuje extrémne hodnoty, považovaný 20. percentil. Ako je vidieť na obr. 6, ak by sme hodnotili extremitu sucha bez konštrukcie združenej pravdepodobnosti, tak hodnoty bodov, ktoré by sa na obrázku nachádzali v oblasti označenej ako A2, by sme nepovažovali za extrémne. Bod P2, nachádzajúci sa v tejto oblasti, by nebol extrémom ani z hľadiska indexu SPI, ani z hľadiska indexu SSI, pretože sa nachádza nad zvolenou prahovou hodnotou obidvoch posudzovaných premenných. Ak však posudzujeme extremitu na základe združenej pravdepodobnosti, tak bod P2, rovnako ako aj ostatné body v oblasti A2, môžeme považovať za extrém. Konštrukcia združeného rozdelenia je dôležitá hlavne z dôvodu toho, aby nedošlo k podceneniu alebo prípadnému nadhodnoteniu rizika pri spolupôsobení viacerých meteorologických javov či prvkov (Hao, Singh, Hao 2018).



Obr. 6 Združená pravdepodobnosť zrážok a pôdnej vlhkosti (zdroj: Hao, AghaKouchak 2013).

Pri vytváraní viacrozmerných dôb opakovania môžeme na ich výpočet použiť dva vzorce podľa toho, či určitú prahovú hodnotu, ktorá definuje extremitu, prekročia obidve alebo len jedna zo sledovaných premenných (napríklad súčasné pôsobenie intenzívnych

zrážok a vzdutia morskej hladiny) (Mirabbasi, Fakheri-Fard, Dinpashoh 2012; Moftakhari et al. 2017; Zellou, Rahali 2019). Všeobecne môžeme spomínané vzorce zapísať nasledovne

$$T_{AND} = \frac{1}{P((X>x) \cap (Y>y))} = \frac{1}{1 - F_X(x) - F_Y(y) + C(F_X(x), F_Y(y))} \quad (9),$$

$$T_{OR} = \frac{1}{P((X>x) \cup (Y>y))} = \frac{1}{1 - C(F_X(x), F_Y(y))} \quad (10).$$

Vo vzorci (9) je použitý operátor prieniku, a preto sa tento vzorec používa na výpočet dôb opakovania, ak obidve skúmané veličiny prekročia určitú prahovú hodnotu. Vzorec (10) oproti tomu pracuje s operátorom zjednotenia, a z tohto dôvodu sa používa na výpočet dôb opakovania, vtedy ak iba jedna zo skúmaných veličín prekročí danú prahovú hodnotu (Zellou, Rahali 2019). Písmeno C v obidvoch vzorcoch označuje funkciu kopule, ktorá bola použitá na vytvorenie združenej pravdepodobnosti.

Rovnako aj posudzovanie združených hydrometeorologických udalostí pomocou viacrozmerných dôb opakovania je dôležité z dôvodu možného podcenenia alebo nadhodnotenia danej situácie. Je ale potrebné dodať, že ak dáta, ktoré medzi sebou porovnávame, nevykazujú závislosť, je použitie tejto metódy v podstate bezpredmetné a nemá dostatočnú výpovednú hodnotu. Z tohto dôvodu treba byť veľmi opatrný pri hodnotení rizika pomocou združenej pravdepodobnosti, respektíve viacrozmerných dôb opakovania (Serinaldi 2016). Ako bolo uvedené vyššie, doba opakovania slúži na kvantifikovanie pravdepodobnosti výskytu určitého extrém. Preto obr. 6 rovnako vhodne ilustruje aj viacrozmerné doby opakovania.

3.3 Klasifikácia združených hydrometeorologických udalostí

Táto kapitola bude venovaná združeným hydrometeorologickým udalostiam, rôznym pohľadom na to, čo sa považuje za združenú hydrometeorologickú udalosť a ich klasifikácii.

Na základe faktu, že pri združených hydrometeorologických udalostiach sú vo vzájomnej interakcii dva, prípadne viac javov, je možné pozeráť sa na združené hydrometeorologické udalosti z dvoch hlavných pohľadov.

3.3.1 Klasifikácia na základe odlišného typu interakcie a dopadu spolupôsobiacich javov

V najširšom zmysle môžeme za združené hydrometeorologické udalosti považovať akúkoľvek, hoci aj náhodnú kombináciu javov, ktorých účinky sa vzájomne zosilňujú. Pri tomto druhu združených hydrometeorologických udalostí sa neuvažuje možnosť, že by tieto spolupôsobiace javy boli vzájomne fyzikálne spojené. V tomto prípade ide v podstate o nešťastnú náhodu, kedy dôjde ku nežiaducej kombinácii dvoch javov alebo ohrození. Prevažne ide o kombináciu účinku určitého meteorologického javu s nejakým typom hydrometeorologického ohrozenia, ktoré sa na zasiahnutom území ešte vyskytuje, respektíve pôsobí. Dobrým príkladom je kombinácia zvýšenej hladiny Dunaja v Bratislave, ktorá by bola spôsobená topením snehu v Alpách, so silným privalovým dažďom, vyvolaným napríklad konvektívnou búrkou. Prípadne sa môže jednať o kombináciu s podmienkami na určitom území, ktoré nie sú nebezpečné, ale ich kombinácia s nejakým druhom ohrozenia môže mať ničivé dopady. Príkladom takejto situácie je povodeň z Holandska v roku 1995, ktorá bola výsledkom kombinácie dažďa na zamrznutú pôdu (Khanal et al. 2019). Príkladov, ktoré by sme mohli zaradiť do tejto kategórie, je mnoho.

Druhý hlavný pohľad na združené hydrometeorologické udalosti je založený na tom, že javy, ktoré sa vyskytujú spoločne alebo postupne, sú štatisticky závislé a sú fyzikálne spojené s rovnakým javom alebo podobným cirkulačným vzorcom. Tento druhý hlavný pohľad, respektíve kategóriu združených hydrometeorologických združených udalostí je ďalej možné deliť do ďalších podkategórií. Prvou z nich je situácia, keď je dopad určitej udalosti vyvolaný spolupôsobením dvoch, prípadne viacerých javov, ktoré súvisia s jedným typom ohrozenia. Typickým príkladom takejto situácie je povodeň v ústí rieky do mora, ktorá je výsledkom zvýšenej hladiny oceánu v kombinácii so silnými zrážkami. Obidva mechanizmy spôsobujúce túto povodeň sú spojené s jedným typom ohrozenia (hlboká tlaková níž).

Druhá podkategória spočíva vo výskyte viacerých ohrození toho istého typu (dve tropické cyklóny v priebehu krátkeho času) súčasne alebo postupne (Leonard et al. 2014). Túto podkategóriu môžeme označiť ako združené hydrometeorologické udalosti s kumulatívnym alebo kaskádovým charakterom. Do tejto kategórie sa dá takisto zaradiť aj hydrologické alebo poľnohospodárske sucho ako dôsledok deficitu zrážok, ktorý má kumulatívny charakter a v krajine sa prejavuje s určitým časovým odstupom, pričom

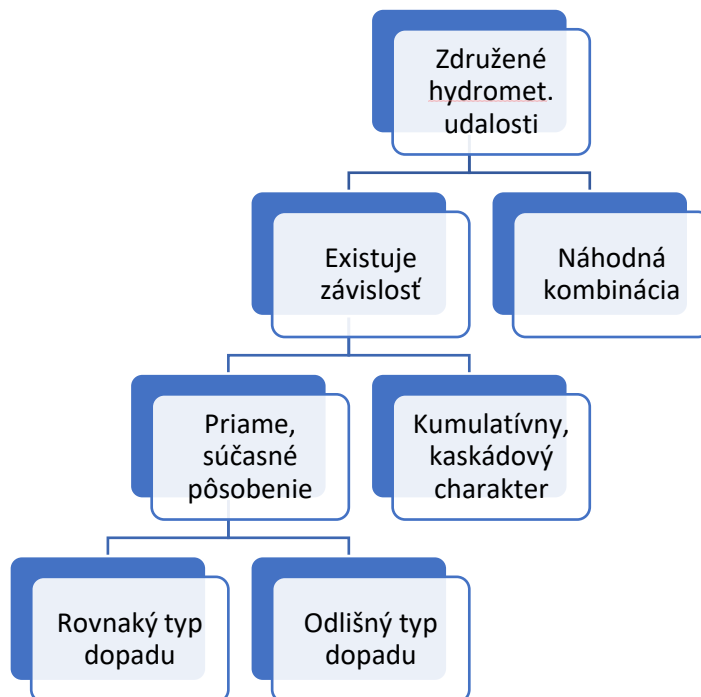
v kombinácii s nadnormálnymi teplotami vzduchu sa dopady tejto udalosti zintenzívňujú. Pojem kaskádových udalostí použil vo svojej práci napríklad Tilloy et al. (2019), ale aj iní autori, ktorí sa však venovali skôr kaskádovým ohrozeniam v iných fyzickogeografických disciplínach. Ďalším príkladom kaskádového typu združenej udalosti by mohla byť nadväznosť veterných extrémov, ktoré nasledujú po nadnormálne teplých obdobiach (Kašpar et al. 2017).

Výskyt týchto javov za sebou v priebehu krátkeho času nesmie byť náhodný, a ako bolo spomenuté vyššie, musí súvisieť s rovnakým cirkulačným vzorcom a javy, ktoré spolupôsobia, musia spolu súvisieť aj fyzikálne. Dôležité je, aby spolupôsobiacie javy zosilňovali dopady udalosti, ktorá by nastala aj keby pôsobil iba jeden meteorologický jav, avšak spolupôsobenie viacerých meteorologických javov tento dopad zosilňuje, respektíve zvyšuje jeho potenciál ohroziť prírodné ekosystémy alebo ľudskú spoločnosť.

Tilloy et al. (2019) vyčleňuje ešte jednu podkategóriu združených hydrometeorologických udalostí. V tomto prípade by sa za združenú udalosť považovala taká situácia, pri ktorej by meteorologické javy, spojené s rovnakým typom ohrozenia, pôsobiace súčasne, spôsobili odlišný typ dopadu. Ako príklad môžeme uviesť súčasný výskyt silného dažďa a vetra pri konvektívnej búrke. Tento príklad by však bolo možno vhodnejšie označiť skôr ako združené alebo viacnásobné ohrozenie.

Z pohľadu definície združených hydrometeorologických udalostí od autorov Leonard et al. (2014) je otázne, či by sme takýto prípad mohli považovať za združenú hydrometeorologickú udalosť. Pri búrke alebo tropickej cyklóne síce spoločne pôsobia javy, ktoré spolu súvisia, avšak každý z týchto javov, napríklad krupobitie, silný vietor, alebo intenzívny dážď, spôsobuje odlišný typ dopadu. Dážď môže spôsobiť povodne, pričom vietor, ktorý sa veľmi často pri búrke vyskytuje spoločne so silným dažďom, nemá v tomto prípade vplyv na povodeň samotnú. Hlavne počas leta môže pri konvektívnej búrke dôjsť k silnému vetru, ktorý by sme z hľadiska určitej prahovej hodnoty mohli považovať za extrém, avšak vietor nemusí spôsobiť extrémny dopad (škody). Zatiaľ čo intenzívne zrážky spôsobené tou istou búrkou môže spôsobiť povodne. Na druhej strane v pobrežných oblastiach však môže nastať situácia, keď je povodeň spôsobená obidvoma týmito javmi. V tomto prípade by sme mohli povodeň označiť za združenú hydrometeorologickú udalosť. Situácia súvisiaca s konvektívnou búrkou by sa však dala označiť za združenú udalosť podľa

definície od IPCC (2012) alebo Zscheischler et al. (2018). Na lepšiu orientáciu v jednotlivých pohľadoch a kategóriách slúži obr.7.



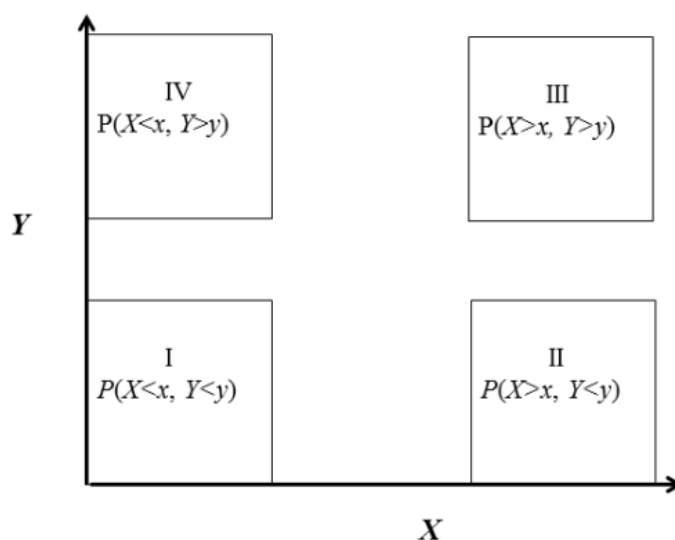
Obr. 7 Schéma jednotlivých kategórií združených hydrometeorologických udalostí (zostavené na základe vyššie citovanej literatúry).

3.3.2 Klasifikácia na základe extremity spolupôsobiacich javov

Hydrometeorologické javy, ktoré sa spoločne podieľajú na vzniku združenej udalosti, sú pomerne často extrémami. Práve na základe extrémnosti pôsobiacich prvkov je odvodená ďalšia klasifikácia združených hydrometeorologických udalostí. Definícia toho, čo považujeme za extrém, bola predstavená v úvodnej kapitole, kde boli vymedzené základné pojmy.

Táto klasifikácia sa používa na klasifikovanie tých združených hydrometeorologických udalostí, kde pôsobia iba dva rôzne typy hydrometeorologických javov. Podľa tejto klasifikácie sa združené hydrometeorologické udalosti delia do štyroch hlavných skupín podľa toho, či určitú stanovenú prahovú hodnotu prekročia obidva alebo iba jeden hydrometeorologický jav (Hao, Singh, Hao 2018).

Názornú ukážku tejto klasifikácie poskytuje obr. 8. Na obrázku sú znázornené spomínané štyri kategórie. Kategória označená rímskou jednotkou predstavuje situáciu, ktorá je charakterizovaná tak, že obidva hydrometeorologické javy nadobúdajú hodnoty, ktoré sa nachádzajú pod určitým percentilom, prípadne prahovou hodnotou kumulatívnej distribučnej funkcie daného prvku. Do tejto kategórie by sme mohli zaradiť napríklad súčasný výskyt sucha a extrémne nízkych teplôt. Takýto druh združenej udalosti sa však v literatúre zaoberajúcej sa združenými meteorologickými udalosťami neskúma často.



Obr. 8 Základná klasifikácia združených udalostí na základe prekročenia určitých prahových hodnôt (zdroj: Hao, Singh, Hao 2018).

Opakom vyššie popísanej kategórie je kategória označená rímskou trojkou. Obidva spolupôsobiacie hydrometeorologické javy v tomto prípade prekročia daný percentil, respektíve prahovú hodnotu. Tento stav je typický napríklad pre spoločný výskyt silného vetra a dažďa. Zvyšné dve kategórie predstavujú situáciu, keď hodnota jedného zo spolupôsobiacich prvkov prekročí hornú prahovú hodnotu kumulatívnej distribučnej funkcie a hodnota druhého nadobudne hodnotu pod určitou stanovenou prahovou hodnotou. Najčastejším druhom združenej udalosti, ktorá spĺňa podmienky na zaradenie do týchto kategórií je súčasný výskyt nadnormálne vysokých teplôt a deficitu zrážok (kategória II) a spoločný výskyt chladných období a nadnormálne vysokých úhrnov zrážok (Hao, Singh, Hao 2018).

3.3.3 Zhodnotenie klasifikácií

Uvedené klasifikácie ponúkajú ďalšie pohľady, ako možno deliť združené hydrometeorologické udalosti. Schematicky sú tieto pohľady ukázané na obr. 9. Pri klasifikácii na obr. 7 sa na združené udalosti pozeráme z hľadiska ich dopadu, čo znamená, že za združenú udalosť považujeme napríklad už často spomínanú povodeň v pobrežných oblastiach a nie spolupôsobenie javov, ktoré ju vyvolajú. Mohli by sme teda povedať, že táto klasifikácia triedi združené udalosti na základe definície Leonarda et al. (2014), v ktorej boli združené udalosti definované ako extrémny dopad.

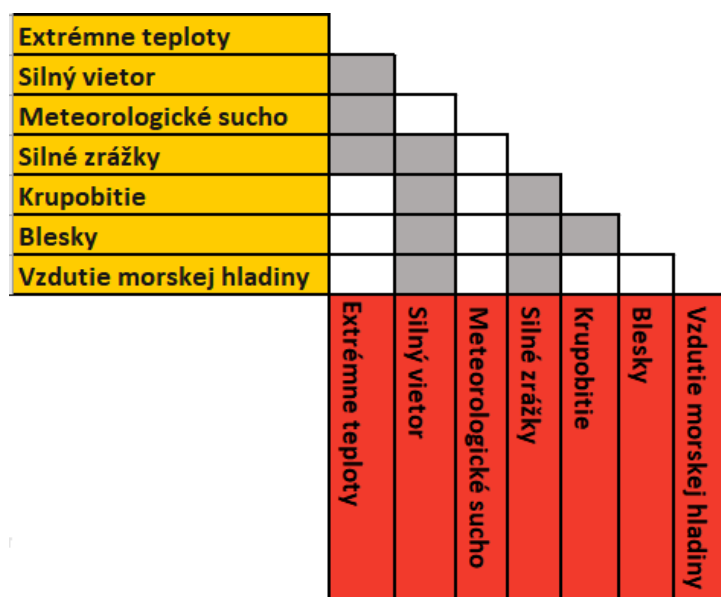
Oproti tomu v poradí druhá predstavená klasifikácia posudzuje združené udalosti z pohľadu extremity spolupôsobiacich javov. Pre zaradenie do kategórií zobrazených na obr.8 stačí, aby spolupôsobiace javy spĺňali určité kritériá, pričom sa vôbec neprihliada na dopady tohto spolupôsobenia dvoch, prípadne viacerých meteorologických javov. Tento fakt v praxi znamená, že ak by sme hodnotili napríklad spoločný výskyt silného vetra a silného dažďa, čo je typický jav pre konvektívne búrky, na základe horného kvartilu (75. percentil) by sme mohli za združenú udalosť považovať aj situácie, pri ktorých spôsobí škody iba dážď. Tento druh klasifikácie predstavuje skôr jednoduchšiu možnosť, ako klasifikovať združené hydrometeorologické udalosti a združené hydrometeorologické udalosti klasifikované podľa tejto klasifikácie spĺňajú definíciu od Zcheislera et al. (2018).



Obr. 9 Rôzne pohľady na združené hydrometeorologické udalosti podľa dvoch druhov klasifikácií.

3.4 Druhy združených hydrometeorologických udalostí

V nasledujúcej podkapitole budú opísané dva druhy združených hydrometeorologických udalostí, ktoré sú v súčasnej literatúre najčastejšie skúmané. Stručne budú zhrnuté doterajšie poznatky o týchto druhoch združených udalostí. Pohľad na rôzne kombinácie hydrometeorologických javov, ktoré môžeme označiť za združené hydrometeorologické udalosti, poskytuje obr. 10. Na obrázku nie sú druhy hydrometeorologickej združenej udalosti, ktoré spadajú pod náhodnú kombináciu javov.



Obr. 10 Kombinácie javov, ktoré môžu viesť ku združenej hydrometeorologickej udalosti. Sivé bunky označujú tú kombináciu javov, ktorá môže spôsobiť združenú udalosť (upravené podľa: Tilloy et al. 2019).

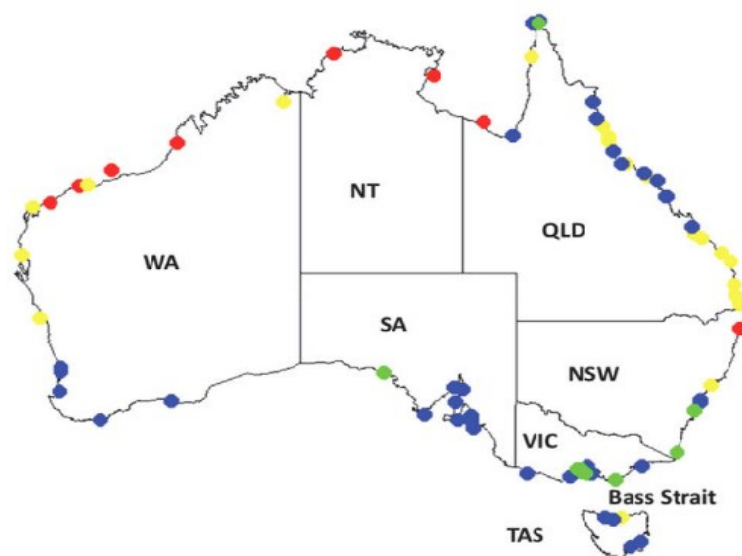
3.4.1 Združená povodeň v pobrežných oblastiach

Združená povodeň v pobrežných oblastiach je často spojená s hlbokou tlakovou nížou, ktorá spôsobí vzduťie morskej hladiny. Vzduťie morskej hladiny súvisí s tzv. inverzným barometrickým efektom. Toto vzduťie môže spôsobiť zablokovanie alebo spomalenie odtoku vody z riek do mora, čo môže viesť k povodniam. Zároveň sa s tlakovou nížou veľmi často spoločne vyskytujú aj silný vietor a silné zrážky. Kombinácia týchto javov môže viesť k omnoho vážnejším dopadom, ako keby tieto javy pôsobili samostatne (Zheng, Westra, Sisson 2013; Bevacqua et al. 2019).

Z tohto dôvodu sa tomuto druhu združenej hydrometeorologickej udalosti venovala v poslednej dobe pomerne značná pozornosť. Združenou povodňou sa zaoberali autori po

celom svete. Wu et al. (2018) sa zaoberali závislosťou medzi vzduťím morskej hladiny a zrážkami v pobrežných oblastiach Austrálie. V Austrálii sa touto závislosťou zaoberali aj Zheng, Westra, Sisson (2013), ktorí zistili, že pravdepodobnosť výskytu extrémneho vzduťia morskej hladiny počas extrémnych zrážok (alebo naopak) môže byť až 35-krát vyššia ako keby sme závislosť neuvažovali. Podobnú štúdiu pre Veľkú Britániu predstavili napríklad Hendry et al. (2019). Na americkom kontinente sa tejto problematike, okrem iných, venuje práca od autorov Moftakhari et al. (2017). Obzvlášť veľká pozornosť sa tomuto druhu ohrozenia venuje pobrežným oblastiam v Holandsku či Taliansku (Kew et al. 2013; Bevacqua et al. 2017).

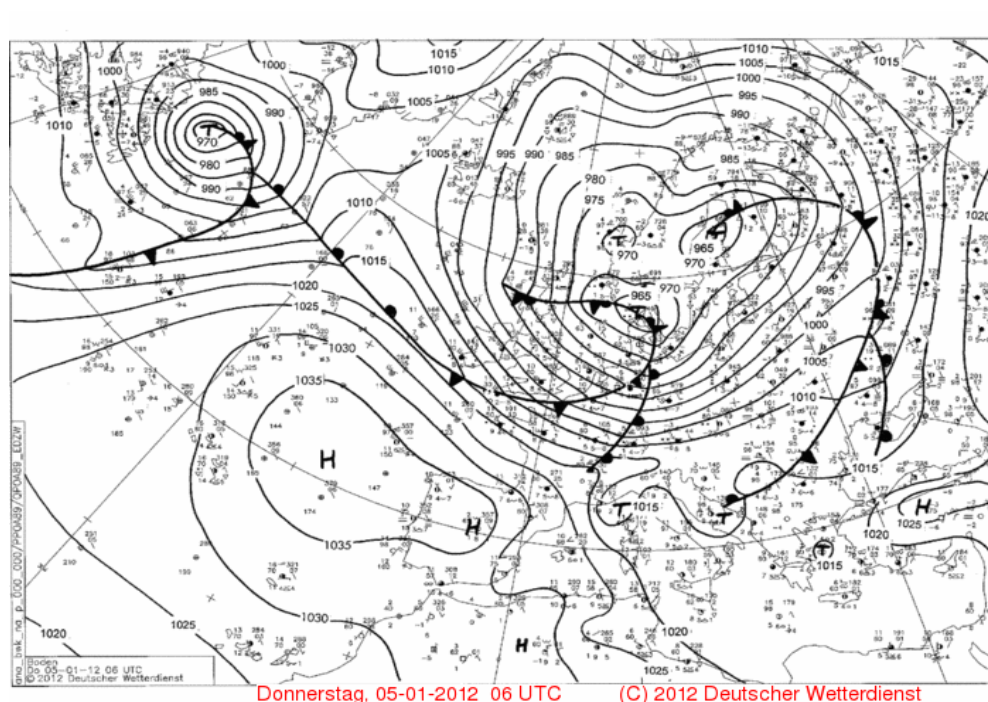
Veľa prác spomínaných v predošlom odstavci preukázalo závislosť medzi extrémnymi úhrnmi zrážok a vzduťím morskej hladiny. Táto závislosť závisí na viacerých faktoroch ako napríklad veľkosť povodia alebo jeho poloha (Zheng, Westra, Sisson 2013). To dokazujú aj zistenia Hendryho et al. (2019) alebo Klerka et al. (2015), ktorí zistili, že pri povodiach s väčšou rozlohou je často maximálny prietok v riekach pozorovaný niekoľko dní po vzduťí morskej hladiny. Združené povodne sú napríklad častejšie, a závislosť medzi spomínanými javmi silnejšia, na západnom a juhozápadnom pobreží Veľkej Británie ako na východnom. Podobná situácia je aj v Austrálii (vid' obr. 11), kde je závislosť medzi extrémnym vzduťím morskej hladiny a zrážkami silnejšia na severnom a severozápadnom, prípadne severovýchodnom pobreží Austrálie oproti napríklad južnému a juhovýchodnému pobrežiu (Hendry et al. 2019; Wu et al. 2018).



Obr. 11 Závislosť medzi extrémnym úhrnom zrážok a vzduťím morskej hladiny v Austrálii. Červené a žlté body indikujú najsilnejšiu závislosť, naopak modré a zelené slabú respektíve štatisticky nevýznamnú závislosť (zdroj: Wu et al. 2018).

V rôznych oblastiach sveta dochádza ku združenej povodni počas iného rozloženia tlakových útvarov, to znamená pri inej synoptickej situácii. Pre Holandsko je výskyt tohto druhu združených hydrometeorologických udalostí spojený predovšetkým so severnými a severozápadnými smermi vetra, viažucimi sa na mimo-tropickú cyklónu. Naopak, na severozápadnom a severnom pobreží Austrálie sa združené povodne viažu predovšetkým na tropické cyklóny (Kew et al. 2013; Wu et al. 2018).

Tento druh hydrometeorologického ohrozenia sa v Holandsku viaže na výskyt oblasti nízkeho tlaku nad Baltským morom, prípadne nad severovýchodným Poľskom. Táto oblasť nízkeho tlaku obvykle nie je tak rozsiahla a hlboká ako pri veterných extrémoch vyskytujúcich sa v Holandsku. Pri združených povodniach, nielen v Holandsku, ale aj inde vo svete, sú rýchlosti vetra nižšie a postup tlakových níží pomalší ako pri čisto veterných extrémoch. Pri výskyte združených povodní v oblasti Holandska je takisto typickým prvkom oblasť vysokého tlaku vzduchu so stredom západne od Španielska, čo znamená, že prúdenie sa meridionalizuje. Tieto situácie sa môžu vyskytnúť počas celého roka, avšak častejšie k nim dochádza v období chladného polroka (Kew et al. 2013; Van Den Hurk et al. 2015).

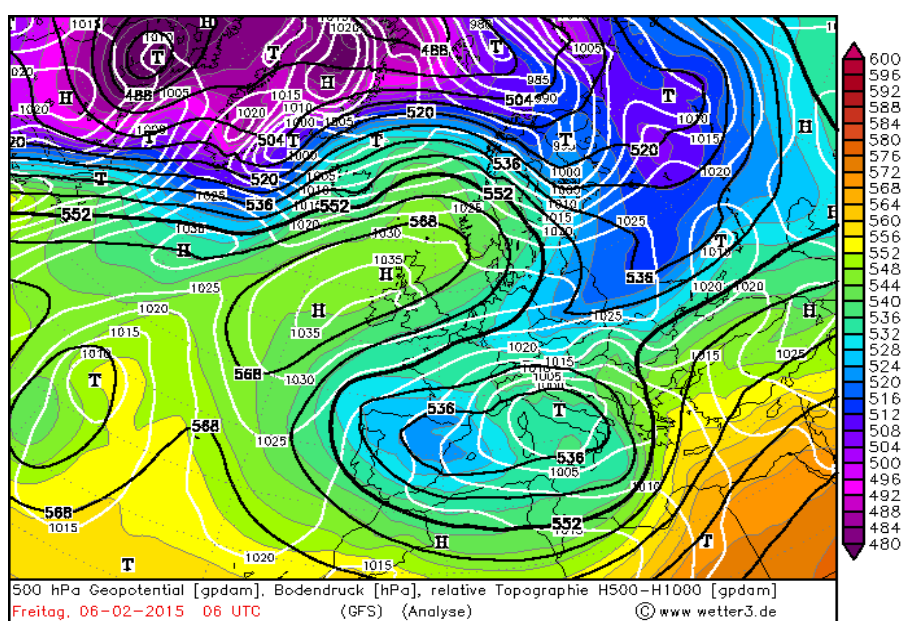


Obr. 12 Synoptická situácia nad Európou 5.1.2012 počas povodní v Holandsku (zdroj:wetter3.de).

Synoptická situácia vyobrazená na obr. 12 predstavuje typickú situáciu, kedy v Holandsku dochádza k združenej povodni. Na synoptickej mape vidíme pomerne veľký tlakový gradient medzi tlakovou výšou na západ od Španielska a tlakovou nížou nad Baltským morom. Tento tlakový gradient má za následok silné severozápadné prúdenie v oblasti Holandska a priľahlých štátov.

Zatiaľ čo v Holandsku je tento druh združenej hydrometeorologickej udalosti spojený s meridionálnym prúdením, na západnom pobreží Veľkej Británie sa tento druh ohrozenia skôr spája so silným západným alebo juhozápadným prúdením. Tento druh situácie nastáva, ak sa tlaková níž nachádza severozápadne od Írska a postupuje smerom k severovýchodu severne od Škótska alebo priamo cez Škótsko. Tieto zistenia môžu pomôcť pri predpovedaní situácii, kedy môže dôjsť ku združenej povodni (Hendry et al. 2019).

Združená povodeň neohrozuje len štáty západnej Európy, ale vyskytuje sa aj v oblasti Stredomoria. Príkladom združenej povodne v oblasti Stredomoria je udalosť zo 6.2. 2015, kedy sa v talianskom meste Ravenna, ležiacom na východnom pobreží Talianska, vyskytla povodeň tohto druhu. Počas dvoch dní napršalo v okolí Ravenny približne 170 mm zrážok, čo v kombinácii so vzduťím morskej hladiny, ktoré bolo spôsobené juhovýchodným prúdením, vyvolalo povodne. Príčinou tejto povodne bola tlaková níž, ktorá sa premiestňovala so Španielska cez Korziku až nad centrálnu Taliansko (viď obr. 13) (Bevacqua et al. 2017).



Obr. 13 Synoptická situácia počas združenej povodne v Ravenne, význam línií a farebnej škály je rovnaký ako na obr.2 (zdroj: wetter3.de).

Vyššie popísané fakty a príklady združených povodní poukazujú na to, že výskyt tohto druhu združenej hydrometeorologickej udalosti je pravdepodobnejší na pobreží Atlantiku. Podľa autorov Bevacqua et al. (2019) je však vyššia pravdepodobnosť ich výskytu v oblasti Stredomoria, a to hlavne v oblasti Valencie, Lyonského zálivu alebo juhovýchodného pobrežia Talianska. Autori to odôvodňujú tým, že v oblasti Atlantiku býva často vysoká úroveň prílivu. Vzdušenie morského hladiny, ktoré často vstupuje do výpočtov pri analyzovaní združených povodní v pobrežných oblastiach, je totiž definované ako „neobvyklý nárast morského hladiny, ktorý je spôsobený veternou búrkou, nad predpokladané hodnoty astronomického prílivu“ (Petroligkis 2018, s. 3). Hodnoty pre vzdušenie morského hladiny sú reziduá, ktoré získame odčítaním výšky hladiny mora od astronomického prílivu (Wu et al. 2018).

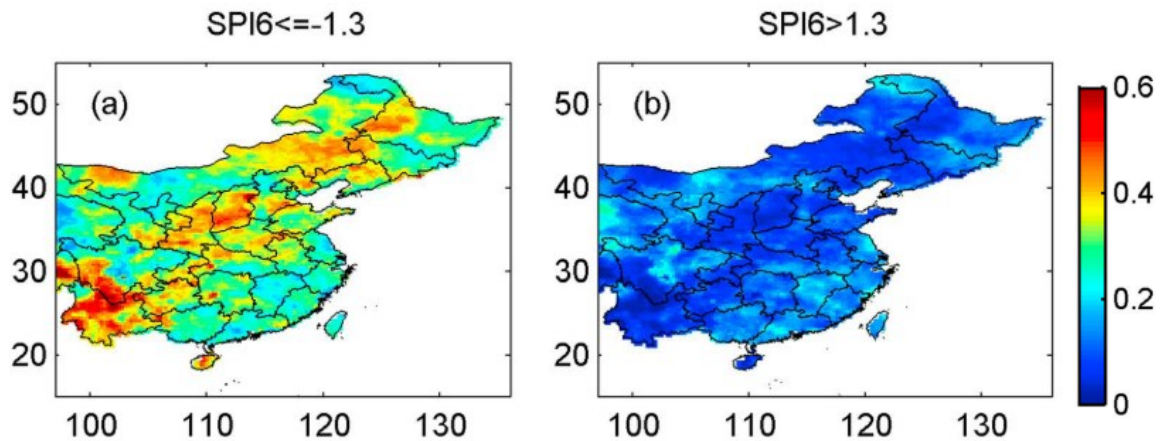
Na druhú stranu je ale potrebné dodať, že združená povodeň je komplexný fenomén, ktorý závisí aj na veľa iných faktoroch, ako sú napríklad topografia, či ochranné opatrenia v danej oblasti. To znamená, že združená povodeň sa v rámci Európy, ale aj sveta, môže vyskytnúť aj na tých miestach, ktoré autori Bevacqua et al. (2019) označili ako miesta s menšou pravdepodobnosťou ich výskytu.

3.4.2 Vlny horúčav a meteorologické sucha

Vlny horúčav sa často vyskytujú spoločne so suchými obdobiami. Výskyt extrémne dlhých období bez zrážok v kombinácii s extrémne vysokými teplotami vzduchu môže spôsobiť vyšší deficit pôdnej vlhkosti, ako keby tieto dva meteorologické javy pôsobili samostatne (Manning et al. 2019). Tento druh združenej hydrometeorologickej udalosti môžeme na základe jeho postupných účinkov a dopadov na krajinu, zaradiť do kategórie kumulatívnych alebo kaskádových združených udalostí.

Interakciou a závislosťou medzi zrážkami a teplotou vzduchu sa zaoberalo mnoho štúdií. Autori Mueller a Seneviratne (2012) sa zaoberali vplyvom predchádzajúceho sucha na pravdepodobnosť výskytu nadnormálne teplých dní. Ich štúdia ukazuje, že po obdobiach so zrážkovým deficitom, je výskyt nadnormálne teplých dní pravdepodobnejší ako po období s nadnormálnymi úhrnmi zrážok. Signifikantnejšia závislosť medzi spomínanými fenoménmi bola zistená predovšetkým v strednej a východnej Európe, východnej a severnej Číne, juhu USA, alebo niektorých častiach Južnej Ameriky. Tento vzťah autori vysvetľujú

tým, že znížený obsah vody v pôde v dôsledku zrážkového deficitu znižuje možnosť ochladzovať zemský povrch a teda aj vzduch evapotranspiráciou. Podobnú štúdiu pre Čínu vypracovali Hao et al. (2017), ktorí rovnako preukázali závislosť medzi predchádzajúcim suchým obdobím a nasledovnými vysokými teplotami vzduchu. Túto závislosť autori zisťovali pomocou metódy podmienenej pravdepodobnosti. Ich výsledky ukazujú, že predovšetkým v juhozápadnej časti Číny je pravdepodobnosť výskytu vysokých teplôt vzduchu po predchádzajúcom suchu vysoká (viď obr. 14).

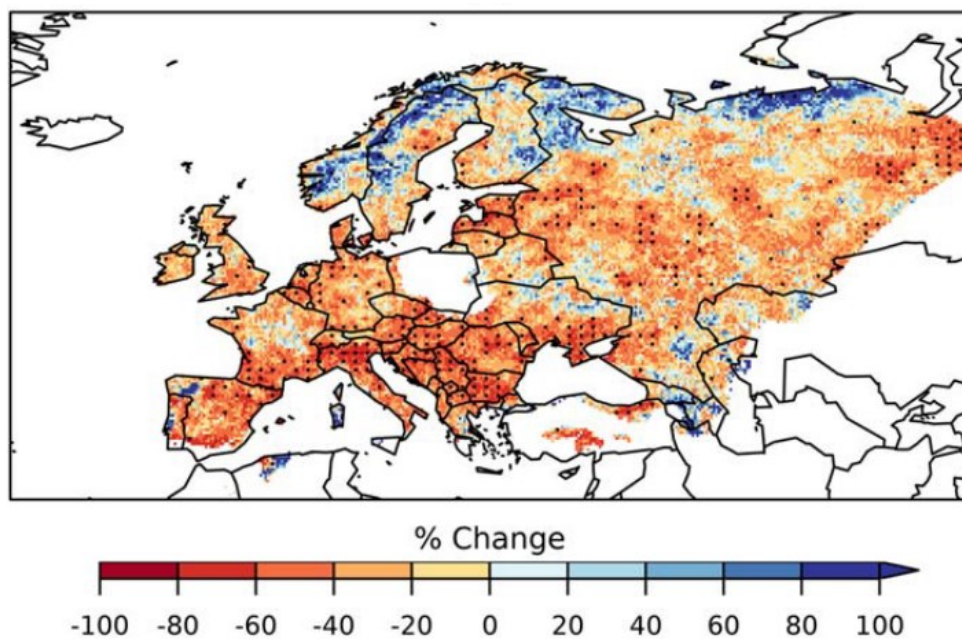


Obr. 14 Podmienená pravdepodobnosť výskytu teplých dní, nasledujúcich po období šiestich mesiacov s indexom SPI menším ako -1,3 (a), respektíve vyšším ako 1,3 (b) (zdroj: Hao et al. 2017).

Spoločné posudzovanie meteorologického sucha a vln horúčav je v posledných rokoch často skúmanou problematikou a obzvlášť v poslednej dekáde sa jej venovalo množstvo štúdií. V globálnej mierke sa zmenou počtu dní s extrémnymi hodnotami zrážok a teplôt zaoberali napríklad autori Zscheischler a Seneviratne (2017) alebo Hao, Aghakouchak a Phillips (2013), ktorí preukázali zvýšenie pravdepodobnosti výskytu spoločného meteorologického sucha a vysokých teplôt, a to najmä v oblasti juhovýchodu USA, severu Číny a niektorých častiach Ruska. Ide v podstate o rovnaké oblasti ako v predošlom odstavci.

Tieto zistenia potvrdzuje aj množstvo prác venujúcich sa rovnakej problematike v regionálnej mierke. V Číne sa zvýšenému počtu spoločného výskytu suchých a teplých období venovali Wu et al. (2019), ktorí preukázali nárast počtu týchto období. V rámci USA bola najväčšia zmena zaznamenaná okrem už spomínaného juhovýchodu aj v štátoch východných Kordiller (Mazdiyasi, Aghakouchak 2015). Beniston (2009) vo svojom

článku takisto zistil nárast počtu dní so spoločným výskytom vysokých teplôt a podnormálnym úhrnom zrážok. V rôznych európskych mestách, ktoré boli zahrnuté do štúdie, došlo od začiatku 20. storočia k dvoj až štvôr-násobnému nárastu počtu takýchto dní za rok. Zvýšenú pravdepodobnosť spoločného výskytu dlhých suchých a nadnormálne teplých období počas leta potvrdzujú aj Manning et al. (2019), a to predovšetkým na Balkáne, západnom Rusku, juhu Francúzska a severe Talianska (viď obr. 15).

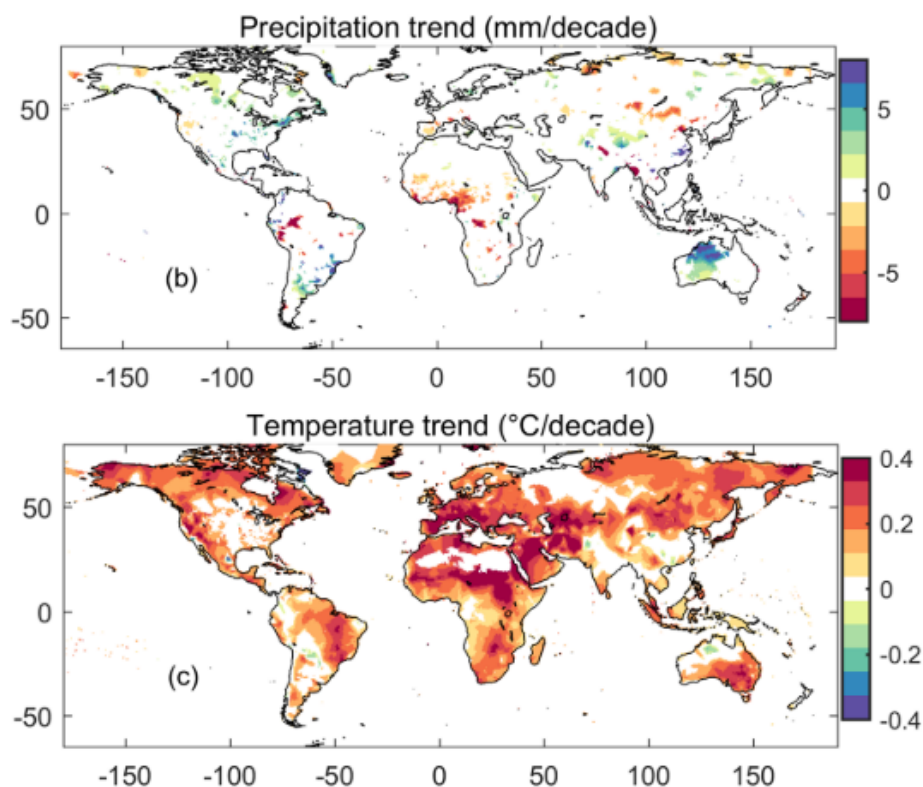


Obr. 15 Zmena v dvojrozmerných dobách opakovania pre spoločný výskyt extrémne dlhých a zároveň nadnormálne teplých období. Porovnávané boli obdobia rokov 1950–1979 a 1984–2013 (zdroj: Manning et al. 2019).

Ako bolo spomenuté v kapitolách o vlnách horúčav a o suchu, tieto hydrometeorologické ohrozenia sa spájajú s tlakovou výšou alebo jej výbežkom, ktoré nad zasiahnutým územím zotrvávajú niekoľko dní či týždňov. Rovnako tomu bolo aj pri vlne horúčav v Rusku počas leta 2010, ktorá predstavuje typický príklad združeného pôsobenia tepla a sucha. Vlna horúčav v Rusku počas leta 2010 trvala zhruba od polovice júla do polovice augusta. Toto veľmi teplé obdobie, kedy boli na mnohých miestach v Rusku pozorované teploty vzduchu nad 40 °C, bolo navyše spojené s veľmi suchým obdobím, čo malo za následok zníženú produkciu pšenice, lesné požiare a výrazné straty na životoch (Grumm 2011).

Trendy v prípade zrážok nie sú vo svete jednoznačné a signifikantnejšie nárasty alebo poklesy úhrnov zrážok sú zväčša pozorované iba v niektorých oblastiach sveta, ako je zrejme z obr. 16. Teplota vzduchu však vykazuje na mnohých miestach sveta rastúci trend

(Hao et al. 2018). Išlo síce o štúdiu v globálnej mierke, ale tieto výsledky potvrdzujú aj iné štúdie, ktoré boli vykonané na menšom území. Napríklad Kirono, Hennessy, Grose (2017) takisto zistili rastúci teplotný trend v austrálskych mestách Sydney a Melbourne, zatiaľ čo zrážky prakticky nevykazujú žiadny alebo len minimálny klesajúci trend. Podobne aj v Európe sú podľa Manninga et al. (2019) trendy v dĺžke suchých období v rámci Európy nejednoznačné a nevykazujú výrazne stúpajúcu ani klesajúcu tendenciu. Teploty vzduchu však vykazujú na mnohých miestach Európy rastúci trend a z tohto dôvodu sa aj znižujú doby opakovania spoločného výskytu dlhých suchých a nadnormálne teplých období. Na základe týchto zistení označujú autori ako hlavnú príčinu nárastu pravdepodobnosti výskytu združených suchých a teplých období zvyšujúce sa teploty vzduchu. Na druhej strane je takisto dôležitá aj distribúcia zrážok v priebehu roka, leta, alebo mesiaca, a nielen samotný celkový úhrn zrážok. Je určite rozdiel medzi situáciou, keď by napríklad väčšina priemerného mesačného úhrnu zrážok spadla v dvoch-troch dňoch a zvyšok mesiaca by už bol suchý, oproti situácii, keď by boli zrážky rozdelené rovnomerne počas celého obdobia.

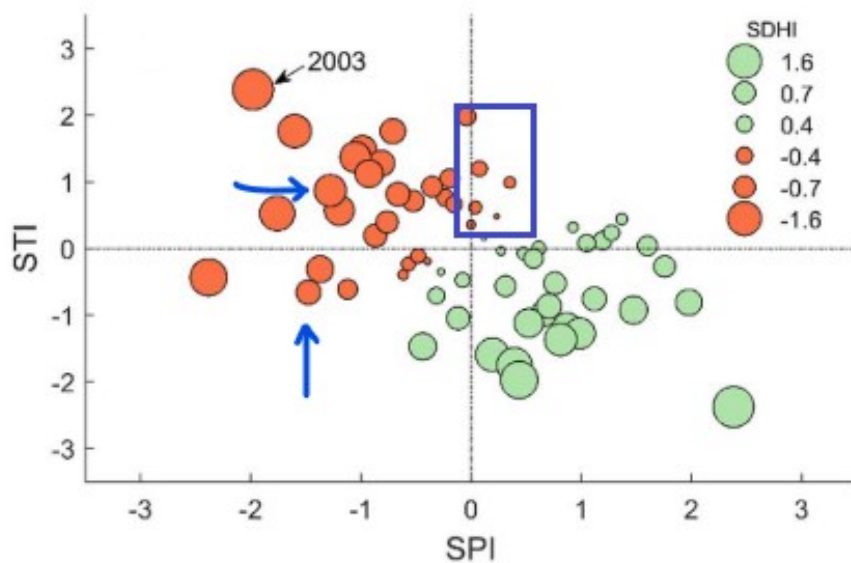


Obr. 16 Trendy priemerných úhrnov zrážok v mm za desaťročie (horná mapa) a trendy priemerných teplôt vzduchu v stupňoch Celzia za desaťročie, pre teplú polovicu roka v období rokov 1951–2016 (zdroj: Hao et al. 2018).

Vyššie uvedené skutočnosti potvrdzujú dôležitosť spoločného posudzovania sucha a vĺn horúčav ako združenej hydrometeorologickej udalosti. Z výsledkov práce Manninga et al. (2019) ďalej vyplýva, že pokiaľ by sme tieto dve hydrometeorologické ohrozenia posudzovali samostatne, mohlo by dôjsť k podceneniu rizika, ktoré je vyššie v prípade spoločného výskytu týchto ohrození. Vo väčšine predošlých štúdií sa hydrometeorologické ohrozenia analyzovali samostatne. Pretože sú však teplo a sucho, hlavne počas leta, kedy majú aj výraznejšie dopady, vzájomne korelované, nie je možné analyzovať ich vplyv samostatne. To potvrdzujú aj autori Mazdiyasn, AghaKouchak (2015), ktorí vo svojej štúdií pre USA rovnako nepotvrdili signifikantný trend pre meteorologické sucho, avšak spoločný výskyt vĺn horúčav a meteorologického sucha vykazuje trendy signifikantnejšie a autori poukazujú na ich zvýšenú pravdepodobnosť a zvýšenú mieru ohrozenia pre prírodu a spoločnosť.

Na základe vyššie uvedených skutočností je vhodné používať na analyzovanie združeného pôsobenia sucha a vysokých teplôt vzduchu metódy, ktoré umožňujú posudzovať vplyvy dvoch, prípadne viacerých premenných spoločne. Niektoré z nich boli predstavené vyššie. Vhodnou metódou môže byť aj štandardizovaný index sucha a tepla SDHI (v angličtine *standardized dry and hot index*), ktorý v sebe kombinuje indexy STI (štandardizovaný teplotný index) a SPI. Pri záporných hodnotách tohto indexu nadobúda index STI kladné hodnoty, čo indikuje nadnormálne vysoké teploty vzduchu a index SPI nadobúda záporné hodnoty, indikujúce suché podmienky. Z uvedeného vyplýva, že záporné hodnoty indexu SDHI označujú obdobia, ktoré môžeme považovať za združený výskyt tepla a sucha. Princíp výpočtu indexu je podobný ako pri indexe MSDI, ktorý je popísaný v kapitole 3.2.5. Hao et al. (2018) použili index SDHI k hodnoteniu sucha a vĺn horúčav v teplej polovici roka počas obdobia rokov 1951–2016 vo Francúzsku (vid' obr. 17). V ľavom hornom rohu sa nachádzajú teplé polovice rokov, v ktorých bola teplota nadpriemerná a zároveň úhrn zrážok bol podpriemerný. Zvýraznený je už mnohokrát skloňovaný rok 2003, ako typický príklad združenej hydrometeorologickej udalosti tohto druhu. Hao et al. (2018) ďalej upozorňujú na oblasť, ktorá je na obr. 17 vyznačená modrým obdĺžnikom. Vo vyznačenej oblasti nadobúda index SDHI záporné hodnoty aj napriek kladným hodnotám indexu SPI. Zaujímavé sú aj body označené modrými šípkami, ktoré ukazujú na roky, kedy bol deficit zrážok vyjadrený indexom SPI takmer rovnaký. Bod ležiaci vyššie má však hodnotu indexu SDHI nižšiu a to vďaka kladnej odchýlke teploty vzduchu.

Ako je uvedené pri opise indexu SDHI, pri hodnotení dopadov (tzn. poľnohospodárske a hydrologické sucho) tohto druhu združenej hydrometeorologickej udalosti je dôležité brať do úvahy oba pôsobiace faktory a nehodnotiť ich vplyv samostatne. Na spoločné hodnotenie však nemusí slúžiť len vyššie spomenutý index SDHI, ale aj známejší index SPEI, ktorého použitie je pri hodnotení sucha, vzhľadom na uvedené trendy teploty vzduchu, efektívnejšie ako použitie indexu SPI (Valach, Vido, Škvarenina 2016).



Obr. 17 Ukážka indexu SDHI, záporné hodnoty indexu sú znázornené červenou farbou, kladné hodnoty sú znázornené zelenou farbou. Podrobnosti sú uvedené v texte (upravené podľa: Hao et al. 2018).

3.5 Pravdepodobnosť združených hydrometeorologických udalostí v budúcej klíme

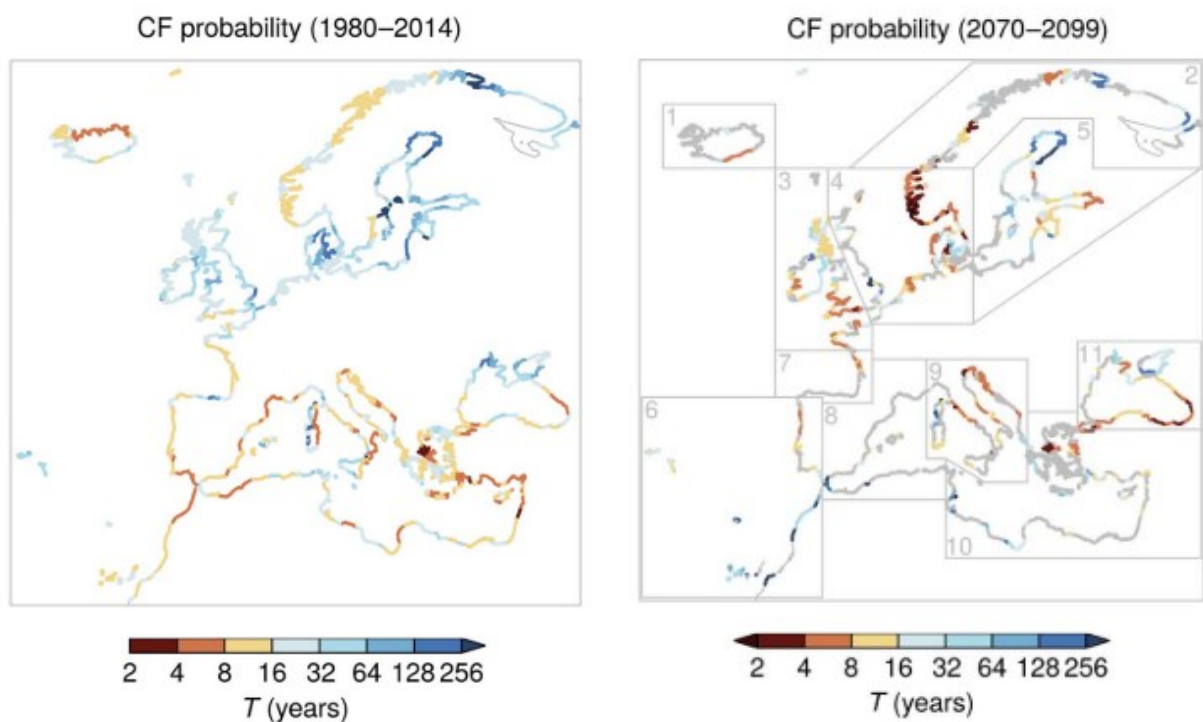
V nasledujúcej kapitole budú stručne naznačené zmeny v pravdepodobnosti výskytu vyššie popísaných druhov združených hydrometeorologických udalostí.

3.5.1 Združená povodeň v budúcej klíme

Podľa viacerých autorov sa v budúcnosti pravdepodobnosť združených povodní v pobrežných oblastiach zvýši. Nárast tejto pravdepodobnosti je zapríčinený hlavne

predikovaným nárastom hladiny oceánov (Moftakhari et al. 2017). V Európe by sa mala pravdepodobnosť združených povodní zvýšiť hlavne na západnom pobreží Veľkej Británie, severnom pobreží Francúzska a na pobreží Holandska (Bevacqua et al. 2019). Zmenu tejto pravdepodobnosti dokumentuje obr. 18.

Tvrdenie autorov Bevacqua et al. (2019) o tom, že v budúcnosti sa zvýši pravdepodobnosť výskytu združených povodní na pobreží Holandska, je však v rozpore so zistením autorov Klerk et al. (2015) a Kew et al. (2013), ktorí tvrdia, že pravdepodobnosť výskytu tohto druhu ohrozenia sa nezmení alebo dokonca poklesne, čo autori odôvodňujú znížením počtu dní s vetrom severných a severozápadných smerov. Veľmi zdôrazňovaným faktorom vo všetkých vyššie citovaných prácach je nutnosť uvedomovania si závislosti medzi javmi, ktoré sa podieľajú na združenej povodni. Ignorovanie tejto závislosti by mohlo viesť k podceneniu nebezpečenstva, vyplývajúceho z tohto druhu ohrozenia.



Obr. 18 Súčasná pravdepodobnosť výskytu združenej povodne (vľavo) a predpokladaná pravdepodobnosť na konci tohto storočia (vpravo). T predstavuje dvojrozmernú dobu opakovania pre extrémne zrážky a výšku morskej hladiny (zdroj: Bevacqua et al. 2019).

3.5.2 Vlny horúčav a meteorologické sucho v budúcej klíme

V kapitole 3.4.2 už bola naznačená zvýšená pravdepodobnosť tejto združenej hydrometeorologickej udalosti, a to predovšetkým vďaka rastúcej teplote vzduchu. V budúcnosti sa preto na viacerých miestach vďaka globálnemu otepľovaniu takisto očakáva zvýšená frekvencia výskytu tohto hydrometeorologického ohrozenia. Beniston (2009) predpokladá zvýšenú frekvenciu spoločného výskytu suchých a teplých období na konci tohto storočia. Do konca tohto storočia by sa mohla pravdepodobnosť spoločného výskytu vln horúčav a sucha zdvojnásobiť (Zscheischler, Seneviratne 2017).

4 Združené hydrometeorologické udalosti na príklade stanice Churáňov

V nasledujúcej časti práce budú pomocou prípadových štúdií popísané vybrané združené hydrometeorologické udalosti, ktoré sa vyskytli v Českej republike.

4.1 Druhy združených hydrometeorologických udalostí v Českej republike

Z kombinácií javov, uvedených na obr. 10, sú pre Česko typické hlavne spoločné pôsobenie tepla a sucha a spoločný výskyt silného dažďa a vetra pri konvektívnych búrkach. Ukázkovým príkladom spoločného výskytu sucha a tepla je aj nedávne leto 2015. Nakoľko Česko nemá more, je na jeho území vylúčený výskyt združenej povodne, ktorá je typická pre pobrežné oblasti. Je tu však možný výskyt udalostí so silnými zrážkami v priebehu krátkeho času alebo dvoch veterných udalostí nasledujúcich krátko po sebe.

V priestore strednej Európy sú dobrým príkladom v krátkom čase po sebe idúcich veterných extrémov rodiny cyklón, ktoré by sme mohli zaradiť do kategórie kumulatívnych/kaskádových združených hydrometeorologických udalostí. Z histórie je veľmi známym príkladom dvojica silných veterných búrok Vivian a Wiebke, ktoré zasiahli Nemecko a Švajčiarsko na konci februára 1990. Tieto dve mimotropické cyklóny vznikli vďaka silnému gradientu teploty vzduchu a boli vzájomne previazané rovnakým cirkulačným vzorcom. Z tohto pohľadu by sme ich preto mohli klasifikovať ako združené hydrometeorologické udalosti. V Česku by sme za združenú hydrometeorologickú udalosť tohto druhu mohli považovať silné dažde zo začiatku augusta 2002, ktoré nasledovali v krátkom časovom úseku a boli vyvolané podobným cirkulačným vzorcom.

Jedným z mnohých príkladov spoločného výskytu silných zrážok a vetra vyvolaných silnou konvekciou na území Česka je aj situácia z 22. 7.–23. 7. 1939. V tomto prípade sa vyskytlo aj krupobitie. V obci Štítná nad Vláří spôsobili krupobitie a silný vietor značné škody na domoch a stodolách a takisto si vyžiadali aj straty na ľudských životoch (Dvořáková 2007).

Silné zrážky v kombinácii so silným vetrom nemusia v Česku spôsobovať škody len v letných mesiacoch. Ich spoločný výskyt môže častokrát napáchať škody aj v zimných mesiacoch, ako tomu bolo napríklad 15. –16. decembra 2005. Česko vtedy, najmä na horách, trápilo husté sneženie a situáciu komplikoval aj silný vietor. Situácia bola najhoršia v Krušných horách, Jeseníkoch a na území Krkonôš. Sneženie komplikovalo dopravu a mokrý sneh nadmerne zaťažoval lesné porasty, ktoré tak boli ohrozované vetrom aj veľkým množstvom snehu (Dvořáková 2007).

4.2 Použité dáta

Prípadové štúdie boli pripravené na základe dát zo synoptickej stanice Churáňov, ležiacej v nadmorskej výške 1118 metrov nad morom. Poloha stanice v rámci Česka je zobrazená na obr. 19. Využité boli údaje o priemernej dennej a mesačnej teplote vzduchu, dennom a mesačnom úhrne zrážok za obdobie medzi rokmi 1961–2017. Ďalej boli využité homogenizované maximálne denné nárazy vetra do roku 2015. Išlo o rovnaké dáta ako v článku Kašpar et al. (2017), kde je takisto opísaný aj proces homogenizácie dát. Pre skúmanie združených hydrometeorologických udalostí na stanici Churáňov bola použitá empirická metóda opísaná v kapitole 3.2.1.

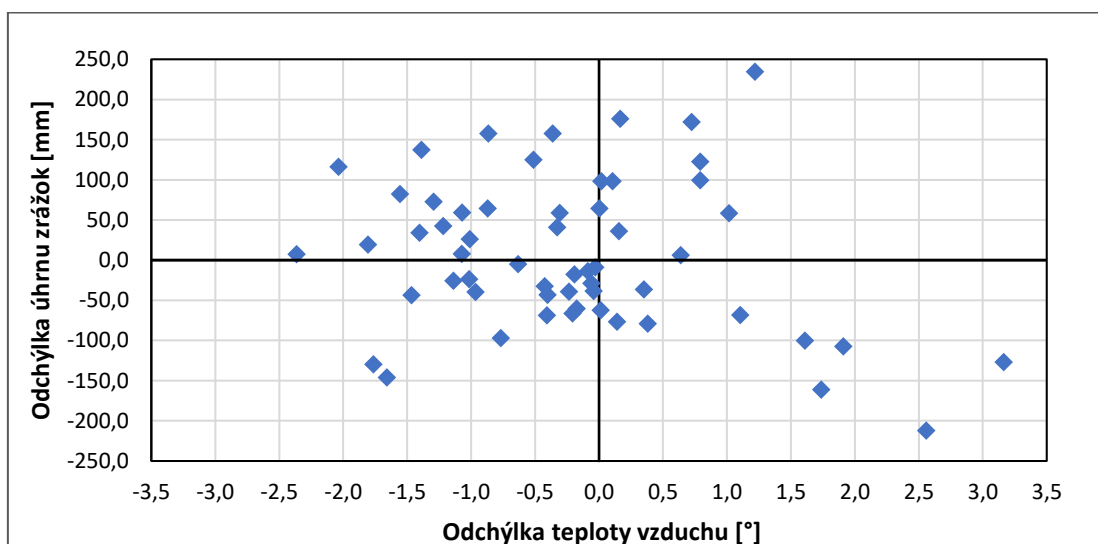


Obr. 19 Poloha stanice Churáňov. Stanicu predstavuje červený trojuholník (zdroj: ČHMÚ).

4.3 Nadnormálne teploty vzduchu a meteorologické sucho

Pre hodnotenie tohto druhu združenej hydrometeorologickej udalosti bola vypočítaná priemerná teplota vzduchu pre leto (jún, júl, august) za obdobie rokov 1981–2010, ktoré predstavuje klimatologický normál. Následne boli vypočítané odchýlky priemernej letnej

teploty vzduchu v každom roku v časovej rade (1961–2017) od priemernej letnej teploty vzduchu v období medzi rokmi 1981–2010. Pre výpočet deficitu zrážok bol postup podobný. V každom roku z časovej rady bol vypočítaný kumulatívny úhrn zrážok za letné mesiace. Ďalej bol vypočítaný priemer letného kumulatívneho úhrnu zrážok pre obdobie medzi rokmi 1981–2010. Nakoniec boli rovnako ako v prípade teplôt spočítané odchýlky od priemeru. Výpočty boli realizované v programe Ms Excel. Priemerný letný kumulatívny úhrn zrážok je na úrovni 351,2 mm a priemerná teplota vzduchu má hodnotu 13 °C. Výsledné hodnoty sú zobrazené na obr. 20 pomocou scatterplotu. Na osi x sú vynesené hodnoty odchýlky priemernej teploty vzduchu počas leta a hodnoty na osi y predstavujú deficit odchýlky úhrnu zrážok počas leta.



Obr. 20 Odchýlky priemernej teploty vzduchu a úhrnu zrážok počas leta od klimatologického normálu 1981–2010 na stanici Churáňov pre obdobie 1961–2017.

4.3.1 Posúdenie závislosti

Ako bolo uvedené v teoretickej časti práce, meteorologické javy alebo prvky, podieľajúce sa na vzniku združenej hydrometeorologickej udalosti, bývajú častokrát vzájomne závislé. Na posúdenie závislosti medzi odchýlkou teploty vzduchu a odchýlkou zrážok bol pre jednoduchosť využitý Pearsonov a Spearmanov korelačný koeficient.

Štatistická významnosť korelačných koeficientov bola stanovená na hladine testu $\alpha=0,05$. Hladina testu vyjadruje najvyššiu dovolenú pravdepodobnosť s akou zamietame nulovú hypotézu, ak táto hypotéza platí (Zvára 2013). V prípade testovania korelácie,

nulová hypotéza tvrdí, že dáta sú nezávislé a neexistuje medzi nimi závislosť. Korelačné koeficienty boli spočítané vo voľne šíriteľnom štatistickom programe Rx64 3.5.3. Tento program ponúka pri výpočte korelačných koeficientov vo výsledkoch aj tzv. p -hodnotu, ktorá vyjadruje pravdepodobnosť, s akou by sme mohli dostať výsledok rovnako, alebo ešte viac odporujúci nulovej hypotéze. Ak je $p \leq \alpha$, nulová hypotéza sa zamieta. Ak je naopak $p > \alpha$ nulovú hypotézu nezamietame, no nemôžeme ani istotou tvrdiť, že platí, môžeme iba predpokladať, že táto hypotéza platí (Zvára 2013).

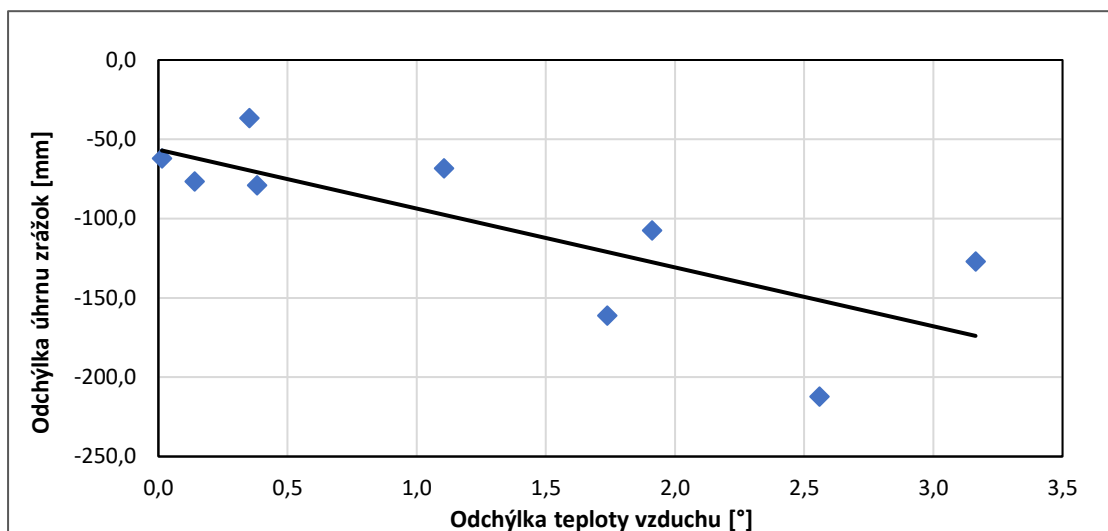
V prvom kroku bola posudzovaná závislosť pre všetky letá v sledovanom období. Hodnoty korelačných koeficientov vyšli pre Pearsonov koeficient -0,2329, respektíve -0,1528 pre Spearmanov koeficient. V tomto prípade podáva zrejme relevantnejšie výsledky Spearmanov koeficient, ktorý pracuje s poradím hodnôt a je tak citlivejší voči odľahlým pozorovaniam, ktoré sú z obrázku 20 očividné (pravý dolný roh). Je ale potrebné dodať, že na 5% hladine testu sme podľa p -hodnoty nezamietli nezávislosť skúmaných hodnôt. P -hodnota vyšla pri oboch koeficientoch vyššia ako 0,05 (vid' tab. 3), čo znamená, že korelačné koeficienty nie sú na 5% hladine testu významné a závislosť nemôžeme predpokladať, čo je badateľné už z obr. 20.

Pri združenej hydrometeorologickej udalosti tohto druhu sú však vo vzájomnej interakcii teplo (nadnormálne teploty vzduchu) a sucho, v tomto prípade deficit zrážok. Preto bola posudzovaná závislosť medzi letami s kladnou teplotnou odchýlkou a zápornou odchýlkou zrážok. V tomto prípade bola zistená silná záporná korelácia medzi kladnou odchýlkou letnej teploty vzduchu a zápornou odchýlkou zrážok. Toto zistenie potvrdzuje tvrdenie z podkapitoly 2.5 o častom spoločnom výskyte vln horúčav a sucha. Korelačné koeficienty nadobúdajú takmer rovnaké hodnoty. Pearsonov koeficient má hodnotu -0,7649. Spearmanov koeficient má hodnotu presne -0,8. P -hodnoty vyšli pri oboch koeficientoch výrazne nižšie ako 0,05 (vid' tab.3). Vysoké hodnoty koeficientov by sme mohli odhadnúť už pri pohľade na rozmiestnenie bodov na scatterplote (obr. 21).

Tab. 3 Hodnoty korelačných koeficientov a ich p -hodnoty pre odchýlky úhrnov zrážok a odchýlky priemernej teploty vzduchu na stanici Churáňov v období 1961–2017.

Obdobie	Pearson	Spearman	p -hodnota Pearson	p -hodnota Spearman
Všetky letá	-0,2329	-0,1528	0,0813	0,2558
Iba letá s kladnou odchýlkou teploty vzduchu a deficitom zrážok	-0,7649	-0,8	0,01634	0,01383

Túto silne zápornú koreláciu môžeme interpretovať tak, že vo výrazne teplých letách sa často vyskytujú aj značné deficity zrážok. Nevýhodou pri posudzovaní závislosti medzi spolupôsobiacimi javmi je fakt, že z 57 rokov bolo len 9 takých, v ktorých bol zaznamenaný deficit zrážok a kladná odchýlka teploty vzduchu, čo je na hodnotenie korelácie pomerne nízke číslo.



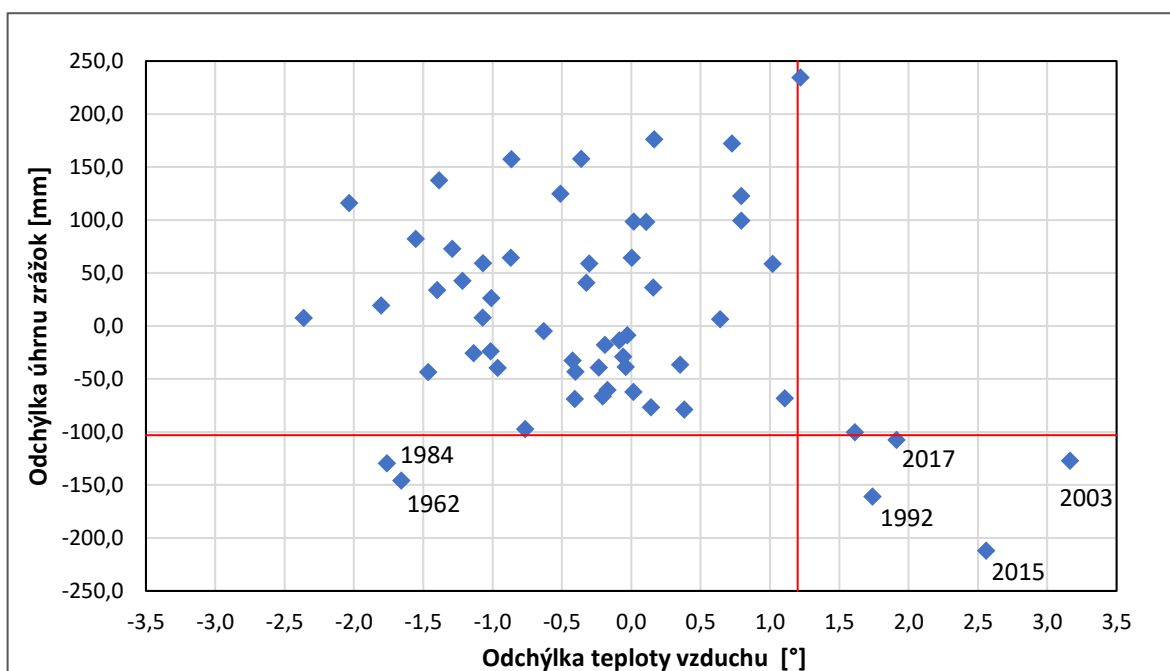
Obr. 21 Letá s kladnou odchýlkou priemernej teploty vzduchu a zápornou odchýlkou úhrnu zrážok od dlhodobého priemeru na stanici Churáňov v období 1961–2017.

4.3.2 Výber konkrétnych udalostí

Na posúdenie toho, či išlo o združenú hydrometeorologickú udalosť alebo nie, bola použitá metóda klasifikácie na základe prahových hodnôt. Za prahové hodnoty, na základe ktorých bola definovaná extremita, bol pre odchýlku priemernej teploty vzduchu zvolený 90. percentil a pre odchýlku úhrnu zrážok 10. percentil, pričom 90. percentil predstavuje odchýlku priemernej teploty vzduchu 1,2 °C a 10. percentil znamená deficit zrážok 103 mm. Prahové hodnoty sú na obr. 22 vyobrazené ako červené línie.

Body, vymedzené týmito líniami, nachádzajúce sa v pravom dolnom rohu, predstavujú spoločný výskyt extrémne suchých a teplých liet. Na základe obr. 22 by sme mohli podľa prekročenia stanovených prahových hodnôt považovať za združené hydrometeorologické udalosti letá v rokoch 1992, 2003, 2015 a 2017. Tesne mimo vymedzeného priestoru skončilo leto v roku 1994. Vo všetkých týchto rokoch bola počas leta splnená podmienka prekročenia stanovených prahových hodnôt, hoci v roku 2017 z pohľadu zrážok tesne. Deficit zrážok počas letných mesiacov v tomto roku dosiahol 107,6

mm. Najvýraznejší deficit bol zaznamenaný v roku 2015, a to až 212,2 mm oproti dlhodobému priemeru 1981–2010. V roku 2015 však nebola zaznamenaná najvyššia odchýlka letnej teploty vzduchu od dlhodobého priemeru. Tá bola zaznamenaná v rekordne teplom lete 2003 a mala hodnotu 3,2 °C, zatiaľ čo v lete 2015 činila táto odchýlka 2,6 °C. Poradie jednotlivých rokov na základe odchýlky teploty vzduchu a úhrnu zrážok je uvedené v tabuľkách v prílohe tejto práce.

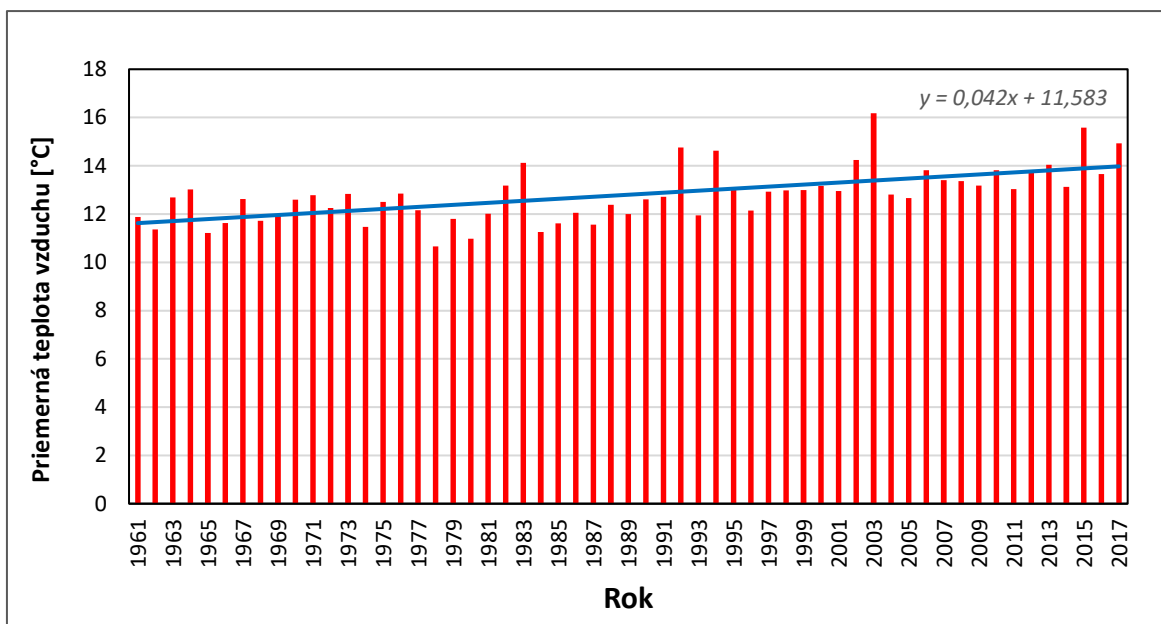


Obr. 22 Odchýlky priemernej teploty vzduchu a úhrnu zrážok počas leta od klimatologického normálu 1981–2010 na stanici Churáňov pre obdobie 1961–2017. Červené línie zobrazujú príslušné prahové hodnoty.

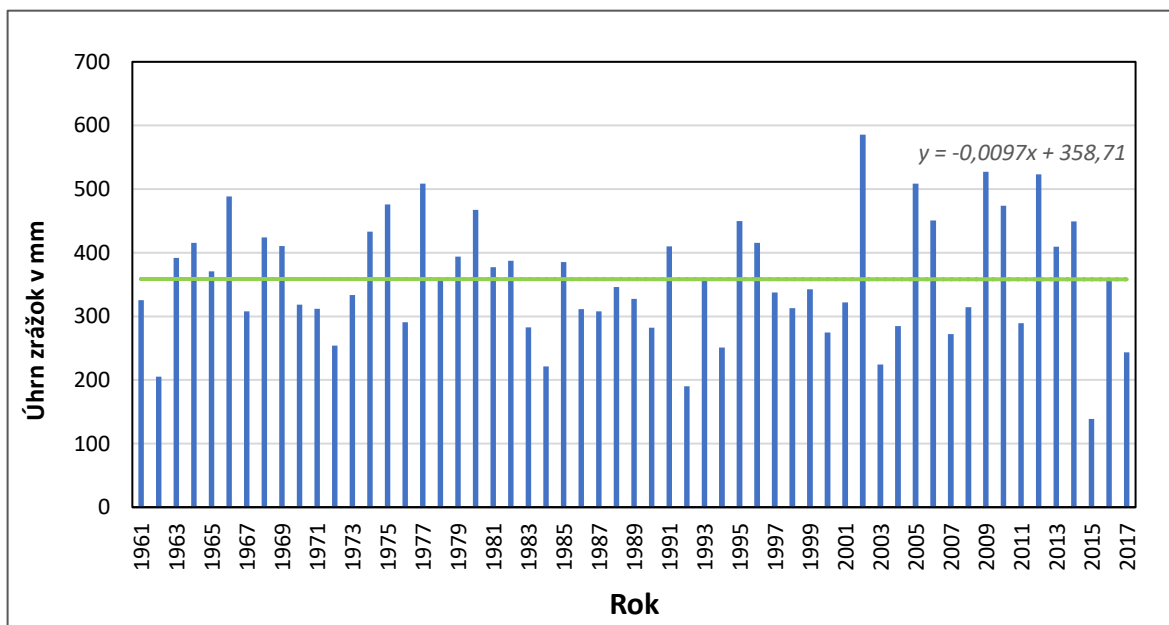
Zaujímavé sú aj body nachádzajúce sa v ľavom dolnom rohu. Tieto dva body predstavujú letá v rokoch 1984 a 1962. Z pohľadu deficitu zrážok sú roky 1984 a 1962 porovnateľné s rokom 2003, avšak v roku 1984 bola odchýlka teploty vzduchu -1,8 °C a v roku 1962 -1,7 °C, čo ich radí medzi najchladnejšie letá v sledovanom časovom období na stanici Churáňov. To znamená, že ak by sme sa na dopady sucha pozerali iba cez deficit zrážok, mohlo by dôjsť k skresleným pohľadom na závažnosť dopadov sucha, pretože ako vieme z poznatkov z rešeršnej časti práce, dopady sucha sú omnoho závažnejšie ak sa suché periódy objavia zároveň s nadnormálne teplými obdobiami.

Všetky udalosti, pri ktorých bol pozorovaný spoločný výskyt vysokých teplôt a deficitu zrážok, boli pozorované, až na jednu výnimku, v posledných dvoch dekádach. Hlavnou príčinou je podľa všetkého rastúci trend teploty vzduchu počas letných mesiacov,

pretože trend úhrnov zrážok počas leta je veľmi nevýrazný a nevýznamný. Uvedené skutočnosti dokumentujú grafy, znázornené na obr. 23 a 24. Na grafe na obr. 23 môžeme vidieť, že priemerná letná teplota vzduchu sa v období medzi rokmi 1961–2017 zvýšila o približne 2°C, zatiaľ čo letný úhrn zrážok sa takmer nezmenil. Tieto zistenia korešpondujú so zisteniami autorov citovaných v kapitole 3.4.2, ktorí takisto považujú za príčinu zvýšenej frekvencie tohto druhu združenej hydrometeorologickej udalosti rastúcu teplotu vzduchu.



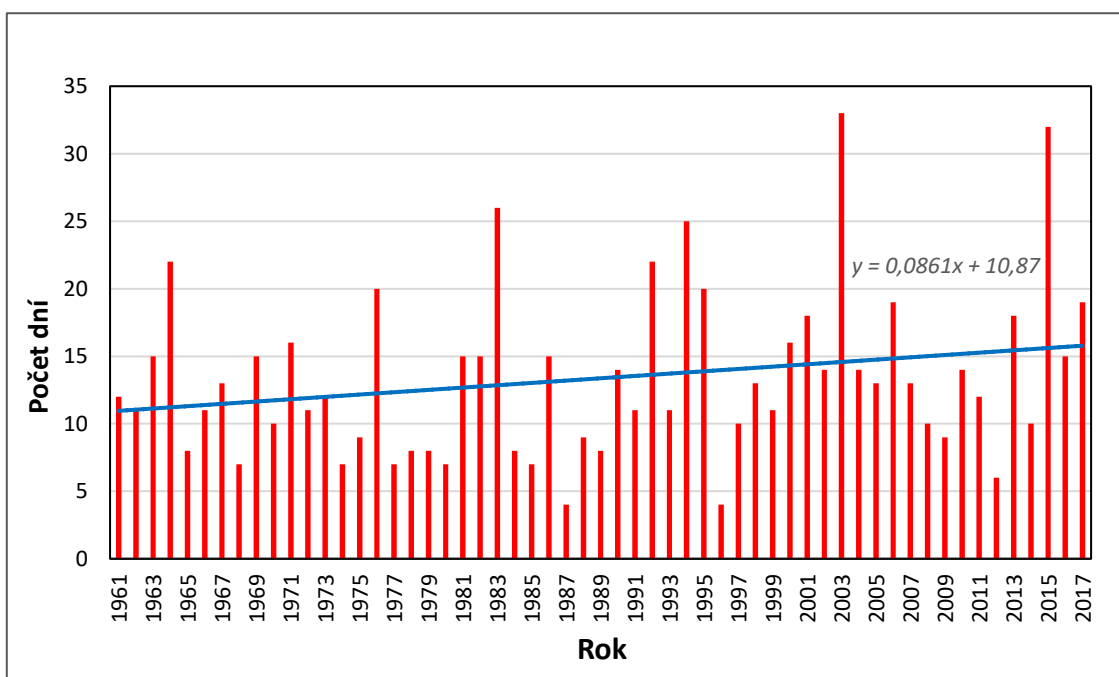
Obr. 23 Priemerná teplota vzduchu počas leta na stanici Churáňov v rokoch 1961–2017 a jej lineárny trend zobrazený modrou líniou.



Obr. 24 Úhrny zrážok počas leta na stanici Churáňov v rokoch 1961–2017 a ich lineárny trend zobrazený zelenou líniou.

V literatúre, zaoberajúcej sa skúmaním spoločného výskytu teplých a suchých periód, sa často používajú na ich hodnotenie aj počty dní so spoločným výskytom nadnormálne vysokých teplôt a nízkym úhrnom zrážok.

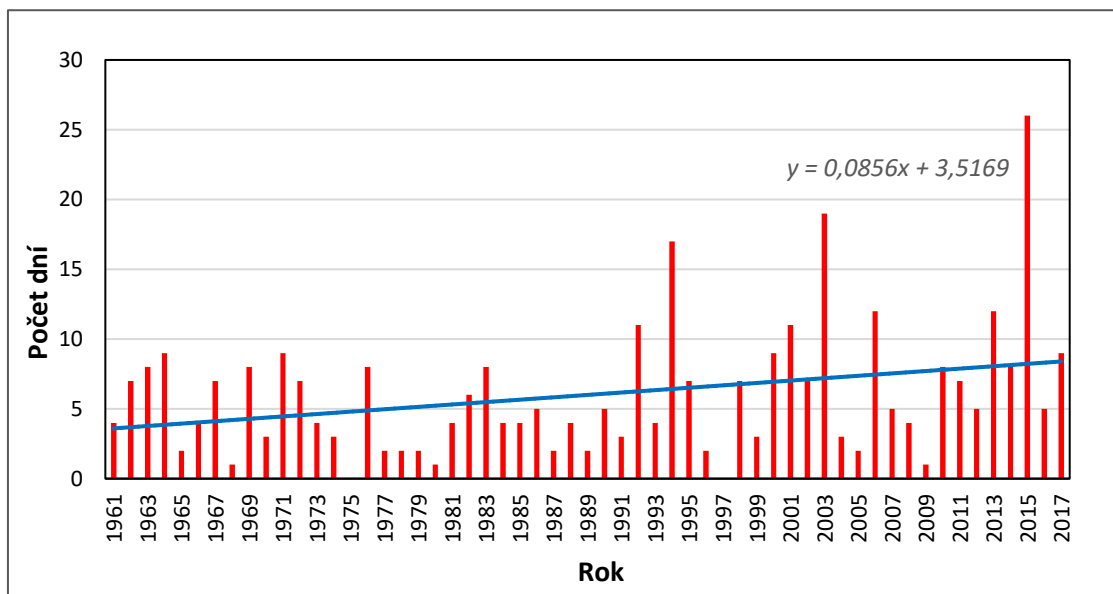
Po vzore práce Benistona (2009) boli spracované nasledujúce dva grafy, ktoré ukazujú počet nadnormálne teplých dní s nulovým úhrnom zrážok, počas letných mesiacov. Na prvom grafe (obr. 25) je zobrazený počet týchto dní, v ktorom bola pre prahovú hodnotu zvolená priemerná denná teplota vzduchu 15,8 °C, čo predstavuje 75. percentil, čiže horný kvartil priemerných denných teplôt v letných mesiacoch v rámci celého sledovaného obdobia. V druhom grafe (obr. 26) predstavuje prahovú hodnotu 90. percentil, ktorý predstavuje priemernú dennú teplotu vzduchu 18,2 °C. Z obidvoch grafov je vidieť stúpajúci trend počtu týchto dní. Priemerný počet týchto dní za obdobie 1981–2010 je 14, pre 75. percentil priemernej dennej teploty vzduchu, a 6 pre 90. percentil. Podľa zistených trendov je nárast v počte nadnormálne teplých dní oproti priemernej hodnote 14% pre 75. percentil a 33% pre 90. percentil.



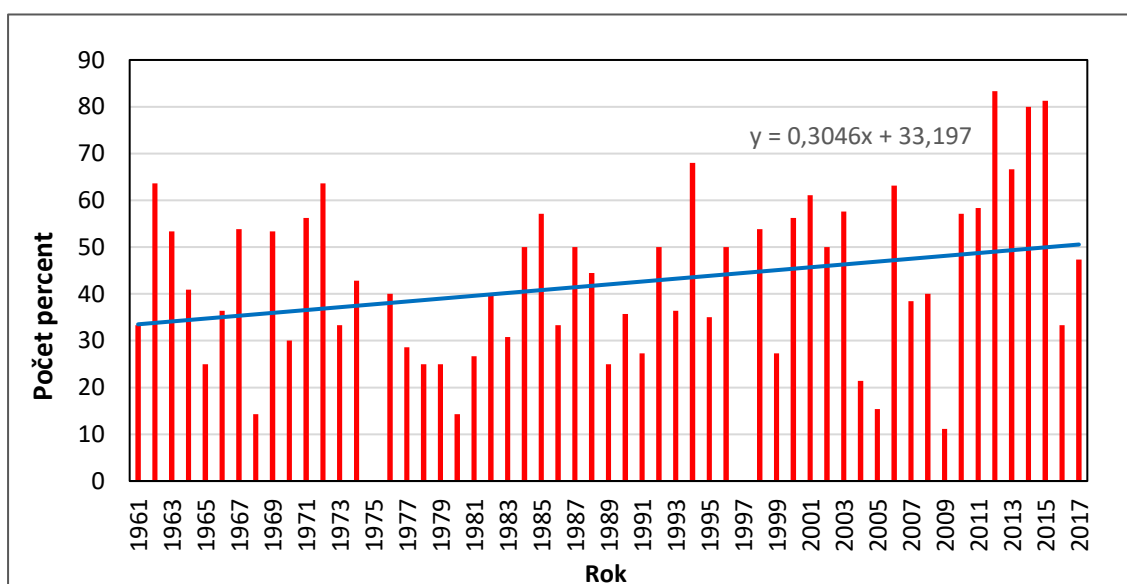
Obr. 25 Počet dní s priemernou dennou teplotou vzduchu nad 75. percentilom a nulovým úhrnom zrážok počas leta a ich lineárny trend na stanici Churáňov v období 1961–2017.

V obidvoch grafoch výrazne vystupujú predovšetkým letá v rokoch 2003 a 2015. Veľmi zaujímavý je fakt, že leto v roku 2015 malo oveľa vyšší počet dní s prekročením prahovej hodnoty predstavovanej 90. percentilom (vid' obr. 26). Pre prahovú hodnotu danú

75. percentilom bol v roku 2003 počet týchto dní 33 a pre rok 2015 to bolo 32 dní. Pre 90. percentil bol však počet týchto dní v lete 2003 iba 19 oproti 26 v roku 2015. Z uvedeného by sa dalo povedať, že leto 2015 bolo z tohto pohľadu extrémnejšie ako leto 2003. Zvýšený podiel počtu bezzážkových dní s priemernou teplotou vzduchu nad 90. percentilom v rámci dní s teplotou nad 75. percentilom dokumentuje obr. 27. Z grafu vyplýva, že v posledných rokoch dochádza k častejšiemu prekročeniu 90. percentilu, ak sa v lete vyskytnú bezzážkové dni s teplotou vzduchu nad 75. percentilom.

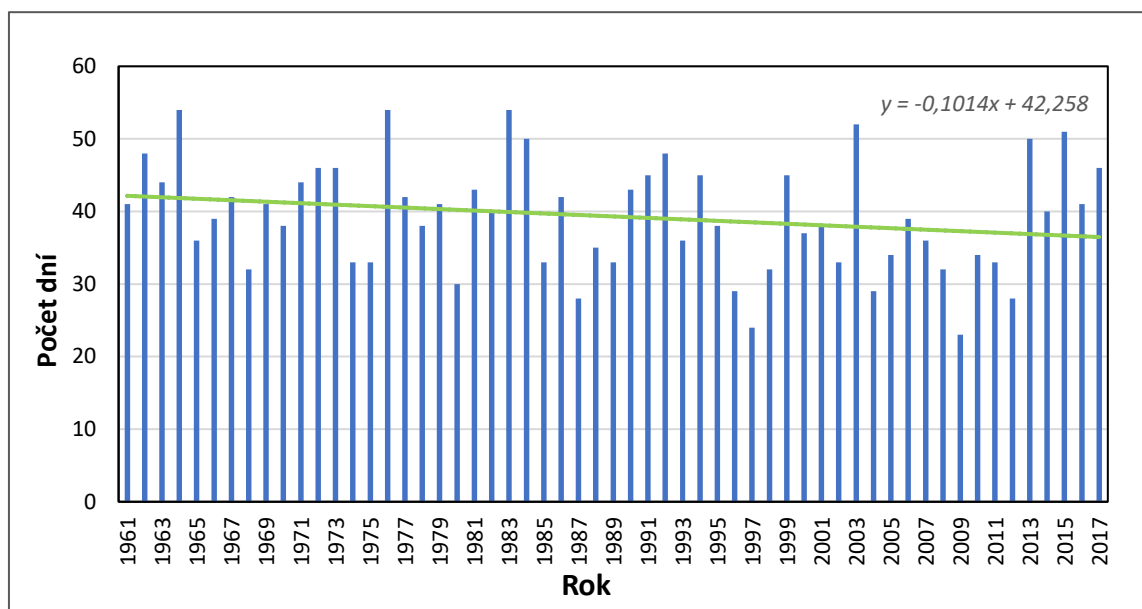


Obr. 26 Počet dní s priemernou dennou teplotou vzduchu nad 90. percentilom a nulovým úhrnom zrážok počas leta na a ich lineárny trend na stanici Churáňov v období 1961–2017.



Obr. 27 Percentuálny podiel počtu dní s priemernou teplotou vzduchu nad 90. percentilom a nulovým úhrnom zrážok v rámci nadnormálne teplých dní a ich lineárny trend na stanici Churáňov v období 1961–2017.

Ďalším zaujímavým faktom, poukazujúcim na dôležitosť spoločného posudzovania tepla a sucha, je klesajúci počet dní s nulovým úhrnom zrážok v priebehu leta na stanici Churáňov (viď obr. 28). Toto zistenie opäť potvrdzuje tvrdenia autorov z kapitoly 3.4.2 o tom, že na zvýšenú frekvenciu združeného výskytu tepla a sucha má zrejme výraznejší vplyv rastúca teplota vzduchu.



Obr. 28 Počet dní s nulovým úhrnom zrážok počas leta a ich lineárny trend na stanici Churáňov pre obdobie 1961–2017.

Na druhú stranu je ale potrebné dodať, že rovnaké trendy v počte či už samotných bezzrážkových dní počas leta, alebo trendy v počte spoločného výskytu teplých a bezzrážkových dní nemusia platiť celosvetovo a ide len o jednu konkrétnu stanicu, takže označenie rastúceho trendu teploty vzduchu ako hlavnú príčinu zvýšenej frekvencie tohto druhu hydrometeorologickej združenej udalosti by mohlo byť zbrklé a nemuselo by byť úplne správne.

Pri analyzovaní trendov je veľmi dôležité brať do úvahy aj štruktúru časovej rady. V prípade trendov popísaných vyššie sú to extrémne vysoké hodnoty počtu dní so spoločným výskytom nadnormálne vysokých teplôt vzduchu a nulového úhrnu zrážok, hlavne v rokoch 2003 a 2015, ale aj 1994 alebo 1983. Tieto výrazne nadpriemerné roky môžu v prípade lineárnych trendov „nadvihovať“ trendovú spojnicu a výsledné trendy môžu pôsobiť zavádzajúco. Na analyzovanie trendov a posúdenie ich štatistickej významnosti, by bolo vhodnejšie použiť neparametrický Mann-Kendallov test, ktorý je menej citlivý na extrémne hodnoty v časovej rade (Škoda et al. 2014), čo je však zrejme nad rámec tejto bakalárskej práce.

4.3.3 Prípadová štúdia leto 2017

Ako už bolo uvedené v kapitole 4.3.2, na základe obr. 22 bolo leto 2017 na stanici Churáňov klasifikované ako združená hydrometeorologická udalosť, ktorá vznikla spoločným výskytom dvoch meteorologických ohrození. V tomto prípade išlo o kombináciu meteorologického sucha, vyjadreného deficitom zrážok, a nadnormálnymi teplotami vzduchu.

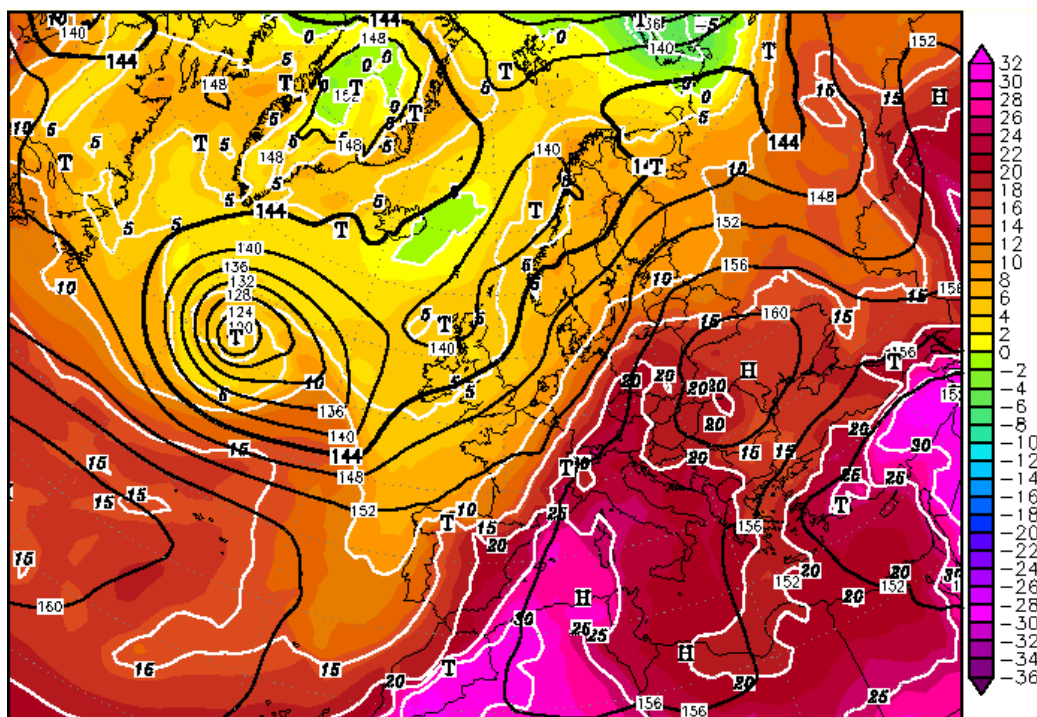
Kumulatívny úhrn zrážok bol v lete roku 2017 na úrovni 243,6 mm, čo predstavuje deficit zrážok 107,6 mm oproti klimatologickému normálu 1981–2010. Rovnako aj priemerná letná teplota vzduchu (14,9 °C) bola silno nadpriemerná. Odchýlka priemernej teploty vzduchu mala hodnotu 1,9 °C. Obidve hodnoty odchýlok spĺňajú kritériá, na základe ktorých boli jednotlivé letá považované za združenú hydrometeorologickú udalosť. Najteplejším mesiacom bol august s priemernou teplotou vzduchu 15,5 °C. Táto hodnota je o 2 °C vyššia ako klimatologický normál (1981–2010) pre tento mesiac. Najvýraznejšiu odchýlku od priemernej teploty vzduchu mal však mesiac jún, konkrétne 3,1 °C. V tomto mesiaci bol zaznamenaný aj najvyšší počet dní bez zrážok (18), čo sa prejavilo aj v nízkom mesačnom úhrne zrážok (50,7 mm), čo znamená deficit 56,6 mm oproti dlhodobému priemeru. Rovnakú hodnotu v počte dní bez zrážok dosiahol aj august, ten má však o jeden deň v kalendári viac. Počas celého leta bolo takýchto dní 46. Čo sa týka dní so spoločným výskytom nadnormálne teplých dní s nulovým úhrnom zrážok, tak v priebehu tohto leta bolo zaznamenaných 19 takých dní, ktoré mali nulový úhrn zrážok a priemernú dennú teplotu vzduchu v hornom kvartile letných teplôt. Najviac ich bolo zaznamenaných v mesiaci jún. Dní, ktorých priemerná denná teplota vzduchu prekročila 90. percentil a zároveň v nich nebol zaznamenaný žiadny úhrn zrážok, bolo 9. Obidve hodnoty sú z hľadiska normálu 1981–2010 nadpriemerné. Prehľad jednotlivých charakteristík poskytuje tab. 4.

Tab. 4 Prehľad jednotlivých teplotných a zrážkových charakteristík leta 2017. Bunky podfarbené červenou farbou označujú hodnoty s kladnou odchýlkou. Modro podfarbené bunky naopak označujú hodnoty so zápornou odchýlkou od klimatologického normálu 1981–2010.

	Priemerná teplota vzduchu [°C]		Úhrn zrážok [mm]		Počet dní bez zrážok		Počet dní bez zrážok s priemernou teplotou vzduchu nad 75. percentilom		Počet dní bez zrážok s priemernou teplotou vzduchu nad 90. percentilom	
	1981-2010	2017	1981-2010	2017	1981-2010	2017	1981-2010	2017	1981-2010	2017
Celé leto	13	14,9	351,2	243,6	37,7	46	14,0	19	6,0	9
Jún	11,7	14,9	107,3	50,7	11,8	18	3,2	9	1,3	3
Júl	13,8	14,5	127,3	91,6	12,6	10	5,5	4	2,9	2
August	13,5	15,5	116,3	101,3	13,3	18	5,3	6	1,8	4

Prvá výraznejšia perióda s výskytom nadnormálne teplých a zároveň bezzrážkových dní bola počas leta 2017 zaznamenaná v období od 11. 6. do 26. 6. 2017. Všetky dni so spoločným prekročením charakteristickej prahovej hodnoty a nulovým úhrnom zrážok pre mesiac jún boli zaznamenané práve v tomto období. Podobne aj väčšina bezzrážkových dní tohto mesiaca sa vyskytla v spomenutom časovom úseku. Toto teplé a suché obdobie bolo narušené iba dvomi dňami, v ktorých bol zaznamenaný úhrn zrážok. Konkrétne išlo o dni 15.6. (0,1 mm) a 22. 6. (2,9 mm). Zároveň bola dňa 22.6. dosiahnutá aj maximálna priemerná denná teplota vzduchu v rámci tohto obdobia. Priemerná teplota vzduchu tohto dňa mala hodnotu 22,1 °C.

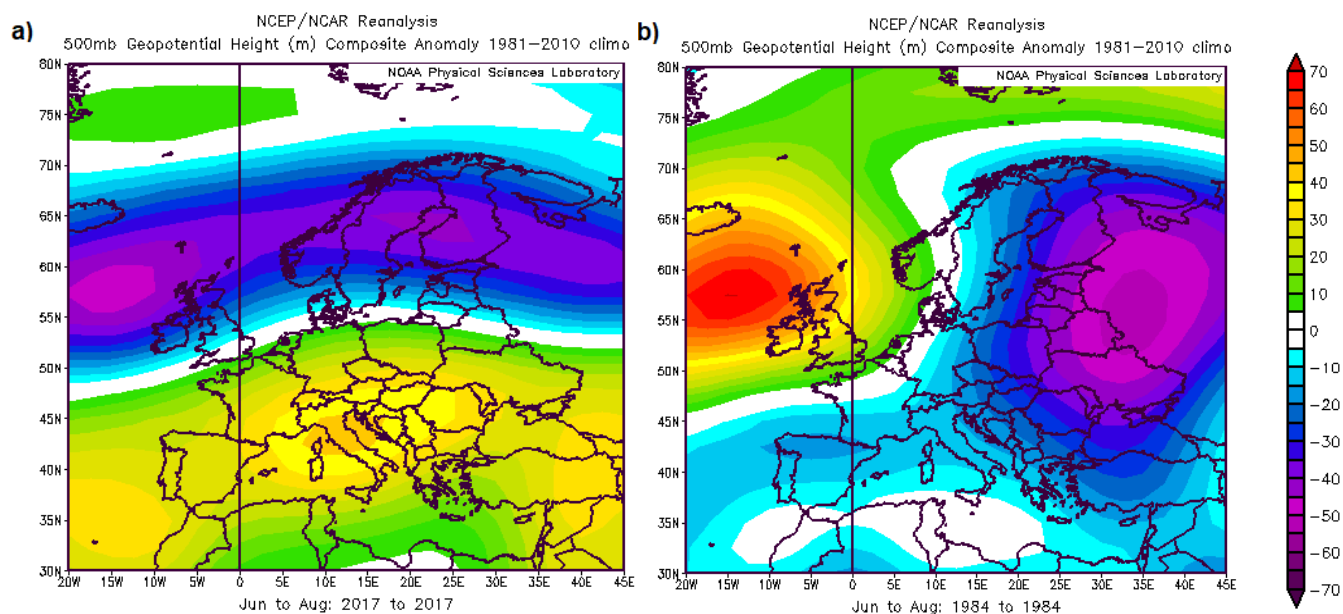
Najteplejšie obdobie leta sa vyskytlo na prelome mesiacov júl a august. V tomto období bola zaznamenaná aj najvyššia priemerná denná teplota vzduchu leta 2017, ktorá mala hodnotu 24,4 °C a bola nameraná 1. 8. 2017. Táto hodnota sa tak zaradila na desiate miesto v histórii pozorovaní na stanici Churáňov. Zo synoptickej situácie na obr. 29 vidíme, že po zadnej strane tlakovej výše so stredom približne nad Moldavskom, prúdil nad Česko veľmi teplý, pôvodom tropický vzduch od juhozápadu. Tento prílev teplého vzduchu bol navyše ešte zosilnený vďaka prítomnosti tlakovej níše nad Britskými ostrovmi. Teplota vzduchu v hladine 850 hPa v tento deň presiahla hranicu 20 °C.



Obr. 29 Geopotenciálna výška [gpdam] izobarickej hladiny 850 hPa, vyjadrená čiernymi líniami, a teplota vzduchu [°C] v tejto hladine vyjadrená farebnou škálou, 1. 8. 2017, 12 UTC (zdroj: wetter3.de).

Hlavnou príčinou suchých a teplých podmienok leta 2017 boli cirkulačné pomery v atmosfére, ktoré umožňovali prílev teplého vzduchu do strednej Európy a zároveň zabráňovali prisunu vlhšieho vzduchu od Atlantiku. V lete 2017 boli tieto vhodné podmienky na spoločný výskyt vln horúčav a sucha zapríčinené častou prítomnosťou výbežku Azorskej anticyklóny, pričom často dochádzalo k osamostatneniu jadra vyššieho tlaku vzduchu najmä nad Stredomorím. To dosvedčujú aj odchýlky výšky geopotenciálnej hladiny 500 hPa v priebehu leta 2017 na obr. 30 (a). Z obrázku sú zrejmé výrazné kladné odchýlky nad Talianskom a priľahlou oblasťou, ale aj nad Balkánom, či strednou Európou. Kladné odchýlky vo výške geopotenciálnej hladiny znamenajú prítomnosť teplej vzduchovej hmoty a anticyklonálnejší ráz počasia. Z obr. 30 (a) je ďalej viditeľný posun frontálnej zóny smerom na sever, čo malo za následok znížené množstvo zrážok počas leta. Chladnejší oceánsky vzduch sa tak dostával skôr nad západnú a severnú Európu ako do našej oblasti. Česko sa naopak často ocitalo na zadnej strane oblasti vyššieho tlaku vzduchu, čo malo za následok prílevy teplého vzduchu. Pri takejto situácii má ďalej na teplotné, ale aj zrážkové pomery vplyv zosilnená subsidencia. Subsidencia spôsobuje ohrev vyšších hladín a stabilizuje teplotné zvrstvenie. V stabilnejšom teplotnom zvrstvení je následne zmenšená šanca na tvorbu konvektívnych zrážok. Zosilnený je aj ohrev vzduchu od zemského povrchu.

Z priloženej mapy na obr. 30 (a) vyplýva, že pre súčasný výskyt tepla a sucha je potrebné vhodné postavenie tlakových útvarov. Väčšinu leta 2017 bolo postavenie tlakových útvarov vhodné pre vznik združeného efektu sucha a tepla. V kapitole 4.3.2 však boli spomenuté aj suché letá 1984 a 1962, ktoré mali dokonca vyšší deficit zrážok ako leto 2017. Pre leto roku 1984 bol deficit zrážok na úrovni 129,7 mm, čo ho radí na štvrté miesto v sledovanom časovom úseku (viď príloha). Nízky úhrn zrážok je badateľný aj zo štatistiky bezzrážkových dní. Leto 1984 ich malo až 50. Tieto letá sa však vyznačovali inou cirkuláciou ako vyššie popisované obdobie, a z tohto dôvodu nebola teplotná odchýlka od dlhodobého priemeru kladná, ale bola naopak záporná. To sa v prípade leta 1984 prejavilo aj na nízkom počte dní s priemernou teplotou vzduchu nad 75., respektíve 90. percentilom a nulovým úhrnom zrážok. Týchto dní bolo 8, resp. 4. Z hodnôt odchýlok geopotenciálnej výšky 500 hPa na obr. 30 (b) môžeme vidieť, že postavenie tlakových útvarov síce nahrávalo blokovaníu zonálneho prenosu vzduchových hmôt, avšak prúdenie bolo často zo severných smerov. Česko sa tak často dostávalo na prednú stranu oblasti vysokého tlaku vzduchu, ktorý sa často vyskytoval nad západnou Európou, čo malo za následok prúdenie chladnejšieho vzduchu od severu.



Obr. 30 Odchýlka výšky geopotenciálnej hladiny 500 hPa nad Európou počas leta 2017 (a), to isté pre leto 1984 (b). Farebná škála vyjadruje odchýlku výšky tejto hladiny od klimatologického normálu 1981–2010 (zdroj: NOAA).

4.4 Silný vietor a intenzívne zrážky

Kombinácia silného vetra a intenzívnych zrážok ako združená hydrometeorologická udalosť môže spôsobiť značné škody. Silný vietor môže strhnúť strechy a spoločne sa vyskytujúci sa dážď tak môže spôsobiť ešte väčšie škody. Výdatné zrážky v zime môžu v kombinácii s vetrom takisto spôsobiť väčšie škody (hlavne na lesných porastoch), ako keby pôsobil iba jeden z týchto javov (Martius, Pfahl, Chevalier 2016).

V prípade posudzovania tohto druhu združenej udalosti boli posudzované maximálne denné nárazy vetra a denné úhrny zrážok na stanici Churáňov od 1. 1.1961 do 31. 12. 2015. V niektorých obdobiach došlo k výpadku dát maximálnych nárazov vetra. Tieto obdobia neboli zaradené do výpočtov.

4.4.1 Posúdenie závislosti

Veterné a zrážkové extrémny bývajú pomerne často vzájomne spojené. V tropických oblastiach bývajú často spojené s tropickými cyklónami. V našich podmienkach sa prevažne viažu na hlboké mimo-tropické cyklóny (Martius, Pfahl, Chevalier 2016). Na posúdenie závislosti boli použité rovnaké metódy ako v prípade tepla a sucha. Prvým krokom bolo

rozdelenie dát na ročné obdobia a obdobie chladného a teplého polroka. Chladný polrok bol vymedzený mesiacmi október – marec. Mesiacmi apríl – september bol vymedzený teplý polrok. Následne bola vypočítaná závislosť medzi denným úhrnom zrážok a maximálnym denným nárazom vetra.

Ak sa pozrieme na obdobie celého roka, tak korelačné koeficienty nenaznačujú príliš silnú koreláciu medzi skúmanými veličinami. Hodnota Pearsnovho koeficientu je 0,2853 pre denné úhrny zrážok a denné maximá nárazu vetra (viď tab. 5). O niečo vyššiu hodnotu má Spearmanov koeficient, konkrétne 0,3832. *P*-hodnota je pre oba koeficienty veľmi nízka, na základe čoho môžeme jednoznačne zamietnuť nulovú hypotézu o nezávislosti dát. Keď sa pozrieme bližšie na jednotlivé obdobia, tak zistíme stredne silnú závislosť medzi nárazmi vetra a dennými úhrnmi zrážok v zime a chladnom polroku (tab. 5).

Silnejšie korelácie v týchto obdobiach by mohli byť vysvetlené tak, že v zime sú priemerné maximálne denné nárazy vetra vyššie ako v ostatných ročných obdobiach. To isté sa dá povedať ak porovnáme chladný a teplý polrok. V zime je oproti zvyšným ročným obdobiam nižší aj percentuálny podiel dní bez zrážok. Rovnako je to aj pri porovnaní chladného a teplého polroka. Podrobnosti sú uvedené v tab. 6.

Tab. 5 Hodnoty korelačných koeficientov a *p*-hodnoty pre denný úhrn zrážok a maximálny denný náraz vetra v rámci jednotlivých období na stanici Churáňov v období 1961–2015.

Obdobie	Pearson	Spearman	<i>p</i> -hodnota Pearson	<i>p</i> -hodnota Spearman
Celý rok	0,2853	0,3832	2,20E-16	2,20E-16
Jar	0,2795	0,3343	2,20E-16	2,20E-16
Leto	0,1973	0,3123	2,20E-16	2,20E-16
Jeseň	0,3292	0,3954	2,20E-16	2,20E-16
Zima	0,4849	0,5147	2,20E-16	2,20E-16
Teplý polrok	0,1974	0,2951	2,20E-16	2,20E-16
Chladný polrok	0,4391	0,4760	2,20E-16	2,20E-16

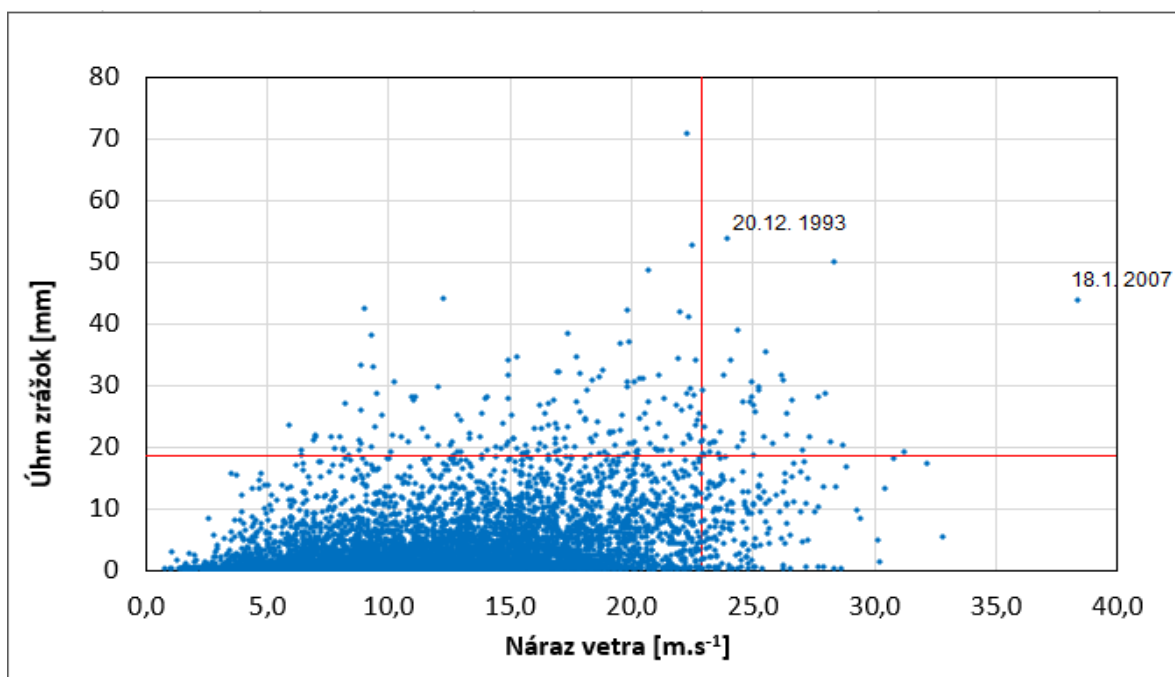
Tab. 6 Priemerný maximálny denný náraz vetra a percentuálny podiel dní bez zrážok pre jednotlivé ročné obdobia na stanici Churáňov pre obdobie 1961–2015.

	ZIMA	JAR	LETO	JESEŇ	CHLADNÝ p.	TEPLÝ p.
Priemerný maximálny denný náraz vetra [m.s ⁻¹]	11,3	10,1	9,4	10,0	11,0	9,5
Percentuálny podiel dní bez zrážok	39,0	41,5	42,5	47,9	42,2	43,3

4.4.2 Výber konkrétnych udalostí

Podobne ako pri výbere udalostí, pri ktorých boli v interakcii nadnormálne teploty vzduchu a meteorologické sucho, tak aj pri tomto druhu združenej hydrometeorologickej udalosti boli konkrétne udalosti posúdené ako združené na základe spoločného prekročenia určitých prahových hodnôt skúmaných meteorologických prvkov.

V tomto prípade išlo o 98. percentil. Takto vysoká hodnota bola zvolená na základe práce Martius, Pfahl, Chevalier (2016), ktorí ju považujú za hranicu, nad ktorou už vietor a zrážky majú potenciál spôsobiť značné škody. Udalosti boli vybrané z chladnej polovice roka, pretože v tomto období bola zistená vyššia korelácia medzi uvažovanými meteorologickými prvkami ako v teplom polroku. Táto silnejšia závislosť sa odzrkadlila aj na celkovom počte združených udalostí tohto druhu. V chladnom polroku ich bolo počas sledovaného obdobia 40, zatiaľ čo v teplom polroku ich bolo zaznamenaných iba 9. Prahové hodnoty sú na obr. 31 opäť reprezentované červenými líniami. Pre maximálny denný náraz vetra predstavovala prahová hodnota náraz vetra na úrovni $22,9 \text{ m.s}^{-1}$. Denný úhrn zrážok bol braný do úvahy, ak prekročil hodnotu $18,7 \text{ mm}$.



Obr. 31 Maximálny denný náraz vetra a denný úhrn zrážok v chladnom polroku na stanici Churáňov v období 1961–2015. Dátumami sú označené popisované prípadové štúdie.

4.4.3 Tlaková níž Kyrill

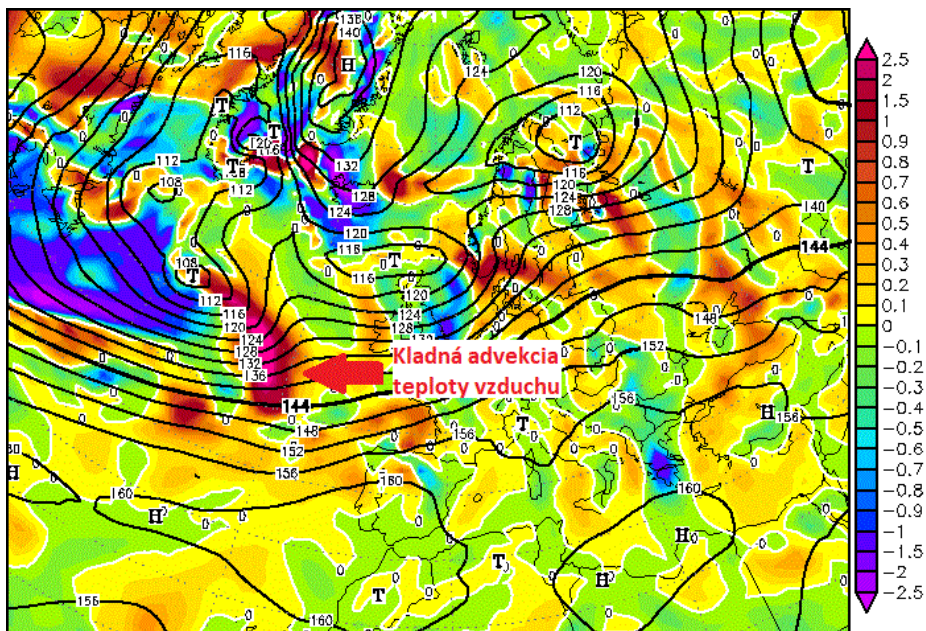
Január 2007 sa v Českej republike vyznačoval veľmi veterným počasím. Nárazy vetra často prekračovali hodnotu 15 m.s^{-1} . Toto veterné počasie bolo zapríčinené intenzívnou cyklónálnou činnosťou v oblasti severovýchodného Atlantiku, čo malo za následok silné zonálne prúdenie, v ktorom sa cez územie Česka často presúvali frontálne systémy. Tento charakter cirkulácie vyvrcholil v dňoch 18. a 19. januára, kedy sa cez zpadnú a strednú Európu presúvala veľmi hlboká tlaková níž Kyrill (Sandevev 2007).

Pomocou zvolených prahových hodnôt bola tlaková níž Kyrill vyhodnotená ako združená hydrometeorologická udalosť, pri ktorej boli vo vzájomnej interakcii silný vietor a intenzívny dážď. Z obr. 31 vidíme, že z pohľadu maximálneho nárazu vetra sa táto udalosť zaradila na prvé miesto v histórii pozorovaní na stanici Churáňov v období 1961–2015. Náraz vetra dosiahol 18.1. 2007 hodnotu $38,4 \text{ m.s}^{-1}$. Denný úhrn zrážok bol v tomto dni takisto extrémny a mal hodnotu 43,7 mm, čím sa zaradil na siedme miesto v rámci chladného polroka v sledovanom období.

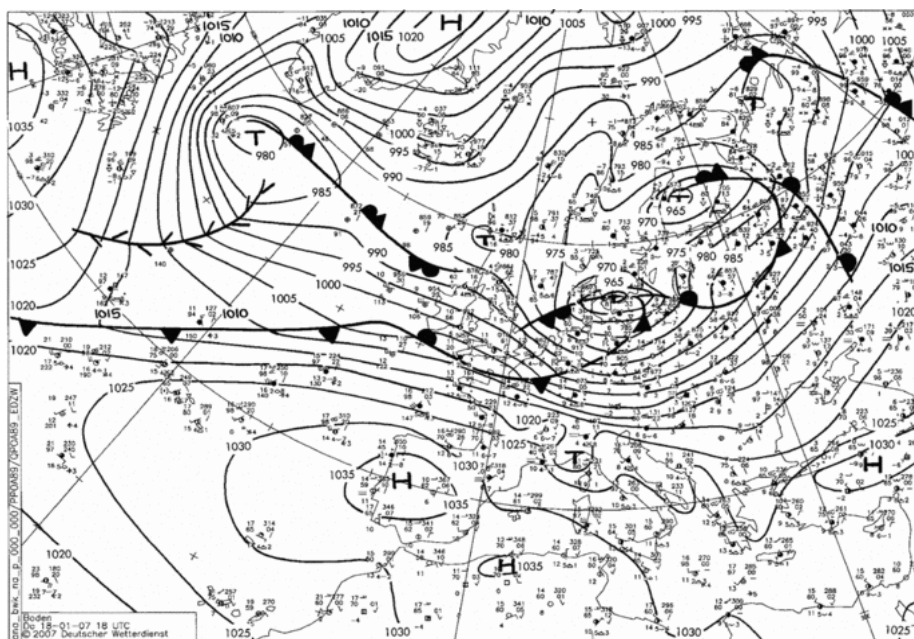
Tlaková níž Kyrill začala vznikať 15. 1. v oblasti Veľkých Kanadských jazier. Pri svojom postupe ďalej na severovýchod sa níž prehlbovala a proces cyklogenézie sa zintenzívnil. Prehlbovanie níše bolo podmienené silnou kladnou advekciou teploty vzduchu a výrazným teplotným rozhraním (obr. 32). Dňa 18. januára sa Kyrill priblížil ku Britským ostrovom a tlak v jeho strede poklesol pod 970 hPa. Podľa Sandeva (2007) došlo vďaka zmohutneniu tlakovej výše nad Pyrenejským polostrovom k výraznej konvergencii výškového vetra medzi tlakovou nížou Kyrill a tlakovou výšou nad Pyrenejským polostrovom. To malo za následok o niečo odlišnú dráhu Kyrilla od bežných tlakových níží, čím došlo k situácii spomenutej v kapitole 3.2, kde je spomenuté, že ak sa hlboké tlakové níše postupujúce z Atlantiku na svojej dráhe vychýlia viac na juh, je silným vetrom zasiahnutá aj stredná Európa.

Najsilnejšie nárazy vetra sa v Česku vyskytovali pri prechode studeného frontu v noci z 18. 1. na 19. 1. 2007. V tej dobe sa už stred tlakovej níše nachádzal nad Baltským morom. Tlak v strede níše poklesol až na 965 hPa, zároveň sa nad Pyrenejským polostrovom stále udržiavala tlaková výš, v ktorej strede tlak vzduchu presahoval 1035 hPa (vid' obr. 33). Tento výrazný tlakový gradient mal za následok silné, spočiatku juhozápadné, neskôr západné a po prechode studeného frontu severozápadné prúdenie. Najsilnejšie nárazy vetra sa vyskytli práve na čele studeného frontu, ktoré bolo navyše spojené aj s intenzívnymi

zrážkami a búrkami, hlavne v severnej polovici územia. Maximálny náraz vetra bol v Česku zaznamenaný na Labskej boude, kde bola nameraná rýchlosť vetra až $57,8 \text{ m.s}^{-1}$ (Hostýnek, Novák, Žák 2008). Najvyššie úhrny zrážok boli namerané v pohraničných pohoriach Šumava, Krkonoše a Jeseníky. Jednodňové úhrny sa tu pohybovali na úrovni 40-60 mm (Sandev 2007).



Obr. 32 Advekcia teploty vzduchu na hladine 850 hPa 17.1. 2007 12 UTC. Čiernymi líniami je vyjadrená výška hladiny 850 hPa v gdam. Farebná škála vyjadruje advekciu teploty vzduchu v K.h^{-1} (zdroj: wetter3.de).



Obr. 33 Synoptická situácia pred prechodom studeného frontu 18. januára 2007 o 18 UTC (zdroj: wetter3.de).

O tom, že išlo o kombináciu nebezpečných meteorologických javov, svedčí aj výstraha ČHMÚ na veľmi silný vietor, silný a trvalý dážď a povodňové ohrozenie. Významné škody boli napokon spôsobené prevažne silným vetrom, avšak vyskytli sa aj situácie, kedy boli škody spôsobené aj kombináciou nebezpečných meteorologických javov. Príkladom môže byť strhnutá strecha telocvične v obci Velké Svatoňovice (okres Trutnov), ktorá bola následne vyplavená silným dažďom (meteosvatonovice.cz). V Česku bolo evidovaných 80 tisíc poistných udalostí v objeme takmer 2,25 miliardy korún. Vietor napáchal škody hlavne na budovách a lesných porastoch a spôsobil rozsiahle výpadky elektriny. Náklady na opravu majetku sa vyšplhali na 7,5 miliardy korún, z toho 5,5 miliardy korún stála obnova štátnych lesov. Celkovo bolo zničených približne 10 miliónov m³ dreva (čt24). V prípade tlakovej níše Kyrill bolo šťastím, a to aj napriek významným škodám spôsobených vetrom, že v čase prechodu níše na území Česka absentovala snehová pokrývka. Intenzívne zrážky v spojení so silným vetrom a vysokými teplotami vzduchu by inak mohli spôsobiť, kvôli povodňiam, ešte väčšie škody. S ohľadom na absenciu snehovej pokrývky však došlo len k prechodnému zvýšeniu niekoľkých menších tokov (Sandev).

4.4.4 Povodne v decembri 1993

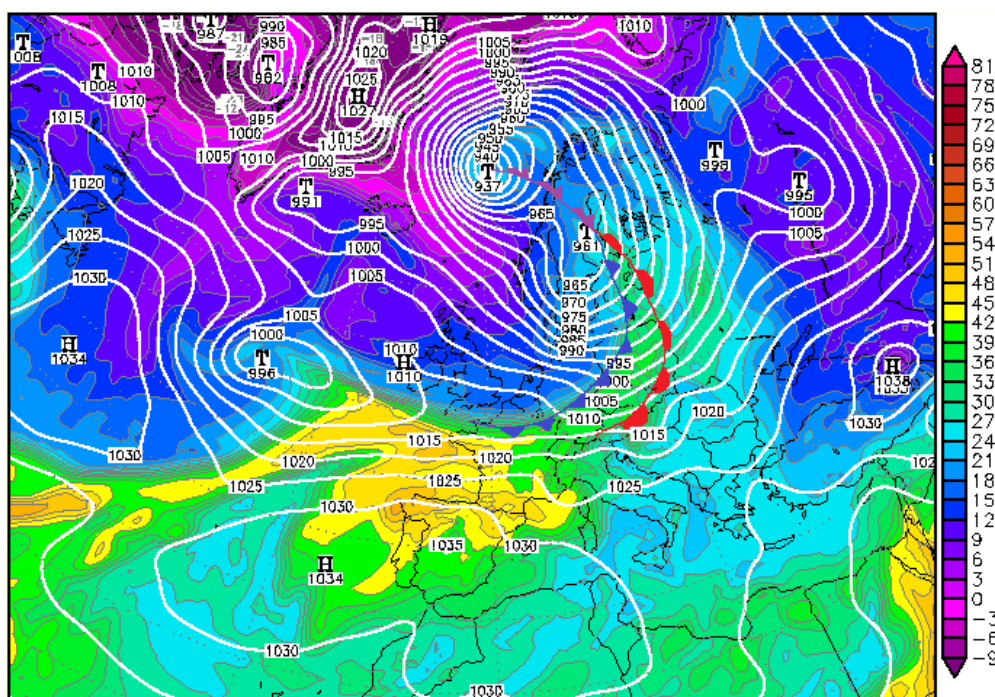
Situácia z druhej polovice decembra 1993 bola z hľadiska pôsobenia vetra a zrážok klasifikovaná ako združená hydrometeorologická udalosť. Oproti vyššie spomenutému Kyrillovi, pri ktorom silné zrážky a vietor síce pôsobili súčasne, no nevyvolali spoločný dopad, sme pri tejto situácii pozorovali spoločný účinok nielen silných zrážok a silného vetra, ale aj teploty vzduchu. Všetky tieto podmienky spoločne s predošlou akumuláciou snehovej pokrývky viedli k významným povodňiam.

V decembri 1993 prevládal zonálny prenos vzduchových hmôt. Takýto typ cirkulácie spôsoboval časté prechody atmosférických frontov a častú zrážkovú činnosť. Najviac zrážok v prvej polovici mesiaca spadlo v rámci Česka práve na Šumave, vzhľadom na vyššie teploty vzduchu a živú cirkuláciu sa snehová pokrývka vytvorila iba v polohách nad 1000 m (Lett et al. 1993). Na stanici Churáňov spadlo v prvej polovici mesiaca 68,9 mm zrážok.

Hlavnou príčinou povodne bolo mimoriadne množstvo zrážok a synchronný výskyt kladnej teploty vzduchu, zrážok a silného vetra. Riadiacim tlakovým útvarom počas zrážkovej epizódy bola veľmi hlboká tlaková níz, nachádzajúca sa východne od Islandu,

ktorej frontálny systém so sebou priniesol výdatné zrážky (viď obr. 34). Na obrázku je vyobrazená ekvivalentná potenciálna teplota v hladine 850 hPa, ktorá je vhodná na identifikovanie atmosférických frontov, pretože v sebe „skrýva“ aj informáciu o vlhkosti vzduchových hmôt.

Výraznejšie zrážky a oteplenie aj do vyšších polôh priniesol teplý front, ktorý prechádzal 19. decembra. Najsilnejšie zrážky sa vyskytli na studenom fronte, prechádzajúcom cez územie Česka v ranných hodinách 20. decembra. V ďalších hodinách sa nad Slovenskom, Rakúskom, Bavorskom a južným cípom Česka nachádzalo frontálne rozhranie. O polohe rozhrania svedčí aj výrazný teplotný kontrast medzi Českými Budějovicami, kde bola teplota večer 20. decembra 3,2 °C, a Vyšším Brodom, v ktorom bola teplota 10,8 °C. Po celé obdobie sa na oboch stranách rozhrania, avšak intenzívnejšie na studenej strane, vyskytovali trvalé zrážky (Lett et al. 1993).



Obr. 34 Synoptická situácia 20.12. 1993, 00 UTC pri povodniach v decembri 1993. Farebná škála vyjadruje ekvivalentnú potenciálnu teplotu, biele línie tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora. Frontálna analýza bola doplnená subjektívne (zdroj: upravené podľa wetter3.de).

Ako už bolo spomenuté vyššie, najsilnejšie zrážky, ktoré zachytávajú prakticky celú zrážkovú udalosť, sa vyskytli v dňoch 19. a 20. 12. 1993. Úhrny zrážok počas týchto dní na niektorých staniciach presiahli hranicu 100 mm. Najvyššie dvojdenné úhrny zaznamenali

stanice Kvilda a Prášily, kde spadlo 136, respektíve 125 mm. Na mnohých stanicích boli prepísané rekordy jednodenných úhrnov zrážok na mesiac december. Maximálne denné úhrny boli namerané 20. 12., kedy na Kvilde spadlo až 94,4 mm zrážok. Nemecká stanica Zwieslerwaldhaus dokonca zaznamenala denný úhrn až 101 mm (Lett et al. 1993; Budínová, Hostýnek, Sulan 1994) Na Churáňove za uvedené dva dni spadlo 71,7 mm, z toho 53,6 mm v priebehu 20. decembra.

Okrem silných zrážok hrali podstatnú rolu pri rýchlom topení snehovej pokrývky silný vietor a kladná teplota vzduchu. Vo vyšších vrstvách atmosféry prúdil nad Šumavu teplý vzduch, čo dosvedčuje aj teplota vzduchu zo stanice Grosser Arber na nemeckej strane pohoria. Teplota vzduchu tu počas celej noci z 20. na 21. decembra zotrvala približne na úrovni 4 °C, pričom fúkal silný západný vietor s rýchlosťou 20 m.s⁻¹, v nárazoch až okolo 35 m.s⁻¹ (Lett et al. 1993). Na Churáňove mal, podľa homogenizovaných údajov, maximálny náraz vetra hodnotu 23,9 m.s⁻¹ a bol nameraný 20.12. 1993.

Súčasný výskyt veľkého množstva zrážok a topiaceho sa snehu v dôsledku kladnej teploty vzduchu a silného vetra mal výraznú odozvu v prietokoch a vodných stavoch tunajších riek. Otava v Sušici mala kulminačný prietok 266 m³.s⁻¹, čo predstavuje N-ročnosť 50 rokov. Extrémnejší bol prietok Vltavy na stanici VD-Lipno prítok, kde bol nameraný prietok 370 m³.s⁻¹, čo znamená 150-ročnú vodu. V povodí Berounky boli najextrémnejšie prietoky zaznamenané na riekach Úhlava a Radbuza. Rieka Úhlava mala v čase kulminácie na stanici VD Nýrsko-prítok prietok 47,2 m³.s⁻¹, na stanici Staňkov bol kulminačný prietok rieky Radbuza 138,1 m³.s⁻¹ (Budínová, Hostýnek, Sulan 1994).

Rozvodnené rieky spôsobili značné škody na majetku. Okresný úrad Klatovy hlásil škody na majetku obci a majetku občanov (vnútorné vybavenie, záhrady) vo výške približne 300 000 korún. Ešte vyššie škody boli hlásené okresným úradom v Domažliciach, kde boli škody na vodných tokoch a majetku obci (zatopené pivnice, studne, pozemky) približne 2,1 milióna korún (Budínová, Hostýnek, Sulan 1994).

5 Zhrnutie poznatkov a ich diskusia

Predkladaná práca si kladie za cieľ predovšetkým zhrnúť poznatky o, v našej literatúre, doteraz takmer nepopísanej problematike spolupôsobenia dvoch či viacerých nebezpečných meteorologických javov. Ako vyplýva z poznatkov rešeršnej časti práce, spolupôsobenie viacerých meteorologických javov či ohrození nie je vôbec neobvyklé, naopak je pomerne časté a množstvo katastrof spojených s nebezpečnými meteorologickými javmi je spôsobené efektom združeného pôsobenia týchto javov (Zscheischler et al. 2018). Výraznejšia pozornosť sa im však (prevažne v zahraničnej literatúre) začala venovať iba približne v poslednej dekáde.

Zvýšený záujem o túto problematiku viedol k snahám podať definíciu tohto prírodného fenoménu. Základnou črtou všetkých definícií je interakcia dvoch, prípadne viacerých meteorologických javov alebo ohrození. Podľa definície od Leonarda et al. (2014) musia byť spolupôsobiace javy vzájomne štatisticky závislé a nemalo by ísť o náhodnú kombináciu javov. Tento fakt znamená, že pod pojem združené hydrometeorologické udalosti by nespádali napríklad situácie, kedy by bola na určitom mieste zvýšená hladina vodných tokov, vďaka predchádzajúcim plošne rozsiahlym zrážkam, následne ešte viac zvýšená intenzívnymi zrážkami spôsobenými búrkami. Z princípu toho, že pri združených udalostiach ide o kombináciu nebezpečných javov, kde práve táto kombinácia, hoci aj náhodná, je nebezpečnejšia a má závažnejší dopad ako individuálny výskyt nebezpečných javov, by však tento, ale aj iné podobné príklady mali byť zahrnuté pod združené udalosti. Škody spôsobené takýmito udalosťami môžu byť veľmi závažné a ich odstraňovanie finančne nákladné, čo je dôležité nielen pre ľudí, ale aj pre samotné poisťovne, či vládnych činiteľov. Z tohto dôvodu bola do klasifikácie združených hydrometeorologických udalostí pridaná aj táto kategória náhodných kombinácií javov, resp. ohrození. Na druhú stranu je však potrebné dodať, že výpočet dôb opakovania alebo budúcej pravdepodobnosti výskytu takýchto druhov združených udalostí je zrejme nereálne.

V definícii od IPCC (2012) je nejasná a diskutabilná časť, v ktorej sa hovorí o súčasnom alebo po sebe nasledujúcom výskyte dvoch extrémnych udalostí. Podľa Martius, Pfahl, Chevalier (2016) si môžeme pod touto časťou vybaviť rôzne dlhé časové úseky. S tým súvisí problém, čo ešte považovať za združenú udalosť a čo už nie. Tento problém sa týka predovšetkým združených udalostí s tzv. kumulatívnym alebo kaskádovým charakterom. Za takúto udalosť by sme mohli považovať napríklad veľmi známy prípad dvoch krátko po sebe

nasledujúcich tlakových níží Vivian a Wiebke. Otázkou však zostáva, aká maximálna doba medzi výskytom dvoch nebezpečných javov môže byť uvažovaná, tak aby sme mohli o danej udalosti tvrdiť, že je združená. Pri spomenutej situácii by mohlo ísť aj o niekoľko dní, možno aj viac ako týždeň. Pomerene často nastáva situácia, kedy je určité územie zasahované viacerými, navzájom spojenými tlakovými nížami (rodiny cyklón). Ak by tieto cyklóny spôsobili značné škody a ich vznik by bol podmienený tým istým cirkulačným vzorcom, mohli by sme hovoriť o združenej udalosti, aj keby bol medzi týmito dvomi cyklónami časový rozdiel napríklad týždeň. Situácia, ktorá by nebola označená ako združená udalosť kumulatívneho/kaskádového charakteru, aj napriek tomu, že určité miesto bolo zasiahnuté dvomi tlakovými nížami v priebehu kratšieho času, by vyzerala nasledovne: 1) dané územie je zasiahnuté tlakovou nížou, ktorá vyvolá závažný dopad, 2) cirkulačný vzorec je prerušený tzv. uzatvárajúcou tlakovou výšou, 3) územie je zasiahnuté novou tlakovou nížou, schopnou spôsobiť značné škody.

Vyššie uvedený príklad poskytuje pohľad na danú situáciu očami meteorológa. Z pohľadu obyčajných ľudí, politikov alebo poisťovní, ktorí sa pozerajú na takéto udalosti cez spôsobené škody, by mohla byť za združenú udalosť tohto typu považovaná aj situácia, kedy by boli jednotlivé udalosti od seba časovo vzdialené aj podstatne dlhšie. Je to z toho dôvodu, že odstraňovanie škôd môže trvať aj niekoľko týždňov. Ak sa počas tohto obdobia vyskytne iný, alebo ten istý nebezpečný meteorologický jav, môže to mať ešte závažnejšie dopady, nakoľko ešte neopravené budovy alebo iný majetok, sú určite náchylnejšie na poškodenie ako už opravené veci.

Na základe zozbieraných poznatkov sa môžeme na združené hydrometeorologické udalosti pozerat' z viacerých uhlov pohľadu. Prvým z nich je už spomínaná náhodná kombinácia javov. Oproti tomuto pohľadu stojí situácia, keď sú pôsobiace javy štatisticky závislé. V rámci tejto kategórie môžeme ďalej vyčleniť dve podkategórie na základe odlišného typu dopadu spolupôsobiacich javov. Táto klasifikácia, teda berie do úvahy výsledok interakcie javov, ktorých spoločný výskyt označujeme ako združenú hydrometeorologickú udalosť. Uplatňuje sa pri nej prístup, ktorý preferuje Leonard et al. (2014) a Zscheischler et al. (2018). Ide o tzv. bottom-up approach (doslovne prístup zdola nahor), ktorý pri skúmaní združených udalostí začína analýzu od dopadov udalosti a potom sa sústreďuje na javy a fenomény, ktoré tento dopad spôsobili. Podľa tohto prístupu je dôležitý dopad udalosti, v podobe napríklad závažných strát na životoch, majetku či

prírodných zdrojoch. Tieto straty môžu byť spôsobené aj javmi, ktoré nie sú samé o sebe extrémne, ale ich spoločný výskyt a pôsobenie má vo výsledku značný dopad na spoločnosť.

Pri druhom spôsobe klasifikácie združených hydrometeorologických udalostí je na pôsobenie dvoch, prípadne viacerých javov pozerané cez ich extremitu. Často sa definuje určitá prahová hodnota, vyjadrujúca extremitu a pomocou znázornenia jednotlivých bodov v grafe a podľa tejto prahovej hodnoty sa určí, ktoré body spadajú do kategórie súčasného výskytu extrémov. Nevýhodou tejto klasifikácie je to, že nepostihuje situácie, kedy ani jeden z pôsobiacich javov nie je extrémny. Ďalšou nevýhodou je, že čisto z dát zobrazených v grafe nie vždy môžeme s určitosťou tvrdiť, že oba (alebo viac) z pôsobiacich javov spôsobili závažný dopad, hoci oba boli extrémne z pohľadu prahových hodnôt. Príkladom môže byť aj prípadová štúdia tlakovej níže Kyrill z praktickej časti tejto práce. Škody pri nej spôsobil hlavne silný vietor, hoci aj denný úhrn zrážok bol extrémny. Ako už však bolo spomenuté, principiálne by o združenú udalosť išlo, a to z pohľadu spoločného výskytu dvoch extrémnych javov.

V kapitole 3.4 sú stručne popísané tie druhy združených hydrometeorologických udalostí, ktoré sú v súčasnej literatúre najčastejšie analyzované. Ide o povodeň, ktorá je spôsobená vzduťím morskej hladiny a intenzívnymi zrážkami, ktoré sa odzrkadlia na zvýšenom prítoku vody z riek ústiach do mora. Významnou združenou udalosťou je aj spoločný výskyt meteorologického sucha a vln horúčav. Pri oboch druhoch je dôležitá vhodná synoptická situácia, ktorá následne vedie ku združenému efektu.

Združená povodeň je spojená s tlakovou nížou, ktorá obvykle nie je tak hlboká ako pri veterných extrémoch a postupuje pomalšie. Dôležitý je aj smer vetra pri tejto situácii, orientácia vodného toku a povodia voči tomuto prúdeniu. Z tohto dôvodu sú synoptické situácie vedúce k tomuto druhu združenej hydrometeorologickej udalosti odlišné v rôznych krajinách sveta. O dôležitosti spomenutých faktorov svedčia aj výsledky práce Hendryho et al. (2019). Podľa ich práce je silnejšia závislosť medzi zvýšenou hladinou mora zrážkami silnejšia na západnom pobreží Británie ako na východnom. Tento fakt je zrejme daný tým, že v Európe zväčša prevláda zonálne prúdenie a rieky na západnom pobreží tečú proti tomuto prúdeniu. Extrémne situácie, pri ktorých dochádza k povodniam tohto druhu na Britských ostrovoch, sú práve spojené so silným západným, prípadne juhozápadným prúdením. Na východnom pobreží naopak tečú rieky logicky smerom na východ, a preto je voda v mori pri západnom prúdení hnaná od pobrežia a nevzniká tak združený efekt vzduťia morskej hladiny a veľkého prítoku vody z riek. Navyše ako ukazujú výsledky práce

Hendryho et al. (2019), situácie s intenzívnymi zrážkami na východnom pobreží nie sú spojené so silným vetrom, a naopak silný vietor na východe Británie nebýva v spojení so silnými zrážkami. Rovnako aj pre iné krajiny sveta platí, že združený efekt vzdutia morskej hladiny a zvýšeného prítoku vody z riek je spôsobovaný špecifickými synoptickými situáciami pre danú oblasť, ako bolo spomenuté v kapitole 3.4.1 .

Snahou praktickej časti bolo pomocou jednoduchých prípadových štúdií popísať vybrané druhy združených hydrometeorologických udalostí na základe dát zo stanice Churáňov na Šumave. Prípadové štúdie slúžia skôr na ilustráciu ako na hlbšiu analýzu jednotlivých združených udalostí. Z uvedeného dôvodu preto ani neboli použité sofistikovanejšie štatistické metódy, či prístupy popísané v rešeršnej časti práce. Nevýhodou je určite použitie dát iba z jednej stanice, a to hlavne pri hodnotení sucha, avšak ako už bolo uvedené, išlo len o ilustračné prípadové štúdie.

Napriek možným nedostatkom prípadových štúdií sa potvrdzujú výsledky prác Benistona (2009) alebo Manninga et al. (2019) o zvýšenej frekvencii, či už nadnormálne teplých dní s nulovým úhrnom zrážok alebo spoločného výskytu vln horúčav a meteorologického sucha.

Jedným z nedostatkov je určite aj dĺžka sledovaného obdobia. Zrážkové úhrny počas celého leta môžu byť ovplyvnené jednou výraznou zrážkovou epizódou, ktorá môže celé obdobie dostať do priemerných hodnôt. Tým pádom by sa mohlo stať, že by sme medzi združené udalosti tohto typu nezaradili letá, ktoré sa mohli vyznačovať viacerými kratšími, ale intenzívnymi obdobiami sucha a vysokých teplôt, ktoré mohli byť prerušené intenzívnymi zrážkovými udalosťami. Z uvedeného dôvodu by bolo pri podobných analýzach lepšie popisovať sucho pomocou indexov sucha, ktoré sú citlivé voči takýmto krátkym epizodám zrážok. Dobrým spôsobom na posudzovanie spoločných vplyvov teploty vzduchu a deficitu zrážok môžu byť indexy kombinujúce tieto dve meteorologické premenné, ako napríklad index SDHI, spomenutý v kapitole 3.4.2. Na druhú stranu si však myslím, že boli zachytené tie najextrémnejšie letá, vyznačujúce sa suchom a extrémne vysokými teplotami vzduchu. Konkrétne išlo o letá v rokoch 1992, 2003, 2015 a 2017.

Najextrémnejšie letá, charakteristické suchými a teplými podmienkami, boli zaznamenané po roku 1990, pričom tie úplne najzávažnejšie po roku 2000. Takisto aj počet dní so spoločným výskytom vysokých teplôt a nulového úhrnu zrážok má rastúcu tendenciu. Na základe porovnania odchýlok vo výške geopotenciálnej hladiny 500 hPa pre letá 2017

a 1984 bolo taktiež potvrdené, že sucho sa môže vyskytnúť aj pri takej synoptickej situácii, kedy nedochádza k pridruženému výskytu nadnormálne vysokých teplôt. Obdobie leta bolo vybrané na základe toho, že práve v tomto období môže mať súčasný výskyt tepla a sucha najzávažnejšie dopady v rámci celého roka. Nejde iba o poľnohospodárske plodiny, ktoré sú viac ohrozené, ako keby sa vyskytlo len samotné sucho, ale hlavne o starších ľuďoch a ľuďoch so srdcovocievnyimi chorobami, ktorí sú pri vlnách horúčav najviac ohrození. Ak sa nadnormálne teploty vzduchu a sucho vyskytnú napríklad počas apríla, tak to síce môže mať závažnejší dopad na plodiny a pôdnu vlhkosť, ale podľa môjho názoru však ľudia nie sú až tak ohrození, ako keď sa nadnormálne teploty vzduchu objavia v júli. Okrem toho plodiny dozrievajú práve v lete a z klimatologického pohľadu padá v našej oblasti najviac zrážok v letných mesiacoch. Výrazný deficit zrážok v tomto období je preto podľa mňa o niečo viac závažnejší ako napríklad na jar.

Pri posudzovaní závislosti medzi odchýlkou priemernej teploty vzduchu a úhrnu zrážok počas leta v rámci celého sledovaného obdobia nevyšla závislosť štatisticky významná, zatiaľ čo pre letá s kladnou odchýlkou teploty vzduchu a deficitom zrážok vyšla korelácia silne záporná. Dôvodom prečo v rámci celého sledovaného obdobia vyšla závislosť medzi odchýlkou teploty vzduchu a úhrnu zrážok počas letných mesiacov štatisticky nevýznamná, by mohla byť skutočnosť, že priemerné letné teploty vzduchu na Churáňove vykazujú rastúci trend, zatiaľ čo úhrny zrážok nevykazujú žiadny významný trend. Fakt, že teploty vzduchu vykazujú rastúci trend a zrážky nie, má za následok to, že letá v prvých desaťročiach majú zápornú odchýlku zrážok od normálu 1981–2010, a zároveň sú podpriemerné aj z hľadiska teplôt. Naopak vlhké roky z konca sledovaného obdobia majú kladnú odchýlku priemernje letnej teploty vzduchu. Rastúci trend teploty vzduchu je viditeľný jednak z obr. 23, na ktorom je vidieť jasný lineárny trend, ale aj z tabuľky v prílohe, kde sú odchýlky priemernej letnej teploty vzduchu zoradené chronologicky. Z tejto tabuľky je vidieť, že pred rokom 1981 sa nevyskytol ani jeden rok s kladnou odchýlkou teploty vzduchu od klimatologického normálu 1981–2010. Tento efekt by sa dal odstrániť tak, že by sa odchýlkou teploty vzduchu preložila regresná priamka a každé leto by bolo charakterizované odchýlkou práve od tejto regresnej priamky. Závislosť by sa následne spočítala na základe odchýlok od regresnej priamky a odchýlok úhrnu zrážok.

V prípade hodnotenia súčasného výskytu silného vetra a intenzívnych zrážok sa ukázala nevýhoda použitia klasifikácie založenej na prahových hodnotách opísaná vyššie. Ďalšou možnou nevýhodou zvoleného postupu je to, že do úvahy boli brané iba situácie, keď

sa extrémne silný vietor a extrémny denný úhrn zrážok vyskytli v jeden deň. To mohlo mať za následok vynechanie situácii, kedy by bol silný vietor zaznamenaný napríklad 1. 3. a extrémny úhrn zrážok 2. 3., pričom by išlo o tú istú situáciu (napr. prechod studeného frontu). Celkový počet združených udalostí tohto druhu tak mohol byť aj vyšší. Táto situácia by sa dala vyriešiť uvažovaním údajov aj z okolia bunky s extrémnou hodnotou. V časti venujúcej sa štatistickým prístupom je uvedené, že bežne používané metódy na meranie miery závislosti medzi javmi často nepostačujú na popis závislosti na chvostoch rozdelenia. Na popis celkovej závislosti denného úhrnu zrážok a maximálneho denného nárazu vetra však boli použité pre jednoduchosť klasické korelačné koeficienty, čo by mohlo byť vnímané ako ďalší nedostatok praktickej časti práce.

6 Záver

Hlavným cieľom práce bolo popísať a zhrnúť doterajšie poznatky o združených hydrometeorologických udalostiach. Leitmotívom konceptu združených udalostí je súčasný výskyt viacerých nebezpečných meteorologických javov, čo môže mať v konečnom dôsledku omnoho závažnejšie dopady ako samostatný výskyt týchto javov. Táto kombinácia viacerých javov môže byť buď náhodná, alebo môže ísť o javy vzájomne závislé.

Existuje viacero kombinácií nebezpečných meteorologických javov, ktoré môžu byť považované za združené udalosti. Hlavnými, a zároveň najčastejšie skúmanými, sú vzdušná morská hladina v kombinácii so silnými zrážkami a spoločný výskyt sucha a vln horúčav.

V praktickej časti boli pomocou jednoduchých prípadových štúdií popísané vybrané druhy združených udalostí, ktoré sa objavili na území Česka. Táto časť práce si nedáva za cieľ hlbšiu analýzu spolupôsobenia daných javov a sú v nej použité skôr jednoduchšie postupy. Do budúcnosti by bolo určite vhodné analyzovať vzťah medzi rôznymi meteorologickými premennými aj pomocou chvostovej závislosti a koeficientov chvostovej závislosti, alebo iných štatistických prístupov popísaných v kapitole 3.2.

Na prácu je možné nadviazať v diplomovej práci a pokúsiť sa o hlbšiu analýzu niektorých združených hydrometeorologických udalostí vyskytujúcich sa v Českej republike. V budúcej práci by bolo vhodné uvažovať plošnú extremitu namiesto uvažovania plošne izolovaných bodov. Aktuálnym problémom sa javí sucho a s tým spojené vlny tepla, ako tomu bolo v rokoch 2003, 2015 či 2017. Zaujímavým námetom pre ďalšiu prácu by mohol byť aj menej prebádaný a v súčasnej literatúre možno trochu prehliadaný druh združenej udalosti, a sice spoločný výskyt sucha a mrazov, hlavne počas jarných mesiacov. V posledných rokoch sa podľa môjho názoru pomerne často stáva, že na jar sú ovocné stromy, či iné plodiny vystavené nielen suchu, ale aj mrazom.

Zoznam použitej literatúry

ADEJUWON, J., AZAR, C., BAETHGEN, W., HOPE, C., MOSS, R., LEARY, N., RICHELIS, R., VAN YPERSELE, J.-P. (2001): Overview of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change. In: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, And Vulnerability* [MCCARTHY, J.J., CANZIANI, O.F., LEARY, N.A., DOKKEN, D.J., WHITE, K.S. (eds.)]. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 75–103.

ANDRADE, C., LEITE, S. M., SANTOS, J. A. (2012): Temperature extremes in Europe: Overview of their driving atmospheric patterns. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5, 12, 1671–1691.

BENISTON, M. (2009): Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100. *Geophysical Research Letters*, 7, 36, 1–6.

BEVACQUA, E., MARAUN, D., HOBÆK HAFF, I., WIDMANN, M., VRAC, M. (2017): Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: Analysis of floods in Ravenna (Italy). *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, 21, 2701–2723.

BEVACQUA, E., MARAUN, D., VOUSDOKAS, M. I., VOUKOUVALAS, E., VRAC, M., MENTASCHI, L., WIDMANN, M. (2019): Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. *Science Advances*, 9, 5, 1–7.

BRÁZDIL, R. et al. (2005): *Historické a současné povodně v České republice*. Masarykova univerzita v Brně a Český hydrometeorologický ústav v Praze, Brno – Praha.

BRÁZDIL, R., KIRCHNER, K., et al. (2007): *Vybrané přírodní extrémy a jejich dopady na Moravě a Slezku*. Reprocentrum Blansko, Brno – Praha – Ostrava.

BRÁZDIL, R., TRNKA, M., et al. (2015): *Sucho v českých zemích: minulost, současnost, budoucnost*. Centrum výskumu globální změny AV ČR, V.V.I., Brno.

BUDÍNOVÁ, HOSTÝNEK, J., SULAN, J. (1994): Zpráva o povodni prosinec 1993, Západočeský region – povodí Berounky. Český hydrometeorologický ústav, pobočka Plzeň. http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/PL/povodne/1993_12/hodnoceni.pdf [cit. 25.4. 2020]

Česká meteorologická společnost: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS). <http://slovník.cmes.cz> [cit. 1.3. 2020]

ČHMÚ HPPS: Srážkoměrná stanice Churáňov. [cit. 1.5. 2020]

http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_srzstationodyn.php?day_offset=0&seq=307416&x=13

Čt 24: Deset let po orkánu Kyrill: Lesy se vzpamatovávají, silnému větru by ale podlehly znovu. <https://ct24.ceskatelevize.cz/domaci/2017945-deset-let-po-orkanu-kyrill-lesy-se-vzpamatovavaji-silnemu-vetru-ale-podlehly-znovu> [cit. 22.4. 2020]

DELLA-MARTA, P. M., LUTERBACHER, J., VON WEISSENFLUH, H., XOPLAKI, E., BRUNET, M., WANNER, H. (2007): Summer-heat-waves-over-western-Europe-1880-2003-their-relationship-to-large-scale-forcings-and-predictability. *Climate Dynamics*, 2–3, 29, 251–275.

DVOŘÁKOVÁ, M. (2007): Analýza vybraných historických vichřic - dopady na přírodu a společnost. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta, Geografický ústav, Masarykova univerzita, Brno.

GRUMM, R. H. (2011): The central European and Russian heat event of July-August 2010. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 10, 92, 1285–1296.

HAO, Z., AGHAKOUCHAK, A., PHILLIPS, T. J. (2013): Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes. *Environmental Research Letters*, 3, 8.

HAO, Z., HAO, F., SINGH, V. P., OUYANG, W. (2017): Quantitative risk assessment of the effects of drought on extreme temperature in eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 17, 122, 9050–9059.

HAO, Z., HAO, F., SINGH, V. P., SUN, A. Y., XIA, Y. (2016): Probabilistic prediction of hydrologic drought using a conditional probability approach based on the meta-Gaussian model. *Journal of Hydrology*, 542, 772–780.

- HAO, Z., HAO, F., SINGH, V. P., ZHANG, X. (2018): Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas. *Environmental Research Letters*, 12, 13.
- HAO, Z., LI, W., SINGH, V. P., XIA, Y., ZHANG, X., HAO, F. (2020): Impact of dependence changes on the likelihood of hot extremes under drought conditions in the United States. *Journal of Hydrology*, November 2019, 581, 124410.
- HAO, Z., SINGH, V. P., HAO, F. (2018): Compound extremes in hydroclimatology: A review. *Water (Switzerland)*, 6, 10, 16–21.
- HENDRY, A., HAIGH, I. D., NICHOLLS, R. J., WINTER, H., NEAL, R., WAHL, T., JOLY-LAUGE, A., DARBY, S. E. (2019): Assessing the characteristics and drivers of compound flooding events around the UK coast. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7, 23, 3117–3139.
- HOSTÝNEK, J., NOVÁK, M., ŽÁK, M., (2008): Kyrill a Emma v Česku– meteorologické příčiny, průběh bouří s hodnocením větrných extrémů. *Meteorologické zprávy*, 3, 61, 65–71.
- KAŠPAR, M., MÜLLER, M., CRHOVÁ, L., HOLTANOVÁ, E., POLÁŠEK, J. F., POP, L., VALERIÁNOVÁ, A. (2017): Relationship between Czech windstorms and air temperature. *International Journal of Climatology*, 1, 37, 11–24.
- KEW, S. F., SELTEN, F. M., LENDERINK, G., HAZELEGER, W. (2013): The simultaneous occurrence of surge and discharge extremes for the Rhine delta. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 13, 2017–2029.
- KHANAL, S., LUTZ, A. F., IMMERZEEL, W. W., DE VRIES, H., WANDERS, N., VAN DEN HURK, B. (2019): The impact of meteorological and hydrological memory on compound peak flows in the Rhine river basin. *Atmosphere*, 4, 10, 1–19.
- KIRONO, D. G. C., HENNESSY, K. J., GROSE, M. R. (2017): Increasing risk of months with low rainfall and high temperature in southeast Australia for the past 150 years. *Climate Risk Management*, 16, 10–21.
- KLERK, W. J., WINSEMIUS, H. C., VAN VERSEVELD, W. J., BAKKER, A. M. R., DIERMANSE, F. L. M. (2015): The co-occurrence of storm surges and extreme discharges within the Rhine-Meuse Delta. *Environmental Research Letters*, 3, 10.

- KOLLÁRIKOVÁ, P., SZOLGAY, J., PECHO, J. (2013): Dlhodobé zmeny vybraných charakteristík vln horúčav na Slovensku. *Meteorologický časopis*, 2, 16, 63–69.
- KULČÁR, L., PRIBULLOVÁ, A. (2011): *Základy meteorológie a klimatológie*. Slovenská ústredná hviezdáreň, Hurbanovo.
- KYSELÝ, J., KALVOVA, J., KVĚTOŇ, V. (2000): Heat waves in the south Moravian region during the period 1961-1995. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 1, 44, 57–72.
- LEONARD, M., WESTRA, S., PHATAK, A., LAMBERT, M., VAN DEN HURK, B., MCINNES, K., RISBEY, J., SCHUSTER, S., JAKOB, D., STAFFORD-SMITH, M. (2014): *treme A compound event framework for understanding eximpacts*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 1, 5, 113–128.
- LETT, P., et al. (1993): Zpráva o povodni v prosinci roku 1993. Český hydrometeorologický ústav, pobočka České Budějovice.
http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/povodnove_zpravy/cb_1993_12.pdf [cit. 25.4. 2020]
- MANNING, C., WIDMANN, M., BEVACQUA, E., VAN LOON, A. F., MARAUN, D., VRAC, M. (2019): Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950–2013). *Environmental Research Letters*, 9, 14, 094006.
- MARTIUS, O., PFAHL, S., CHEVALIER, C. (2016): A global quantification of compound precipitation and wind extremes. *Geophysical Research Letters*, 14, 43, 7709–7717.
- MAZDIYASNI, O., AGHAKOUCHAK, A. (2015): Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 37, 112, 11484–11489.
- Meteorologická stanice Velké Svatoňovice: Cyklona Kyrill 18. a 19.1. 2007.
<https://www.meteosvatonovice.cz/cyklona-kyrill-18-a-19-1-2007/> [cit. 22.4. 2020]
- MIAO, C., SUN, Q., DUAN, Q., WANG, Y. (2016): Joint analysis of changes in temperature and precipitation on the Loess Plateau during the period 1961–2011. *Climate Dynamics*, 9–10, 47, 3221–3234.

- MIRABBASI, R., FAKHERI-FARD, A., DINPASHOH, Y. (2012): Bivariate drought frequency analysis using the copula method. *Theoretical and Applied Climatology*, 1–2, 108, 191–206.
- MOFTAKHARI, H. R., SALVADORI, G., AGHAKOUCHAK, A., SANDERS, B. F., MATTHEW, R. A. (2017): Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 37, 114, 9785–9790.
- MUELLER, B., SENEVIRATNE, S. I. (2012): Hot days induced by precipitation deficits at the global scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 31, 109, 12398–12403.
- MUNZAR, J., ONDRÁČEK, S., AUER, I., DANCEWICZ, A., SZALAI, S. (2011): Jednodenní srážkové úhrny 300 mm a více ve střední Evropě. *Meteorologické zprávy*, 4, 64, 107–112.
- MÜLLER, M., KAŠPAR, M., VALERIÁNOVÁ, A., CRHOVÁ, L., HOLTANOVÁ, E., GVOŽDÍKOVÁ, B. (2015): Novel indices for the comparison of precipitation extremes and floods: An example from the Czech territory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 19, 4641–4652.
- NOAA: Monthly/Seasonal Climate Composites. <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites/printpage.pl> [cit. 10.4. 2020]
- PÁLEŠ, M. (2017): Využitie kopula funkcií pri agregácii rizík. *Slovenská štatistika a demografia*, 1, 27, 13–22.
- PETROLIAGKIS, T. I. (2018): Estimations of statistical dependence as joint return period modulator of compound events-Part 1: Storm surge and wave height. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 18, 1937–1955.
- POLÁŠEK, J. F. (2012): Míry extremity v meteorologii. Bkalárska práca. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha.
- POLÁŠEK, J. F. (2015): Plošná extremita vichřic na území České republiky. Diplomová práca. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha.

- ROBINSON, P. J. (2001): On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 4, 40, 762–775.
- SANDEV, M. (2007): Výjimečný průběh počasí v zimě 2006/2007. *Meteorologické zprávy*, 4, 60, 97–105.
- SANDEV, M. (nedatované): Příčiny, meteorologické charakteristiky a předpovědi tlakových níží Kyrill & Emma.
http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/katastrofy/17zasedani/sandev_ke.pdf [cit. 22.4. 2020]
- SCHUBERT, S. D., STEWART, R. E., WANG, H., BARLOW, M., BERBERY, E. H., CAI, W., HOERLING, M. P., KANIKICHARLA, K. K., KOSTER, R. D., LYON, B., MARIOTTI, A., MECHOSO, C. R., MÜLLER, O. V., RODRIGUEZ-FONSECA, B., SEAGER, R., SENEVIRANTE, S. I., ZHANG, L., ZHOU, T. (2016): Global meteorological drought: A synthesis of current understanding with a focus on sst drivers of precipitation deficits. *Journal of Climate*, 11, 29, 3989–4019.
- SENEVIRATNE, S.I., N. NICHOLLS, D. EASTERLING, C.M. GOODESS, S. KANAE, J. KOSSIN, Y. LUO, J. MARENGO, K. MCINNES, M. RAHIMI, M. REICHSTEIN, A. SORTEBERG, C. VERA, AND X. ZHANG. (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [FIELD, C.B., V. BARROS, T.F. STOCKER, D. QIN, D.J. DOKKEN, K.L. EBI, M.D. MASTRANDREA, K.J. MACH, G.-K. PLATTNER, S.K. ALLEN, M. TIGNOR, AND P.M. MIDGLEY (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 109-230.
- SERINALDI, F. (2015): Dismissing return periods! *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 4, 29, 1179–1189.
- SERINALDI, F. (2016): Can we tell more than we can know? The limits of bivariate drought analyses in the United States. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 6, 30, 1691–1704.
- Slovenský hydrometeorologický ústav (2015): *Klimatický atlas Slovenska, Climate Atlas of Slovakia*. SHMÚ, Bratislava.

- STEPHENSON, D. B. (2008): Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. *Climate Extremes and Society*, 9780521870, 11–23.
- ŠKODA, P., LIOVÁ, S., BLAŠKOVIČOVÁ, L., ŠIMOR, V., PAEŠOVÁ, Z. (2014): Vplyv vybraných vodných nádrží na hydrologický režim tokov. XXXIV. Priehradné dni 2014. http://www.evizig.hu/Nemzetkozi/1_6_Skoda_a_kol.pdf [cit. 10.4. 2020]
- TILLOY, A., MALAMUD, B. D., WINTER, H., JOLY-LAUGEL, A. (2019): A review of quantification methodologies for multi-hazard interrelationships. *Earth-Science Reviews*, May, 196, 102881.
- TOPÇU GÜLÖKSÜZ, Ç. (2016): Comparison of Some Selection Criteria for Selecting Bivariate Archimedean Copulas. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 2, 16, 250–255.
- VALACH, J., VIDO, J., ŠKVARENINA, J. (2016): Výskyt sucha v regióne Horného Požitia v období 1966 – 2013. *Acta Hydrologica Slovaca*, 1, 17, 30–36.
- VALERIÁNOVÁ, A., CRHOVÁ, L., HOLTANOVÁ, E., KAŠPAR, M., MÜLLER, M., PECHO, J. (2017): High temperature extremes in the Czech Republic 1961–2010 and their synoptic variants. *Theoretical and Applied Climatology*, 1–2, 127, 17–29.
- VAN DEN HURK, B., VAN MEIJGAARD, E., DE VALK, P., VAN HEERINGEN, K. J., GOOIJER, J. (2015): Analysis of a compounding surge and precipitation event in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 3, 10.
- Wetter3: Archiv. <http://www1.wetter3.de/Archiv/> [cit. 25.4. 2020]
- WONG, G., VAN LANEN, H. A. J., TORFS, P. J. J. F. (2013): Analyse probabiliste des caractéristiques de la sécheresse hydrologique utilisant la sécheresse météorologique. *Hydrological Sciences Journal*, 2, 58, 253–270.
- WU, W., MCINNES, K., O'GRADY, J., HOEKE, R., LEONARD, M., WESTRA, S. (2018): Mapping Dependence Between Extreme Rainfall and Storm Surge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 4, 123, 2461–2474.
- ZELLOU, B., RAHALI, H. (2019): Assessment of the joint impact of extreme rainfall and storm surge on the risk of flooding in a coastal area. *Journal of Hydrology*, December 2018, 569, 647–665.

ZHENG, F., WESTRA, S., LEONARD, M., SISSON, S. a. (2014): Surge To Estimate Coastal Flooding Risk. *Water Resources Research*, 2050–2071.

ZHENG, F., WESTRA, S., SISSON, S. A. (2013): Quantifying the dependence between extreme rainfall and storm surge in the coastal zone. *Journal of Hydrology*, 505, 172–187.

ZSCHEISCHLER, J., SENEVIRATNE, S. I. (2017): Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Science Advances*, 6, 3, 1–11.

ZSCHEISCHLER, J., WESTRA, S., VAN DEN HURK, B. J. J. M., SENEVIRATNE, S. I., WARD, P. J., PITMAN, A., AGHAKOUCHAK, A., BRESCH, D. N., LEONARD, M., WAHL, T., ZHANG, X. (2018): Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 6, 8, 469–477.

ZUO, J., PULLEN, S., PALMER, J., BENNETTS, H., CHILESHE, N., MA, T. (2015): Impacts of heat waves and corresponding measures: A review. *Journal of Cleaner Production*, 92, 1–12.

ZVÁRA, K., (2013): *Základy statistiky v prostředí R*. Univerzita Karlova v Praze, Praha.

Zoznam obrázkov a tabuliek

Obr. 1 Synoptická situácia nad Európou 19.11. 2004, 12 UTC.....	14
Obr. 2 Synoptická situácia nad Európou dňa 4.8. 2003, 12 UTC počas vlny horúčav v západnej Európe.....	16
Obr. 3 Tri hlavné skupiny metód analyzovania viacnásobných prírodných ohrození a ich ďalšie delenie na jednotlivé podskupiny.....	23
Obr.4 Priemerný počet dní za desaťročie, kedy bola prekročená zvolená prahová hodnota pre spoločný výskyt extrémne vysokých teplôt a extrémne nízkych úhrnov zrážok.....	25
Obr.5 Ukážky rozdelenia vybraných typov kopúl (Gaussova, Frankova, Claytonova a Gumbelova).....	28
Obr. 6 Združená pravdepodobnosť zrážok a pôdnej vlhkosti.....	31
Obr. 7 Schéma jednotlivých kategórií združených hydrometeorologických udalostí.....	35
Obr.8 Základná klasifikácia združených hydrometeorologických udalostí na základe prekročenia určitých prahových hodnôt.....	36
Obr. 9 Rôzne pohľady na združené hydrometeorologické udalosti podľa dvoch druhov klasifikácií	37
Obr. 10 Kombinácie javov, ktoré môžu viesť ku združenej hydrometeorologickej udalosti.....	38
Obr.11 Závislosť medzi extrémnym úhrnom zrážok a vzdušným tlakom v Austrálii.....	39
Obr. 12 Synoptická situácia nad Európou 5. 1.2012 počas povodní v Holandsku.....	40
Obr.13 Synoptická situácia počas združenej povodne v Ravenne.....	41
Obr.14 Podmienená pravdepodobnosť výskytu teplých dní, nasledujúcich po období šiestich mesiacov s indexom SPI menším ako -1,3 (a) respektíve vyšším ako 1,3 (b).....	43
Obr.15 Zmena v dvojrozmerných dobách opakovania pre spoločný výskyt extrémne dlhých a zároveň nadnormálne teplých období.....	44
Obr. 16 Trendy priemerných úhrnov zrážok v mm za desaťročie a trendy priemerných teplôt v stupňoch Celzia za desaťročie, pre teplú polovicu roka v období rokov 1951–2016.....	45
Obr. 17 Ukážka indexu SDHI.....	47
Obr. 18 Súčasná pravdepodobnosť výskytu združenej povodne a predpokladaná pravdepodobnosť na konci tohto storočia.....	48

Obr. 19 Poloha stanice Churáňov.....	51
Obr. 20 Odchýlky priemernej teploty vzduchu a úhrnu zrážok počas leta od dlhodobého priemeru 1981–2010 na stanici Churáňov pre obdobie 1961–2017.....	52
Obr. 21 Letá s kladnou odchýlkou priemernej teploty vzduchu a zápornou odchýlkou úhrnu zrážok od dlhodobého priemeru na stanici Churáňov v období 1961–2017.....	54
Obr. 22 Odchýlky priemernej teploty vzduchu a úhrnu zrážok počas leta od dlhodobého priemeru 1981–2010 na stanici Churáňov pre obdobie 1961–2017.....	55
Obr. 23 Priemerná teplota vzduchu počas leta na stanici Churáňov v rokoch 1961–2017 a jej lineárny trend.....	56
Obr. 24 Úhrny zrážok počas leta na stanici Churáňov v rokoch 1961–2017 a ich lineárny trend.....	56
Obr. 25 Počet dní s priemernou dennou teplotou vzduchu nad 75. percentilom a nulovým úhrnom zrážok počas leta a ich lineárny trend na stanici Churáňov v období 1961–2017.....	57
Obr. 26 Počet dní s priemernou dennou teplotou vzduchu nad 90. percentilom a nulovým úhrnom zrážok počas leta na a ich lineárny trend na stanici Churáňov v období 1961–2017.....	58
Obr. 27 Percentuálny podiel počtu dní s priemernou teplotou vzduchu nad 90. percentilom a nulovým úhrnom zrážok v rámci nadnormálne teplých dní a ich lineárny trend na stanici Churáňov v období 1961–2017.....	58
Obr. 28 Počet dní s nulovým úhrnom zrážok počas leta a ich lineárny trend na stanici Churáňov pre obdobie 1961–2017.....	59
Obr. 29 Geopotenciálna výška [gpdam] izobarickej hladiny 850 hPa, a teplota vzduchu [°C] v tejto hladine, 1. 8. 2017, 12 UTC.....	61
Obr. 30 Odchýlka výšky geopotenciálnej hladiny 500 hPa nad Európou počas leta 2017 (a) a leta 1984 (b).....	63
Obr. 31 Maximálny denný náraz vetra a denný úhrn zrážok v chladnom polroku na stanici Churáňov v období 1961–2015.....	65
Obr. 32 Advekcia teploty vzduchu na hladine 850 hPa 17. 1. 2007 o 12 UTC.....	67
Obr. 33 Synoptická situácia pred prechodom studeného frontu 18. januára 2007 o 18 UTC.....	67
Obr. 34 Synoptická situácia pri povodniach v decembri 1993.....	69
Tab. 1 Hodnotenie období sucha podľa Štandardizovaného zrážkového indexu.....	18
Tab. 2 Ukážky vzorcov vybraných kopúl.....	27

Tab. 3 Hodnoty korelačných koeficientov a ich p–hodnoty pre odchýlky úhrnov zrážok a odchýlky priemernej teploty vzduchu na stanici Churáňov v období 1961–2017.....	53
Tab. 4 Prehľad jednotlivých teplotných a zrážkových charakteristík leta 2017.....	60
Tab. 5 Hodnoty korelačných koeficientov a p-hodnoty pre denný úhrn zrážok a maximálny denný náraz vetra v rámci jednotlivých období na stanici Churáňov v období 1961–2015.....	64
Tab. 6 Priemerný maximálny denný náraz vetra percentuálny podiel dní bez zrážok pre jednotlivé ročné obdobia na stanici Churáňov pre obdobie 1961–2015.....	65

Prílohy

Roky zoradené podľa odchýlky teploty vzduchu a úhrnu zrážok počas leta na stanici

Churáňov za obdobie 1961–2017

Rok	Odchýlka teploty vzduchu [°C]
2003	3,2
2015	2,6
2017	1,9
1992	1,7
1994	1,6
2002	1,2
1983	1,1
2013	1,0
2010	0,8
2006	0,8
2012	0,7
2016	0,6
2007	0,4
2008	0,4
2009	0,2
1982	0,2
2000	0,1
2014	0,1
1995	0,0
2011	0,0
1964	0,0
1999	0,0
1998	0,0
2001	-0,1
1997	-0,1
1976	-0,2
1973	-0,2
2004	-0,2
1971	-0,2
1991	-0,3
1963	-0,3
2005	-0,4
1967	-0,4
1990	-0,4
1970	-0,4
1975	-0,5
1988	-0,6
1972	-0,8
1977	-0,9
1996	-0,9
1986	-1,0
1981	-1,0
1989	-1,0
1969	-1,1
1993	-1,1
1961	-1,1
1979	-1,2
1968	-1,3
1966	-1,4
1985	-1,4
1987	-1,5
1974	-1,6
1962	-1,7
1984	-1,8
1965	-1,8
1980	-2,0
1978	-2,4

Rok	Odchýlka úhrnu zrážok [mm]
2015	-212,2
1992	-161,2
1962	-145,9
1984	-129,7
2003	-127,1
2017	-107,6
1994	-100,3
1972	-97,2
2007	-79,0
2000	-76,7
1990	-68,9
1983	-68,4
2004	-66,5
2011	-62,2
1976	-60,4
1987	-43,4
1967	-43,2
1986	-39,7
1971	-39,3
1998	-38,6
2008	-36,6
1970	-32,7
2001	-29,1
1961	-25,8
1989	-23,8
1973	-17,8
1997	-13,6
1999	-8,9
1988	-4,9
2016	6,3
1978	7,4
1993	7,9
1965	19,4
1981	26,2
1985	34,0
1982	36,2
1963	40,8
1979	42,5
2013	58,4
1991	58,8
1969	59,2
1996	64,4
1964	64,5
1968	72,8
1974	82,2
2014	98,1
1995	98,4
2006	99,4
1980	116,1
2010	122,7
1975	124,8
1966	137,5
1977	157,5
2005	157,7
2012	172,1
2009	176,0
2002	234,4

Odchýlky priemernej teploty a úhrnu zrážok počas leta na stanici Churáňov za obdobie 1961–2017 zoradené chronologicky.

Rok	Odchýlka teploty vzduchu [°C]
1961	-1,1
1962	-1,7
1963	-0,3
1964	0,0
1965	-1,8
1966	-1,4
1967	-0,4
1968	-1,3
1969	-1,1
1970	-0,4
1971	-0,2
1972	-0,8
1973	-0,2
1974	-1,6
1975	-0,5
1976	-0,2
1977	-0,9
1978	-2,4
1979	-1,2
1980	-2,0
1981	-1,0
1982	0,2
1983	1,1
1984	-1,8
1985	-1,4
1986	-1,0
1987	-1,5
1988	-0,6
1989	-1,0
1990	-0,4
1991	-0,3
1992	1,7
1993	-1,1
1994	1,6
1995	0,0
1996	-0,9
1997	-0,1
1998	0,0
1999	0,0
2000	0,1
2001	-0,1
2002	1,2
2003	3,2
2004	-0,2
2005	-0,4
2006	0,8
2007	0,4
2008	0,4
2009	0,2
2010	0,8
2011	0,0
2012	0,7
2013	1,0
2014	0,1
2015	2,6
2016	0,6
2017	1,9

Rok	Odchýlka úhrnu zrážok [mm]
1961	-25,8
1962	-145,9
1963	40,8
1964	64,5
1965	19,4
1966	137,5
1967	-43,2
1968	72,8
1969	59,2
1970	-32,7
1971	-39,3
1972	-97,2
1973	-17,8
1974	82,2
1975	124,8
1976	-60,4
1977	157,5
1978	7,4
1979	42,5
1980	116,1
1981	26,2
1982	36,2
1983	-68,4
1984	-129,7
1985	34,0
1986	-39,7
1987	-43,4
1988	-4,9
1989	-23,8
1990	-68,9
1991	58,8
1992	-161,2
1993	7,9
1994	-100,3
1995	98,4
1996	64,4
1997	-13,6
1998	-38,6
1999	-8,9
2000	-76,7
2001	-29,1
2002	234,4
2003	-127,1
2004	-66,5
2005	157,7
2006	99,4
2007	-79,0
2008	-36,6
2009	176,0
2010	122,7
2011	-62,2
2012	172,1
2013	58,4
2014	98,1
2015	-212,2
2016	6,3
2017	-107,6