

Číslo úkolu: 3702

**Činnosti k podpoře výkonu státní správy v problematice
SUCHO v roce 2017 – úkol 3702
C) SYSTÉMOVÉ NÁSTROJE**

Ing. Adam Vizina, Ph.D. a kolektiv

Název a sídlo organizace:

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

Ředitel:

Ing. Tomáš Urban

Zadavatel:

Ministerstvo životního prostředí
Vršovická 65, 100 10 Praha 10

Zástupce zadavatele:

Mgr. Lukáš Záruba, Ing. Pavel Marták, Ing. Tereza Davidová, Ph.D.

Zahájení a ukončení úkolu:

duben 2017 – duben 2018

Místo uložení zprávy:

VÚV TGM, www.suchovkrajine.cz

Náměstek ředitele pro výzkumnou a odbornou činnost:

Ing. Libor Ansorge, Ph.D.

Vedoucí odboru:

Ing. Anna Hrabánková

Hlavní řešitel:

Ing. Adam Vizina, Ph.D.

Spoluřešitelé:

VÚV TGM: Doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D., Ing. Radek Vlnas, Ing. Magdalena Nesládková, Ing. Ladislav Kašpárek, CSc., Ing. Roman Kožíň, Ing. Petr Pavlík, Ing. Roman Kožíň, RNDr. Tomáš Hrdinka, Ph.D., Ing. Petr Vyskoč, RNDr. Hana Prchalová, Ing. Jiří Pícek, Ing. Jiří Dlabal, Mgr. Erika Hlušíčková, RNDr. Renata Filippi

FŽP ČZU: Doc. Petr Máca, Ph.D., Ing. Petr Bašta, Ing. Vojtěch Moravec, Ing. Filip Strnad, Ing. Martin Heřmanovský, Ph.D.

CzechGlobe: prof. Ing. Mgr. Miroslav Trnka, Ph.D., Doc. Ing. Petr Hlavinka, Ph.D.

ČHMÚ: RNDr. Jan Daňhelka, Ph.D. a kol.

Obsah

A. Systémový nástroj	9
ANOTACE DÚ (cca 500-1000 znaků)	9
1) Příprava metodiky pro tvorbu plánu pro zvládání sucha	9
2) Sestavení typového plánu „Dlouhodobé sucho“	9
3) Návrh online systému „Zvládání sucha“	9
4) Výpočet indikátorů	10
5) Výpočet hydrologické bilance a nedostatkových objemů	10
6) Výpočet vodohospodářské bilance	10
1 Úvod	11
1.1 Metodika	11
1.2 Systémový nástroj pro předpověď hydrologické situace HAMR	13
2 Data	15
2.1 Popis UPOV	15
2.2 Topologie UPOV	16
2.3 Hydrologické charakteristiky UPOV	17
2.4 Meteorologická data a odtok	18
2.5 Užívání vod	19
2.6 Fyzicko-geografické poměry v ploše povodí UPOV	20
2.6.1 Fyzické charakteristiky říčního systému povodí UPOV	21
2.6.2 Sklonové poměry v ploše povodí UPOV	22
2.6.3 Čísla CN a retenční schopnost povodí UPOV	24
3 Bilan	28
3.1 Nastavení	28
3.2 Kalibrace	29
3.3 Validace	32
3.4 Clusterová analýza	33
3.5 Modelované odtoky	35
4 SoilClim	36
4.1 Základní popis	36
4.2 Prostorové simulace	37
5 Model říční sítě	42
5.1 Vytvoření schéma říční sítě	42

5.2	Výpočet celkového odtoku z UPOVu řádu a.....	42
5.3	Použité metody transformace odtoku	42
5.3.1	Metoda lineární nádrže	42
5.3.2	Metoda Muskingum	43
5.4	Vodní nádrž v UPOVu a její vliv na transformaci odtoku.....	44
5.3.3	Nakládání s povrchovými vodami v UPOVu	46
5.3.4	Kalibrace a verifikace modelu říční sítě	46
5.3.5	Výběr fyzicko-geografických charakteristik UPOVů	47
5.5	Kalibrace modelu říční sítě	53
5.6	Regionalizace parametrů modelu říční sítě	53
6	Předpověď sucha	55
6.1	Kalibrace předpovědi.....	55
6.2	Získání předpovědi a pozorování srážek a teploty	55
6.3	Předpovědní běh a aktualizace webové aplikace.....	55
6.4	Rozhodovací systém pro řízení vodních zdrojů	55
7	Indikátory	56
7.1	Popis indikátorů.....	56
7.1.1	SPI, SPEI	56
7.1.2	PDSI.....	56
7.1.3	Nedostatkový objem	56
7.2	Indexy určující míru zranitelnosti povodí	57
7.3	Návrh do plánů	57
8	Webová aplikace	60
8.1.	Technické řešení.....	60
8.2.	Data	60
8.3.	Postprocessing.....	63
8.4.	Základní rozvržení.....	63
8.4.1	Základní mapa	64
8.4.2	Indikátory sucha	65
8.4.3	Užívání	66
8.4.4	Validace	67
8.5.	Zjednodušená verze aplikace	68
8.5.1	Technické řešení.....	68

8.5.2	Použité balíčky:.....	68
8.5.3	Mapové komponenty	69
7.4	O projektu.....	70
9.	Modelování hydrologické bilance a kvality vody povodí útvarů povrchových vod pomocí modelu HYPE	71
9.1.	Model Hype	71
9.2.	Postup prací.....	73
9.3.	Výsledky stavby modelu HYPE.....	75
9.3.1	Kalibrace modelu HYPE	75
9.3.2	Výsledky kalibrace	75
9.4.	Model HYPE pro modelování adaptačních opatření a jejich vlivu na jakost vody	77
9.4.1	Stavba modelu.....	77
9.4.2	Výsledky stavby modelu	77
9.4.3	Závěr a další postupy modelování adaptačních opatření.....	80
10.	Regionální analýza nedostatkových objemů extrémním modelem	81
10.1	L-momenty	81
10.2	Volba rozdělení.....	81
10.3	Regionalizace.....	82
10.4	Statistický model	83
10.5	Goodness of fit	84
10.6	Odhad návratnosti událostí.....	85
	SEZNAM LITERATURY	89
	PŘÍLOHA 1 – Modelované roční odtoky	91
	PŘÍLOHA 2 – Indikátory	100

Seznam obrázků

Obrázek 1 Propagace sucha do jednotlivých částí hydrologického cyklu (Vizina, 2014)	12
Obrázek 2 Schéma systému pro předpověď hydrologické situace	14
Obrázek 3 Logo systému HAMR	14
Obrázek 4 Vymezené útvary povrchových vod dle Langhammera (2010) s doplňkovými pracovními útvary.....	15
Obrázek 5: Příslušnost UPOV ke krajům dle dominantní plochy.	16
Obrázek 6 Stavba topologie. Čísla uvnitř polygonů udávají řád UPOV.	17
Obrázek 7 Průměrné roční odtokové výšky za období (1981-2010)	19
Obrázek 8 Souhrnný vývoj odběrů povrchových vod pro území České republiky (1980-2016)	19
Obrázek 9 Desagregované evidované užívání vod (na denní hodnoty) na toku Radbuza od pramene po Černý potok (Kód UPOV BER_0180).....	20
Obrázek 10 Hustota říční sítě v povodí UPOV	22
Obrázek 11 Průměrné sklony v plochách povodí UPOV.....	24
Obrázek 12 Průměrná potenciální maximální retence povodí UPOV pro nejvlhčí variantu předchozích vláhových podmínek	26
Obrázek 13 Průměrná potenciální maximální retence povodí UPOV pro střední variantu předchozích vláhových podmínek	26
Obrázek 14 Průměrná potenciální maximální retence povodí UPOV pro nejsušší variantu předchozích vláhových podmínek	27
Obrázek 15 Schéma modelu Bilan.....	28
Obrázek 16: Parametr Spa modelu Bilan (vlevo) označující kapacitu zásoby půdní vlhkosti a parametr Dgm, reprezentující koeficient mezi teplotou a táním sněhu	30
Obrázek 17: Parametr základního odtoku modelu Grd (vlevo) a parametr Alf, určující odtok ze zásoby do přímého odtoku.....	30
Obrázek 18: Parametry dělení perkolace na přímý odtok a dotaci podzemní vody pro letní podmínky Soc (vlevo) a zimní podmínky Mec.....	31
Obrázek 19 Míra dosažené shody jako vzájemný poměr chyb mezi M-denními kvantily.	32
Obrázek 20 Povodí s měřenými průtoky určenými k validaci modelu.	33
Obrázek 21 Analogony pro vzorová opatření na zemědělské půdě.....	34
Obrázek 22 Analogony pro vzorová povodí s revitalizací toku	34
Obrázek 23 Analogony pro vzorová povodí s opatřeními na lesní půdě.....	34
Obrázek 24 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2002 (povodně).....	35
Obrázek 25 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2015 (sucho).	35
Obrázek 26 Schéma modelu SoilClim.....	36
Obrázek 27 Digitální model terénu použitý v modelu SoilClim pro reprezentaci území ČR.	37
Obrázek 28 Mapa půdních typů využitá jako základ pro stanovení retenční schopnosti půd (dle Tomáška, 2000 a zdrojů VÚMOP).....	38
Obrázek 29 Převládající typ vegetace použitý v daném gridu pro výpočet půdní vlhkosti.....	38
Obrázek 30 Graf intenzity sucha zachycený jako kombinace míry plochy zasažené poklesem relativního nasycení půdní vláhy pod 30% a délkou trvání v jednotlivých letech.....	39
Obrázek 31 Graf intenzity sucha zachycený jako kombinace míry plochy zasažené poklesem relativního nasycení půdní vláhy pod 30% a délkou trvání v jednotlivých letech a to pro současné klima (1956-2015 – zeleně) a očekávané klima (2021-2080 – oranžově) při využití scénáře RCP 4.5 a	

pěti regionálních klimatických modelů z databáze EUROCORDEX. Znaménko „+“ označuje průměrnou hodnotu intenzity sucha ve všech letech v obou obdobích a charakterizuje tendenci změny zásoby vody v půdě. Znaménko „x“ pak charakterizuje průměrnou hodnotu intenzity sucha v 10 nejhorších letech v obou obdobích a charakterizuje tak posun extremity.....	39
Obrázek 32 Vývoj počtu dní s nedostatkem vláhy v půdním profilu 0–100 cm za rok	40
Obrázek 33 Simulační účinnost modelu říční sítě využívajícího lineární zásobník jako metodu transformace odtoku korytem na souboru 64 říčních sítích v kalibrační i verifikační fázi podle CC (vlevo) i KGE (vpravo). Parametr transformační metody byl stanoven na základě průměrného sklonu údolnice (1 FGC), resp. průměrného sklonu údolnice, délky údolnice a hustoty říční sítě (3 FGC).	49
Obrázek 34 Porovnání simulačních účinností modelu říční sítě využívajícího lineární zásobník jako metodu transformace odtoku korytem na souboru 64 říčních sítí podle KGE v kalibrační (vlevo) i verifikační fázi (vpravo) v závislosti na počtu UPOVů v síti, jejichž řád byl vyšší než 1. Parametr transformační metody byl stanoven na základě průměrného sklonu údolnice.....	50
Obrázek 35 Celkový simulovaný odtok (Dsim) v porovnání s celkovým měřeným odtokem (Dmer), síť tvořena 2 UPOVy (koncový UPOV: Olše od státní hranice po tok Lomná). Parametry transformační metody vypočteny pomocí rovnice 5.24 na základě průměrného sklonu údolnice. Vlevo kalibrační fáze s CC = 0,811, KGE = 0,784. Vpravo verifikační fáze s CC = 0,563, KGE = 0,528.	51
Obrázek 36 Celkový simulovaný odtok (Dsim) v porovnání s celkovým měřeným odtokem (Dmer), síť tvořena 10 UPOVy (koncový UPOV: Tichá Orlice od toku Dobroučka po tok Třebovka). Parametry transformační metody vypočteny pomocí rovnice 5.24 na základě průměrného sklonu údolnice, délky údolnice a hustoty říční sítě. Vlevo kalibrační fáze s CC = 0,679, KGE = 0,450. Vpravo verifikační fáze s CC = 0,560, KGE = 0,362.	51
Obrázek 37 Simulační účinnost modelu říční sítě hodnocená formou mediánu CC a mediánu KGE na časové řadě 1. 1. 1993 až 31. 12. 1998, pokud bylo na souboru 64 říčních sítí testováno 64 lokálních vztahů obsahujících průměrný sklon údolnice (vlevo) a průměrný sklon údolnice, délku údolnice a hustotu říční sítě (vpravo).	52
Obrázek 38 Celkový simulovaný odtok (Dsim) v porovnání s celkovým měřeným odtokem (Dmer), časová řada 1. 1. 1993 až 31. 12. 1998. Vlevo síť tvořena 2 UPOVy s CC = 0,828 a KGE = 0,764 (koncový UPOV: Olše od státní hranice po tok Lomná). Vpravo síť tvořená 10 UPOVy s CC = 0,655 a KGE = 0,383 (koncový UPOV: Tichá Orlice od toku Dobroučka po tok Třebovka). Parametry transformační metody vypočteny pomocí rovnice 5.25.	53
Obrázek 39 Rozhodovací schéma pro vyhlášení stavu sucha	58
Obrázek 40 Zranitelné oblasti dle WQ90_	58
Obrázek 41 Základní rozložení systému HAMR.....	64
Obrázek 42 Základní mapa systému.....	65
Obrázek 43 Komponenta indikátory sucha	66
Obrázek 44 Komponenta nakládání s vodou.....	67
Obrázek 45 Komponenta validace průtoků a parametrů hydrologického modelu.....	68
Obrázek 46 Základní mapa modelu HAMR – lite verze	69
Obrázek 47 Komponenta indikátory sucha – lite verze.....	69
Obrázek 48 Komponenta nakládání s vodou - lite verze	70
Obrázek 49 Okno „O projektu“	70
Obrázek 50 Struktura modelu HYPE (zdroj: prezentace modelu HYPE SMHI)	71
Obrázek 51 Struktura modelu HYPE (zdroj: www.smhi.se).....	72

Obrázek 52 Pravděpodobnostní rozložení diferencí mezi původními polygony a rasterizovanými	73
Obrázek 53 Vztah mezi rozdílem mezi původními polygony a rasterizovanými a jejich celkovou plochou.....	74
Obrázek 54 Hodnoty Nash-Sutcliffe koeficientu a Kling-Gupta koeficientu modelovaných průtoků...	76
Obrázek 55 Relativní procentuální chyba modelované vodní hodnoty sněhové pokrývky	76
Obrázek 56 Relativní procentuální chyba (vlevo) a korelační koeficient (vpravo) modelované potencionální evapotranspirace.....	76
Obrázek 57 Koncentrace celkového fosforu v období 2008 - 2016, pozorované hodnoty (černá), modelované hodnoty (červená)	78
Obrázek 58 Koncentrace dusíku dusitanového v období 2008–2016, pozorované hodnoty (černá), modelované hodnoty (červená)	78
Obrázek 59 Citlivostní analýza modelovaných veličin.....	80
Obrázek 60 L-moment ratio diagram pro nedostatkové objemy (body) a populaci τ_3 a τ_4 pro GPA (linie).....	82
Obrázek 61 Výsledné shluky ÚPOVů na základě 14d k-means analýzy.....	83
Obrázek 62 Gumbel ploty pro všechny oblasti (shluky ÚPOVů). Červeně regionální kvantilová funkce, modře empirické normované hodnoty pro jednotlivé útvary náležící do shluku.	84
Obrázek 63 Mapa N-letých nedostatkových objemů (simulovaného) odtoku pro dobu opakování 2, 5, 10, 20, 50 let.....	86
Obrázek 64 Mapa N-letých nedostatkových objemů (simulovaného) odtoku pro dobu opakování 2, 5, 10, 20, 50 let po zvýšení teploty o 2 °C.	87
Obrázek 65 Mapa N-letých nedostatkových objemů (simulovaného) odtoku pro dobu opakování 2, 5, 10, 20, 50 let po zvýšení teploty o 2 °C a zvýšení srážek 10 %.	88

A. Systémový nástroj

ANOTACE DÚ (cca 500-1000 znaků)

Úkol „Systémové nástroje“ v sobě skrývá aktivity, které budou podporou pro státní správu, a to především pro odbor OOV MŽP. Hlavními výstupy bude maketa operačního plánu, typový plán „Dlouhodobé sucho“ a pilotní webová aplikace (na webových stránkách www.suchovkrajine.cz, nebo www.stavsucha.cz), která bude sloužit pro rozhodování v období sucha na jednotlivých úrovních managementu. Jednotlivé principy budou definovány v operačním plánu a jeho metodice a v typovém plánu „Dlouhodobé sucho“. Nedílnou součástí pro sestavení takového systému je podrobný výpočet hydrologické i vodohospodářské bilance a indikátorů pro povrchové i podzemní vody ve vysokém rozlišení na území České republiky.

1) Příprava metodiky pro tvorbu plánu pro zvládání sucha

- Tvorba dílčích podkladů:
 - zavedení nového nástroje pro rozhodovací činnosti, souvisejícím s užíváním vod – rozsah dat, poskytovaných ve zkrácené době a zjednodušené postupy jejich vyhodnocování a uveřejňování rovněž ve zkrácené lhůtě
 - Navrhnout postup zjišťování a verifikace požadavků na užívání vod
 - Návrh snížení současného limitu ($6000 \text{ m}^3/\text{rok}$, $500 \text{ m}^3/\text{měsíc}$), kdy jsou provozovatelé povinni hlásit odběry a vypouštění
 - Kontrola databáze o užívání vod
- Zahrnutí výsledků výpočtu indikátorů
- Metodický pokyn pro tvorbu operačního plánu
- Tvorba makety operačního plánu
- Příprava metodiky pro tvorbu plánu pro zvládání sucha
- Ověření metodiky (vytvořením plánu) v pilotním území
- Konzultace návrhu metodiky s předpokládanými uživateli formou diskuzního semináře

2) Sestavení typového plánu „Dlouhodobé sucho“

- Spolupráce s OOV při sestavování typového plánu

3) Návrh online systému „Zvládání sucha“

- Navrhnout postup zjišťování a verifikace požadavků na užívání vod
- Tvorba online systému, který bude založen na zemědělském ‘půdním’ modelu, hydrologickém modelu přirozených podmínek, vodohospodářském modelu a jednotlivých užívání vody
- Pilotní verze webové aplikace na stránkách www.suchovkrajine.cz, která bude sloužit jako nástroj pro operativní rozhodování, podklad pro operační plán pro zvládání sucha

4) Výpočet indikátorů

- Výpočet indikátorů pro bilanční profily na celém území ČR pro podzemní a povrchové vody
- Na základě analýzy hodnot budou určeny limitní hodnoty pro operační plány pro zvládání sucha pro povrchové a podzemní vody + indexy na užívání
- Návrh výpočtu do webového systému a metodiky (novely vodního zákona)

5) Výpočet hydrologické bilance a nedostatkových objemů

- Výpočet hydrologické bilance na podrobnost vodních útvarů
- Upravení modelu hydrologické bilance pro modelování na povodích, která nemají vodoměrnou stanici (tzv. ungaged basins),
- Clusterová analýza pro přenos fyzickogeografických parametrů modelu
- Upravení modelu pro kalibraci, která bude založena na dlouhodobých charakteristikách odtoku, základního odtoku atd.
- Vyhodnocení N-letých nedostatkových objemů pro scénáře změny klimatu, tvorba a ověření metodiky pro disagregaci charakteristik sucha z mezipovodí do vodních útvarů
- Odhad změn N-letých nedostatkových objemů pomocí opatření v povodí (velké/malé vodní nádrže, změna využití pozemků, retenční opatření apod.)
- Revidování postupů výpočtu přírodních zdrojů podzemních vod hydrologickou bilancí, využití výstupů a metodických dokumentů z projektu „Rebilance“ a tím jednak verifikovat současné dlouhodobé hodnoty přírodních zdrojů a dále umožnit stanovení přírodních zdrojů dosud nehodnocených hydrogeologických rajonů
- Začlenění hydrologického hodnocení minulého roku vůči dlouhodobým hodnotám do výstupů hydrologické bilance
- Atlas hydrologických poměrů za období 1981 – 2010 (2015)

6) Výpočet vodohospodářské bilance

- Sestavení vodohospodářského modelu pro celou Českou republiku ve vysoké podrobnosti, návrh online webu pro zvládání sucha, zahrnutí do modelu cca 200 nejvýznamnějších nádrží a převodů vody
- Výpočet vodohospodářské bilance v podrobném měřítku

1 Úvod

V České republice, ale i ve světě ve stále větším počtu oblastí velmi rychle narůstá nedostatek vody a výskyt sucha, který v některých případech dosahuje úrovně živelné katastrofy s masivními dopady. V případě sucha dochází k nárůstu jeho četnosti v některých oblastech včetně střední Evropy. Tento jev úzce souvisí s procesem globální klimatické změny. Problém zabezpečení vodních zdrojů se už začíná projevovat i v oblastech, v nichž obyvatelstvo projevy sucha dosud příliš nepociťovalo. Navíc míru dopadů sucha a nedostatku vody na obyvatelstvo a průmysl v posledních letech příznivě ovlivnila skutečnost, že došlo k poklesu odběrů vody přibližně o polovinu oproti situaci v roce 1990. Zmírňující efekt tohoto vývoje se však již postupně vytrácí. V roce 2015 byly v ČR zaznamenány problémy se zásobováním obyvatelstva v obcích s nedostatečně spolehlivými vodními zdroji a výrazně vzrostly dopady sucha na zemědělskou produkci a lesní hospodářství, kde se dopady tohoto jevu projevují obvykle nejdříve, a ostatní hospodářské sektory. Došlo ke zvýšení počtu dní s nedostatkem vláhy v klíčovém období pro produkci většiny plodin. Do budoucna lze očekávat, že stávající vodní zdroje nebudou dostatečné, a to nejen z hlediska potenciálně snižujícího se dostupného množství vody, ale i z hlediska nevyhovující jakosti vody. Z těchto důvodů se řada institucí zabývá v posledních více než 10 letech výzkumem problematiky sucha a upozorňuje na problém, který se již začíná výrazně projevovat. Jednou z klíčových výzkumných činností je v současnosti tvorba nástroje pro predikci stavu vodních zdrojů v dlouhodobém měřítku, který je představen v tomto příspěvku.

V současné době rozhodování dispečerů správců povodí v období sucha a nedostatku vody probíhá na základě předchozích zkušeností, bez podpůrných nástrojů. Tento stav by šel přirovnat k situaci zvládání povodní bez jednotlivých prognostických nástrojů a modelů. Dispečeré jsou schopni stav zmírnit, ale bez podpory expertního systému mohou dělat opatření, která nemusí být optimální a může docházet k ekonomickým ztrátám v případě suché epizody (v případě povodní by mohlo docházet v krajních případech i k ohrožení společnosti). Pro rozhodování má dispečink správců povodí nyní k dispozici:

- manipulační řady vodních děl,
- informace o aktuální klimatické a hydrologické situaci – měřené hodnoty srážek, teploty vzduchu, přítoku a odtoku z nádrží, stavu hladin v nádržích, průtoků atp.,
- informaci o dlouhodobých statistických charakteristikách hydrologických poměrů v daném měsíci,
- informaci o nutných opravách na vodních dílech, aj.

Pro rozhodování v období sucha však zcela chybí informace o předpokládaném vývoji hydrologické situace ve výhledu následujících týdnů až měsíců, která může napomoci optimalizaci řízení vodohospodářských soustav.

1.1 Metodika

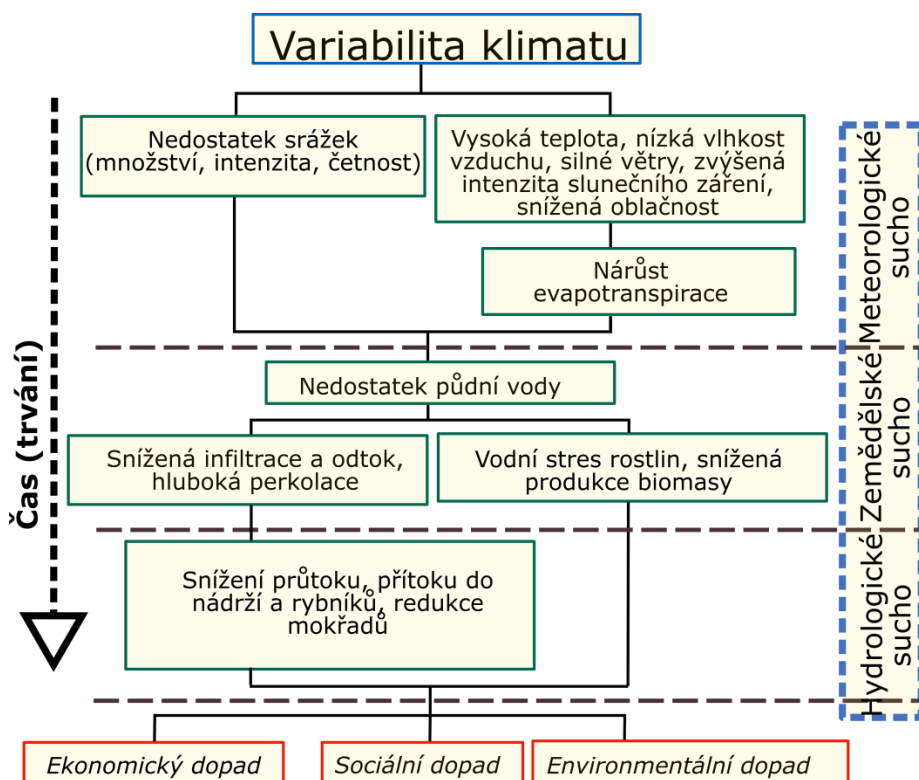
Sucho a nedostatek vody jsou pojmy, které je třeba od sebe správně rozlišovat.

Sucho představuje dočasný pokles dostupnosti vody a je považováno za přirozený jev. Pro sucho je charakteristický jeho pozvolný začátek, značný plošný rozsah a dlouhé trvání. Přirozeně dochází k výskytu sucha, pokud se nad daným územím vyskytne anomálie v atmosférických cirkulačních

procesech v podobě vysokého tlaku vzduchu beze srážek, která setrvává po dlouhou dobu nad určitým územím.

Nedostatek vody je definován jako situace, kdy vodní zdroj není dostatečný pro uspokojení dlouhodobých průměrných požadavků na vodu.

Dopady sucha mohou být méně nápadné – začátek a konec sucha lze stanovit jen velmi obtížně. Účinky sucha mají kumulativní charakter, neboť velikost sucha se zvyšuje s jeho délkou. S dopady sucha se setkáváme ještě několik let po výskytu normálních dešťů (Blinka, 2004). Sucho nepříznivě ovlivňuje různá odvětví lidské společnosti, např. zemědělství, energetiku, zásobování vodou, průmysl, lodní dopravu; může mít i sociální a environmentální dopady. Četná odvětví jsou potenciálně ohrožená v důsledku nedostatku vody v různých složkách hydrologického cyklu zemského povrchu (Peters, 2003; Bratršovská, 2013; Panu a Sharma, 2002; Hayes, 2000). Dopady sucha lze rozdělit do tří základních kategorií: ekonomické, environmentální a sociální (Obrázek 1).



Obrázek 1 Propagace sucha do jednotlivých částí hydrologického cyklu (Vizina, 2014)

I když bývá kvantifikace škod způsobených suchem velmi obtížná, je jisté, že ztráty způsobené suchem dosahují značných rozměrů. Podle různých studií převyšují odhady ztrát způsobených suchem škody z jiných přírodních katastrof. Například Witt (1997) označil sucho jako nejnákladnější přírodní katastrofu, roční náklady na sucho ve Spojených státech odhaduje na 6–8 miliard dolarů, což je více, než náklady na hurikány nebo povodně (Peters, 2003). Sucho také postihuje větší území než jiná přírodní rizika a zároveň postihuje více lidí než jakákoli jiná nebezpečí (Blinka, 2004; Trnka et al., 2003; Wilhite, 2000). V posledních desetiletích má sucho významný dopad na ekonomiku a život ve střední a východní Evropě. Pomineme-li povodně, jsou sucha považována za nejničivější přírodní katastrofy v České republice. I když poslední výskyt sucha u nás nemohl být přímo spojen s člověkem způsobenou změnou klimatu, odhadované dopady sucha ukazují zranitelnost těchto oblastí, co se

sucha týče. Navíc nedávná studie Brázdila et al. (2015) jasně ukázala, že trendy k výskytu častějšího a intenzivnějšího sucha nelze vysvětlit jinou přirozenou příčinou, jakými jsou kolísání sluneční aktivity, vulkanická činnost či přirozené klimatické oscilace. Vzhledem k předpokládanému zvýšení teploty nad střední Evropou s jen mírným růstem srážek v některých obdobích (jaro, podzim, zima) a poklesu v letním období, je velmi pravděpodobné, že se četnost výskytu sucha a jeho závažnost bude v budoucnosti ve střední Evropě zvyšovat a dopady související s těmito událostmi se zhorší. Navíc, rostoucí poptávka po vodě (i rostoucí tlak na další přírodní zdroje) v důsledku populačního růstu, zvyšující se urbanizace, a větší důraz kladený na ochranu životního prostředí mění zranitelnost obyvatelstva vůči období sucha (Trnka et al., 2003; Wanders et al., 2010). Je však důležité si uvědomit, že v rozvinutých vlhkých a subhumidních oblastech jsou škody způsobené suchem především finančního charakteru, zatímco nejzávažnější důsledky sucha se často vyskytují v rozvojových oblastech s (polo-) suchým klimatem, kde je dostupnost vody nízká již za normálních podmínek, kde se potřeba blíží nebo převyšuje dostupnost přirozenou, kde společnost má jen zřídka možnost zmírnění sucha či přizpůsobení se suchu a kde sucho často ohrožuje samotné životy lidí (Peters, 2003; Stahl et al., 2010). Sucho, nebo kombinace sucha a lidské činnosti v těchto oblastech mohou vést ke vzniku pouští, přičemž půdní struktura a úrodnost půdy jsou degradovány a bio-produktivní zdroje se snižují, nebo mizí (Kundzewicz, 1997). Nicméně lepší monitorování a management vodních zdrojů a pochopení vývoje sucha mohou dopady sucha zmírnit.

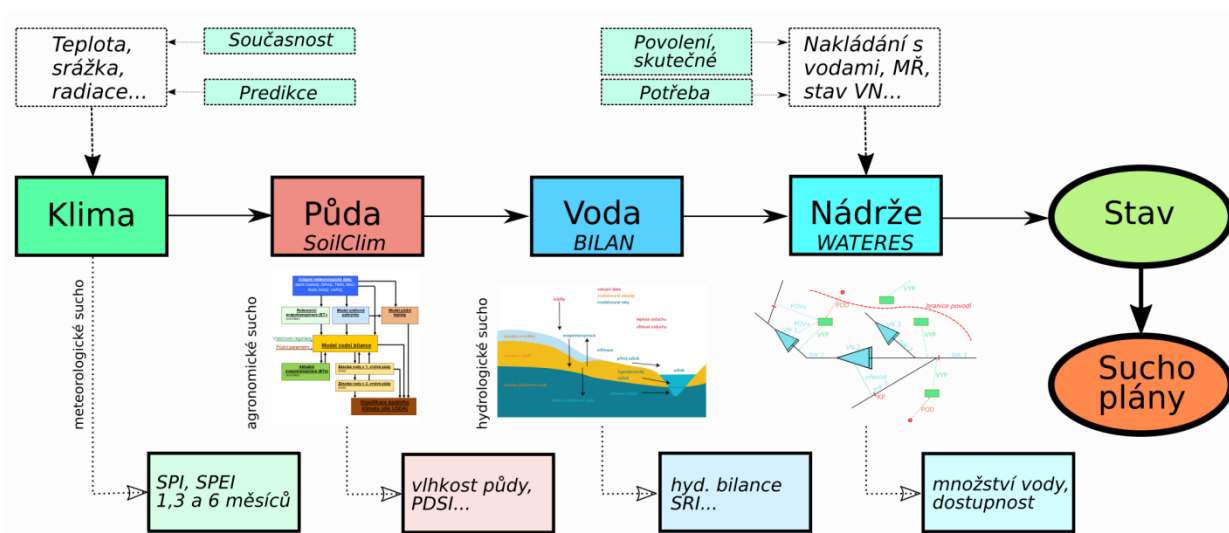
1.2 Systémový nástroj pro předpověď hydrologické situace HAMR

Nástroj je založen na propojení modelu vláhové bilance půdy SoilClim, modelu hydrologické bilance BILAN a modelu vodohospodářské soustavy WATERES jednotlivých povodí za účelem modelování pravděpodobného vývoje hydrologické situace na cca 8 týdnů. Schéma modelu je zobrazeno na Obrázek 2, na kterém je zobrazena základní struktura systému. Jednotlivé komponenty jsou podrobněji popsány níže.

Systém má pracovní název HAMR, který v sobě skrývá zjednodušeně všechny komponenty systému, a to:

Hydrologie,
Agronomie,
Meteorologie,
Retence,

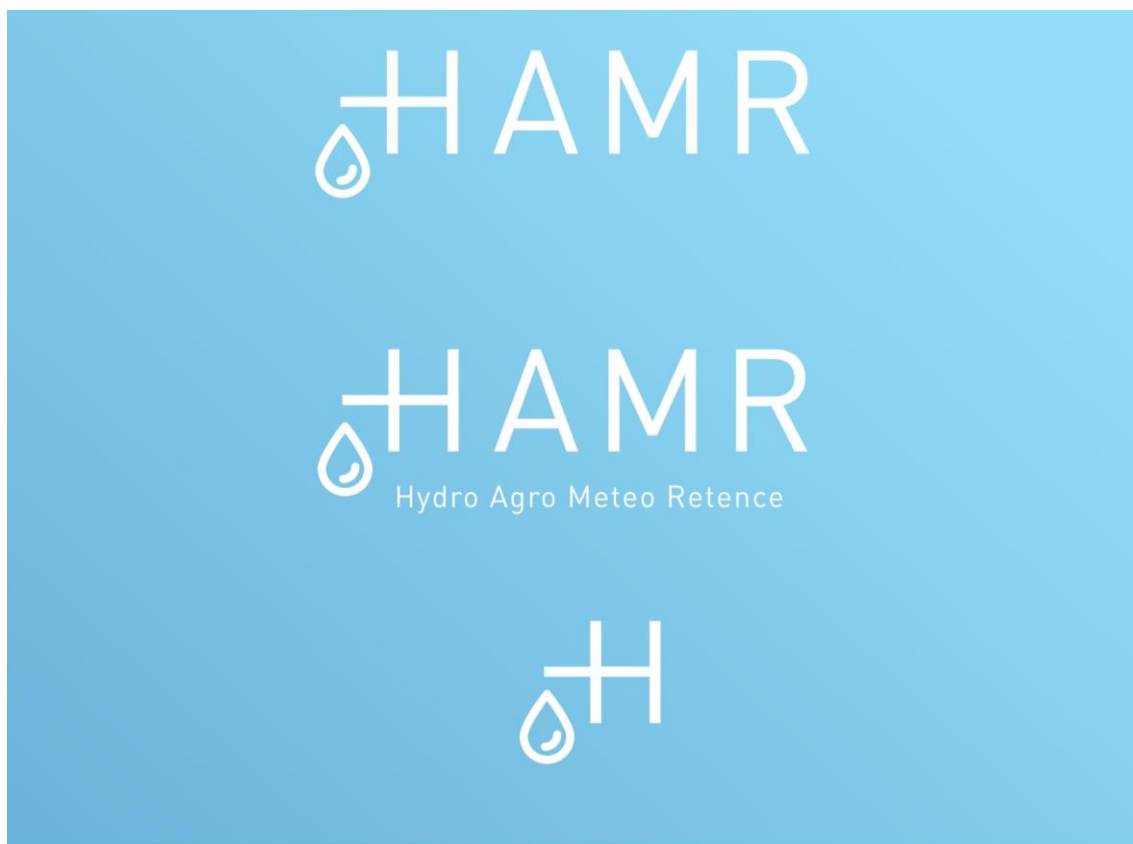
a také samotné slovo „hamr“ je ve spojitosti s vodou, konkrétně se jedná o dílnu, která je poháněna vodním kolem. Výhodou také je, že název je stejný i v anglickém jazyce.



Obrázek 2 Schéma systému pro předpověď hydrologické situace

Cílem je zajištění podkladů pro operativní řízení nádrží a vodohospodářských soustav pro dispečinky státních podniků Povodí a pro rozhodování „komisí pro zvládání sucha“ svolaných v souvislosti s probíhajícím suchem. Dále je to vytvoření platformy pro sdílení informací o aktuálních požadavcích na vodu ze strany odběratelů pro optimalizaci řízení.

Pro samotný systém bylo navrženo následující logo, viz Obrázek 3.

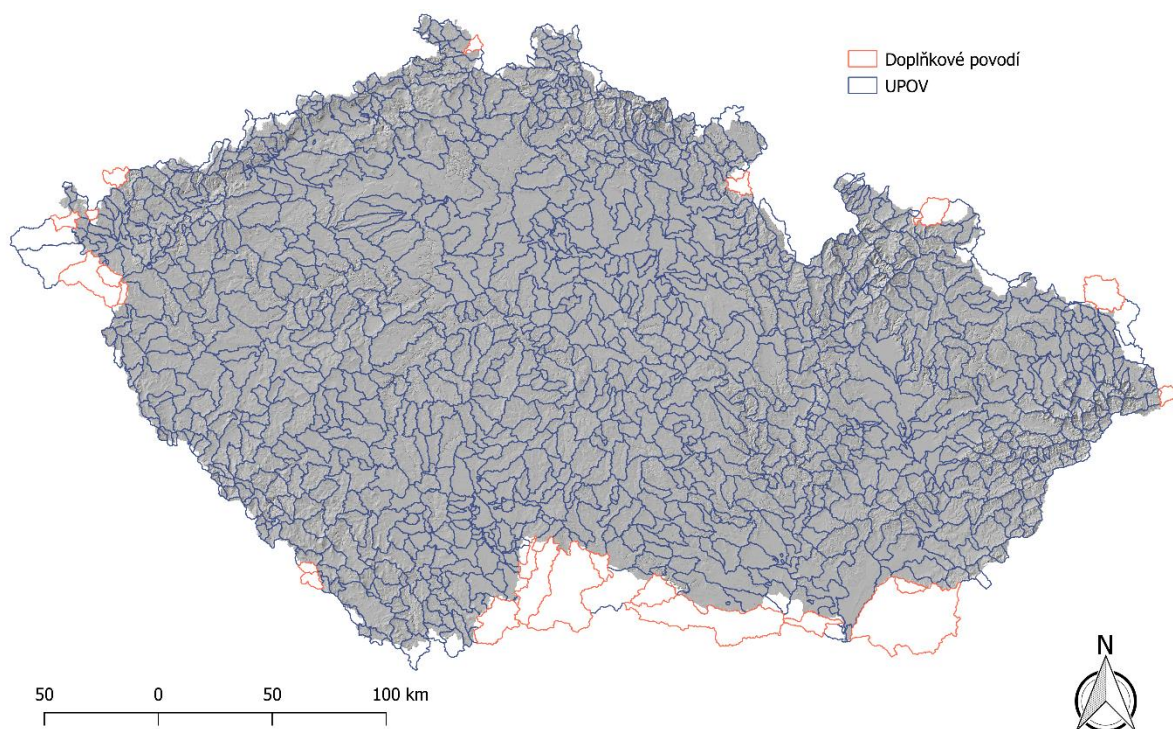


Obrázek 3 Logo systému HAMR

2 Data

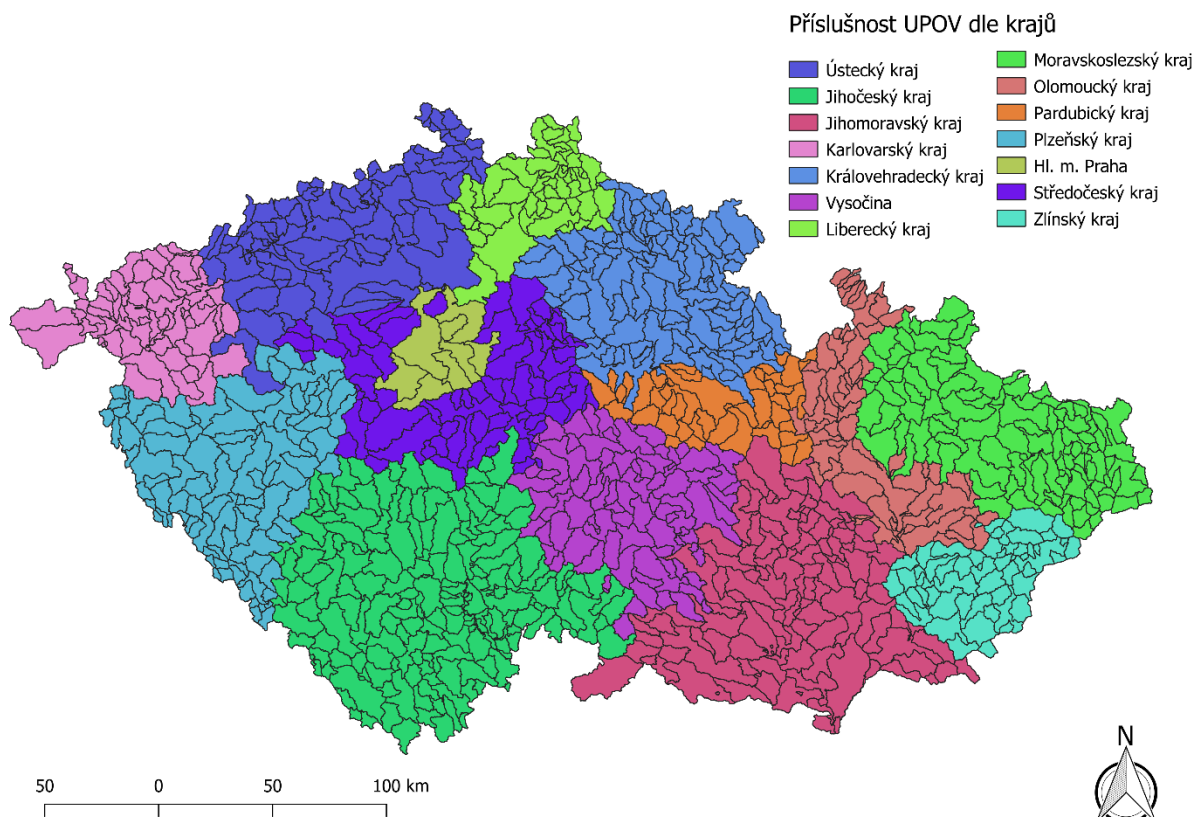
2.1 Popis UPOV

Útvar povrchových vod (UPOV) je dle definice v Evropské směrnici o vodní politice (EC 2000) „samostatný a významný prvek povrchové vody jako jsou jezero, nádrž, tok, řeka nebo kanál, část toku, řeky nebo kanálu, brakické vody nebo úsek pobřežních vod“. Tyto prvky byly určeny dle metodických doporučení uvedených v Guidance 2 (EC 2003). UPOV nejsou v čase neměnné jednotky, což dokládá fakt, že prvně bylo vymezeno 1002 útvarů (Fuksa, Prchalová et al., 2004), následně aktualizováno na 1141 UPOV (Fuksa, 2005). Aktuální vymezení je z roku 2010 (Langhammer et al.). Výchozí vrstvou pro poslední vymezení UPOV byl úsekový model říční sítě (VÚV 2010). Na těchto tocích byly za pomoci vrstvy hranic povodí identifikovány typologicky homogenní celky, a to i s ohledem na hydrogeologickou rajonizaci. Klíčovým parametrem při hodnocení homogenity byla stejnorodost pátečních toků (Langhammer et al. 2010). Pracovní vrstva čítá celkem 1121 UPOV, z nichž 1044 spadá do kategorie „řeka“ a 77 kategorie „jezero“. Tato vrstva byla pro účely projektu dále rozšířena o doplňkové celky UPOV, které jsou podstatné pro propagaci odtokového režimu dále po toku. Rozšíření bylo provedeno na místech, kde tok opouští hranice republiky a opět se vracel, případně vstupoval na území republiky po akumulaci odtoku z jiných zdrojových povodí mimo ČR. Většina z doplněných UPOV byla vymezena již při primárním dělení v roce 2004 (Fuksa, Prchalová et al. 2004), kdy hlavní princip vycházel z členění hydrografické sítě vodních toků dle Strahlera od povodí 4. řádu. Výsledná geometrie, která je na Obrázek 4, představuje kompromis mezi dosaženou mírou prostorové homogenity a velikostí správních jednotky.



Obrázek 4 Vymezené útvary povrchových vod dle Langhammera (2010) s doplňkovými pracovními útvary.

Na Obrázek 5 je zobrazena příslušnost jednotlivých UPOV do jednotlivých krajů. Toto rozdělení bylo provedeno z důvodu odlišné správní hranice pro kraje a rozvodnice UPOV.



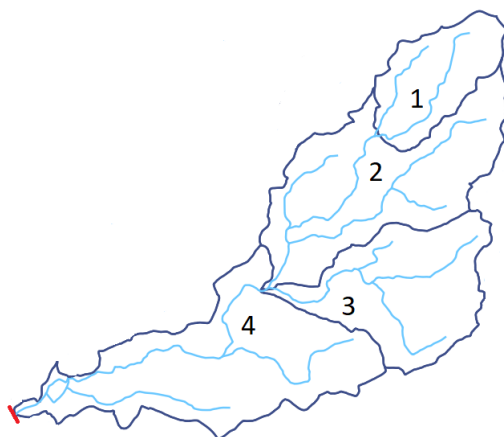
Obrázek 5: Příslušnost UPOV ke krajům dle dominantní plochy.

2.2 Topologie UPOV

Na základě vstupních podkladů vrstvy polygonů jezer, liniové vrstvy řek, vrstvy polygonů UPOV (VÚV 2017), byla jednoznačně určena topologie UPOV, tj. ke každému UPOV byl(y) stanoven(y) UPOV(y) zdrojové a UPOV recipientu. Samotnou vrstvu polygonů byla nutné opravit o drobné nesrovnalosti (zejména překryvy na hranicích apod.). Každému UPOV byl přiřazen odpovídající řád v soustavě povodí. Hodnota řádu UPOV je vyjádřena dle schématu

$$\text{řád UPOV}_i = \max (z \text{ řádů UPOV}_j) + 1; \quad j \in 0 \dots (i - 1).$$

Interpretace je následující: hodnota pramenného UPOV je tedy jasně rovna 1. Řád každého recipientu je o 1 vyšší než maximální řád ze všech UPOV, jež jsou jeho zdrojové. Maximální dosažené řády jsou v hraničních UPOV příslušných k povodím I. řádu. Jeden takový výsledek je znázorněn na Obrázek 6.



Obrázek 6 Stavba topologie. Čísla uvnitř polygonů udávají řád UPOV.

Celkové počty útvarů příslušných řádů jsou udány v Tabulka 1.

Tabulka 1 Rozsah a zastoupení řádů UPOV.

Řád	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 - 12	13 - 15	16 - 18	19 - 23
Σ	683	181	87	49	34	21	17	14	10	7	5	4	2	1

2.3 Hydrologické charakteristiky UPOV

Od roku 2013 jsou ČHMÚ poskytována data z aktualizovaného katastru vodnosti. Data měrných stanic byla statisticky zpracována a pomocí stanovených metodických postupů byly jejich statistické charakteristiky (průměr, koeficient variace, koeficient asymetrie atd.) extrapolovány do nepozorovaných profilů. Datová sada referenčního období 1981-2010 obsahuje tyto základní hydrologické údaje:

- dlouhodobá roční výška srážek na povodí,
- dlouhodobý průměrný průtok a
- m-denní průtoky.

Rastr dlouhodobého ročního úhrnu srážek v bodech byl vytvořen metodou orografické interpolace. Dlouhodobá roční výška srážek na povodí byla stanovena nástroji GIS překryvem polygonové vrstvy rozvodnic povodí a uvedené rastrové vrstvy aplikací zonální statistiky. Dlouhodobý průměrný průtok v nepozorovaných profilech byl odhadnut pomocí modifikované rovnice Schreibera (1904).

$$\frac{R_a}{P_a} = \frac{1}{e^{b_1 \left[\frac{PET_a}{P_a} \right]^{b_2}}} \quad (2.1)$$

kde R_a [mm] je odtoková výška, P_a [mm] dlouhodobé srážky a PET_a [mm] potenciální evapotranspirace. Volné parametry regresního vztahu b_1 a b_2 byly nastaveny pro jednotlivé hydrogeologické rajony.

M-denní průtoky vznikly na základě nového způsobu odvození pro období 1981-2010 (ČHMÚ, 2012). Zásadní rozdíl oproti předešlému odvození dat za období 1931–1980 spočívá v:

- Použití logaritmicko-normálního rozdělení s pěti parametry, které dokáže (logicky) daleko lépe popsat hydrologický režim toků než původně používané tříparametrické rozdělení.

- Využití parametrů statistického rozložení jako indikátorů hydrologického režimu vodních toků, který je dán tvarem čáry překročení lišícím se primárně hydrogeologickými podmínkami. Území ČR bylo za tímto účelem rozděleno do 18ti hydrogeologických oblastí, pro které byly odvozeny regresní vztahy pro jednotlivé parametry v závislosti na dalších fyzikogeografických charakteristikách území.
- Optimalizaci parametrů statistického rozložení na jednotlivých říčních úsecích hlavních toků a přítoků (vymezených profily s vodoměrným pozorováním) vůči empirickým (napozorovaným, tedy nikoli teoretickým) hodnotám M-denních průtoků s následným přepočtem výsledků na empirické hodnoty průtoků.
- Zahrnutí statistických charakteristik časových řad ovlivnění (odběrů, vypouštění atd.) přímo do výpočetního schématu jednotlivých řešených říčních úseků.

Optimalizační výpočty probíhají ve výpočetních úsecích. Každý úsek je v hydrologickém smyslu shora a zdola (příp. pouze zdola) vymezen profily vodoměrných stanic, kde jsou známy hodnoty M-denních průtoků a parametry jejich statistického rozdělení. Základními stavebními kameny výpočetních úseků jsou jednotlivá základní hydrologická povodí s odhadnutými parametry statistického rozdělení z regresních vztahů platných pro příslušnou hydrogeologickou oblast. Do výpočetních úseků se zadávají rovněž parametry jednotlivých antropogenních ovlivnění, příp. dalších prvků, které ovlivňují režim M-denních průtoků v daném úseku (ztráty vody v říční nivě, soustředěné přítoky z podzemních vod atd.). Pro získání korektních výsledků je nutná co největší věrohodnost vstupních dat pozorovaných průtoků ve vodoměrných stanicích i dat o antropogenním ovlivnění.

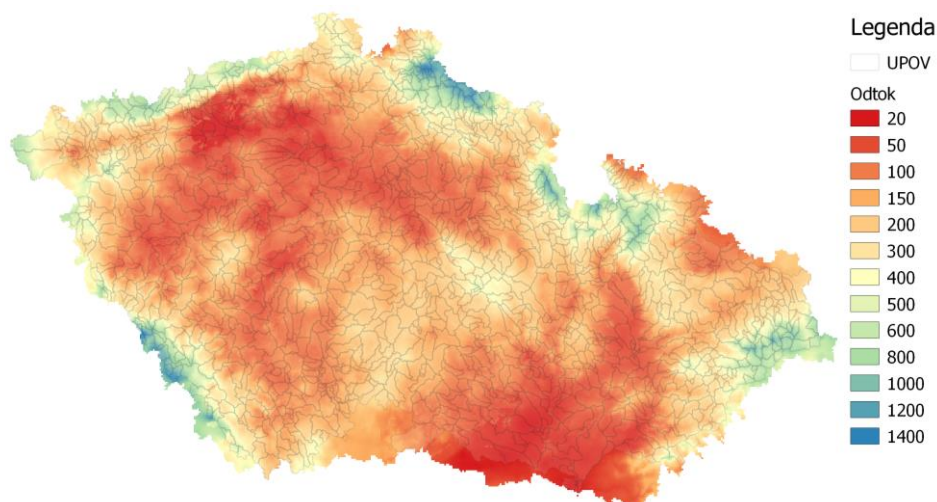
Hydrologické charakteristiky jsou v současnosti dostupné pro většinu povodí v ČR. Výjimkou je oblast povodí Ohře a Dolního Labe, kde dodávku dat očekáváme začátkem příštího roku.

2.4 Meteorologická data a odtok

Pro kalibraci hydrologického modelu byly využity denní časové řady srážek a teploty pro období 1981-2010. Tyto řady byly odvozeny z datasetu gridovaných srážek a teploty v rozlišení 25 km × 25 km (Štěpánek et al., 2011). Pro jednotlivá povodí byla interpolací Thiessenovými polygony spočítána průměrná srážka na povodí, ta byla následně korigována na základě vrstvy průměrných srážek (viz výše, stejné období, rozlišení 1 km × 1 km) tak, aby průměr srážek pro povodí byl stejný. Podobě byla korigována i teplota: průměrná teplota na povodí z gridované vrstvy byla opravena na základě rozdílu v nadmořské výšce odvozené z gridované vrstvy a z digitálního modelu terénu, přičemž byl uvažován gradient teploty 0.65 °C/ 100 m.

Dalším potenciálním zdrojem meteorologických dat jsou data používaná k běhu modelu SoilClim. Tato data byla získána od CzechGlobe během přípravy této zprávy. V další etapě bude testováno využití časových řad srážek a průměrné teploty jako vstupů do modelu Bilan. Použití stejných dat je vhodné za účelem zajištění konzistence modelů Bilan a SoilClim. Kromě srážek a teploty bude testováno využití (SoilClim) odhadů potenciální (případně skutečné) evapotranspirace, vlhkosti půdy a zásoby vody ve sněhu pro odhad parametrů modelu Bilan.

Dále byla využita vrstva průměrných odtokových výšek za období 1981-2010, kterou odvodili hydrologové na ČHMÚ a je zobrazena na Obrázek 7.



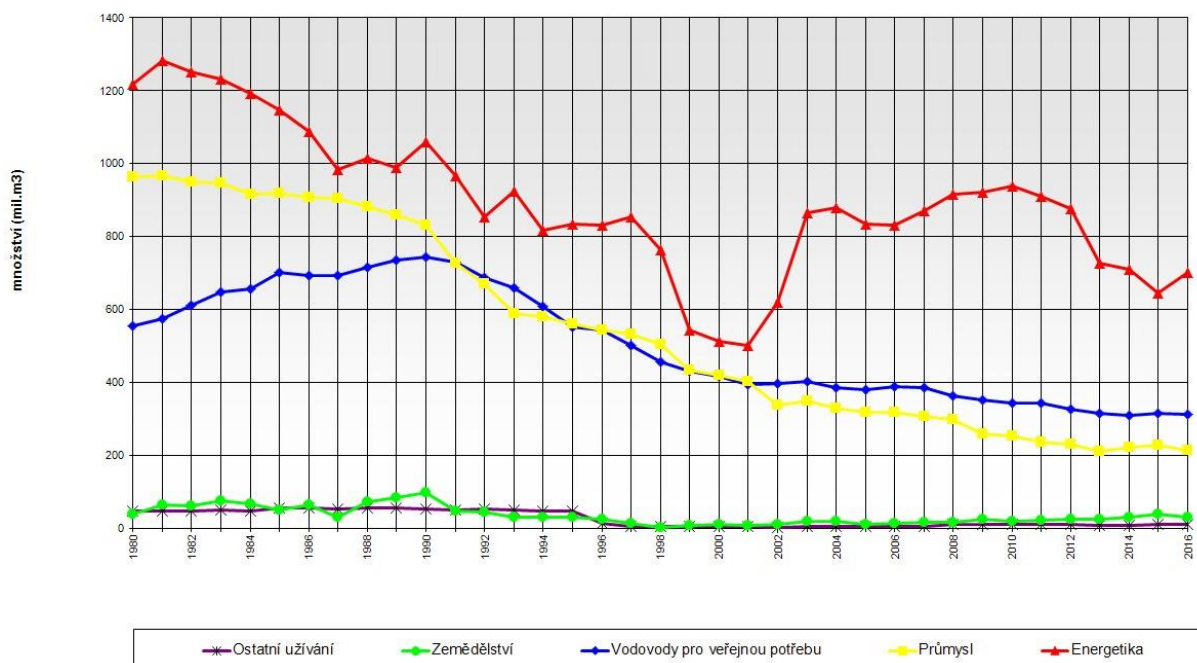
Obrázek 7 Průměrné roční odtokové výšky za období (1981-2010)

2.5 Užívání vod

Data o užívání vod v měsíčním kroku jsou dostupná v databázi užívání vod, kterou spravuje Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. Evidovány jsou subjekty s užíváním vyšším než 6000 m³ ročně nebo 500 m³ měsíčně. V databázi jsou k dispozici záznamy odběrů povrchových vod (POV), odběrů podzemních vod (POD) a vypouštění do povrchových vod (VYP) z období 1979 - současnost, nicméně vzhledem k neuspokojivé kvalitě starších dat byla uvažována novější datová sada (2006-2015).

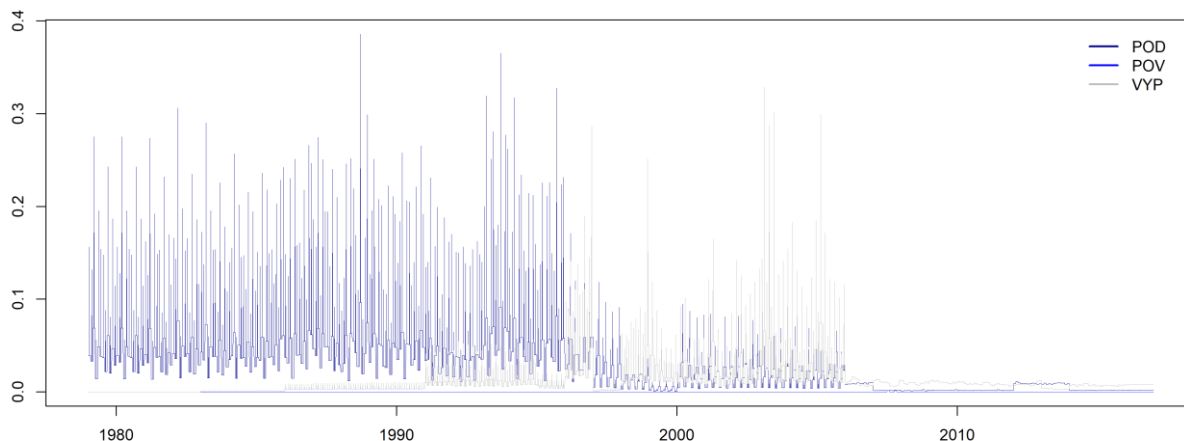
V užívání jako celku lze vidět pozitivní trend velkého snížení zejména v posledních letech, viz Obrázek 8.

Odběry povrchových vod v ČR v letech 1980-2016



Obrázek 8 Souhrnný vývoj odběrů povrchových vod pro území České republiky (1980-2016)

K použití při modelování hydrologické bilance v denním kroku bylo nutné desagregovat měsíční záznamy na denní. Výsledek procesu znázorněn na Obrázek 9. Vzhledem k tomu, že není znám denní režim provozu uživatelů, bylo užívání odvozeno také korekcí M-denních vod z průměrného přirozeného odtoku z UPOV. Tím byla rovněž lépe vypořádána prostorová příslušnost subjektu s užíváním, který pokud se nachází blízko hranice dvou či více UPOV, nemusí nutně ovlivňovat hydrologickou bilanci pouze jednoho.



Obrázek 9 Desagregované evidované užívání vod (na denní hodnoty) na toku Radbuza od pramene po Černý potok (Kód UPOV BER_0180).

Celkové roční užívání v letech 1979 – 2016 podle krajů. Údaje jsou uvedeny v mm.

2.6 Fyzicko-geografické poměry v ploše povodí UPOV

V následujícím textu jsou popsány hlavní fyzicko-geografické charakteristiky, které byly (nebo budou) šetřeny v ploše povodí UPOV a na jejich tocích. Tyto charakteristiky budou dále použity jako vysvětlující proměnné do modelu říční sítě, případně při kalibraci modelu Bilan.

Jedná se o:

1. fyzické charakteristiky povodí a říční sítě
 - plocha povodí
 - délka hlavního toku v povodí
 - délka celé říční sítě v povodí
 - hustota říční sítě v povodí
2. sklonové poměry v povodí
 - podélný sklon hlavního toku v povodí
 - průměrný, minimální a maximální sklon v ploše povodí
3. charakteristiky vycházející z CN křivek

- průměrné hodnoty čísla CN v povodí – pro I., II. a III. skupinu předchozích vláhových poměrů
- průměrné hodnoty potenciální maximální retence v povodí – pro I., II. a III. skupinu předchozích vláhových poměrů

2.6.1 Fyzické charakteristiky říčního systému povodí UPOV

V rámci říčního systému řešených povodí UPOV byly šetřeny základní fyzikální charakteristiky povodí: plocha povodí UPOV, celková délka hlavního toku v povodí, délka celé říční sítě dle vrstvy A02 Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD) – jemného členění, a hustota sítě vodních toků v povodí. Tyto charakteristiky jsou následně využívány pro hydrologické modelování na říční síti povodí UPOV v modelu BILAN.

2.6.1.1 Metodika stanovení fyzikálních charakteristik

Veškeré délkové a plošné míry, jako je rozloha povodí UPOV nebo délka říčních úseků, byly vyšetřeny v Esri arcGIS Desktop aplikaci funkce Calculate Geometry.

Hustota sítě vodních toků ρ_T pak vychází z přepočtu celkové délky všech toků v povodí UPOV (L_T) na jednotkovou plochu (Hrádek et Kuřík, 2002). Hustota říční sítě je znázorněna na Obrázek 10.

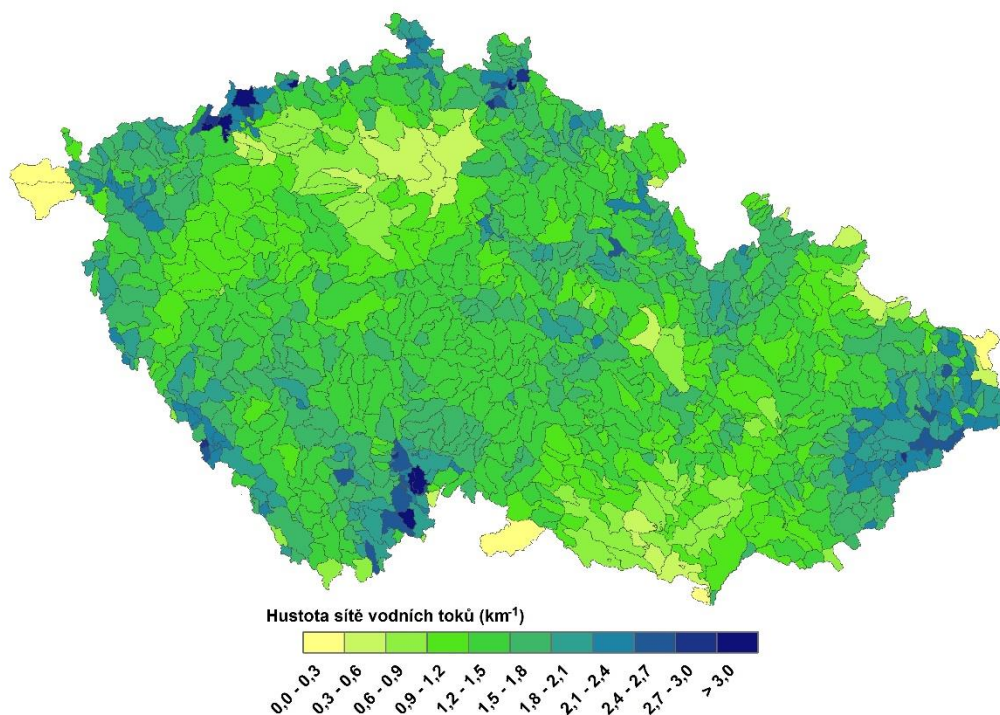
$$\rho = \frac{L_T}{P} \quad (2.1)$$

kde P je rozloha povodí UPOV. Uvádí se v jednotkách km/km^2 , tj. km^{-1} . Obvyklá hodnota ρ_T v případě horských povodí ČR dosahuje i více než 1 km^{-1} , zatímco u nížinných povodí bývá hustota říční sítě obvykle nižší.

Metodika určení podélného sklonu říčního systému v povodí UPOV je popsána v kapitole Sklonové poměry v ploše povodí UPOV.

2.6.1.2 Zdroj dat pro odvození fyzikálních charakteristik v povodí UPOV

Zdrojem dat pro odvození fyzikálních charakteristik v povodí UPOV byly přímo vrstva říčních úseků hlavních toků UPOV, vrstva 1 121 povodí UPOV a dále vrstva vodních toků s jemným členěním A02 z Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD).



Obrázek 10 Hustota říční sítě v povodí UPOV

2.6.2 Sklonové poměry v ploše povodí UPOV

Sklonové poměry patří mezi základní geomorfologické charakteristiky povodí. Řadí se rovněž mezi primární charakteristiky terénu, protože je lze spočítat přímo z hodnot nadmořských výšek. Sklon je první derivací nadmořské výšky. V hydrologii se sklonové poměry využívají především k odhadům rychlosti složek přímého odtoku – povrchového a hypotermického.

Základní sklonovou charakteristikou je průměrný sklon povodí, hodnota uváděná v procentech nebo stupních, eventuálně bezrozměrně. V horských povodích je hodnota průměrného sklonu obvykle vyšší než 10 %, ale většinou ani zde nepřevyšuje 20 %. V nížinných oblastech bývá sklon v řádu promile, maximálně jednotek procent.

Z průměrného sklonu povodí bývá vyčleňována dílčí charakteristika, sklon svahů. Jde o průměrnou hodnotu počítanou z menší plochy, než je celé povodí a obvykle se využívá pouze v případech, že povodí je nehomogenní a průměrná hodnota z celé jeho plochy by tak nebyla relevantním údajem. Alternativou k této charakteristice je také průměrný sklon levé a pravé části povodí.

Třetí sklonovou charakteristikou je sklon na říční síti. Jedná se o průměrnou hodnotu podélného sklonu vodních toků v povodí, případně hlavního toku.

2.6.3.1 Metodika stanovení sklonových poměrů

První dvě uvedené charakteristiky, tedy sklony v ploše povodí, lze odvodit několika způsoby. Nejjednodušší metodou je stanovení tzv. náhradního sklonu I_s (%) podle vztahu (Hrádek et Kuřík, 2002)

$$I = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{P}} \quad (2.2)$$

kde $H_{\max}$ a $H_{\min}$ jsou maximální, resp. minimální nadmořská výška v rámci analyzované oblasti (povodí) a P je plocha povodí. Jde o hrubší odhad průměrného sklonu. V oblastech s homogennějším terénem je poměrně přesný, v horských oblastech s nehomogenním terénem bývá odchylka od skutečné hodnoty zpravidla do 5 %.

Dalším způsobem odvození průměrného sklonu povodí je vztah podle Herbsta (Hrádek et Kuřík, 2002). Jde o vážený průměr nadmořských výšek jednotlivých výškopisných vrstevnic procházejících analyzovaným územím, přičemž každá taková vrstevnice je vážena délkou jejího úseku v území:

$$I = \frac{\Delta h \sum_{i=1}^n d_i}{P} \quad (2.3)$$

kde d_i je délka i -té vrstevnice, Δh je výškový interval mezi sousedními vrstevnicemi, n je počet vrstevnic v povodí a P je plocha povodí. Tato metoda je přesnější než náhradní sklon.

Nevýhodou této metody je však její zdlouhavost, zejména pokud by se měla aplikovat bez užití GIS.

V dnešní době nejrozšířenější metodou šetření průměrného sklonu v povodí je využití nástrojů GIS na základě rastrových výškopisných podkladů, tzv. digitálního modelu terénu (DMT). DMT je topografický rastr, který mapuje povrch terénu prostřednictvím nejčastěji čtvercových pixelů, přičemž každý pixel nese informaci o nadmořské výšce. Funkce GIS přetvoří výškopisný rastr v analogický rastr s hodnotami sklonu. Průměrný sklon v celém analyzovaném území je průměrnou hodnotou všech dílčích sklonů z každého pixelu, který do daného území spadá (metoda zonální statistiky).

Jde o velice efektivní metodu, jejíž přesnost závisí především na podrobnosti vstupního modelu terénu, tj. na velikosti jednotlivých pixelů rastru. Úskalím této metody může být nedostatečně podrobný výškopisný rastr, který nadměrně vyhlazuje drobnější terénní nerovnosti, což v závěru vede k podhodnocení průměrného sklonu v analyzovaném území.

V softwaru Esri ArcGIS Desktop slouží pro vyšetření sklonu v ploše povodí funkce Slope. Tento nástroj vychází z jednoduchého algoritmu, který pro každý pixel rastru DMT počítá rozdíly nadmořských výšek mezi ním a jeho osmi sousedními pixely. Maximální rozdíl ve výškách identifikuje nejstrmější sklon. ArcGIS pro výpočet sklonu využívá algoritmus, který popisují Burrough et McDonell (1998). Nástroj postupně prochází celý rastr modelu terénu prostřednictvím okna o velikosti 3 x 3 pixely ležícího kolem centrálního řešeného pixelu a dle výše zmíněného algoritmu postupně vyhodnotí sklon pro každý pixel. Lze volit mezi stupni nebo procenty.

Poslední charakteristikou sklonu byl podélný sklon toků. Průměrný podélný sklon říčního úseku lze vypočítat dle jednoduchého vztahu (Hrádek et Kuřík, 2002)

$$I_s = \frac{H_{\max,U} - H_{\min,U}}{L} \quad (2.4)$$

kde $H_{\max,U}$ a $H_{\min,U}$ jsou maximální, resp. minimální nadmořská výška na řešeném úseku vodního toku a L je délka úseku toku. Výsledek je bezrozměrný, resp. přenásobíme-li 100, tak v %.

2.6.3.2 Zdroj dat pro odvození sklonových poměrů v povodí UPOV

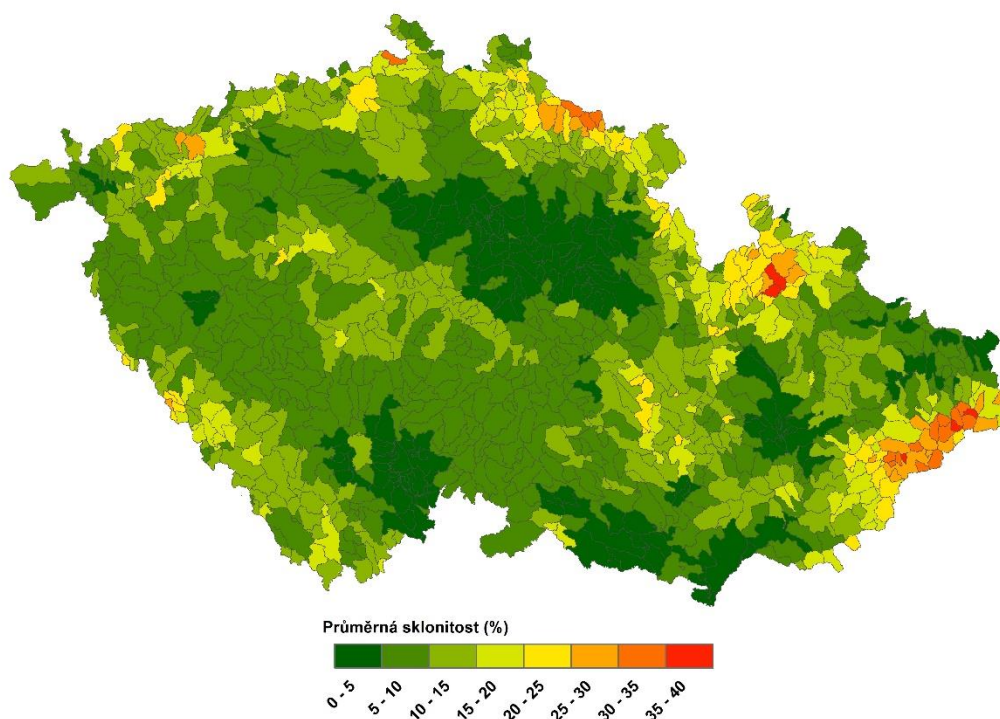
Zdrojem dat pro DMT, z něhož byla následně odvozena sklonitost, byl digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G). DMR 4G představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností

upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v pravidelné síti (5 x 5 m) bodů. Nadmořská výška je ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv) s úplnou střední chybou výšky 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu. Pro naše účely byl DMR 4G zjednodušen na již zmíněné rozlišení 10 x 10 m. DMR 4G je určen k analýzám terénních poměrů regionálního charakteru a rozsahu.

2.6.3.3 Sklonové poměry v povodí UPOV

Sklonové poměry v povodí UPOV byly šetřeny v programu Esri ArcGIS Desktop užitím výše uvedené funkce Slope na základě zmíněného DMT s velikostí pixelu 10 x 10 m. Výsledný rastr sklonitosti terénu byl počítán v procentuální míře. Průměrné sklony pro jednotlivá povodí a dílčí části povodí byly vyhodnoceny pomocí statistické zonální analýzy ploch, kdy jsou brány v potaz hodnoty sklonu z každého pixelu rastru v zájmovém povodí.

Průměrné sklony povodí UPOV jsou znázorněny na Obrázek 11. Průměrná sklonitost v největší míře nepřesahuje 10 %, pouze u horských povodí nabývá až 25 %, v případě Krkonoš, Jeseníků a Beskyd až 35-40 %.



Obrázek 11 Průměrné sklony v plochách povodí UPOV

2.6.3 Čísla CN a retenční schopnost povodí UPOV

Pro stanovení retenční schopnosti povodí bude využita metoda odtokových křivek CN (Curve Number). Díky této metodě lze zjistit množství srážkové vody, které je povodí schopno na svém území zadržet. Metodický postup stanovení retenční schopnosti povodí na základě čísla CN při tom zohledňuje závislost retence na hydrologických vlastnostech půd, počátečním stavu nasycenosti půd (předchozích vláhových poměrech), způsobu využívání zemědělské krajiny (druzích přítomných zemědělských plodin) a na hydrologických podmínkách (ovlivnění infiltrace vegetačním pokryvem).

Dále lze metodou CN křivek stanovit velikost přímého odtoku z malých povodí na základě srážkového úhrnu. CN křivka vyjadřuje závislost výšky odtoku na výšce srážkového úhrnu.

2.6.3.4 Metodika stanovení CN a retence povodí

Metoda CN vychází z empiricky stanovených vztahů. U srážkoodtokové události se pro daný čas předpokládá, že poměr mezi skutečnou retencí F a maximální potenciální retencí S na povodí je roven poměru mezi objemem odtoku Q a objemem srážky P redukováným o počáteční ztrátu I_a , viz následující vztah (Hrádek et Kuřík, 2002):

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (2.5)$$

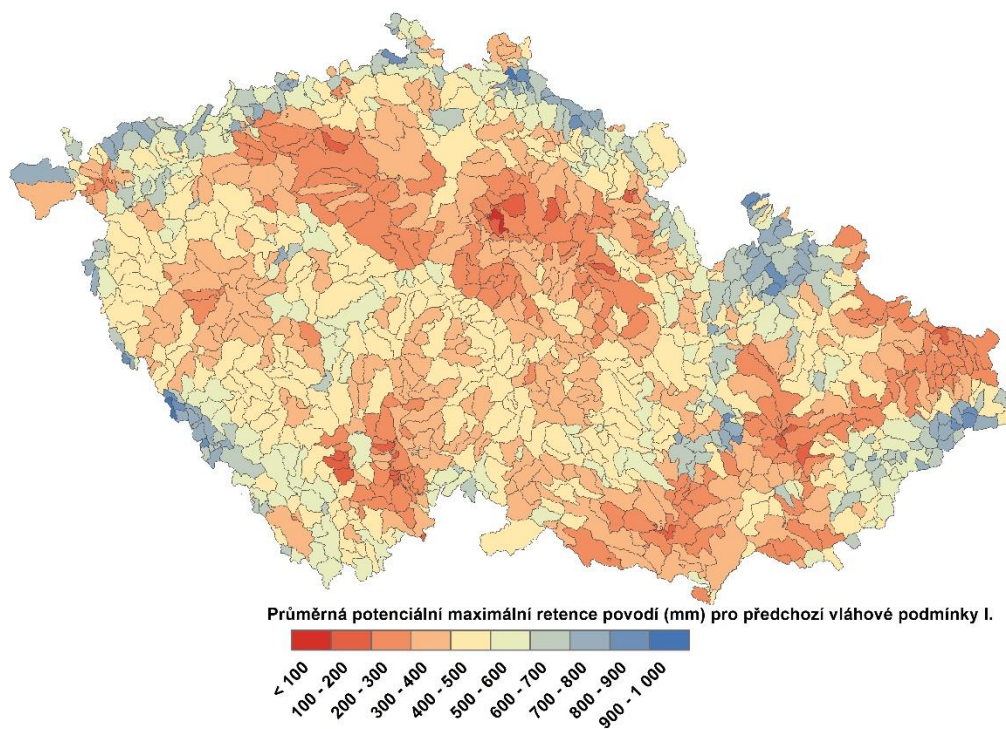
Počáteční ztráta vody I_a je schopnost povodí okamžitě zadržet jistý počáteční úhrn srážky, který dokud není přesažen, nedojde k vyvolání žádného přímého odtoku. Teprve po vyčerpání této kapacity se přímý odtok objeví. Velikost počáteční ztráty I_a se obvykle počítá jako 20 % maximální potenciální retence povodí S .

Maximální potenciální retence povodí S je dána číslem CN křivky dle empiricky stanoveného vztahu (Hrádek et Kuřík, 2002):

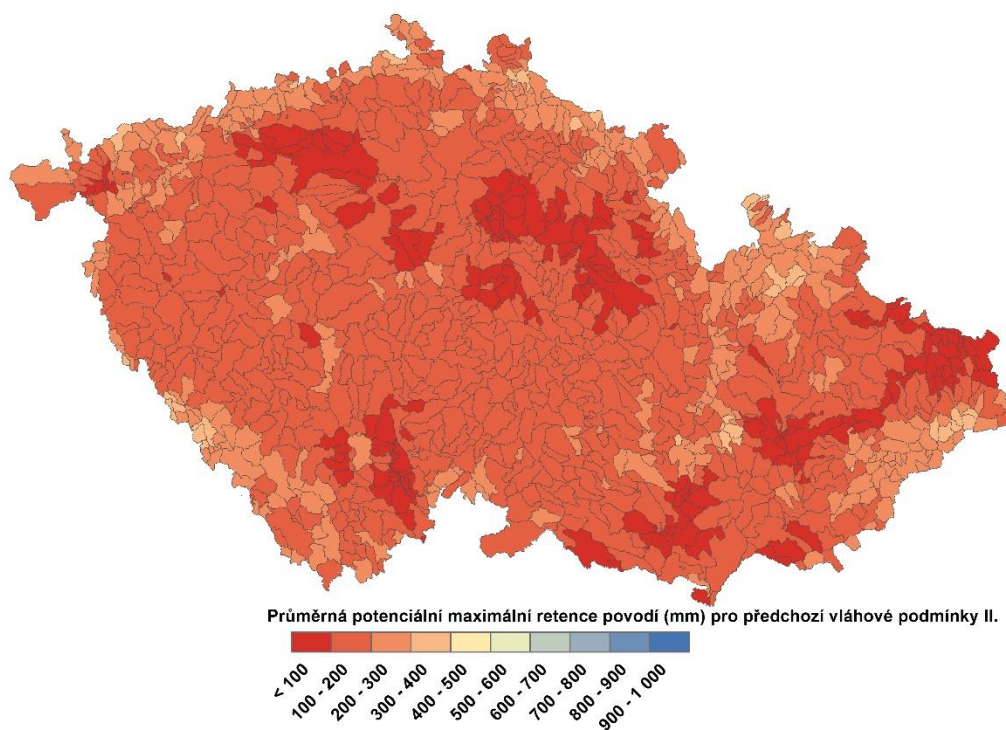
$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2.6)$$

Čísla CN křivek nabývají obvykle hodnot od 30 v případě největších ztrát vody v povodí do 100 v případě nulové retence.

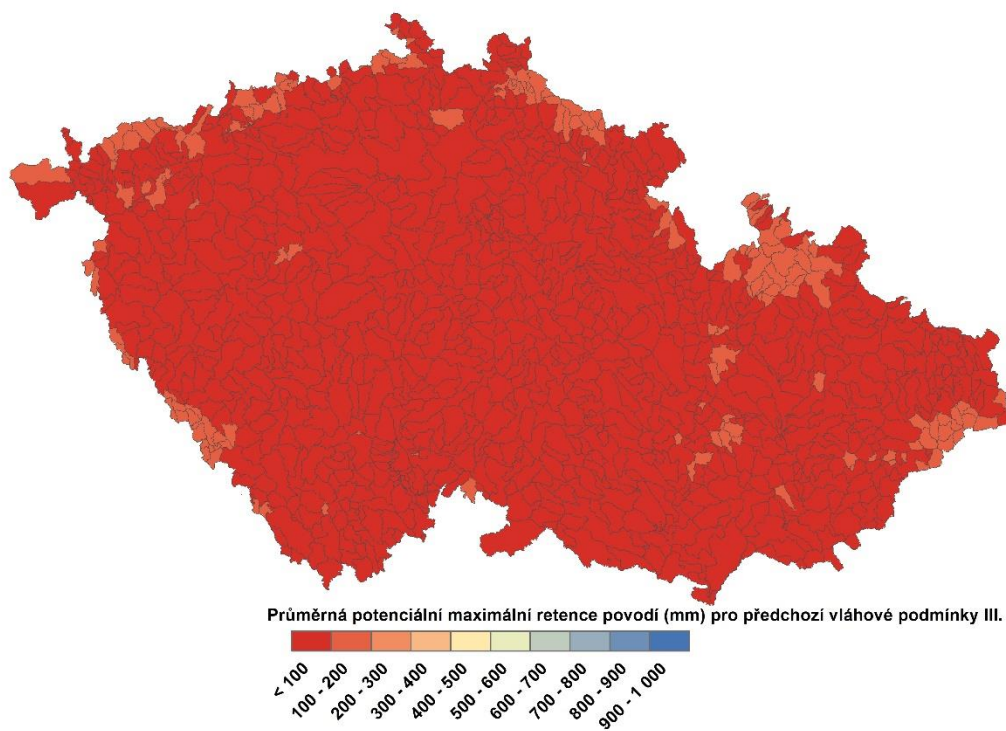
Následující Obrázek 12, Obrázek 13 a Obrázek 14 znázorňují tři varianty průměrné potenciální maximální retence v ploše povodí UPOV lišící se dle tří kategorií předchozích vláhových poměrů. V případě nejpříznivější varianty z hlediska vláhových poměrů (Obrázek 12) se pohybuje retence napříč republikou v rozmezí 100 až 1 000 mm sloupce vody, přičemž největší retenční schopnost mají horská povodí. U střední třídy předchozích vláhových poměrů (Obrázek 13) však retenční potenciál rapidně klesá (např. u horských povodí na 300 až 400 mm) a u nejsušší varianty (Obrázek 14) jsou povodí schopna potenciálně zadržet maximálně do 200 mm.



Obrázek 12 Průměrná potenciální maximální retence povodí UPOV pro nejvlhčí variantu předchozích vláhových podmínek



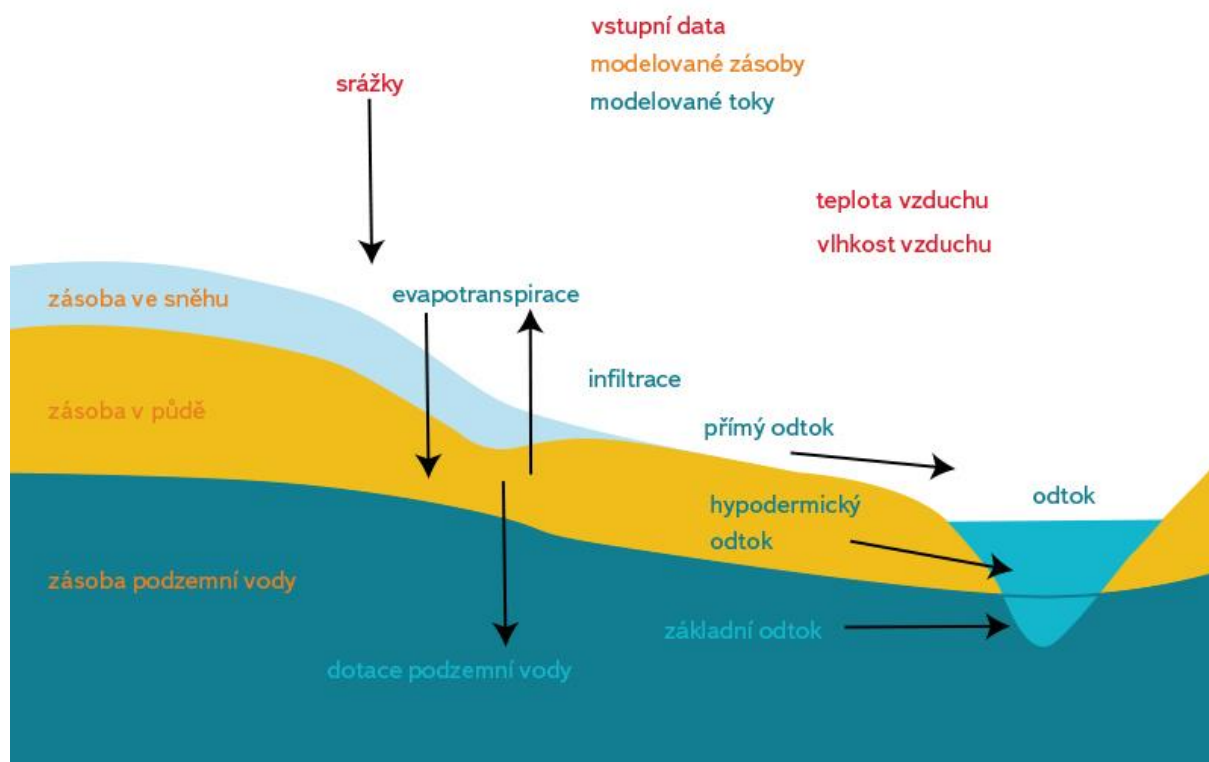
Obrázek 13 Průměrná potenciální maximální retence povodí UPOV pro střední variantu předchozích vláhových podmínek



Obrázek 14 Průměrná potenciální maximální retence povodí UPOV pro nejsušší variantu předchozích vláhových podmínek

3 Bilan

Konceptuální model BILAN (Vizina, 2015), simulující hydrologickou bilanci v denním či měsíčním časovém kroku, je ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka vyvíjen a používán od 90. let 20. století. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí, a v zóně podzemní vody. Jako ukazatel balance toků energie, která hydrologickou bilanci významně ovlivňuje, je použita teplota vzduchu. Výpočtem se modeluje potenciální evapotranspirace, územní výpar, infiltrace do zóny aerace, průsak touto zónou, zásoba vody ve sněhu, zásoba vody v půdě a zásoba podzemní vody. Odtok je modelován jako součet tří složek: dvě složky přímého odtoku (zahrnující i hypodermický odtok) a základní odtok. Schéma modelu je uvedeno na Obrázek 15.



Obrázek 15 Schéma modelu Bilan

V roce 2011 byla původní softwarová implementace modelu BILAN, napsaná v jazyce Object Pascal, kompletně přepsána do jazyka C++, čímž se výrazně zjednodušil další vývoj modelu. Zároveň byla vytvořena dvě rozhraní k modelu: grafické uživatelské rozhraní (GUI) založené na multiplatformní knihovně Qt a balík pro statistické a programovací prostředí R. Obě rozhraní se vzájemně doplňují (individuální a hromadné zpracování). K dispozici je také online verze modelu na adrese <http://bilan.vuv.cz>.

3.1 Nastavení

Byla použita varianta modelu v denním časovém kroku se šesti volnými parametry (*Spa*, *Alf*, *Dgm*, *Soc*, *Mec*, *Grd*). Model Bilan byl upraven tak, aby umožňoval kalibraci na statistické charakteristiky vybraných výstupních veličin (např. průměrný průtok atp.). Model byl kalibrován na hydrologické charakteristiky povodí UPOV (m-denní průtoky a dlouhodobý průměrný průtok) poskytnuté v rámci

projektu ČHMÚ. Volné parametry vah mezi kalibračními kritérii byly nastavovány v průběhu kalibrace. K stanovení hodnot parametrů byl použit globální optimalizační algoritmus diferenciální evoluce. Pro kalibrační kritéria byly napsány funkce ke stanovení součtu maximálních odchylek mezi kvantily a zjištění maximálního rozdílu v kvantilech. Chyba byla vždy stanovena jako absolutní rozdíl mezi vstupními a modelovanými hodnotami. V budoucnu bude pro zajištění robustnosti kalibrace uvažována i vlhkost půdy, případně skutečná evapotranspirace a zásoba vody ve sněhu z modelu SoilClim.

Vstupní časové řady srážek [mm] a průměrných teplot [°C] příslušné danému UPOV byly odvozeny z rastru denních meteorologických dat (viz kap. 2.4). V budoucnu budou tato data nahrazena (bude-li to možné) daty odvozenými pro model SoilClim. Kalibrační časové řady byly dostupností měření omezeny na hydrologické roky 1982 až 2010. Potenciální evapotranspirace [mm] byla spočítána modelem Bilan pomocí vztahu odvozeného Oudinem, založeném na zeměpisné délce a šířce (Oudin et al., 2010).

$$PET(i) = \begin{cases} \frac{0,408R_e(T(i)+5)}{100} & pro T(i) + 5 > 0 \\ 0 & pro T(i) + 5 \leq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

3.2 Kalibrace

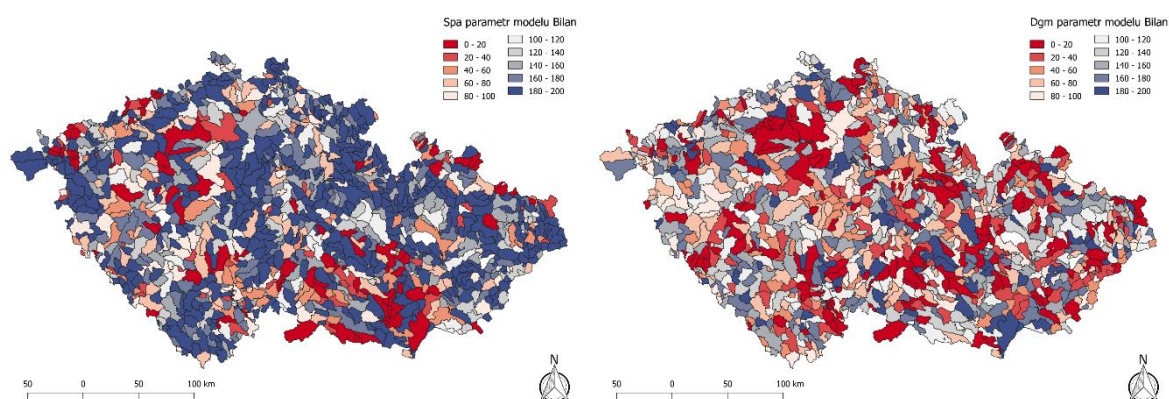
Model byl kalibrován celkem na 1136 jednotkách (původní soubor UPOV + doplňkové). Proces byl prováděn vždy dávkově pro všechny UPOV daného řádu. Poté byla prováděna manuální kontrola případně re-parametrizace modelu pro neuspokojivě odhadnuté UPOV. Poté byla za pomoci průměrného odtoku ze všech zdrojových UPOV kalibrovány parametry recipientu o řádu a jedna vyšším. UPOV typu „jezero“ procházejí modelem pouze formálně, jejich modelované odtoky byly nahrazeny bilancí v podobě srážky ponížené o modelovanou skutečnou evapotranspiraci. Postupně bylo použito množství kalibračních schémat, která jsou shrnuta v Tabulka 1. Pro kalibrační kritéria byly napsány funkce ke stanovení součtu maximálních odchylek mezi kvantily a zjištění maximálního rozdílu v kvantilech. Chyba byla vždy stanovena jako absolutní rozdíl mezi vstupními a modelovanými hodnotami. Dále byl pro zajištění robustnosti kalibrace uvažován parametr vlhkosti půdy a skutečná evapotranspirace, která byla spočítána modelem SoilClim. Vstupní časové řady srážek P [mm] a průměrných teplot [°C] příslušné danému UPOV tvořily řady odvozené z rastru denních meteorologických dat (viz kap. 2.5) a vstupy modelu SoilClim. Při kalibraci za použití potenciální evapotranspirace bylo použito kritérium Kling-Gupta na odchylky mezi modelovanou skutečnou a skutečnou evapotranspirací modelu SoilClim. Dále bylo metodou bootstrap vzorkováno pro každý UPOV 500x parametr AWV z empirického rozdělení tohoto parametru. Tato informace byla následně použita k omezení parametru *Spa* modelu Bilan z původního rozsahu (0-200) na průměrné AWV ± 2 sd. Při určování parametrů modelu byla kromě M-denních průtoků použita experimentálně i jejich korigovaná varianta, determinovaná poměrem mezi průměrným dlouhodobým ročním odtokem a potenciálním přirozeným odtokem z daného UPOV.

Tabulka 2 Použitá kalibrační schémata

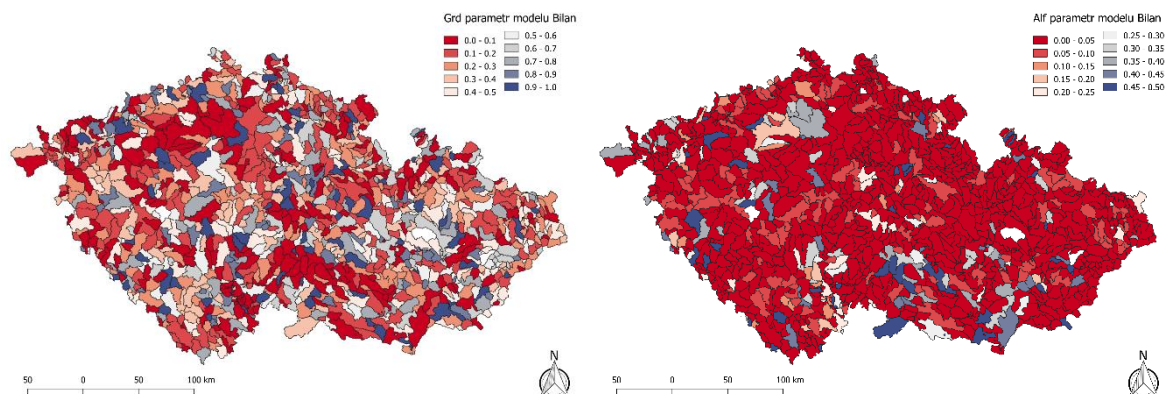
Vstupní meteorologická data	Užívání	Složky objektivní funkce				
		Q _a	M-denní (max. kvantil)	M-denní (abs. odchylka)	X	X
Štěpánek	NE	Q _a	M-denní	M-denní	X	X

P, T			(max. kvantil)	(abs. odchylka)		
Štěpánek P, T	NE	Q _a	M-denní (max. kvantil)	M-denní (abs. odchylka)	SoilClim ET	X
Štěpánek P, T	ANO	Q _a	M-denní (max. kvantil)	M-denní (abs. odchylka)	X	X
SoilClim P, Tavg	NE	Q _a	M-denní s korekcí (max. kvantil)	M-denní s korekcí (abs. odchylka)	X	X
SoilClim P, Tavg	NE	Q _a	M-denní s korekcí (max. kvantil)	M-denní s korekcí (abs. odchylka)	SoilClim ET	X
SoilClim P, Tavg	NE	Q _a	M-denní s korekcí (max. kvantil)	M-denní s korekcí (abs. odchylka)	SoilClim ET	Spa ~ AWW

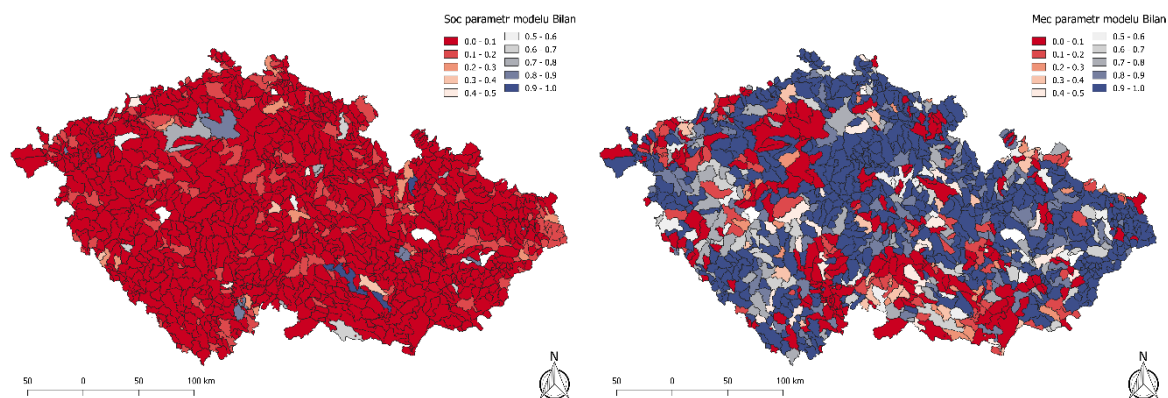
Výstupy kalibrací jsou parametry UPOV příslušné dennímu typu modelu, které byly ukládány společně s metadaty a časové řady odtoku. Výsledné parametry jsou uvedeny na Obrázcích XX:XX



Obrázek 16: Parametr Spa modelu Bilan (vlevo) označující kapacitu zásoby půdní vlhkosti a parametr Dgm, reprezentující koeficient mezi teplotou a táním sněhu .

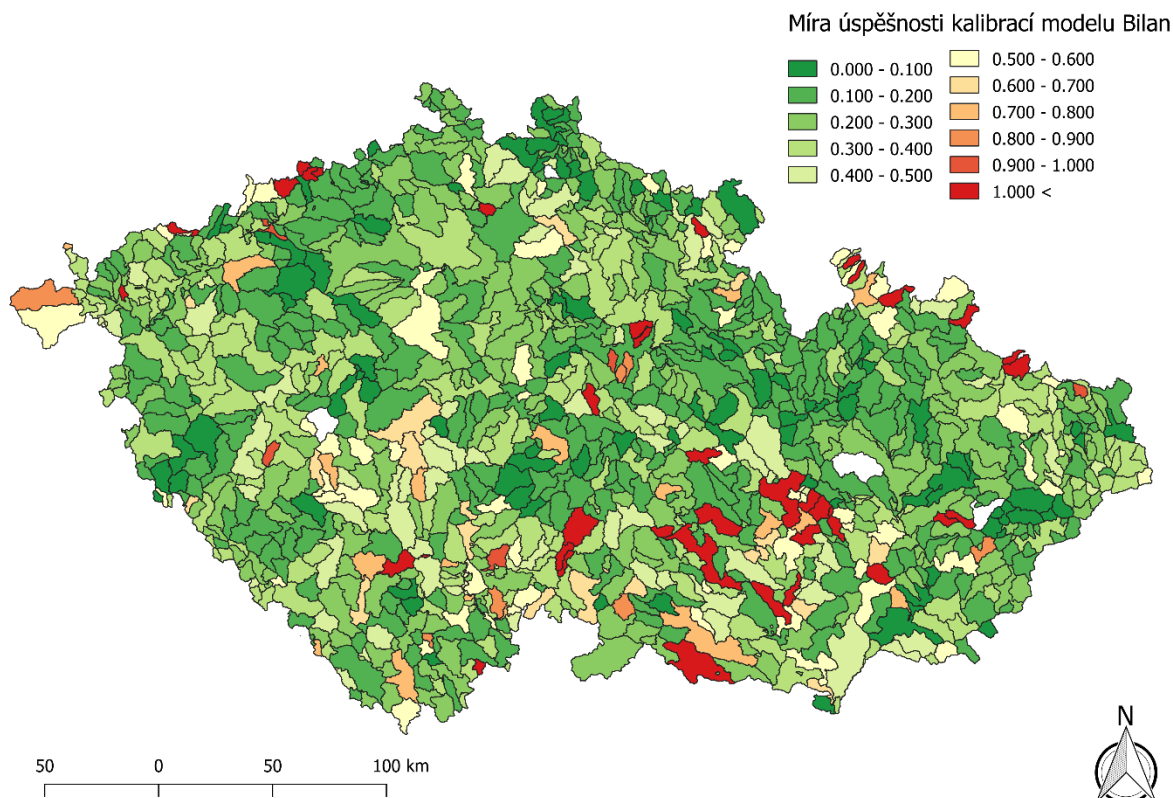


Obrázek 17: Parametr základního odtoku modelu Grd (vlevo) a parametr Alf, určující odtok ze zásoby do přímého odtoku.



Obrázek 18: Parametry dělení perkolace na přímý odtok a dotaci podzemní vody pro letní podmínky Soc (vlevo) a zimní podmínky Mec..

Na Obrázek 19 je zobrazena úspěšnost jednotlivých kalibrací modelu Bilan. Míra úspěšnosti kalibrace modelu je vyjádřena jako poměr průměru absolutních chyb mezi jednotlivými kvantily modelovaných a poskytnutých M-denních průtoků ku jejich velikosti. Informační hodnota chyby je tedy u všech kvantilů stejná. Ve většině případů bylo dosaženo dobré shody, zejména tomu tak bylo u útvarů méně ovlivněných, přírodě blízkého charakteru. Tyto jsou nejčastěji zdrojovými UPOV prvního řádu. V ojedinělých případech byla míra dosažené shody nedostačující až úplně špatná, k čemuž docházelo zejména na území Jihomoravského kraje a obecně několika nádrží v celé ČR. Tento fakt lze přičíst vyšší míře antropogenního ovlivnění hydrologického režimu. Vliv UPOV s horší mírou shody na M-denních průtocích byl částečně eliminován agregací s lépe modelovanými denními řadami dále po toku.

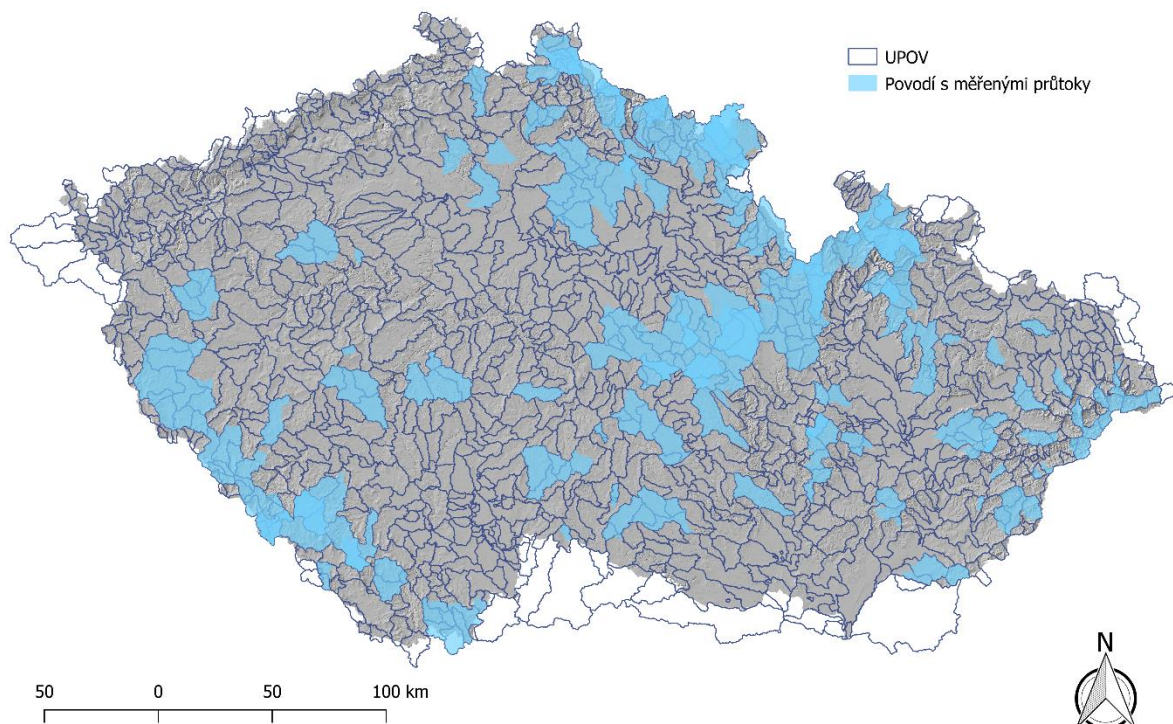


Obrázek 19 Míra dosažené shody jako vzájemný poměr chyb mezi M-denními kvantily.

Za pomoci simulovaných odtoků z povodí, byl zrekonstruován celkový roční odtok z povodí v letech 2000 – 2016 (Příloha 1). Na obrázcích jsou dobře patrné zejména roky 2003 a 2015, kdy se na celém území České republiky vyskytovalo intenzivní hydrologické sucho. UPOV s nízkým až velmi nízkým odtokem jsou identifikovány v oblastech Zlínského a Jihomoravského kraje a Středočeského a Královéhradeckého kraje, což je v souladu s dosavadními poznatky. Pouze v letech 2001, 2002, 2010 a 2013 byl z většiny UPOV povrchový odtok více jak 300 mm.

3.3 Validace

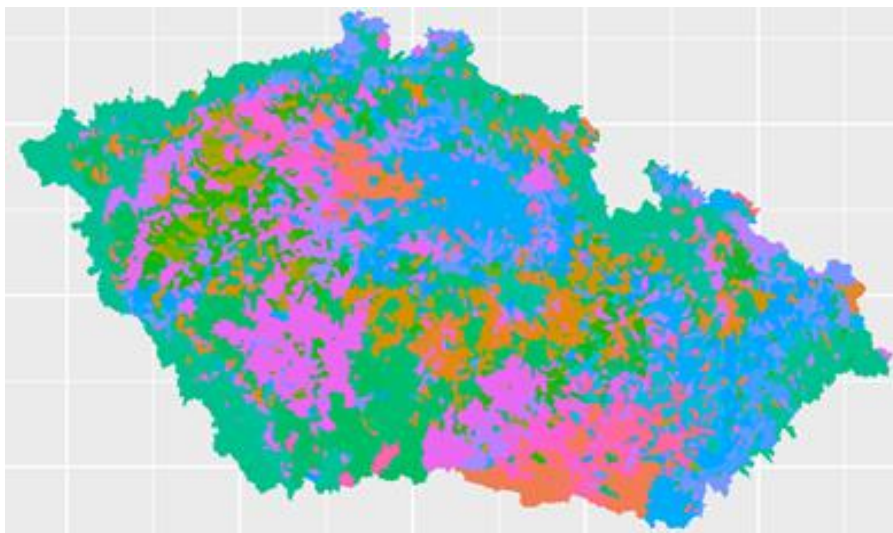
K validaci průtoků bylo primárně užito záznamů ze 156 měrných stanic (rozmístění viz Obrázek 20). Za validační kritéria byla použita standardní sada (NS, MSE, RMSLE atp.). Vzhledem k tomu, že model byl kalibrován na m-denní průtoky, byla míra chyby v jednotlivých dnech více variabilní než dlouhodobější odezva. Na tuto chybu byl model kalibrován z velké míry velmi úspěšně. Parametr modelu Bilan *Spa* byl v rámci jedné z kalibrací svázán s maximální kapacitou půdní vláhly simulovanou modelem SoilClim.



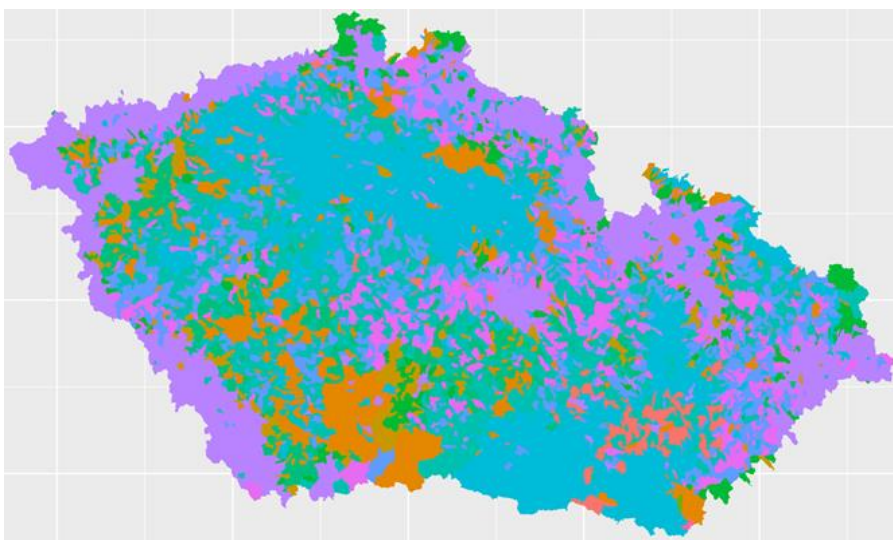
Obrázek 20 Povodí s měřenými průtoky určenými k validaci modelu.

3.4 Clusterová analýza

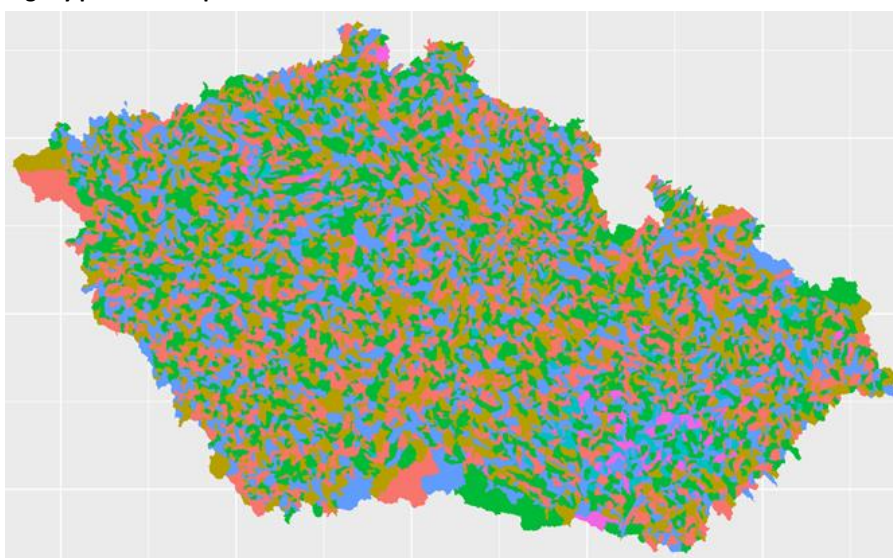
Pro účely vývoje aplikace zobrazující vzorová opatření pro všechna povodí v ČR byla provedena shluková analýza. Cílem analýzy bylo přiřadit každé ze vzorových lokalit množinu povodí s podobnými charakteristikami. Jako vysvětlující proměnné byly vybrány průměrná srážka, průměrná teplota, průměrný odtok a průměrný erozní smyv. Tyto veličiny byly nejprve standardizovány (byl odečten průměr a zbytek byl podělen směrodatnou odchylkou – tj. standardizované veličiny mají průměr nula a směrodatnou odchylku 1). Pro tvorbu shluků byla využita metoda k-nejbližších sousedů (k-nearest neighbours). Vstupem algoritmu je množina bodů, které jsou definované souřadnicemi v d-rozměrném prostoru (zde 4-rozměrném), a požadovaný počet shluků. Všechny shluky jsou reprezentované svými středy a každý bod náleží do shluku, 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 shluků, a spěje tak k lokálně-optimálnímu řešení. Výsledné shluky pro opatření na zemědělské půdě jsou ukázány na, pro povodí s revitalizací toku na a pro opatření na lesní půdě na Obrázek 21, Obrázek 22 a Obrázek 23.



Obrázek 21 Analogony pro vzorová opatření na zemědělské půdě



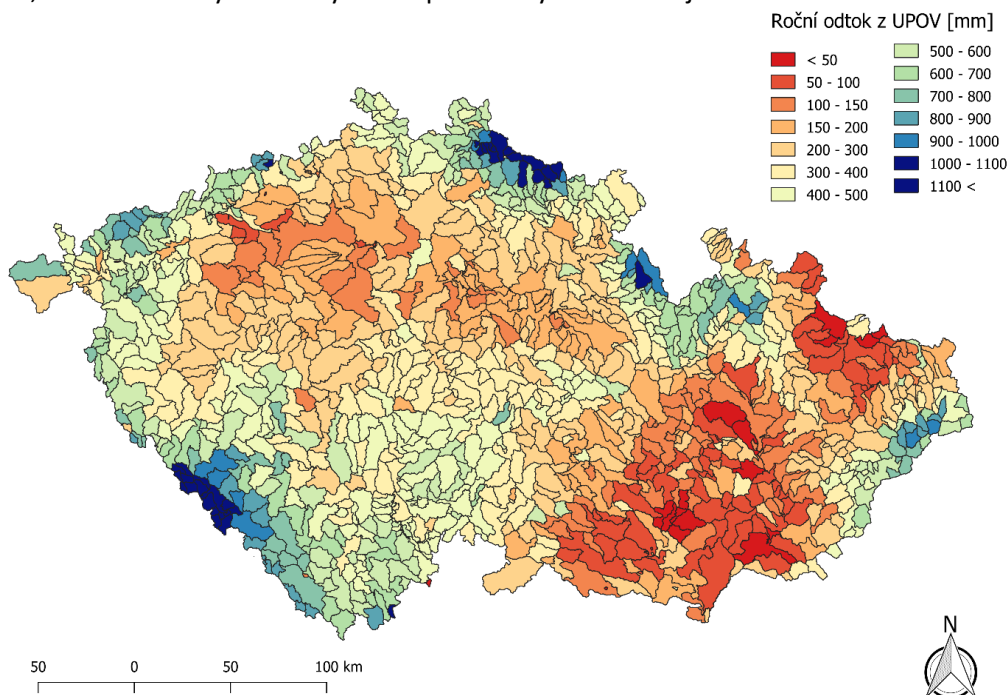
Obrázek 22 Analogony pro vzorová povodí s revitalizací toku



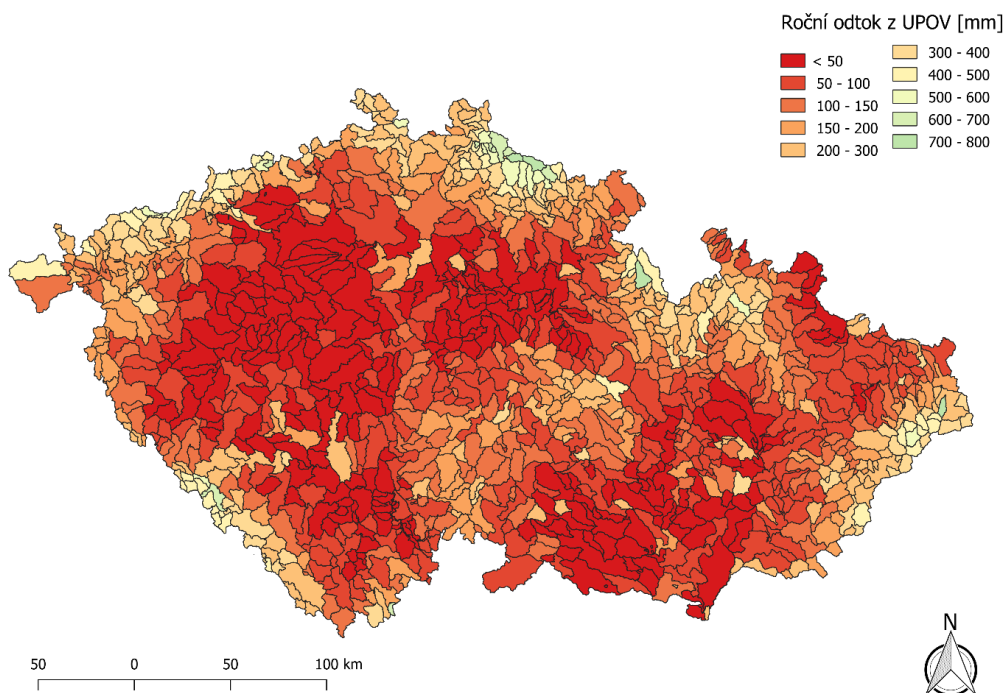
Obrázek 23 Analogony pro vzorová povodí s opatřeními na lesní půdě

3.5 Modelované odtoky

Za pomoci simulovaných odtoků z povodí, byl zrekonstruován celkový roční odtok z povodí v letech 2000 – 2016 (Příloha 1, Obrázek 24 a Obrázek 25). Na obrázcích jsou dobře patrné zejména roky 2003 a 2015, kdy se na celém území České republiky vyskytovalo intenzivní hydrologické sucho. UPOV s nízkým až velmi nízkým odtokem jsou identifikovány v oblastech Zlínského a Jihomoravského kraje a Středočeského a Královehradeckého kraje, což je v souladu s dosavadními poznatky. Pouze v letech 2001, 2002, 2010 a 2013 byl z většiny UPOV povrchový odtok více jak 300 mm.



Obrázek 24 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2002 (povodně).

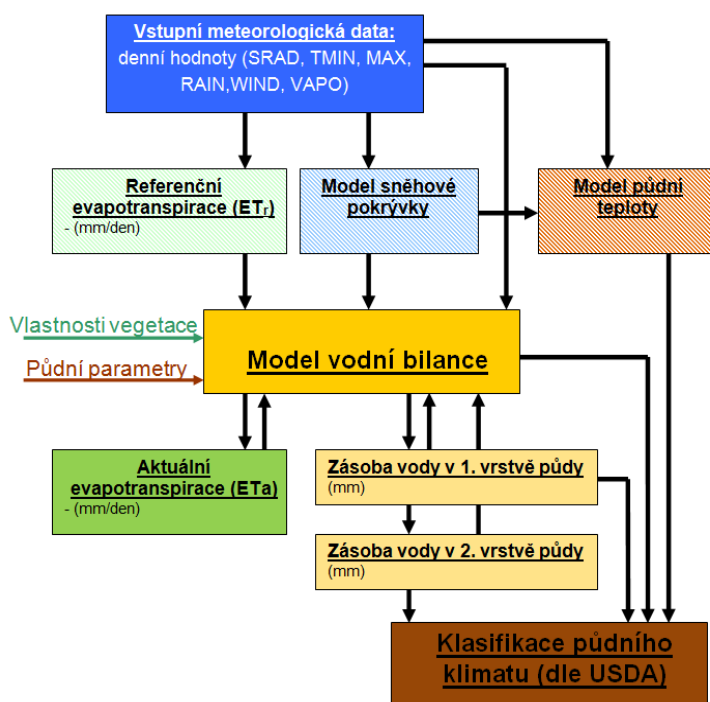


Obrázek 25 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2015 (sucho).

4 SoilClim

4.1 Základní popis

Základem pro provoz modelu SoilClim je využití databáze meteorologických prvků v denním kroku (maximální a minimální teploty vzduchu, sumy globální sluneční radiace, úhrnů srážek, rychlosti větru, vlhkosti vzduchu) pro současné klima, která vychází z měření na jednotlivých stanicích v rámci celé ČR. Tyto hodnoty jsou interpolovány do gridů (500 m x 500 m) pokrývající ČR. Pro tyto gridy jsou pak stanoveny hodnoty indikátory referenční a aktuální evapotranspirace (ET_r a ET_a), vodní bilance, vlhkosti a teploty půdy a popis půdního klimatu. Ve výpočtech SoilClimu je zohledněna retenční kapacita půdy (pro každý grid bod) ve dvou vrstvách (0–40 a 40–100 cm) a pravděpodobné zastoupení vegetace (dle informací o LandUse). SoilClim byl vyvinut jako modifikace přístupu FAO-56 (Allen et al., 1998) a pro podmínky České republiky byl kalibrován a validován Hlavinkou et al., (2011). Tento nástroj pracuje na modulární bázi (skládá se z několika samostatných modulů – sad algoritmů), kdy výstupy ze základních modulů jsou využity jako vstupy do navazujících výpočtů (viz Obrázek 26).



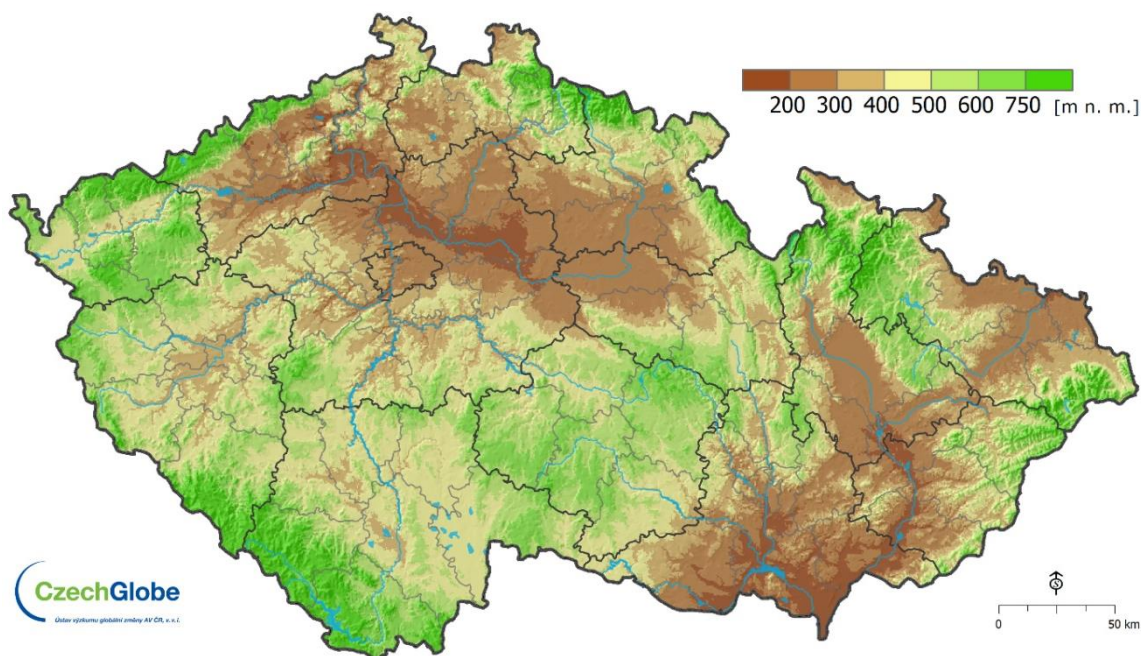
Obrázek 26 Schéma modelu SoilClim

Prvním krokem výpočtu je odhad referenční evapotranspirace ET_r pro hypotetický travní porost s využitím metody Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Paralelně s odhadem ET_r dochází na základě denních hodnot teploty vzduchu a srážkových úhrnů k odhadu výskytu sněhové pokrývky (vč. obsahu akumulované vody) modelem SnowMAUS (Trnka et al., 2010). Tímto způsobem jsou odhadovány i termíny a intenzita případného postupného tání sněhu, což je významný údaj pro korektní modelování vodní bilance v obdobích s možností výskytu sněhové pokrývky, přičemž je zohledněna i odhadovaná hodnota sublimace. SoilClim následně prostřednictvím kombinace výpočtů v denním kroku umožňuje modelovat obsah vody v půdě (pro každou ze dvou definovaných hloubek) s využitím

tzv. kapacitního přístupu. Významnou roli zde sehrává odhad odběru vody aktuální evapotranspirací (ET_a), který je dán dostupností půdní vlhkosti a vlastnostmi předpokládaného vegetačního krytu či povrchu. K tomuto je v modelu SoilClim využívána metoda tzv. crop koeficientů (K_c) (Allen et al., 1998), které popisují vlastnosti daného povrchu vzhledem k referenčnímu trávniku. Hodnota K_c se mění v průběhu sezóny dle aproximovaného vývoje listové plochy a dalších vlastností vegetace.

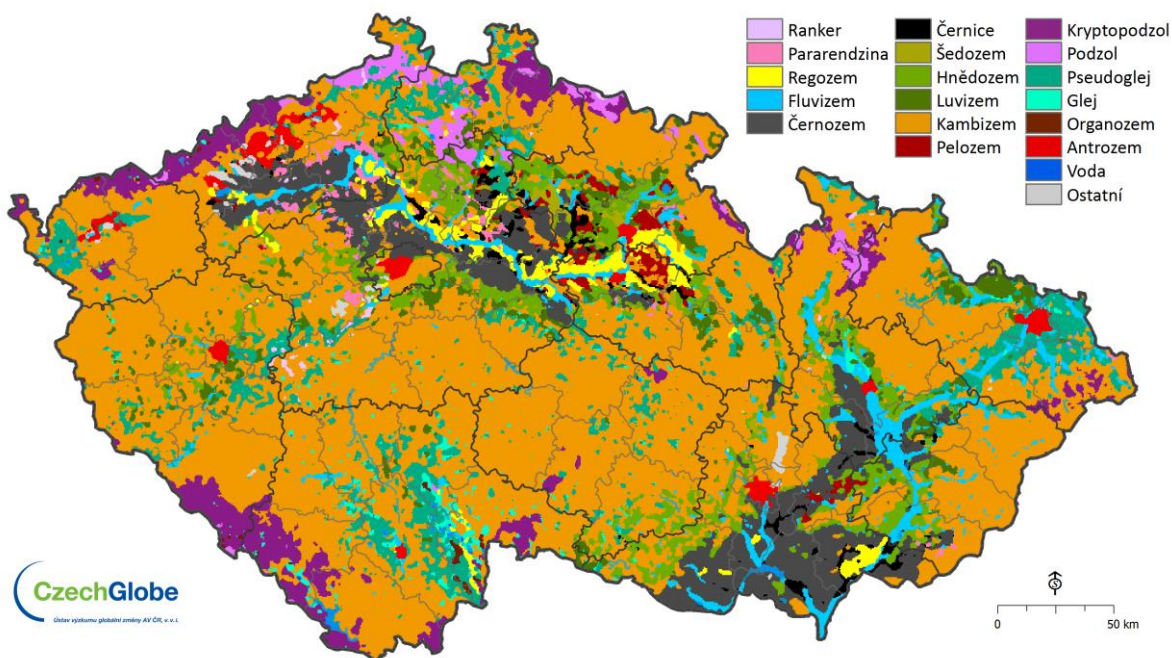
4.2 Prostorové simulace

Pro prostorový běh je využíváno interpolace vstupních meteorologických dat do sítě 500 m s tím, že vzniká mírně zkreslený model terénu. Nicméně pro naprostou většinu analýz poskytuje toto rozlišení poměrně věrný obraz ČR až po úroveň obcí s rozšířenou působností (Obrázek 27) či v některých aplikacích i pro katastrální území.



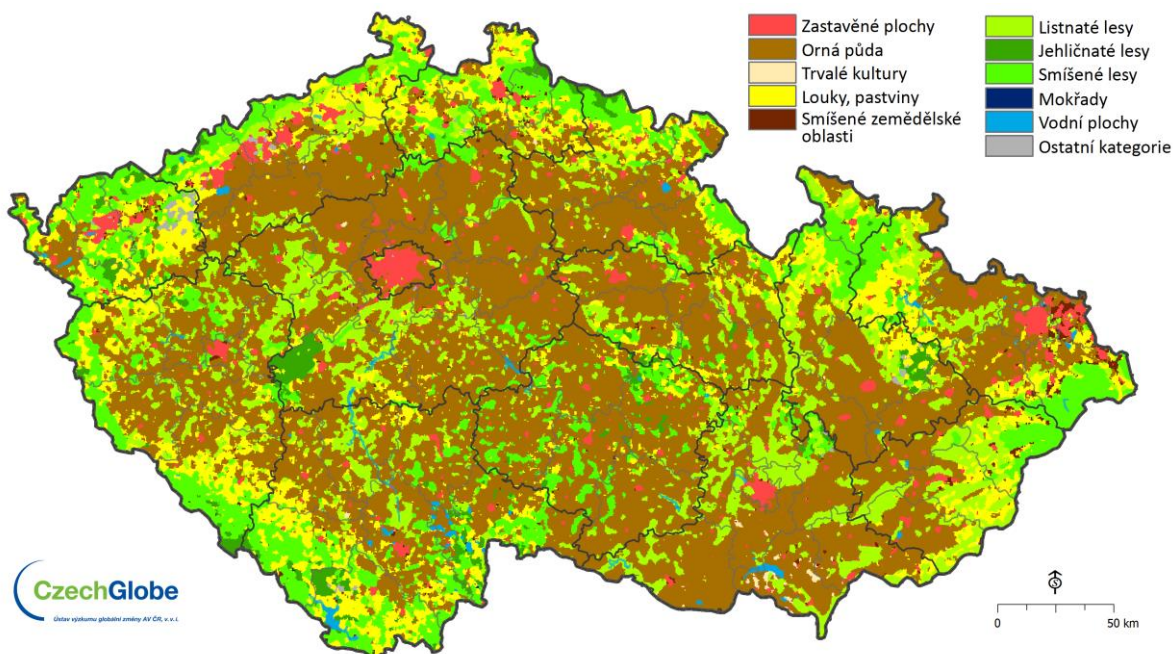
Obrázek 27 Digitální model terénu použitý v modelu SoilClim pro reprezentaci území ČR.

Jedním z klíčových parametrů, který ovlivňuje hodnotu půdní vlhkosti a její dynamiku je schopnost půdního profilu zadržovat vodu. Ta je definována jako zásoba vláhy ve dvou vrstvách (viz. výše) a schopnost vegetace čerpat z jednotlivých vrstev vláhu je závislá na hodnotě nasycení této vrstvy, typu vegetace a fenologické fázi. V případě půdní vlhkosti jsou informace o retenční schopnosti založeny na kombinaci dat z cca 1000 výběrových sond komplexního průzkumu půd a mapě půdních typů vydaných Českou geologickou službou (Tomášek, 2000). Tato základní vrstva byla dále doplněna pomocí dat o retenční schopnosti půdy v rozlišení 500 m vytvořené pracovníky Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půd a dále Evropskou půdní mapou v rozlišení 1:1 000 000. Aktuální mapa používané půdních typů pro potřeby výpočtu modelu SoilClim je zachycena na Obrázek 28.



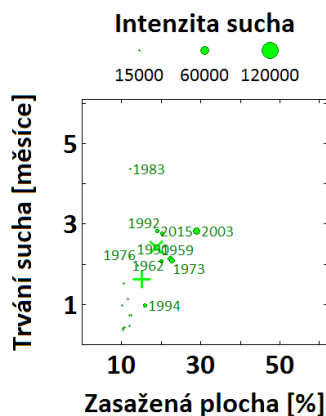
Obrázek 28 Mapa půdních typů využitá jako základ pro stanovení retenční schopnosti půd (dle Tomáška, 2000 a zdrojů VÚMOP).

Pro každý z gridů byl explicitně zvolen jeden typ krajinného krytu na základě Mapy 3. Fenologické moduly pak závisí na zvoleném typu vegetace a na jejich kombinaci pak aktuální hodnota K_c koeficientu. V případě orné půdy je uvažováno na každém gridu s výskytem osevního postupu v tomto poměru 50% - ozim C3; 40% jařina C3 a 10% jařina C4, přičemž parametry K_c a fenologické parametry odpovídají pšenici ozimé, ječmenu jarnímu a kukuřici. Pro oblasti zastavěné (vč. povrchových dolů) ani pro vodní plochy se výpočty neprovádějí



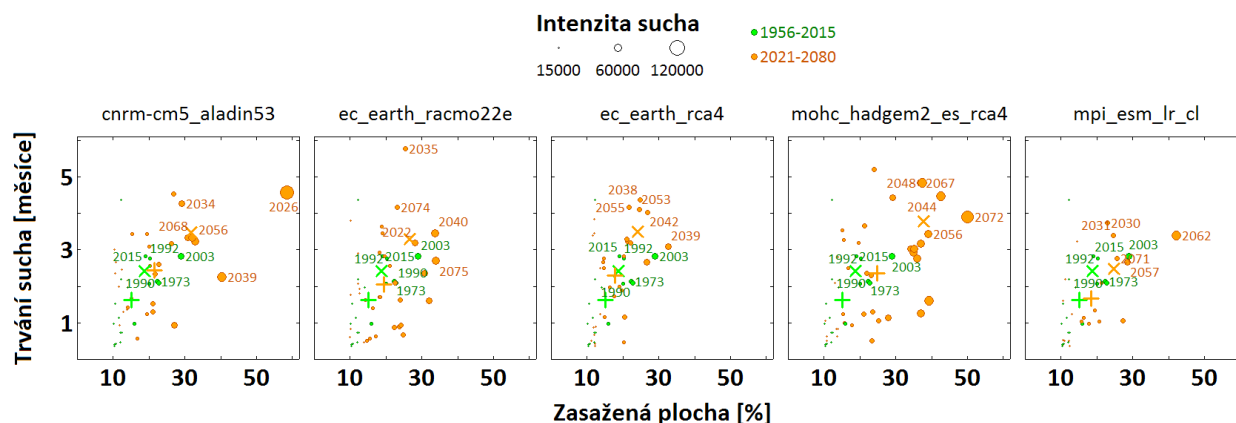
Obrázek 29 Převládající typ vegetace použitý v daném gridu pro výpočet půdní vlhkosti.

Model SoilClim prošel řadou validačních experimentů a to na základě dat půdní vlhkosti z ČR, Rakouska a USA, ale jeho výsledky byly porovnány i v ostatních klíčových parametrech schopnost zachytit aktuální evapotranspiraci, či změny fenologického vývoje (např. Trnka et al., 2015). Pro účely této studie byla vytvořena analýza chování půdní vlhkosti v období od roku 1956 s důrazem na výskyt významných suchých epizod (Obrázek 30). Je evidentní, že pokud sucho posuzujeme optikou kalendářních let z pohledu intenzity sucha, vynikají suché epizody 2003 a 2015.



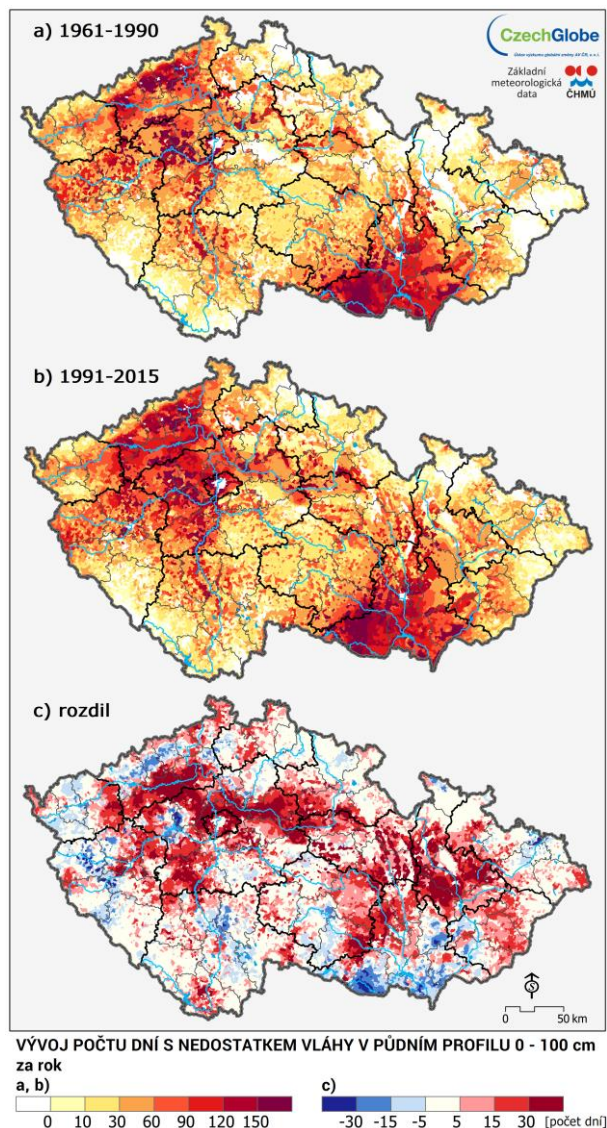
Obrázek 30 Graf intenzity sucha zachycený jako kombinace míry plochy zasažené poklesem relativního nasycení půdní vláhy pod 30% a délkou trvání v jednotlivých letech.

Model byl koncipován pro využití v rámci analýz pro budoucí klimatické podmínky, což je dosaženo mj. dynamickým modelem fenologického vývoje krajinného krytu, který reaguje na změnu teplotního chodu tepoty půdy s přihlédnutím k délce dne a v případě orné půdy i k teplotě a vlhkosti půdy, umožňující setí. Současně je započten vliv zvýšené koncentrace CO₂ na stomatární vodivost a zohledněna pozitivní role vyšších než současných koncentrací tohoto plynu půdní vlhkost. Přesto, jak dokládá Obrázek 31, je nutné v očekávaných klimatických podmínkách počítat s výrazně vyšším rizikem suchých epizod, které budou zasahovat vyšší plochu, budou trvat déle a současně budou celkově dosahovat vyšší intenzity.



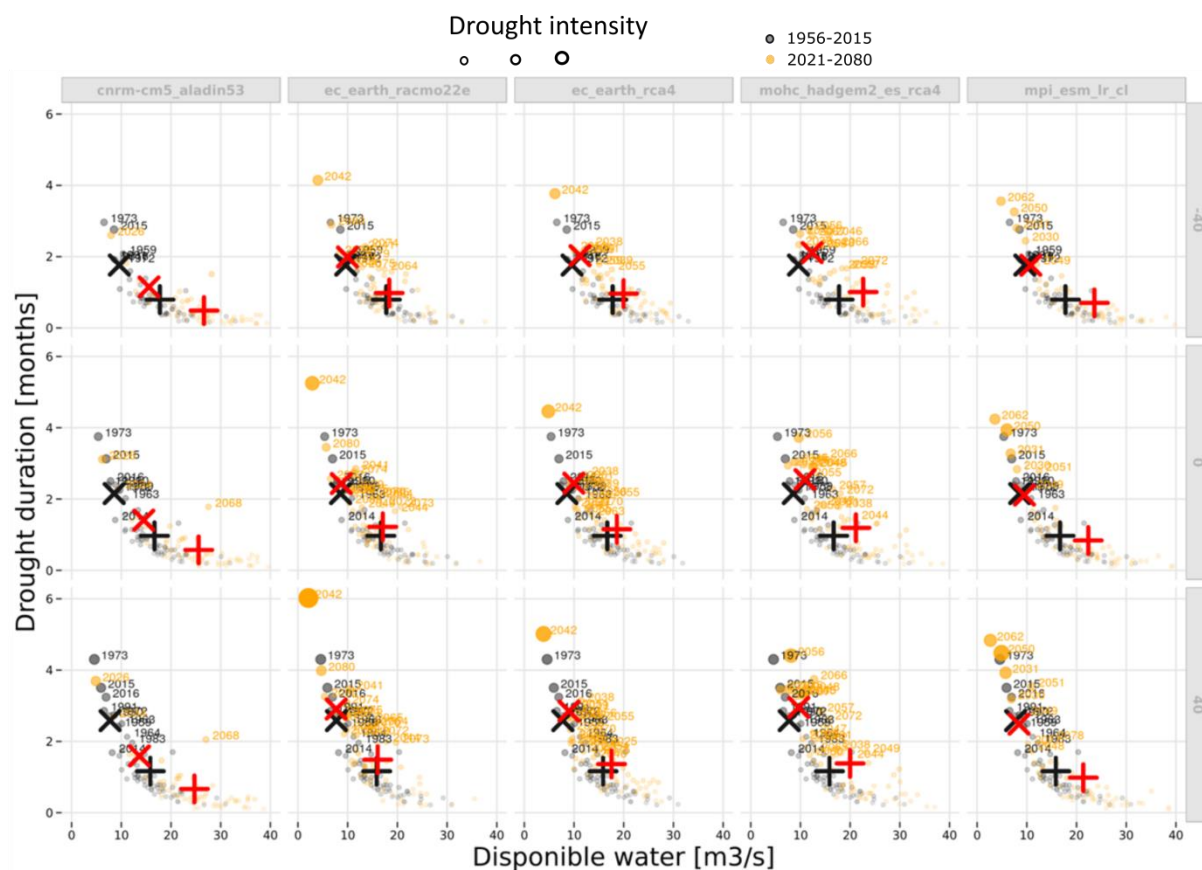
Obrázek 31 Graf intenzity sucha zachycený jako kombinace míry plochy zasažené poklesem relativního nasycení půdní vláhy pod 30% a délkou trvání v jednotlivých letech a to pro současné klima (1956-2015 – zeleně) a očekávané klima (2021-2080 – oranžově) při využití scénáře RCP 4.5 a pěti regionálních klimatických modelů z databáze EUROCORDERX. Znaménko „+“ označuje průměrnou hodnotu intenzity sucha ve všech letech v obou obdobích a charakterizuje tendenci změny zásoby vody v půdě. Znaménko „x“ pak charakterizuje průměrnou hodnotu intenzity sucha v 10 nejhorších letech v obou obdobích a charakterizuje tak posun extremity.

Na Obrázek 32 je zobrazen vývoje počtu dnů s nedostatkem vláh v půdním profilu. Na většině území tento rozdíl narůstá.



Obrázek 32 Vývoj počtu dní s nedostatkem vláh v půdním profilu 0–100 cm za rok

Na Obrázek 33 je zobrazeno vyhodnocení pro hydrologické sucho a disponibilní zdroje v rámci České republiky pro současné (období 1956-2015) a výhledové podmínky (období 2021-2080) pro 5 klimatických modelů (ve sloupcích). Černá barva značí historické události a žlutá výhled. Černý křížek je průměr za 10 nejvýznamnějších událostí v daném období a znaménko plus potom průměr za celé období. Jednotlivé řádky ukazují dopady na hydrologické sucho změny retenční kapacity krajiny o -40 %, 0 % a 40 %. Tato změna retence byla provedena pomocí programu SoilClim.



Obrázek 33 Hydrologické sucho, disponibilní zdroje pro současné a výhledové podmínky

5 Model říční sítě

V rámci řešeného projektu byl navržen model říční sítě (dále jen MRS), který v denním časovém kroku řeší transformaci odtoku korytem v zájmové říční síti. MRS tedy simuluje časové zpoždění dotoku vody z UPOVů, které přispívají k celkovému odtoku zájmového UPOVu.

5.1 Vytvoření schéma říční sítě

Pro zvolený koncový UPOV (tj. UPOV jehož celkový odtok je předmětem zájmu) je nejprve sestaveno schéma říční sítě. Toto schéma obsahuje všechny UPOVy, které přispívají k celkovému odtoku z koncového UPOVu a jejich propojení v rámci sestavené sítě.

5.2 Výpočet celkového odtoku z UPOVu řádu a

Celkový odtok z UPOVu řádu a (pro $a > 1$) bez vodní nádrže na hlavním toku je řešen rovnicí:

$$O_{C(a)} = O_{BIL(a)} + O_{TR(a)} \quad (5.1)$$

kde $O_{C(a)}$ [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$] je celkový odtok z UPOVu řádu a , $O_{BIL(a)}$ [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$] je odtok generovaný UPOVem řádu a , který je simulován modelem BILAN, $O_{TR(a)}$ [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$] je transformovaný odtok vypočtený na základě celkových odtoků všech UPOVů nižších řádů, ze kterých voda přímo odtéká do UPOVu řádu a . Odtok $O_{TR(a)}$ v UPOVu řádu a je řešen podle schématu:

$$O_{C(a-b)} \rightarrow O_{NTR(a)} \rightarrow O_{TR(a)} \quad (5.2)$$

kde $O_{C(a-b)}$ [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$] je celkový odtok z UPOVů řádu $a - b$ (pro $b = 1, \dots, a - 1$), ze kterých voda přímo odtéká do UPOVu řádu a , $O_{NTR(a)}$ [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$] je netransformovaný odtok UPOVu řádu a , řešený:

$$O_{NTR(a)} = \sum O_{C(a-b)} \quad (5.3)$$

Pro UPOV řádu 1 (tj. $a = 1$) bez vodní nádrže na hlavním toku platí:

$$O_{C(a)} = O_{BIL(a)} \quad (5.4)$$

5.3 Použité metody transformace odtoku

Navržený model říční sítě využívá k transformaci odtoku korytem ($O_{NTR(a)} \rightarrow O_{TR(a)}$) pro UPOV řádu a dvě metody:

- lineární nádrž
- Muskingum

5.3.1 Metoda lineární nádrže

Při použití lineární nádrže, jako prostředku transformace odtoku, je model říční sítě schematizován soustavou lineárních zásobníků, které reprezentují jednotlivé UPOVy v rámci vytvořené říční sítě. Vzájemné propojení lineárních nádrží odpovídá reálnému propojení UPOVů v síti. Vstupem do lineární nádrže je netransformovaný odtok UPOVu řádu a ($O_{NTR(a)}$), výstupem je transformovaný odtok UPOVu řádu a ($O_{TR(a)}$).

Transformace odtoku ($O_{NTR(a)} \rightarrow O_{TR(a)}$) lineární nádrží pro UPOV řádu a vychází z rovnice zásoby (Ponce, 1989):

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (5.5)$$

kde dS v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je změna zásoby v čase, I v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je vstup do nádrže a O v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je výstup z nádrže. Numerickou diskretizací rovnice X. 5, založenou na metodě konečných diferencí, získáme rovnici ve tvaru:

$$S[i] = S[i - 1] + I[i] - O[i] \quad (5.6)$$

kde $S[i]$ v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je zásoba v časovém kroku i , $S[i - 1]$ v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je zásoba v časovém kroku $i - 1$, $O[i]$ v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je výstup ze zásobníku v časovém kroku i , $I[i]$ v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je vstup do zásobníku v časovém kroku i .

Odtok z nádrže v časovém kroku i je řešen modelem dvěma způsoby:

- $O[i] = k \cdot S[i - 1]$ (5.7)

- $O[i] = k \cdot (S[i - 1] + I[i])$ (5.8)

kde k [-] je koeficient zdržení vody v nádrži.

5.3.2 Metoda Muskingum

Při použití metody Muskingum model říční sítě schematizuje říční síť soustavou segmentů, které reprezentují jednotlivé UPOVy v rámci této sítě. Propojení segmentů odpovídá reálnému propojení UPOVů v síti. Vstupem do segmentu je netransformovaný odtok UPOVu řádu a ($O_{NTR(a)}$), výstupem ze segmentu je transformovaný odtok UPOVu řádu a ($O_{TR(a)}$).

Transformace odtoku ($O_{NTR(a)} \rightarrow O_{TR(a)}$) metodou Muskingum vychází z bilanční rovnice zásoby (5.5), avšak zásoba je zde lineární funkcí vstupu i výstupu (Ponce, 1989):

$$S = K[X \cdot I + (1 - X) \cdot O] \quad (5.9)$$

kde S v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je zásoba v segmentu, I v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je vstup do segmentu, O v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ je výstup ze segmentu, K [-] je koeficient zdržení vody v segmentu a X je váhový faktor [-].

Diskretizací rovnice 5.5 získáme rovnici:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t} \quad (5.10)$$

Vyjádříme-li rovnici 5.9 pro časový krok i a $i - 1$ získáme rovnice:

$$S[i] = K[X \cdot I[i] + (1 - X) \cdot O[i]] \quad (5.11)$$

$$S[i - 1] = K[X \cdot I[i - 1] + (1 - X) \cdot O[i - 1]] \quad (5.12)$$

Dosazením rovnic 5.11 a 5.12 do rovnice 5.10 a vyjádřením $O[i]$ získáme rovnici:

$$O[i] = C_0 \cdot I[i] + C_1 \cdot I[i - 1] + C_2 \cdot O[i - 1] \quad (5.13)$$

kde $O[i - 1]$ v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ $O[i]$ v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ jsou výstupy v časovém kroku $i - 1$, resp. i , $I[i - 1]$ v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ a $I[i]$ v $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$ jsou výstupy v časovém kroku $i - 1$, resp. i . Koeficienty C_0 , C_1 a C_2 jsou řešeny na základě parametrů K a X dle rovnic (Ponce, 1989):

$$C_0 = \frac{-K \cdot X + 0,5}{K \cdot (1 - x) + 0,5} \quad (5.14)$$

$$C_1 = \frac{K \cdot X + 0,5}{K \cdot (1 - x) + 0,5} \quad (5.15)$$

$$C_2 = \frac{K \cdot (1 - X) - 0,5}{K \cdot (1 - x) + 0,5} \quad (5.16)$$

5.4 Vodní nádrž v UPOVu a její vliv na transformaci odtoku

V případě, že UPOV řádu a obsahuje jednu nebo více vodních nádrží situovaných na hlavním toku, nebo na některém z vedlejších toků, je nutné uvažovat jejich vliv na celkový odtok z tohoto UPOVu. Pro výpočet bilance vody ve vodní nádrži je použit program Wateres který byl vyvinut Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, v.v.i. a je dostupný na <https://github.com/tgmwri/wateres>. V zásadě lze řešit následující možnosti umístění vodní nádrže na UPOVu:

- nádrž / nádrže na hlavním toku,
- nádrž / nádrže na vedlejším toku.

Umístění vodní nádrže na hlavním či vedlejším toku ovlivňuje výpočet vstupní časové řady odtoku Q_i $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ do programu Wateres. Pokud je vodní nádrž situována na hlavním toku, pak je Q_i vypočten následujícím vztahem:

$$Q_i = O_{BIL(a)} + O_{TR(a)} + VYP_a \quad (5.17)$$

Odběr vody z hlavního toku v UPOVu řádu a PO_a $[\text{m}^3]$ je použit ve formě dalšího vstupu do programu Wateres. V případě, že je vodní nádrž situována na vedlejším toku, pak je Q_i vypočten následujícím vztahem:

$$Q_i = 0,3 \cdot O_{BIL(a)} \quad (5.18)$$

Mezi další vstupy do programu Wateres patří: časová řada potenciální evaporace $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$, časová řada srážek $[\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}]$, optimální a maximální objem nádrže $[\text{m}^3]$, plocha nádrže $[\text{m}^2]$, minimální zůstatkový průtok MZP $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$, neškodný průtok korytem pod hrází Q_{nes} $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$. Optimální objem vodní nádrže je dán součtem objemu stálého nadržení a zásobního objemu. Maximální objem je dán součtem objemu stálého nadržení, zásobního objemu a objemem ovladatelného prostoru nádrže. Výstupem jsou časové řady odtoku z vodní nádrže $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$, zásoby vody $[\text{m}^3]$ ve vodní nádrži a výparu z vodní nádrže $[\text{m}^3]$. Minimální zůstatkový průtok je zjištěn z manipulačního řádu, případně je odhadnut výpočtem:

$$MZP = 0,1 \cdot Q_A \quad (5.19)$$

kde Q_a je průměrný roční průtok z nádrže [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. Neškodný průtok korytem pod hrází je zjištěn z manipulačního řádu, případně je odhadnut výpočtem:

$$Q_{nes} = 100 \cdot MZP \quad (5.20)$$

Manipulace na vodních nádržích jsou řešeny zjednodušeně:

- Pokud je objem vody v nádrži nižší než je optimální objem a Q_i , v kombinaci s dešťovou srážkou spadlou do nádrže, není schopen kompenzovat ztrátu vody výparem z nádrže a zároveň není schopen zaručit odtok z nádrže vyšší nebo roven MZP , pak nádrž vypouští právě MZP a tím se dále prázdní.
- Pokud je objem vody v nádrži nižší než je optimální objem a Q_i , v kombinaci s dešťovou srážkou spadlou do nádrže, je schopen kompenzovat ztrátu vody výparem z nádrže a zároveň by byl schopen zaručit odtok z nádrže vyšší než MZP , pak nádrž akumuluje vodu až do dosažení optimálního objemu a vypouští právě MZP .
- Pokud objem vody v nádrži odpovídá optimálnímu objemu, ale Q_i , v kombinaci s dešťovou srážkou spadlou do nádrže, není schopen kompenzovat ztrátu vody výparem z nádrže a současně není schopen zaručit odtok z nádrže vyšší nebo roven MZP , pak nádrž vypouští právě MZP a tím se prázdní.
- Pokud objem vody v nádrži odpovídá optimálnímu objemu a Q_i , v kombinaci s dešťovou srážkou spadlou do nádrže, je schopen kompenzovat ztrátu vody výparem z nádrže a zároveň je schopen zaručit odtok z nádrže vyšší než MZP , ale menší nebo maximálně roven Q_{nes} , pak nádrž vypouští přebytečnou vodu a zůstává na optimálním objemu.
- Pokud objem vody v nádrži odpovídá optimálnímu objemu a Q_i , v kombinaci s dešťovou srážkou spadlou do nádrže, je schopen kompenzovat ztrátu vody výparem z nádrže a zároveň je schopen zaručit odtok z nádrže vyšší než MZP , ale také vyšší než Q_{nes} , pak nádrž akumuluje vodu ovladatelném prostoru a vypouští Q_{nes} .
- Pokud je objem vody v nádrži vyšší než je optimální objem a Q_i , v kombinaci s dešťovou srážkou spadlou do nádrže, je schopen kompenzovat ztrátu vody výparem z nádrže a zároveň je schopen zaručit odtok z nádrže vyšší než MZP , ale nižší než Q_{nes} , pak nádrž vypouští právě Q_{nes} tak dlouho, dokud se nedostane na optimální objem.
- Pokud je objem vody v nádrži vyšší než optimální objem a Q_i , v kombinaci s dešťovou srážkou spadlou do nádrže, je schopen kompenzovat ztrátu vody výparem z nádrže a zároveň je schopen zaručit odtok z nádrže vyšší než MZP , ale také vyšší než Q_{nes} , pak nádrž dále akumuluje vodu ovladatelném prostoru a vypouští Q_{nes} .

Při řešení vlivu vodní nádrže na celkový odtok u UPOVu řádu a byla zavedena následující zjednodušení:

- Vodní nádrž na hlavním toku (nebo vedlejším toku) je situována vždy v uzavírajícím profilu UPOVu.
- Soustava dvou a více vodních nádrží na hlavním toku (nebo vedlejším toku) je nahrazena jednou fiktivní vodní nádrží situovanou v uzavírajícím profilu UPOVu (celková plocha a objem fiktivní nádrže je definována jako suma celkových ploch a objemů jednotlivých vodních nádrží soustavy).

- V případě, že UPOV obsahuje vodní nádrž na hlavním i vedlejším toku, je nejprve řešena bilance v nádrži na vedlejším toku a teprve poté je řešena bilance ve vodní nádrži na hlavním toku.
- V případě, že délka vodní nádrže zaujímá dominantní část délky údolnice daného UPOV, není pro tento UPOV řešena transformace odtoku korytem (tj. pokud poměr délky nádrže a délky údolnice byl vyšší, nebo roven 0,5, pak transformace odtoku korytem byla vynechána).

V rámci projektu byly získány informace o 185 vodních nádržích situovaných ve vybraných UPOVech, které byly vstupem do programu Waterses. Plocha jednotlivých nádrží se pohybovala v intervalu od 0,577 ha do 4504,400 ha (medián 66,992 ha). Celkový objem jednotlivých nádrží se nacházel v intervalu od $0,013 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ do $716,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (medián $2,147 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). Průměrný roční průtok z nádrže se měnil v intervalu od $0,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $85,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (medián $0,113 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Z hlediska technickobezpečnostního dozoru nad vodními díly spadá 23 vodních nádrží do kategorie I (vybudované mezi roky 1934 a 1991), 54 do kategorie II (vybudované mezi roky 1850 a 1990), 59 do kategorie III (vybudované mezi roky 1272 a 1988) a 48 do kategorie IV (vybudované mezi roky 1367 a 1982). U vodní nádrže Vrkoč není kategorie TBD uvedena.

5.3.3 Nakládání s povrchovými vodami v UPOVu

Nakládáním s povrchovými vodami v daném UPOVu se rozumí odběr vody (PO_a) z hlavního toku nebo vypouštění vody (VYP_a) do hlavního toku. Vstupem při bilanci celkového odtoku z UPOVu řádu a jsou časové řady odběru povrchových vod na hlavním toku [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] a vypouštění vody do hlavního toku [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. Pokud UPOV řádu a neobsahuje vodní nádrž na hlavním toku, pak se odběr povrchových vod řídí následujícími pravidly, která řeší eventuální snížení odběru vody z hlavního toku, pokud by nebyl zaručen celkový odtok z UPOVu odpovídající minimálně hodnotě MZP:

$$\bullet \text{ pro } (O_{BIL(a)} + O_{TR(a)} + VYP_a) \leq MZP \text{ je } PO_{a,skutečný} = 0 \quad (5.21)$$

$$\bullet \text{ pro } (O_{BIL(a)} + O_{TR(a)} + VYP_a) \leq (MZP + PO_{a,povolený}) \\ \text{je } PO_{a,skutečný} = O_{BIL(a)} + O_{TR(a)} + VYP_a - MZP \quad (5.22)$$

$$\bullet \text{ pro } (O_{BIL(a)} + O_{TR(a)} + VYP_a) > (PO_{a,povolený} + MZP) \\ \text{je } PO_{a,skutečný} = PO_{a,povolený} \quad (5.23)$$

kde $PO_{a,povolený}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] je povolený odběr vody z hlavního toku, $PO_{a,skutečný}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] je skutečně realizovaný odběr vody takový, aby v hlavním toku byl zachován minimálně MZP.

Pokud UPOV obsahuje vodní nádrž na hlavním toku, je odběr řešen v rámci bilance na této vodní nádrži programem Waterses.

5.3.4 Kalibrace a verifikace modelu říční sítě

Kalibrace modelu říční sítě (MRS) byla provedena v několika krocích. Nejprve byla vybrána metoda transformace odtoku korytem a sestavena kolekce různých fyzicko-geografických charakteristik (FGC), o kterých se předpokládalo, že mohou mít vliv na její parametry. Poté byl navržen matematický vztah mezi FGC UPOVů a hodnotami parametrů zvolené transformační metody ve formě:

$$\theta = A_0 + A_1 \cdot CHAR_1 + A_2 \cdot CHAR_2 + \dots + A_m \cdot CHAR_m \quad (5.24)$$

kde θ je hodnota parametru transformační metody (např. výtokový koeficient lineární nádrže), $CHAR_1, CHAR_2, \dots, CHAR_m$ jsou hodnoty použitých FGC a $A_0, A_1, \dots, A_m$ jsou kalibrované koeficienty. Celkem bylo pro odhad konkrétního parametru transformační metody navrženo 14 vztahů mezi ním a FGC.

Pro každou říční síť, pro kterou byla dostupná měřená data na koncových UPOVech, byly kalibrovány koeficienty A_1 až A_m v rovnici 5.24. Výsledkem kalibrace byla skupina matematických vztahů mezi FGC UPOVů a hodnotami parametrů zvolené transformační metody. Každý z těchto vztahů byla následně testován na celém souboru říčních sítí a z nich vybrán takový, který vedl k nejlepším simulačním výsledkům z hlediska použitého hodnotícího kritéria, zároveň co nejčastěji k reálným hodnotám parametrů zvolené transformační metody a rozumnému rozptylu v hodnotách parametrů transformační metody mezi UPOVy v závislosti na použité FGC.

Transformace využívající metody Muskingum a Nashův model obsahují dva odhadované parametry, z nichž každý může být určen na základě libovolného vztahu ze 14 navržených. Bylo by tedy nutné pro každou transformační metodu testovat celkem 196 kombinací navržených rovnic. Z tohoto důvodu byly oba parametry odhadovány rovnicí 5.24 na základě stejné FGC (tj. pro každý parametr byl použit vztah obsahující stejnou FGC, kalibrovány byly koeficienty A_1 až A_m v obou rovnicích).

5.3.5 Výběr fyzicko-geografických charakteristik UPOVů

V Tabulka 3 je uvedena základní popisná statistika použitých fyzicko-geografických charakteristik (FGC) UPOVů spolu s jejich označením a jednotkou. Nulové hodnoty u průměrného sklon údolnice a délky údolnice (minima uvedená v Tabulka 3) souvisí se způsobem určení těchto FGC a byly spojeny pouze s UPOVy, které obsahují vodní nádrž na hlavním toku zaujímající většinu plochy tohoto UPOVu (v rámci těchto UPOVů nebyla řešena transformace odtoku korytem, ale pouze vodní nádrží programem Wateres).

Tabulka 3 Souhrn použitých fyzicko-geografických charakteristik UPOVů.

	označení, jednotka	minimum	dolní kvartil	medián	horní kvartil	maximum
průměrný sklon údolnice	PSU [%]	0,000	2,420	4,245	6,229	48,853
délka údolnice	DU [km]	0,000	9,263	14,963	22,374	90,669
plocha UPOVu	AUP [km ²]	1,323	30,241	54,672	96,511	1077,22
hustota říční sítě v UPOVu	HRS [km ⁻¹]	0,017	1,193	1,434	1,707	4,724

V Tabulka 4 jsou uvedeny vypočtené Pearsonova korelačního koeficientu mezi vybranými FGC. Z tab. 5.2 je patrná významná závislost pouze mezi délkou údolnice (DU) a plochou UPOVu (AUP). Proto

byly z původních 14 vztahů mezi FGC a parametry transformační metody odstraněny ty, které obsahují právě tyto dvě FGC společně. Z původních 14 vztahů jich poté zbylo jen 10.

Tabulka 4 Hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu vypočtené mezi fyzicko-geografickými charakteristikami UPOVů (použité zkratky jsou vysvětleny v tab. 5.1).

	PSU	DU	AUP	HRS
PSU	1,000	-0,082	-0,160	0,164
DU		1,000	0,801	-0,208
AUP			1,000	-0,333
HRS				1,000

Kalibrace koeficientů matematického vztahu mezi fyzicko-geografickými charakteristikami UPOVů a hodnotami parametrů zvolené transformační metody

Pro transformaci odtoku korytem byla vybrána metoda lineární nádrže, která je popsána rovnicemi 5.6 a 5.7. Pro kalibraci a verifikaci modelu říční sítě (MRS) byla použita měřená data na koncových UPOVech pro 64 říčních sítí. Použité sítě obsahovaly celkově od 2 do 36 UPOVů všech řádů, resp. od 1 do 17 UPOVů, jejichž řád byl vyšší než 1 a pro které byly řešeny parametry transformační metody. Kalibrace MRS byla provedena na časových řadách 1. 1. 1993 až 31. 12. 1998, verifikace byla provedena na časových řadách 1. 1. 1999 až 31. 12. 2004. Vstupem do MRS byly:

- časové řady odtoků simulovaných modelem BILAN pro každý UPOV v rámci řešené sítě,
- časové řady užívání (vypouštění a odběry) pro každý UPOV v rámci řešené sítě,
- požadované vstupy pro program Wateres (pokud UPOV obsahoval vodní nádrž na hlavním nebo vedlejším toku),
- hodnoty FGC UPOVů v rámci řešené sítě.

Pro kalibraci koeficientů matematických vztahů mezi FGC a parametry zvolené transformační metody byla použita metoda diferenciální evoluce s nastavením:

- počáteční populace o velikosti 2·počet koeficientů v rovnici 5.24,
- mutace rand-to-best/2,
- binární křížení,
- mutační konstanta a práh křížení byly optimalizovány v průběhu evolučního cyklu,
- za ukončovací kritérium byla použita konvergence hodnotícího kritéria.

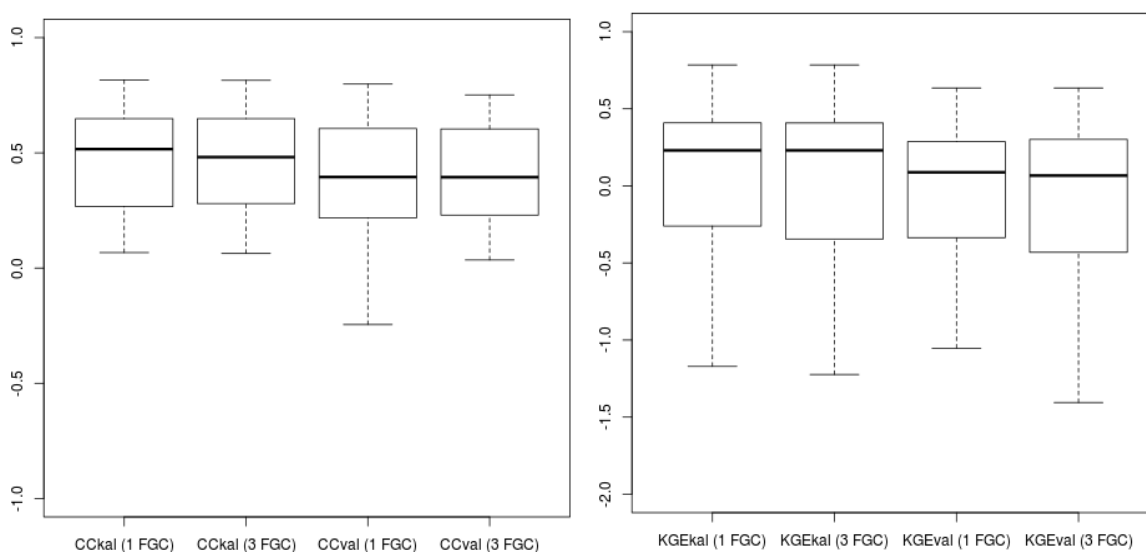
Jako hodnotící kritérium byl použit korelační koeficient mezi simulovaným a pozorovaným odtokem (CC) a Kling-Guptův koeficient účinnosti (KGE) (Gupta et al., 2009). Protože v rámci kalibrace MRS nebyly řešeny počáteční stavy v lineárních nádržích, které reprezentují UPOV o řádu vyšším než 1, byla použita warming-up perioda o délce 1 rok. Tedy, výpočet hodnotícího kritéria byl proveden na časových řadách 1. 1. 1994 až 31. 12. 1998, resp. 1. 1. 2000 až 31. 12. 2004.

Při optimalizaci koeficientů rovnice 5.24 byla použita penalizace těch sad koeficientů, které vedly k nereálným hodnotám parametrů použité transformační metody. Nereálné hodnoty parametrů transformační metody byly nejprve nahrazeny hodnotami, které byly blízké mezím intervalu reálných hodnot tohoto parametru (pro výtokový koeficient lineární nádrže K to byly hodnoty 0,001, pokud

vypočtené $K < 0$, nebo 0,999, pokud vypočtené $K > 1$). S nahrazenou hodnotou parametru (pro jeden nebo více UPOVů v síti) byla vypočtena transformace odtoku korytem a následně vypočteno hodnotící kritérium, které bylo poníženo o hodnotu 500. Tím bylo zaručeno, že nevhodné sady koeficientů budou z evoluce vyřazeny.

Výsledkem kalibrace MRS s transformační metodou lineární nádrže byla kolekce 640 matematických vztahů mezi FGC a výtokovým koeficientem lineární nádrže. Výsledky kalibrace MRS na jednotlivých sítích ukazují nižší simulační účinnost MRS jak v kalibrační tak i ve verifikační fázi bez ohledu na to, kolik a jaké FGC byly obsaženy ve vztahu, jehož koeficienty byly optimalizovány. To je patrné z Obrázek 34 pro vztah s 1 FGC (průměrný sklon údolnice) s mediány CC 0,516 a KGE 0,230 v kalibrační fázi a mediány CC 0,395 a KGE 0,090 ve verifikační fázi vers. vztah s 3 FGC (průměrný sklon údolnice, délka údolnice, hustota říční sítě) s mediány CC 0,481 a KGE 0,231 v kalibrační fázi a mediány CC 0,394 a KGE 0,070 ve verifikační fázi. Nižší simulační účinnost MRS můžeme pravděpodobně spojit s těmito faktory:

1. méně přesná vstupní data, zejména simulace modelem BILAN pro každý UPOV v rámci sítě,
2. použití nevhodných FGC pro konstrukci vztahu mezi nimi a parametrem transformační metody,
3. zjednodušená forma řešení vodních nádrží (např. nahrazení soustavy nádrží jednou fiktivní nádrží, stanovení neškodného průtoku pod hrází) a zjednodušené manipulace na těchto nádržích.

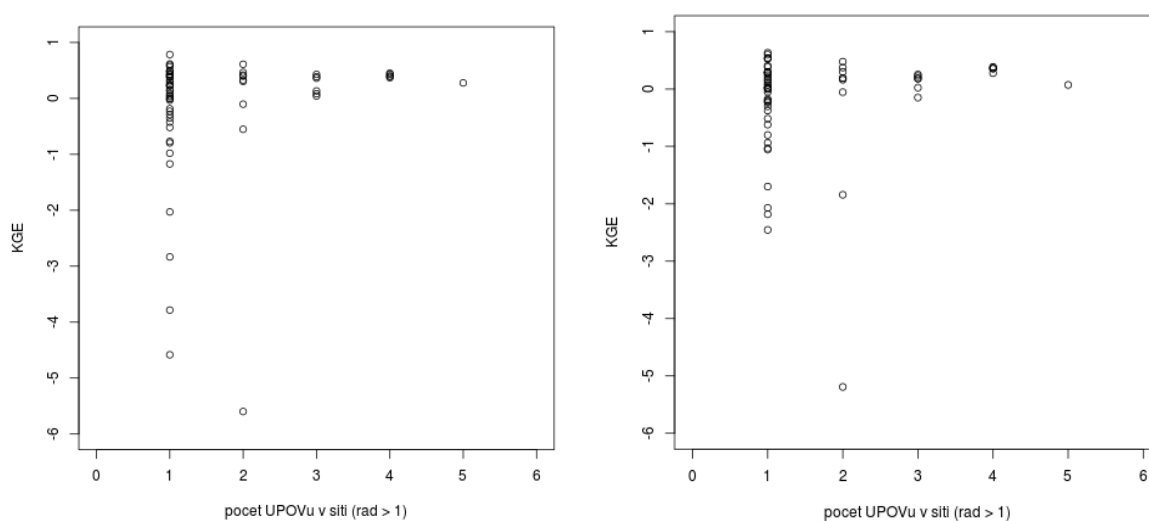


Obrázek 34 Simulační účinnost modelu říční sítě využívajícího lineární zásobník jako metodu transformace odtoku korytem na souboru 64 říčních sítích v kalibrační i verifikační fázi podle CC (vlevo) i KGE (vpravo). Parametr transformační metody byl stanoven na základě průměrného sklonu údolnice (1 FGC), resp. průměrného sklonu údolnice, délky údolnice a hustoty říční sítě (3 FGC).

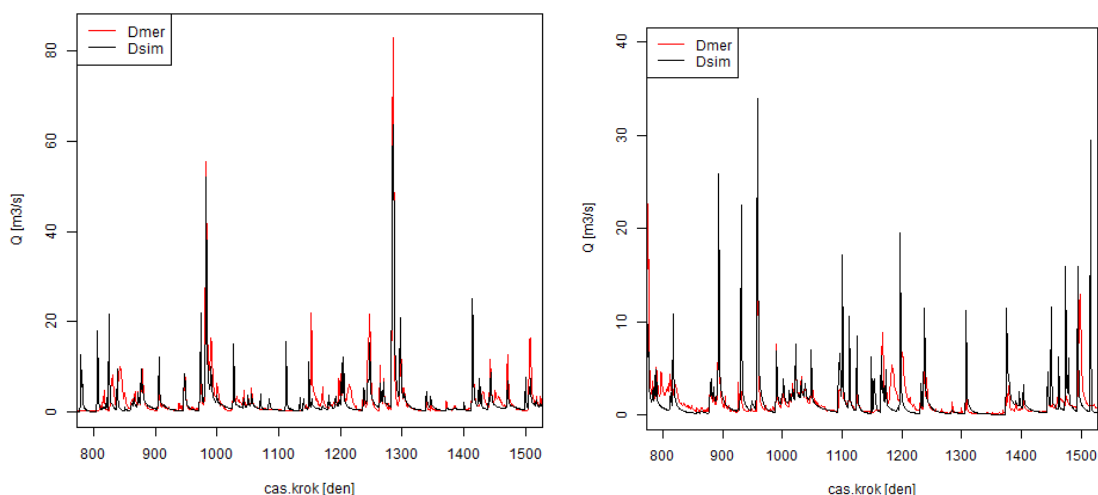
Faktory 1 a 2 jsou synergické ve svém vlivu na simulační účinnost MRS. Tedy, pokud by probíhala kalibrace MRS klasickým způsobem (tj. přímá kalibrace parametrů transformační metody), pak by MRS mohl vykompenzovat méně kvalitní vstupy hodnotami kalibrovaných parametrů. Tím, že jsou parametry transformační metody počítány pro každý UPOV, jehož řád je vyšší než 1, na základě

rovnice 5.24, je možnost kompenzace vlivu méně kvalitních vstupů v rámci celé říční sítě snížena (zejména pokud mají UPOVY v síti o řádu vyšším než 1 velmi podobné hodnoty FGC, které vstupují do rovnice 5.24).

Z výsledků je dále patrná podobnost získaných simulačních účinností bez ohledu na to, jaké FGC a kolik jich bylo obsaženo v testovaných vztazích (viz Obrázek 34). Získané výsledky také ukazují, že lepších simulačních výsledků v kalibrační i verifikační fázi bylo dosaženo na větších sítích (tj. sítích tvořených vyšším počtem UPOVů), viz Obrázek 35, bez ohledu na to, kolik a jakých FGC bylo použito v rovnici 5.24. Tento výsledek je očekávatelný, neboť v rámci větších sítí dochází k určitému vyhlazení rozkolísanosti v celkovém odtoku.

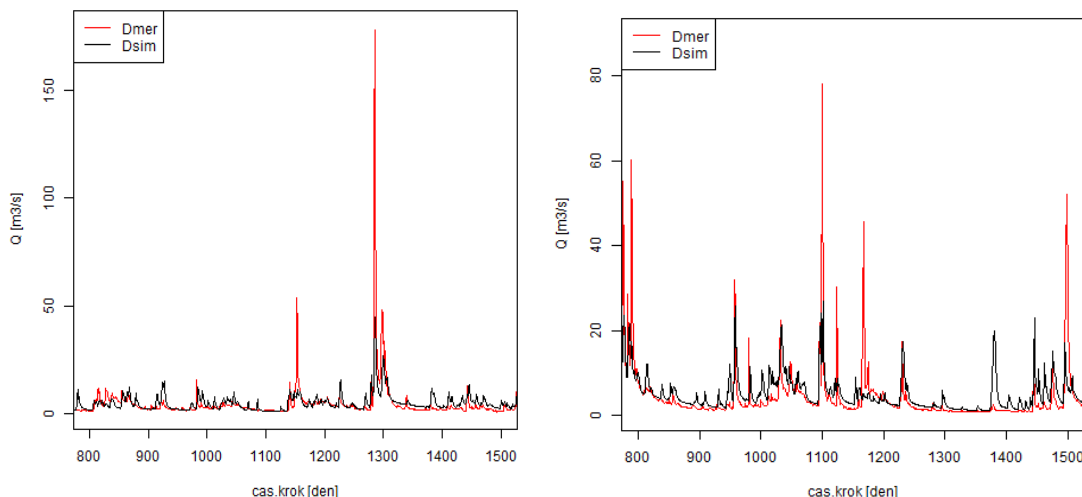


Obrázek 35 Porovnání simulačních účinností modelu říční sítě využívajícího lineární zásobník jako metodu transformace odtoku korytem na souboru 64 říčních sítí podle KGE v kalibrační (vlevo) i verifikační fázi (vpravo) v závislosti na počtu UPOVů v síti, jejichž řád byl vyšší než 1. Parametr transformační metody byl stanoven na základě průměrného sklonu údolnice.



Obrázek 36 Celkový simulovaný odtok (Dsim) v porovnání s celkovým měřeným odtokem (Dmer), síť tvořena 2 UPOV (koncový UPOV: Olše od státní hranice po tok Lomná). Parametry transformační metody vypočteny pomocí rovnice 5.24 na základě průměrného sklonu údolnice. Vlevo kalibrační fáze s $CC = 0,811$, $KGE = 0,784$. Vpravo verifikační fáze s $CC = 0,563$, $KGE = 0,528$.

Na Obrázek 36 a Obrázek 37 jsou uvedeny příklady simulace celkového odtoku, kdy parametry transformační metody byly počítány na základě vztahu obsahujícího 1 FCG (průměrný sklon údolnice) a 3 FGC (průměrný sklon údolnice, délka údolnice, hustota říční sítě). Celkový odtok byl často silně rozkolísaný s množstvím výraznějších reakcí na vstupy (simulované odtoky modelem BILAN), které se transformací korytem nepodařilo vyhladit (viz Obrázek 36, Obrázek 37 vlevo i vpravo). I v případě, že simulační účinnost MRS byla vyšší (viz Obrázek 36, Obrázek 37 vlevo i vpravo), nebyl MRS schopen korektně simulovat vyšší odtoky a špatně simuloval některé poklesové větve.

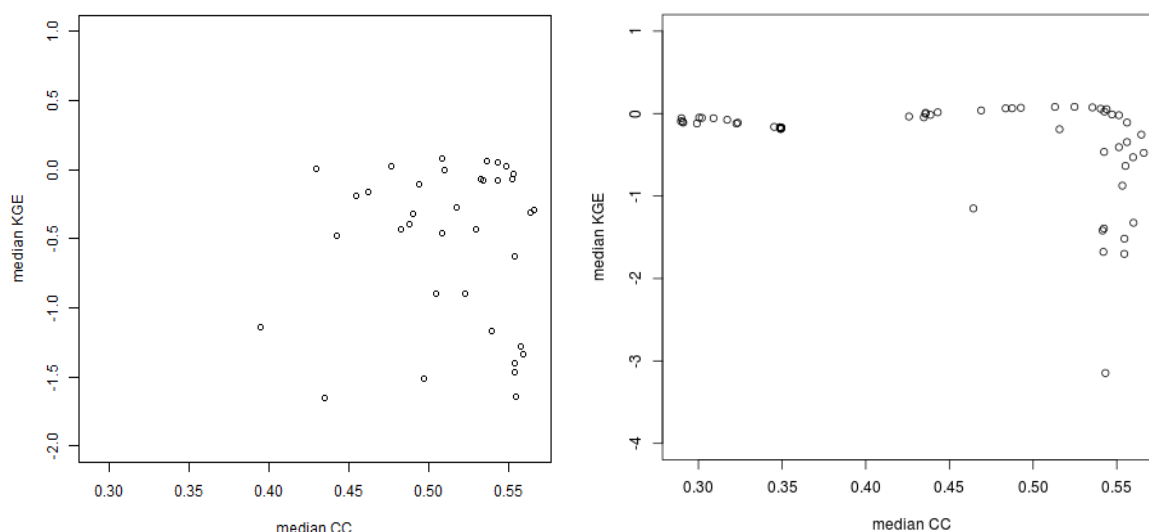


Obrázek 37 Celkový simulovaný odtok (Dsim) v porovnání s celkovým měřeným odtokem (Dmer), síť tvořena 10 UPOV (koncový UPOV: Tichá Orlice od toku Dobroučka po tok Třebovka). Parametry transformační metody vypočteny pomocí rovnice 5.24 na základě průměrného sklonu údolnice, délky údolnice a hustoty říční sítě. Vlevo kalibrační fáze s $CC = 0,679$, $KGE = 0,450$. Vpravo verifikační fáze s $CC = 0,560$, $KGE = 0,362$.

Výběr optimálního vztahu mezi fyzicko-geografickými charakteristikami UPOVů a hodnotami parametrů zvolené transformační metody

Jednotlivé identifikované vztahy mezi fyzicko-geografickými charakteristikami (FGC) a parametry zvolené transformační metody (dále jen lokální vztahy) byly postupně testovány na celém souboru říčních sítí, které byly použity ke kalibraci modelu říční sítě. Za optimální vztah (dále v textu jen regionální vztah) pro celý soubor říčních sítí byl vybrán ten, který na celém souboru sítí vedl k nejvyšší hodnotě simulační účinnosti (hodnoceno formou mediánu CC a KGE), zároveň vedl co nejčastěji k reálným hodnotám parametrů zvolené transformační metody a dále k rozumnému rozptylu v hodnotách parametrů transformační metody mezi UPOVY v závislosti na použité FGC.

Výsledky testování lokálních vztahů na souboru 64 říčních sítí ukazují zejména výrazný pokles simulační účinnosti hodnocené pomocí KGE pro všech 640 testovaných lokálních vztahů. Na druhou stranu, pokles mediánu CC nebyl v mnoha případech tak výrazný, viz Obrázek 38.



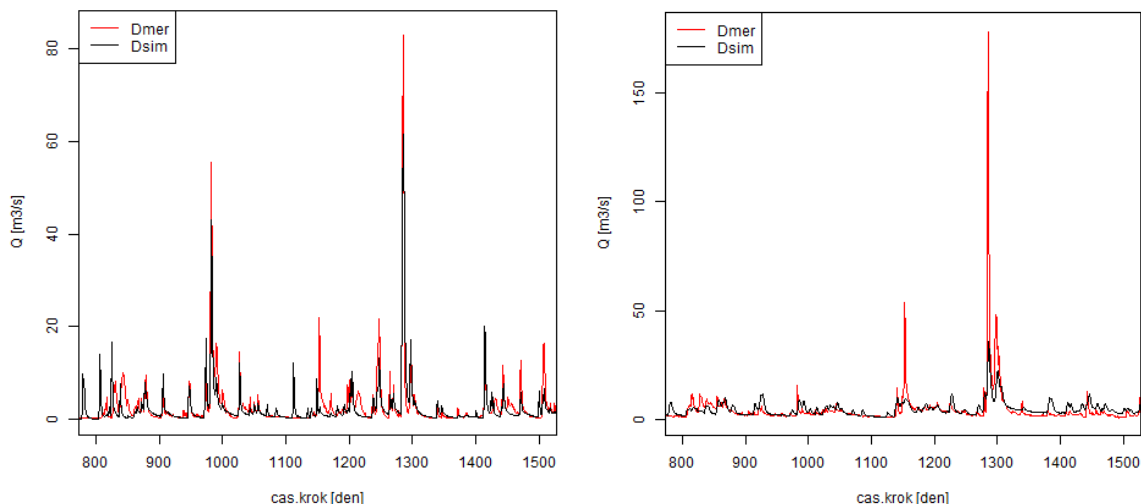
Obrázek 38 Simulační účinnost modelu říční sítě hodnocená formou mediánu CC a mediánu KGE na časové řadě 1. 1. 1993 až 31. 12. 1998, pokud bylo na souboru 64 říčních sítí testováno 64 lokálních vztahů obsahujících průměrný sklon údolnice (vlevo) a průměrný sklon údolnice, délku údolnice a hustotu říční sítě (vpravo).

Získané výsledky ukazují, že zvyšující počet FGC v lokálním vztahu, pokud je tento testován jako regionální vztah, vede k vyššímu počtu nereálných hodnot parametru transformační metody. Např. při použití 1 FGC (průměrný sklon údolnice) byl zaznamenán pouze u 2 testovaných lokálních vztahů vysoký počet záporných hodnot parametru transformační metody, při použití 3 FGC (průměrný sklon údolnice, délka údolnice, hustota říční sítě) byl zaznamenán u 17 testovaných vztahů vysoký počet záporných hodnot parametru transformační metody.

Na základě získaných výsledků byla za regionální vztah zvolena rovnice obsahující průměrný sklon údolnice ve tvaru:

$$\theta = 0,903 \cdot \log PSU + 0,05 \quad (5.25)$$

Tento regionální vztah vedl na souboru 64 sítí k relativně vysokému mediánu CC na časových řadách 1. 1. 1993 až 31. 12. 1998. Zároveň tento regionální vztah na souboru 64 říčních sítí vedl pouze v 6 případech k nereálným hodnotám parametru transformační metody. Příklady simulace odtoku s použitím této regionální rovnice jsou uvedeny na Obrázek 39.



Obrázek 39 Celkový simulovaný odtok (Dsim) v porovnání s celkovým měřeným odtokem (Dmer), časová řada 1. 1. 1993 až 31. 12. 1998. Vlevo síť tvořená 2 UPOVy s $CC = 0,828$ a $KGE = 0,764$ (koncový UPOV: Olše od státní hranice po tok Lomná). Vpravo síť tvořená 10 UPOVy s $CC = 0,655$ a $KGE = 0,383$ (koncový UPOV: Tichá Orlice od toku Dobroučka po tok Třebovka). Parametry transformační metody vypočteny pomocí rovnice 5.25.

5.5 Kalibrace modelu říční sítě

V další fázi proběhne kalibrace parametrů modelu říční sítě. Testovány budou obě transformační metody, přičemž v případě lineární nádrže budou řešeny obě varianty výpočtu transformovaného odtoku pro UPOV řádu a (tj. výpočet využívající rovnice 5.7 a 5.8). Proces kalibrace bude dvoufázový. V první fázi bude model kalibrován a validován pouze na sítích, kde žádný UPOV neobsahuje vodní nádrž na hlavním toku. Ve druhé fázi budou do kalibračního i validačního souboru zařazeny i sítě obsahující vodní nádrže na UPOVech. Použitým optimalizačním algoritmem bude metoda diferenciální evoluce, kvůli očekávanému vyššímu počtu kalibrovaných parametrů. Počet kalibrovaných parametrů bude v případě použití lineární nádrže roven počtu UPOVů řádu $a > 1$, v případě použití metody Muskingum bude dvojnásobkem počtu UPOVů řádu $a > 1$. K vyhodnocení simulační účinnosti modelu bude možné použít zvolené hodnotící kritérium: Nash-Sutcliffeův koeficient schody (Nash and Sutcliffe, 1970), Kling-Guptův koeficient (Gupta et al., 2009), střední kvadratická chyba, případně jiné.

5.6 Regionalizace parametrů modelu říční sítě

Optimální sady parametrů modelu říční sítě, zjištěné při kalibraci, budou v další fázi použity jako jeden ze vstupů pro nalezení regresních vztahů mezi nimi a vypočtenými geomorfologickými charakteristikami UPOVů. K identifikaci regresních vztahů bude použita metoda krokové regrese. Použitou alternativou bude metoda genetického programování (identifikace nelineárních vztahů,

zavedení speciálních funkcí). Nalezené regresní vztahy budou následně implementovány do modelu říční sítě a tato nová verze modelu bude testována na validačních datech.

6 Předpověď sucha

Předpověď sucha bude implementována v druhé etapě řešení projektu (tj. do konce března 2018). Postup tvorby předpovědi v reálném čase lze schematizovat do několika kroků, z nichž některé budou řešeny až v případném navazujícím projektu. V rámci aktuálního řešení bude vytvořena infrastruktura pro zavedení předpovědi a předpověď bude demonstrována offline (na historických datech). Předpověď v reálném čase vyžaduje řešení v návazném projektu.

6.1 Kalibrace předpovědi

Na historických datech bude testována předpověď několika metodami. Základní metodou je využití střednědobých předpovědí Evropského centra pro střednědobou předpověď, získaných prostřednictvím ČHMÚ a CzechGlobe. Předpovědi musí být zbaveny systematických chyb pomocí standardních metod. Testování předpovědi pomocí modelu Bilan bude probíhat na datech historického období s využitím pozorovaných meteorologických dat místo předpovědi. To umožní lepší testování hydrologického modelu, jelikož případné chyby v hydrologické předpovědi budou způsobeny pouze ním. Kromě předpovědi modelem Bilan bude, v případě dostatku času v rámci studentských prací testována i předpověď indikátorů sucha pomocí náhodných stromů a lesů, případně konvolučních neuronových sítí.

6.2 Získání předpovědi a pozorování srážek a teploty

Postprocesovaná předpověď ECMWF (ČHMÚ/CzechGlobe) bude pravidelně automaticky získávána, pravděpodobně v týdenních intervalech. Samotný výběr předpovědních produktů, časový horizont a metody postprocessingu budou dohodnuty na speciální schůzce. Do toku dat bude začleněn i model SoilClim (v současnosti již existuje předpověď prostřednictvím projektu Intersucho) za účelem zajištění konzistence. Předpověď v reálném čase bude implementována v případném návazném projektu.

Simulovaná hydrologická bilance a stav vodních zdrojů v povodí ve výchozím bodě předpovědi bude zákonitě zatížen chybou. Tyto chyby lze eliminovat pomocí metod asimilace dat. Zjednodušeně, stavové veličiny systému (zásoby v hydrologickém modelu, ve vodních nádržích atp.) budou opraveny tak, aby simulované veličiny co nejlépe korespondovali s pozorovanými.

6.3 Předpovědní běh a aktualizace webové aplikace

Po provedení asimilace dat bude následovat předpovědní běh, respektive předpovědní běhy. Ze surových výstupů modelu Bilan budou spočteny produkty zobrazované ve webové aplikaci (měsíční časové řady, indikátory sucha atp.). Budou dopočteny disponibilní vodní zdroje pro povodí UPOV. Užívání vod pro předpovědní horizont bude odhadnuto na základě historických pozorování. Do systému bude zavedena možnost tyto výhledy upravovat.

6.4 Rozhodovací systém pro řízení vodních zdrojů

V případném následném projektu bude vytvořena nastavba umožňující management vodních zdrojů pro různé správní jednotky. Systém bude jednoduše sumarizovat dostupné vodní zdroje i požadavky na užívání vod jednotlivými sektory. Zahrnuty budou i jednoduché optimalizační nástroje umožňující simulaci různých opatření (např. sektorových omezení) užívání vod.

7 Indikátory

7.1 Popis indikátorů

7.1.1 SPI, SPEI

Tento ukazatel byl vyvinut v roce 1993 (McKee et al., 1993) k monitorování a určení suchých období. Na rozdíl od jiných indexů má několik výhod: ke kalkulaci jsou nutná pouze srážková data (průtoky), výpočet je relativně snadný (zavádí se jen dva další parametry), a standardizovaný charakter. Posledně zmíněná věc však může být zároveň nevýhodou. Extrémně sucha období budou klasifikována se stejnou frekvencí jako extrémně vlhká období na různých lokalitách. Proto se doporučuje použít jako doplňující informace k jiným ukazatelům (Lloyd a Saunders, 2002). Jedná se vlastně o transformaci srážkových časových řad na normální rozdělení. Měsíční (nebo jiný časový interval) jsou aproximovány pravděpodobnostním rozdělením (nejčastěji se používá Gamma rozdělení, ale v některých případech může být vhodnější Poissonovo nebo Log-normální). Česká povodí byla aproximována Gamma rozdělením s obdobným nebo lepším výsledkem než log-normální rozdělení. Poissonovo rozdělení nereflektuje srážkové řady pro česká povodí. Obdobně byly vypočteny indikátory SRI (na průtoky), SGI (na základní odtok) a SPEI (indikátor zahrnující evapotranspiraci). Pro každý útvar byly indexy vypočteny ve variantě 1, 3, 6 a 12 měsíců. Příklad vývoje indexu SPI pro 3 měsíce je uveden v Příloze II (výstup systému HAMR).

7.1.2 PDSI

Byl vyvinut v šedesátých letech v USA (Palmer, 1965). Na rozdíl od předchozího klimatického ukazatele bilancuje nejen srážky v dané oblasti, ale zároveň i zásobu vody v půdním horizontu a výpar. Umožňuje tak kvantifikovat a porovnávat sucho v oblastech s odlišnými pedologickými a klimatickými poměry. Rekursivní formule pro tento index vychází z odchylky od klimatického normálu pro daný časový interval a z předešlého výpočetního období. Metoda výpočtu je tím pádem nastavena tak, aby jeden suchý měsíc (s nízkým srážkovým úhrnem) v dlouhodobě vlhkém období neměl zásadní vliv na hodnotu indexu.

7.1.3 Nedostatkový objem

Jedním z hlavních kritérií pro vyhodnocení hydrologického deficitu jsou nedostatkové objemy. Průtok je popsán časovou funkcí $Z(t)$. Funkce $Z(t)$ je v čase proměnná v požadavku na vodu. Pro časový integrál $\langle t_{pi}, t_{ki} \rangle$, pro který je splněná podmínka $Z(t_i) > Q(t_i)$ definujeme určitý integrál W_i :

$$W_i = \int_{t_{pi}}^{t_{ki}} [Z(t_i) - Q(t_i)] dt.$$

kde: $i = 1, 2, 3, \dots, n$, n – počet deficitů v řešeném období,

t_{pi} – čas počátku i -tého deficitu,

t_{ki} – čas konce i -tého deficitu.

(7.1)

Důležitým faktorem je hodnota prahu (threshold level). Bývají to kvantily průměrného ročního průtoku $Q_{80\%}$, $Q_{90\%}$, ... a m-denní průtoky např. Q_{330} , Q_{355} nebo Q_{364} . V tomto případě jsou jako vstup použity denní průměrné průtoky. Avšak sucho lze posuzovat i v měsíčním časovém kroku. Měsíční průtokové řady jsou stejně přesné jako denní, pokud jsou vyhotoveny z původní denní řady. Zavedení variabilní hodnoty je zejména důležité pro reflexi ekologických a jiných požadavků na vodní tok, avšak v současné době se v České republice většinou užívá hodnota minimálního zůstatkového průtoku, která se vypočítává z denních průtokových hodnot, a proto není použitelná pro vyhodnocení v měsíčním časovém kroku. Z tohoto důvodu byly pro vyhodnocení zvoleny průtokové kvantily $Q_{70\%}$, $Q_{80\%}$, $Q_{90\%}$ a $Q_{95\%}$, a to pro konstantní i variabilní hodnotu prahu (thresholdu).

7.2 Indexy určující míru zranitelnosti povodí

Pro porovnání jednotlivých povodí z hlediska zranitelnosti vůči suchu byly pro každé povodí 3. řádu stanoveny níže uvedené indexy, vycházející z měsíčních řad. Vstupními daty pro jejich výpočet jsou pozorované řady o užívání vod spolu s řadami potenciální evapotranspirace, srážek, minimálního zůstatkového průtoku a 90 % kvantilu.

Vypočítané indexy:

$$PP = \frac{PET}{P}, \quad (7.2)$$

$$WQ_{90} = \frac{POV + POD + MZP}{Q_{90}}, \quad (7.3)$$

$$WPP = \frac{POV + POD + MZP}{P - PET}, \quad (7.4)$$

$$WQ_{90_} = \frac{POV + POD - VYP + MZP}{Q_{90}}, \quad (7.5)$$

$$WPP_ = \frac{POV + POD - VYP + MZP}{P - PET}, \quad (7.6)$$

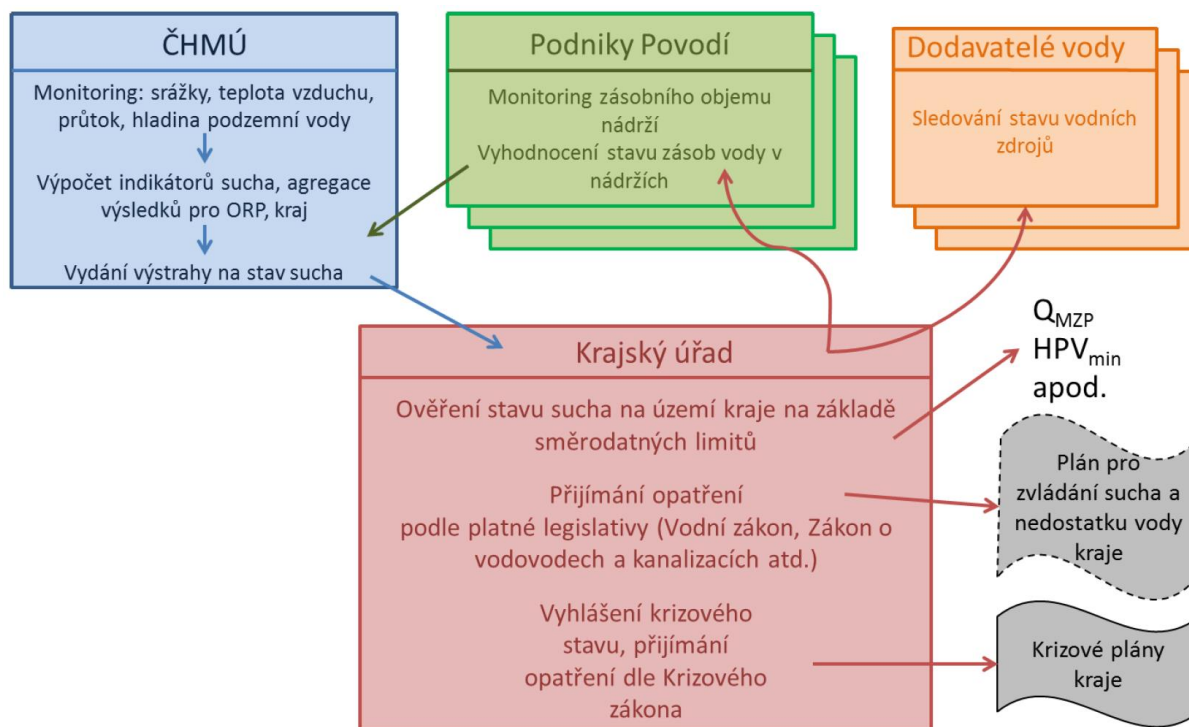
$$\text{prum} = \text{průměr indexů } PP, WPP_ \text{ a } WQ_{90_}, \quad (7.7)$$

kde PET je potenciální evapotranspirace, P jsou srážky, POV odběry z povrchových vod, POD odběry z podzemních vod, VYP vypouštění, MZP minimální zůstatkový průtok a Q_{90} je 90% kvantil průtoku (z měsíčních průměrných průtoků).

7.3 Návrh do plánů

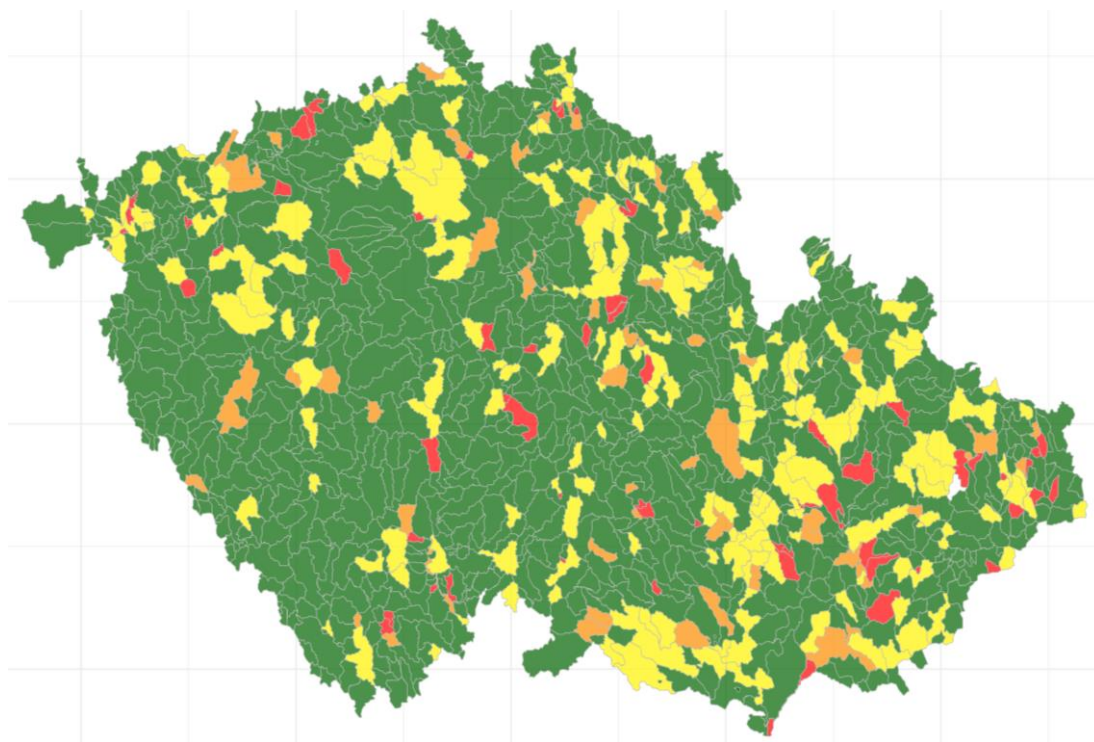
Pro celkové hodnocení sucha v rámci tohoto projektu byly použity již zmíněné indexy. Jejich kombinace je poté navržena do plánů pro zvládání sucha. Chod rozhodování funguje dle následujícího principu (více viz zpráva „Typové plány“ a Obrázek 40). Pro jednotlivé složky (srážka, průtok...) jsou vypočteny indikátory a jsou rozděleny do 4 stavů:

- Normální stav
- Bdělost
- Kritický stav
- Ohrožení



Obrázek 40 Rozhodovací schéma pro vyhlášení stavu sucha

Na Obrázek 41 jsou zobrazeny zranitelné oblasti dle WQ90_, tento index udává zranitelnost vůči dodávkám vody. Následně byla jednotlivým oblastem přiřazena váha, dle které se přepočítává celkový index. Zelená barva značí oblast bez ohrožení, žlutá nízké riziko, oranžová rizikové a červená kritické oblasti.



Obrázek 41 Zranitelné oblasti dle WQ90_

Vážené hodnoty jednotlivých indexů pro každý UPOV jsou následně přepočteny váženým průměrem pro okres a kraj, pro který jsou následně vyhlášeny jednotlivé stupně sucha dle následujícího principu:

8 Webová aplikace

V rámci řešení projektu byly vytvořeny dvě webové aplikace – první aplikace umožňuje vizualizaci komplexních výsledků projektu a slouží zároveň pro vyhodnocení kalibrace a validace modelu Bilan, modelu vodohospodářské soustavy atd. Vzhledem k velkému objemu dat, je tato aplikace relativně pomalá. Z toho důvodu byla naprogramována druhá, odlehčená, aplikace. Tato aplikace zobrazuje pouze vybraná data a je tak rychlejší a stabilnější. V první části této kapitoly se zabýváme kompletní aplikací, v závěru aplikací zjednodušenou.

Aplikace je vytvořena prostřednictvím programovacího jazyka R. Jedná se o vizualizaci výsledků modelování projektu HAMR (viz záložka “O projektu”). Jádrem aplikace je postaveno na balíčcích Shiny a flexdashboard.

Shiny je balíček, umožňující jednoduché vytváření interaktivních aplikací kombinací výpočetních možností R s interaktivitou moderních webových stránek. flexdashboard slouží k publikaci dat a jejich přehledné vizualizaci v rámci webového prohlížeče. Využívá R Markdown k publikaci souvisejících vizualizací do jednotného zobrazení neboli dashboardu. Balíček podporuje široký výběr komponentů, včetně `htmlwidgets` (například Leaflet, dygraphs, Plotly). Společně tyto balíčky slouží k publikaci interaktivních vizualizací v rámci webového prohlížeče.

8.1. Technické řešení

Aplikace je přístupná na [serveru](#)¹ nebo ji lze také [stáhnout ze stránek GitHubu](#)², kde je pro aplikaci založen repozitář. Tento repozitář obsahuje následující soubory:

- Soubor s aplikací “flex_app.Rmd”
- Skript připravující vstupní data pro aplikaci “prep.R”
- Skript pro automatickou instalaci potřebných balíčků “install.packages.R”
- Soubor s kaskádovými styly pro nastavení vzhledu aplikace “styles.css”

Mimo již zmíněné balíčky Shiny a flexdashboard byly použité následující balíčky:

- Leaflet, umožňující vizualizaci prostorových dat v interaktivních mapách
- ggplot2, dygraphs a Plotly k vykreslení časových řad a čar překročení
- data.table, dplyr sloužící k transformaci dat
- DT, sloužící k vytváření interaktivních tabulek.

8.2. Data

Data, která využívá aplikace, jsou objemná, přibližně 1.17 GB, a jsou chráněna licencí. Většinou se totiž jedná o majetek ČHMÚ a VÚV TGM. Z těchto důvodů data jsou zatím uložena zvlášť na OwnCloud³ úložišti, ke kterému mají přístup pouze řešitelé projektu. Pro offline chod aplikace je tedy nezbytné mít přístup na toto úložiště. Verze publikovaná na serveru KVHEM pochopitelně využívá vlastní kopii dat.

¹ Aplikace na serveru ČZU KVHEM: <https://shiny.fzp.czu.cz/KVHEM/HAMR/>

² Repozitář na GitHub: <https://github.com/KVHEM/Sucho>

³ OwnCloud je open source cloudová služba, více o této službě zde: <https://owncloud.org/features/>

Vizualizovaná data lze rozdělit do několika skupin:

- prostorová data,
- data potřebná pro hydrologickou bilanci,
- data pro indikátory sucha,
- data pro užívání vod
- data pro validaci.

Skupina prostorových dat obsahuje soubory s informacemi o útvarech povrchových vod (UPOV) ČR (povodi.rds, reky.rds, jezera.rds, nadrze.rds) a soubory administrativního členění ČR (kraje.rds, okresy.rds a povodí 3. řadu povodi_III.rds). Tyto soubory byly v rámci přípravy dat převedeny z formátu *.shp do formátu *.rds. Dále pro rychlejší načítání a jednodušší manipulaci byly tyto soubory transformovány do souřadnicového systému WGS84 (pomocí funkce `spTransform()` z balíčku `sp` a atributu CRS - *Coordinate Reference System* - nastaveného na identifikátor pro WGS84 - EPSG:4326) a zjednodušeny (pomocí funkce `ms_simplify()` z balíčku `rmapshaper`) pro snížení náročnosti při vykreslování. Soubor `popis.rds` obsahuje informace o jednotlivých útvarech, jako jsou: název útvaru, název povodí, název oblasti, kategorie útvaru a typ útvaru. Následně soubor `popis.rds` je propojen pomocí funkce `merge()` z balíčku `sp` se souborem `povodi.rds` přes identity jednotlivých útvaru (`UPOV_ID`). K vykreslení horního povodí se používá soubor `TABB.rds` obsahující informace o tom, která povodí přitékají do jednotlivých UPOVů.

Další skupinou jsou data potřebná pro vyhodnocení hydrologické bilance. Pomocí modelu Bilan (Vizina et al. 2015) bylo v rámci projektu kalibrováno 1112 UPOVů a výstupem je 18 proměnných (složky hydrologické bilance a meteorologické vstupy) pro každý UPOV v denním kroku pro období 1981-2010. Tyto proměnné jsou uvedeny v tabulce níže (VÚV TGM 2015):

zkratka	význam	zkratka	význam
P	srážky na povodí	SW	půdní vlhkost (zásoba vody v nenasycené zóně)
R	odtok (pozorovaný)	SS	zásoba vody ve sněhu
RM	celkový odtok (simulovaný)	GS	zásoba podzemní vody
BF	základní odtok (simulovaný)	INF	infiltrace do půdy
B	základní odtok (odvozený)	PERC	perkolace z půdní vrstvy
DS	zásoba pro přímý odtok	RC	dotace zásoby podzemní vody
DR	přímý odtok	T	teplota vzduchu
PET	potenciální evapotranspirace	H	vlhkost vzduchu
ET	územní výpar	WEI	váhy pro kalibraci odtoku

Z důvodů šetření vnitřní paměti aplikace se soubory s daty pro hydrologickou bilanci nacházejí na úložišti ve složce 'res' a jsou uloženy ve formátu *.rds s názvy odpovídající identitě jednotlivých povrchových útvarů (`UPOV_ID`). Aplikace tyto soubory načítá pouze při požadavku uživatele. Měsíční bilance je agregací denních dat a načítá se ze souboru `bilan_month_data_table.rds` (ukládá se do proměnné `BM`). Do této skupiny lze zařadit i soubor `cara_prekroceni_dt.rds` (v aplikaci proměnná

cp). Soubor obsahuje před počítané roční, měsíční a sezónní pravděpodobnosti vypočtené jednotlivé proměnné dle vzorce:

$$p = \frac{(m-0,3)}{(n+0,4)}, \quad (8.1)$$

kde po seřazení souboru dle velikosti v klesajícím pořadí je n počet prvků a m je pořadové číslo.

Data pro vykreslení indikátorů sucha se nacházejí ve samostatné složce 'indikatory'. Při zvolení uživatelem indikátoru sucha (v nabídce jsou indikátory SPI, SPEI, PDSI a scPDSI spočítány klouzavě s krokem 1, 3, 6, 9 a 12 měsíců) se načte *.rds soubor dle odpovídajícího indikátoru či indikátoru a kroku (soubory `spi.rds` a `spei.rds` jsou z důvodu velikosti rozděleny do menších podsouborů).

Data užívání vod za období 2006-2016 (`uzivani_na_nahraz_dt.rds` ve složce 'uzivani') pocházejí z evidence užívání vod, kterou spravuje VÚV T. G. Masaryka a v rámci aplikace se ukládají do proměnné `u`. Data obsahují informace o poloze odběru ve formě souřadnic (X a Y), identifikačním čísle odběru (ICOC), názvu místa odběru (NAZICO) a také informace o jevu (odběry z podzemních vod POD, odběry z povrchových vod POV či vypouštění VYP). V rámci přípravy dat byly ICOCům, které obsahovali pozorované údaje, ale měli chybějící souřadnice, přiřazeny průměry souřadnic mezi odběry se stejným ICOC a jiným jevem. Tyto data slouží k vykreslení časových řad a tabulek. Pro vykreslení bodů do mapy bylo nutné vytvořit soubor (`u_leaflet.rds` ve stejné složce), který obsahuje pouze jeden záznam pro každý ICOC. Souřadnice těchto ICOCů byly transformovány do souřadnicového systému WGS84 a následně byly uloženy ve formátu `SpatialPointsDataFrame`.

Kalibrace modelu Bilan proběhla s nastavením modelu na denní časový krok při použití šesti volných parametrů (*Spa, Alf, Dgm, Soc, Mec, Grd*). Parametry denního modelu Bilan jsou popsány v kapitole 3. Soubor s parametry `pars.rds` se nahrává v aplikaci do stejnojmenné proměnné a obsahuje počáteční hodnoty parametrů (`initial`), jejich dolní a horní meze (`lower, upper`) a stávající hodnotu (`current`). Tyto proměnné jsou dány pro každý UPOV. K stanovení hodnot parametrů byl použit globální optimalizační algoritmus diferenciální evoluce (VÚV TGM, 2015).

Model byl kalibrován na hydrologické charakteristiky povodí UPOV (m-denní průtoky a dlouhodobý průměrný průtok) poskytnuté ČHMÚ. M-denní průtoky vypočítané na základě pozorovaných hodnot lze načíst ze souboru `chars_mm.rds` a m-denní průtoky pro simulovaná data ze souboru `chars_mm_sim.rds`.

K validaci denních průtoků (soubor `QD.rds` ze složky 'chmu') bylo využito dat ze 156 vodoměrných stanic. Po propojení databankového čísla DBCN s povodím UPOV_ID zbylo 153 stanic. Mimo DBCN a UPOV_ID soubor obsahuje hodnoty pozorovaných denních průtoků (`value`) za období 1980-2010 (DTM). Simulované průtoky se nacházejí ve složce '*routed-Q_bilan_bez_VN*' a obdobně jako u denních dat hydrologické bilance obdrží se při zvolení konkrétní stanice (dle patřičného UPOV_ID aplikace načte odpovídající *.rds soubor). Pro prostorové vykreslení stanic se používá soubor `QD_stanice` (složka '*geo_rds*', soubor `stanice.rds`). Původní shapefile byl převeden do souřadnicového systému WGS84 a uložen ve formátu *.rds. Soubor obsahuje nejen prostorové informace, ale i informace o názvech toku, ploše povodí atd.

Validace měsíčních průtoků využívá záznamy 542 vodoměrných stanic z období 1982-2010. Prostorová data jsou uložena do proměnné stanice (soubor `E04_Vodomerne_stanice.rds` ze složky

'geo_rds'). Data s naměřenými (QMER) a simulovanými (QNEK, QNEY) průtoky lze načíst ze souboru data_validate.rds ze složky 'chmu'. Tento soubor byl vytvořen agregací denních dat ze složky 'routed-0_bilan_bez_VN'.

8.3. Postprocessing

Pro podporu projektu byl vytvořen balíček CatCa⁴, který obsahuje některé důležité funkce pro práci s útvary povrchových vod, výpočet bilance, m-denních vod atd. Nainstalovat balíček lze pomocí příkazu `devtools::install_github("KVHEM/CatCa")`. V rámci tvorby aplikace byly do tohoto balíčku přidány také funkce pro přípravu dat. Tyto funkce upravují vstupní data do potřebného formátu a vybírají pouze potřebné proměnné pro snížení využívané paměti a výpočetní náročnosti. Přehled funkcí k přípravě dat je uveden v Tabulce 5 níže. Dále balíček obsahuje funkci `give_paths()` pro nastavení pracovních cest k úložišti dat. Pokud cesta není nastavena pomocí funkce `give_paths()` je nutné ji uložit manuálně do proměnné `.datadir`.

Tabulka 5 Přehled funkcí k přípravě dat

<code>prep_spatial_data()</code>	příprava prostorových dat pro aplikaci
<code>prep_bilan_month()</code>	příprava měsíční bilance pro aplikaci
<code>prep_QD()</code>	příprava denních průtoků (validace) pro aplikaci
<code>prep_uzivani()</code>	příprava užívání pro aplikaci
<code>prep_uzivani_upovid()</code>	příprava připojení UPOV_ID k užívání pro aplikaci

8.4. Základní rozvržení

Na úvod je vhodné uvést některé pojmy, které budou používány pro popis základního rozvržení aplikace. Okno aplikace je většinou rozděleno do několika hlavních částí:

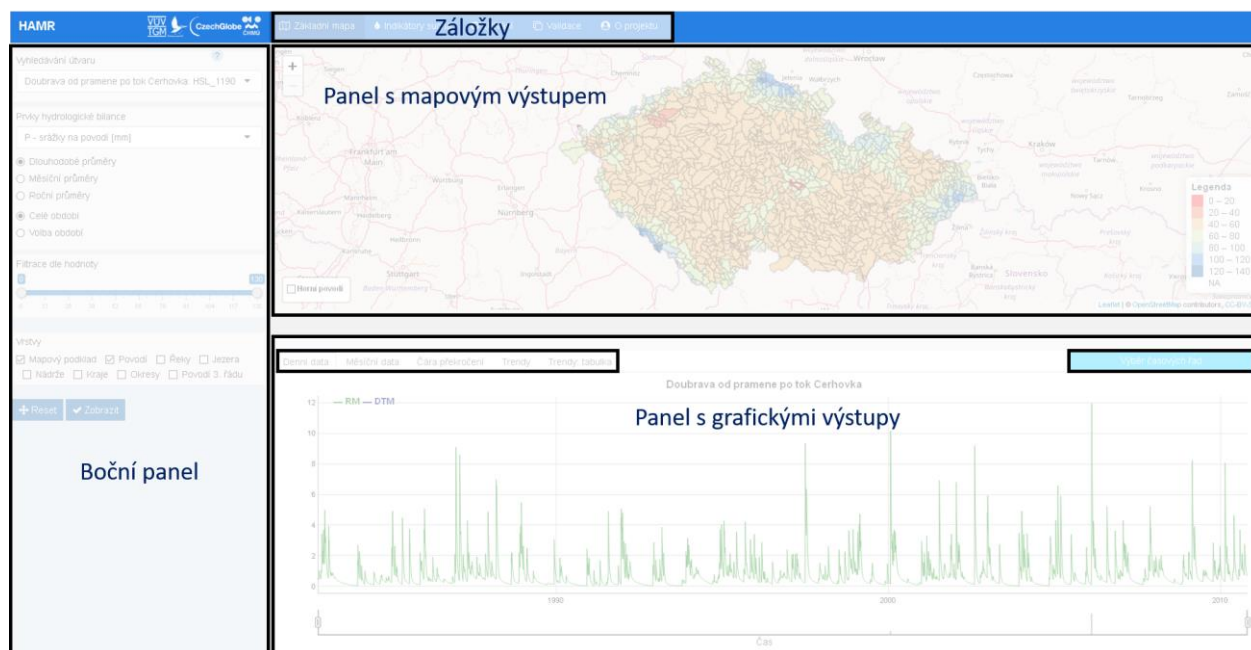
- boční panel
- panel s mapovým výstupem
- panel s grafickými výstupy.

V bočním panelu se nastavují vstupy pro vykreslení mapy, požadované vrstvy a lze také použít pole pro vyhledávání útvaru. Pole "Vyhledávání útvaru" nabízí seznam všech vykreslených útvarů, ale lze ho také použít k ručnímu vyhledávání; stačí vymazat momentálně zobrazený název a napsat název toku či jeho UPOV_ID. Pole "Vrstvy" v bočním panelu je k dispozici pro každý panel s mapovým výstupem aplikace a umožňuje výběr následujících vrstev: povodí, řeky, jezera, nádrží, mapový podklad, povodí 3. řádu a administrativní členění České republiky (kraje a okresy). Boční panel některých záložek také obsahuje tlačítka "Reset" a "Zobrazit". Tlačítko "Reset" vrací mapový panel na počátečně nastavené souřadnice. Tlačítko "Zobrazit" slouží k vykreslení po novém nastavení vstupů. Horní lišta aplikace obsahuje přepínač mezi jednotlivými záložkami aplikace: "Základní mapa", "Indikátory sucha", "Užívání", "Validace" a "O projektu". Záložka "O projektu" obsahuje krátký popis

⁴ Repozitář na GitHub: <https://github.com/KVHEM/CatCa>.

projektu a veškeré kontakty. V budoucnu bude rozšířena o metodiky k jednotlivým součástem systému.

Grafy zpravidla mají vlastní výběr proměnných, který se na níže uvedeném obrázku nachází v pravém horním rohu grafického panelu. Tento výběr má tvar srolovatelného menu. Dále grafický panel může obsahovat vlastní lištu se záložkami pro přepínání mezi jednotlivými typy grafů a tabulek. Základní přehled je uveden na Obrázek 42.



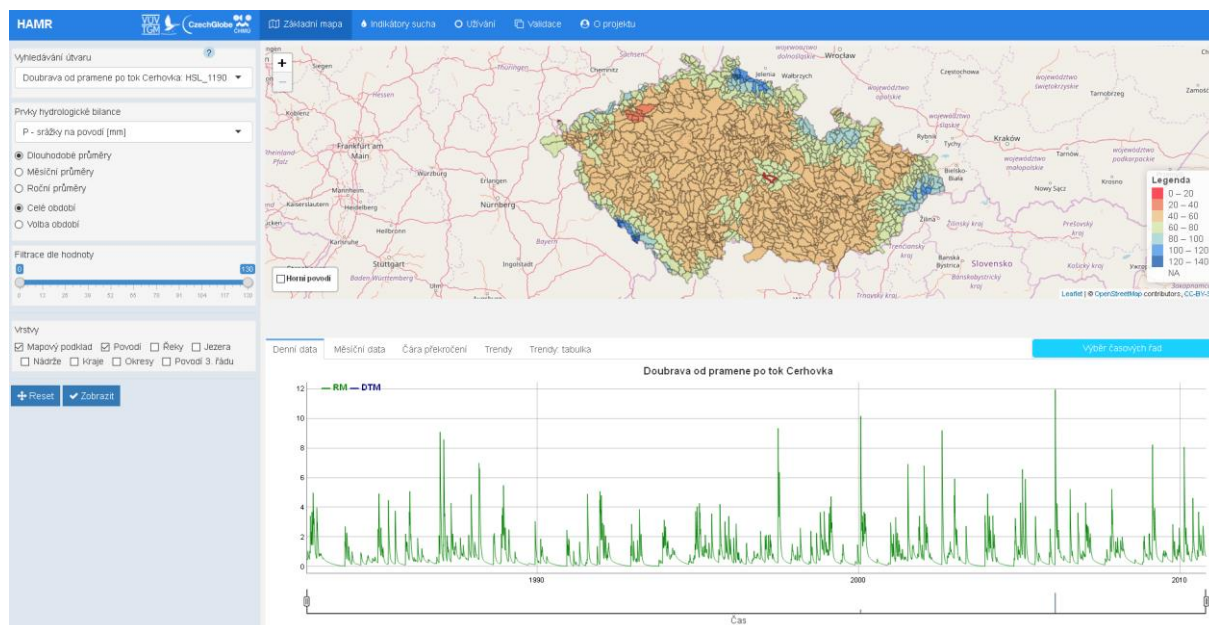
Obrázek 42 Základní rozložení systému HAMR

8.4.1 Základní mapa

“Základní mapa” je první záložkou a zobrazí se ihned po spuštění aplikace. Obsahuje informace o hydrologické bilanci povodí České republiky. Záložka základní mapa je rozložena na boční panel, panel s mapovým výstupem a panel s grafickým výstupem.

V bočním panelu se nacházejí pole “Vyhledávání útvaru”, “Prvky hydrologické bilance”, “Filtrace dle hodnoty”, “Vrstvy” a tlačítka “Reset” a “Zobrazit”. Uživatel volí proměnnou hydrologické bilance, dle níž jsou zbarveny jednotlivá povodí, zobrazená na mapě. Hodnoty proměnné jsou agregovány do měsíčních a ročních kroků, lze je také vykreslit jako dlouhodobé průměry, tzn. průměry za celé období nebo za konkrétní periody po 30 letech: 1961-1990, 1971-2000 a 1981-2010. “Filtrace dle hodnoty” v počátečním stavu obsahuje všechny hodnoty zvolené proměnné a dále umožňuje nastavení rozsahu hodnot, který omezí vykreslená povodí. “Vyhledávání útvaru” je jedinou částí bočního panelu, která je propojená nejenom s mapou, ale i s grafickými výstupy. Mapové objekty jsou vykresleny pomocí Leaflet. Pro zvolené povodí se vypočítají časové řady z měsíčních a denních dat (pomocí balíčku dygraphs), čára překročení pro celé období, roční období a měsíce (pomocí balíčku Plotly) a trendy: grafické znázornění a tabulka s vyhodnocením statistické významnosti (ggplot2). Zvolené povodí se zvýrazní v mapě červeným okrajem. Kliknutím na jiné povodí se

přepočítají grafické výstupy a název nově zvoleného povodí s jeho UPOV_ID se promítne do pole “Vyhledávání útvaru”. Základní mapa je zobrazena na Obrázek 43.



Obrázek 43 Základní mapa systému

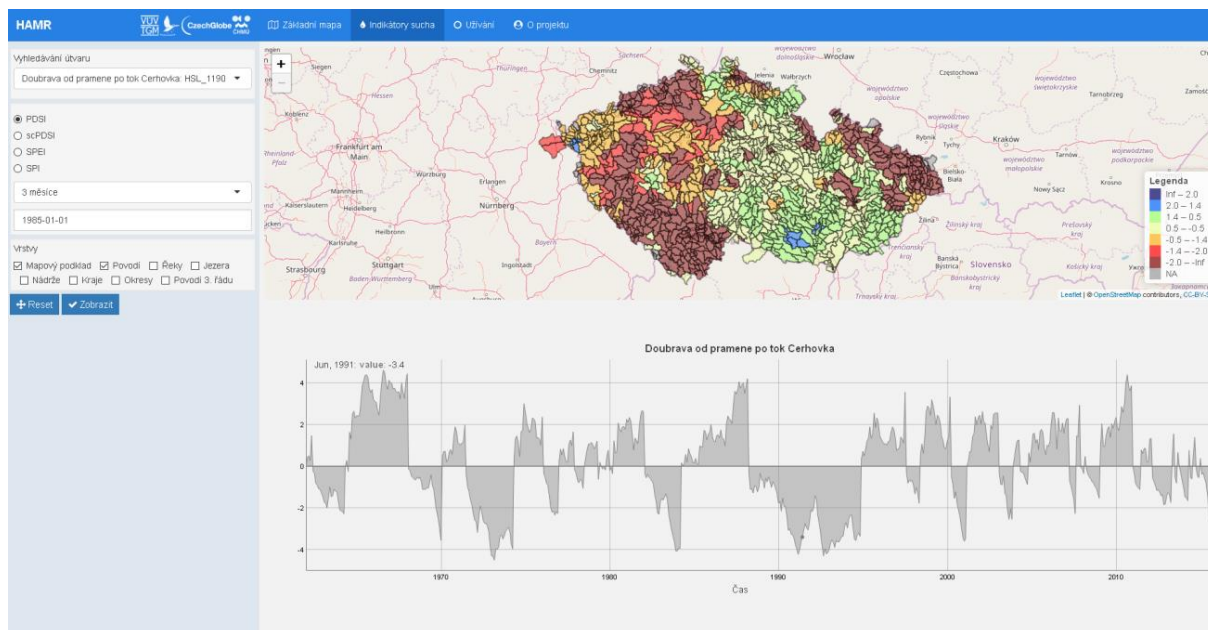
8.4.2 Indikátory sucha

Záložka “Indikátory sucha” (Obrázek 44) se skládá z bočního panelu, mapového panelu a grafického panelu. V bočním panelu se obdobně jako v záložce “Základní mapa” nachází pole “Vyhledávání útvaru” a “Vrstvy”. Dále v bočním panelu lze zvolit indikátor a krok, do kterého budou data agregována. Dále lze zvolit datum pro vykreslení mapy. Protože data mají měsíční časové měřítko, volba konkrétního dne v kalendáři nehraje pro vykreslení žádnou roli, ale volba data ve formátu “mm-YYYY” zatím není možná. Momentálně v mapě jsou zobrazeny indikátory SPI (*Standardized Precipitation Index*), SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) a PDSI (*Palmer Drought Severity Index*) a scPDSI (*Self-calibrating Palmer Drought Severity Index*), které jsou počítány klouzavě s krokem 1, 3, 6, 9 a 12 měsíců. Povodí se dělí do 7 kategorií podle hodnoty příslušného indikátoru tak, aby se dostatečně projevila variabilita viz Tabulka 6.

Tabulka 6 Hodnocení intenzity sucha pro jednotlivé indikátory

∞ až 2,0	extrémně vlhké
2,0 až 1,4	silně vlhké
1,4 až 0,5	mírně vlhké
0,5 až –0,5	bez výskytu sucha
–0,5 až –1,4	slabé sucho
–1,4 až –2,0	silné sucho
–2,0 až $-\infty$	mimořádné sucho

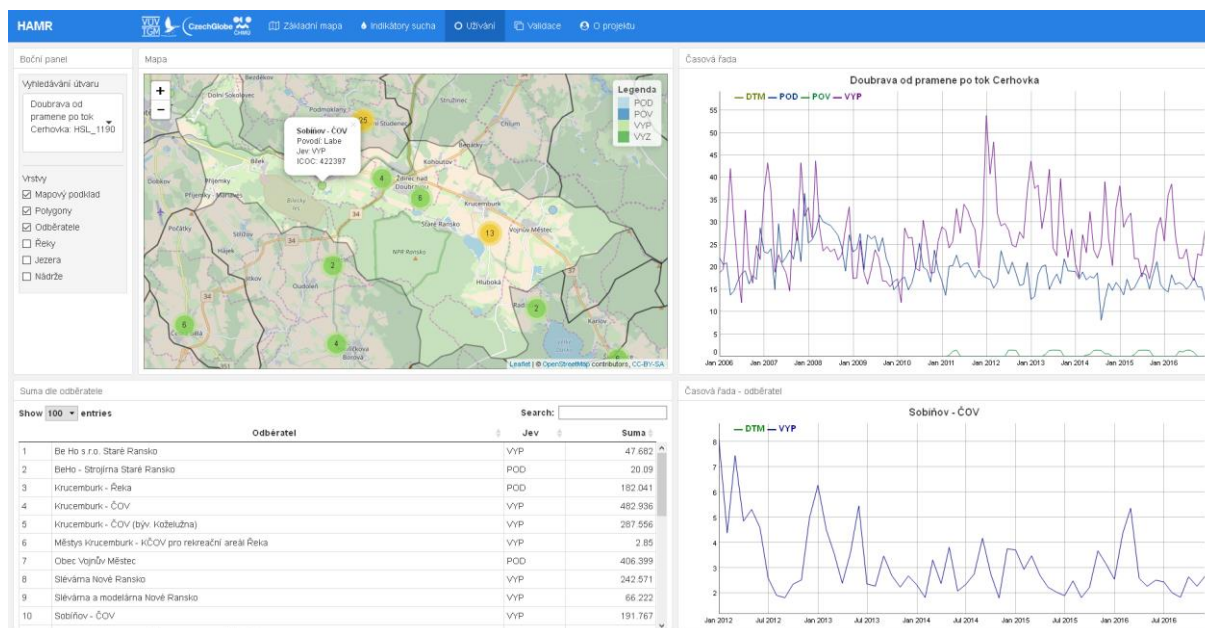
Mapové objekty jsou vykresleny pomocí Leaflet. V grafickém panelu se vykresluje časová řada indikátoru pro zvolené povodí pomocí balíčku dygraphs.



Obrázek 44 Komponenta indikátory sucha

8.4.3 Užívání

Záložka “Užívání” obsahuje informace o užívání vody v ČR a je rozdělena do pěti částí: boční panel, panel s mapovým výstupem, dva panely s grafickými výstupy a jeden panel s tabulkovým výstupem. Boční panel obsahuje pole “Vyhledávání útvaru” a “Vrstvy”. Pole “Vrstvy” je rozšířeno o vrstvu “Odběratele”, avšak postrádá administrativní členění České republiky. Mapový panel spojuje místa odběru do shluků. Po přiblížení lze na bod kliknout. Po kliknutí se zobrazí popis s informací o odběrateli a vykreslí se časová řada odběrů. Kliknutím na povodí se obdrží informace o všech odběratelích v tabulkovém panelu a časová řada pro jednotlivé jevy v grafickém panelu (odběry z podzemních vod POD, odběry z povrchových vod POV či vypouštění VYP). Grafické panely jsou vytvořeny pomocí dygraphs. Tabulka je vytvořena pomocí balíčku DT a je interaktivní. Komponenta pro nakládání s vodou je na Obrázek 45.



Obrázek 45 Komponenta nakládání s vodou

8.4.4 Validace

Záložka “Validace” se dělí na tři části: boční panel, panel s mapovým výstupem a panel s grafickým výstupem. Boční panel obsahuje standardní pole “Vrstvy” a přepínač mezi následujícími možnostmi: denní průtoky, měsíční průtoky, přepínání parametrů a m-denní průtoky.

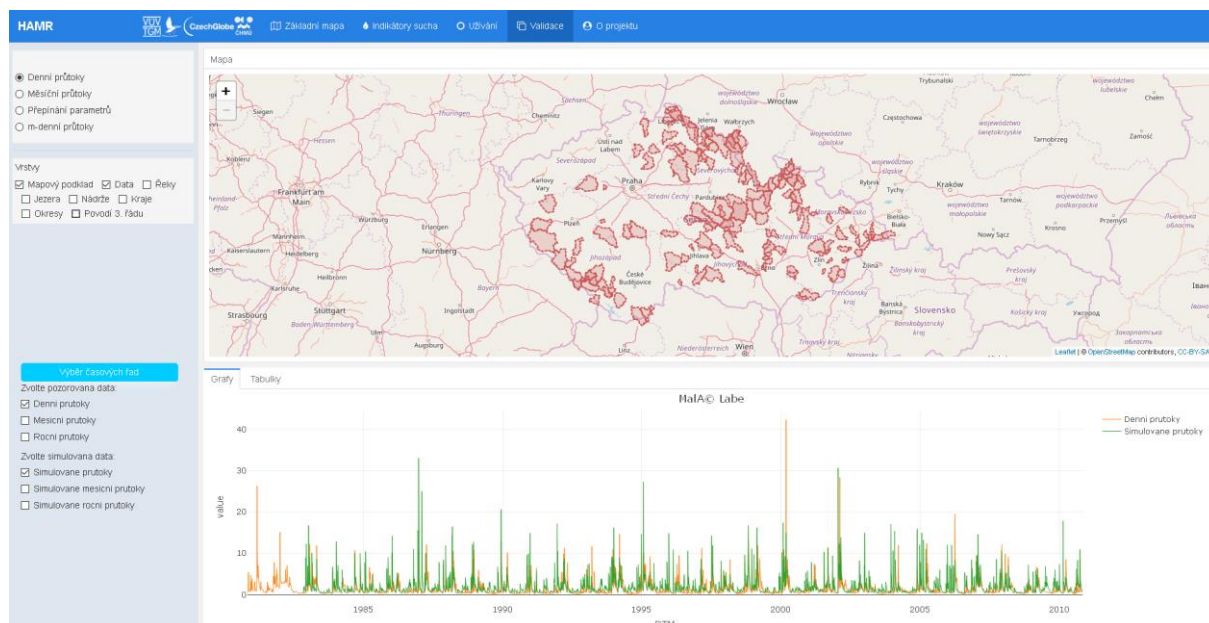
Mapový výstup denních průtoků obsahuje polohu 153 měrných stanic a grafický panel po zvolení konkrétní měrné stanice vytvoří časovou řadu pozorovaných a simulovaných průtoků, které lze vykreslit v denním, měsíčním a ročním kroku pomocí menu “Výběr časových řad” (nachází se v oblasti bočního panelu). Záložku grafického panelu lze přepnout z grafů na tabulky, které nejsou interaktivní. Tabulka denních průtoků obsahuje pouze základní přehled o datech (počet pozorování, střední hodnotu atd.).

Mapový výstup měsíčních průtoků obsahuje pozice 542 vodoměrných stanic. Body vodoměrných stanic jsou propojeny s informacemi o UPOVu, do kterého spadají. Kliknutím na bod se objeví popisec stanice a vykreslí se horní povodí, obdobně jako v záložce “Základní mapa”. Graf obsahuje časové řady pozorovaných a simulovaných průtoků a tabulka obsahuje číselné vyhodnocení přesností simulovaných dat vůči pozorovaným datům. Výpočet je uskutečněn pomocí funkce `gof()` z balíčku `hydroGOF`⁵.

Po zvolení “Přepínání parametrů” se v bočním panelu objeví pole s nabídkou parametrů (*Spa*, *Alf*, *Dgm*, *Soc*, *Mec*, *Grd*). Momentálně “Přepínání parametrů” obsahuje pouze panel s mapovým výstupem pro vizualizaci plošného rozložení parametrů. UPOVy jsou zbarveny dle stávajících hodnot parametru (current).

⁵ Dokumentace balíčku je dostupná na adrese <https://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/hydroGOF.pdf>

Po zvolení m-denních průtoků se objeví v bočním panelu nabídka m-denních vod (Q_{30d} , Q_{60d} , Q_{90d} , Q_{120d} , Q_{150d} , Q_{180d} , Q_{210d} , Q_{240d} , Q_{270d} , Q_{300d} , Q_{330d} , Q_{355d} , Q_{364d}). Také se objeví pole “Vyhledávání útvaru”, které propojuje mapový a grafický panel. Útvary mapového výstupu se zbarvují dle hodnoty proměnné, kterou zvolí uživatel. Grafickým výstupem je Plotly objekt, který obsahuje seřazené hodnoty pozorovaných a simulovaných m-denních průtoků pro zvolené povodí. Tabulkový výstup obsahuje tytéž hodnoty. Komponenta je na Obrázek 45.



Obrázek 46 Komponenta validace průtoků a parametrů hydrologického modelu

8.5. Zjednodušená verze aplikace

Zjednodušená verze aplikace je založena na původní verzi, avšak nejsou dostupná všechna data pro analýzu a prohlížení. Tím se aplikace stává svižnější a na druhou stranu pro koncového uživatele s dostatečným informačním zdrojem. Následující kapitoly tuto lite verzi prohlížečky prezentují.

8.5.1 Technické řešení

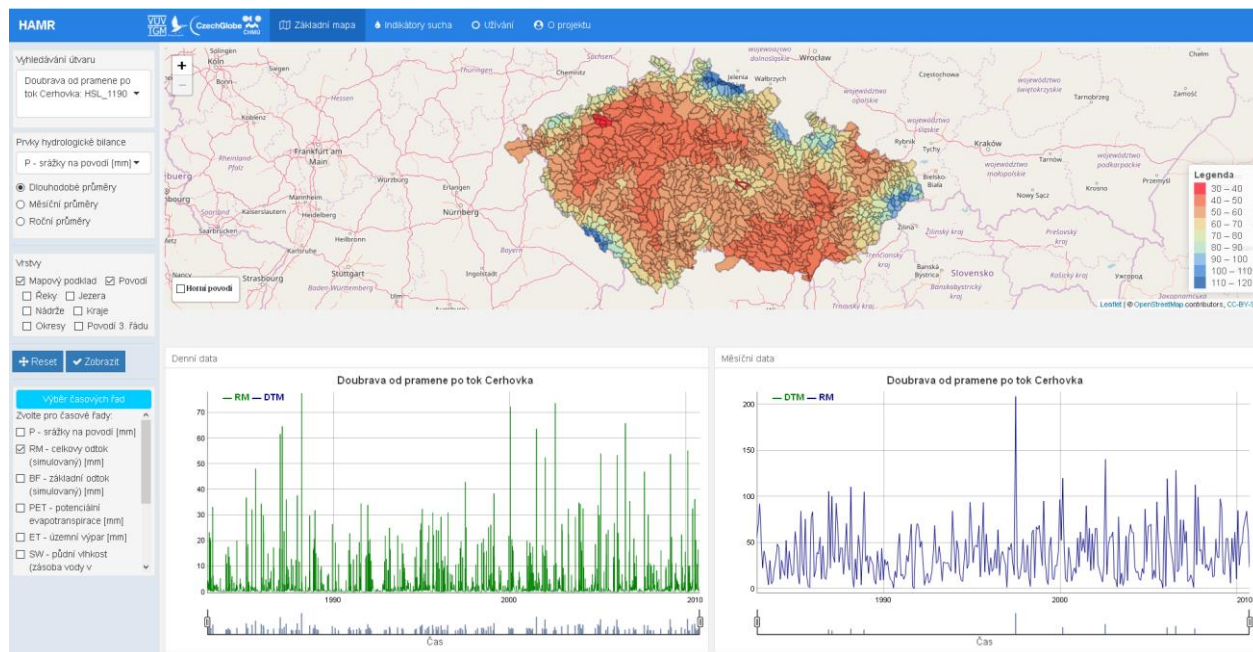
- Soubor s aplikací “*aplikace.Rmd*”
- Skript pro automatickou instalaci potřebných balíčků “*install.packages.R*”
- Soubor s kaskádovými styly pro nastavení vzhledu aplikace “*styles.css*”

8.5.2 Použité balíčky:

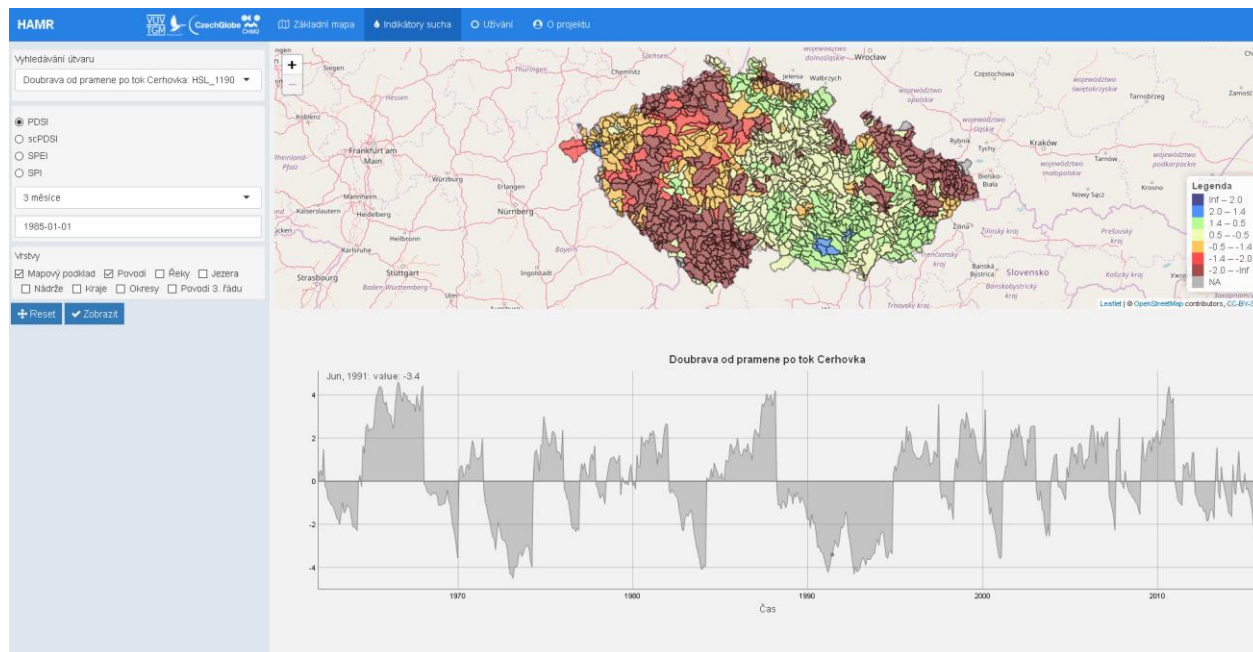
- Shiny pro tvorbu dynamických vizualizací
- flexdashboard pro publikaci dat a jejich přehlednou vizualizaci v rámci webového prohlížeče
- Leaflet, umožňující vizualizaci prostorových dat v interaktivních mapách
- dygraphs pro vykreslení časových řad
- data.table, dplyr sloužící k transformaci dat

8.5.3 Mapové komponenty

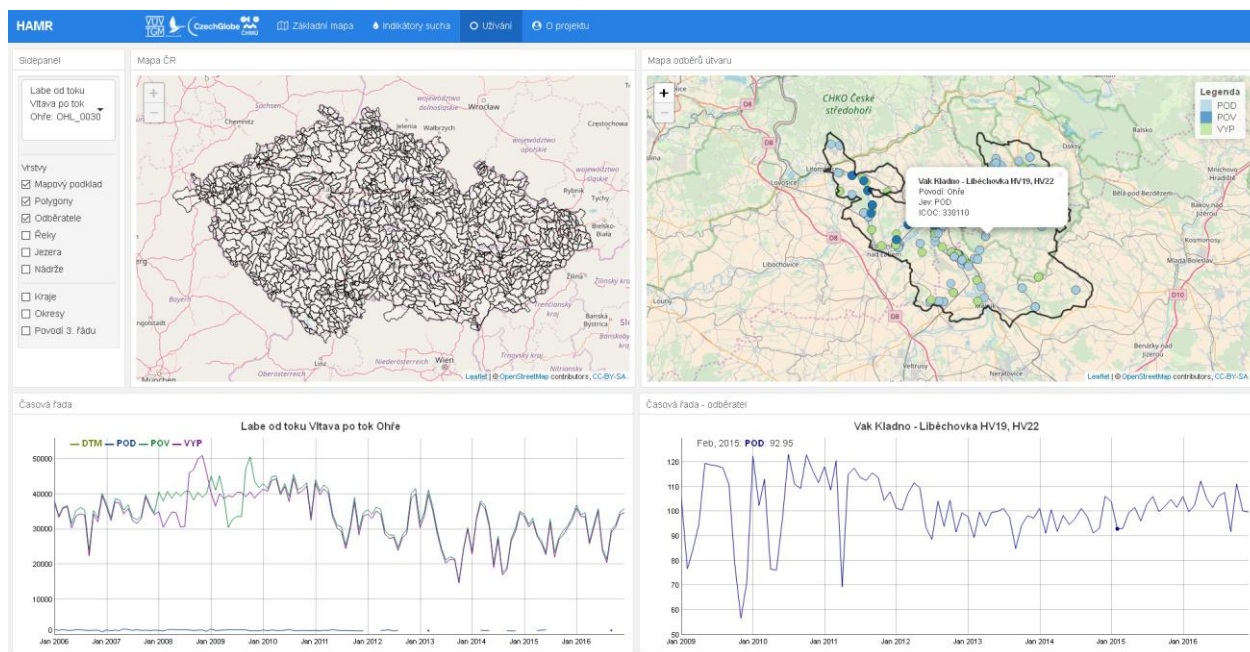
Okno aplikace je obdobně rozděleno jako u plné verze. Následné layouty prezentují jednotlivé komponenty, a to základní mapu (Obrázek 47), indikátory (Obrázek 48) a nakládání s vodami (Obrázek 49). V lite verzi zcela chybí komponenta validace.



Obrázek 47 Základní mapa modelu HAMR – lite verze



Obrázek 48 Komponenta indikátory sucha – lite verze



Obrázek 49 Komponenta nakládání s vodou - lite verze

7.4 O projektu

Krátký popis projektu a veškeré kontakty jsou zobrazeny na Obrázek 50. Okno je doplněno o metodiky k jednotlivým součástem systému.

The screenshot shows the 'O projektu' window in the HAMR application. It provides information about the project's purpose, the models used, and the participating institutions.

O projektu
Systém je založen na propojení modelu půdního (SoilClim), modelu hydrologického (Bilan) a vodohospodářské bilance. Tyto modely spolu se vstupními klimatologickými daty reprezentují suchu meteorologické, zemědělské a hydrologické.

Na vzniku systému se podílí:

- VÚV TGM**
Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.
Podbabská 30, 160 00 Praha 6
Ing. Adam Vízina, Ph.D.
- Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí**
Kamýcká 129, 165 21 Praha 6
doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.
- CzechGlobe**
Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.
Bátická 986/4a, 603 00 Brno
prof. Ing. Mgr. Miroslav Trnka, Ph.D.
- CHMU**
Český hydrometeorologický ústav
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 412
RNDr. Jan Drahelka, Ph.D.

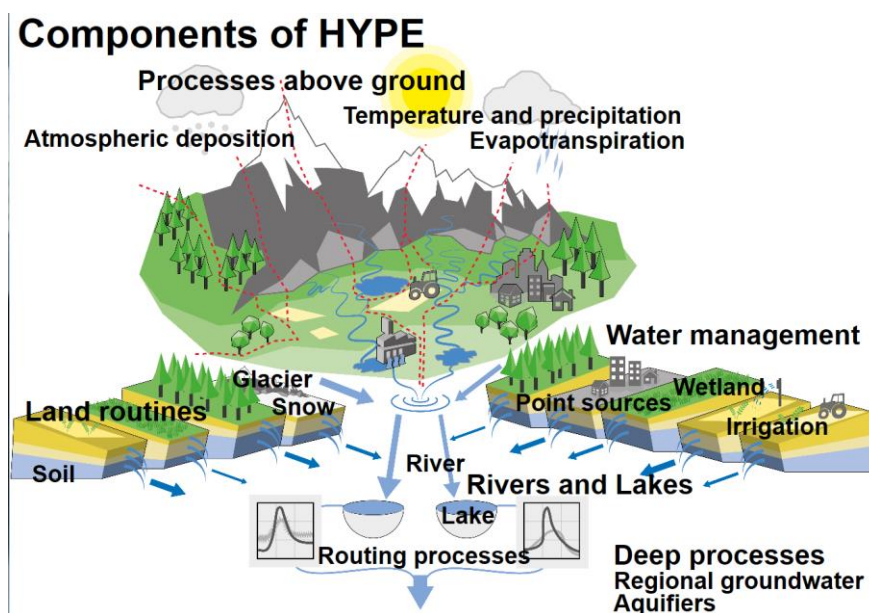
Ministerstvo životního prostředí České republiky
Systém pro předpověď sucha vznikl v rámci projektu financovaném Ministerstvem životního prostředí v roce 2017.

Obrázek 50 Okno „O projektu“

9. Modelování hydrologické bilance a kvality vody povodí útvarů povrchových vod pomocí modelu HYPE

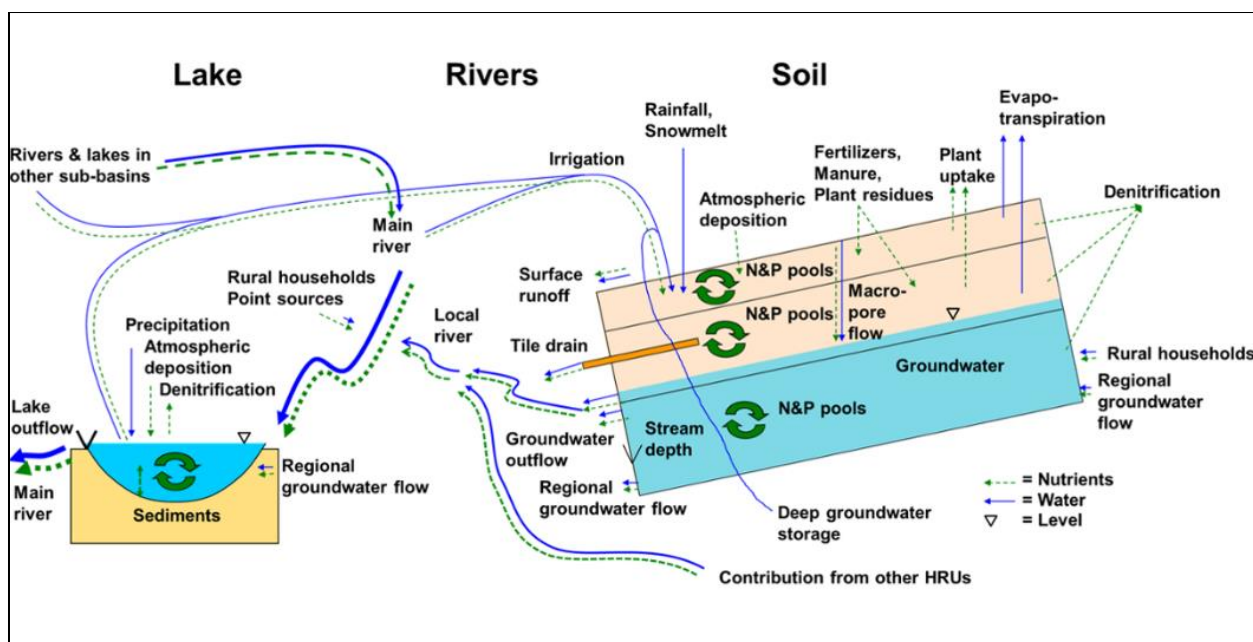
9.1. Model Hype

Pro potřeby tohoto projektu je využit hydrologický model HYPE vyvíjený Švédským meteorologickým a hydrologickým institutem a to zejména z důvodu, že kromě vodní bilance je schopen modelovat i jakost vody, která je sledovaným jevem v období hydrologických extrémů jako je právě sucho nebo povodně. Model klade důraz kromě klasických komponent také navíc na složku zemědělskou, která zohledňuje osevní postupy nebo také zemědělské meliorace. Právě tato složka je hlavním činitelem v rámci zmiňované modelace jakosti vody. Tuto složku, kromě jiného je možné vidět ve struktuře modelu HYPE na Obrázek 51.



Obrázek 51 Struktura modelu HYPE (zdroj: prezentace modelu HYPE SMHI)

HYPE je semi-distribuovaný open-source hydrologický model, který funguje na bázi fragmentace povodí na subpovodí, která jsou dále rozdělena do skupin hydrologicky responzivních jednotek (HRJ), které jsou výsledkem kombinace rastrových vrstev, jmenovitě vrstva digitálního modelu terénu, vrstva sklonitosti, vrstva krajinného krytu, vrstva základních hydropedologických ukazatelů (hloubka hydrologicky aktivní vrstvy půdy a skeletovitost půdy) a volitelně v rámci modelování kvality vody vrstva plodinových map popřípadě drenážních systémů. Jednotlivé HRJ mají unikátní hydrologický režim, jež je ovládán příslušnými parametry modelu. HRJ vstupují do modelu ve formě procentuálního zastoupení každé HRJ v rámci jednotlivých povodí. Model uvažuje až tři půdní vrstvy s rozdílnými hloubkami pro přesnější simulaci pohybu nutrientů půdou (viz Obrázek 52). Model pracuje se třemi skupinami parametrů, které jsou vázány buď globálně nebo na druh krajinného pokryvu nebo na typ půdy.



Obrázek 52 Struktura modelu HYPE (zdroj: www.smhi.se)

Kromě zmiňovaných rastrových vstupů jsou dále vstupem do modelu charakteristiky vodních děl, zejména těch manipulovaných, jmenovitě hloubka, objem, plocha, typ vodní nádrže, průměrný odtok z nádrže, minimální zůstatkový odtok z nádrže a řada dalších. Vstupem do modelu je také procentuální zastoupení vodních ploch na povodí, které bylo odvozeno z vektorové vrstvy nádrží z databáze DIBAVOD. Stejně tak délka hlavního toku a délka vedlejších toků.

V rámci modelace kvality vody v povodích útvarů povrchových vod (ÚPOV) je nutným vstupem do modelu znalost pěstovaných plodin v povodích a jejich rotace. Ta bude odvozena pomocí plodinových map z dat Sentinelu pro roky 2016–2017 v kooperaci s daty z veřejného registru půdy LPIS pro roky 2015–2017 spolu s deklaracemi farmářů pro roky 2015–2017. Přičemž postup zavedení zmíněných dat do modelu je následovný: prvotně je uvažováno porovnání všech tří datových zdrojů, následně určení osevních rotací plodin z kombinace zmiňovaných datových sad pomocí expertního posudku, poté zanesení doporučených dávek hnojiv pro dané osevní rotace plodin pomocí expertního posudku a nakonec kalibrace samotného modelu na pozorovaná data jakosti povrchových vod z platformy IS Arrow Českého hydrometeorologického úřadu.

Též bude zohledněno užívání vod pomocí zavedení vstupních dat údajů o užívání vod od roku 1989–2016.

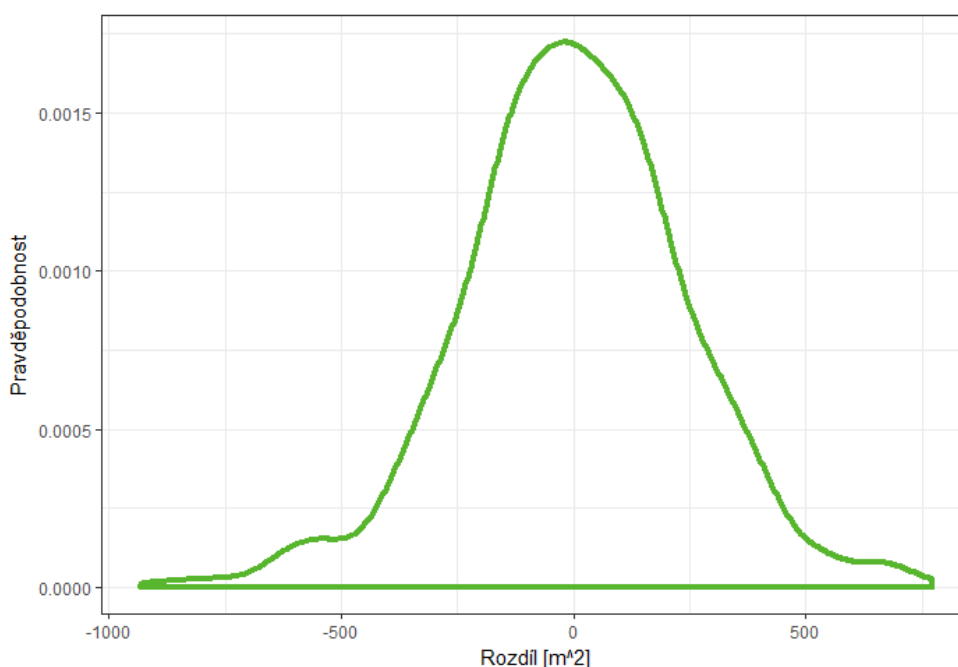
Aby bylo možné model kalibrovat je uvažováno použití dat z datasetu SoilClim, kde vstupem budou jmenovitě pozorovaný denní úhrn srážek, průměrná denní teplota (pro výpočet potenciální evapotranspirace dle Oudin et al. (2005)), maximální a minimální denní teplota (pro variantu výpočtu potenciální evapotranspirace dle Prestley-Taylor (1972)), pozorované průtoky v uzavěrových profilech ÚPOV, zásoba vody ve sněhu a půdní vlhkost.

9.2. Postup prací

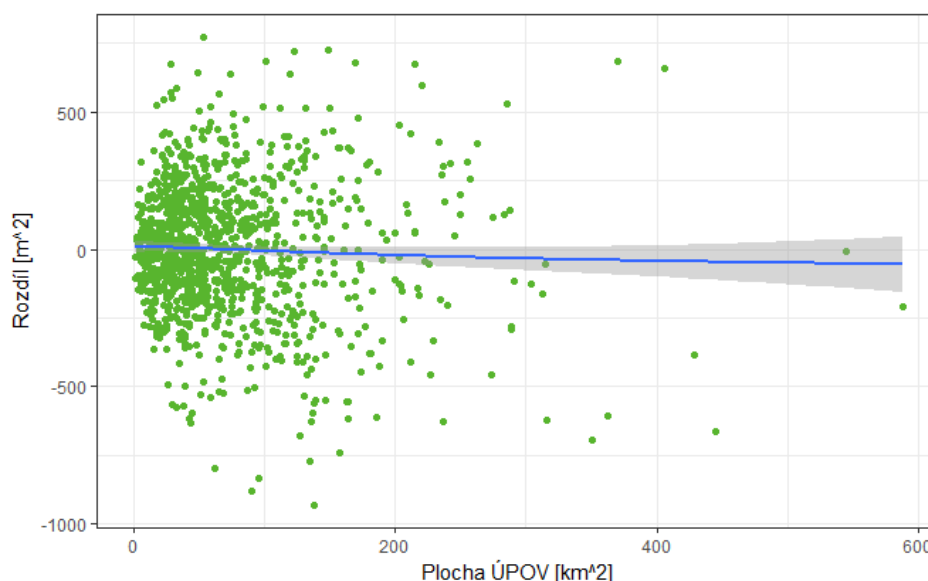
- V rámci přípravy vstupních dat pro hydrologický model HYPE bylo potřeba opravit vstupní shapefilovou vrstvu polygonů útvarů povrchových vod a to z důvodů překryvů a mezer mezi jednotlivými polygony.
- Následně tato shapefilová vrstva byla převedena na rastrovou vrstvu a zpět na polygonovou vrstvu tak, aby vrstva sloužila jako vhodný vstup pro přípravný program WHIST, který zpracovává vstupní data pro model HYPE a to proto, aby byla zajištěna ortogonalita této vstupní vrstvy. Rozlišení zmiňovaného rastru bylo zvoleno 3x3 metry a to proto, aby se zachovala původní velikost ploch jednotlivých povodí a zároveň aby shapefilová vrstva mohla být zpracovávána standardní výpočetní technikou. V Tabulka 7 lze vidět základní statistické údaje rozdílů ploch v metrech čtverečných mezi původními polygony ÚPOV a těmi rasterizovanými. Jak je možné vidět v Tabulka 7 ale i na Obrázek 53 a Obrázek 54, maximální rozdíly v rozloze jednotlivých ÚPOVů se pohybují v rozmezí od -932 do +771 metrů čtverečných, což je v rámci stavby modelu zanedbatelné.

Tabulka 7 Rozdíly mezi původními a rasterizovanými polygony ÚPOV v metrech čtverečných

Minimum	1. kvartil	Medián	Průměr	3. kvartil	Maximum
-931.80	-150.30	0.13	-0.76	152.40	771.10



Obrázek 53 Pravděpodobnostní rozložení diferencí mezi původními polygony a rasterizovanými



Obrázek 54 Vztah mezi rozdílem mezi původními polygony a rasterizovanými a jejich celkovou plochou

- Pro popis hydropedologických charakteristik byly interpolovány rastry svrchní vrstvy půdy, a to její hloubka a její skeletovitost v rámci všech povodí ÚPOV pomocí metody Spline z bodové vrstvy bonitované půdní ekologické jednotky (BPEJ). Tyto rasterové vrstvy byly propojeny s rasterizovanou vektorovou vrstvou krajinného krytu CORINE LANDCOVER získaného ze služby Land Monitoring Services – Copernicus. Tím vznikl rastr unikátních HRJ, který dále vstupuje do modelu (viz úvod)
- Délky hlavních a vedlejších toků pro každý ÚPOV byly odvozeny z vektorové vrstvy DIBAVOD – VÚV TGM. Hlavní tok je definován jako daný útvar povrchových vod vztažený ke každému polygonu útvarů povrchových vod. Vedlejší tok je definován jako průměrná délka hrubých úseků modelu říční sítě DIBAVOD – VÚV TGM.
- Délky hlavních toků ÚPOVů, ve kterých celou část toku tvoří rezervoár, byly nastaveny na nulovou hodnotu. Délky hlavních toků ÚPOVů, ve kterých pouze určitou část toku tvoří rezervoár, byly definovány jako zbývající délka hlavního toku po odečtení délky toku v rezervoáru.
- Délky hlavních a vedlejších toků, které pramení mimo ČR, nicméně se podílejí na odtoku v rámci ČR nebo toků, které pramení v ČR, ale odtékají mimo ČR a jejich délka byla zkrácena hranicí ČR, byly odvozeny z vektorové vrstvy EU-Hydro River Network ze služby Land Monitoring Services – Copernicus
- Charakteristiky jednotlivých manipulovaných nádrží byly odvozeny z vektorové vrstvy DIBAVOD – VÚV TGM.
- Pokud nádrž odvodňovala nejen ÚPOV, ve kterém figurovala, ale byla i přímým recipientem ÚPOVu nad ní, byla nádrž označena jako nádrž, která odvodňuje více povodí a model se k ní proto chová adekvátně.

9.3. Výsledky stavby modelu HYPE

V rámci úkolu byla sestavena doména modelu HYPE čítající 1135 povodí, z čehož 1112 povodí odpovídá útvarům povrchových vod a zbylých 23 povodí slouží pro transfer vody a pro správnou bilanci v povodích (jedná se zejména o povodí zasahující mimo hranice České republiky). V doméně modelu je také 68 povodí, která jsou odvodňována skrze nádrže. Doména modelu pokrývá plochu celé České republiky.

9.3.1 Kalibrace modelu HYPE

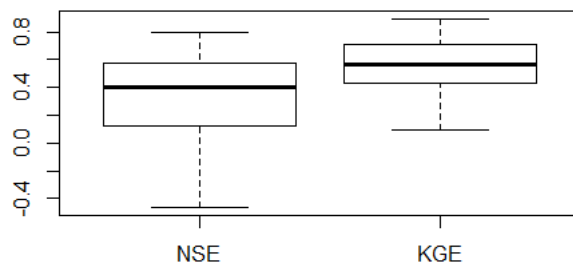
Veličinami sloužícími pro kalibraci modelu byly:

- odtoky ze 156 povodí České republiky (zdroj: ČHMI),
- údaje o vodní hodnotě sněhové pokrývky (zdroj: model SoilClim),
- údaje o potenciální a aktuální evapotranspiraci (zdroj: model SoilClim).

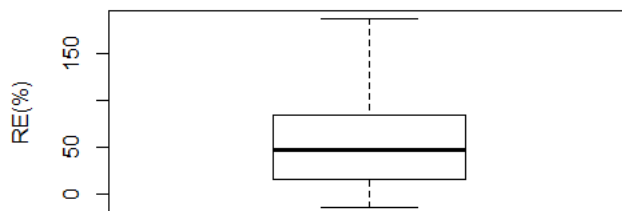
Kalibrace modelu probíhala pomocí izolace povodí s převažujícím druhem půdy nebo převažujícím druhem krajinného krytu. Takto izolované skupiny povodí byly následně použity na kalibraci parametrů ovládající právě specifický druh půdy nebo specifický druh krajinného krytu. Kalibrace těchto parametrů probíhala pomocí spojení algoritmu Markovových řetězců a Monte-Carlo simulací, kdy bylo kalibrováno pomocí vícera objektivních funkcí, které byly zaměřeny na dané veličiny. Jmenovitě pro údaje o průtocích byl použit *Nash-Sutcliffe* koeficient (NSE) (pro správnou reprezentaci kulminačních průtoků), alternativní verze *Nash-Sutcliffe* koeficientu (s koeficientem 0.5) (pro správnou reprezentaci suchých period) a relativní chyba (pro celkový objem), pro údaje o vodní hodnotě sněhové pokrývky byla použita relativní chyba a nakonec korelační koeficient pro potencionální evapotranspiraci. Těmto objektivním funkcím sledujícím dané veličiny byly zadány váhy, načež výsledkem byla jedna vážená objektivní funkce, která sloužila pro kalibraci parametrů.

9.3.2 Výsledky kalibrace

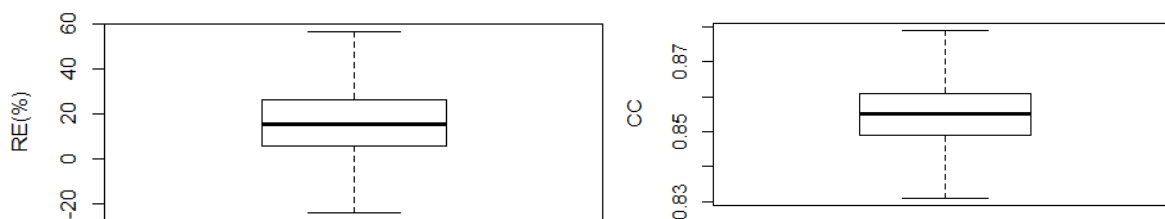
Jak je možné vidět na Obrázek 55, medián *Nash-Sutcliffe* koeficientu modelovaných průtoků se pohybuje kolem hodnoty 0.4 (NSE se pohybuje v intervalu od $-\infty$ –1, přičemž hodnoty nižší než 0 indikují nižší výkonost než aritmetický průměr a naopak 1 znamená absolutní shodu obou veličin). Jak již bylo zmíněno, NSE akcentuje hlavně kulminační průtoky, proto uvádíme i Kling-Gupta koeficient (KGE), který v sobě zahrnuje korelační koeficient, poměr průměrné hodnoty simulované a pozorované veličiny a také směrodatnou odchylku. Tudiž KGE dává ucelenější představu o celkové úspěšnosti kalibrace. KGE modelovaných průtoků dosahuje vyšších hodnot, jeho medián se pohybuje kolem 0.57 (KGE má stejný interval jako NSE a platí i stejný princip hodnot jako u NSE). Obrázek 56 reprezentuje relativní procentuální chybu vodní hodnoty sněhové pokrývky ze všech povodí, která se pohybuje nejčastěji kolem 50 %. Obecně lze říci, že model HYPE nadhodnocuje vodní hodnotu sněhové pokrývky oproti modelu SoilClim. Obrázek 57 znázorňuje relativní procentuální chybu potencionální evapotranspirace ze všech povodí, která se pohybuje od 6 do 26 % (1. a 3. kvartil) s hodnotou mediánu 15 %. Korelační koeficient se pohybuje v rozsahu 0.82–0.88. Tudiž lze říci, že potencionální evapotranspiraci model reprezentuje poměrně přesně, pouze lehce nadhodnocuje.



Obrázek 55 Hodnoty Nash-Sutcliffe koeficientu a Kling-Gupta koeficientu modelovaných průtoků



Obrázek 56 Relativní procentuální chyba modelované vodní hodnoty sněhové pokrývky



Obrázek 57 Relativní procentuální chyba (vlevo) a korelační koeficient (vpravo) modelované potenciální evapotranspirace

Další postupy

V rámci kalibrace modelu bylo zjištěno, že nejlepších shod pozorovaných a modelovaných průtoků celkem logicky dosahují průtoky zdrojových povodí bez lidského ovlivnění. Naopak poměrně znatelné chyby vykazují povodí odvodňována nádržemi, kde vystihnout chování jednotlivých nádrží bývá problematické. Proto dalším krokem je dosáhnout co nejlepších shod pozorovaných a modelovaných průtoků pod nádržemi. K tomu poslouží řada údajů o odtocích z nádrží od ČHMI. Metodika spočívá buďto v definování specifické odtokové křivky pro každou nádrž zvlášť nebo v definování takzvané produkční periody, což je období, po které se snaží nádrž dotovat dolní tok daným stabilním průtokem.

Dále bude nutné se věnovat správné interpretaci sněhové pokrývky v modelu HYPE, přičemž bude věnována značná pozornost parametrům ovládajícím výskyt a chování sněhu a sněhové činnosti. Je uvažována implementace pozorovaných dat sněhu z experimentálních povodí, která umožní přesnější představu o úhrnu sněhu v daných lokalitách a mohou zpřesnit chování modelu HYPE.

V rámci modelace jakosti vody v útvarech povrchových vod byla vytvořena subdoména modelu s menším plošným rozsahem založená na povodích čtvrtého řádu, která zahrnuje 19 experimentálních lokalit, na kterých se testuje funkčnost jakostního modulu modelu HYPE a zároveň

se kalibrují parametry pro modelaci jakosti vody. Nakalibrované parametry pomocí této subdomény modelu se následně přenesou do celorepublikové domény modelu, kde bude následně možné modelovat jakost vody při různých hydrologických situacích v rámci různých scénářů. Také bude možnost modelovat jakost vody v rámci změny klimatu a také při použití adaptačních opatření na tuto změnu. V současné době probíhá citlivostní analýza jednotlivých komponent modelu v rámci zajištění co nejlepšího výkonu modelu.

9.4. Model HYPE pro modelování adaptačních opatření a jejich vlivu na jakost vody

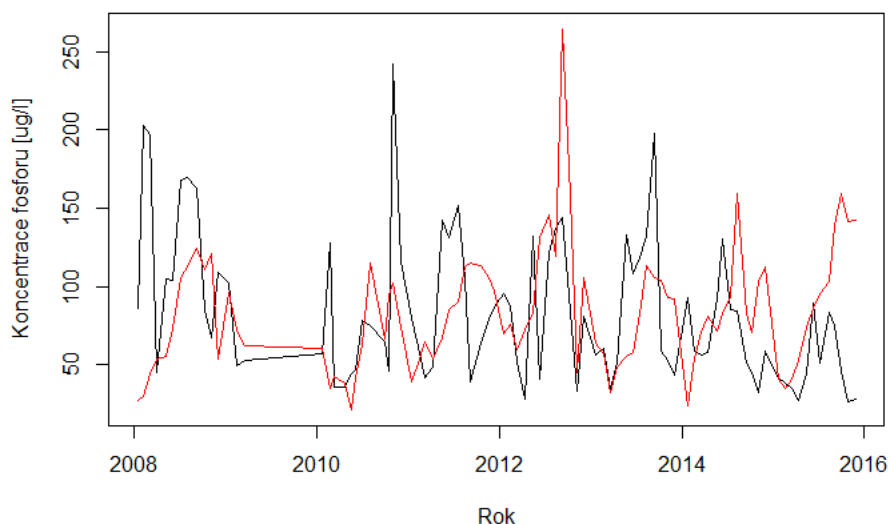
9.4.1 Stavba modelu

V rámci úkolu byl vybrán set 19 experimentálních lokalit, na kterých je modelován nejen vliv adaptačních opatření na retenční kapacitu povodí, ale také jejich vliv na kvalitu vody. Doména modelu je založena na povodích čtvrtého řádu a zahrnuje v sobě právě zmiňované lokality. Doména čítá 483 povodí čtvrtého řádu.

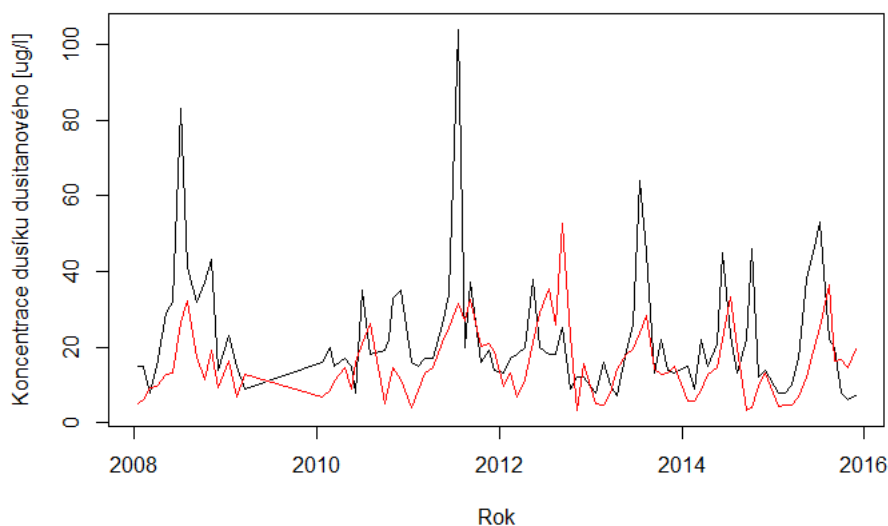
Vstupem do modelu byly údaje o krajinném krytu (zdroj: CORINE landcover – Copernicus), údaje o sklonovitosti a nadmořské výšce jednotlivých povodí (zdroj: SRTM) a údaje o struktuře a hloubce půdy (zdroj: BPEJ). Vstupními hnacími veličinami byly údaje o srážkách a teplotě (zdroj: Štěpánek at al. (2011)) a údaje o jakosti vody (zdroj: IS Arrow ČHMI).

9.4.2 Výsledky stavby modelu

Model HYPE byl úspěšně uveden do provozu a to jak jeho bilanční část, tak i modul pro modelování kvality vody. Protože na experimentálních lokalitách nejsou k dispozici údaje o průtocích ani záznamy o kvalitě vody, byly vybrány analogony (povodí s podobnými charakteristickými vlastnostmi, která měla k dispozici buď měření průtoků, nebo údaje o kvalitě vody, a na která byl model kalibrován), na které byly přeneseny parametry modelu z experimentálních lokalit. Poněvadž zatím nebylo známo uskupení pěstovaných rostlin v daných experimentálních lokalitách, byly aplikovány standardní hodnoty pro obecnou plodinu, kterou byla zvolena obilovina. Na Obrázek 58 a Obrázek 59 je možné pozorovat, že i při přenesení parametrů na analogony a při aplikaci standardních hodnot pro obecnou plodinu, lze dosáhnout poměrně slušných modelovaných hodnot, kdy procentuální chyba vychází okolo 30 %.



Obrázek 58 Koncentrace celkového fosforu v období 2008 - 2016, pozorované hodnoty (černá), modelované hodnoty (červená)



Obrázek 59 Koncentrace dusíku dusitanového v období 2008–2016, pozorované hodnoty (černá), modelované hodnoty (červená)

Z důvodu chybějících údajů pro jednotlivé lokality (viz výše), bylo modelování vlivu adaptačních opatření na jakost vody provedeno formou citlivostní analýzy vnitřních komponent modelu, které lze považovat za formy některých adaptačních opatření.

Zmiňovanými komponenty byly:

- a) změna struktury půdy,
- b) změna krajinného krytu (landuse),
- c) změna v množství dávkovaných hnojiv,
- d) změna v množství atmosférické (suché i mokré) depozice dusíku,
- e) změna teploty ovzduší o 2 °C⁶.

⁶ Spíše než jako adaptační opatření byla tato změna zavedena za účelem zjištění citlivosti modelu na zvýšení teploty v rámci jakosti vody.

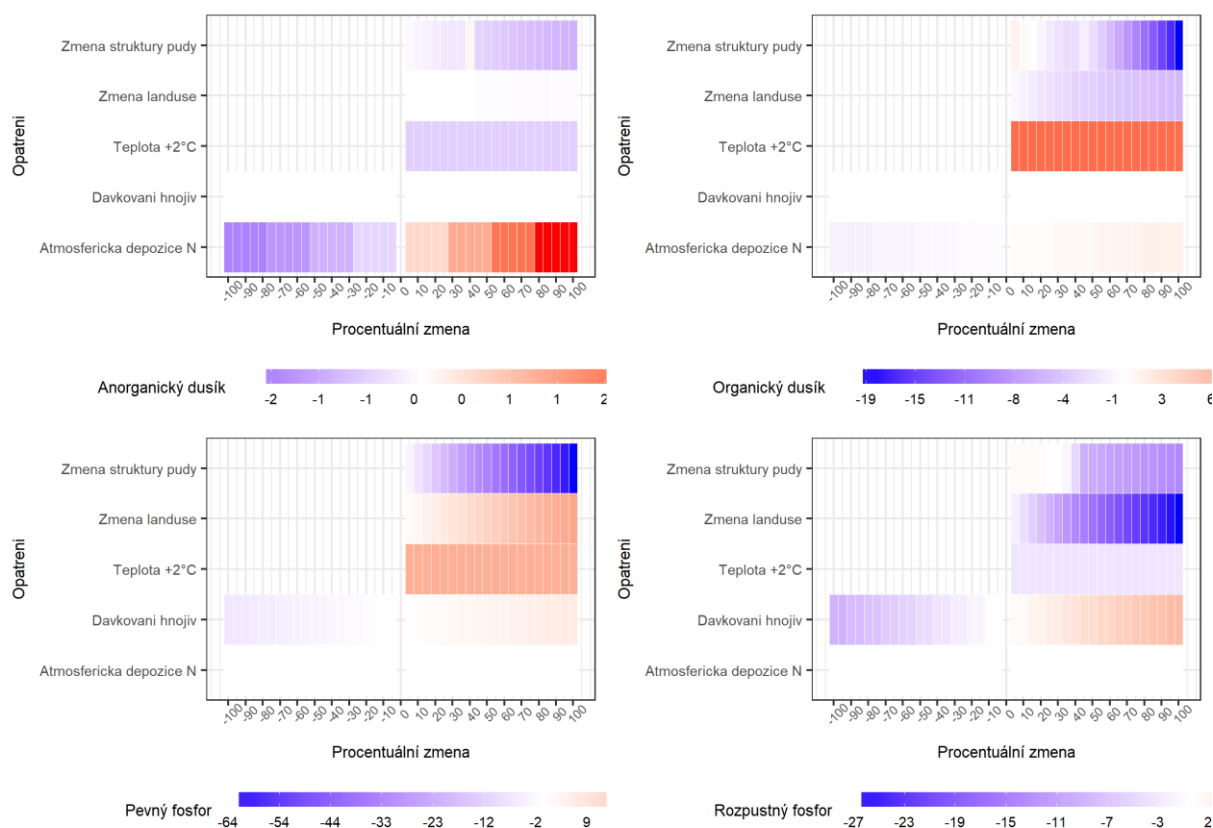
- a) Změnou struktury půdy byla uvažována záměna jemnozrnné půdy za půdu hrubozrnnou, a to v pětiprocentním kroku, jinými slovy v každém kroku bylo z povodí odebráno 5 % půdy jemnozrnné a přidáno 5 % půdy hrubozrnné.
- b) Změnou krajinného krytu byla uvažována záměna orné půdy za luční porost, a to v pětiprocentním kroku, jinými slovy v každém kroku bylo z povodí odebráno 5 % orné půdy a přidáno 5 % lučního porostu.
- c) Změnou v množství dávkování hnojiv bylo uvažováno odečítání v desetiprocentním kroku od standartního dávkování, dokud dávkování nebylo rovno 0 % standartní dávky a naopak přičítání k standartnímu dávkování dokud dávkování nebylo rovno 200 % standartní dávky.
- d) Změnou atmosférické depozice dusíku bylo uvažováno odečítání ve dvacetipětiprocentním kroku od standartních hodnot atmosférické depozice, dokud depozice nebyla rovna 0 % standartní depozice a naopak přičítání k standartní hodnotě atmosférické depozice dokud depozice nebyla rovna 200 % standartní depozice.
- e) Změnou teploty ovzduší o 2 °C bylo uvažováno zvýšení veškeré vstupní teploty do modelu o 2 °C.

Výsledkem je Obrázek 60, který sumarizuje citlivostní analýzu a který dává jasnou představu o tom jaká komponenta modelu má vliv na tu kterou koncentraci modelovaných látek. Na ose Y lze vidět danou komponentu modelu (adaptační opatření) na ose X pak procentuální změnu dané komponenty, přičemž hodnota (resp. barva) dlaždice udává průměrnou hodnotu změny od výchozí modelované koncentrace (viz vzorec 1). Modrá barva značí pokles od výchozí koncentrace, naopak červená značí nárůst od výchozí koncentrace a bílá barva reprezentuje nulovou změnu.

$$\frac{(\Delta kc - kc)}{lkc}, \quad (9.1)$$

kde Δkc je modelovaná řada koncentrací s procentuální změnou, kc je výchozí řada modelovaných koncentrací a lkc je délka (počet) modelovaných koncentrací.

Jak je možné vidět na Obrázek 60 hodnotový rozsah je pro každou látku specifický, poněvadž jejich koncentrace v povodích, respektive v tocích je rozdílná. Obecně lze vyvozovat, že s přechodem z jemnozrnné půdy na půdu s hrubší strukturou klesá koncentrace všech čtyř modelovaných látek (jmenovitě anorganický dusík, organický dusík, pevný fosfor a rozpustný fosfor). Přechod z orné půdy na luční porost zapříčiňuje pokles koncentrace dusíku a rozpustného fosforu, nikoliv však pevného fosforu. Dávkování hnojiv má vliv pouze na fosfor v obou fázích a jejich výsledná koncentrace kladně koreluje s mírou dávkování, dusík zůstává neměnný. Stejně tak atmosférická depozice dusíku logicky kladně koreluje s mírou koncentrace dusíku v tocích. Zvýšení teploty o 2 °C zapříčiňuje nárůst pevného fosforu a organického dusíku a naopak pokles rozpustného fosforu a anorganického dusíku.



Obrázek 60 Citlivostní analýza modelovaných veličin.

9.4.3 Závěr a další postupy modelování adaptačních opatření

Jak již bylo zmíněno, v rámci úkolu byly obstarány tři sady dat údajů o pěstovaných plodinách v rámci České republiky, jmenovitě plodinové mapy z dat Sentinelu pro roky 2016–2017, data z veřejného registru půdy LPIS pro roky 2015–2017 a deklarace farmářů pro roky 2015–2017. V první fázi je potřeba najít společný průsečík všech zmiňovaných datových sad, aby byla zajištěna co největší jistota v pěstovaných plodinách na daných plochách. Následně budou určeny osevní postupy a dávky hnojiv pomocí expertního posudku a to vše spolu s výskytem daných plodin v povodích bude zaneseno do modelu za účelem zlepšení kalibrace parametrů modelu ovládajících jakost vody.

Také je potřeba blíže prověřit jednotlivé komponenty modelu mající na starost modelaci jakosti vody, poněvadž například fakt, že dávkování hnojiv má nulový vliv na modelovanou přítomnost dusíku ve vodě je přinejmenším zajímavý.

Pomocí této domény modelu s 19 experimentálními lokalitami bude možné ověřit vliv jednotlivých komponent modelu mající na starost modelaci jakosti vody, ověřit senzitivitu jednotlivých parametrů na celkový výsledek modelace a zároveň nakalibrovat jednotlivé parametry na pozorované údaje o jakosti vody ze systému IS Arrow. Nakalibrované parametry se pak budou moci přenést do celorepublikové domény modelu, díky které bude možno modelovat jakost vody v rámci adaptace na změnu klimatu v rozsahu celé České republiky.

10. Regionální analýza nedostatkových objemů extrémním modelem

Nedostatkové objemy pro útvary povrchových vod jsou modelovány pomocí stacionárního index-flood modelu (tj. s využitím regionální frekvenční analýzy). Předpokladem je, že kvantily rozdělení maximálních nedostatkových objemů jsou v homogenních oblastech, až na škálovací faktor shodné. Regionální frekvenční analýza umožňuje snížit nejistotu, jelikož kombinací dat z více stanic roste efektivní délka použitých dat.

10.1 L-momenty

Metoda L-momentů je ve statistice používána k odhadu tvaru rozdělení pravděpodobností. Jedná se o lineární kombinaci pořadové statistiky (L-statistika) analogické ke standardním momentům a je využita pro výpočet veličin analogických ke směrodatné odchylce, koeficientu šikmosti a koeficientu špičatosti, označované jako L-scale, L-skewness a L-kurtosis (L-mean je totožný se standardním průměrem). Standardizované L-momenty se nazývají L-moment ratio a jsou analogické standardizovaným momentům. Stejně jako u standardních momentů má teoretické rozdělení danou populaci L-momentů.

Pro náhodnou veličinu X , je r -tý moment populace definován jako

$$\lambda_r = r^{-1} \sum_{j=0}^{r-1} (-1)^j \binom{r-1}{j} E(X_{r-j:r}). \quad (10.1)$$

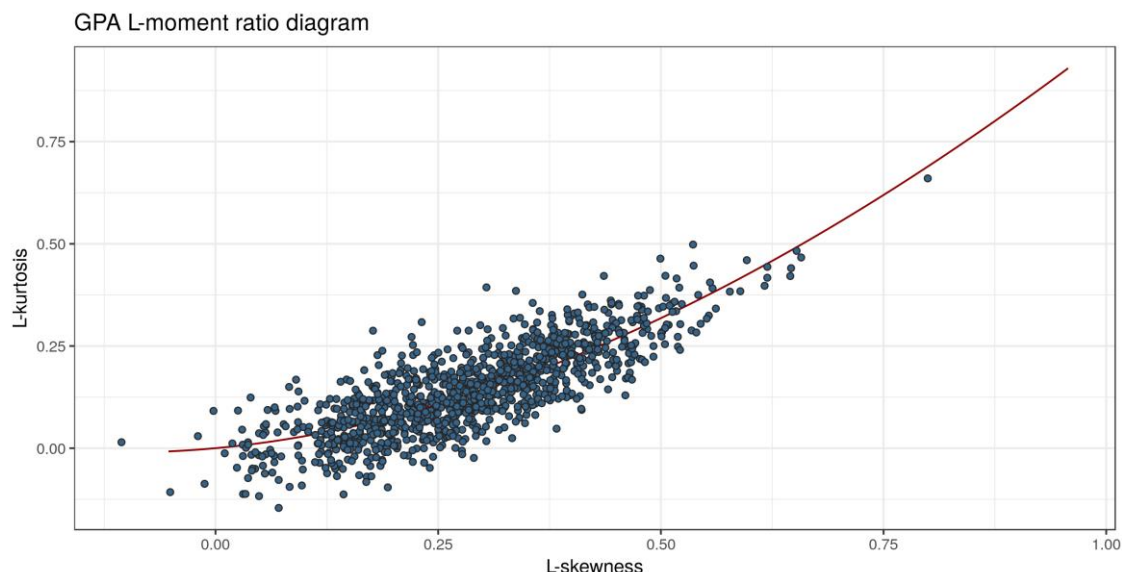
kde $X_{j:n}$ označuje j -tou pořadovou statistiku o velikosti nezávislého vzorku n z rozdělení X a E označuje očekávanou hodnotu.

10.2 Volba rozdělení

Vhodné rozdělení bylo vybráno na základě vyhodnocení L-moment ratio diagramu: tj. L-skewness (τ_3) a L-kurtosis (τ_4) odhadnutých pro roční bloková maxima nedostatkových objemů pro všechny ÚPOVY s populacemi τ_3 a τ_4 pro vybraná teoretická rozdělení. Největší shodu mezi teoretickými a empirickými hodnotami vykazovalo obecné Pareto rozdělení (generalized Pareto distribution - GPA).

Vztah mezi τ_3 a τ_4 je pro GPA dán jako

$$\tau_4 = \frac{\tau_3(1+5\tau_3)}{5+\tau_3}. \quad (10.2)$$



Obrázek 61L-moment ratio diagram pro nedostatkové objemy (body) a populaci τ_3 a τ_4 pro GPA (linie).

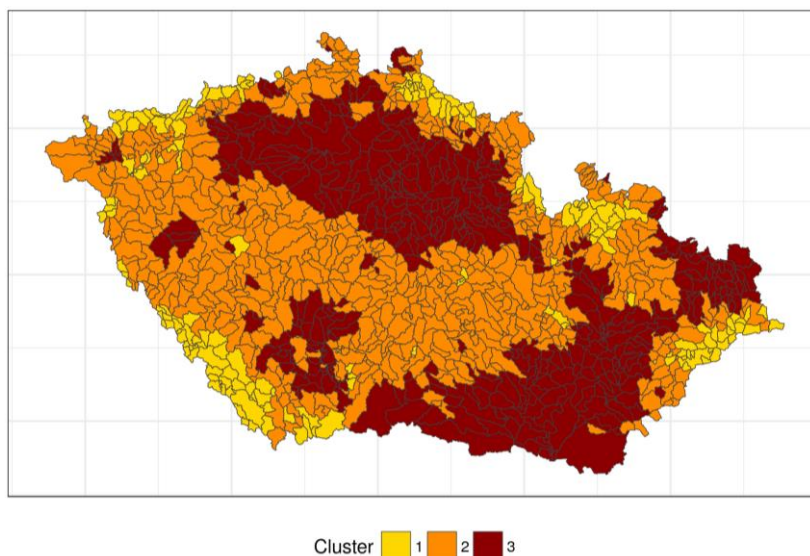
GPA je kombinací spojitých rozdělení a je často využíváno pro modelování chvostů jiných rozdělení. Je popsáno třemi parametry: location, scale a shape. Distribuční funkce GPA je definována jako

$$F(x) = \alpha^{-1} e^{-(1-\kappa)y}, \quad y = \begin{cases} -\kappa^{-1} \log[1 - \frac{\kappa(x-\xi)}{\alpha}], & \kappa \neq 0, \\ \frac{(x-\xi)}{\alpha}, & \kappa = 0. \end{cases} \quad (10.2)$$

kde $\xi \in \mathbb{R}$ je location, $\alpha > 0$ scale a $\kappa \in \mathbb{R}$ shape parameter s rozsahem x : $\xi \leq x \leq \xi + \alpha/\kappa$, když $\kappa > 0$ a $\xi \leq x \leq \infty$, když $\kappa \leq 0$.

10.3 Regionalizace

Ze všech fází regionální frekvenční analýzy je identifikace homogenních oblastí zpravidla nejobtížnější a vyžaduje velké množství subjektivních rozhodnutí. Pro identifikaci homogenních oblastí byl využit algoritmus K-means (konkrétně algoritmus Hartigan-Wong), jehož cílem je nalezení shluků v datasetu. Vstupem algoritmu je množina bodů, které jsou definované souřadnicemi v d -rozměrném prostoru, a číslo k , určující požadovaný počet shluků. Všechny shluky jsou reprezentované svými středy a každý bod náleží do shluku, 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 shluků, a spěje tak k lokálně-optimálnímu řešení. Shluková analýza pro povrchový odtok proběhla se škálovanými daty procentuálního pokryvu krajiny základních pěti tříd Corine land cover, 10, 50 a 90% kvantily nadmořských výšek a hloubek půdních profilů a procentuálního zastoupení skeletovitosti půdy na plochách ÚPOVů. Algoritmus proběhl celkově 25x ve 14 rozměrné metrice, pokaždé se startem středu shluků v jiné, náhodné pozici. Do 100 iterací každý běh konvergoval k lokálně-optimálnímu řešení. Výsledné tři oblasti jsou ukázány na následujícím obrázku.



Obrázek 62 Výsledné shluky ÚPOVů na základě 14d k-means analýzy.

10.4 Statistický model

Odhad N -letých nedostatkových objemů je zatížen značnou nejistotou, vyplývající 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 ÚPOV 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 jednotlivé ÚPOV, je zpravidla označován index-flood, stejně jako tato metoda.

Za normovací faktor byly v našem konkrétním případě zvoleny jednotlivé hodnoty λ_1 . Regionální L-momenty, označeny l_1^R, t^R, t_3^R, t_4^R , byly získány využitím následujících vztahů

$$l_1^R = 1. \quad (10.3)$$

$$t^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \tau^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i}, \quad \tau = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad (10.4)$$

$$t_r^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \tau_r^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i}, \quad r = 3, 4, \dots \quad (10.5)$$

kde N je počet stanic (ÚPOVů), n je délka časové řady pozorování, včetně roků bez sucha. Tři regionální parametry GPA jsou dány

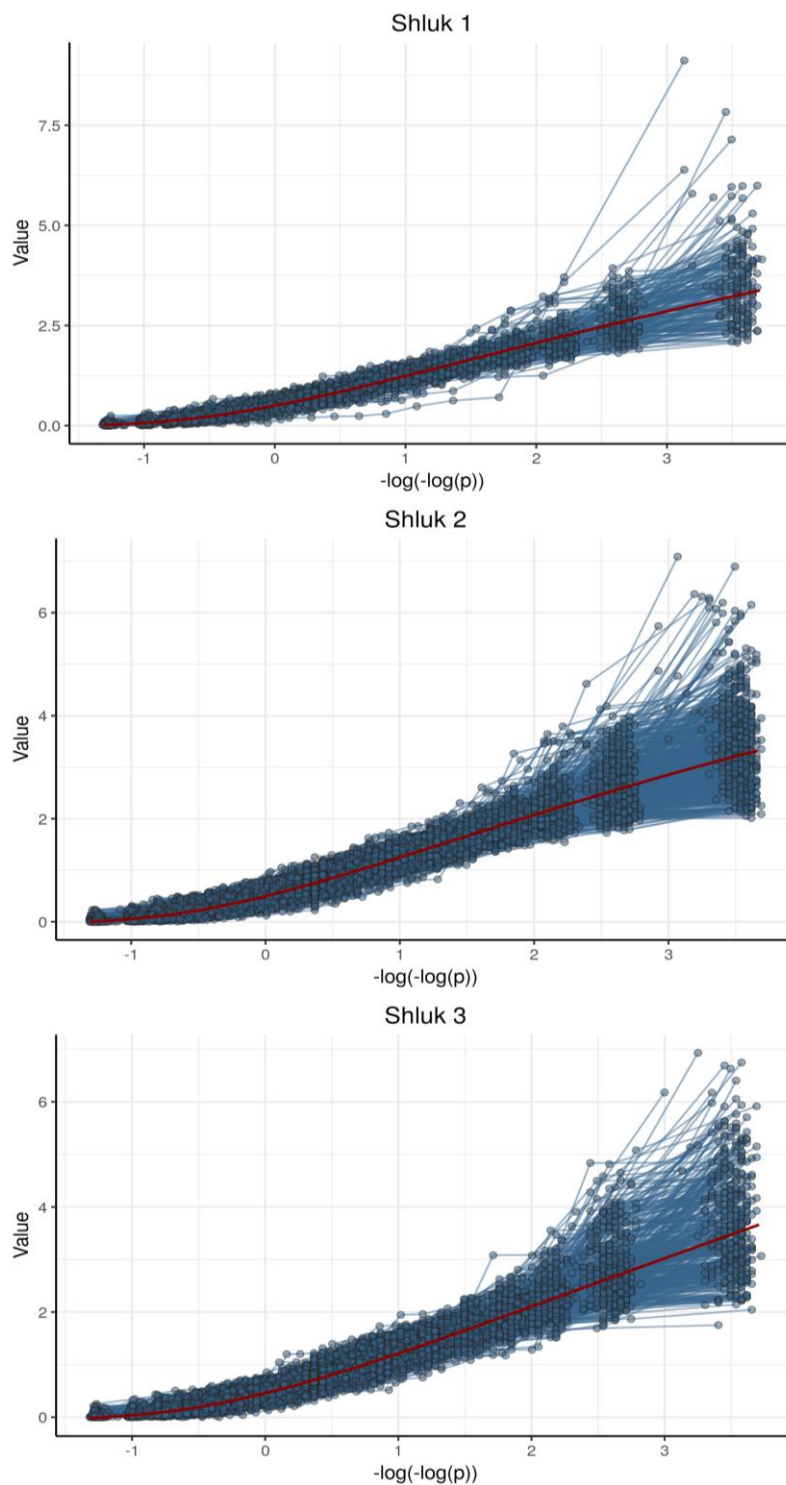
$$k = \frac{1-3t_3^R}{1+t_3^R}, \quad \alpha = (1+\kappa)(2+\kappa)t^R, \quad \xi = l_1^R - (2+\kappa)t^R. \quad (10.6)$$

Libovolné kvantily regionálního rozdělení nedostatkových objemů lze odhadnout pomocí vztahu

$$x(F) = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha[1-(1-F)^\kappa]}{\kappa}, & \kappa \neq 0, \\ \xi - \alpha \log(1-F), & \kappa = 0. \end{cases} \quad (10.7)$$

10.5 Goodness of fit

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



Obrázek 63 Gumbel ploty pro všechny oblasti (shluky ÚPOVů). Červeně regionální kvantilová funkce, modře empirické normované hodnoty pro jednotlivé útvary náležící do shluku.

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

$$A^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]^2}{F(x)[1 - F(x)]} dF(x). \quad (10.8)$$

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

Pro každý útvar povrchových vod byl použit AD test pro lokální GPA model. Testem na hladině významnosti $\alpha = 0.05$ neprošlo 76 z 1135 ÚPOVů (tj. 6,7 %), tato hodnota dobře koresponduje s nominální hodnotou testu.

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

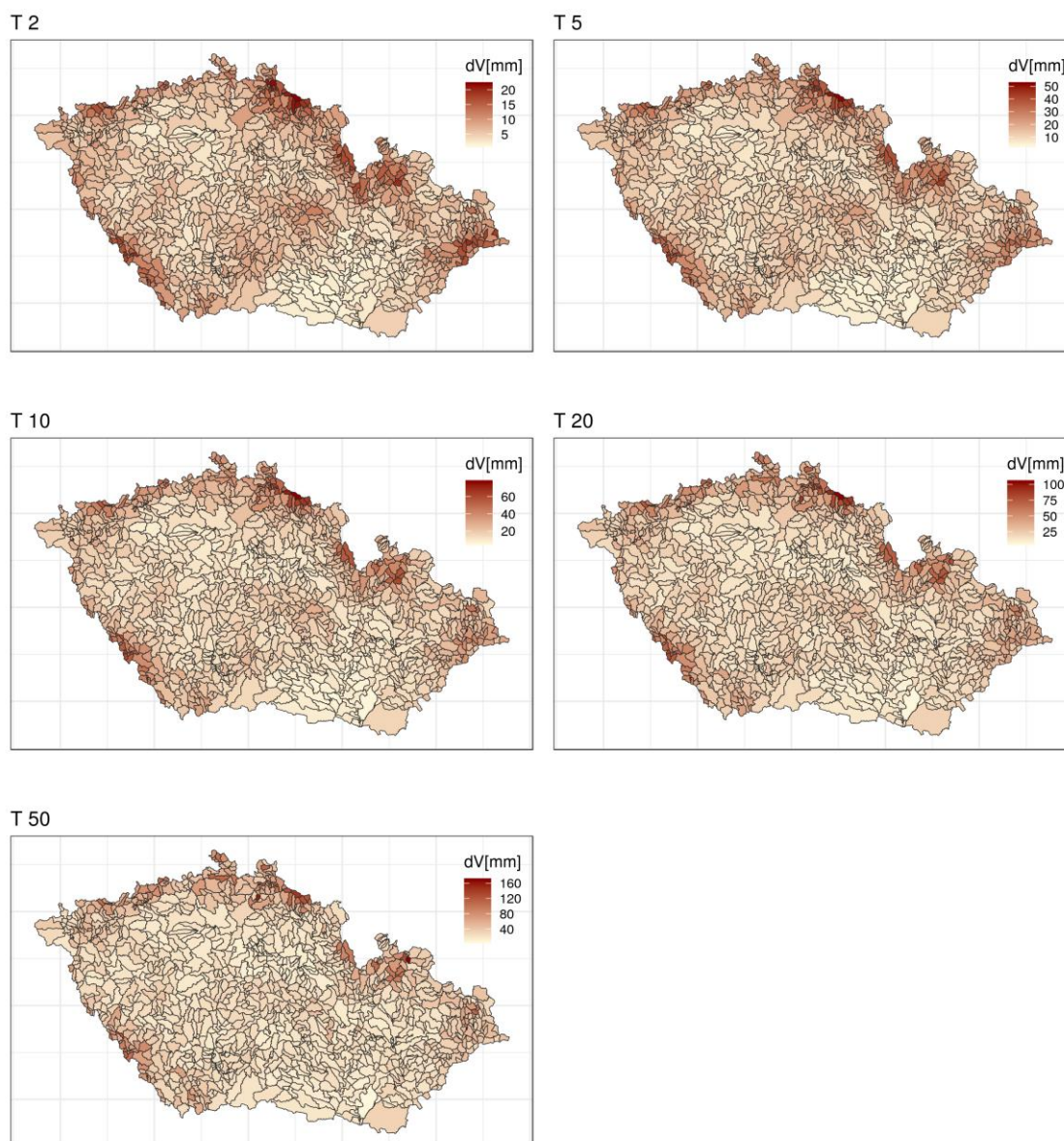
10.6 Odhad návratnosti událostí

Vzhledem k tomu, že sucho se nevyskytuje každý rok, bylo nutné korigovat distribuční funkci GPA na složené rozdělení s pravděpodobnostmi koncentrovanými v nule na základě

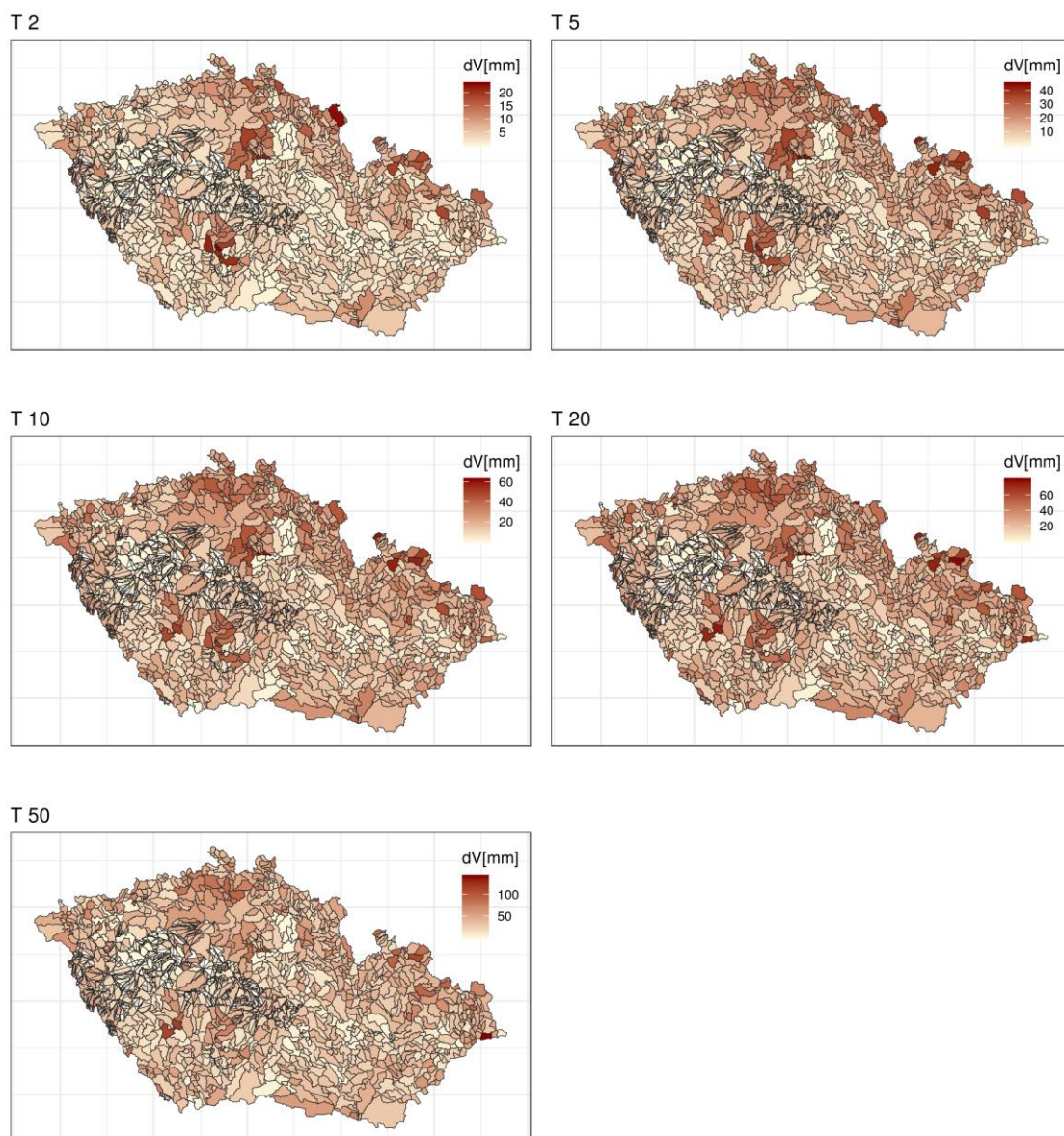
$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ p + (1 - p)G(x), & x \geq 0. \end{cases} \quad (10.9)$$

kde p je pravděpodobnost výskytu sucha a $G(x)$ distribuční funkce nenulových hodnot (GPA). N -letý kvantil pak získáme dosazením bloku N do vztahu $F = 1 - 1/N$ a výsledných pravděpodobností do kvantilové funkce.

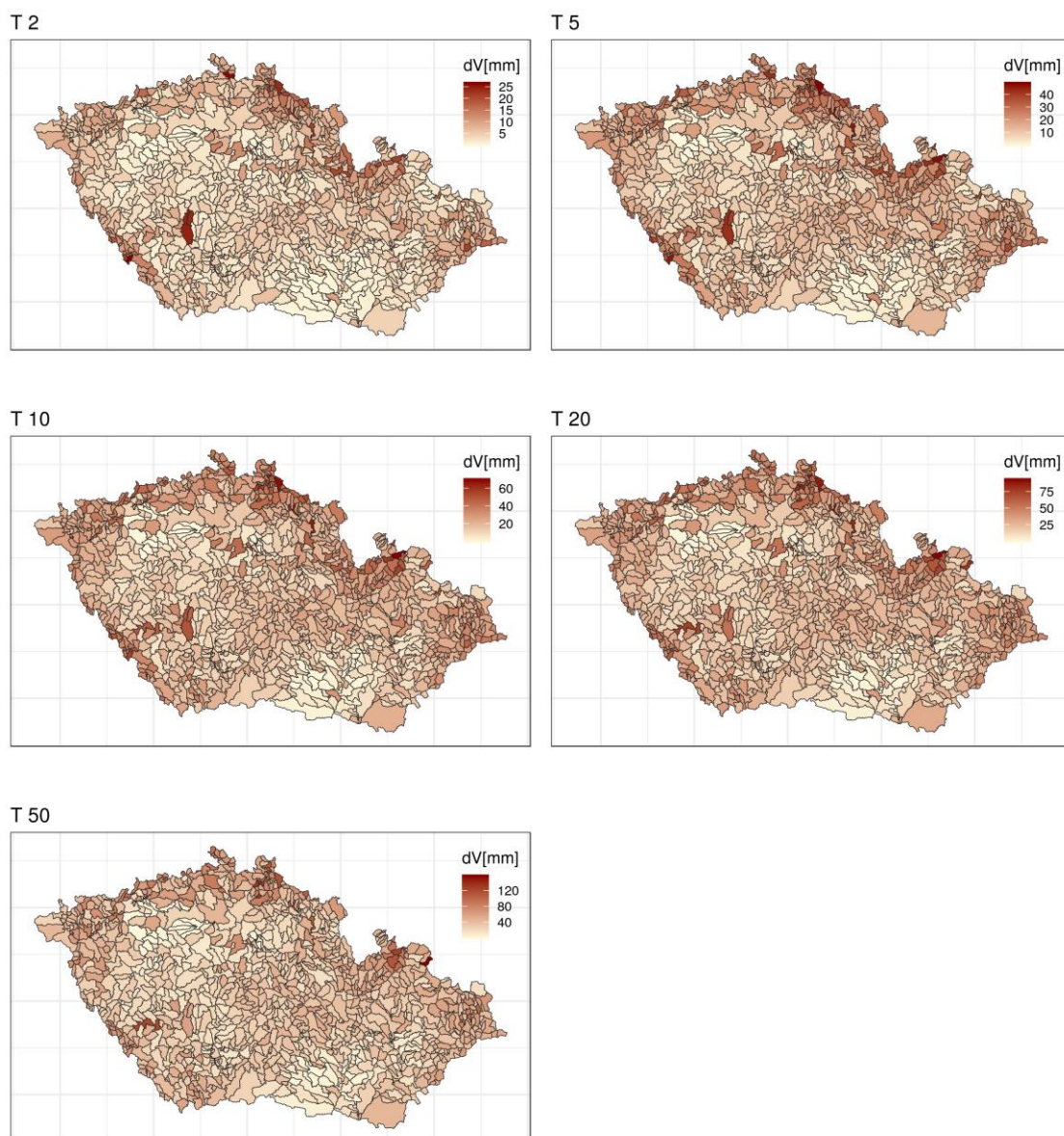
Doby opakování byly vyčísleny pro modelem Bilan simulované odtoky pro období 1980-2010 a dále pro časové řady ovlivněné pomocí zjednodušených scénářů změny klimatu, kdy (a) byla zvýšena teplota o 2 °C, (b) byla zvýšena teplota o 2 °C a zvýšeny srážky o 10 %. Zjednodušeně tyto hodnoty zhruba odpovídají průměrným scénářům pro polovinu 21. století.



Obrázek 64 Mapa N-letých nedostatkových objemů (simulovaného) odtoku pro dobu opakování 2, 5, 10, 20, 50 let.



Obrázek 65 Mapa N-letých nedostatkových objemů (simulovaného) odtoku pro dobu opakování 2, 5, 10, 20, 50 let po zvýšení teploty o 2 °C.



Obrázek 66 Mapa N-letých nedostatkových objemů (simulovaného) odtoku pro dobu opakování 2, 5, 10, 20, 50 let po zvýšení teploty o 2 °C a zvýšení srážek 10 %.

SEZNAM LITERATURY

- Allen, M. (1999) Do it yourself climate prediction. *Nature*, 401, 642.
- Blinka, P. (2004) KLIMATOLOGICKÉ HODNOCENÍ SUCHA A SUCHÝCH OBDOBÍ NA ÚZEMÍ ČR V LETECH 1876–2003. Seminář „Extrémy počasí a podnebí“, Brno.
- Bratršovská, L. (2013) Vyhodnocení propagace sucha hydrologickým cyklem na povodí Tiché Orlice a Střely - Diplomová práce. ČZU, Praha.
- Brázdil, R., Trnka, M., Mikšovský, J., Řezníčková, L., Dobrovolný, P. (2015): [Spring-summer droughts in the Czech Land in 1805–2012 and their forcings](#). *International Journal of Climatology*, Wiley, 2015, roč. 35, č. 7, s. 1405-1421. ISSN 1097-0088. doi: 10.1002/joc.4065.
- Burrough, P., McDonnell, R. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, 1998.
- Garanganga, B. (1999) Role of regional climate system monitoring and prediction in drought management. In Proceedings of the International Conference on Integrated Drought Management: Lessons for Sub-Saharan Africa, 20–22.
- Gupta, H., V., Kling, H., Yilmaz, K., K., Martinez, G., F., 2009: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377 (1-2), 80-91.
- Hayes, M. J. (2000) Drought indices. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska.
- Hlavinka P, Trnka M, Balek J, Semerádová D, Hayes M, Svoboda M, Eitzinger J, Možný M, Fischer M, Hunt E, Žalud Z. 2011. Development and evaluation of the SoilClim model for water balance and soil climate estimates. *Agriculture and Water Management* 98: 1249–1261. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.03.011.
- Hrádek F., Kuřík P.: Hydrologie. FLE ČZU Praha, 2002, 280 s.
- Kundzewicz, Z. W. (1997) Water resources for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), 467–480.
- Lloyd, H. B., Saunders, M. A. (2002) A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology, 179-184.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970: River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3), 282-290.
- Palmer, W. C. (1965) Meteorological Drought. Office of climatology.
- Panu, U., Sharma, T. (2002) Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(S1), S19–S30.

Peters, E. (2003) Propagation of drought through groundwater systems: illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments. Wageningen Universiteit.

Ponce, V., M., 1989: Engineering Hydrology: Principles and Practices. Prentice Hall. ISBN: 9780132778312.

Štěpánek, P., Zahradníček, P., Huth, R. (2011) Interpolation techniques used for data quality control and calculation of technical series: an example of a Central European daily time series. *IDOJÁRÁS - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 115(1–2), 87–98.

Trnka, M., Brázdil, R., Možný, M., Štěpánek, P., Dobrovolný, P., Zahradníček, P., Balek, J., Semerádová, D., Dubrovský, M., Hlavinka, P., Eitzinger, J., Wardlow, B., Svoboda, M., Hayes, M. and Žalud, Z. (2015), Soil moisture trends in the Czech Republic between 1961 and 2012. *Int. J. Climatol.*, 35: 3733–3747. doi:10.1002/joc.4242

Trnka, M., Semerádová, D., Eitzinger, J., et al. (2003) Selected methods of drought evaluation in South Moravia and Northern Austria. XI International poster day. Transport of water, chemicals and energy in soil–crop atmosphere system, Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia.

Vizina, A., Horáček, S., Hanel, M. (2015) Nové možnosti modelu Bilan. *VTEI*, roč. 55, s. 4–5.

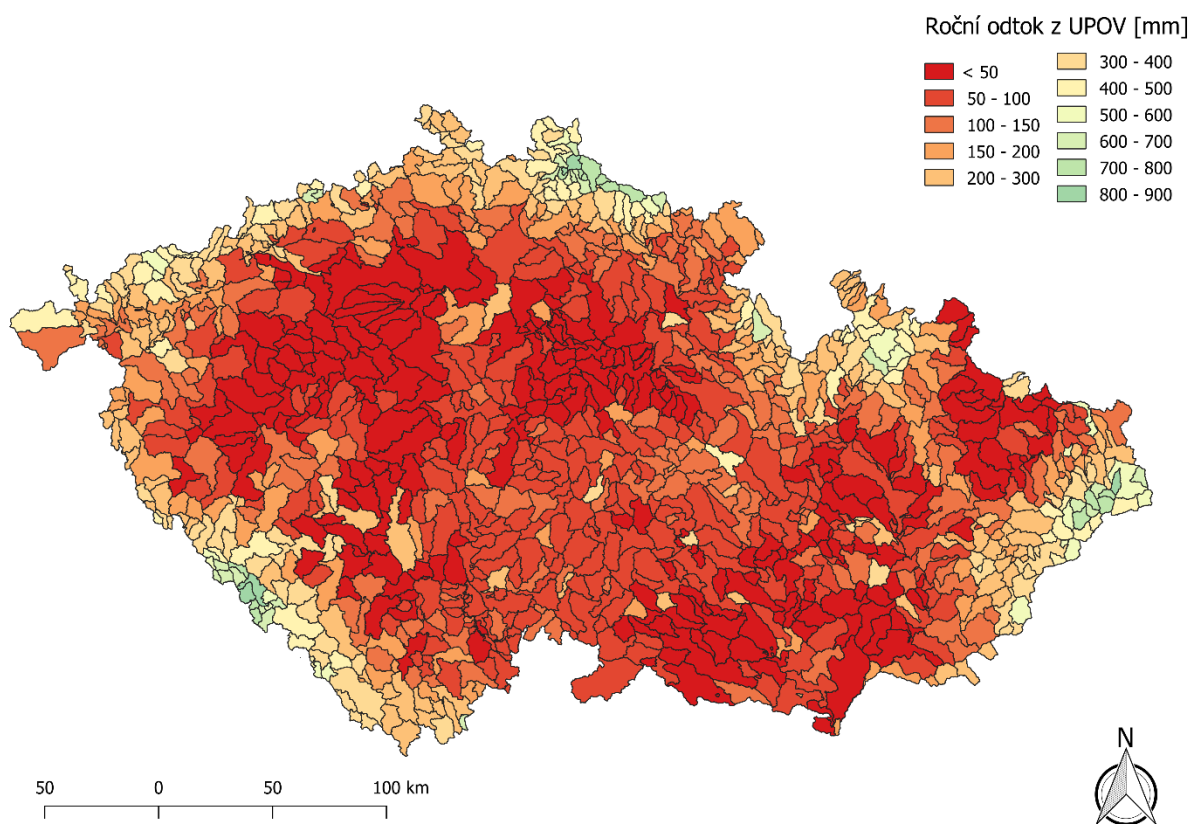
Vizina, A., Hanel, M., Melišová, E. (2015) Analýza propagace sucha pomocí generátoru počasí. *Vodní hospodářství*, roč. 56, č. 6, s. 5–11. ISSN 1211-0760.

Wanders, N., Van Lanen, H., van Loon, A. F. (2010) Indicators for drought characterization on a global scale.

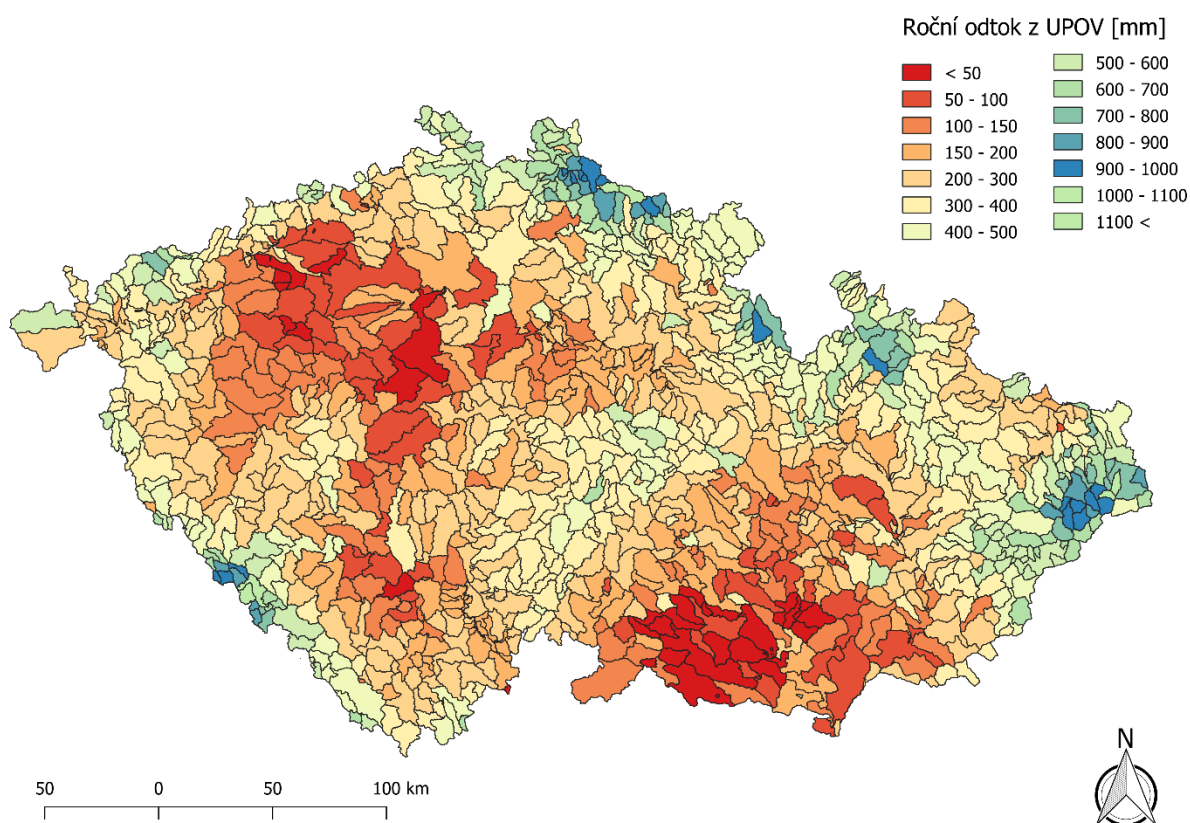
Wilhite, D. A. (2000) Drought as a natural hazard: concepts and definitions. *Drought, a global assessment*, 1, 3–18.

Witt, J. L. (1997) National Mitigation Strategy: Partnerships for Building Safer Communities. Diane Publishing.

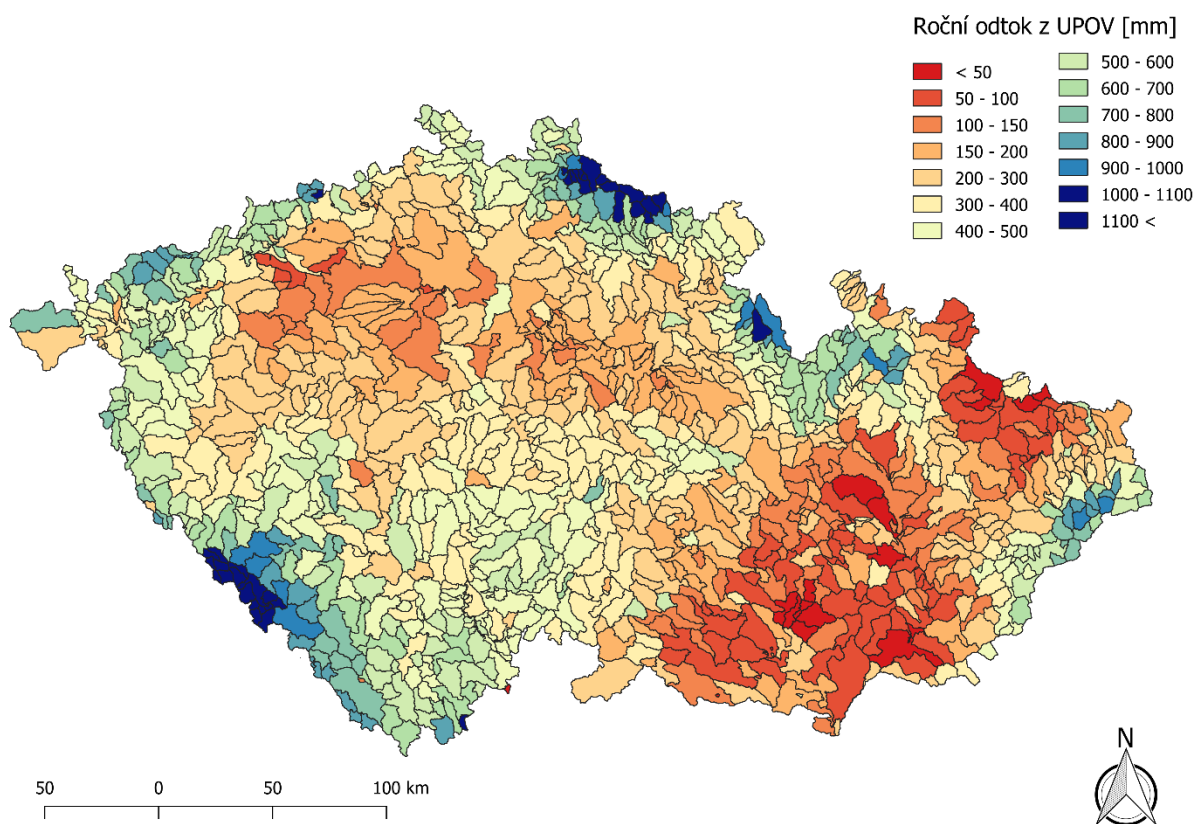
PŘÍLOHA 1 – Modelované roční odtoky



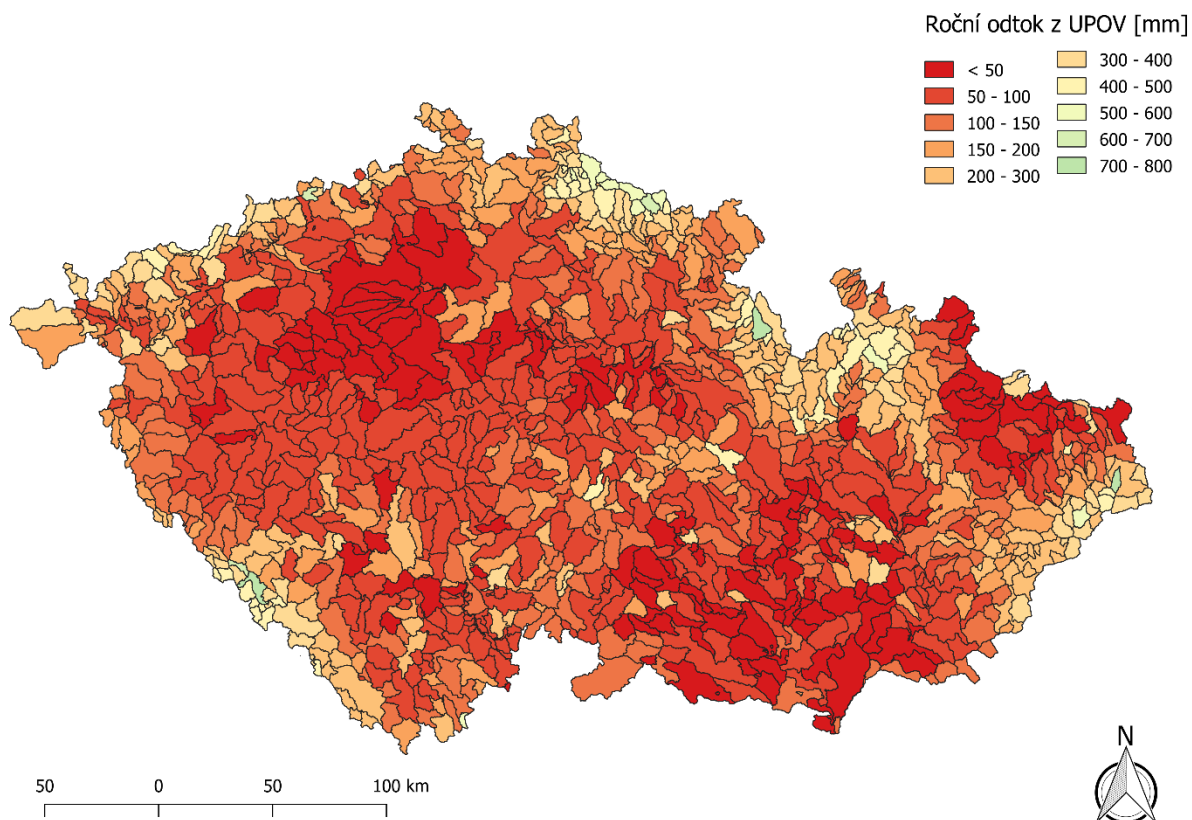
Příloha I-1 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2000.



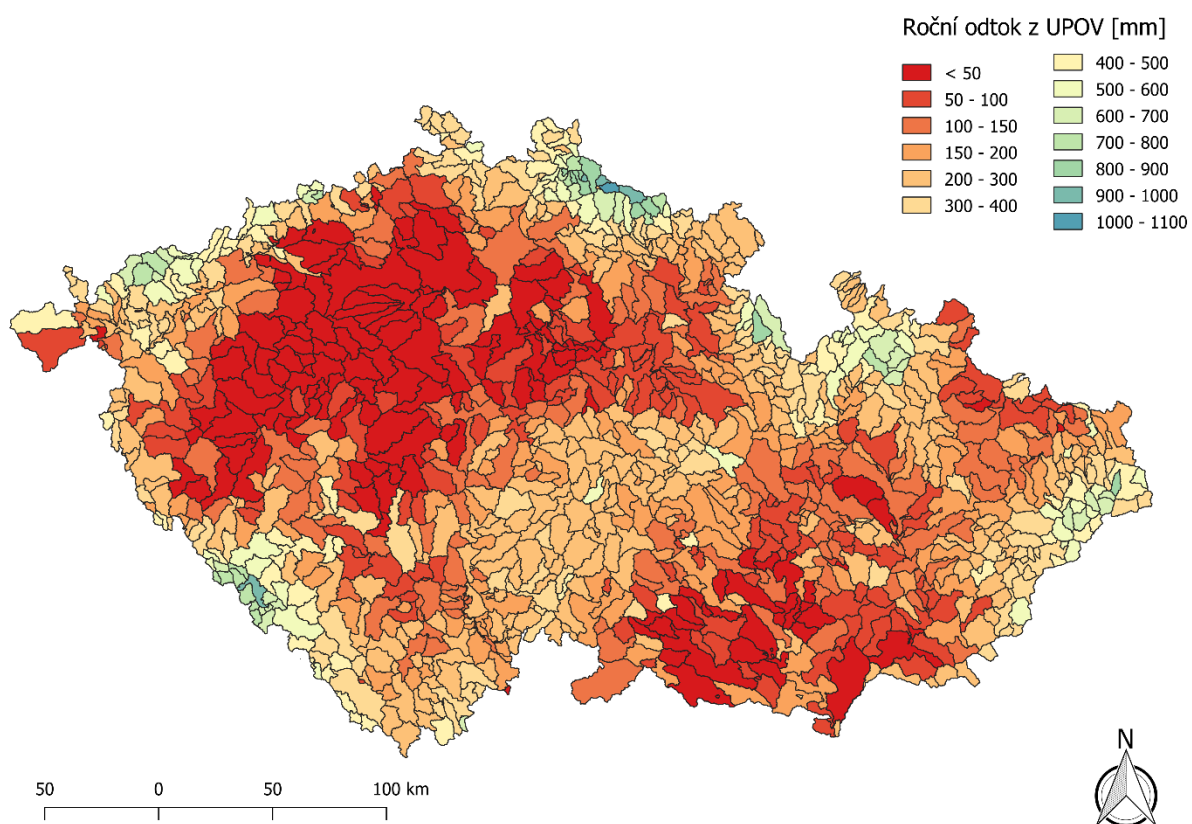
Příloha I-2 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2001.



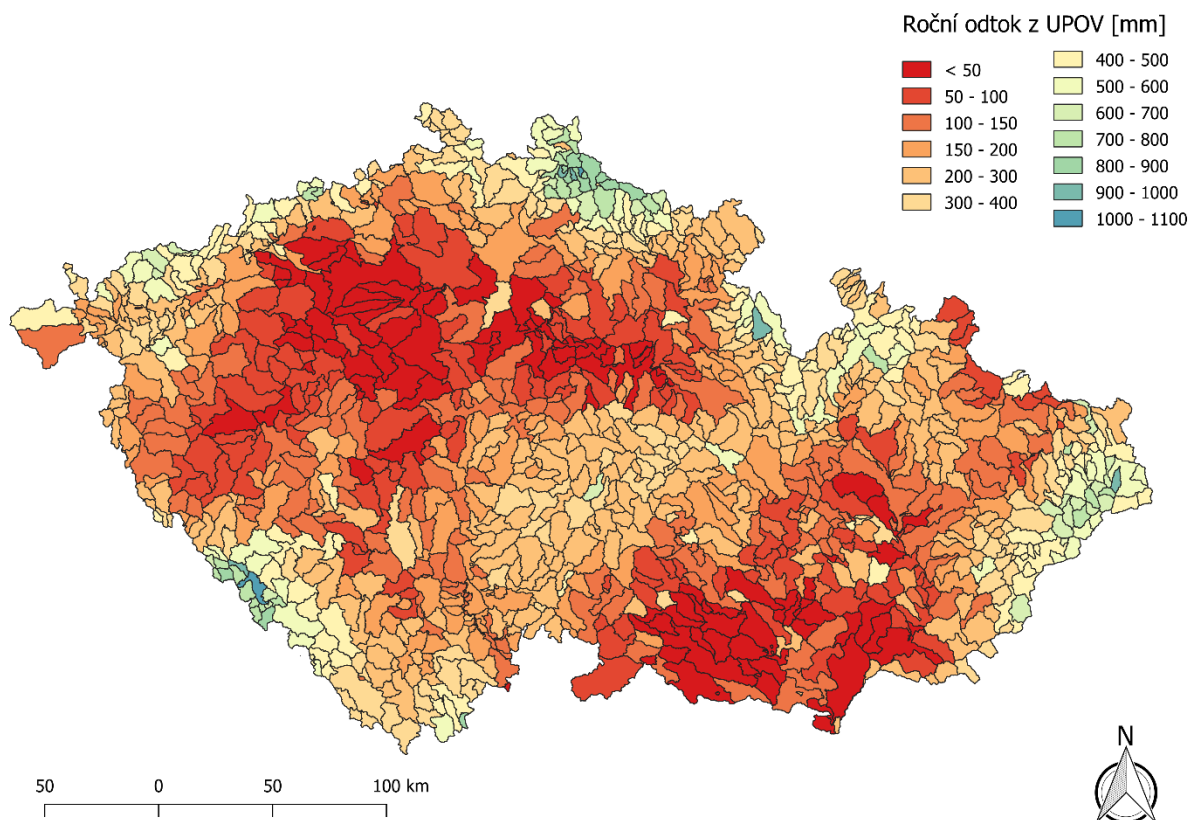
Příloha I-3 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2002.



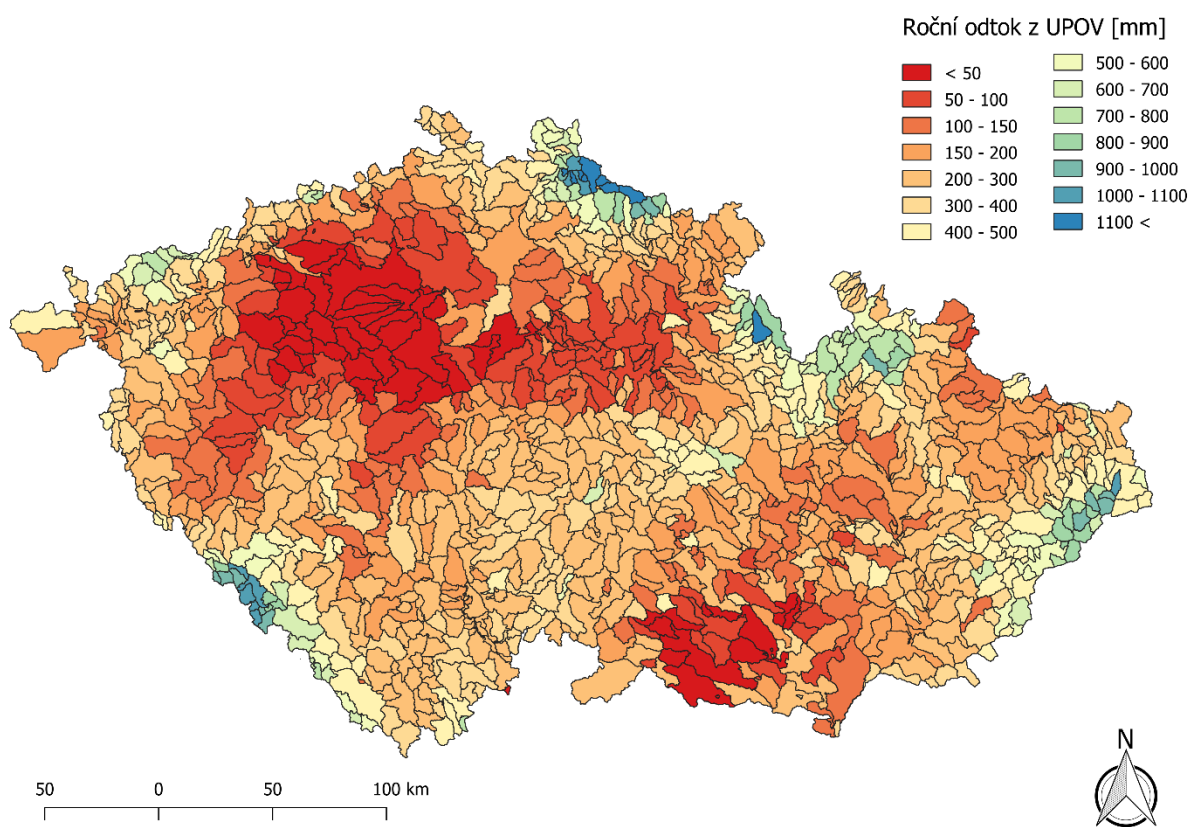
Příloha I-4 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2003.



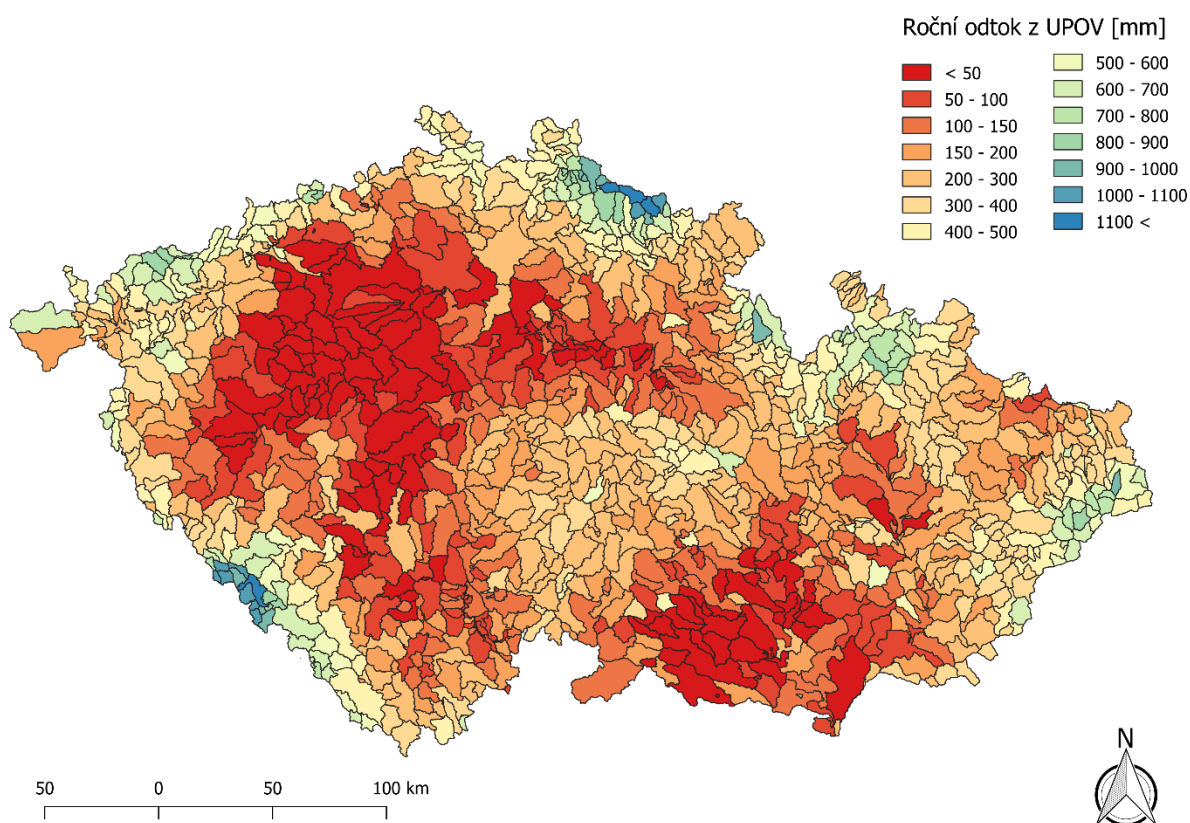
Příloha I-5 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2004.



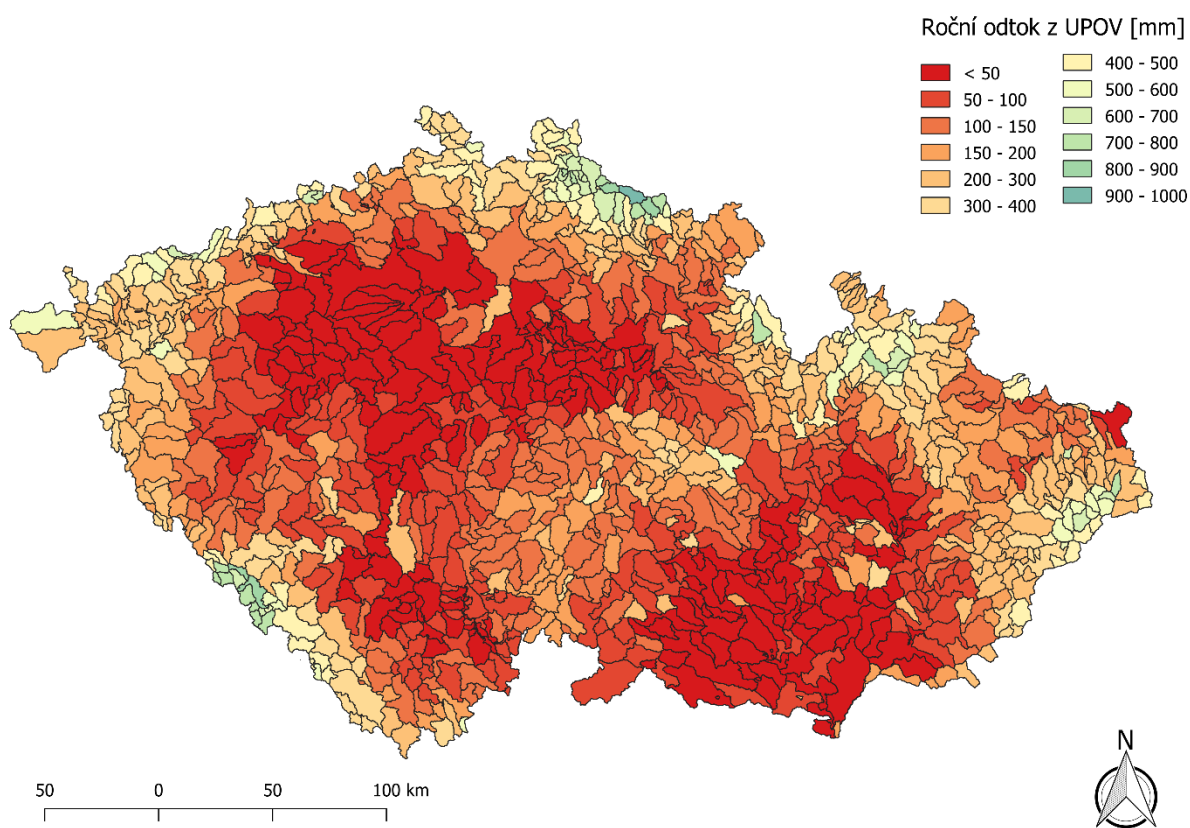
Příloha I-6 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2005.



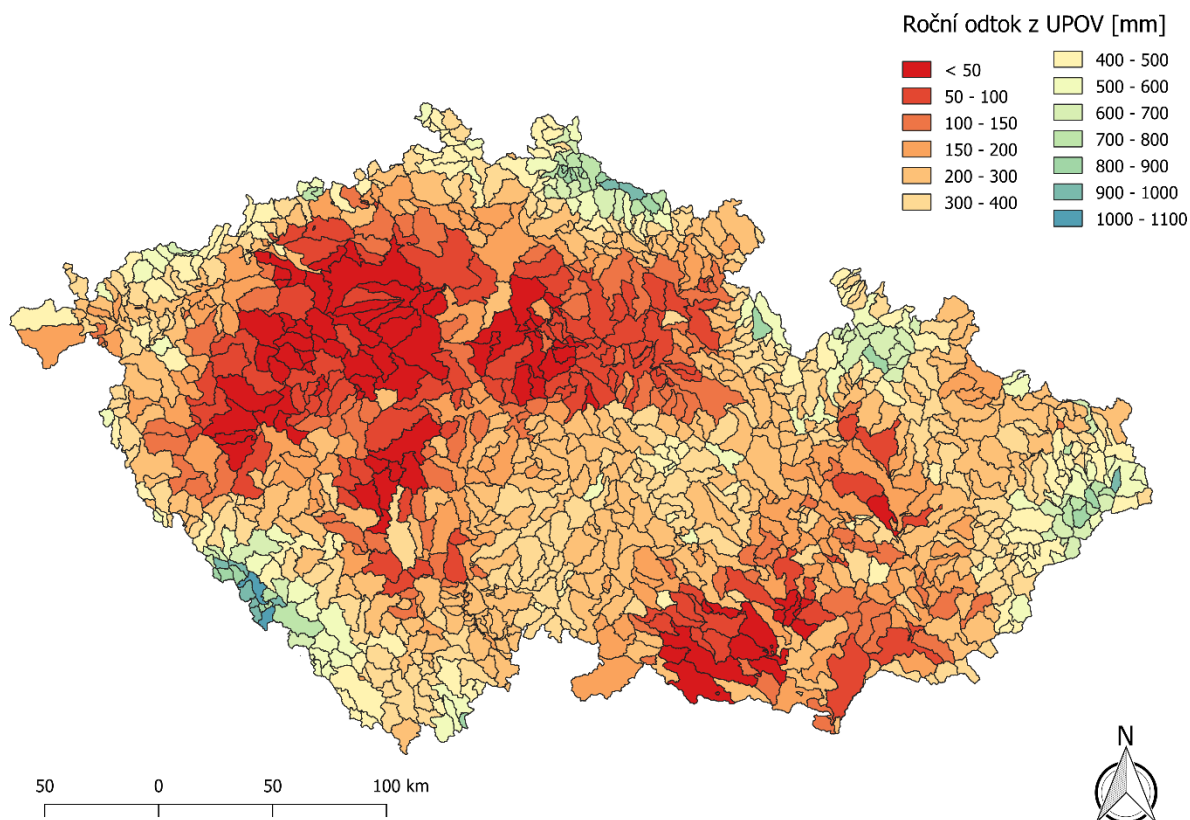
Příloha I-7 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2006.



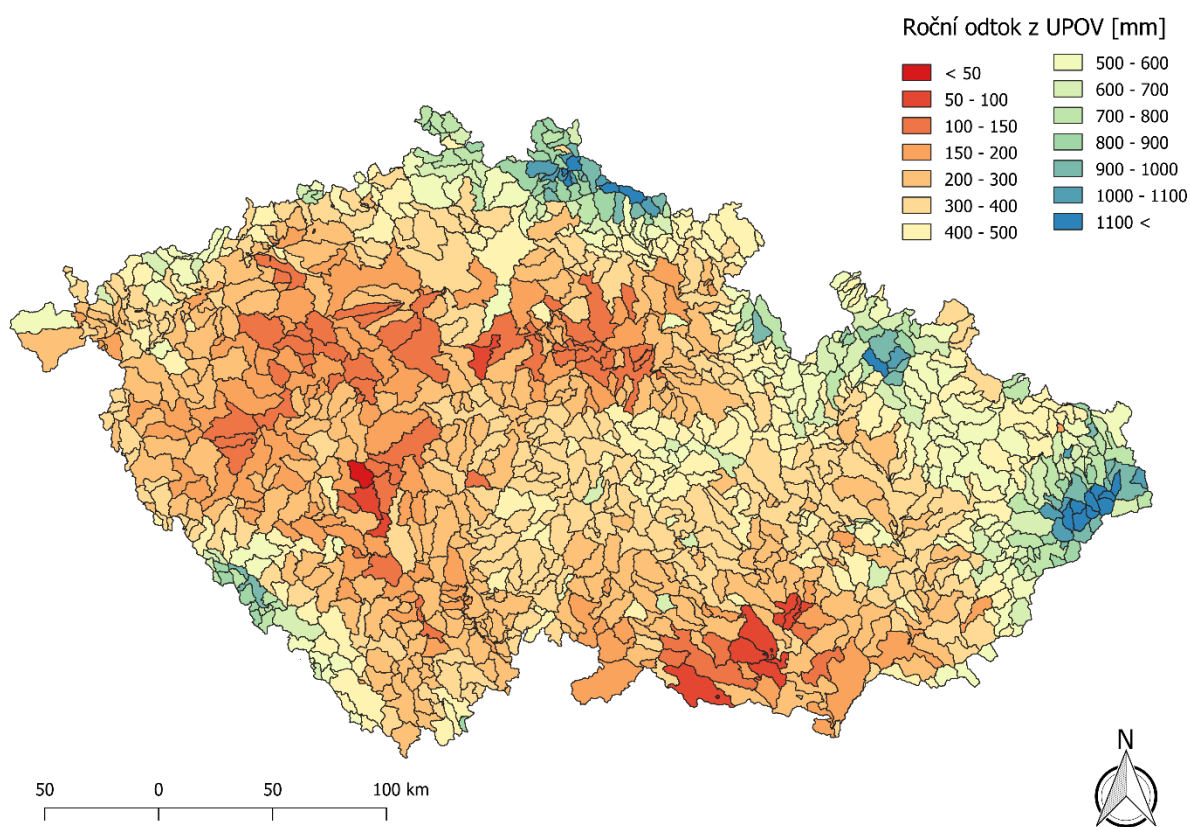
Příloha I-8 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2007.



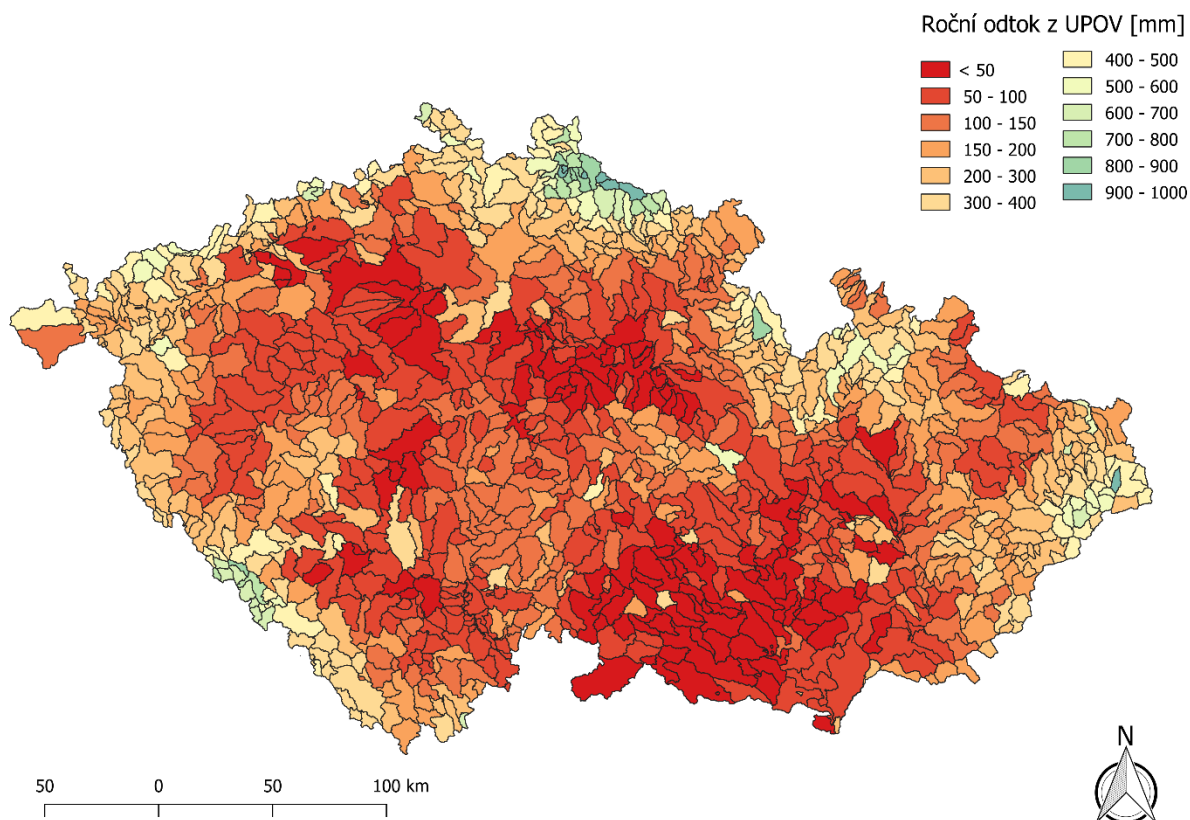
Příloha I-9 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2008.



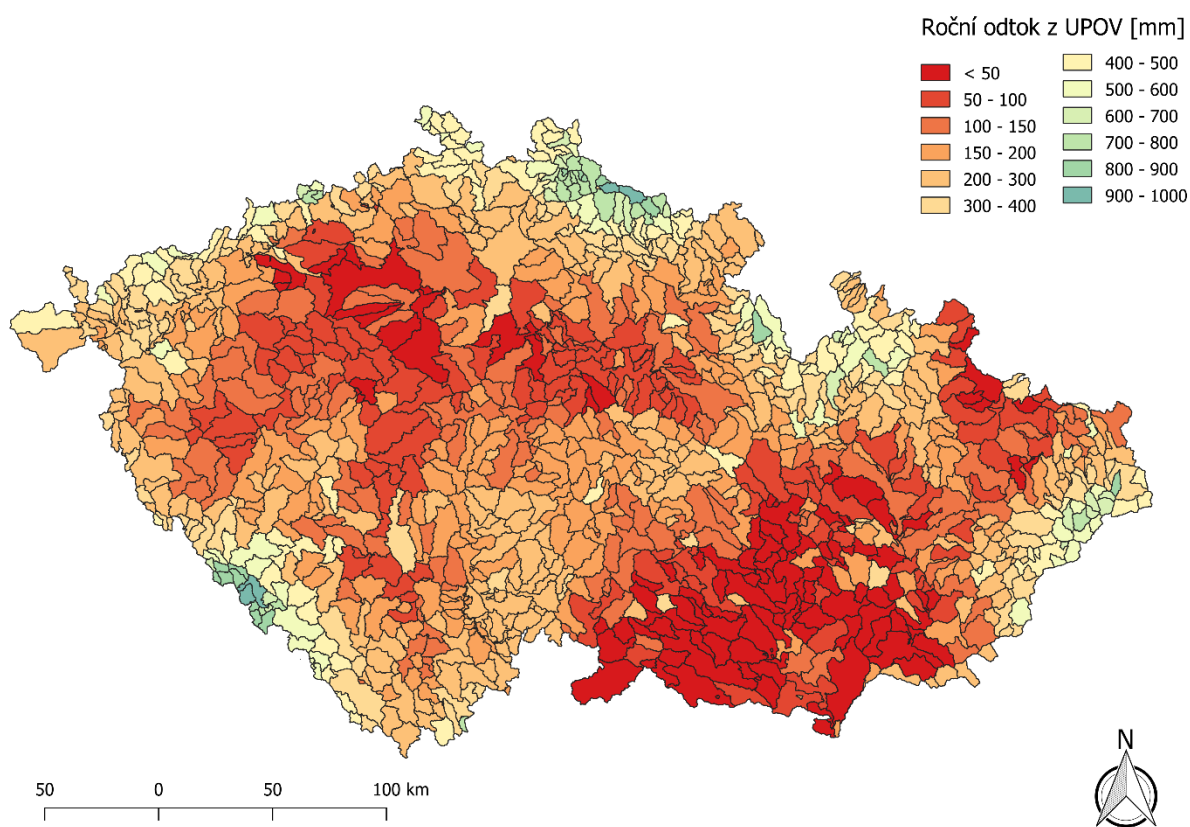
Příloha I-10 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2009.



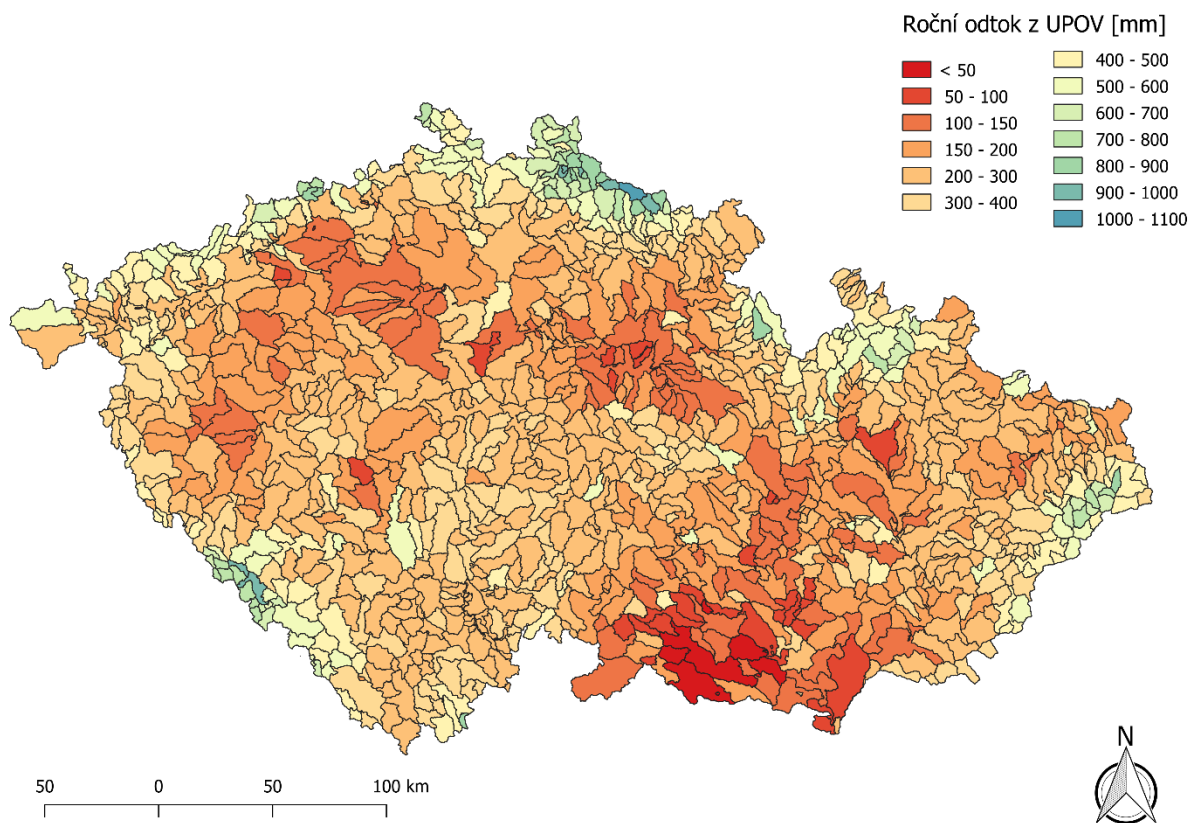
Příloha I-11 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2010.



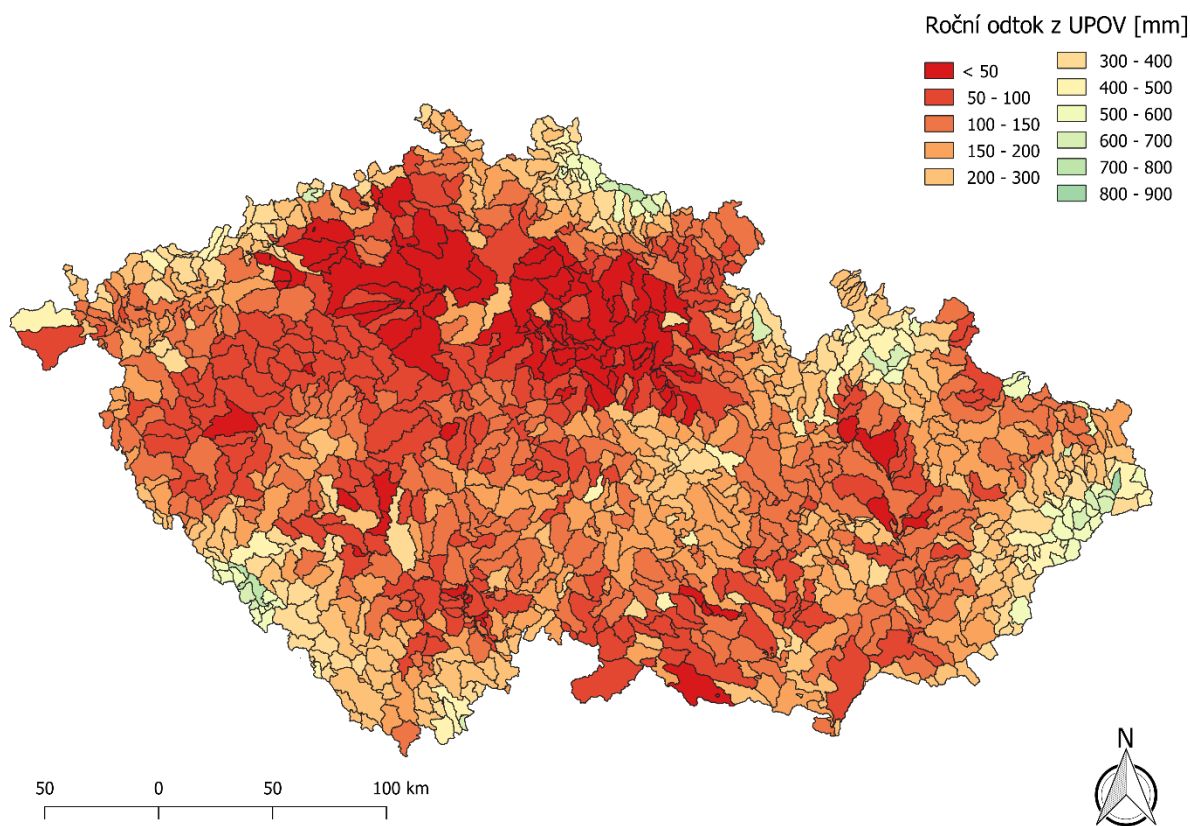
Příloha I-12 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2011.



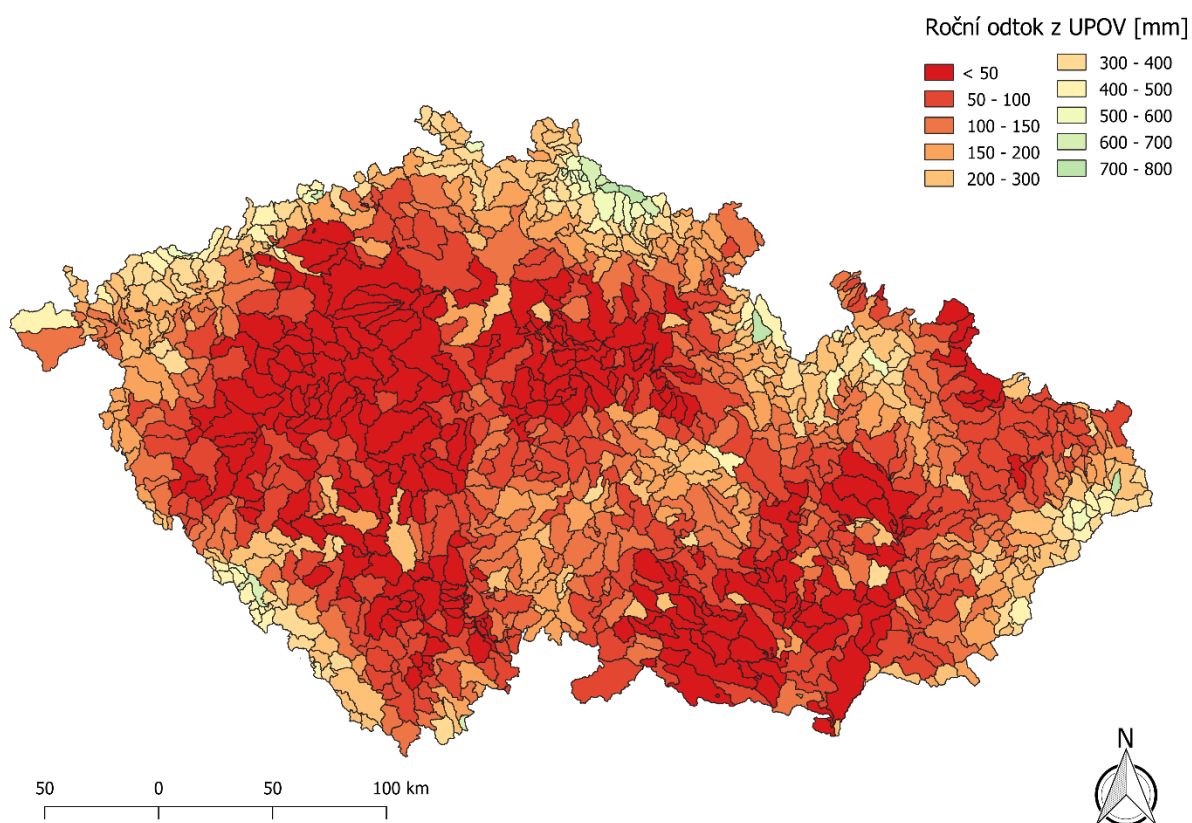
Příloha I-13 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2012.



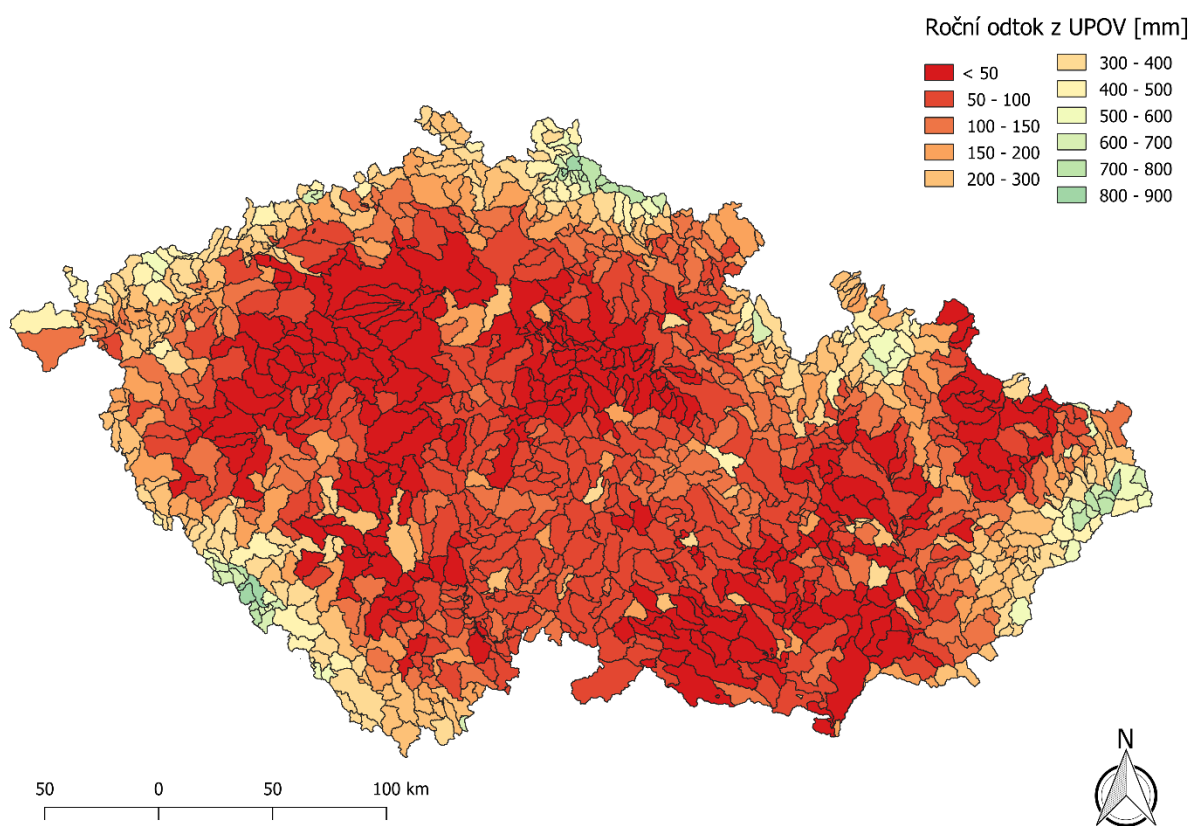
Příloha I-14 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2013.



Příloha I-15 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2014.

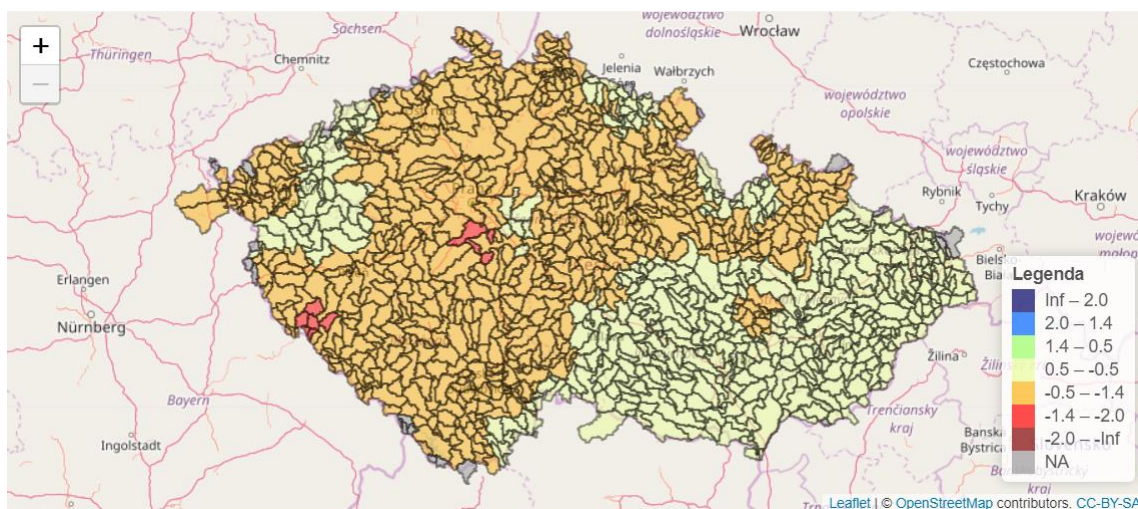


Příloha I-16 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2015.

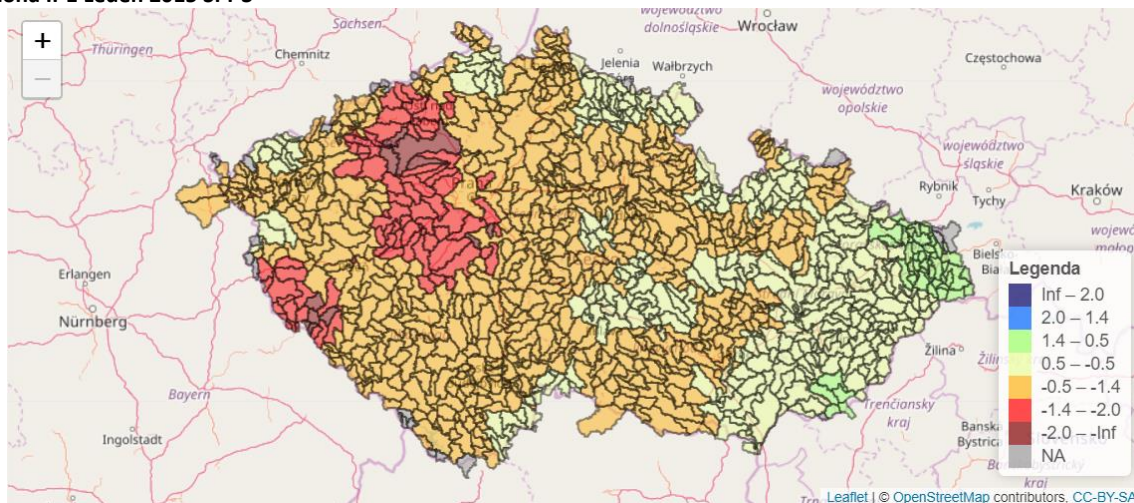


Příloha I-17 Celkový roční odtok z UPOV za rok 2016.

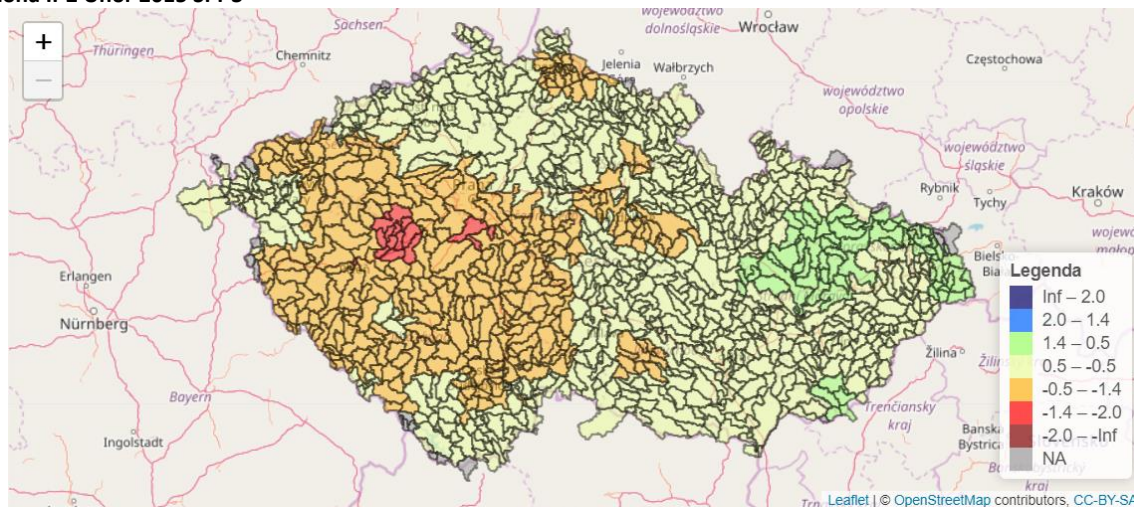
PŘÍLOHA 2 – Indikátory



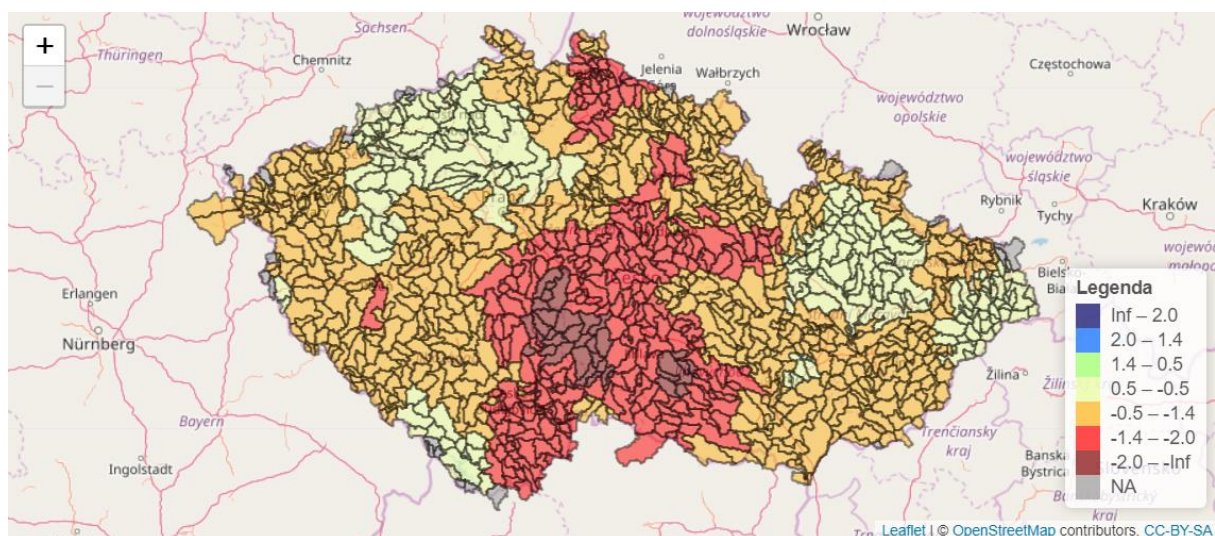
Příloha II-1 Leden 2015 SPI-3



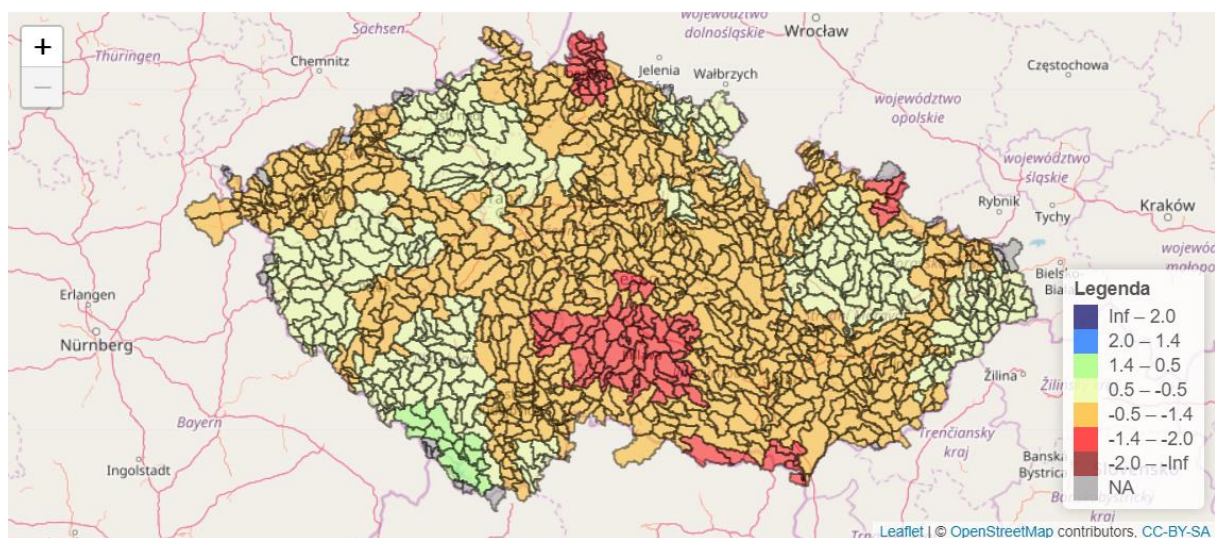
Příloha II-2 Únor 2015 SPI-3



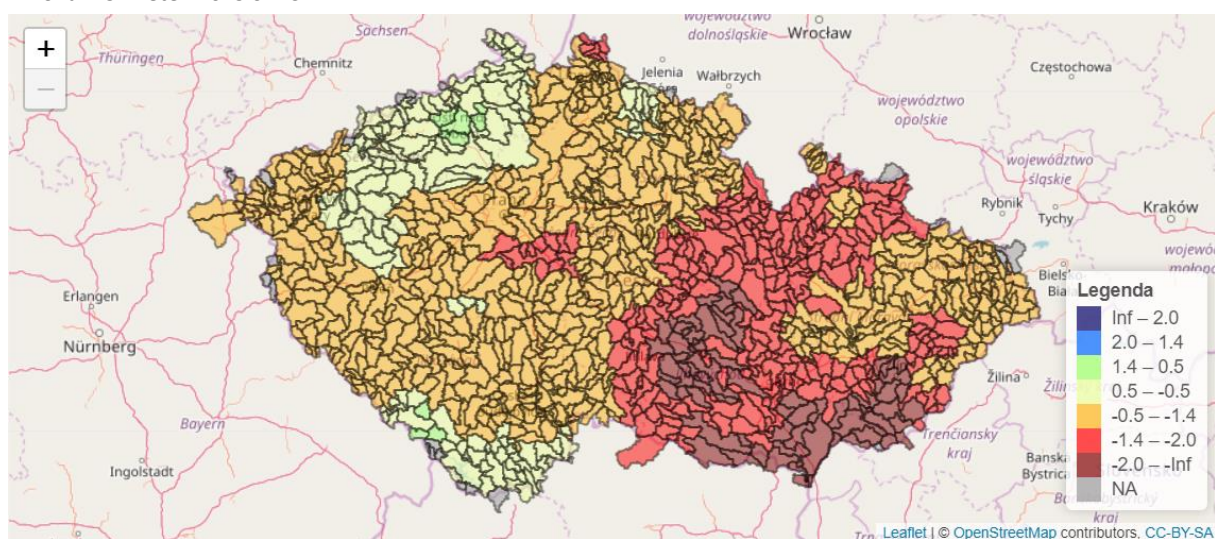
Příloha II-3 Březen 2015 SPI-3



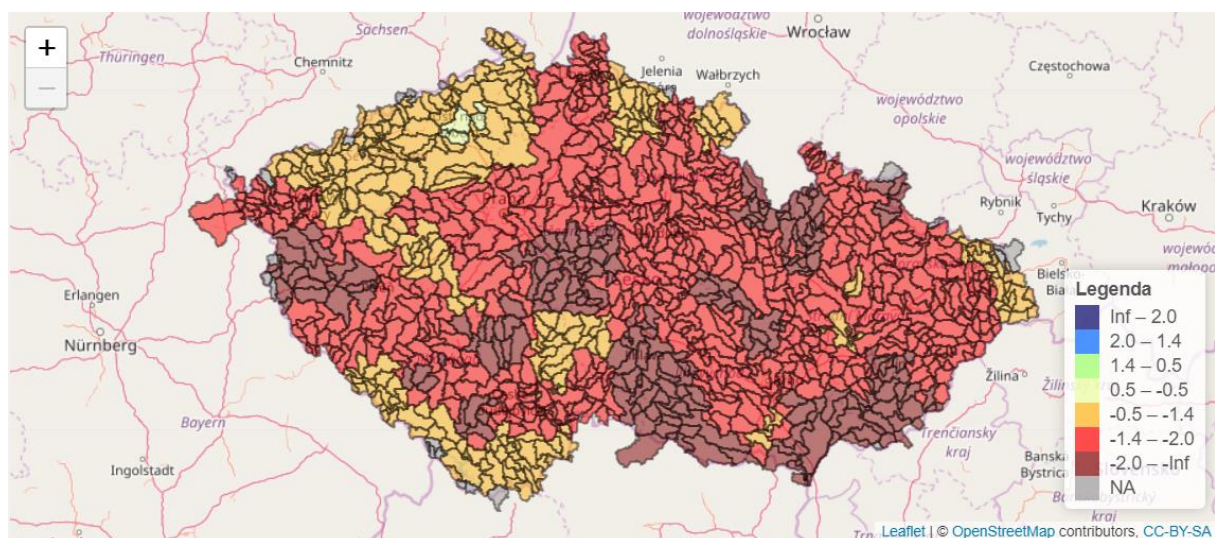
Příloha II-4 Duben 2015 SPI-3



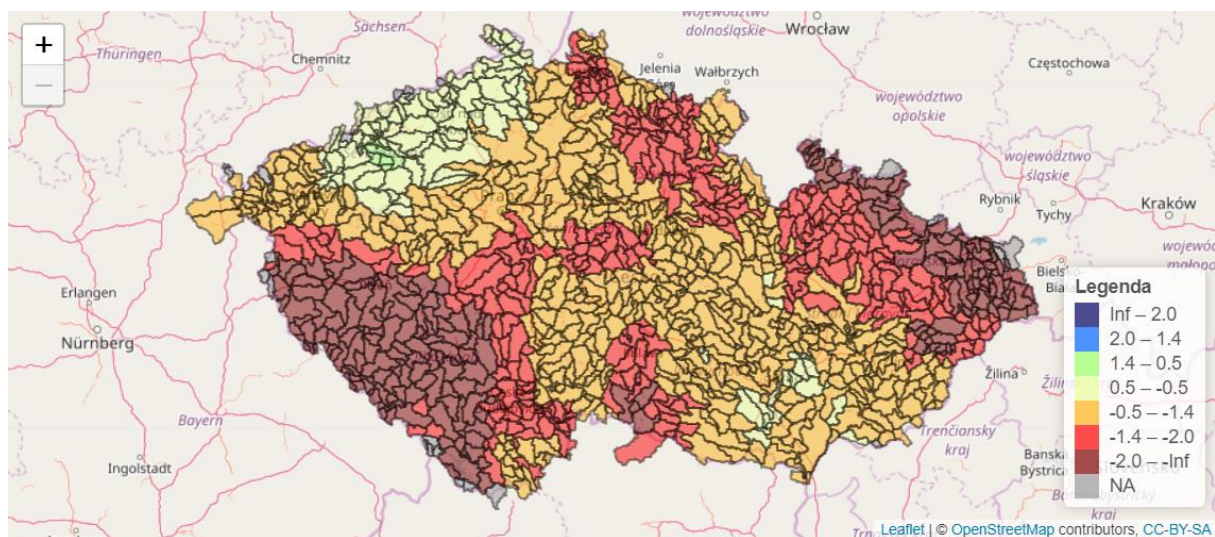
Příloha II-5 Květen 2015 SPI-3



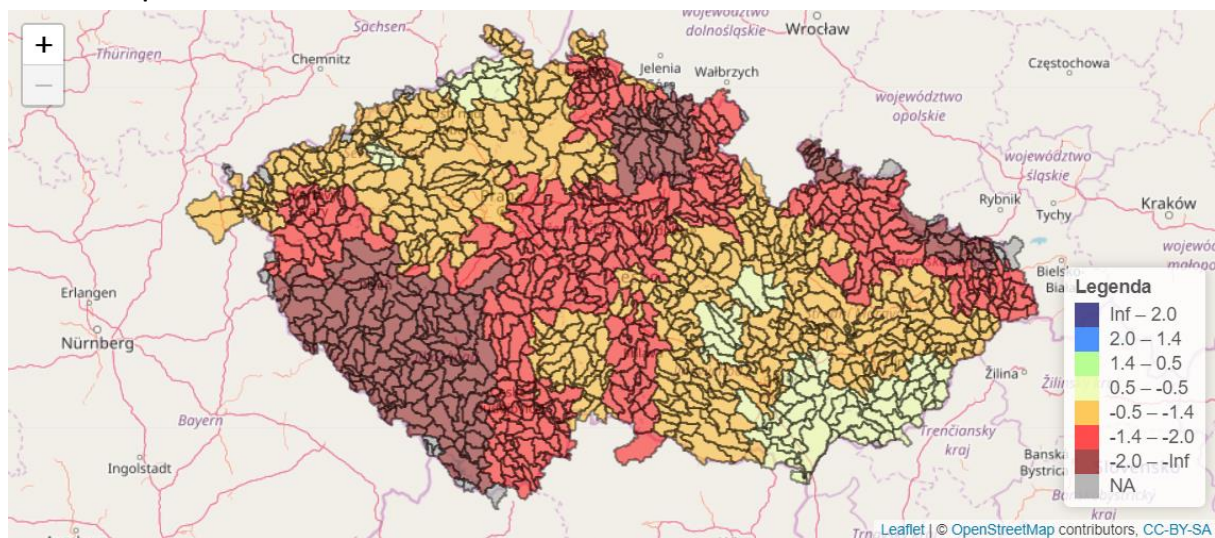
Příloha II-6 Červen 2015 SPI-3



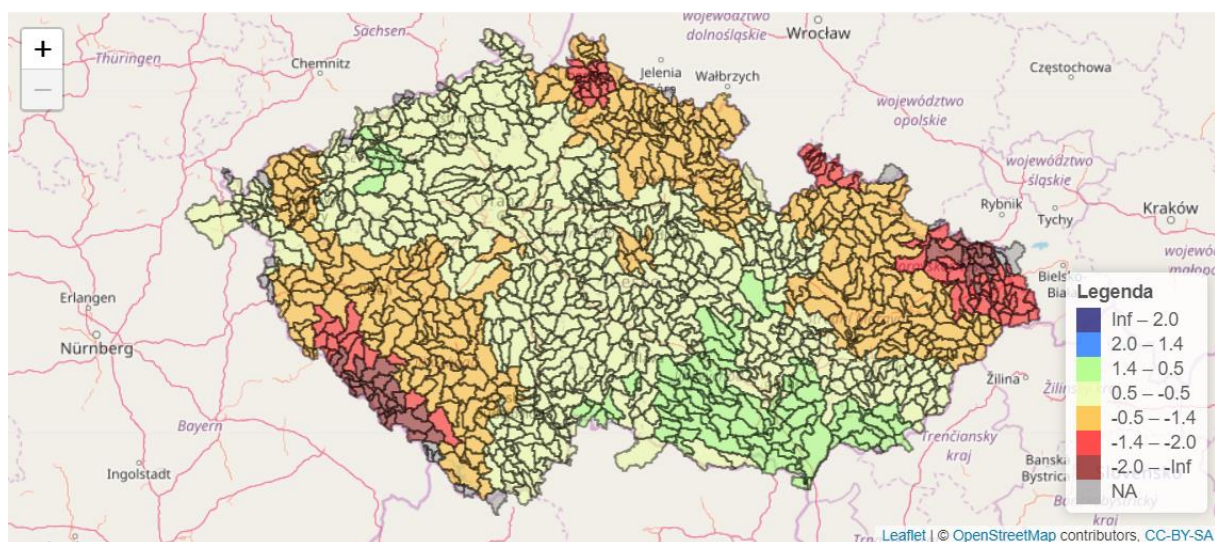
Příloha II-7 Červenec 2015 SPI-3



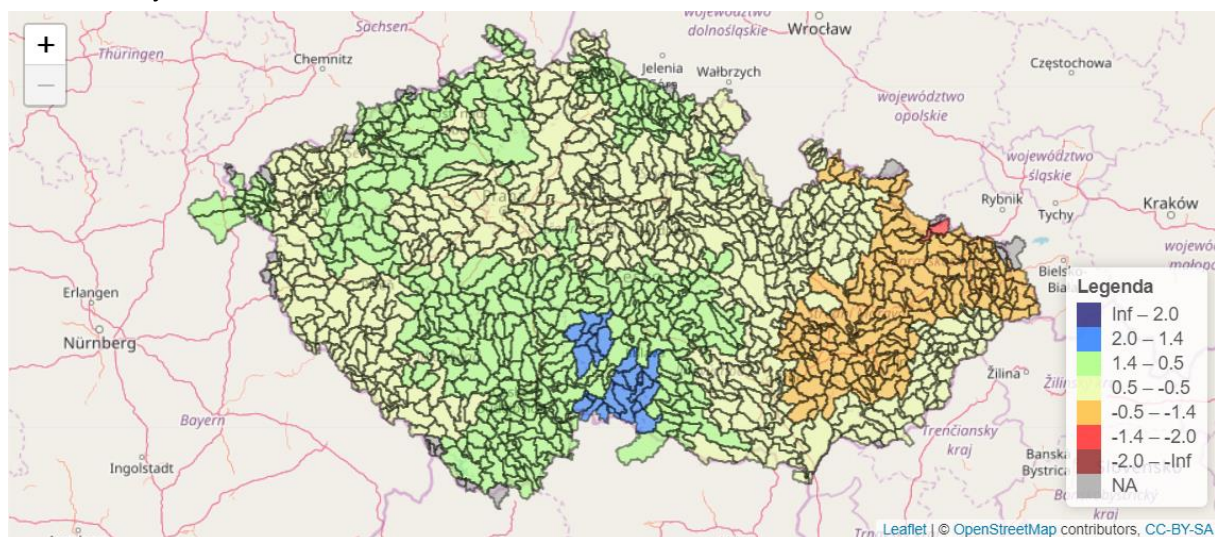
Příloha II-8 Srpen 2015 SPI-3



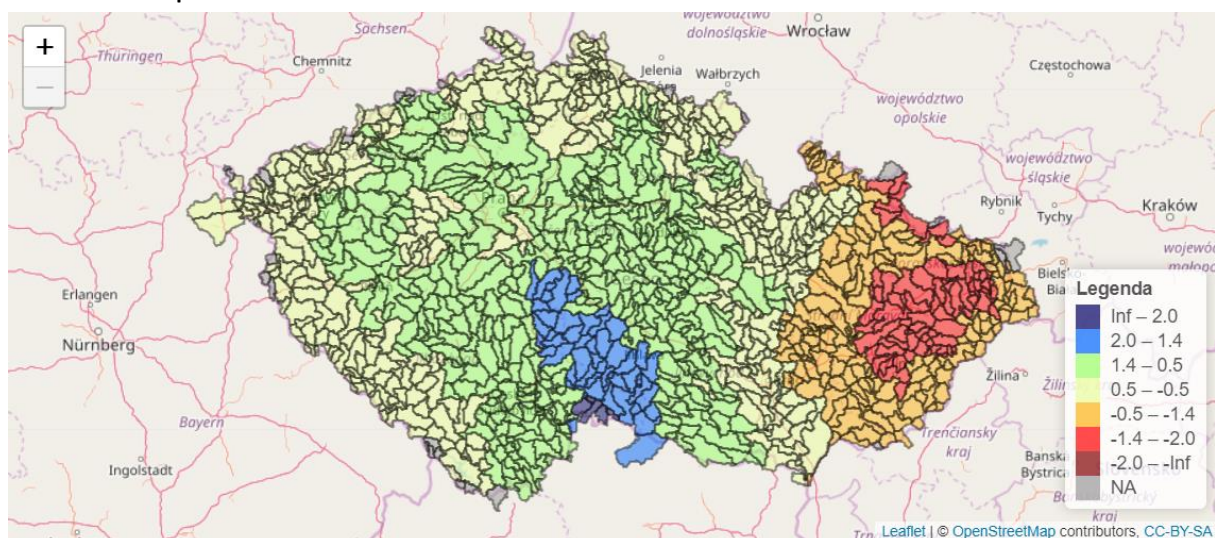
Příloha II-9 Září 2015 SPI-3



Příloha II-10 Říjen 2015 SPI-3



Příloha II-11 Listopad 2015 SPI-3



Příloha II-12 Prosinec 2015 SPI-3