

**VÝZKUMNÝ ÚSTAV
VODOHOSPODÁŘSKÝ
T.G. MASARYKA**

veřejná výzkumná instituce

Číslo úkolu: 3702.04

**ČINNOSTI K PODPOŘE VÝKONU STÁTNÍ SPRÁVY V PROBLEMATICE SUCHO V
ROCE 2016 – ÚKOL 3702**

**ANALÝZA NEDOSTATKOVÝCH OBJEMŮ V ÚTVARECH POVRCHOVÝCH A
PODZEMNÍCH VOD**

Zadavatel: Ministerstvo životního prostředí

Praha, prosinec 2016

Číslo výtisku:

počet stran, příloh

Název a sídlo organizace:

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

Ředitel:

Mgr. Mark Rieder

Zadavatel:

Ministerstvo životního prostředí
Vršovická 65, 100 10 Praha 10

Zástupce zadavatele:

Zahájení a ukončení úkolu:

Místo uložení zprávy:

Náměstek ředitele pro výzkumnou a odbornou činnost:

Ing. Petr Bouška, Ph.D.

Vedoucí odboru:

Ing. Anna Hrabánková

Hlavní řešitel:

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Spoluřešitelé:

Ing. Vojtěch Moravec, Ing. Filip Strnad, Ing. Adam Vizina, Ph.D.

Obsah

Obsah.....	3
1 Souhrn	3
1.1 Anotace	3
1.2 Hlavní výsledky DÚ	4
1.3 Výsledky z DÚ do návrhu koncepce.....	4
1.4 Nejistoty řešení.....	5
1.5 Seznam výchozích projektů	5
2 Úvod	5
3 Charakteristiky sucha	6
3.1 Velikost nedostatkových objemů	6
3.2 Doba trvání deficitní události	7
3.3 Intenzita sucha	10
3.4 Poměr deficitního objemu k průměrnému měsíčnímu odtoku.....	10
3.5 Relativní intenzita sucha.....	11
3.6 Validace deficitních objemů	13
4 Regionalizace ČR z hlediska výskytu sucha.....	18
5 Regionální extrémální model pro nedostatkové objemy	22
5.1 Popis modelu.....	22
5.2 Výsledky pro celkový odtok.....	23
5.3 Výsledky pro základní odtok.....	26
6 Implementace Mapy rizika vysychání drobných vodních toků v ČR	30
7 Definování neznalostí a nejistot stávající úrovně řešení	31
LITERATURA.....	32

1 Souhrn

1.1 ANOTACE

Pomocí modelu Bilan nakalibrovaného v rámci DÚ 3 byly simulovány časové řady celkového a základního odtoku pro sadu 133 (mezi-)povodí pro období 1901-2015. Na základě srážek, výparu, celkového a základního odtoku a hydrogeologických rajonů byla pomocí shlukové analýzy provedena regionalizace ČR z hlediska chování v době sucha. Tato regionalizace byla následně

expertně revidována. Byly vyčísleny nedostatkové objemy a byl vytvořen statistický model pro odhad N-letých nedostatkových objemů.

1.2 HLAVNÍ VÝSLEDKY DÚ

Regionalizace ČR z hlediska ohrožení suchem – povrchový odtok (mapa)

Popis: V rámci sady 133 (mezi-)povodí byly na základě shlukové analýzy s využitím srážek, potenciální evapotranspirace, základního odtoku a expertních znalostí definovány 3 oblasti. Homogenita těchto oblastí byla prověřena pomocí statistického modelu.

Regionalizace ČR z hlediska ohrožení suchem – základní odtok (mapa)

Popis: V rámci sady 133 (mezi-)povodí byly na základě shlukové analýzy s využitím základního odtoku, baseflow indexu, hydrogeologických rajónů a expertních znalostí definovány 4 oblasti. Homogenita těchto oblastí byla prověřena pomocí statistického modelu.

N-leté nedostatkové objemy – celkový odtok (mapa)

N-leté nedostatkové objemy – základní odtok (mapa)

Popis: Pro jednotlivé homogenní oblasti byl vytvořen statistický model uvažující, že rozdělení nedostatkových objemů je až na škálovací faktor stejné pro celou oblast. Model umožňuje robustní odhad N-letých nedostatkových objemů včetně nejistoty.

Riziko vysychání drobných vodních toků v rámci vodních útvarů (mapa)

Popis: Mapa vznikla jako průnik mapy Riziko vysychání malých vodních toků (Zahrádková et al., 2015) a vrstvy vodních útvarů.

Místo uložení: Oddělení hydrologie VÚV

Způsob využití:

Podklad pro návrh opatření na zmírnění dopadů sucha.

1.3 VÝSLEDKY Z DÚ DO NÁVRHU KONCEPCE

- Regionalizace ČR z hlediska ohrožení suchem – 2.1 c)

- Mapy N-letých nedostatkových objemů – 2.2 a) ii

1.4 NEJISTOTY ŘEŠENÍ

- neexistence vybraných prostorově distribuovaných hydrologických podkladů v potřebné podrobnosti (minimální a maximální odtoky, charakteristiky variability odtoku, vybrané kvantily rozdělení odtoku, charakteristiky základního odtoku apod.) pro kalibraci hydrologického modelu Bilan na mezipovodí
- neexistence metodického postupu umožňujícího disagregaci charakteristik nedostatkových objemů do subpovodí
- možná přítomnost trendů v charakteristikách nedostatkových objemů a s tím související nutnost jejich zohlednění ve statistickém modelu
- absence vyhodnocení nedostatkových objemů pro scénáře změny klimatu

1.5 SEZNAM VÝCHOZÍCH PROJEKTŮ

[GA16-16549S](#)

Název projektu: Půdní a hydrologické sucho v měnícím se klimatu,
Poskytovatel: GA0 - Grantová agentura České republiky,
Období řešení projektu: 2016 – 2018

[TA02020320](#)

Název projektu: Podpora dlouhodobého plánování a návrhu adaptačních opatření v oblasti vodního hospodářství v kontextu změn klimatu,
Poskytovatel: TA0 - Technologická agentura České republiky,
Období řešení projektu: 2012 – 2014

[TA04020501](#)

Název projektu: Možnosti kompenzace negativních dopadů klimatické změny na zásobování vodou a ekosystémy využitím lokalit vhodných pro akumulaci povrchových vod,
Poskytovatel: TA0 - Technologická agentura České republiky,
Období řešení projektu: 2014 - 2017

2 Úvod

Cílem tohoto dílčího úkolu je regionalizace České republiky z hlediska rizika výskytu sucha v jednotlivých povodích a to jak v případě nízkého celkového odtoku, tak v případě nízkých základních odtoků. Regionalizace ČR byla provedena v měřítku 133 mezipovodí a uzavřených povodí, pro která byl v rámci úkolu "Hydrologická bilance množství vody v celostátní úrovni podrobnosti v době sucha"

nakalibrován a validován model Bilan. Primárním indexem popisujícím sucho v rámci tohoto dílčího úkolu je nedostatkový objem vzhledem k prahu odpovídajícímu 20% kvantilu měsíčních průtoků. Pro naše účely neomezujeme řešení pouze na období 1980-2015, ale používáme i rekonstruované časové řady od roku 1901.

Kapitola 3 popisuje použitá data, základní charakteristiky sucha i validaci simulovaných charakteristik sucha vzhledem k charakteristikám odvozených z pozorovaných dat, tam kde je to možné.

V kapitole 4 je prezentována regionalizace ČR z hlediska charakteristik sucha dle celkového a základního odtoku. Kapitola 5 představuje statistický model použitý pro odhad N-letých nedostatkových objemů i výsledné odhady. V kapitole 6 popisuje úpravu mapy rizika vysychání drobných vodních toků pro vodní útvary. Nejistoty řešení jsou definovány v rámci kapitoly 7.

3 Charakteristiky sucha

Pro účely tohoto dílčího úkolu je sucho definováno na základě nedostatkových objemů odvozených ze simulované hydrologické bilance pro sadu mezipovodí pro období 1901-2015. Sady parametrů pro mezipovodí byly odvozeny v rámci DÚ 3 (Hydrologická bilance množství vody v celostátní úrovni podrobnosti v době sucha). Pro účely tohoto dílčího úkolu byly odvozeny časové řady měsíčních srážek a teploty na plochy mezipovodí. Data jsou založena na kombinaci HadCRU-TS3.21 (Harris et al., 2014), staničních dat a gridovaného datasetu srážek a teploty (Štěpánek et al., 2011). Gridovaná data byla převedena na plochu povodí pomocí váženého průměru (dle velikosti průniku plochy povodí a příslušných grid boxů), následně byla u teploty provedena korekce na nadmořskou výšku na základě porovnání nadmořské výšky povodí a průměrné nadmořské výšky grid boxů a korekce srážek na základě vrstvy dlouhodobých průměrných srážek v období 1981-2010. Pomocí těchto časových řad a nakalibrovaných parametrů byla simulována hydrologická bilance pro celé období 1901-2015. Další analýzy využívají simulovaný celkový odtok a simulovaný základní odtok. Nedostatkové objemy jsou definovány jako suma měsíčních (celkových/základních) odtoků souvisle pod 20% kvantilem rozdělení (celkového/základního) odtoku. Mezi základní charakteristiky nedostatkových objemů lze zařadit:

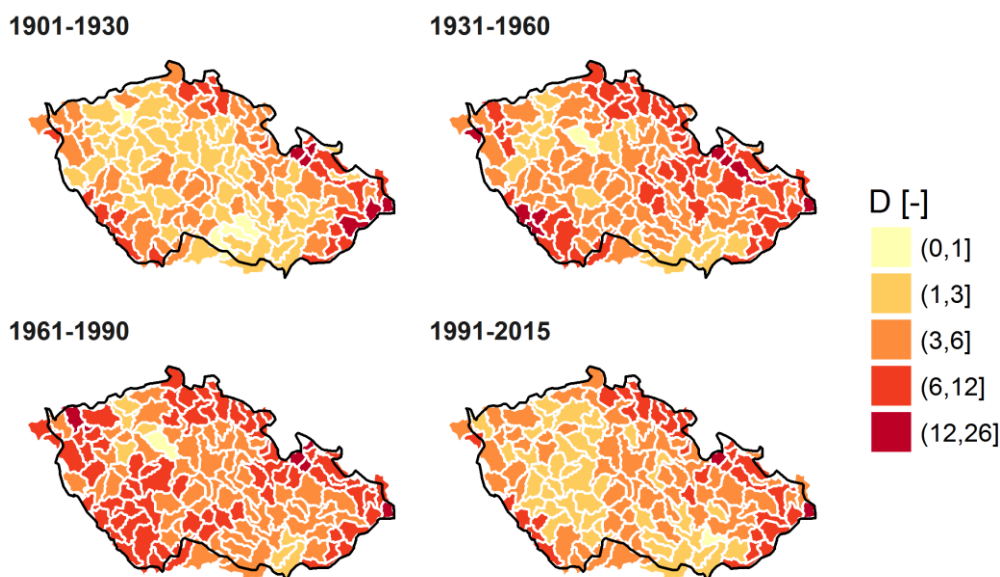
- a) velikost nedostatkového objemu, D [mm nebo m^3]
- b) doba trvání deficitní události, L [měsíce]
- c) intenzita sucha, $I = D / L$ [mm/měsíc nebo $m^3/měsíc$]
- d) poměr deficitního objemu k průměrnému měsíčnímu odtoku (celkovému nebo základnímu), rD [-]
- e) relativní intenzita, $rl = rD / L$ [-]

Dle průměrných hodnot jednotlivých charakteristik sucha v Tabulka 1 a Tabulka 2 je zřejmé, že jsou na sobě jednotlivé charakteristiky lineárně závislé. Také lze pozorovat postupný růst jednotlivých charakteristik v průběhu první (1901-1930) až třetí periody (1961-1990), v poslední periodě (1991-2015) lze pozorovat jejich pokles.

3.1 VELIKOST NEDOSTATKOVÝCH OBJEMŮ

Dle celkového odtoku byly největší nedostatkové průtoky modelovány v období **1901-1930** v povodí Odry (v průměru 9.24 mm/m), Moravy (v průměru 6.24 mm/m) a Horní Vltavy (v průměru 5.05 mm). Zmíněné hodnoty lze pozorovat na Obrázek 1. Výsledky odpovídají výpočtu velikosti nedostatkových průtoků pomocí základního odtoku, viz Obrázek 2. V období **1931-1960** jsou nedostatkové objemy

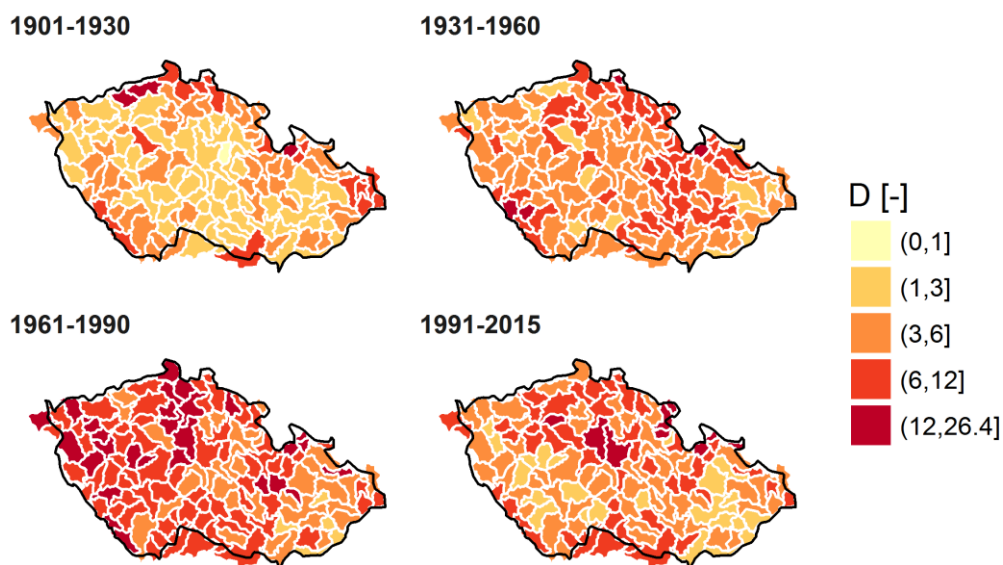
stejně geograficky rozloženy, jen dochází k jejich mírnému navýšení. Zároveň lze pozorovat podstatné navýšení navíc v povodí Horního Labe (v průměru 6.65 mm/m). Období **1961-1990** je charakterizováno nárůstem velikosti nedostatkových průtoků, zejména však v povodí Ohře a Dolního Labe (v průměru 7.00 mm/m) a Berounky (v průměru 6.04 mm/m) dle výpočtu pomocí základního odtoku. V období **1991-2015** lze pozorovat pokles nedostatkových objemů, zejména ve dvou výše zmíněných povodích. Vysoké nedostatkové průtoky jsou nicméně pozorovatelné v povodí Odry (v průměru 8.12 mm/m) a Horního Labe (v průměru 5.51 mm/m).



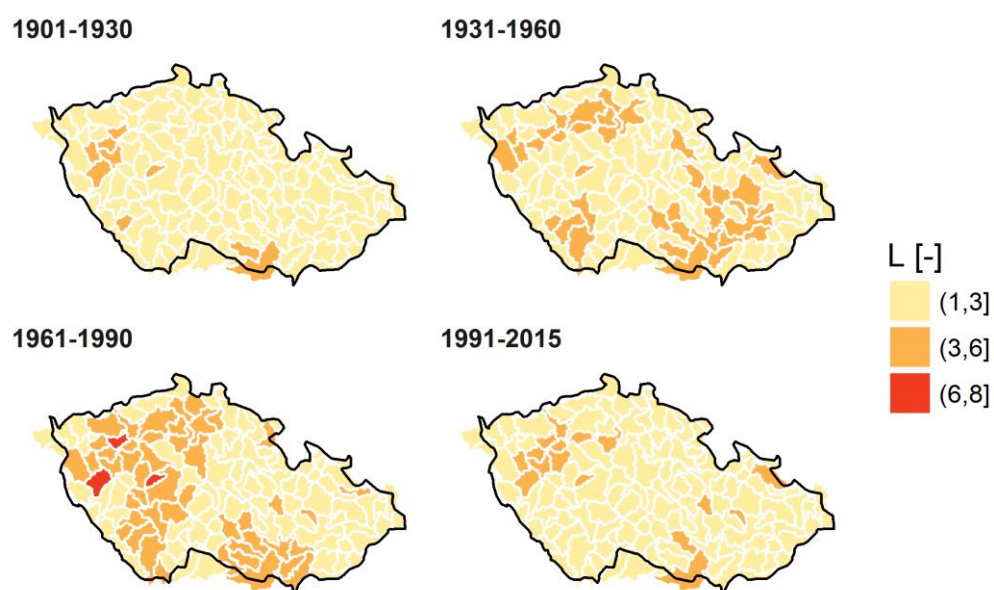
Obrázek 1 - Velikost nedostatkových objemů vypočtena pomocí modelovaného celkového odtoku

3.2 DOBA TRVÁNÍ DEFICITNÍ UDÁLOSTI

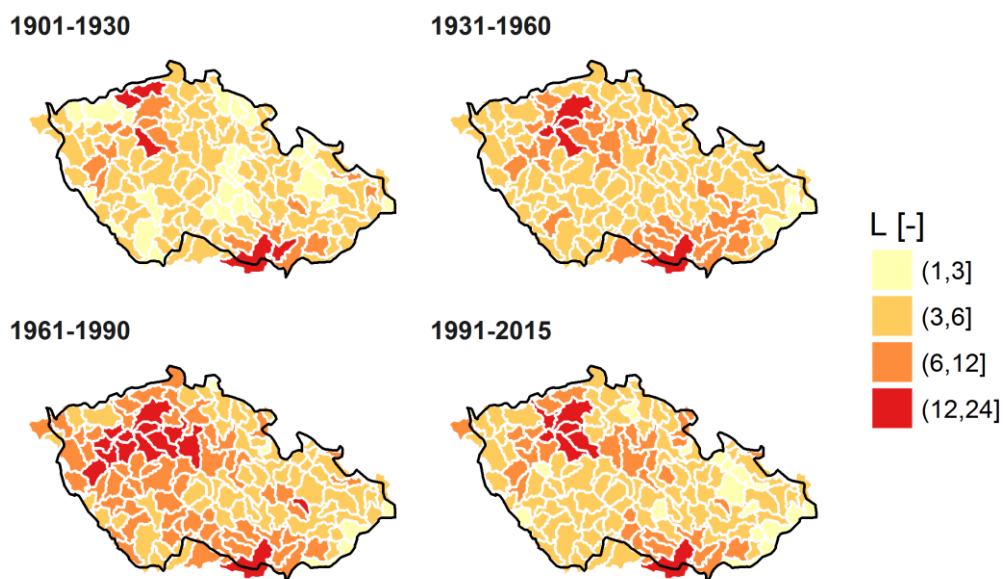
Prostorové rozložení doby trvání deficitní události vypočtené dle základního odtoku (viz Obrázek 4) koreluje s rozložením doby trvání vypočtené dle celkového odtoku (viz Obrázek 3). Nicméně doby trvání deficitních událostí dle výpočtu pomocí základního odtoku jsou zhruba třikrát delší. Nejkratší období sucha se vyskytla v období **1901-1930** (2.34 měsíce), s nejdelší periodou v povodí Berounky (v průměru 2.59 měsíce) a povodí Moravy (v průměru 2.38 měsíce). V období **1931-1960** lze pozorovat navýšení v celé řadě povodí s nejvyšším nárůstem v povodí Dyje (v průměru 3.23 měsíce). Období **1961-1990** vykazovalo v průměru téměř tříměsíční deficitní události. Nejdelší doby trvání deficitní události byly zaznamenány zejména v povodí Berounky (v průměru 3.8 měsíce), Dyje (v průměru 3.42 měsíce), Ohře a Dolního Labe (v průměru 3.3 měsíce). V období **1991-2015** lze pozorovat snížení délky trvání deficitní události a to v průměru na 2.3 měsíce. Nejdelší dobu trvání v tomto období lze pozorovat v povodí Berounky (v průměru 2.83 měsíce).



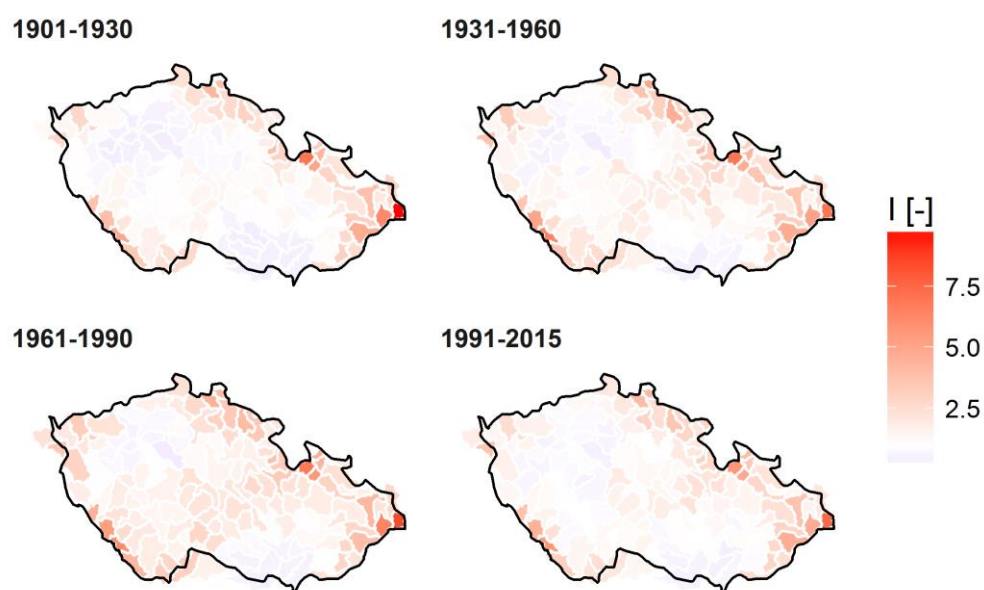
Obrázek 2 - Velikost nedostatkových objemů vypočtena pomocí modelovaného základního odtoku



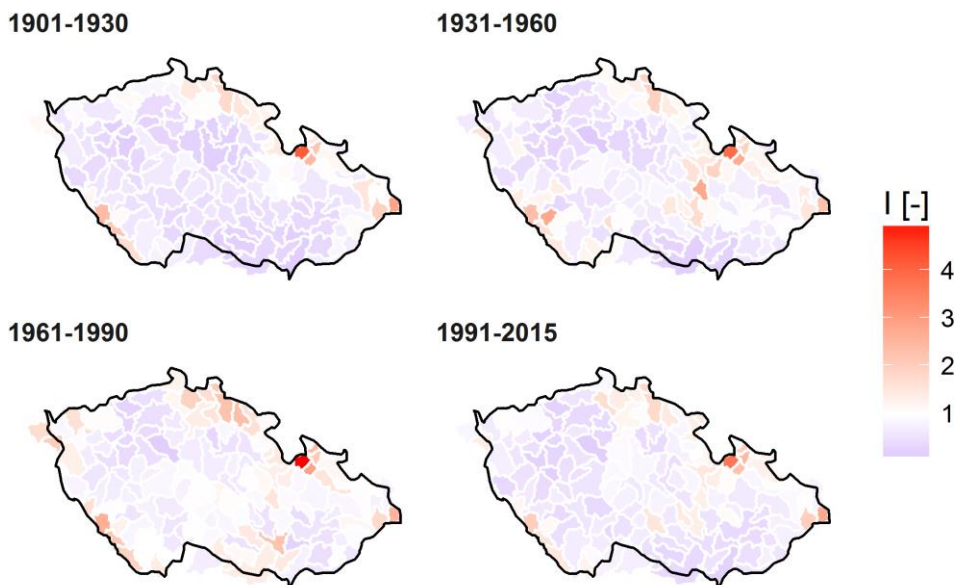
Obrázek 3 - Doba trvání deficitní události dle modelovaného celkového odtoku



Obrázek 4 - Doba trvání deficitní události dle modelovaného základního odtoku



Obrázek 5 - Intenzita sucha dle modelovaného celkového odtoku



Obrázek 6 - Intenzita sucha dle modelovaného základního odtoku

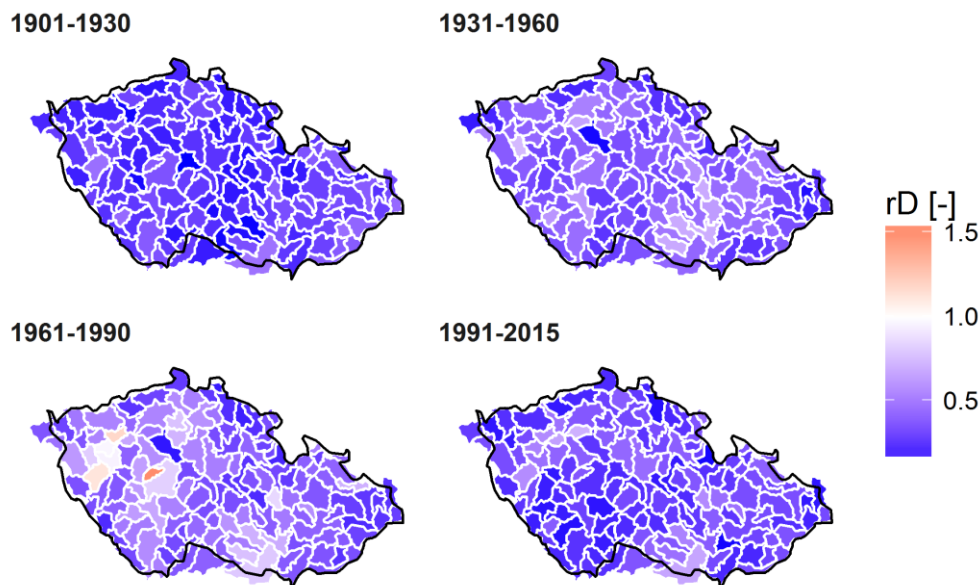
3.3 INTENZITA SUCHA

Nejmenších intenzit bylo modelováno v období **1901-1930** zejména v povodích Dyje (v průměru 0.42 mm/měsíc) a Berounky (v průměru 0.49 mm/měsíc) dle základního odtoku. Naopak největší intenzity sucha byly modelovány v období **1961-1990**, přičemž největší intenzity dle základního odtoku byly sledovány v povodí Odry (v průměru 1.39 mm/měsíc), Moravy (v průměru 1.17 mm/měsíc), Horní Labe (v průměru 1.15 mm/měsíc) a Horní Vltavy (v průměru 1.07 mm/měsíc). Období **1931-1960** a **1991-2015** vykazovala obdobné hodnoty intenzit, přičemž prokazatelně nejvyšší intenzity dle základního odtoku lze pozorovat v povodí Odry (v průměru 1.34 mm/měsíc). Zmiňované hodnoty lze pozorovat na Obrázek 5 pro celkový odtok a na Obrázek 6 pro základní odtok.

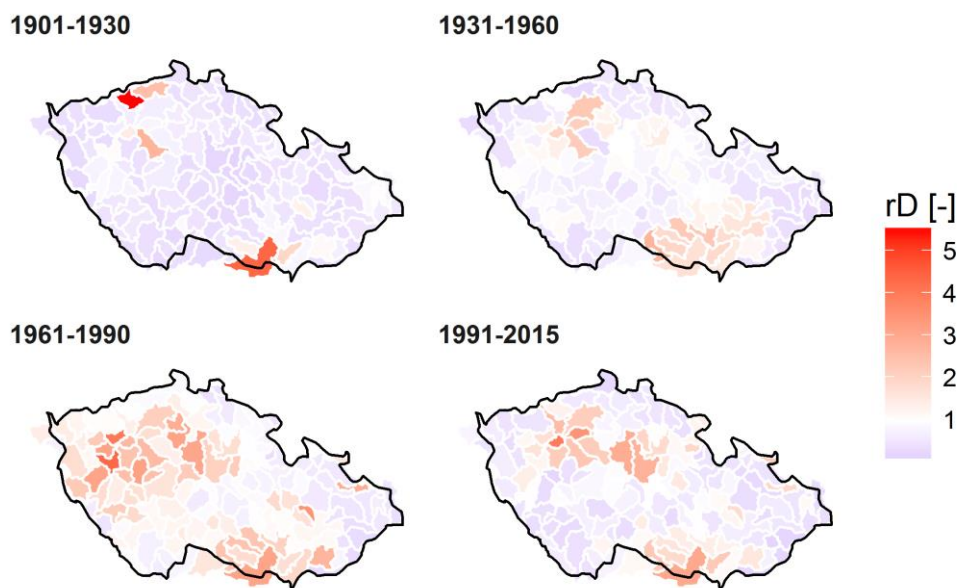
3.4 POMĚR DEFICITNÍHO OBJEMU K PRŮMĚRNÉMU MĚSÍČNÍMU ODTOKU

Vyšší poměr deficitního objemu k průměrnému měsíčnímu odtoku byl modelován dle celkového odtoku zejména v období **1961-1990** a to zejména pro dílčí povodí v povodí Berounky (v průměru 0.6 za celé povodí) a Dyje (v průměru 0.51 za celé povodí). Naopak ostatní období vykazovala téměř celoplošně velmi nízký poměr deficitního objemu k měsíčnímu celkovému objemu, zejména povodí Horní Labe (v průměru 0.2 za celé povodí) a Ohře a Dolního Labe (v průměru 0.21 za celé povodí) v období **1901-1930**, povodí Odry (v průměru 0.29 za celé povodí) a Horního Labe (v průměru 0.33 za celé povodí) v období **1931-1960** a povodí horní Vltavy (v průměru 0.2 za celé povodí) v období **1991-2015**. Zmiňované hodnoty lze pozorovat na Obrázek 7 pro celkový odtok.

Poměr deficitního objemu k průměrnému měsíčnímu základnímu odtoku dosahoval větších hodnot než poměr k celkovému odtoku. Nejvyšších hodnot dosahovala dílčí povodí v povodí Berounky (v průměru 2.33 za celé povodí), v povodí Dyje (v průměru 1.62 za celé povodí) a Ohře a Dolního Labe (v průměru 1.51 za celé povodí) v období **1961-1990**. V období **1931-1960** a **1991-2015** vykazovala povodí Dyje (v průměru 1.35 za celé povodí), Berounky (v průměru 1.13 za celé povodí) a Dolní Vltavy (v průměru 0.97 za celé povodí) poměrně vysoké hodnoty deficitního poměru. Zmiňované hodnoty lze pozorovat na Obrázek 8 pro základní odtok.



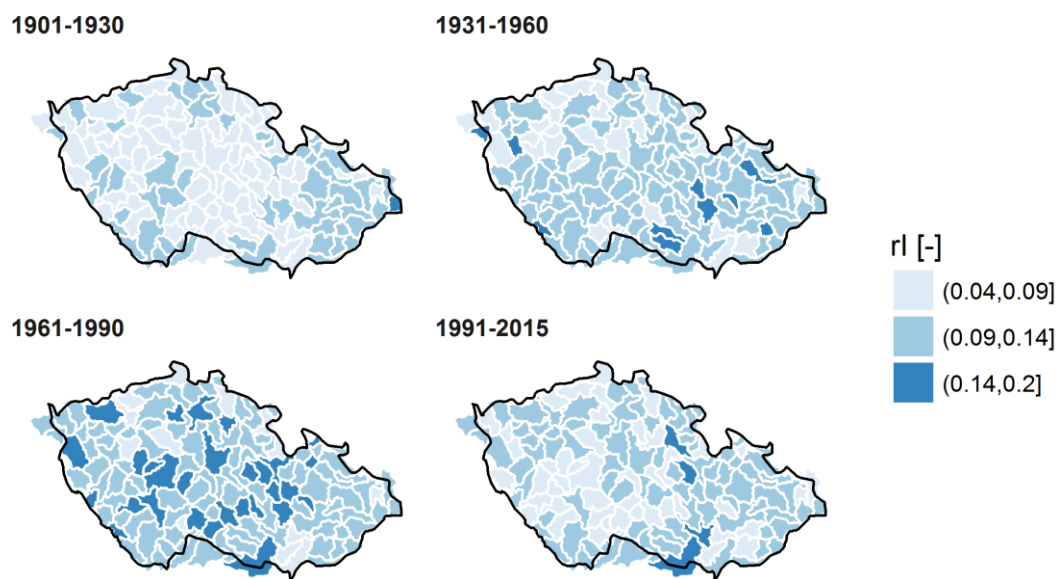
Obrázek 7 - Poměr deficitního objemu k průměrnému měsíčnímu celkovému odtoku



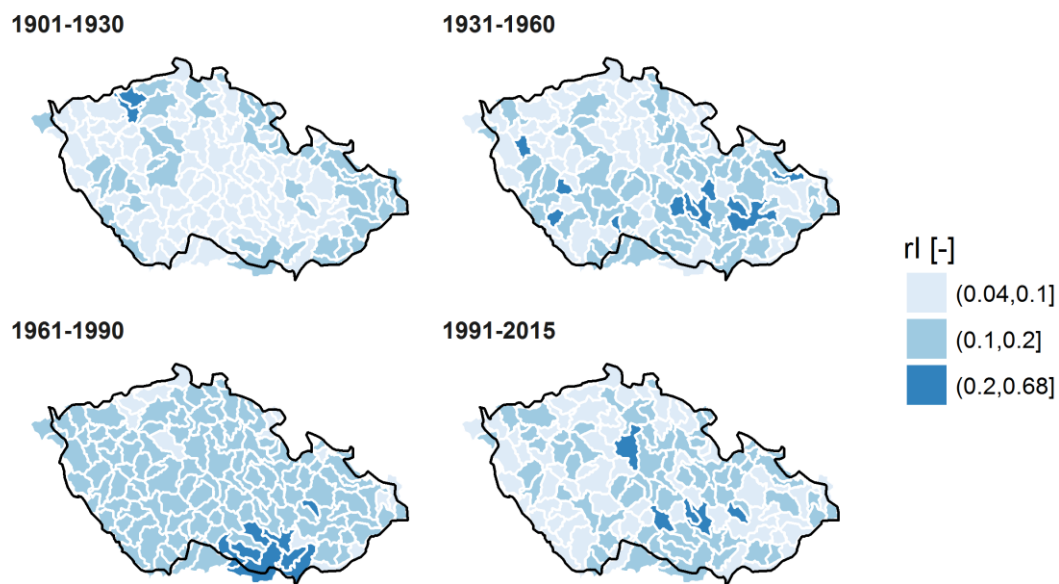
Obrázek 8 - Poměr deficitního objemu k průměrnému měsíčnímu základnímu odtoku

3.5 RELATIVNÍ INTENZITA SUCHA

Intenzita výskytu deficitního objemu byla prokazatelně nejvyšší v období **1961-1990** a to jak dle celkového odtoku (viz Obrázek 9), tak dle základního odtoku, s nejvyššími hodnotami této charakteristiky na povodí Dyje (v průměru 0.26, viz Obrázek 10). Perioda **1901-1930** prokazovala v průměru nejmenší hodnoty intenzit výskytu deficitního objemu (v průměru 0.09). Období **1931-1960** a **1991-2015** vykazovala rovnoměrné rozložení intenzit na ploše ČR s poměrně znatelnou inklinací k vyšším hodnotám v povodí Dyje (v průměru 0.16) a Moravy (v průměru 0.13).



Obrázek 9 - Relativní intenzita sucha dle celkového modelovaného odtoku



Obrázek 10 - Relativní intenzita sucha dle základního modelovaného odtoku

Tabulka 1 - Porovnání charakteristik sucha dle jednotlivých period na základě modelovaného celkového odtoku

Perioda	D	I	L	rD	rl
1901-1930	4.46	1.70	2.34	0.24	0.09
1931-1960	6.01	1.97	2.76	0.36	0.11
1961-1990	6.68	2.19	2.95	0.44	0.12
1991-2015	4.74	1.79	2.38	0.29	0.10

Tabulka 2 - Porovnání charakteristik sucha dle jednotlivých period na základě modelovaného základního odtoku

Perioda	D	I	L	rD	rl
1901-1930	4.20	0.76	4.57	0.63	0.09
1931-1960	5.57	0.91	5.56	0.87	0.12
1961-1990	8.63	1.05	7.18	1.37	0.15
1991-2015	5.98	0.85	5.53	0.97	0.11

3.6 VALIDACE DEFICITNÍCH OBJEMŮ

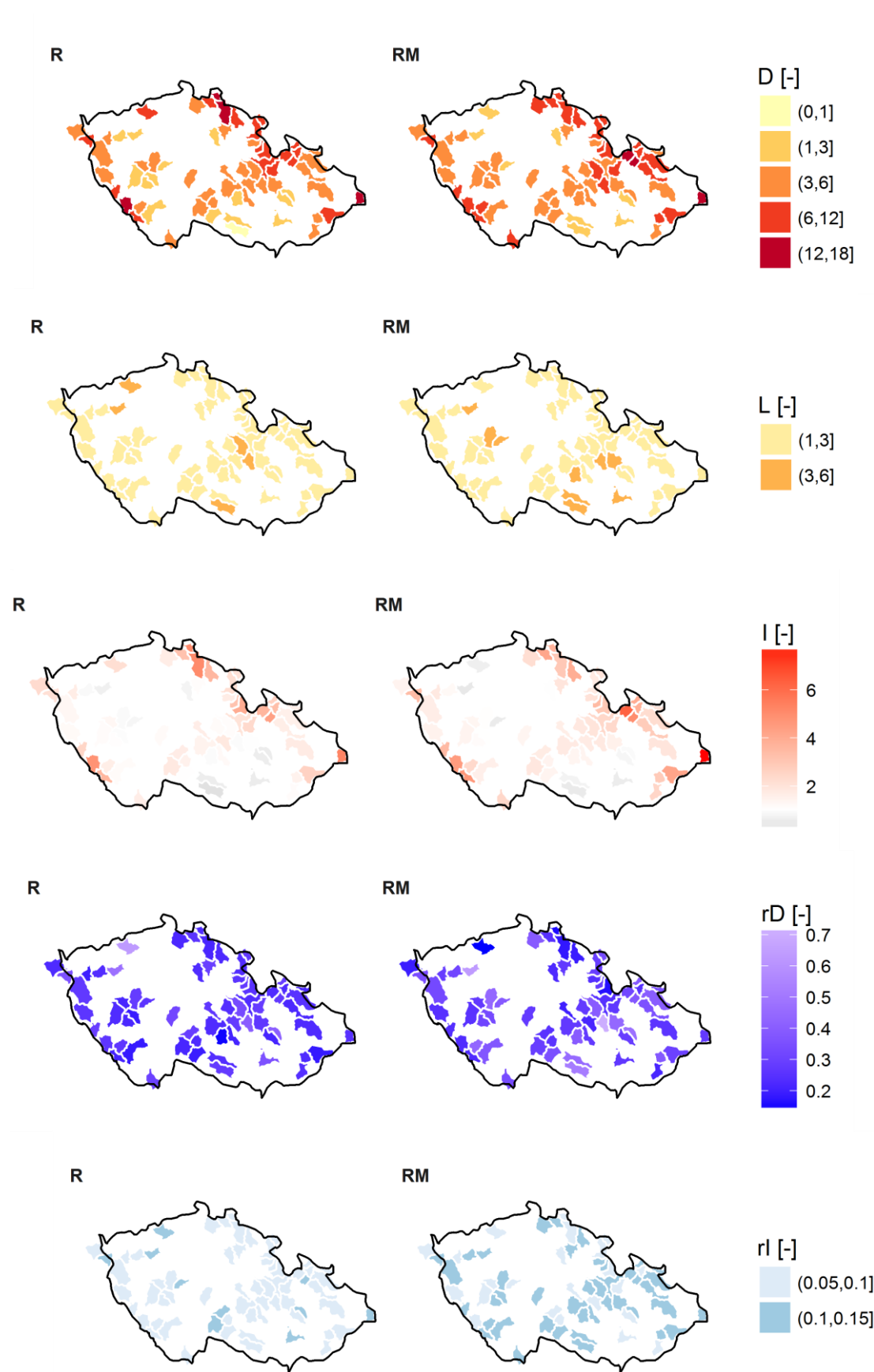
Validace deficitních objemů probíhala pomocí selekce uzavřených povodí se známým pozorovaným odtokem tak, aby bylo možné porovnat jednotlivé charakteristiky sucha vypočítané na základě modelovaného a zároveň pozorovaného průtoku. Validaci bylo možno provést na 65 povodích (ze 133), viz Tabulka 3.

Jak je možné vidět v Tabulka 4, všechny charakteristiky sucha vypočítané na základě simulovaného odtoku jsou pouze mírně vyšší oproti charakteristikám získaným pomocí pozorovaného odtoku. Na Obrázek 11 lze vidět jednotlivé charakteristiky nedostatkových objemů vypočítané pomocí pozorovaných odtoků (R) a modelovaných odtoků (RM). Rozdíl průměrných charakteristik dle pozorovaných a modelovaných řad je uveden na Obrázek 12. Obrázek 13 prezentuje porovnání charakteristik jednotlivých deficitních událostí. Je zřejmé, že model Bilan simuluje důležité charakteristiky sucha dostatečně přesně.

Tabulka 3 - Seznam povodí použitých k validaci

SP_ID	TOK	OD	DO
006000	Labe	1.11.1910	1.12.2015
021000	Metuje	1.11.1947	1.12.2015
028000	Divoká Orlice	1.11.1941	1.12.2015
031000	Bělá	1.11.1940	1.12.2015
036000	Tichá Orlice	1.11.1940	1.12.2015
039000	Dědina	1.11.1960	1.12.2015
047000	Loučná	1.11.1910	1.12.2015
058000	Novohradka	1.11.1930	1.12.2015
066000	Doubrava	1.11.1926	1.12.2015
070000	Cidlina	1.11.1940	1.12.2015
077000	Mrlina	1.11.1954	1.12.2015
091000	Jizera	1.11.1911	1.12.2015
107000	Teplá Vltava	1.11.1946	1.12.2015
113000	Malže	1.11.1943	1.12.2015
127000	Nežárka	1.11.1946	1.12.2015
138000	Otava	1.11.1930	1.12.2015
143000	Volyňka	1.11.1930	1.12.2015
150000	Blanice	1.11.1960	1.12.2015
152000	Lomnice	1.11.1960	1.12.2015
153000	Skalice	1.11.1960	1.12.2015
154600	Kocába	1.11.1983	1.12.2015
158000	Sázava	1.11.1930	1.12.2015
162000	Želivka	1.11.1931	1.12.2015
166200	Blanice	1.11.1957	1.12.2015
174000	Mže	1.11.1930	1.12.2015
179000	Radbuza	1.11.1930	1.12.2015
182000	Úhlava	1.11.1930	1.12.2015
187000	Úslava	1.11.1930	1.12.2015
188000	Klabava	1.11.1949	1.12.2015
189000	Střela	1.11.1952	1.12.2015
197000	Litavka	1.11.1955	1.10.1998
206000	Ohře	1.11.1931	1.12.2015
206500	Odrava	1.1.1979	1.12.2015

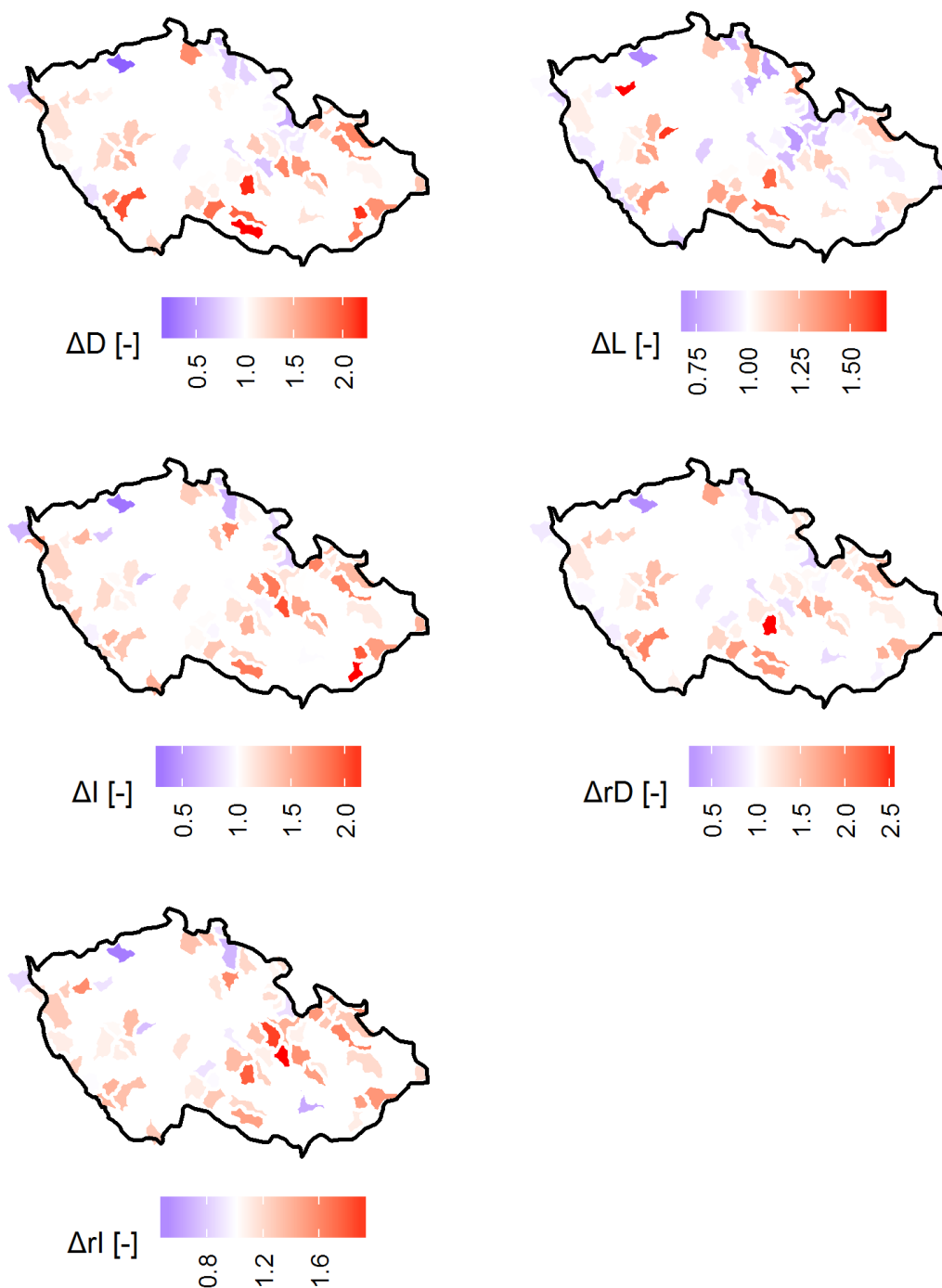
SP_ID	TOK	OD	DO
212000	Teplá	1.11.1954	1.12.2015
217000	Bířanka	1.11.1968	1.7.2008
223000	Bílina	1.11.1941	1.12.2009
235000	Ploučnice	1.11.1947	1.12.2015
252000	Odra	1.11.1957	1.12.2015
266000	Opava	1.11.1925	1.12.2015
274000	Moravice	1.11.1925	1.12.2015
299000	Olše	1.11.1946	1.12.2015
304000	Osoblaha	1.11.1954	1.10.2002
306000	Stěňava	1.11.1975	1.12.2015
309000	Vidnavka	1.11.1955	1.12.2015
313000	Bělá	1.11.1954	1.12.2015
320000	Lužická Nisa	1.11.1951	1.12.2015
324000	Smědá	1.11.1965	1.12.2015
345000	Morava	1.11.1920	1.12.2015
351100	Desná	1.11.1925	1.12.2015
354000	Moravská Sázava	1.11.1925	1.12.2015
361000	Třebůvka	1.11.1921	1.12.2011
382000	Vsetínská Bečva	1.11.1939	1.12.2015
393000	Blata	1.11.1958	1.12.2015
397000	Valov	1.11.1955	1.12.2015
412000	Dřevnice	1.11.1975	1.12.2015
418000	Olšava	1.11.1947	1.12.2015
429000	Moravská Dyje	1.11.1966	1.12.2015
440000	Jevišovka	1.11.1945	1.12.2015
445000	Svratka	1.11.1924	1.12.2015
447000	Loučka	1.11.1935	1.12.2015
454000	Svitava	1.11.1925	1.12.2015
461000	Litava	1.11.1951	1.12.2015
465000	Jihlava	1.11.1927	1.12.2015
473000	Oslava	1.11.1924	1.12.2015
477000	Rokytná	1.11.1945	1.12.2015



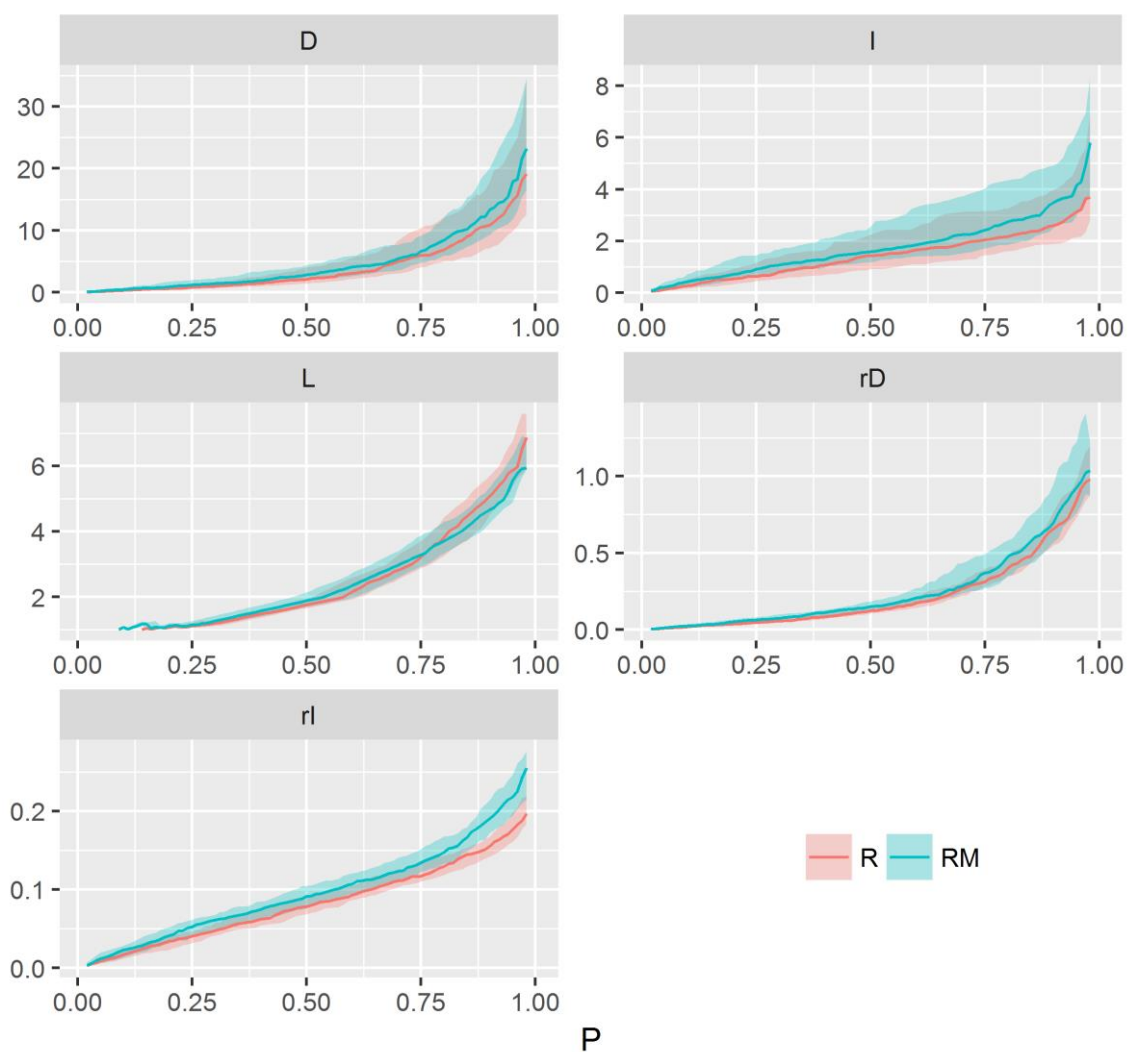
Obrázek 11 - Validace charakteristik deficitních objemů

Tabulka 4 - Porovnání charakteristik sucha na základě pozorovaného a simulovaného odtoku

Odtok	D	I	L	rD	rI
Pozorovaný (R)	5.25	1.94	2.29	0.24	0.09
Simulovaný (RM)	6.15	2.35	2.36	0.28	0.10



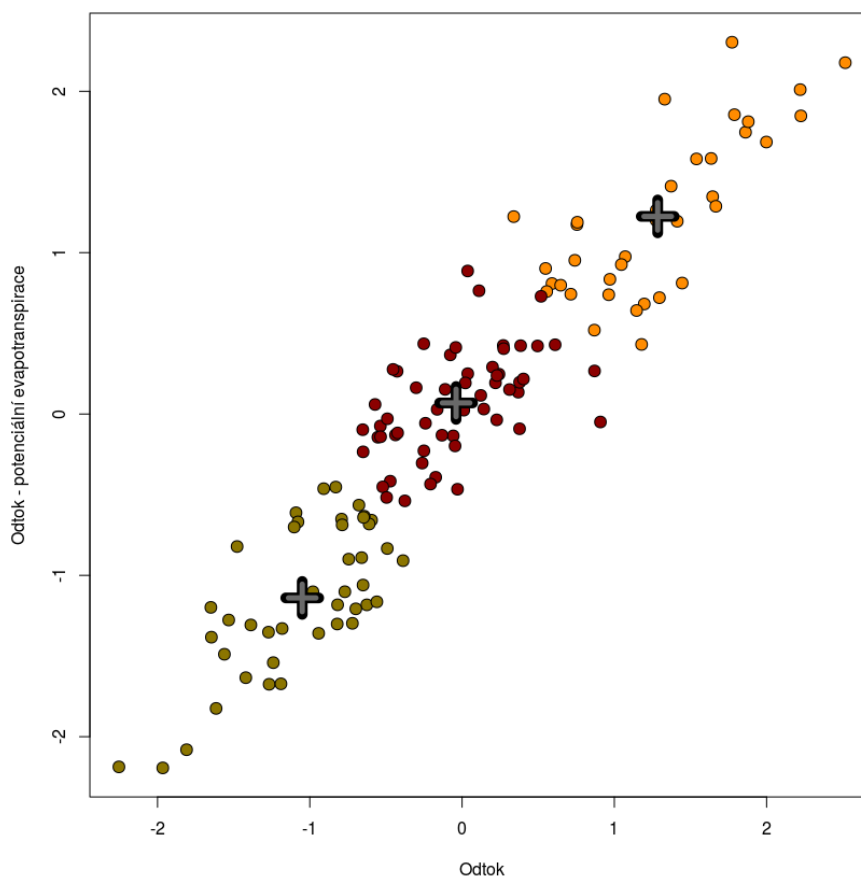
Obrázek 12 - Rozdíly jednotlivých charakteristik nedostatkových objemů mezi pozorovaným a modelovaným odtokem



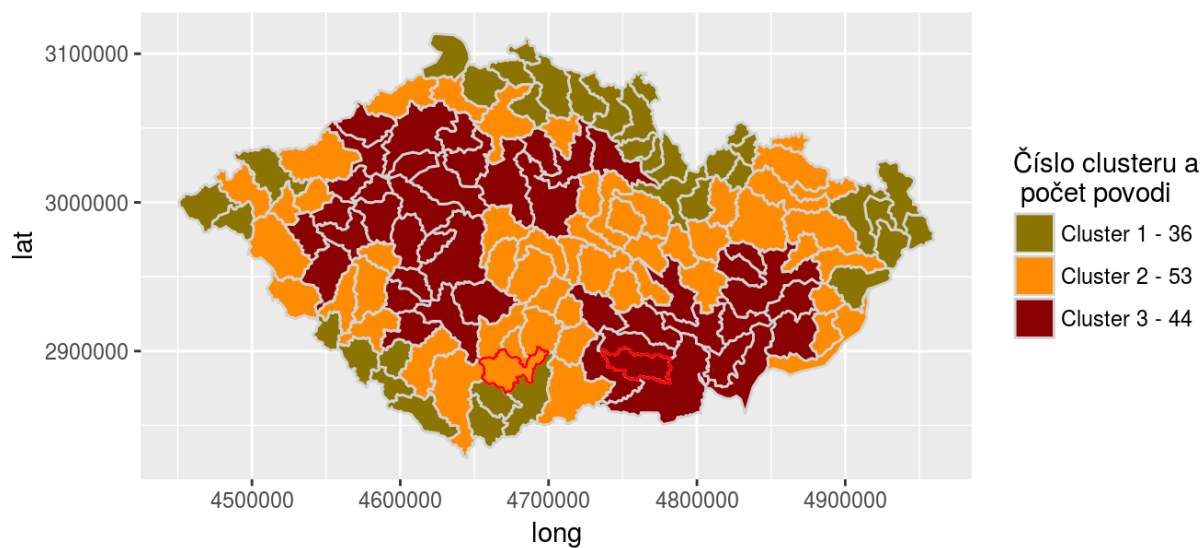
Obrázek 13 - Porovnání charakteristik sucha pozorovaného a modelovaného průtoku

4 Regionalizace ČR z hlediska výskytu sucha

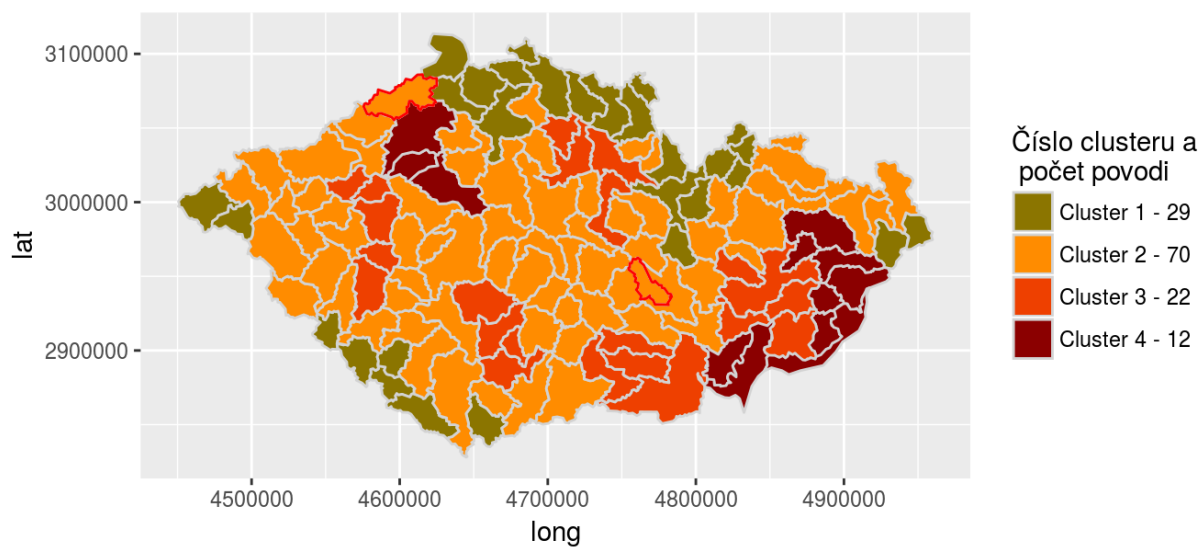
Ze všech fází regionalizace je identifikace homogenních oblastí z pravidla nejobtížnější a vyžaduje velké množství subjektivních rozhodnutí. Regionalizace byla provedena jak pro povrchový odtok, tak podzemní vody. Pro oba případy byl využit algoritmus K-means. K-means patří do skupiny takzvaných algoritmů strojového učení bez učitele. Jeho cílem je nalezení clusterů daných bodů, kde clusterem rozumíme skupinu bodů, které jsou si navzájem blízko (ve smyslu předem určené metriky v euklidovském prostoru). Vstupem algoritmu je množina m bodů, které jsou definované souřadnicemi v n -rozměrném prostoru, a číslo k , určující požadovaný počet clusterů. Všechny clustery jsou reprezentované svými středy a každý bod náleží do clusteru, jehož střed je mu nejbližší. Souřadnice středů se určují iterativním způsobem, tento iterativní algoritmus neustále zmenšuje chybu, definovanou jako součet vzdáleností všech bodů od středů svých clusterů, a spěje tak k lokálně-optimálnímu řešení. Clusterová analýza pro povrchový odtok proběhla s daty odtoků a rozdílů odtoku a potenciální evapotranspirace (viz Obrázek 14), pro podzemní vody proběhla s daty základních odtoků a podílu podzemních vod na povrchových vodách (tzv. Base Flow Index), u podzemních vod bylo dále nutno pro zpřesnění subjektivně přeradit některá povodí dle základních hydrogeologických rajonů. Výsledná regionalizace pro celkový a základní odtok je uvedena na Obrázek 15 a Obrázek 16, příslušnost povodí do jednotlivých oblastí udává Tabulka 5.



Obrázek 14 - Ukázka výstupu k-means pro celkový odtok



Obrázek 15 - Mapa clusterů pro celkový odtok



Obrázek 16 - Mapa clusterů pro základní odtok

Tabulka 5 - Zařazení povodí do jednotlivých clusterů pro celkový (RM) a základní (BF) odtok

RM			BF			
Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
006000	047000	042000	006000	031000	042000	202500
016000	058000	075000	016000	039000	060000	203000
021000	060000	077000	021000	047000	070000	221000
028000	061000	080000	028000	058000	075000	252000
031000	066000	104000	036000	061000	123000	382000
036000	070000	133000	091000	066000	129000	389000
039000	102000	151000	102000	077000	131000	390000
091000	117000	152000	107000	080000	133000	412000
093100	123000	153000	109000	093100	187000	418000
107000	127000	153200	113000	104000	188000	480500
109000	129000	154600	138000	115000	191800	500000
113000	131000	169000	143000	117000	194500	500003
115000	141000	176100	182000	123500	217000	-
123500	150000	186000	206000	127000	397000	-
138000	158000	190000	206500	141000	403000	-
143000	159000	191800	235000	150000	413000	-
182000	162000	191000	239000	151000	421500	-
206000	163310	194500	286600	152000	435000	-
206500	165000	197000	299000	153000	440000	-
214000	166200	200100	306000	153200	461000	-
235000	167000	202500	309000	154600	477000	-
286600	174000	203000	313000	158000	479000	-
293000	179000	204000	320000	159000	-	-
294000	183000	205000	324000	162000	-	-
299000	187000	217000	345000	163310	-	-
303000	188000	219000	351100	165000	-	-
306000	189000	221000	354000	166200	-	-
309000	207300	223000	454000	167000	-	-
313000	212000	393000	500001	169000	-	-
320000	216000	397000	-	174000	-	-
324000	239000	403000	-	176100	-	-
345000	240000	413000	-	179000	-	-
351100	252000	421500	-	183000	-	-
354000	266000	435000	-	186000	-	-
382000	274000	440000	-	189000	-	-
500001	275000	449000	-	190000	-	-
-	304000	461000	-	191000	-	-
-	355000	462000	-	197000	-	-
-	361000	469000	-	200100	-	-
-	367000	477000	-	204000	-	-
-	389000	478000	-	205000	-	-
-	390000	479000	-	207300	-	-
-	412000	480500	-	212000	-	-
-	418000	500000	-	214000	-	-
-	429000	-	-	216000	-	-
-	430000	-	-	219000	-	-
-	445000	-	-	223000	-	-
-	447000	-	-	240000	-	-
-	454000	-	-	266000	-	-
-	457000	-	-	274000	-	-
-	465000	-	-	275000	-	-
-	473000	-	-	293000	-	-
-	500003	-	-	294000	-	-
			-	303000	-	-
			-	304000	-	-

-	355000	-	-
-	361000	-	-
-	367000	-	-
-	393000	-	-
-	429000	-	-
-	430000	-	-
-	445000	-	-
-	447000	-	-
-	449000	-	-
-	457000	-	-
-	462000	-	-
-	465000	-	-
-	469000	-	-
-	473000	-	-
-	478000	-	-

5 Regionální extrémální model pro nedostatkové objemy

5.1 POPIS MODELU

Odhad N-letých nedostatkových objemů je zatížen značnou nejistotou, vyplívající mj. z délky dostupných řad. Podobně jako pro extrémní průtoky a srážky lze i pro nedostatkové objemy využít tzv. index-flood metodu.

Předpokladem je, že nedostatkové objemy v každém (mezi-)povodí v rámci předem definované oblasti mohou být normovány tak, že rozdělení těchto normovaných nedostatkových objemů je v dané oblasti stejné. Normovací faktor, který je určen pro jednotlivá (mezi-)povodí, je zpravidla označován „index-flood“, stejně jako tato metoda (Hosking a Walis, 1997). Primárně uvažujeme, že nedostatkové objemy v jednotlivých povodích lze popsat pomocí zobecněného rozdělení extrémních hodnot (Generalized extreme value distribution – GEV). GEV rozdělení,

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + k \left(\frac{x - \xi}{\alpha} \right) \right]^{-\frac{1}{\kappa}} \right\}, \kappa \neq 0, \quad (2)$$

$$F(x) = \exp \left\{ - \exp \left[- \left(\frac{x - \xi}{\alpha} \right) \right] \right\}, \kappa = 0.$$

má tři parametry ξ, α, κ a kombinuje tři limitní rozdělení extrémů (Gumbelovo, Fréchetovo a obrácené Weibullovo). Použité předpoklady implikují, že parametr κ a koeficient $\gamma = \alpha/\xi$, jsou v uvažované oblasti konstantní.

Jako normovací faktor bývá často použit průměr nebo medián rozdělení extrémů v jednotlivém povodí, nicméně je výhodné normovat rozdělení extrémů pomocí GEV parametru ξ . Parametry jsou odhadnuty metodou maximální věrohodnosti a umožňují odvození odhadů libovolných kvantilů rozdělení nedostatkových objemů pomocí vztahu

$$q_N = 1 - \frac{\gamma}{\kappa} \left\{ 1 - \left[-\log \left(1 - \frac{1}{N} \right) \right]^{-\kappa} \right\}, \kappa \neq 0, \quad (3)$$

$$q_N = 1 - \gamma \log \left[-\log \left(1 - \frac{1}{N} \right) \right], \kappa = 0.$$

Jelikož délka trvání deficitních událostí je pro základní odtok často delší než 1 rok, uvažujeme pro základní odtok 2letá maxima, na rozdíl od celkového odtoku, pro který jsou uvažována 1letá maxima. Vzhledem k tomu, že sucho se nevyskytuje každý rok, byl vztah z rovnice (2) korigován na základě

$$F_{\xi, \alpha, \kappa}^*(x) = \begin{cases} p_0 & \text{kdýž } x = 0 \\ p_0 + (1 - p_0) F_{\xi, \alpha, \kappa}(x) & \text{kdýž } x > 0 \end{cases} \quad (4)$$

kde p_0 je pravděpodobnost výskytu sucha. N-letý kvantil pak získáme pomocí

$$q_N = 1 - \frac{\gamma}{\kappa} \left\{ 1 - \left[-\log \left[p_0 + (1 - p_0) \left(1 - \frac{1}{N^m} \right) \right] \right]^{-\kappa} \right\}, \kappa \neq 0, \quad (5)$$

$$q_N = 1 - \gamma \log \left[-\log \left[p_0 + (1 - p_0) \left(1 - \frac{1}{N^m} \right) \right] \right], \kappa = 0.$$

kde m je velikost bloku, v němž jsou hledána maxima, tj. $m = 1$ pro celkový odtok a $m = 2$ pro základní odtok. K posouzení nejistot odhadu parametrů je využita metoda bootstrap. Další podrobnosti, testování modelu apod. viz Hanel et al. (2009).

Jako ukazatel dobré shody byly použity dvě metody Gumbel plot a Anderson-Darling test. Gumbel plot je grafickým znázorněním transformované distribuční funkce extrémů s pravděpodobnostmi na ose x a maximy na ose y , přičemž pravděpodobnosti p jsou transformované pomocí vztahu $-\log(-\log(p))$. Tato transformace zajišťuje lepší zobrazení extrémů s vysokou dobou opakování.

Andersonův-Darlingův (AD) test je statistický test (Empirical Distribution Function test – EDF) založený na analýze empirické distribuční funkce testovaného výběru. Základem testu je ověřování hypotézy, že n nezávislých proměnných vychází z předem daného spojitého rozdělení s distribuční funkcí $F(x)$. AD test patří do třídy kvadratických EDF statistik. Testová statistika pro ověřování n -prvkového výběru má následující tvar

$$A^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]^2}{F(x)[1 - F(x)]} dF(x) \quad (1)$$

kde $F(x)$ je teoretická distribuční funkce pod nulovou hypotézou a $F_n(x)$ je empirická distribuční funkce.

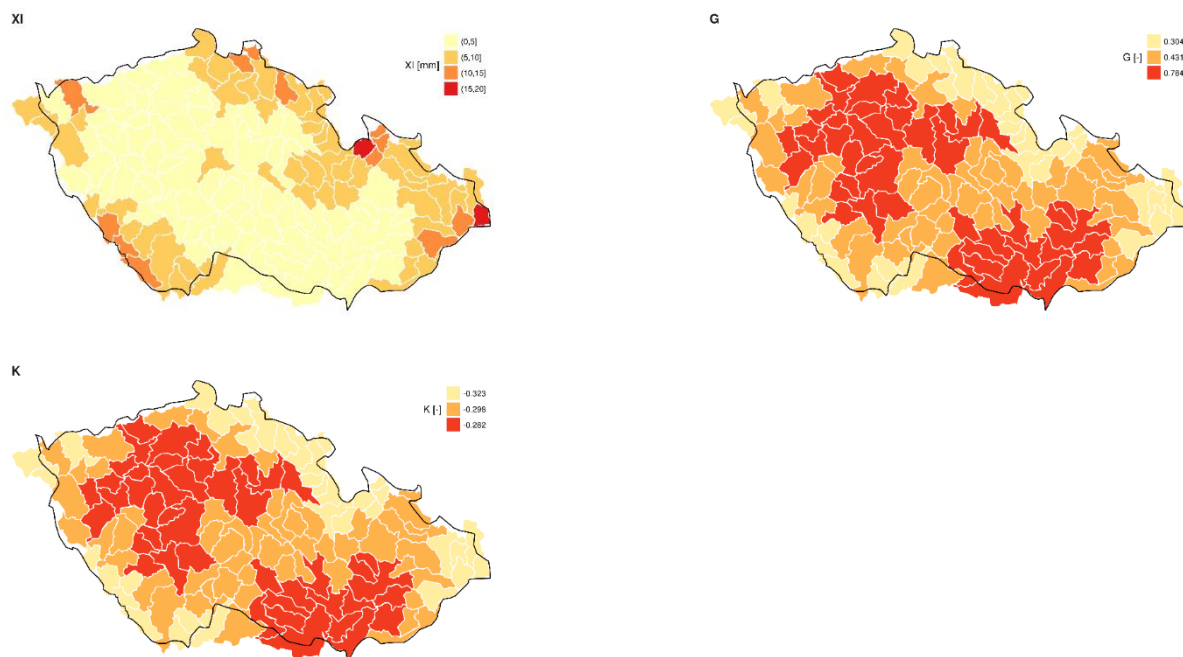
Model byl aplikován pro jednotlivé oblasti definované v předchozí kapitole. Zejména v případě podzemních vod nejsou oblasti vždy striktně homogenní. Nicméně je známo, že porušení předpokladů homogenity oblastí nevede k zásadním chybám v odhadech kvantilů extrémů.

5.2 VÝSLEDKY PRO CELKOVÝ ODTOK

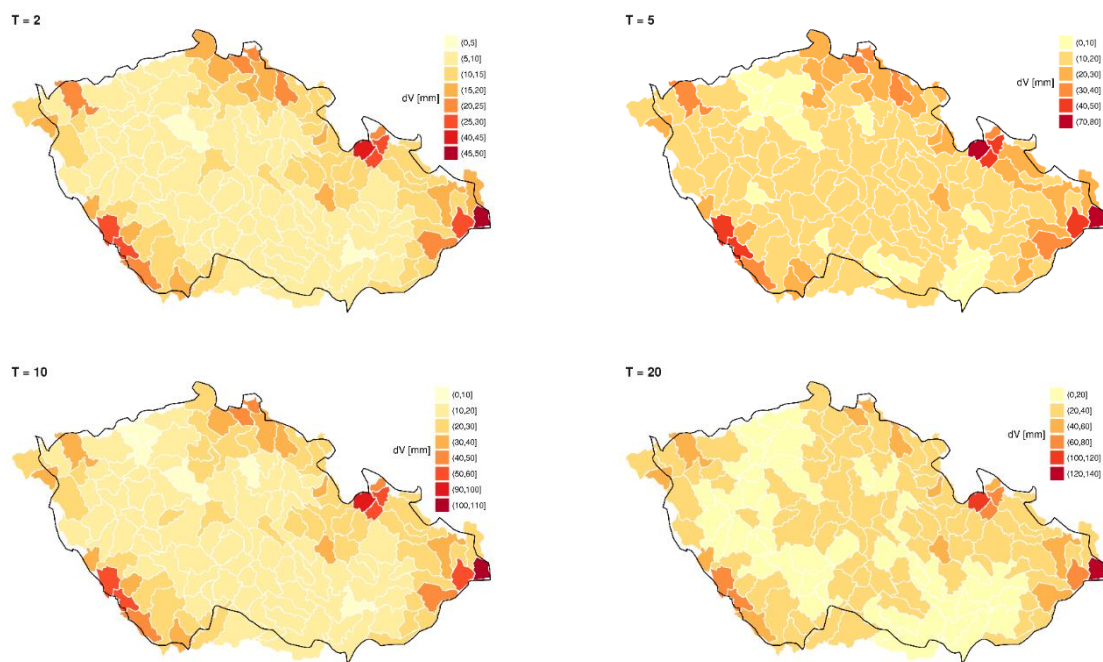
Parametry statistického modelu jsou uvedeny na Obrázek 17. Location parametr (ξ) do značné míry odpovídá prostorovému rozložení odtoku. Disperzní koeficient (γ) v jednotlivých oblastech je výrazně odlišný (0.3 v mírné oblasti, 0.43 v přechodné oblasti a 0.78 v rizikové oblasti) s rozdělením vykazujícím vysokou variabilitu v rizikové oblasti. Toto rozložení odpovídá poznatkům z analýzy srážek, kdy suché oblasti vykazují zpravidla vysoké disperzní koeficienty. Shape parametr (κ) je poměrně podobný ve všech oblastech. To naznačuje možnost dalšího snížení nejistoty odhadu N -letých kvantilů pomocí modelu uvažujícího konstantní shape parametr pro celou ČR.

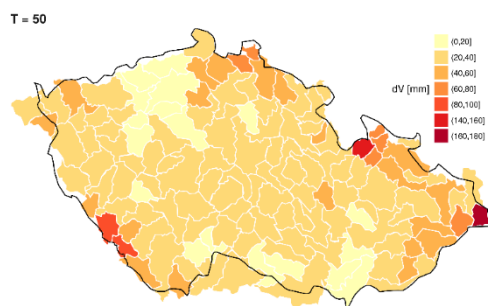
Na Obrázek 18 jsou uvedeny odhady 2, 5, 10, 20 a 50letého nedostatkového objemu [mm] pro celkový odtok. Je zjevné, že nedostatkové objemy jsou do jisté míry korelované s celkovým odtokem. V relativním vyjádření vzhledem k průměrnému celkovému odtoku (Obrázek 19) nedostatkové objemy rostou s dobou opakování (platí i v absolutní hodnotě) a zřetelně je vidět větší dopad na povodí v oblasti 3 (tj. v oblasti s nejvyšším rizikem výskytu sucha).

Obrázky Obrázek 20, Obrázek 21 a Obrázek 22 zobrazují bezrozměrné regionální růstové křivky a pozorované nedostatkové objemy dle celkového odtoku pro jednotlivé clustery.

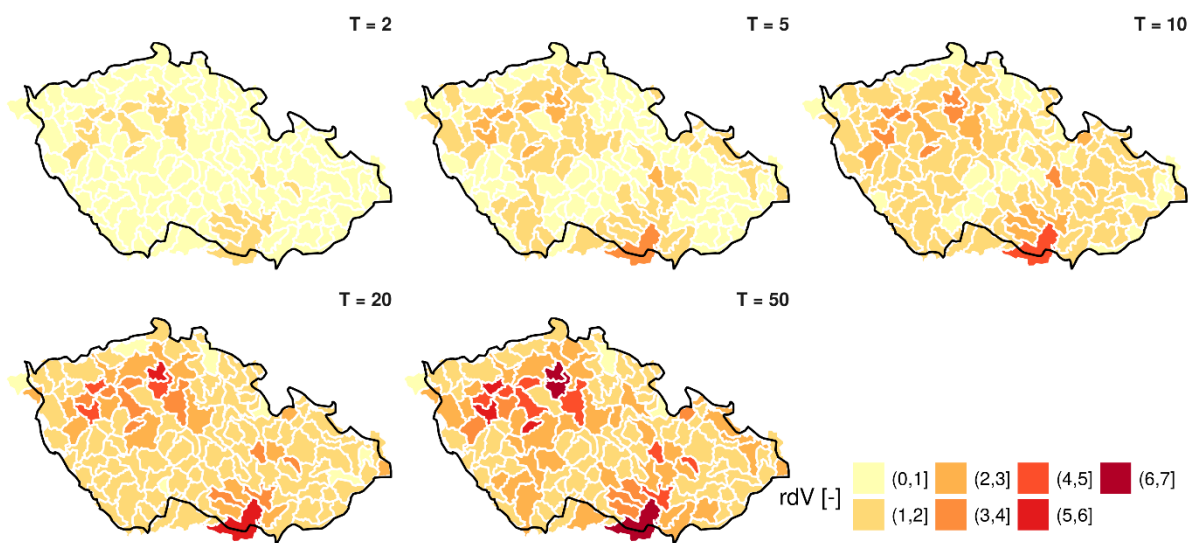


Obrázek 17 - Prostorové rozložení parametrů location (XI), dispersion (G) a shape (K) pro celkový odtok

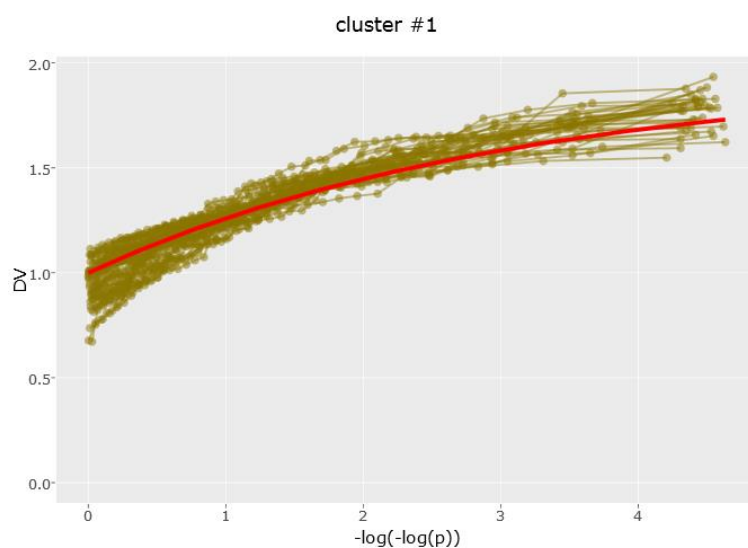




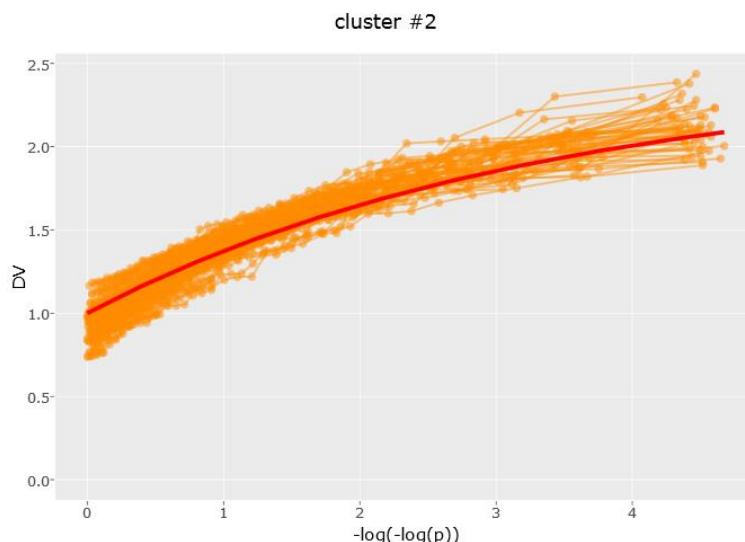
Obrázek 18 - Mapa N-letých nedostatkových objemů pro (simulovaný) celkový odtok pro 2, 5, 10, 20, 50 let



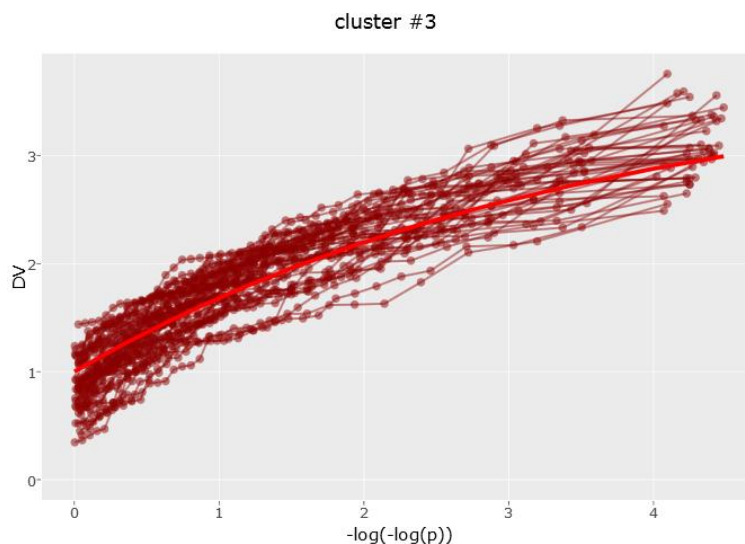
Obrázek 19 - Poměr deficitního objemu k průměrnému měsíčnímu odtoku pro celkový odtok pro doby opakování 2, 5, 10, 20, 50 let



Obrázek 20 - Gumbel-plot pro cluster 1 pro celkový odtok



Obrázek 21 - Gumbel-plot pro cluster 2 pro celkový odtok



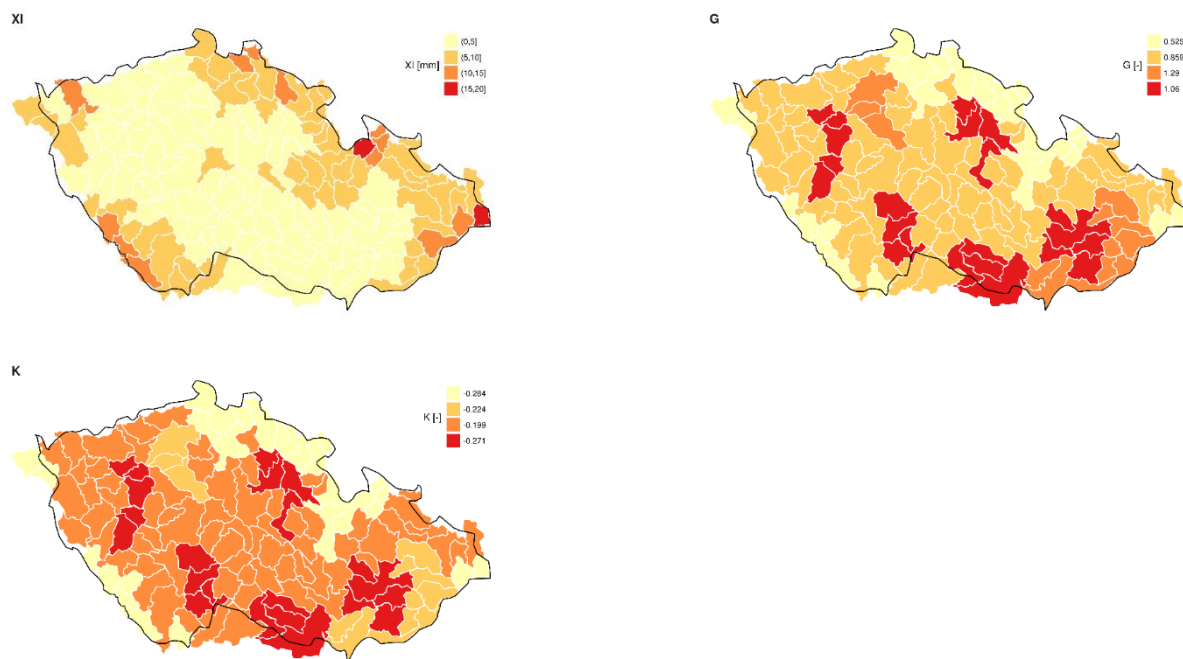
Obrázek 22 - Gumbel-plot pro cluster 3 pro celkový odtok

5.3 VÝSLEDKY PRO ZÁKLADNÍ ODTOK

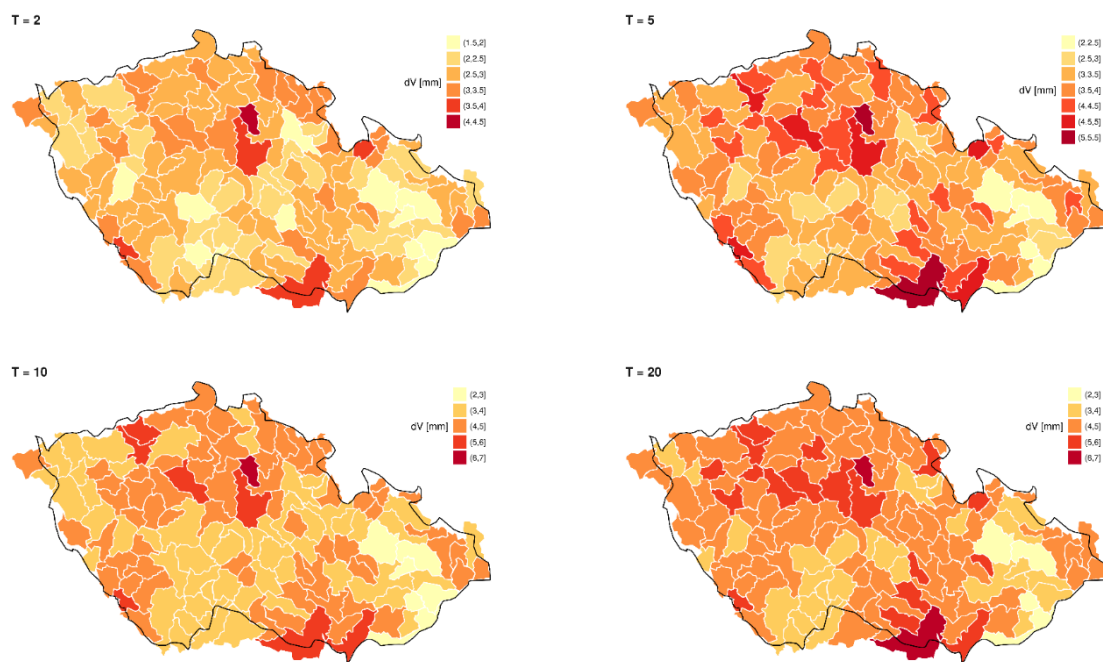
Obrázek 23 ukazuje rozložení parametrů statistického modelu. Prostorové rozložení v případě location parametru (ξ) je poměrně komplexní (ve srovnání s ξ pro nedostatkové objemy v celkovém odtoku), nicméně i zde je vidět korelaci s průměrným a základním odtokem. Disperzní koeficient je opět pro navržené oblasti značně proměnlivý (0.53, 0.86, 1.06 a 1.29), což ukazuje na výrazně odlišný charakter nedostatkových objemů. Shape parametr (κ) je proměnlivější než pro celkový odtok (-0.2 - -0.27), nicméně i zde by bylo možné uvažovat model s konstantním shape parametrem pro celou ČR.

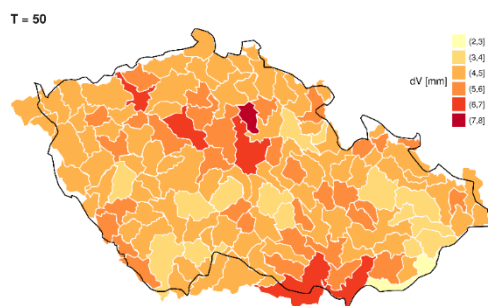
Mapy 2, 5, 10, 20 a 50letých nedostatkových objemů jsou uvedeny na Obrázek 24, v relativním vyjádření vzhledem k průměrnému celkovému odtoku na Obrázek 25. Zejména v relativním vyjádření je zřetelně vidět oblasti zranitelné suchem vzhledem k základnímu odtoku.

Obrázky Obrázek 26, Obrázek 27, Obrázek 28 a Obrázek 29 zobrazují bezrozměrné regionální růstové křivky a pozorované nedostatkové objemy dle základního odtoku pro jednotlivé oblasti.

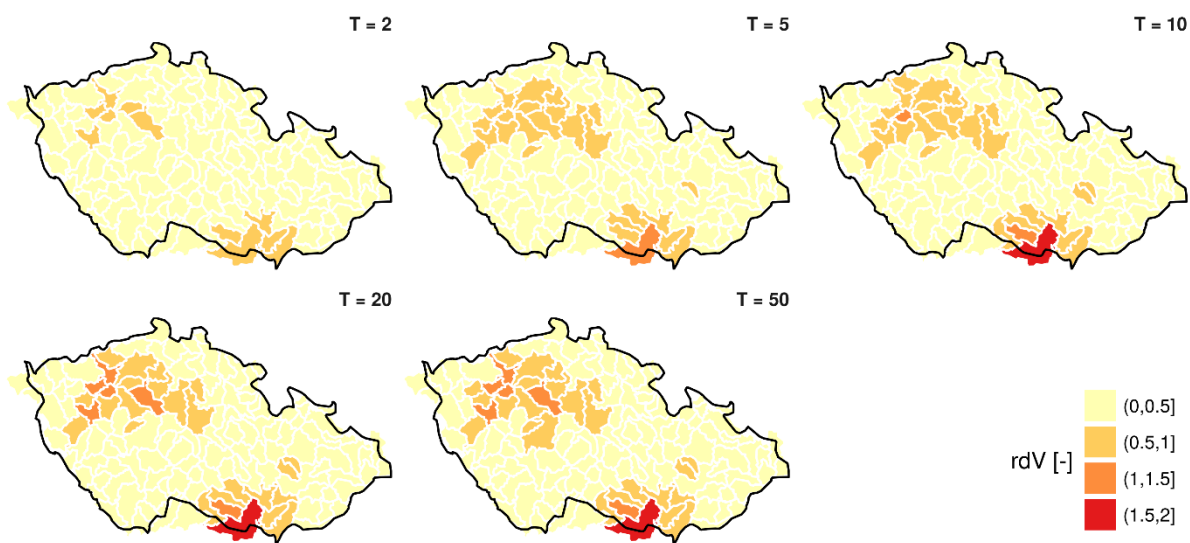


Obrázek 23 - Prostorové rozložení parametrů location (XI), dispersion (G) a shape (K) pro základní odtok

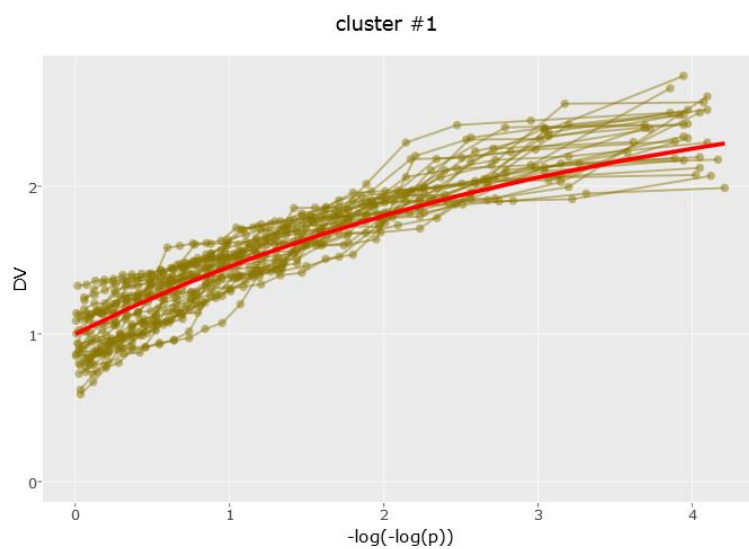




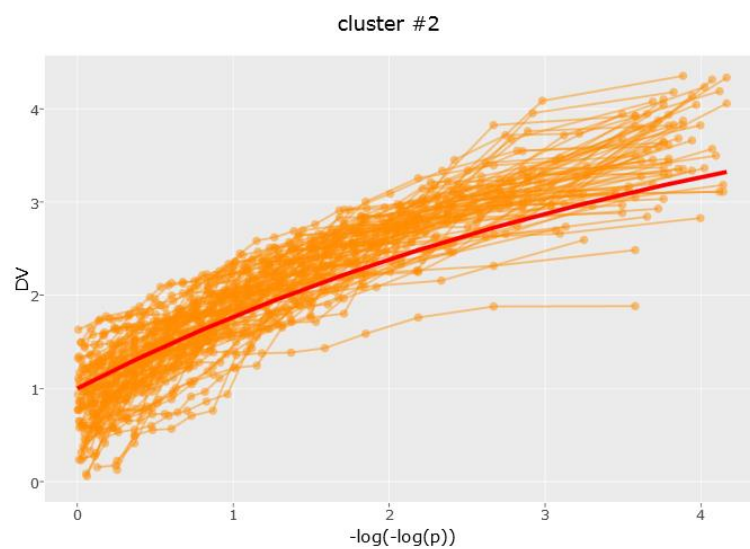
Obrázek 24 - Mapa N-letých nedostatkových objemů pro (simulovaný) základní odtok pro 2, 5, 10, 20, 50 let.



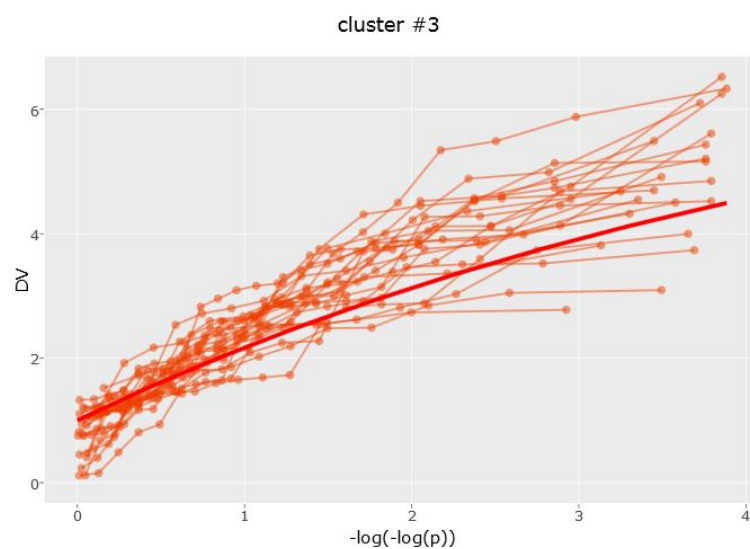
Obrázek 25 - Poměr deficitního objemu k průměrnému měsíčnímu celkovému odtoku pro základní odtok pro doby opakování 2, 5, 10, 20, 50 let



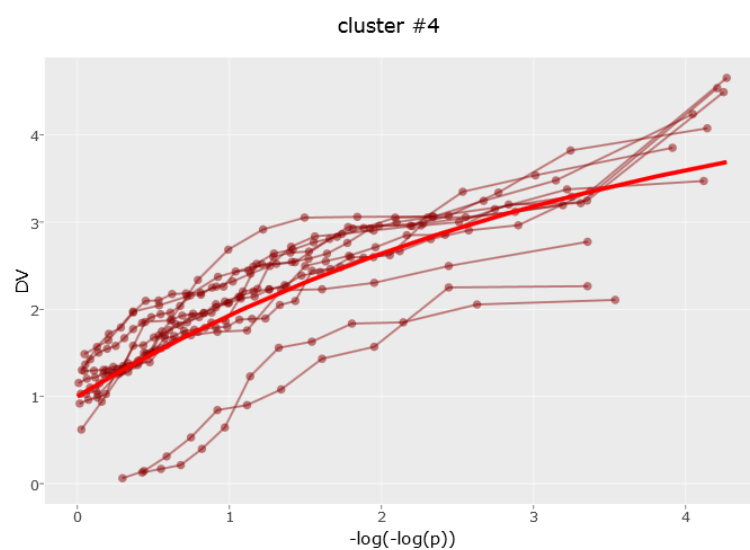
Obrázek 26 - Gumbel-plot pro cluster 1 pro základní odtok



Obrázek 27 - Gumbel-plot pro cluster 2 pro základní odtok



Obrázek 28 - Gumbel-plot pro cluster 3 pro základní odtok



Obrázek 29 - Gumbel-plot pro cluster 4 pro základní odtok

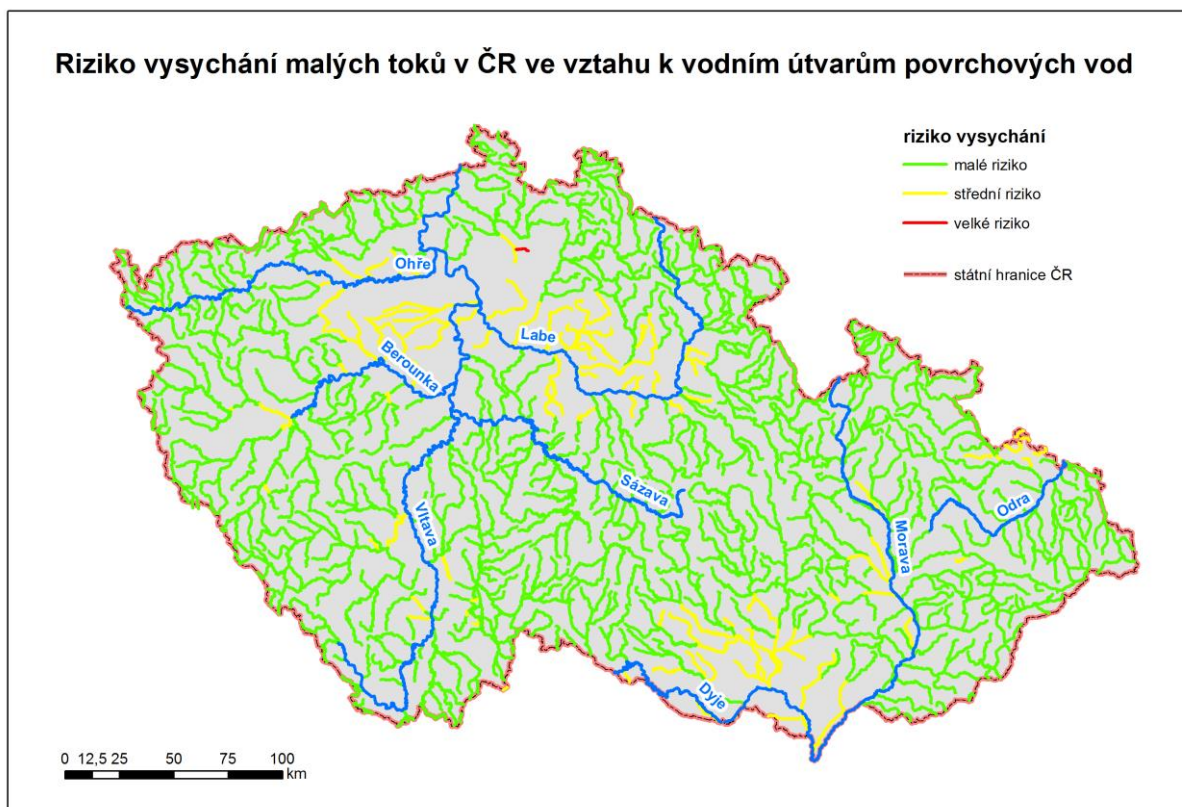
6 Implementace Mapy rizika vysychání drobných vodních toků v ČR

Stanovení míry rizika výskytu sucha ve vztahu k vodním útvarům a jejich hydrologickým povodím bylo provedeno prostorovou identifikací polygonové třídy povodí vodních útvarů vůči polygonové třídě povodí IV. řádu s již stanovenou mírou rizika sucha v těchto stupních:

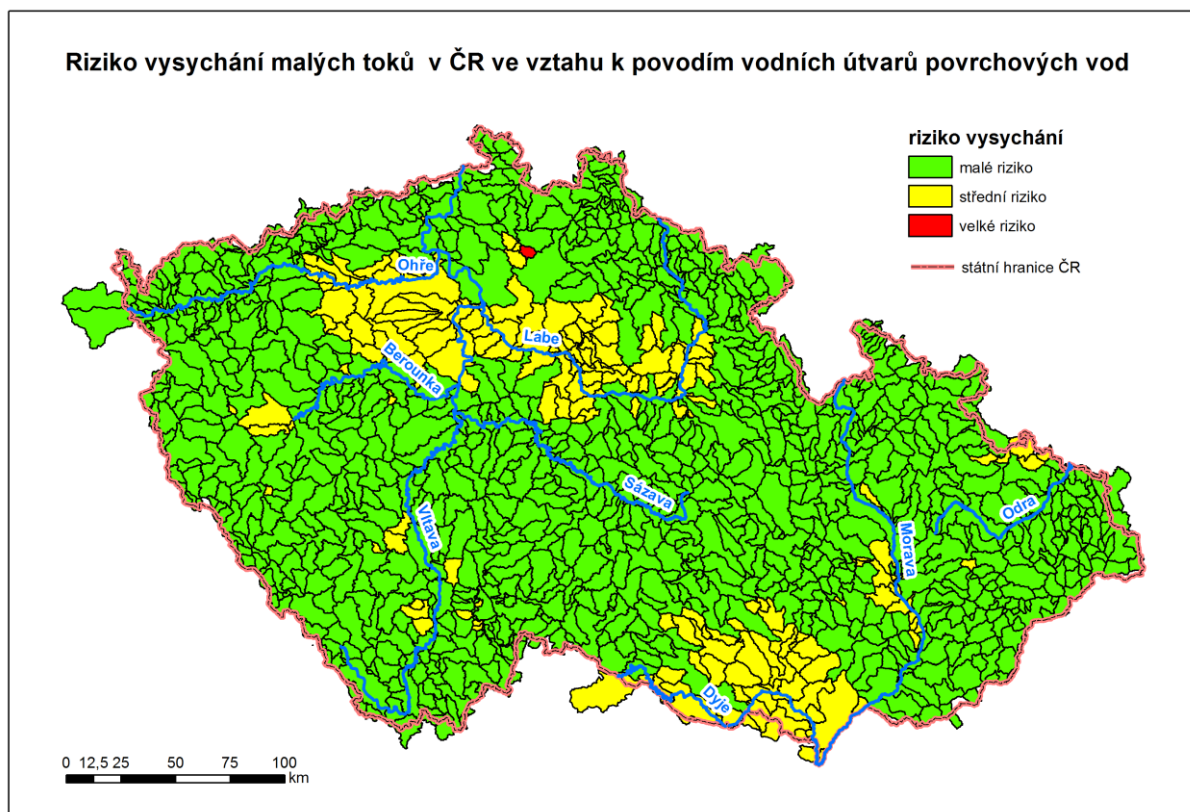
- 1 - malé riziko
- 2 - střední riziko
- 3 - velké riziko

Následně byl pro každé povodí vodního útvaru určen dominantní stupeň rizika, a to podle maxima součtu ploch povodí IV.řádu náležejících jednomu stupni rizika v daném povodí vodního útvaru. Analýza byla zpracována v prostředí GIS platformy ArcGIS For Desktop. Náhledy výsledných map jsou uvedeny na Obrázek 30 a Obrázek 31.

stupeň rizika	počet povodí vodních útvarů
1 - malé riziko	957
2 - střední riziko	154
3 - velké riziko	1



Obrázek 30 - Riziko vysychání malých toků v ČR ve vztahu k vodním útvarům povrchových vod



Obrázek 31 - Riziko vysychání malých toků v ČR ve vztahu k povodím vodních útvarů povrchových vod

7 Definování neznalostí a nejistot stávající úrovně řešení

- neexistence vybraných prostorově distribuovaných hydrologických podkladů v potřebné podrobnosti (minimální a maximální odtoky, charakteristiky variability odtoku, vybrané kvantily rozdělení odtoku, charakteristiky základního odtoku apod.) pro kalibraci hydrologického modelu Bilan na mezipovodí
- neexistence metodického postupu umožňujícího disagregaci charakteristik nedostatkových objemů do subpovodí
- možná přítomnost trendů v charakteristikách nedostatkových objemů a s tím související nutnost jejich zohlednění ve statistickém modelu
- absence vyhodnocení nedostatkových objemů pro scénáře změny klimatu

LITERATURA

Hanel, M., Buishand, TA., Ferro, CAT. (2009) A nonstationary index flood model for precipitation extremes in transient regional climate model simulations. *Journal of Geophysical Research*, 114(D15).

Harris, I., Jones, P., D., Osborn, T., J., Lister, D., H. (2014) Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3, 10 Dataset, *International Journal of Climatology*, 34(3), 623-642.

Hosking, JRM., Wallis, JR. (1997) *Regional frequency analysis: an approach based on Lmoments*. Cambridge University Press.

Štěpánek, P., Zahradníček, P., Huth, R., (2011) Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of Central European daily time series, *Időjárás*, 115(1-2), 87-98.