



OZÁVĚREČNÁ VÝZKUMNÁ ODBORNÁ ZPRÁVA Z PROJEKTU O POSTUPU PRACÍ ZA PROJEKT Č. SS01020052

Příloha k průběžné zprávě za rok 2022

Číslo projektu: SS01020052

Název projektu: Potenciál a rizika závlah na území ČR v měnícím se klimatu

Autorský kolektiv podílející se na řešení projektu

ČVUT v Praze – hlavní příjemce

Ing. Petr Kavka, Ph.D. – řešitel

Ing. Martin Neumann

Ing. Pavla Schwarzová Ph.D.

Ing. Adam Tejkl

Česká zemědělská univerzita v Praze

prof. Ing. Martin Hanel Ph.D.- další řešitel

doc. Ing. Michal Kuráž Ph.D.

Ústav výzkumu globální změny AV

prof. Mgr. Ing. Miroslav Trnka Ph.D. - další řešitel

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka veřejná výzkumná instituce

Ing. Adam Vizina Ph.D. - další řešitel

Ing. Martina Peláková

HANKA MOCHOV s.r.o.

Ing. Petr Hanka – další řešitel

Ing. Libor Čásenský

1	Popis průběhu řešení projektu.....	2
2	Kategorizace ČR z hlediska podmínek současného stavu.....	2
2.1	Charakteristiky dešťových událostí a bezdeštných období.....	3
2.2	Odhad charakteristik ovlivňujících vodní bilanci pro současný stav malých povodí a analýza a charakteristiky dešťových událostí a bezdeštných období.....	7
2.3	Rozdělení území ČR z hlediska převažujících průběhů tvarů návrhových srážek o krátké době trvání 11	
2.4	Vláhová potřeba rostlin.....	14
2.5	Lokalizace historických závlahových soustav.....	17
2.6	Zdrojové plochy pro zachycení vod v lokálním měřítku.....	25
2.7	Analýza dat pro určení potenciálu lokálních závlahových soustav v malých povodích.....	28
3	Kategorizace ČR z hlediska dostupnosti a potřeb vody.....	39
3.1	Dostupné podklady pro útvary povrchových vod.....	39
3.2	Analýza potřeb vody v ČR a analýza potřeb vody pro závlahy.....	41
3.3	Modelování hydrologické bilance a disponibilní vodní zdroje.....	71
4	Vývoj klimatických scénářů.....	76
4.1	Validace modelů a jejich výběr.....	76
4.2	Finální výběr výhledových klimatických scénářů.....	81
5	Dopady změn a jejich klasifikace mezi současným stavem a výhledy klimatických změn.....	82
5.1	Změny v agroklimatických oblastech.....	82
5.2	Dopady změn na dostupnost vody pro závlahové účely.....	94
5.3	Analýza charakteristik UPOV z pohledu dopadů klimatických změn.....	105
6	Experimentální měření a vývoj monitorovacího systému bilance vody v půdě pro potřeby závlahových systémů.....	111
6.1	Cíle monitoringu.....	111
6.2	Experimentální měření na příslušných lokalitách.....	114
6.3	Vývoj Užitého vzoru - Meteorologicko-pedologická jednotka pro podporu řízení závlahy	120
6.4	Analýza pozorovaných hodnot a konstrukce matematického modelu reprezentující experimentální testovací setup.....	128
7	Zdroje.....	143

1 Popis průběhu řešení projektu

Předkládaná průběžná závěrečná za projekt TAČR SS01020052 - "Potenciál a rizika závlah na území ČR v měnícím se klimatu" shrnuje aktivity za celou dobu řešení. Projekt byl zahájen v první polovině roku 2020 a byl ukončen v první polovině roku 2024. Zúčastněna jsou čtyři vědecko-výzkumná pracoviště: ČVUT v Praze – Fakulta stavební, Česká zemědělská univerzita – Fakulta životního prostředí, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i., Ústav pro výzkum globální změny Akademie věd ČR a Hanka Mochoch s.r.o. zároveň jako interní aplikační garant. Externím aplikačním garantem je Státní pozemkový úřad.

Cílem projektu bylo definovat a publikovat informace o dopadu změny klimatu na dostupnost a potřeby vody pro závlahy, a to z pohledu současného stavu klimatu a z pohledu očekávaných změn klimatu. Aktivity na řešeném projektu lze rozdělit do čtyř hlavních částí, které odpovídají vytyčeným cílům projektu.

Řešení projektu bylo rozděleno do čtyřech hlavních částí, které jsou dále rozpracovány a popsány v následujících kapitolách. V první části se jednalo o analýzy a kategorizaci ČR z hlediska současných podmínek. (kap.2.). V které se jednalo zejména o zpracování podmínek současné vláhové bilance, identifikace závlahových soustav a analýz lokálních zdrojů a odběrů. Tato část projektu byla řešena od zahájení projektu. Druhou částí projektu pak byla kategorizace ČR z pohledu dostupnosti zdrojů vody a potřeb vody (kap. 3), která se primárně zabývala získáním podkladů pro odvození vodní bilance a následně pak jejím modelováním. Na tyto dvě části projektu pak navazovala část zabývající se změnami klimatu (kap. 4) a jejími dopady na možné změny vodní bilance a na ni navázaných zdrojů vody z pohledu ansáblu výhledových klimatických scénářů. V rámci aktivit tak byly zpracovávány jak samotné klimatické scénáře a jejich dopady scénáře dopadů na vodní bilanci.

Samostatnou částí projektu pak bylo experimentální měření vodní bilance na zavlažovaných pozemcích s následným vývojem monitorovacího systému bilance vody v půdě pro potřeby závlahových systémů s návazným modelováním. Tato aktivita byla řešena po celou dobu řešení.

2 Kategorizace ČR z hlediska podmínek současného stavu.

Tato aktivita má za cíl zhodnotit současné podmínky klimatu, a to z několika možných hledisek, které mohou ovlivnit zemědělství z hlediska využití produkčních půd ve vztahu k dostupnosti vody pro závlahy. Mimo hlavní vodní toky a na ně navázané velké zdroje vody je jsou klíčové lokální zdroje a schopnost zadržení vody v krajině. Z hlediska vodní bilance jsou pro hodnocení klíčové Útvary povrchových vod (UPOV).

Využití podklady pro útvary povrchových vod

V rámci řešení projektu byla získána data, která jsou agregována právě pro jednotlivé útvary povrchových vod:

- 1) Časové řady denní (1961-2020):
 - Teploty vzduchu
 - Srážkových úhrnů
 - Modelovaných odtokových výšek a základního odtoku
 - Modelované průtoky

- Odvozené disponibilní zdroje vody
- Deficitní objemy
- 2) Charakteristiky:
 - M-denní a N-leté průtoky,
 - Charakteristiky vodních nádrží
 - Index sucha pro referenční období 1991-2020 a 2014-2020 (celý rok, vegetační období)
 - Zabezpečení
- 3) Geomorfologická data:
 - Kritické body
 - Zaniklé rybníky/malé vodní nádrže
 - Aktualizovaná vrstva závlahových soustav
 - Sklonitosti
 - Digitální model terénu
 - Pedologie
 - Vodohospodářské mapy
 - Osy vodních toků
 - Zemědělské výrobní oblasti
- 4) Ostatní:
 - Databáze nakládání s vodou
 - Pětileté a desetileté sucho
 - Databáze LPIS
 - Závlahové soustavy
 - Změny m-denních vod, dlouhodobých průměrných průtoků a nedostatkových objemů.
 - Změny zásobní funkce malých vodních nádrží a závlahových potřeb.

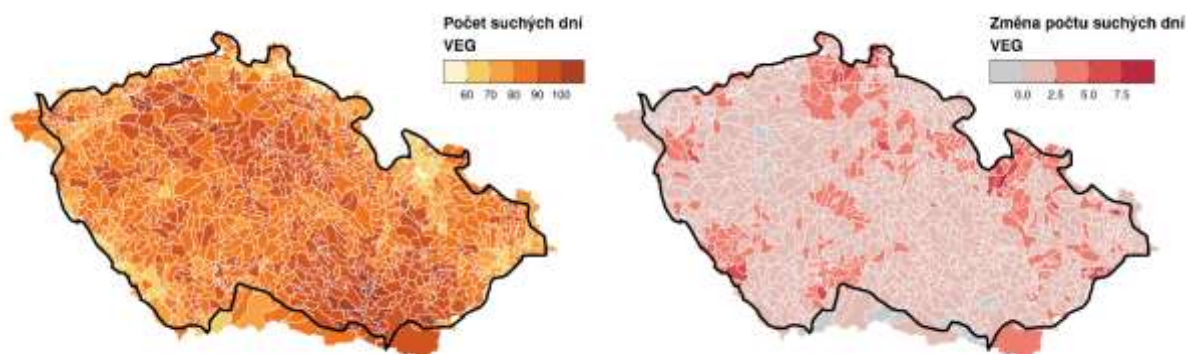
2.1 Charakteristiky dešťových událostí a bezdeštných období

Za účelem předběžného vyhodnocení možností akumulace povrchových vod bylo provedeno hodnocení charakteristik srážkových dní a bezdeštných období. Podkladem byla denní data srážek pro útvary povrchových vod pro období 1961-2020, jež jsou dostupná v rámci systému pro předpověď sucha HAMR.

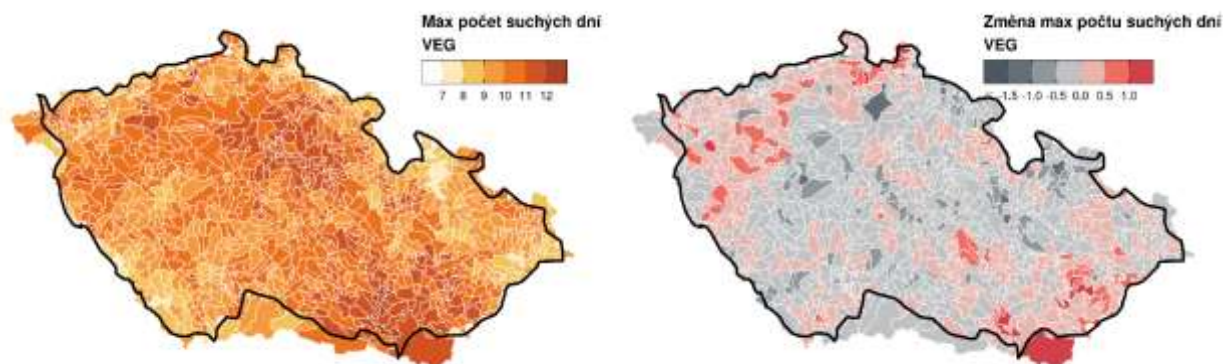
Pro každý útvar povrchových vod byla časové řady srážek rozděleny na období se srážkami nad 0.1 mm/den (tj. dešťové události) a srážkami pod 0.1 mm/den, tj. bezdeštná období. Variantně bylo pak uvažováno dělení na dešťové události s celkovým úhrnem větším než 1 mm / událost a ostatní. Toto hodnocení bylo provedeno pro různá období: celý rok, duben-září (VEG), červen-srpen (JJA), prosinec-únor (DJF) a pro celé hodnocené období (1961-2020) a dvě obsažená třicetiletá období 1961-1990 a 1991-2020. Hodnocení ve třicetiletých obdobích umožňuje vyčíslení trendů/změn.

Na Obr. 2-1 a Obr. 2-2 je ukázka vybraných charakteristik srážkových a bezdeštných období pro měsíce duben-září (vegetační období – VEG). Počet suchých dní (bez srážky > 0.1 mm) se pohybuje v rozmezí 50-110 s tím, že největší počty suchých dní lze zaznamenat v povodí Dyje, Polabské nížině a ve srážkovém stínu Krušných hor (Žatecko, Rakovnicko). V průměru nejdelší souvislé období bez srážek dosahuje na většině území počtu 9-13 dní, s maximy opět v povodí Dyje a v povodí Labe spíše v Královéhradeckém kraji. Změny počtu suchých dní i průměrného nejdelšího období jsou relativně malé.

T A Č R

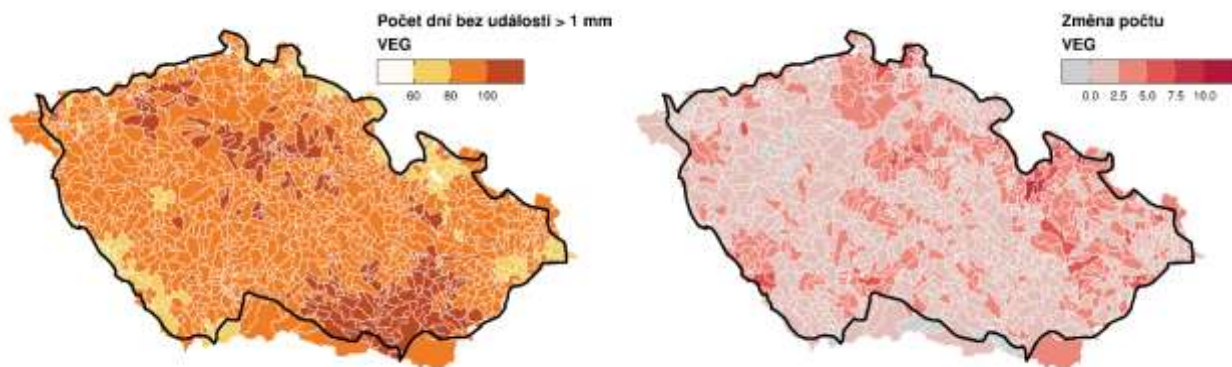


Obr. 2-1: Počet dní s úhrnem $<0,1$ mm / den (vlevo) během vegetačního období a změna tohoto počtu mezi obdobími 1961-1990 a 1991-2020 (vpravo).

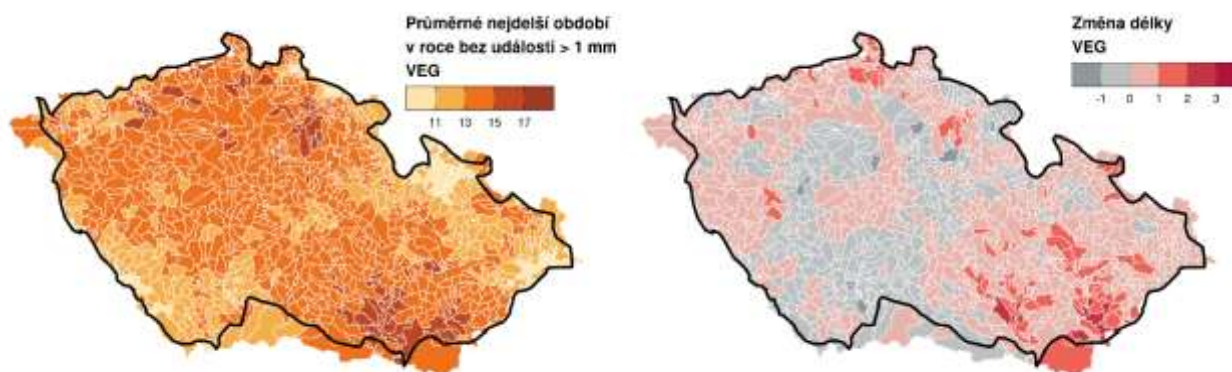


Obr. 2-2: Průměrné nejdelší období s úhrnem $<0,1$ mm / den ve vegetačním období (vlevo) a změna tohoto počtu mezi obdobími 1961-1990 a 1991-2020 (vpravo).

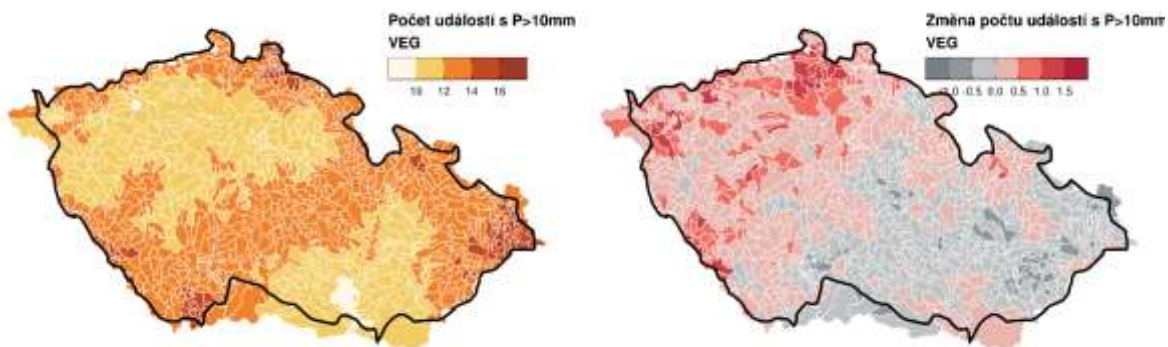
Počet dní bez srážkové události s úhrnem nad 1 mm během vegetačního období dosahuje hodnot mezi cca 50 a 120 (Obr. 2-3). Maxima lze opět konstatovat v povodí Dyje, částečně pak v Královéhradeckém kraji a v některých vodních útvarech na severozápadě Čech. Souvislé období bez srážkové události těchto parametrů (Obr. 2-4) je v průměru dlouhé 14-17 dní s maximy v povodí Dyje a v Polabské nížině. Na většině území se délka období bez srážky nad 1 mm prodlužuje, nicméně zřídka o více než 5 dní. Průměrné nejdelší souvislé období bez srážky nad 1 mm se pro větší část území prodlužuje, nejvíce na jižní Moravě.



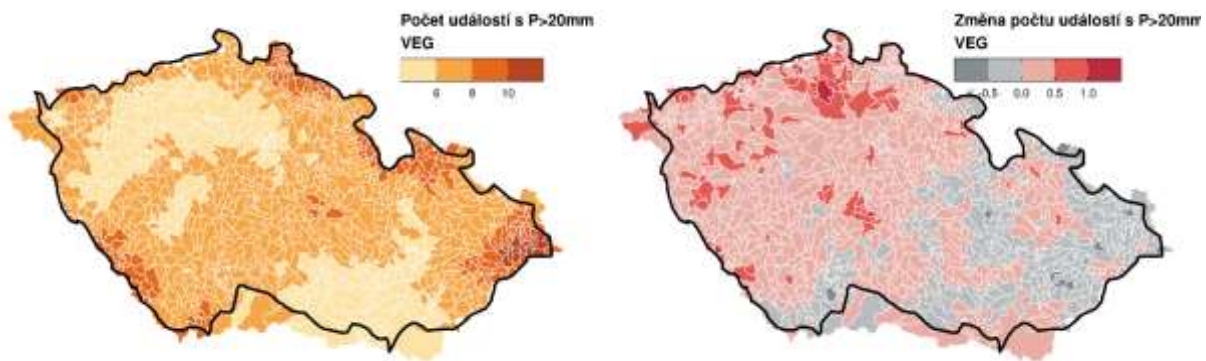
Obr. 2-3: Počet dní během vegetačního období bez srážkové události s celkovým úhrnem > 1 mm (vlevo) a změna tohoto počtu mezi obdobími 1961-1990 a 1991-2020 (vpravo).



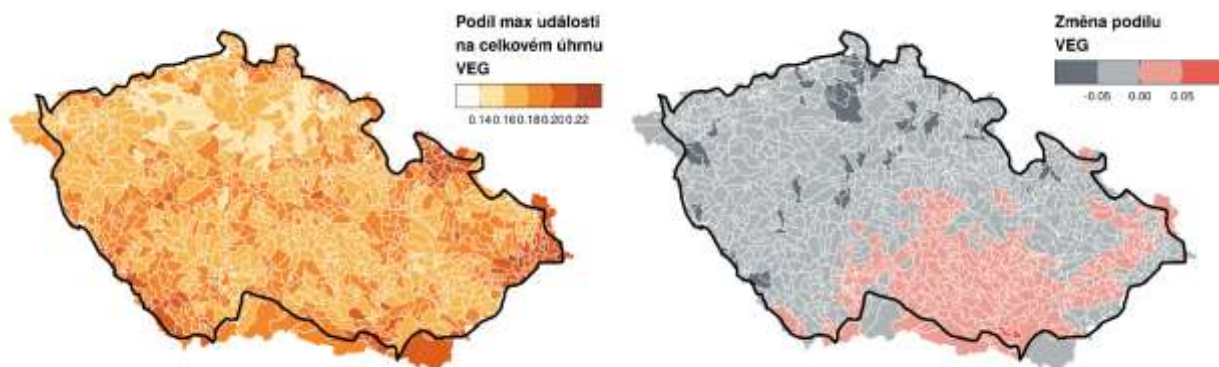
Obr. 2-4: Průměrné nejdelší období (během vegetačního období) bez srážkové události s úhrnem > 1 mm a změna tohoto počtu mezi obdobími 1961-1990 a 1991-2020 (vpravo).



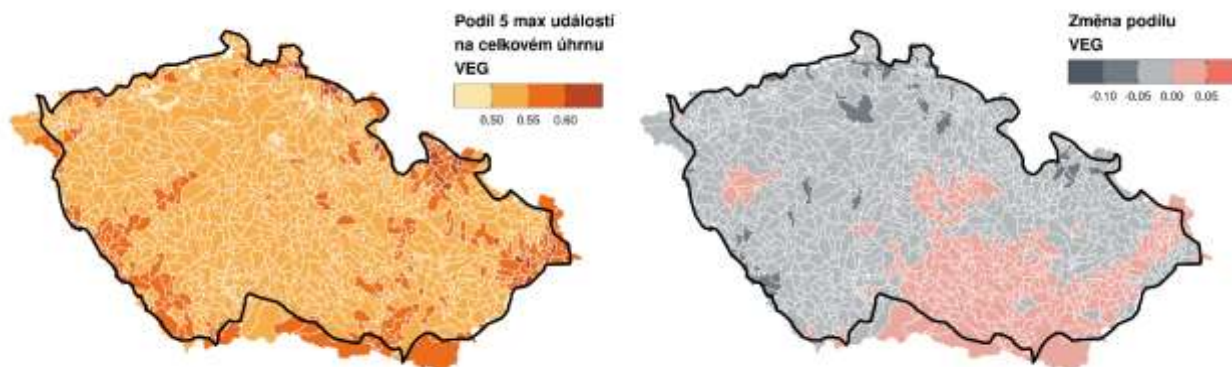
Obr. 2-5: Počet srážkových událostí během vegetačního období s úhrnem > 10 mm (vlevo) a změna tohoto počtu mezi obdobími 1961-1990 a 1991-2020 (vpravo).



Obr. 2-6: Počet srážkových událostí během vegetačního období s úhrnem > 20 mm (vlevo) a změna tohoto počtu mezi obdobími 1961-1990 a 1991-2020 (vpravo).



Obr. 2-7: Příspěvek největší srážkové události do celkového úhrnu za vegetační období (vlevo) a změna tohoto příspěvku mezi obdobími 1961-1990 a 1991-2020 (vpravo).



Obr. 2-8: Příspěvek pěti největších srážkových událostí do celkového úhrnu za vegetační období (vlevo) a změna tohoto příspěvku mezi obdobími 1961-1990 a 1991-2020 (vpravo).

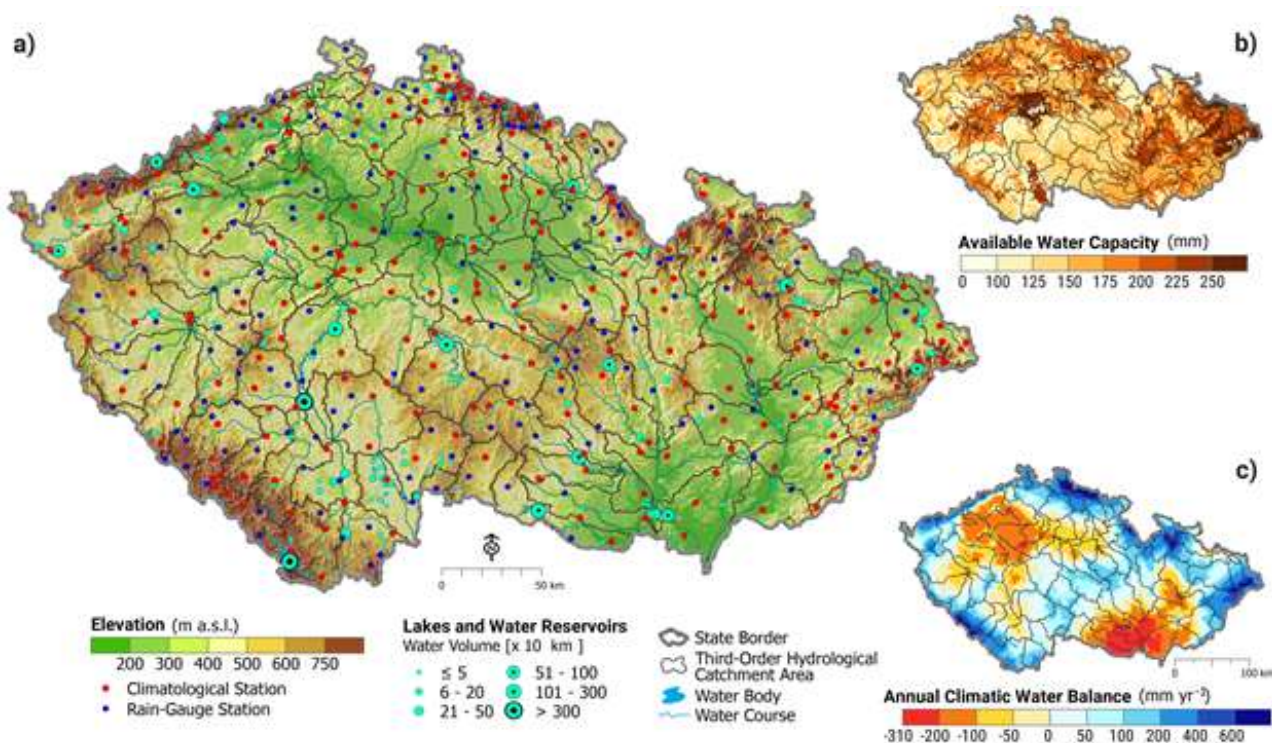
Počet srážkových událostí s úhrnem nad 10 mm a 20 mm je zobrazen na Obr. 2-5 a Obr. 2-6. Obecně lze konstatovat, že oblasti s vyšším počtem těchto událostí se kryjí s oblastmi s nižším počtem suchých dnů a naopak, tedy oblastmi s vyšším počtem těchto událostí jsou zejména části ČR s vyšší nadmořskou výškou – hraniční hory a Vysočina, s maximy v oblasti Beskyd. Změny počtu událostí s těmito úhrny jsou relativně malé (pohybují se v řádu jednotek), nicméně zajímavé je konzistentní zvyšování těchto počtů v Čechách a jejich snižování na Moravě.

Je patrné (Obr. 2-7), že vegetační srážkový úhrn je z velké části tvořen největší událostí (15-25 %), přičemž geograficky nelze konstatovat žádný jasný vzor – což je pravděpodobně do značné míry spojené s převážně konvektivním, lokálním charakterem maximálních událostí. Pět maximálních událostí (Obr. 2-8) již dodá 50-60 % celkového srážkového úhrnu během vegetačního období, přičemž tato hodnota je vyrovnaná v celé ČR. Změny obou podílů se pohybují v rozmezí 0-5 % s růstem tohoto podílu v oblasti jižní Moravy a jižní části Vysočiny. Na zbytku území dochází k poklesu.

Z hlediska možnosti akumulace vod je zřejmé, že jako problematické se budou jevit oblasti povodí Dyje, Polabská nížina, zejména Královéhradecko a Rakovnicko. Na druhé straně, značnou akumulaci lze získat zachycením odtoku z několika maximálních událostí. Nutná tak bude optimalizace velikosti akumulace (a cenových nákladů) vzhledem k potřebě vody (zde indikované délkou bezdeštných období) a množství srážek během událostí.

2.2 Odhad charakteristik ovlivňujících vodní bilanci pro současný stav malých povodí a analýza a charakteristiky dešťových událostí a bezdeštných období

Klimatická data, která byla v projektu využita je kombinace staničních dat sítě ČHMÚ, které pracoviště AVZ zpracovalo do podoby 500 m gridového pole pro všechny základní meteorologické prvky a následně s pomocí modelu vodní bilance SoilClim do podkladů pro nezbytné výpočty evapotranspirace vodní bilance, půdní vlhkosti a vláhové potřeby (Obr. 2-9a). Z pohledu kategorizace území je ilustrativní Obr. 2-9c, který jasně ukazuje oblasti z pohledu klimatologické vodní bilance deficitní, a naopak oblasti s pozitivní vodní bilancí.

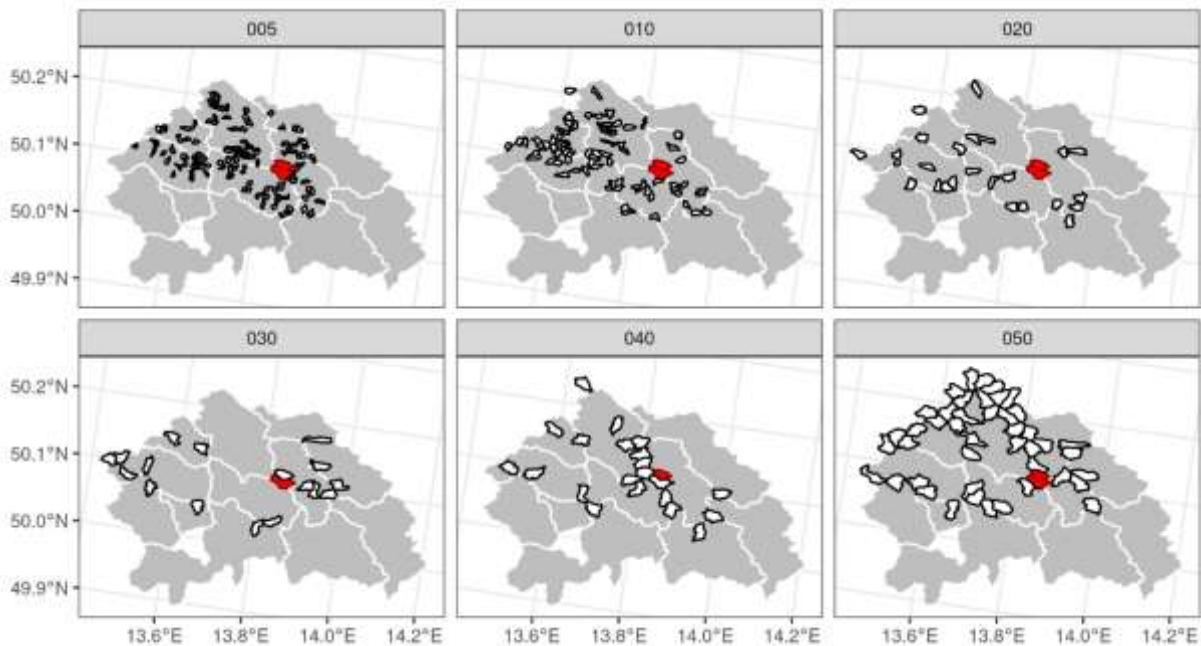


Obr. 2-9. a) Fyzickogeografická mapa ČR se sítí klimatologických a srážkoměrných stanic které jsou využívány řešitelským týmem; b) mapa dostupné vodní kapacity (AWC) v prvním 1 m půdy použitá v modelování SoilClim – zjednodušená verze; c) klimatická vodní bilance vyjádřená jako průměrný rozdíl mezi roční sumou srážek a potenciální evapotranspirace v období 1961–2015.

I když je to uvedeno v rámci kapitoly popisující současný stav tato data jsou využívána také pro určení možných dopadů budoucích klimatických scénářů, tato aktivita tak spadá i do kapitoly 3.3.

Z hlediska optimalizace závlahového režimu v konkrétních lokalitách je klíčové mít k dispozici údaje o hydroklimatickém režimu dané lokality, a to ať už z hlediska dostupných zdrojů, tak z hlediska závlahových potřeb. Cílem této aktivity je zjistit, nakolik mohou být údaje dostupné v měřítku ČR využitelné pro odhad základních parametrů hydroklimatických poměrů v měřítku malých povodí. Primárním účelem je získání odhadu hydrologické bilance, obecně v jakémkoliv profilu.

V první fázi řešení využíváme pilotních lokalit pro ověření metodických postupů, následně bude proveden odhad pro celou republiku. Vybrána byla povodí o velikosti 0,5-5 km². Vrstva těchto povodí byla proložena vrstvou zájmových lokalit a útvary povrchových vod, pro které jsou dostupné odhady hydrologické bilance v rámci systému HAMR (Obr. 2-10).



Obr. 2-10: Ukázka výběru povodí pro zájmové území Amálie (červeně). Černě ohraničená jsou malá povodí ve velikostních třídách 0,5 až 5 km², útvary povrchových vod v okolí zájmové lokality Amálie jsou vyplněny šedou barvou.

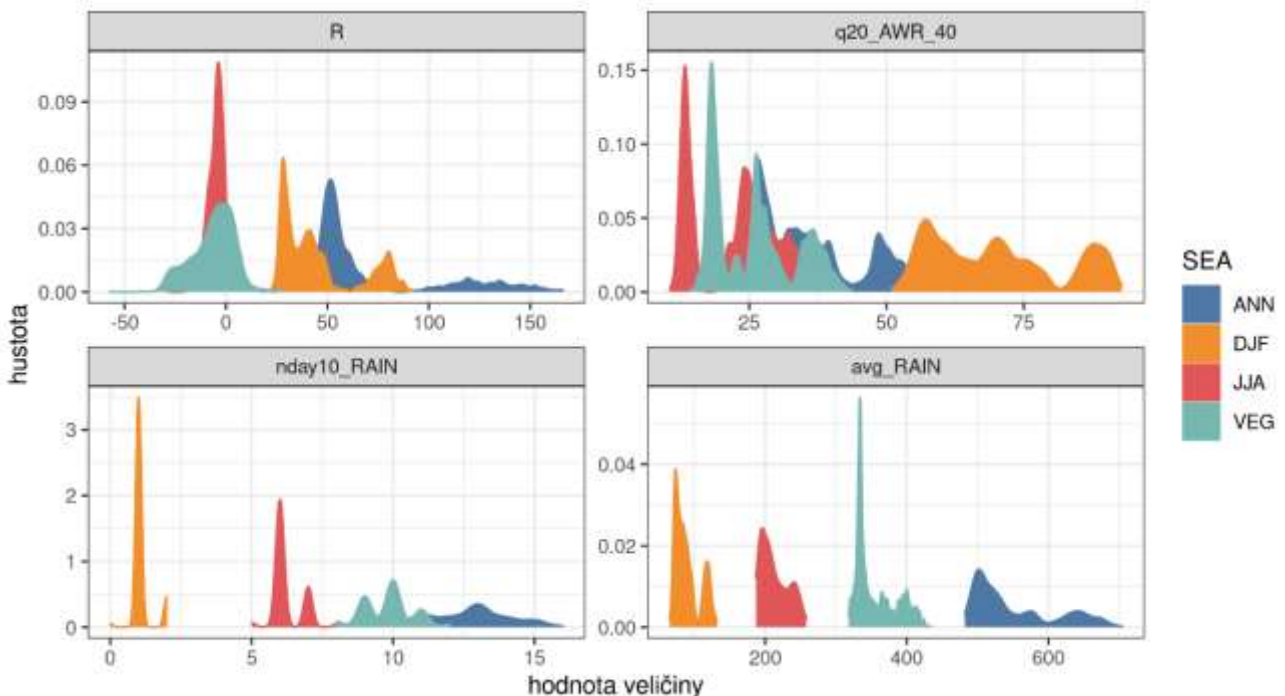
Hydroklimatické údaje pro malá povodí byly extrahovány ze vstupní datové sady interpolovaných pozorování připravené pro model SoilClim a ze samotné simulace provedené modelem. Model je provozován pro ČR v rozlišení 500 m x 500 m, pro účely systému HAMR jsou vstupní i výstupní veličiny agregovány na útvary povrchových vod, pro které je vypočtena hydrologická bilance pro aktuální stav a výhled na několik týdnů dopředu. Podle vrstvy rozvodnic vybraných povodí byly extrahovány denní časové řady a z nich vypočteny charakteristiky vybraných hydroklimatických veličin (Tabulka 2-1). Ukázka rozložení vybraných charakteristik v malých povodích je na Obr. 2-11 a Obr. 2-12.

Na základě uvedených veličin bude dále prověřena možnost odhadu akumulčního potenciálu povodí prostřednictvím fyzikálně či statisticky založeného odhadu, který bude využívat extrahované veličiny, zejména celkový odtok, případně vybrané charakteristiky srážek. Tyto extrahované veličiny mohou budou dále využity pro klasifikaci povodí na základě hydroklimatických podmínek.

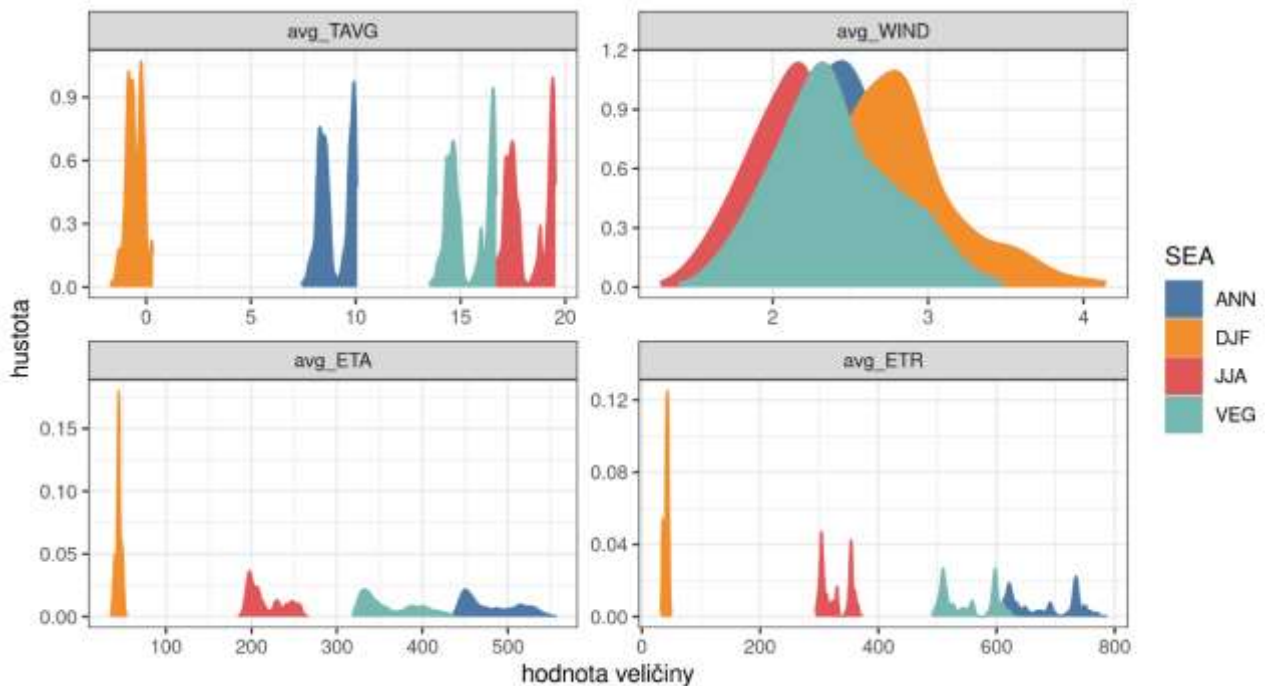
Tabulka 2-1: Extrahované hydroklimatické charakteristiky.

	zdroj	
SEA		Období - JJA (červen-srpen), DJF (prosinec-únor), VEG (duben-září), ANN (rok)
avg_RAIN	interpolovaná pozorování	průměrná suma srážek [mm/období]
nday_RAIN		počet dní se srážkami za období [-]
nday10_RAIN		počet dní se srážkami > 10 mm za období [-]
max_RAIN		maximální denní srážka [mm]
q90_RAIN		90 % kvantil denních srážek [mm]
q95_RAIN		95 % kvantil denních srážek [mm]
avg_TAVG		průměrná denní teplota [°C]

max_TAVG		maximální denní teplota [°C]
min_TAVG		minimální denní teplota [°C]
max_TMAX		maximum maximální denní teploty [°C]
min_TMIN		minimum minimální denní teploty [°C]
avg_WIND		průměrná rychlost větru [m/s]
max_WIND		maximální rychlost větru [m/s]
avg_SRAD		průměrná denní radiace [W/m]
max_SRAD		maximální denní radiace [W/m]
min_SRAD		minimální denní radiace [W/m]
avg_ETR	výpočet	průměrná potenciální evapotranspirace [mm/období]
avg_ETA		průměrná aktuální evapotranspirace [mm/období]
avg_AWR_40	simulace modelu	průměrná zásoba vody v půdě ve vrstvě 0-40 cm [mm]
min_AWR_40		minimální zásoba vody v půdě ve vrstvě 0-40 cm [mm]
q05_AWR_40		5% kvantil zásoby vody v půdě ve vrstvě 0-40 cm [mm]
q20_AWR_40		20% kvantil zásoby vody v půdě ve vrstvě 0-40 cm [mm]
avg_AWR_100		průměrná zásoba vody v půdě ve vrstvě 0-100 cm [mm]
min_AWR_100		minimální zásoba vody v půdě ve vrstvě 0-100 cm [mm]
q05_AWR_100		5% kvantil zásoby vody v půdě ve vrstvě 0-100 cm [mm]
q20_AWR_100		20% kvantil zásoby vody v půdě ve vrstvě 0-100 cm [mm]
R	odhad	Odhad vláhové bilance (avg_RAIN-avg_ETA) [mm/období]



Obr. 2-11: Hustota vláhové bilance (R [mm]), počtu dní se srážkou na 10 mm (nday10_RAIN [-]), dvacetiprocentní kvantil půdní vlhkosti do hloubky 40 cm (q20_AWR_40 [mm]) a průměrné sumy srážek (avg_RAIN [mm/období]) v malých povodích pro celý rok (ANN), zimu (DJF), léto (JJA) a vegetační období (VEG).

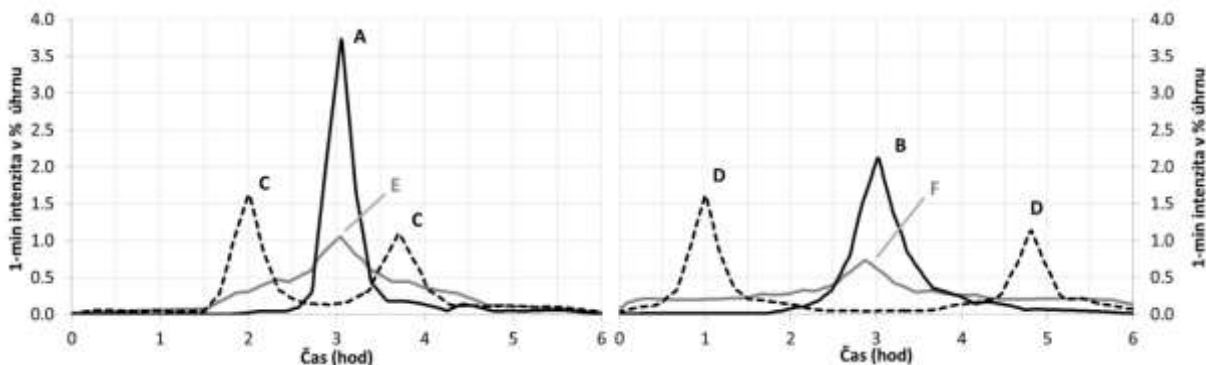


Obr. 2-12: Odhad hustoty průměrné teploty (avg_TAVG [°C]), aktuální evapotranspirace (avg_ETA [mm/období]), průměrné rychlosti větru (avg_WIND [m/s]) a průměrné potenciální evapotranspirace (avg_ETR [mm/období]) pro celý rok (ANN), zimu (DJF), léto (JJA) a vegetační období (VEG).

2.3 Rozdělení území ČR z hlediska převažujících průběhů tvarů návrhových srážek o krátké době trvání

Průběh srážky má zásadní dopad na hydrologickou odezvu a tím i potenciál zadržení vody v krajině, její přirozenou retenci anebo naopak na potenciál rizika rychlého odtoku. Syntetické hyetogramy návrhových srážek a jejich pravděpodobnost výskytu s ohledem na dobu opakování byly odvozeny M. Müllerem a kol. (2018), tato data vztažená na povodí IV. Řádu byla využita pro zde uvedené rozdělení ČR podle převažujících tvarů. Odvození těchto tvarů je také uvedeno na stránkách rain.fsv.cvut.cz, který je provozován členy řešitelského kolektivu z ČVUT. Základní charakteristiky jdou pro ucelenost popisu uvedeny i zde.

Šest syntetických průběhů šestihodinových srážek pro území ČR je zobrazeno na obrázku 1. Tabeleárně jsou průběhy pětiminutových intenzit dostupné přímo v metodice (Kavka a kol., 2018). Jednotlivé hyetogramy jsou označeny písmeny A až F se sestupně klesající mírou koncentrace srážky v čase. Čtveřice průběhů A, B, E a F má jednoduchý průběh, přičemž tvar A reprezentuje epizody nejvíce koncentrované, a naopak tvar F nejméně koncentrované epizody. Tvary C a D se vyznačují dvěma vrcholy s různě dlouhým poklesem mezi nimi. Charakteristiky typických průběhů shrnuje Tabulka 2-2.



Obr. 2-13: Šest syntetických průběhů šestihodinových srážek pro území ČR.

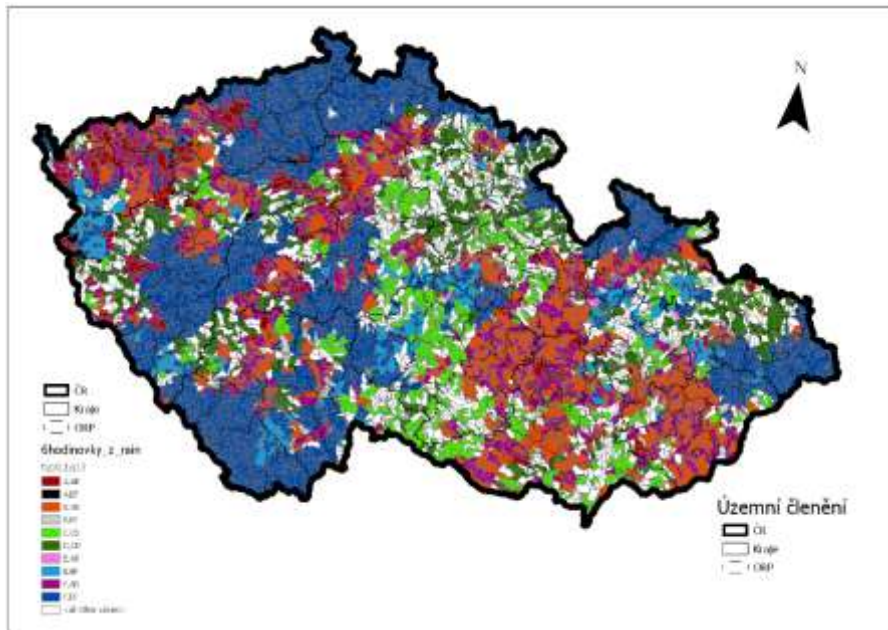
Tabulka 2-2: Charakteristika typických průběhů srážky pro hyetogramy typu A–F (Muller, 2018).

Typ průběhu	Charakteristika průběhu srážky
A	Alespoň 95 % úhrnu spadlo za 30 minut nebo méně.
B	Alespoň 95 % úhrnu spadlo za cca 1 hodinu.
C	Alespoň 95 % úhrnu spadlo za cca 3 hodiny, během nichž se vyskytly dvě dílčí epizody oddělené přestávkou trvající alespoň 30 minut; významnější dílčí epizoda trvala 30 minut nebo méně.
D	Srážka byla rozdělena do dvou dílčích epizod s přestávkou více než 1,5 hodiny.
E	Alespoň 95 % úhrnu spadlo za cca 3 hodiny, během nichž přšelo rovnoměrně.
F	Pršelo prakticky rovnoměrně 6 hodin.

Převažující průběhy srážek A–F byly pro následující analýzu agregovány do tří dvojic s podobnou charakteristikou deště. Koncentrované srážky (A a B), které zahrnují typy průběhů srážek, při nichž 95 % šestihodinového úhrnu spadne nejvýše během 1 hodiny, dvouvrcholové srážky (C a D), které zahrnují středně intenzivní srážky se dvěma vrcholy a rovnoměrné srážky (E a F), zahrnující spíše rovnoměrné déle trvající srážky s nižší intenzitou. Pro tyto dvojice byla spočtena pravděpodobnost výskytu jako součet pravděpodobnosti výskytu příslušných typů v rámci jednotlivých dob opakování (napříč dobami opakování se pravděpodobnost výskytu jednotlivých typů liší).

Povodí IV. řádu byla následně hodnocena pro dobu opakování srážky 100 let nejen podle výskytu absolutně nejčetnějšího průběhu srážky, ale i podle převažujícího charakteru krátkodobých dešťů (AB, CD, EF). Nastávají totiž případy, kdy je například absolutně nejčetnějším průběhem nejkonzentrovanější srážka typu A, ale v součtu převažují spíše rovnoměrné srážky EF. Povodí byla kategorizována do tříd pomocí indexu ve tvaru X_{YY}, kde X znamená výskyt nejčetnějšího průběhu a YY převažující charakter

deště. Kategorizace povodí IV. řádu podle tohoto indexu je zobrazena na Obr. 2-14: Kategorizace povodí IV. řádu podle indexu X_YY. Modré odstíny charakterizují výskyt rovnoměrných srážek, červené odstíny koncentrovaných srážek, zelené dvouvrcholových. Fialový odstín pak kombinaci převažující rovnoměrné srážky v kombinaci s převažujícím koncentrovaným charakterem deště. (Obr. 2-14).

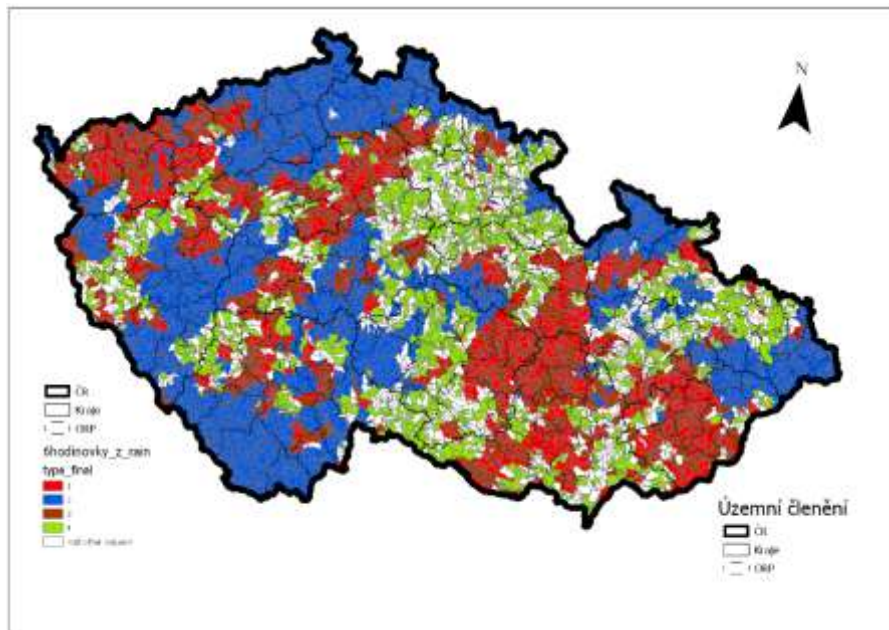


Obr. 2-14: Kategorizace povodí IV. řádu podle indexu X_YY. Modré odstíny charakterizují výskyt rovnoměrných srážek, červené odstíny koncentrovaných srážek, zelené dvouvrcholových. Fialový odstín pak kombinaci převažující rovnoměrné srážky v kombinaci s převažujícím koncentrovaným charakterem deště.

Z geografického hlediska jsou patrné oblasti s převažujícím výskytem spíše koncentrovaných srážek (jižní část Moravy, Karlovarsko, okolí středního a dolního úseku Vltavy). Rovnoměrné srážky jsou pak v horských oblastech včetně Brd a České kanady. Vysočina a Ostravsko jsou pak spíše srážky se dvěma vrcholy nebo bez dominantního tvaru srážek. Území ČR je tak možné rozdělit do pěti oblastí z hlediska převládajícího charakteru srážek.

Tabulka 2-3: Popis skupin převažujícího charakteru srážek.

Skupina č.	Popis
1	Dominují koncentrované srážky.
2	Dominují rovnoměrné srážky.
3	Převažující koncentrované srážky s častým výskytem rovnoměrných srážek.
4	Oblasti srážek s více vrcholy.
5	Ostatní.



Obr. 2-15: Vymezené oblasti převažujícího charakteru deště s úhrnem doby opakování 100 let.

Výše uvedené poznatky byly zpracovány na základní jednotce povodí IV řádu, tak aby byly zpracovány celoplošně ve větším detailu, než jsou hranice UPOV. Princip řešení bude využit v následujícím období pro kategorii malých zdrojových povodí v rámci každého UPOV.

2.4 Vláhová potřeba rostlin

Základním materiálem pro navrhování a provoz závlahových soustav jak ve velkém, tak i v malém měřítku je celosvětově uznávaná metodika FAO 56. Dostupná z (<https://www.fao.org>). Metodika se soustředí na výpočet evapotranspirace v denním kroku pomocí vztahu Penman-Montieth a uvádí celou řadu postupů, jak doplnit chybějící údaje do výpočtu. Vlastní závlahové množství konkrétní plodiny je z hodnoty evapotranspirace vypočteno jejím násobením plodinovým koeficientem. Zásadní nevýhodou metodiky FAO 56 pro její použití v podmínkách ČR je uvádění hodnot zjištěných ve zcela odlišných podmínkách. Hodnoty byly nejčastěji stanoveny pro regiony USA – Kalifornie, Idaho, případně Středozeří, Egypt, či zcela nekonkrétně jako Tropický region. Je tedy nutné používat výsledky s určitou rezervou. Na tuto metodiku navazují další díla z produkce FAO, například FAO 40.

Tabulka 2-4: Plodinový koeficient rostlin a hodnoty pro jednotlivé růstové fáze, dále maximální výška plodiny z metodiky FAO 56.

Crop	K_{cini}	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$	Maximum Crop Height (h) (m)
a. Small Vegetables	0.7	1.05	0.95	
Broccoli		1.05	0.95	0.3
Brussel Sprouts		1.05	0.95	0.4
Cabbage		1.05	0.95	0.4

Shrnujícím díle dosavadního stavu techniky závlah je monografie Navrhování hydromelioračních staveb (Kulhavý, 2008). Tato kniha se věnuje jak odvodnění, tak závlaze. Jsou zde shrnuty základní metody pro

navrhování závlahových staveb, technické provedení a ukázky realizovaných staveb velkoplošné i maloplošné závlahy.

Zavlažovanie poľných plodín, zeleniny a ovocných sádov (Rehák, 2015) spojuje do jedné knihy informace z metodiky FAO 56 a metody používané k navrhování závlahových staveb na území bývalého Československa. Datové sady v této monografii jsou očištěny o hodnoty pro regiony nacházející se na území ČR, hodnoty pro regiony nacházející se na území SR, jsou přebrány z historické literatury. Kniha dále řeší technické provedení závlahových staveb, čerpacích stanic, kanálů, trubních řadů, hydrantů. Je zde probrán i závlahový detail, přenosné potrubí, pásové zavlažovače a další technika.

Plodina	Podunajská nížina		Východoslovenská nížina	
	Vegetačné obdobie	V_c [m ³ .ha ⁻¹]	Vegetačné obdobie	V_c [m ³ .ha ⁻¹]
pšenica ozimná, raž	1. 10. – 10. 11. 1. 4. – 20. 4.	2 400	1. 10. – 10. 11. 1. 4. – 10. 7.	2 400
jačmeň, pšenica	20. 3. – 10. 7.	2 000	1. 4. – 10. 7.	2 000
ovos	20. 3. – 20. 7.	2 250	1. 4. – 20. 7.	2 250
kukurica – zrnó	20. 4. – 30. 9.	3 400	1. 5. – 30. 9.	3 200
strukoviny – jedlé	20. 3. – 20. 7.	2 000	1. 4. – 20. 7.	2 000

Obr. 2-16: Ukázka tabulky hodnoty celkové vláhové potřeby z knihy *Zavlažovanie poľných plodín, zeleniny a ovocných sádov* (Rehák, 2015).

ČSN 75 0434 „Meliorace – Potřeba vody pro doplňkovou závlahu“ z roku 2016 shrnuje metody stanovení závlahového množství pomocí celkové potřeby závlahové vody, dále dle bilanční rovnice a retrospektivním bilancováním. V normě jsou také uvedeny tabulky s koeficienty biologických křivek vláhové potřeby rostlin a tabulky pro metodu Ideálních srážek, pro výpočet závlahových dávek Klattovou metodou po Hemerkově úpravě. Hodnoty uvedené v normě byly stanoveny pro podmínky ČR případně střední Evropy. Zde je problémem aktuálnost dat. Hodnoty jsou převzaty z předešlých monografií a řada z nich se poprvé objevuje již v předválečné literatuře.

Tabulka 2-5: Celkové vláhové potřeby V_c – směrné hodnoty (poľní plodiny z normy ČSN 75 0434).

Název plodiny	Polabí		Jižní Morava	
	Vegetační období	V_c m ³ /ha	Vegetační období	V_c m ³ /ha
ozimá pšenice a žito	1.10. až 10.11 1.4. až 20.7.	2 300	1.10. až 10.11. 1.4. až 20.7.	2 400
jarní ječmen a pšenice	1.4. až 20.7.	2 000	20.3. až 10.7.	2 000
ovos	1.4. až 31.7.	2 250	20.3. až 20.7.	2 250

Otevření trhu se závlahovými systémy po roce 1990 vedlo k přesunu iniciativy z vědeckých institucí do soukromých firem dodávajících ucelené závlahové systémy.

V dnešní době jsou tak důležitým zdrojem informací o závlahových dávkách materiály jednotlivých specializovaných výrobců těchto systémů (Bauer, Netafim, Rainbird). Tito výrobci dodávají systémy všech typů, od automatizovaných závlahových systémů pro parky a golfové hřiště, po zemědělské aplikace. Zároveň spolupracují s projekčními kancelářemi, kterým poskytují své know-how.

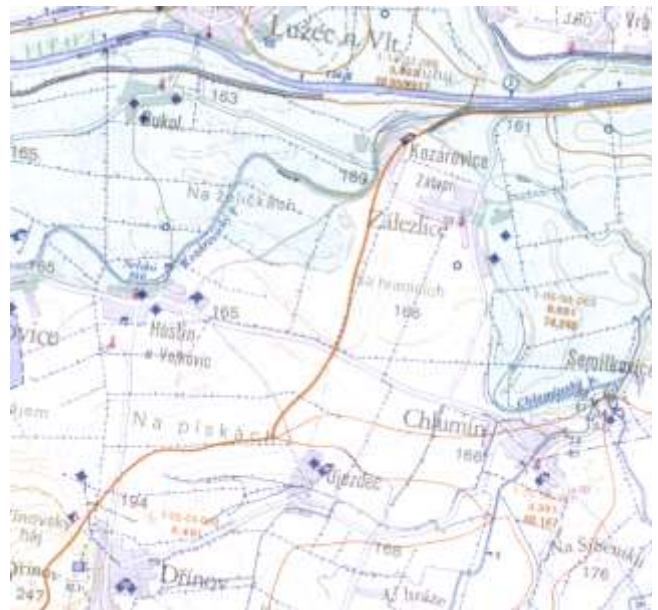
Odhady budoucích závlahových potřeb budou muset být pro výsledné modelové klimatické scénáře zafixovány. Možné dopady rozdílů v závlahových dávkách pro všechny plodiny nebudou v projektu z hlediska budoucích scénářů detailně řešeny. Nic méně je zřejmé, že je třeba stanovovat na jedné straně budoucí vláhové potřeby rostlin, ale sledovat ve scénářích změnu celého hydroklimatického systému, které jsou dány klimatickou změnou.

2.5 Lokalizace historických závlahových soustav

Historické závlahové soustavy, byly po roce 1989 v masové míře opouštěny a likvidovány. Pozemky pod závlahou jsou částečně dostupné na meliorace.vumop.cz. Zdroje těchto dat jsou data ZVHS, která byla před několika lety zrušena a sloučena pod správu jednotlivých povodí. Z tohoto zdroje převzatá data na meliorace.vumop.cz obsahují značně nekompletní data o samotných soustavách, především čerpacích stanicích, hlavnících atp.



a.



b.

Obr. 2-17: a – stav závlahových soustav meliorace.vumop.cz, b – VH mapa 1:50 000 (vpravo).

Přitom z hlediska budování infrastruktury závlahových soustav jsou důležitá odběrná místa, čerpací stanice a páteřní rozvody. Spolehlivým zdrojem těchto závlahových prvků zůstávají Základní vodohospodářské mapy v měřítku 1:50 000, které jsou sice digitalizované, ale prvky nejsou vektorizované. V rámci projektu jsou testovány metody využití strojového učení pro identifikaci těchto prvků z digitalizovaných map podle geometrie prvku (studny, čerpací stanice) nebo geometrie značky linie hlavníku.

- Hledané prvky – liniové

-----> závlahové trubní řady

Hledaným prvkem je modrá čárkovaná čára, jejíž každá 4 čárka je doplněna výstupkem na stejné straně. Ten je většinou směřován na sever (nahoru) či na východ (doprava), nicméně vyskytují se i další směry. V přímé trati se směr výstupků nemění

- Konfliktní prvky

V mapách existuje několik podobných prvků, které by mohly být se závlahovými řady zaměněny a kterým je třeba se při identifikaci vyhnout.

Tabulka 2-6: Přehled prvků závlahových soustav

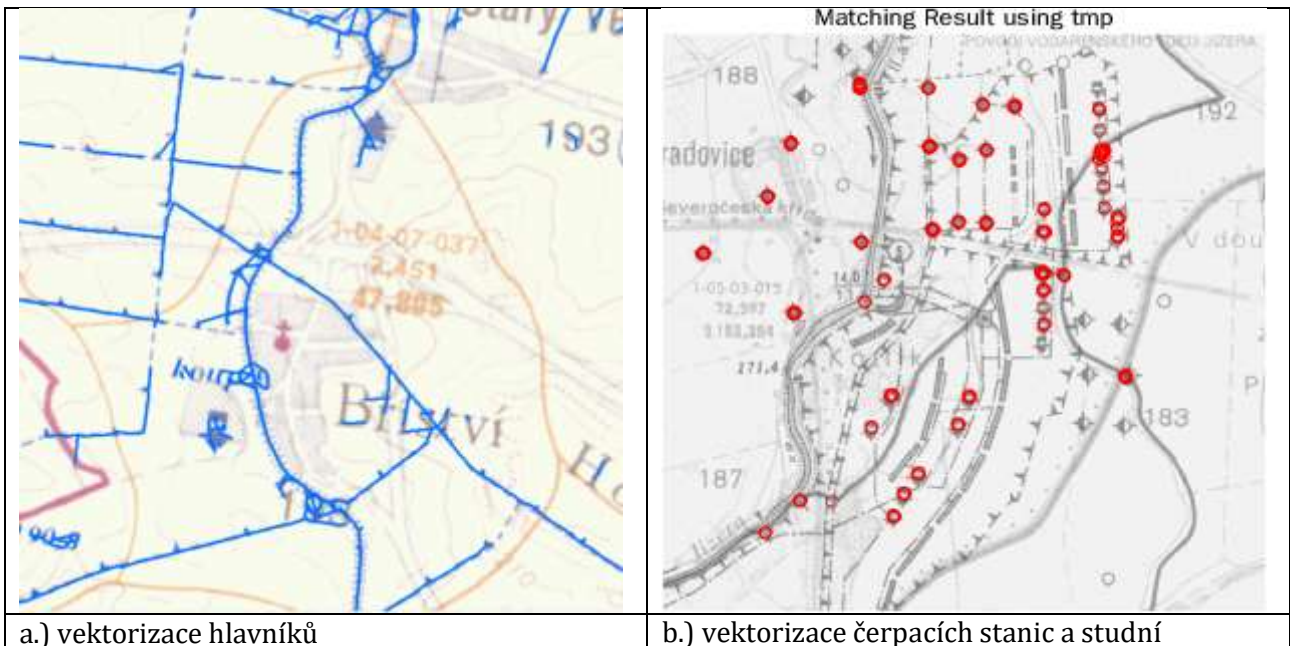
Název	Popis	Obrázek
Náhony opuštěné	Výstupek na každé druhé čárce, směr výstupku střídán	
Zakryté náhony	Tečkovaná, směr výstupků střídán	
Tunely pro přívod a odtok vody	Dvojitá čárkovaná, výstupky střídány na jednotlivých čarách	
Zakryté meliorační kanály	Tečkovaná, směr výstupků stejný	
Kanalizační stoky	Směr výstupků střídán	

Prvním pokusem byla automatická vektorizace v ArcGIS, která má omezené možnosti a nelze provádět filtrace nepotřebných prvků. Toolbar ArcScan který je k tomu určený, má velice omezené možnosti nastavení a výsledek by vyžadoval mnoho ručních oprav.

V současné době jsou testovány následující algoritmy:

- Pattern matching – pro vyhledání bodových prvků (čerpací stanice),
- OCR (Optical Character Recognition) – pro vymazání popisu a ke snadnější detekci liniových prvků,
- hranová detekce – k identifikaci liniových prvků.

Pro zpracování je využíváno prostředí Matlabu nad tréninkovým výřezem mapy ze zájmové lokality Vltavské závlahové soustavy. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny aktuální výsledky.



a.) vektorizace hlavníků b.) vektorizace čerpacích stanic a studní

Obr. 2-18 aktuální výsledky vektorizace objektů závlahových soustav (a – hlavníky, b – čerpací stanice a studny).

Z levého obrázku je patrná shoda identifikovaných liniových prvků. Vodní toky budou filtrovány později a nepředstavují problém. Algoritmus zatím identifikuje například části textů. V případě bodových prvků jsou prozatím identifikovány i některé objekty navíc. Jedná se o průběžné výsledky a v následujícím období bude dále optimalizován algoritmus identifikace.

Veškerá příprava dat a segmentace map probíhala v prostředí programu ArcGIS, práce s klasifikovaným rastrem probíhá tamtéž. Trénink modelu a jeho spuštění nad klasifikovanými daty probíhá v PyScripteru.

Jednotlivé mapové listy nepoužívané pro trénování modelu jsou pak klasifikovány tímto trénovaným modelem. Načítání segmentů pro klasifikaci je řízeno CSV souborem, který obsahuje název segmentu, pozici segmentu na mapovém listu a zda je určen pro trénování či nikoliv. K tomuto CSV souboru se pak přidá hodnota pravděpodobnosti, se kterou jsou segmenty klasifikovány jako závlaha nebo ostatní plocha. Tréninkové segmenty jsou vynechány a je jim přiřazena hodnota no_data. Soubor CSV klasifikovaného mapového listu se načte zpět do prostředí GIS pomocí skriptu Python. Skript načte soubor CSV a vytvoří odpovídající klasifikovaný rastr.

Klasifikované rastry byly zprůměrovány a výsledný rastr byl převeden na polygony. Polygonová vrstva je následně prolnta s vrstvou LPIS zobrazující využívané zemědělské pozemky. Pro takto vzniklou vrstvu zavlažovaných pozemků byla vypočítána statistika ploch odpovídajících jednotlivým zdrojovým vodním tokům a správním krajům. Dále byla vypočtena statistika půdních typů na základě spojených půdních map.

2.5.1 Digitalizované Základní vodohospodářské mapy

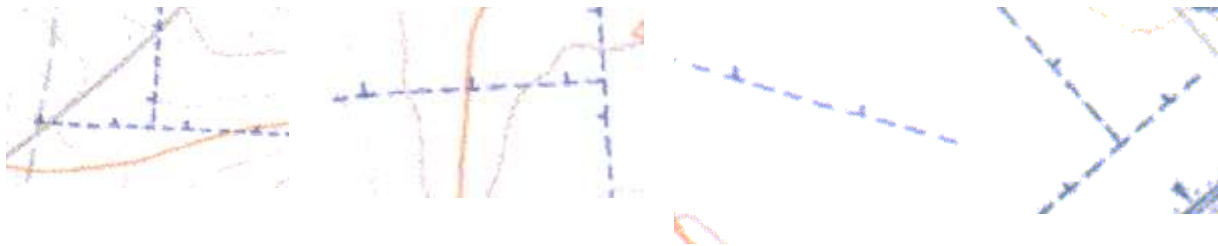
Základní vodohospodářskou mapu ČR 1:50 000 (dále jen ZVM) vydával Český úřad zeměměřický a katastrální jako tematické státní mapové dílo pro Ministerstvo životního prostředí ČR. Gestorem za aktualizaci tematického obsahu byl Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.M. Mapu zpracovával a tiskl

Zeměměřičský úřad na papíru formátu 58x47 cm v kladu listů základních map středních měřítek. Každoročně se aktualizovalo kolem 20 mapových listů.

Mapa byla dotiskem tematického obsahu do základní mapy ČR 1:50 000. Zobrazuje síť vodních toků, rozvodnic a hydrologického členění povodí, objekty státních pozorovacích sítí, stavby a opatření na využití povrchových a podzemních vod, ochranná pásma vodních objektů, objekty a zařízení hlavních uživatelů vody (např. vodovodů a kanalizací, využití vodní energie, vodní dopravy, průmyslu) a další informace.

Skeny listů ZVM ve formátu tif byly importovány do ArcGIS. Jedná se o rastry s velikostí pixelu 3,18 m. Souřadnicový systém rastrů je S-JTSK Křovák. Rastr je 8 jednopásmový. Rozsah hodnot v jednom pixelu tak může být od 0 do 255.

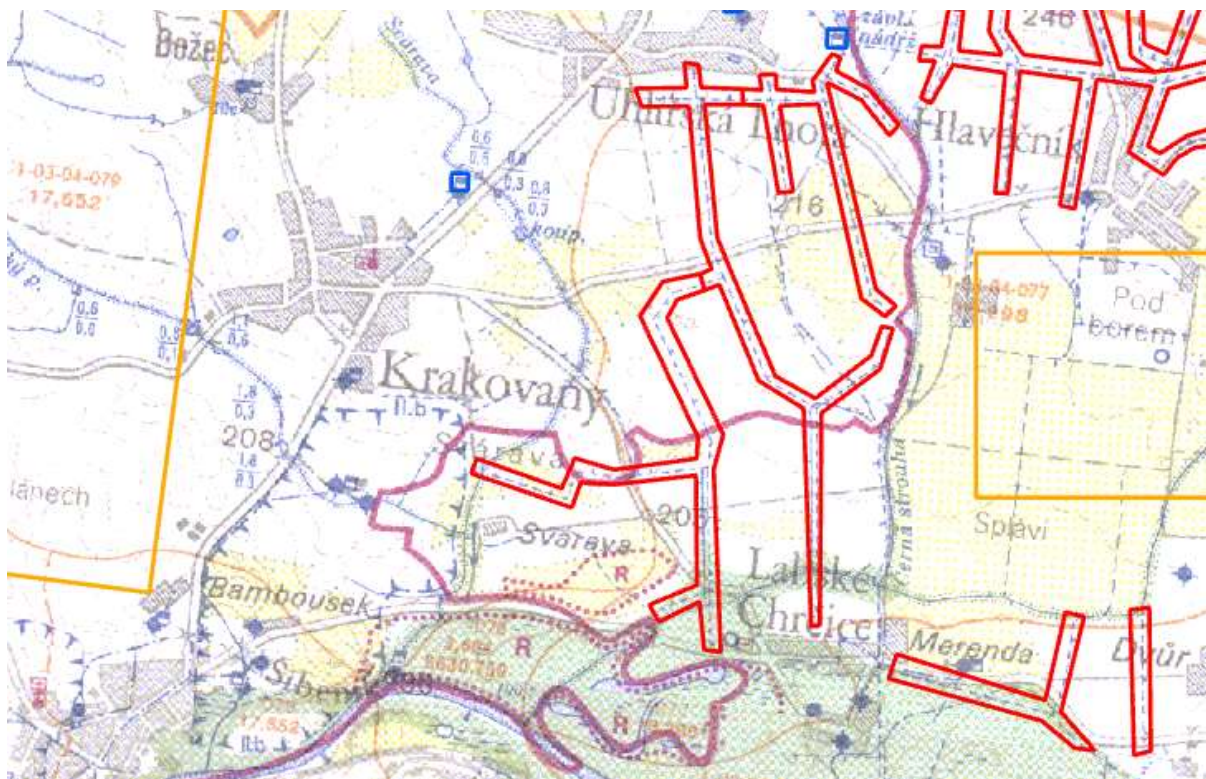
Pro účely reanalýzy byly nejdůležitější linie symbolizující podzemní závlahová potrubí a symboly závlahových čerpacích stanic. Tyto linie se skládají z modré čárkované čáry, přičemž každá 3 až 5 čára obsahuje výstupek. Směr výstupků se u závlahových potrubí nestřídá, nicméně jednotlivé čáry mají v podstatě libovolný zeměpisný směr výstupků, vždy však stále stejný po linii. Vzhledem k manuální tvorbě těchto map, se vyskytují různé délky mezer a čárek, různé šířky a mění se mírně i odstín použité modré barvy. Čáry na jednom mapovém listě jsou si však vždy velmi podobné.



Obr. 2-19: Různá provedení čáry symbolizující závlahové potrubí

2.5.2 Tvorba trénovacích polygonů

Nad georeferencovanými listy ZVM byly manuálně vytvořeny trénovací polygony modelu. Byly vytvářeny tři trénovací kategorie. Závlahy, ostatní plocha, čerpací stanice. Polygon závlahy kopíroval čáru symbolizující závlahové trubní řady s mírným odstupem, tvorba těchto polygonů byla časově nejnáročnější. Polygony třídy ostatní byly většinou tvořeny jako obdélníky v oblastech, ve kterých nebyla vizuálně zjištěna čára závlahy, polygony čerpacích stanic ohraničovaly symbol čerpací stanice.

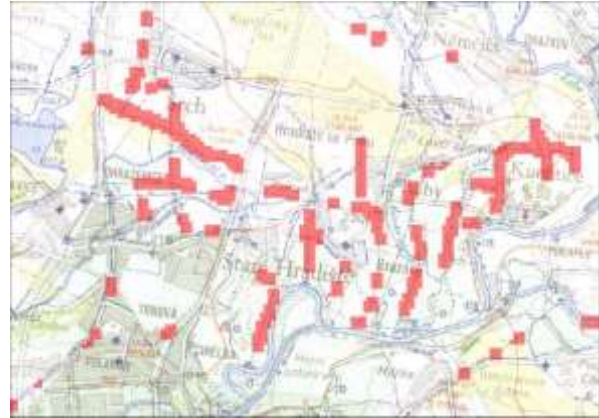


Obr. 2-20: Trénovací polygony na ZVM, červená – závlahy, oranžová – ostatní plochy, modrá – čerpací stanice

2.5.3 Filtrace

Filtrace byla provedena pomocí Python skriptu. Tento skript nejprve vytvořil nový rastr s hodnotou 0. Následně byl klasifikovaný rastr závlah procházen po jednotlivých pixelech a pixely či jejich nejbližší okolí (okno 3x3 pixelu) analyzováno. V případě splnění podmínek pro považování pixelu za pixel obsahující závlahy byla do nového rastru zapsána hodnota 1.

Prvním krokem filtrace bylo nulování pixelů s hodnotou menší 0,5. Dále byly nulovány osamocené pixely. Měl-li pixel hodnotu větší než 0,5 a byl-li zároveň v sousedství pixelu s hodnotou také větší než 0,5 byla do výsledného rastru zapsána hodnota 1. Pro pixely s hodnotou větší než 0,75 a jejich bezprostřední okolí byla do výsledného rastru zapsána hodnota 1.



Obr. 2-21: Klasifikovaná vrstva před a po filtraci

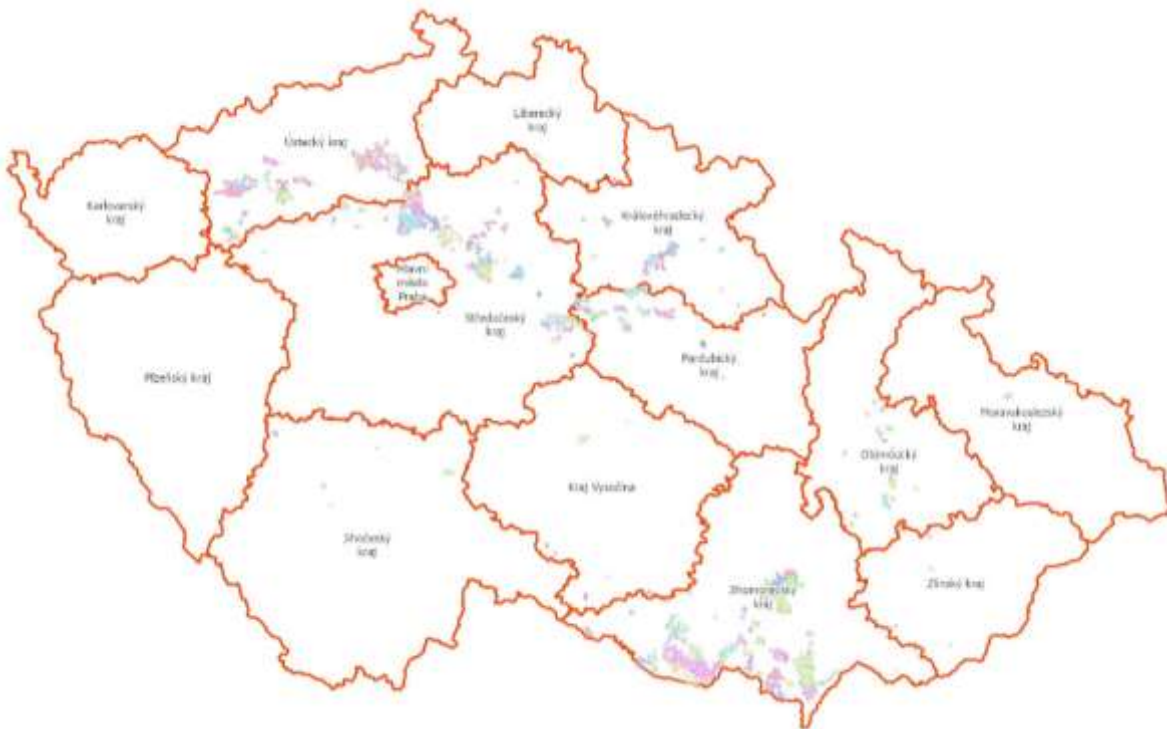
2.5.4 Manuální čištění

Vzniklé polygony byly označeny katastrem obce, na kterém se nacházely a následně byly podle označení katastru spojeny do multipartových polygonů. Následovalo manuální procházení této vrstvy od nejmenších polygonů dle velikosti a mazání v případě, že polygon neoznačil správně linie závlahového potrubí.

Zde se projevil problém zaměnitelnosti závlahového a odpadního potrubí. Odpadní potrubí je symbolizováno stejným typem linie, pouze každý zhruba 5 dílec má opačnou orientaci. Dále byl špatně označen přivaděč pitné vody z ÚV Želivka, používající stejnou symbologii pouze zdvojenou.

2.5.5 Pozemky LPIS s historickou závlahou

Polygonová vrstva je následně prolnta s vrstvou LPIS zobrazující využívané zemědělské pozemky k roku 2021. Vzniká tak polygonová vrstva zemědělských pozemků, na nichž byla závlaha.



Obr. 2-22: Poloha závlahových soustav v ČR

2.5.6 Statistiky dle zdrojů vody

Pro každou soustavu určena primární čerpací stanice a zdroj vody. Vznikla tak bodová vrstva čerpacích stanic. Následným přiřazením názvu toku v nejbližším okolí této stanice byly určeny primární zdrojové

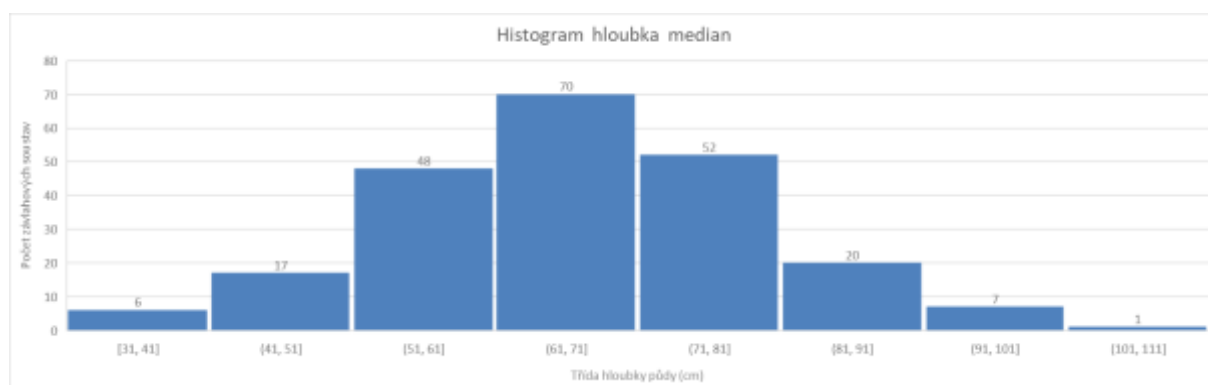
toky všech identifikovaných závlahových soustav. Plochu zavlažovaných pozemků podle zdroje vody ukazuje následující obrázek.



Obr. 2-23: Prvních 20 toků s největší zavlažovanou plochou

2.5.7 Závlahové soustavy podle půdních vlastností

Dále byla vypočtena statistika pozemků LPIS podle hloubky půd na základě spojitě mapy fyzikálních a hydrologických charakteristik na území celé ČR. Využity byly výsledky projektu TJ02000234 – Fyzikální a hydrologické charakteristiky půd ČR (rain.fsv.cvut.cz). Hloubka půdy je důležitý ukazatel možnosti pěstování rostlin s větší hloubkou prokořenění a biologické půdní aktivity.



Obr. 2-24: Histogram mediánové hloubky půdy

2.5.8 Úspěšnost digitalizace

Úspěšnost digitalizace byla hodnocena jako dobrá, vzhledem k časové náročnosti tréninku a běhu modelu, nebyla iterativně stanovena optimální velikost segmentu, a vycházelo se z hodnoty požadované přesnosti tedy cca 50 m. Dalším faktorem umožňujícím tolerovat nižší úspěšnost digitalizace, je fakt, že

se jedná o jednorázovou analýzu a digitalizované polygony, se již nebudou měnit, z důvodu ukončení aktualizací a vydávání ZVM v roce 1997. Digitalizované linie, byly následně použity pro označení LPIS pozemků, tímto došlo k podstatnému snížení vlivu chyb digitalizace na výsledek, protože chybějící elementy linií nezabrání označení LPIS pozemku.

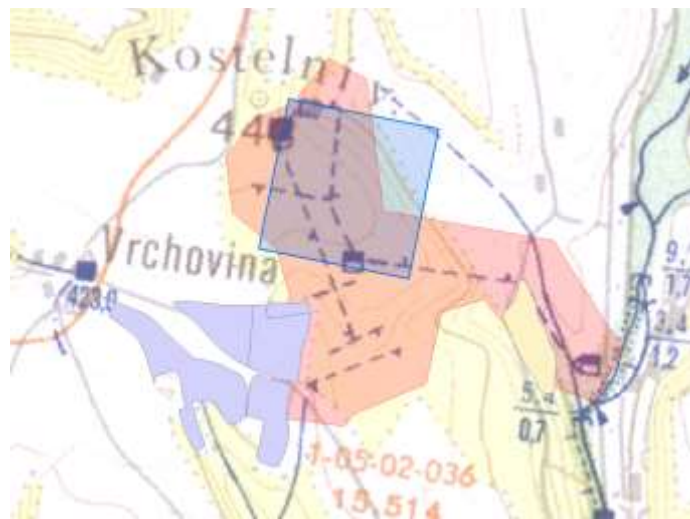
Nejvíce zavlažovaných ploch připadá na řeku Labe a Dyje. O řád menší plochy zásobují řeky Ohře a Vltava. Všechny ostatní toky pak zásobují závlahové soustavy s plochou několika stovek ha.

Hydrologická statistika je zatížena největší nejistotou. Technologie velkoplošných závlah, je téměř vždy volena jako tlaková s čerpáním vody. Soustavy tak jsou často napájeny z několika čerpacích stanic na různých tocích. Zároveň jsou na soustavách budovány nádrže, mezi kterými se voda převádí. Soustava tak může být napájena z nádrže na méně vodném toce, jejíž přítok je nadlepšován z potrubí nadřazené závlahové soustavy. Samostatnou kapitolou jsou umělé přírodní závlahové kanály, do nichž je voda čerpána z nádrží, a z nichž je pak čerpána dále na pozemky, či do sousedních soustav.

Z histogramu mediánové hloubky půdy dle bežešvé mapy půd je zřejmé, že většina závlahových soustav byla realizována na půdách s hloubkou od 50 do 80 cm. Tedy na lokalitách s kvalitní půdou vhodnou pro intenzivní zemědělství, zejména zelinářství.

2.5.9 Porovnání

Identifikace závlah pomocí ZVM ukázala vysokou shodu s daty o poloze závlah CzechGlobe. Výjimkou byla závlaha lesních školek na Kostelním Vrchu u Hodkovic nad Mohelkou. Závlahová soustava se nachází zcela na ploše lesa. Prostorová identifikace soustavy je správná, nicméně byly označeny pozemky LPIS ležící v okolí lesních ploch.



Obr. 2-25: Data CzechGlobe – Modrý čtverec, LPIS – fialová, žlutá, Identifikovaná závlaha – červená

2.6 Zdrojové plochy pro zachycení vod v lokálním měřítku

Za zdrojové plochy je možné považovat všechna horní povodí, tedy ta povodí, které nejsou ovlivněny plochy přítoky z jiných povodí. Současná kategorizace povodí takto definovaná povodí nemá. Standardně jsou povodí klasifikována do čtyřech úrovní podle hierarchie a vedle toho na Útvary povrchových vod pro potřeby Rámcové směrnice o vodní politice 2000/60/ES. Plošně nejmenší jsou

povodí IV řádu. Jejich klasifikaci z hlediska možné hydrologické odezvy uvádí Strouhal (2017). V povodích IV. řádu jsou zastoupena jak horní, tak průtočná povodí a povodí navíc nebyla generována v návaznosti na jejich velikost, a tak je jejich vzájemné porovnání komplikované. V rámci aktivit ČVUT v Praze proto byla na základě DMR4G generována malá horní povodí, která budou využita i pro klasifikaci těchto ploch z hlediska závlah.

V roce 2020 se projekt zaměřil na soustředění vhodných dat, která by bylo vhodné pro klasifikaci využít. Vedle morfologických charakteristik (sklonitost, tvar povodí atp.) a využití území je z hlediska závlah uvažováno o datových zdrojích, které jsou uvedeny v tabulce 1.

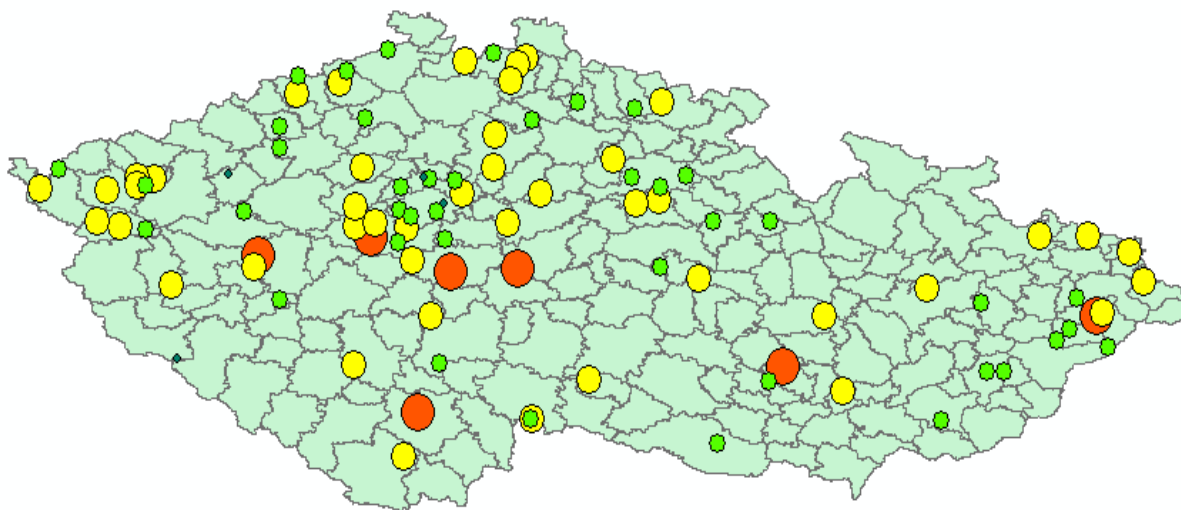
Název	typ dat	popis
Návrhové srážky	SRA	Data o úhrnu šestihodinových srážek včetně pravděpodobnosti výskytu tvarů srážky.
Zaniklé nádrže	MOR	Hráze zaniklých vodních nádrží jakožto potenciálních lokalit po zadržení vody pro závlahy.
Kritické body vstupu plošného odtoku do obcí	MOR	Dráhy soustředěného odtoku pro výběr potenciálních profilů pro zadržení vody v krajině
Lpis	LUS	Vymezení současně využívané zemědělské půdy (pobírající dotace)
BPEJ	SOI	Bonitace půdy – členění půd podle potenciálu produkce
Půda infiltrace	SOI	Mapové vymezení infiltračních schopností a propustnosti zemědělských a nezemědělských půd ČR s celorepublikovou územní kategorizací
Půda retence	SOI	Mapové vymezení charakteristik retenční vodní kapacity zemědělských a nezemědělských půd ČR s celorepublikovou územní kategorizací.
Půda vodní kapacita	SOI	Mapové vymezení využitelné vodní kapacity pro zemědělské půdy ČR s celorepublikovou územní kategorizací.
Závlahové soustavy a meliorace	MAN	Vymezení závlahových soustav. Vrstva v majetku MZE, v současné době řešena jejich možnost využití pro projekt
Závlahové soustavy ZVM 1:50000	MAN	Historické závlahové soustavy na digitalizovaných VH mapách. Probíhá testování výběru závlahových prvků
MVN a vodní toky	MOR	Současné vodní nádrže a vodní toky. Možné zdroje ZABAGED a HEIS
Nezemědělské využití závlahové vody	MAN	Posouzení nezemědělského využívání vody pro závlahy. Hlavní zaměření je na golfová hřiště.
Nakládání s vodou	MAN	Data z ISPOP (povolené, reálné odběry a vypouštění nad 500m ³ /měsíc a 6000 m ³ /rok) za rok 2019
Změny zabezpečeného objemu	MAN	Odhad změn zabezpečeného objemu v rozlišení útvarů povrchových vod

Změny závlahových potřeb	MAN	odhady od UVGZ
Použité zkratky	MAN	Management
	MOR	Morfologie
	LUS	Land Use – využití území
	SRA	Srážky
	SOI	Půda

Tabulka 2-7 Přehled vhodných dat k charakteristice území

Tato data budou promítnuta do vlastností malých zdrojových povodí. Ta tak budou obsahovat údaje o (a) kvalitě půdy a jejím potenciálu zadržet vodu, (b) zároveň ohroženosti extrémními srážkami, (c) morfologií včetně možného/potenciálního prostoru pro akumulaci vody. Aktivita tak směřuje ke klasifikaci území od kategorií neohrožených vysoce produkčních půd po vysoce ohrožené neproduktivní území v návaznosti na možnosti akumulace vody.

Do této klasifikace budou také zahrnuty plošně významné nezemědělské zavlažované plochy. Zejména se jedná o golfová hřiště, která mohou v lokálním přístupu k problematice závlah znamenat významného odběratele závlahové vody. V rámci projektu byla v letošním roce provedena rešerše golfových areálů v rámci ČR. Na území republiky je vedeno přes 100 golfových areálů. Z toho pětice má jen šest jamek. Golfová hřiště jsou vyznačena na následujícím obrázku.



Obr. 2-26: Rozložení golfových areálů na území ČR. červeně jsou označena hřiště s více než 18 jamkami. Žlutě 10–18 jamek. Zeleně pak 10 a méně jamek.

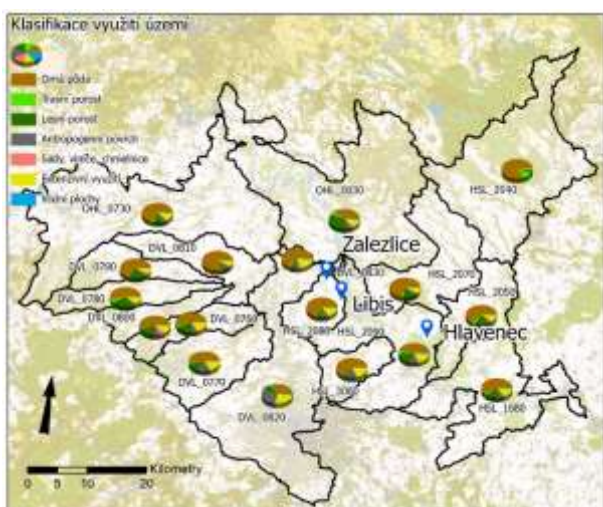
Čtyřicet devět hřišť je s více než 18 jamkami. Základním odhadem jsou cca 3 ha na každou jamku. Rozloha areálů je možné v první fázi projektu odhadnout podle počtu jamek. Celkově rozloha areálů zabírá cca 4500 ha. V poměru s některými stálými komoditami se jedné o plochu cca ¼ rozlohy vinic a o něco menší plochu, než kterou zabírají na území ČR chmelnice. A proto je třeba do vodní bilance a potřeb tyto areály zahrnout, a to především v lokálním měřítku. Aktivity v následujícím období se budou soustředit na sběr informací o zdrojích vody pro tyto areály a jak je řešen management závlah u těchto areálů.

2.7 Analýza dat pro určení potenciálu lokálních závlahových soustav v malých povodích

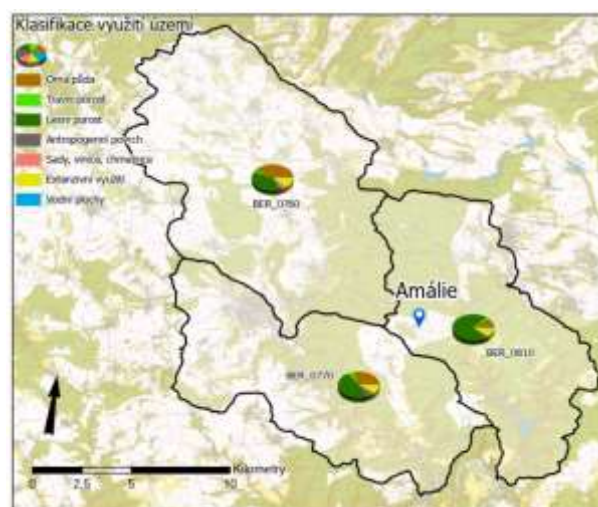
Z hlediska využití území (LU) a tím pádem charakteristik povrchu je pro území ČR přesným vstupem vektorová vrstva ZABAGED, která obsahuje kategorizaci jak plošných, tak liniových prvků. Ve vektorové formě je pak pro zemědělskou půdu vrstva LPIS, která přesněji vymezuje obdělávané plochy. Z těchto dvou vrstev pomocí automatizovaného nástroje je vytvářena bezešvá polygonová vrstva Landu se rozčleněná do sedmi základních kategorií z hlediska možné hydrologické odezvy. Z vybraných relevantních liniových a plošných vrstev nástroj vytváří plochy podle typu vrstvy případně atributu, který obsahuje. V případě bodových vrstev na kruhy s předepsaným poloměrem. Plošné vrstvy ZABAGED a LPIS vstupují do nástroje bez změny geometrie. Následně dochází k vytvoření bezešvé mozaiky pomocí předem zvolené hierarchie vrstev. Takto vzniklá vrstva je následně protnuta s vrstvou LPIS, jenž je považována za aktuálnější z hlediska zemědělských pozemků.

Vzniklá bezešvá vrstva Landu se obsahuje tři úrovně zatřídění ploch. Nejhrubší zatřídění je rozděleno na 7 typů. Jsou to Orná půda, Travní porost, Lesní porost, Antropogenní a zpevněné plochy, Sady, Vinice, chmelnice, Extenzivní využití a Vodní plochy. Pro klasifikaci využití území bylo použito toto hrubé dělení. Toto dělení je pro hydrologické analýzy dostatečné.

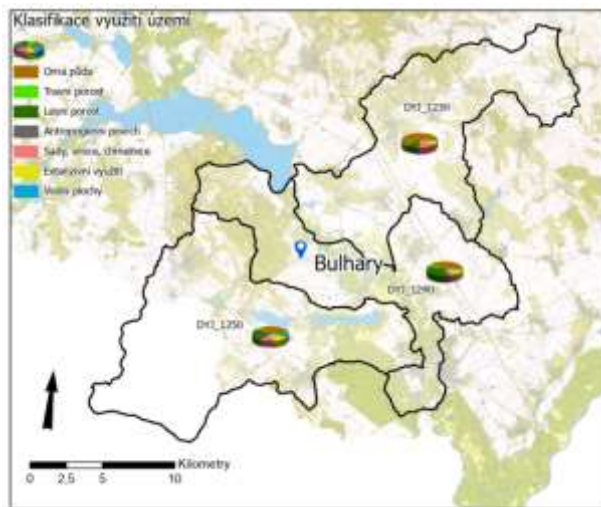
Pro potřeby projektu bude takto připravená vrstev využita k hodnocení jak jednotlivých ÚPOV, tak menších ploch. Ukázka vyhodnocení pro jednotlivé ÚPOV v okolí zájmových lokalit je na následujících obrázcích (Obr. 2-27Obr. 2-27: vyhodnocení LU pro jednotlivé ÚPOV v okolí zájmových lokalit (a – Libiš a Zálezlice – Hanka Mochov, b – Amálie, c – Bulhary)). K vytvoření byl použit model vytvořený v ArcGIS Pro. Tento model použije jednotlivé zájmové ÚPOV, ořízne jimi bezešvou vrstvu Landuse a na takto vzniklé vrstvě je provedeno sloučení všech ploch dle atributu nejhrubšího zatřídění ploch Landuse. Vznikne tak vrstva obsahující 7 polygonů, plocha každého polygonu se rovná ploše konkrétního typu plochy Landuse na ÚPOV. Výsledek je přiřazen zpět k vrstvě polygonů ÚPOV a symbolizován pomocí koláčových grafů.



a.



b.



c.

Obr. 2-27: vyhodnocení LU pro jednotlivé ÚPOV v okolí zájmových lokalit (a – Libiš a Zálezlice – Hanka Mochov, b – Amálie, c – Bulhary).

Výhodou vektorového řešení je minimální ztráta informace a flexibilita při vytváření menších zájmových území například k příslušným plochám povodí nebo katastrálních území. V návaznosti na předchozí řešení bylo následně zpracována charakteru území (jednotlivých UPOV) v detailním zpracování v podrobnosti malých povodí SoLC (Kavka, 2021). Na tato povodí je při zpracování nahlíženo jako na samostatné bilančně uzavřené celky. Za klíčové je výběr a zpracování relevantních dat, která charakterizují povodí z několika následujících hledisek:

- a.) Potenciálu zachytit a následně využít srážkovou vodu
 - a. Současné vodní plochy
 - b. Plochy historických rybníků
 - c. Teoretické profily nádrží
- b.) Rizika spojená s rychlým odtokem
 - a. Klasifikace samotných povodí
 - b. Výskyt kritických bodů
- c.) Potřeba vody
 - a. Velikost zemědělských ploch –potřeba vody pro zemědělství
 - b. Potřeby závlahy pro nezemědělské účely – golfové areály
- d.) Infrastruktura závlah – existující nebo zaniklé závlahové soustavy a potenciál odběrů z velkých vodních zdrojů.

Hodnocení současného stavu pak bude promítnut i do výhledových klimatických scénářů. Datově jsou zpracována všechna SoLC, celkem se jedná o více než 40 tis. elementů, které svou rozlohou zabírají cca 80 % území ČR. SoLC jsou dále kategorizovány podle velikosti do pěti tříd od 0.5 do 5 km². Tam, kde je to relevantní budou výsledky publikovány formou grafů zastoupení sledovaných charakteristik v těchto třídách. Vizuálně jsou pak pro potřeby této zprávy zobrazeny na pilotních lokalitách Amálie a Zálezlice-Mochov.

Nejpodrobnějším zdrojem dat pro využití území je ZABAGED. V rámci pracoviště, a i pro potřeby tohoto řešeného projektu by na pracovišti ČVUT v Praze vyvinut nástroj „LandUSETool“, který z mnoha prvků ZABAGED v kombinaci s LPIS (zemědělské pozemky) vytváří vrstvu LandUSE, ve které jsou prvky zatříděny do hydrologických kategorií ve třech úrovních detailu. V první je uvedeno základní dělení do sedmi kategorií viz následující tabulka.

Tabulka 2-8: základních sedm kategorií LU

1	OOP	orná půda
2	TTP	travní porost
3	LLP	lesní porost
4	AZP	antropogenní a zpevněné plochy
5	ITK	intenzivní sady, vinice, chmelnice s holým meziřadím
6	ETK	extenzivní smíšené porosty
7	VVP	vodní plochy

Ve druhé kategorii jsou tyto základní kategorie dále členěny na následující skupiny.

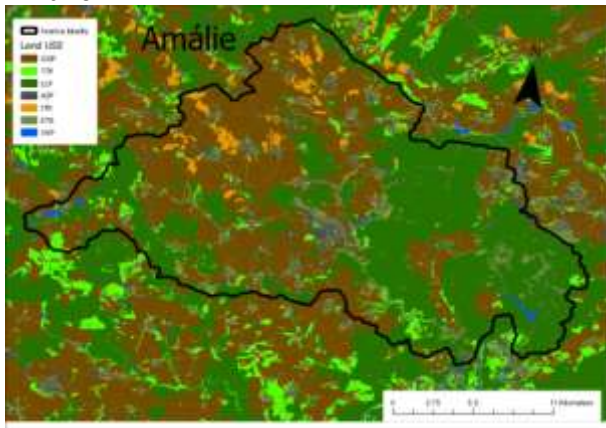
Tabulka 2-9: druhá úroveň kategorizace LU

1	OOP	orná půda	
11		Neoseto	
12		letní úzkořádkové plodiny	
13		ozimé úzkořádkové plodiny	
14		širokořádkové plodiny	
15		víceleté pícniny	
11		Neoseto	
12		letní úzkořádkové plodiny	
22		ozimé úzkořádkové plodiny	
14		širokořádkové plodiny	
15		víceleté pícniny	
2		TTP	travní porost
21			intenzivní pastviny
22			extenzivní pastviny a louky
3		LLP	lesní porost
31	lesní porost listnatý		
32	lesní porost jehličnatý		
33	lesní porost smíšený		
34	lesní porost neurčený		
35	lesní porost křovinatý		
35	lesní porost s kleci		
4	AZP	antropogenní a zpevněné plochy	

41		nepropustné povrchy
42		polopropustné povrchy
43		antropogenní propustné plochy
5	ITK	intenzivní sady, vinice, chmelnice s holým meziřadím
51		s desikovaným meziřadím
52		s obdělávaným meziřadím
6	ETK	extenzivní smíšené porosty
61		plochy s nedokonalým pokrytím (extenzivní sady, doprovodná vegetace komunikací a vodních toků)
62		upravené plochy s dobrým pokrytím (zahrady, parky, zapojený smíšený porost)
7	VVP	vodní plochy

Ve třetí úrovni jsou detailní informace vztahující se ke konkrétním plodinám a o výškách lesních porostů a toto členění je nad rámec potřeb tohoto projektu. Základem je první kategorie další zpracování je provedeno na této první kategorii. Pro každé povodí byly určeny plochy těchto sedmi základních kategorií, které jsou dále využity v jednotlivých částech. Ukázka LU je na následujícím obrázku.

Amálie



Zálezlice – Mochov



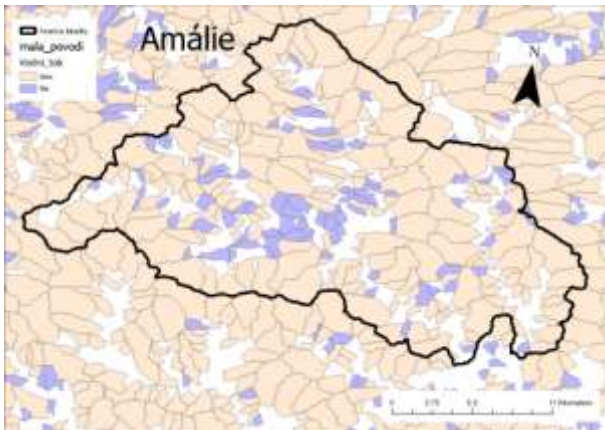
Obr. 2-28: využití území kategorizované pomocí nástroje LandUSEtool

2.7.1 Zachycení a následné možné využití srážkové vody

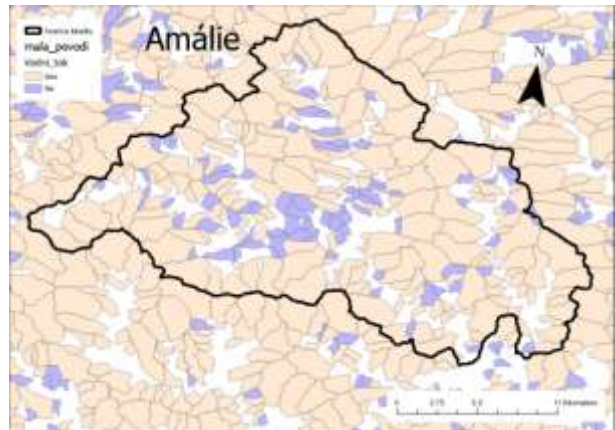
Možnosti akumulace vod jsou dány morfologií povodí a využitím území. Z hlediska dostupnosti vody závlahové účely je klíčová schopnost zachycení – akumulace srážkových vod. Infiltrovaná voda do půdního profilu a do hlubších vrstev je součástí základního odtoku a jejich akumulace je možná v (malých) nádržích v rámci daného povodí. Když vynecháme podzemní zdroje vody, ty je nutno považovat za strategickou a těžko obnovitelnou složku vodní bilance. Základním zdrojem je zachycená voda z povrchového odtoku a voda akumulovaná v rámci malých povodí v malých vodních nádržích – rybnících. Do hodnocení bilance je tak zahrnuta celková stávající plocha vodních nádržích – rybníků v jednotlivých povodích. Základním rysem povodí jsou tak dvě přímé charakteristiky a to a) přítomnost stálého vodního toku, b) existující vodní plochy uvnitř povodí.

Dalším zdrojem jsou pak historické rybníky. Identifikace historických rybníků z map vojenského mapování byly hodnoceny v rámci projektu „NAZV KUS QJ1220233 – Hodnocení území na bývalých rybníčních soustavách (vodních plochách) s cílem posílení udržitelného hospodaření s vodními a půdními zdroji v ČR“, tyto vymezené historické rybníky je možné považovat za potenciálně využitelná území.

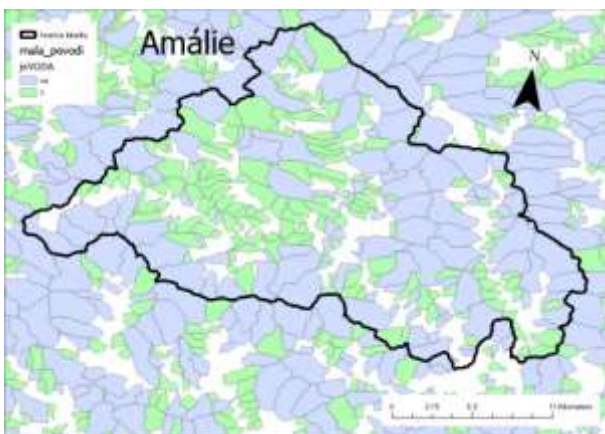
Amálie



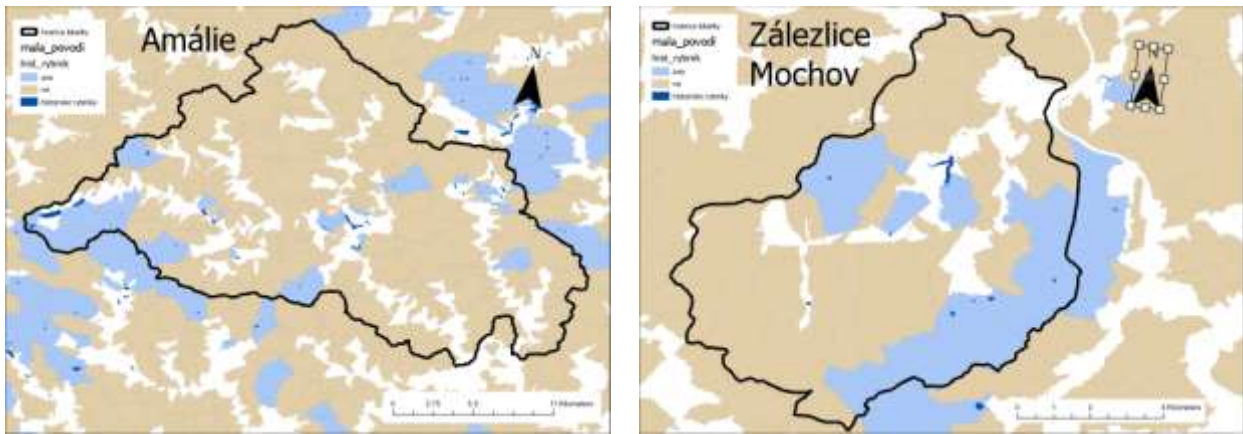
Záležlice – Mochov



a)



b)



Historické rybníky a vyznačená povodí do kterých spadají

Obr. 2-29: kartogramy dvou pilotních lokalit přítomnosti a) vodního toku, b) vodních ploch, c) historických vodních ploch

Zpracování dat pro ČR bylo zpracováno formou následujících grafů.



Obr. 2-30: zobrazuje počty povodí SoLC ve velikostních třídách s (vlevo – oranžová) a bez (vpravo – tyrkysová) jsou povodí rozdělena podle přítomnosti a) evidovaného vodního toku, b) vodních ploch, c) podle evidovaných historických nádrží.

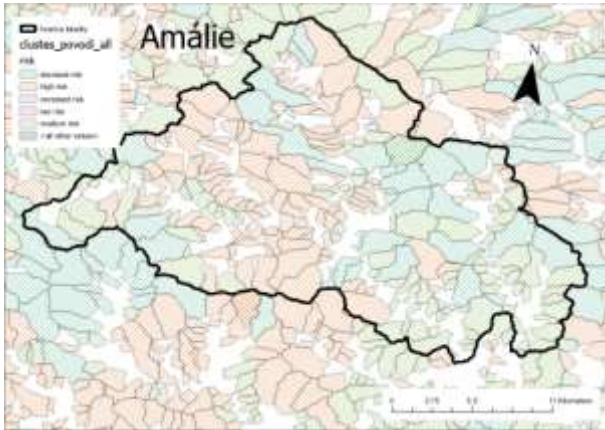
2.7.2 Rizika spojená s rychlým odtokem

Hodnocení rizikovosti malých povodí¹ je jedním z pohledů na chování malých povodí. Dalším pohledem je odvození kritických bodů, odvozených v rámci projektu VG20122015092 – Erozní smyv – zvýšené riziko ohrožení obyvatel a jakosti vody v souvislosti s očekávanou změnou klimatu (Bauer, 2019). V tomto projektu byly odvozovány kritické body na základě potenciálního erozního smyvu a dopadem na kritickou infrastrukturu, který je doprovodným jevem povrchového odtoku. Existence takto definovaného body je indikátorem stavu konkrétního území, v kterém je integrována jak informace o erozním riziku, ale i další infrastruktura.

Posledním zdrojem informací o rychlém odtoku je prováděný monitoring erozních/odtokových událostí. Ten kontinuálně probíhá od roku 2012 a ke konci roku 2021 bylo evidováno již přes 2200 erozních událostí (Kapička, 2021). Protnutí dotčených pozemků uvedených v monitoringu s hranicemi SoLC bylo zpracováno mimo tento řešený projekt, ale výsledky ukazují další pohled na rizika v malých povodích. Definování malých povodí je zobrazeno na dalším obrázku (2-5). Pro přiřazení události k příslušnému povodí bylo bráno těžiště polygonu vymezení zaznamenanou událost. Do této zprávy je vložen přehled výskyt erozních událostí z výše uvedeného článku. Data jsou řešitelskému kolektivu k dispozici.

Amálie

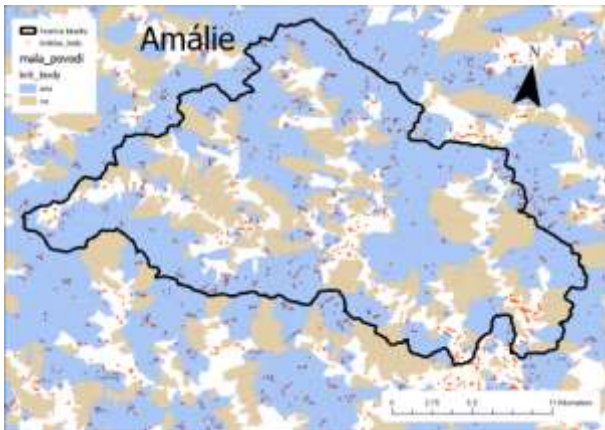
Využití území



Záležlice - Mochov



Hranice malých povodí s vyznačenou mírou rizika rychlého odtoku

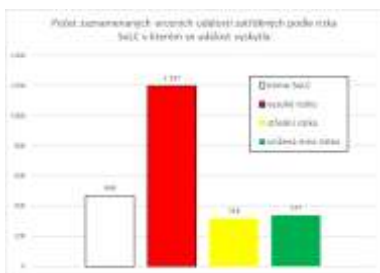


Kritické body v jednotlivých povodích

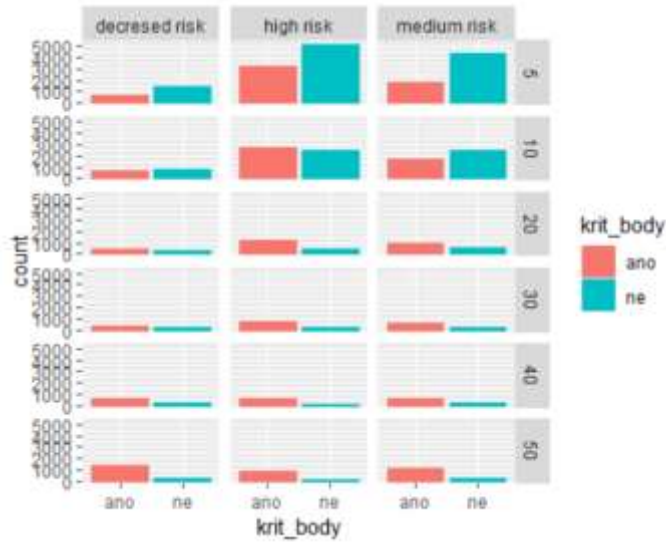
Obr. 2-31: kartogramy dvou pilotních lokalit přítomnost a) rozdělení povodí z hlediska rizika rychlého odtoku, b) výskytu kritických bodů



a



b

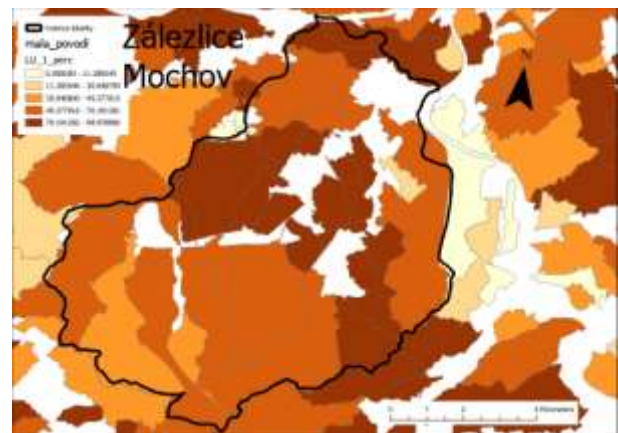
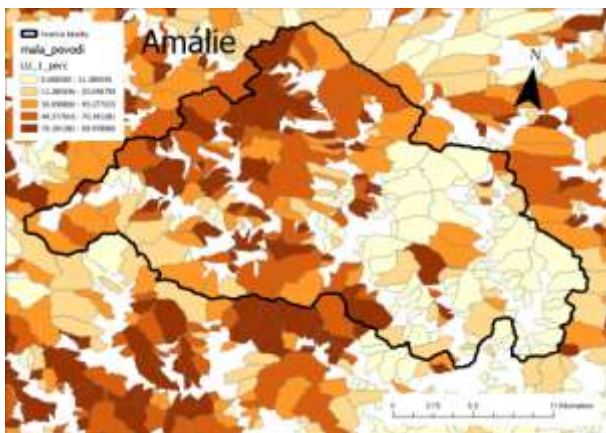


c

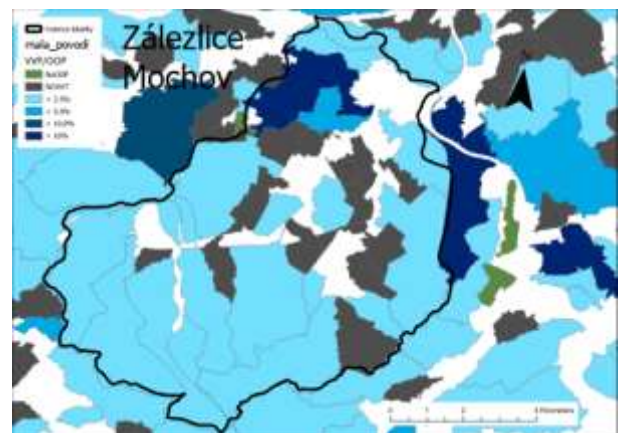
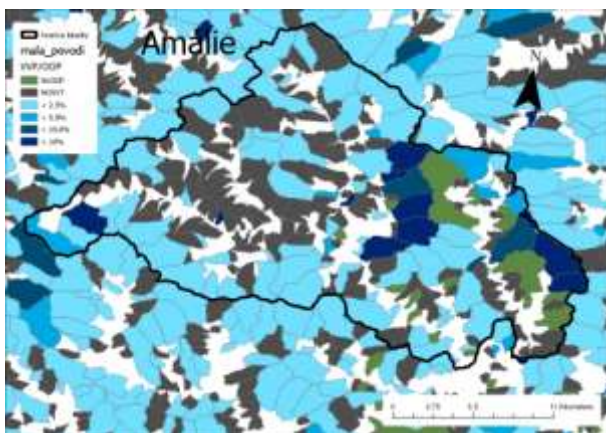
Obr. 2-32: rizika rychlého odtoku za celé území ČR. a.) počty povodí, v kterých se vyskytují kritické body, b) počet erozních událostí z monitoringu eroze a c) počet povodí rozdělených podle míry rizika rychlého odtoku a výskytu kritických bodů.

2.7.3 Lokální podmínky pro odběr vody

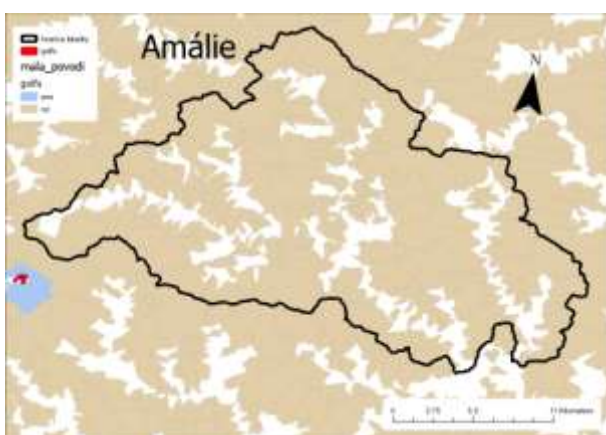
Vedle rizik spojených s rychlým odtokem a tím sníženou schopností v povodí zachytit nadbytečné povrchové vody a současnými možnostmi zachycení vody v SoLC daných počtem vodních nádrží. Zásadním indikátorem z hlediska potřeb vody pro závlahové účely je plocha zemědělské půdy. Ne všechna orná půda je považována za vhodnou k závlaze. Krom celkové orné plochy je tak uvažovaná také tzv. **zavlažovatelná orná** půda, kde z plochy orné půdy jsou vyjmuty trvalé travní porosty, les na orné atp. Dalším indikátorem z hlediska lokálních zdrojů vody pro závlahové účely je poměr mezi plochou orné půdy a vodních ploch. V některých povodích může být potřeba vody ovlivněna nezemědělskými závlahami. Zejména golfovými hřišti, těm je věnována kapitola 2.2.4 a zde je pro přehled zahrnut pouze celkový přehled a vizualizace na lokalitách.



a)



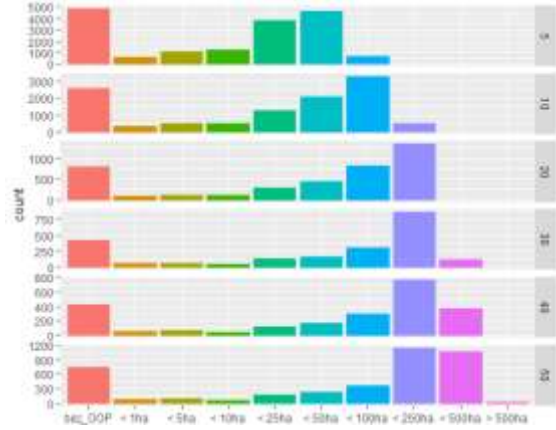
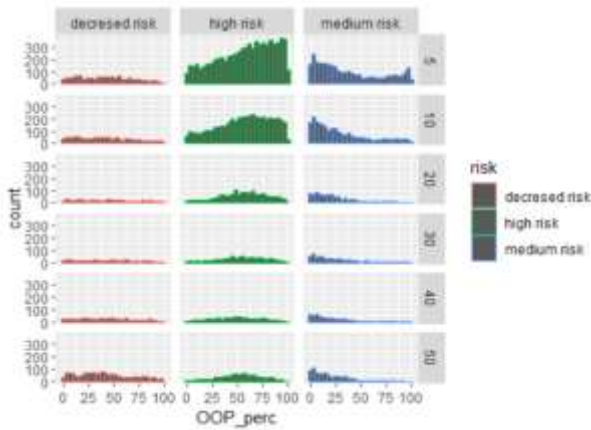
b)



c)

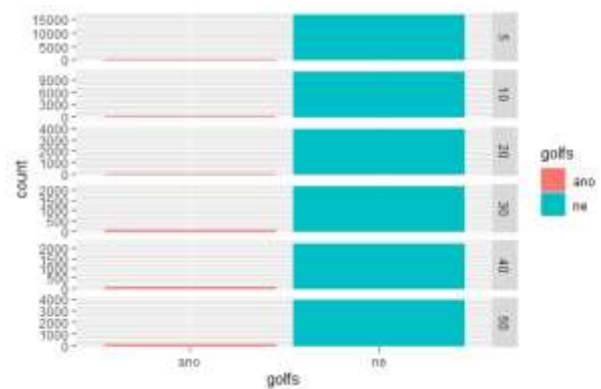
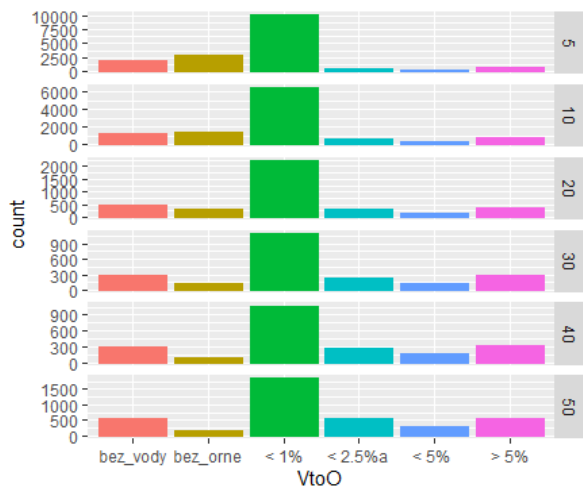
Obr. 2-33: Podklady pro určení teoretických potřeb vody pro závlahy a) procentuální zastoupení orné půdy na SoL.C, b) poměr vodních ploch a orné půdy – zelená barva jsou povodí bez orné půdy, šedou bez zdroje vody, škála modré poměr, c) vyznačení povodí dotčených golfovými areály (mimo pilotní území).

Grafický přehled pro celé území ČR.



a)

b)



c)

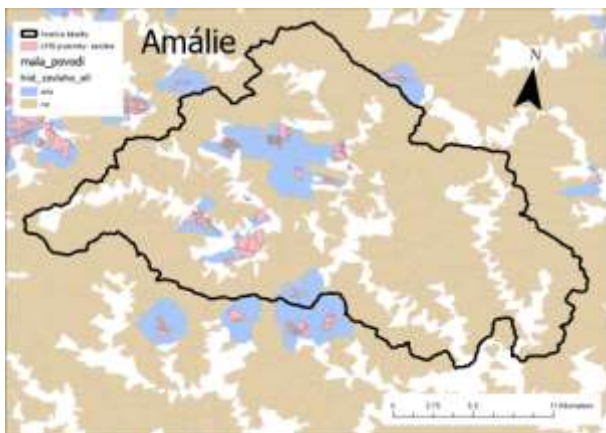
d)

Obr. 2-34: Indikátory velikosti obdělávané plochy a) rozdělení procenta obdělávané plochy z příslušného povodí rozčleněno podle rizika (Kavka, 2021), b) plocha orné půdy v jednotlivých povodích, c) poměr vodních ploch ku orné půdě, d) nezemědělské odběry pro závlahy – golfová hřiště

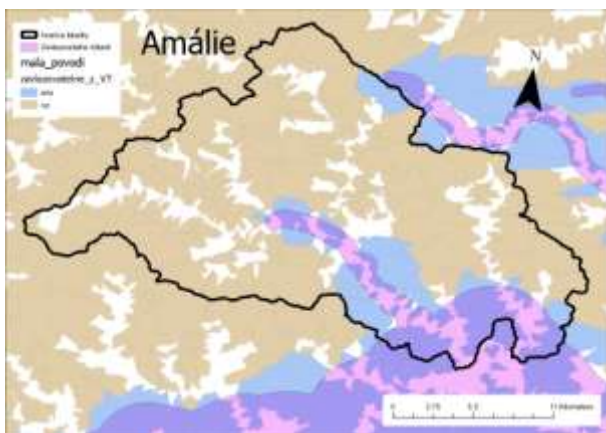
2.7.4 Infrastruktura závlah

Poslední sledovanou skupinou indikátorů je určení potenciální infrastruktury závlahových systémů (odvození těchto dat je popsáno v kapitole 2.1.3) a případný potenciál zajištění vody pro závlahy ze sítě vodních toků (odvození těchto dat viz kap. 2.2.3.).

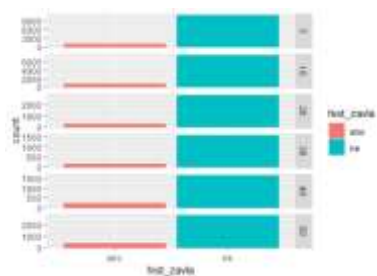
T A Č R



Historické závlahy (viz kap. 2:1.2)

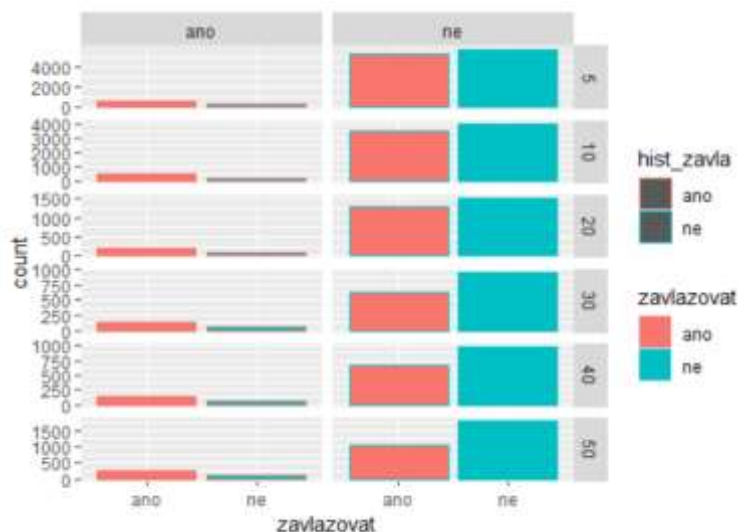


Zavlažovatelné plochy z vodních zdrojů (viz kap. 2.2)



a)

T A Č R



b)

c)

Obr. 2-35: infrastruktura závlah vztážená na SoLC a) počet povodí, kde se vyskytují závlahy, b) počet povodí, které jsou zavlažitelné ze stabilních centrálních zdrojů – velké vodní toky, c) rozdělení povodí z pohledu závlahy z centrálních zdrojů a historické závlahy.

3 Kategorizace ČR z hlediska dostupnosti a potřeb vody

Cílem bylo posouzení historických, současných, ale i teoretických zdrojů závlahové vody v různých kategoriích velikostí závlahových soustav. V rámci řešení byly provedeny následující analýzy a simulace zvolenými modely dle návrhu projektu:

- Analýza Aridity Indexu
- Vliv klimatických změn na vodní zdroje
- Golfová hřiště a jejich potřeba vody
- Dostupnost vodních zdrojů pro závlahy

3.1 Dostupné podklady pro útvary povrchových vod

Pro vodní útvary povrchových vod byla využita data popsána v úvodu kapitoly 2. Zvyšování průměrné teploty vzduchu má za následek zvýšený úbytek vody výparem, nicméně tyto ztráty nejsou kompenzovány srážkovými úhrny, které jsou víceméně stejné a nerovnoměrně rozdělené. Na území České republiky se proto vyskytují oblasti, kde potenciální evapotranspirace významně převyšuje srážkové úhrny. Na povodích s vyšším zastoupením vodních ploch, případně při určování bilance vodních nádrží, je zapotřebí přesné určení výparu z vodní plochy, tak aby byly zřejmé hodnoty disponibilní vody.

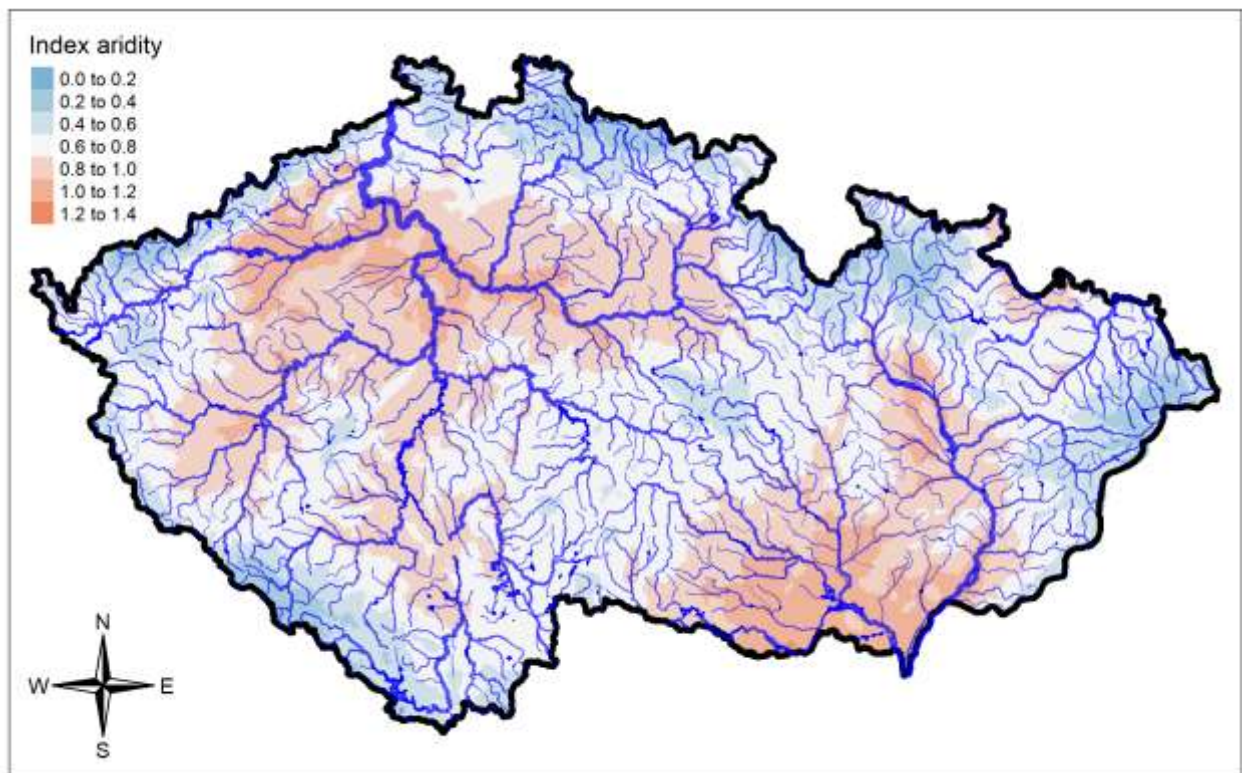
V roce 2022 byly odvozeny indexy aridity pro území ČR dle vzorce:

$$AI = PET/P,$$

Kde: AI – index aridity, PET – potenciální evapotranspirace a P – srážkový úhrn. Index aridity byl vypočten ve 4 variantách:

- 1) Referenční období 1991-2020, leden–prosinec (Obr. 3-1).
- 2) Referenční období 1991-2020, duben–září (období, které reflektuje vegetační sezónu rostlin).
- 3) Referenční období 2014-2020, duben–září (období, které reflektuje vegetační sezónu rostlin a suchou periodu s narůstající teplotou).
- 4) Referenční období 2014-2020, leden–prosinec (období reflektující suché období a narůstající teplotu).

Na základě indexu aridity je možné Českou republiku (dílčí oblasti) jednoduše klasifikovat, tento způsob je také jednoduše přenositelný na simulace změn klimatu (Samotný index tak definuje lokálně deficitní oblasti, kdy při hodnotě větší, než je potenciální evapotranspirace vyšší než srážkový, tzn. krajina dokáže spotřebovat na výpar a transpirace prakticky veškerou srážkovou vodu (kromě přívalových srážek, případně dlouhotrvajících srážek).

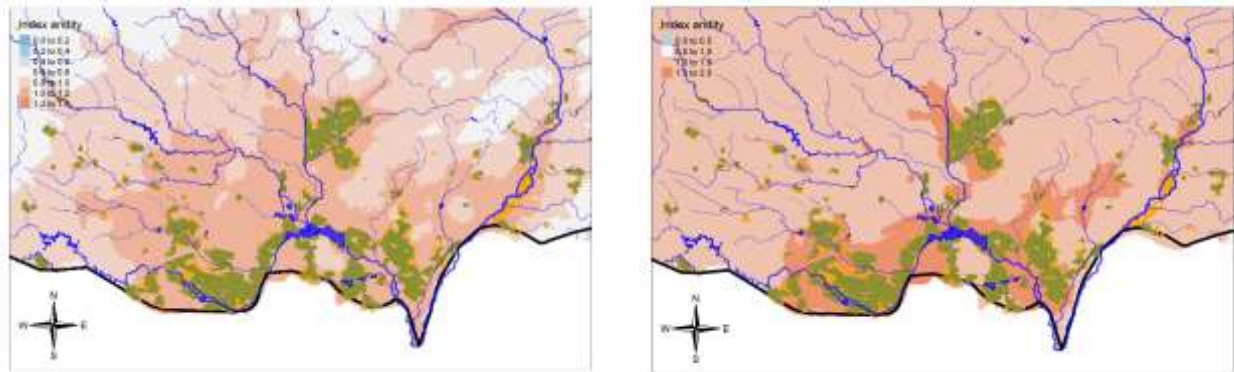


Obr. 3-1: Index aridity za období 1991-2020

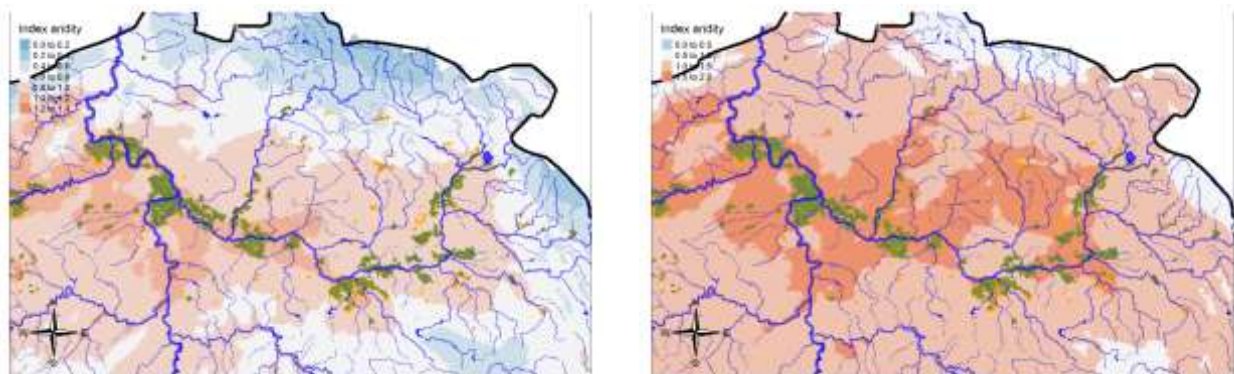
Na Obr. 3-2: Index aridity pro oblast Jižní Moravy, vlevo pro období 1991-2020 (celý rok), vpravo pro období 2014-2020 (vegetační období duben-září), zelené a oranžové polygony označují závlahy na základě dostupných dat.

a Obr. 3-3: je zobrazen AI pro oblasti s nejvyšším výskytem závlah, tzn. Polabí a Jižní Moravy a lze zde pozorovat rozdíl mezi referenčním (aktuálním) obdobím 1991-2020 a suchou periodu v letech 2014-2020. Rozdíl je ještě zdůrazněn ukázkou AI pro suchou periodu pouze ve vegetačním období, kde viditelně rezonuje nárůst teplot, který je spojen s nárůstem evapotranspirace a výparu z vodních ploch. Tento jev není lineární a bude dále probíhat v rámci probíhající změny klimatu. Nárůst potenciální

evapotranspirace je cca 80-100 mm/1°C. Většina závlah se vyskytuje v oblastech s vysokým AI, tento vztah byl dále ověřován i na základě simulací RCM/GCM v konfrontaci s dostupností vody.



Obr. 3-2: Index aridity pro oblast Jižní Moravy, vlevo pro období 1991-2020 (celý rok), vpravo pro období 2014-2020 (vegetační období duben-září), zelené a oranžové polygony označují závlahy na základě dostupných dat.



Obr. 3-3: Index aridity pro Labe, vlevo pro období 1991-2020 (celý rok), vpravo pro období 2014-2020 (vegetační období duben-září), zelené a oranžové polygony označují závlahy na základě dostupných dat.

3.2 Analýza potřeb vody v ČR a analýza potřeb vody pro závlahy

Posouzení potřeb vody bylo založeno na databázi nakládání s vodami, kterou disponuje VÚV TGM. Tato databáze eviduje nakládání s vodou (POV – odběr z povrchové vody, POD – odběr z podzemní vody a VYP – vypouštění do povrchových) všech uživatelů, kdy povolení je větší než 500 m³/měsíc, případně 6000 m³/rok. Na Obr. 3-4 je zobrazen dlouhodobý vývoj nakládání s vodou v České republice, kdy lze pozorovat výrazný pokles po roce 1990, současné hodnoty jsou cca na 65 procentech hodnot před tímto rokem.

Druhou částí je pak vymezení území, kde jsou dostupné vodní zdroje pro závlahy. Pro tuto analýzu byly využity výstupy, kdy byly modelovány disponibilní zdroje a deficity pro jednotlivé vodní útvary. Vymezení proběhlo na základě úvahy, že vodní zdroje pro závlahy jsou potřeba především v období sucha a ve vegetačním období. Před vlastní analýzou potřeb vody pro závlahy je nutné tuto spotřebu vsadit do dalšího využití vod v ČR:

3.2.1 Potřeba vody v ČR

- 1) Výběr dat za období 2014-2018,
- 2) Výběr dat za vegetační sezónu duben-září,
- 3) Agregace na vodní útvary, průměr hodnot za vybrané období,
- 4) V oblastech, kde je průtok menší než minimální zůstatkový průtok, není voda pro závlahy k dispozici,
- 5) Vymezení oblastí kolem vodních toků na základě dostupné vody pro celé období a pro jednotlivé měsíce ve vegetační sezóně (průměr za období 2014-2018).
- 6) Využití aridity indexu pro zmenšení oblastí. V místech, kde $AI > 1$, převažují srážkové úhrny nad hodnotami evapotranspirace (v těchto lokalitách se nepředpokládá závlaha, jedná se především o horské a podhorské oblasti, kde by případně potřeby vody například pro lesnictví/školky neměl být zásadní problém),
- 7) Využití vodních nádrží a velikosti zásobního objemu jednotlivých vodních nádrží a naplněnosti zásobního objemu ve vegetačním období,
- 8) Vymezení oblastí v blízkosti vodních nádrží na základě dostupné vody (hodnoty jsou ze simulací modelu vodohospodářské bilance WATERES, jedná se o zjednodušující přístup, který nezahrnuje podrobné manipulační řady, které jsou v rámci výpočtu zjednodušené a předpokládají, že vodní nádrže pouští minimální zůstatkové průtoky a zbytek vody se vodní nádrží snaží zadržet do plného zásobního objemu). Oblasti byly vymezeny pomocí analýzy v prostředí GIS (programů R a QGIS).

Uvedené postupy byly využity na základě simulací současného stavu a byly podkladem pro další simulace, při kterých se potřeba závlah zvyšovala.



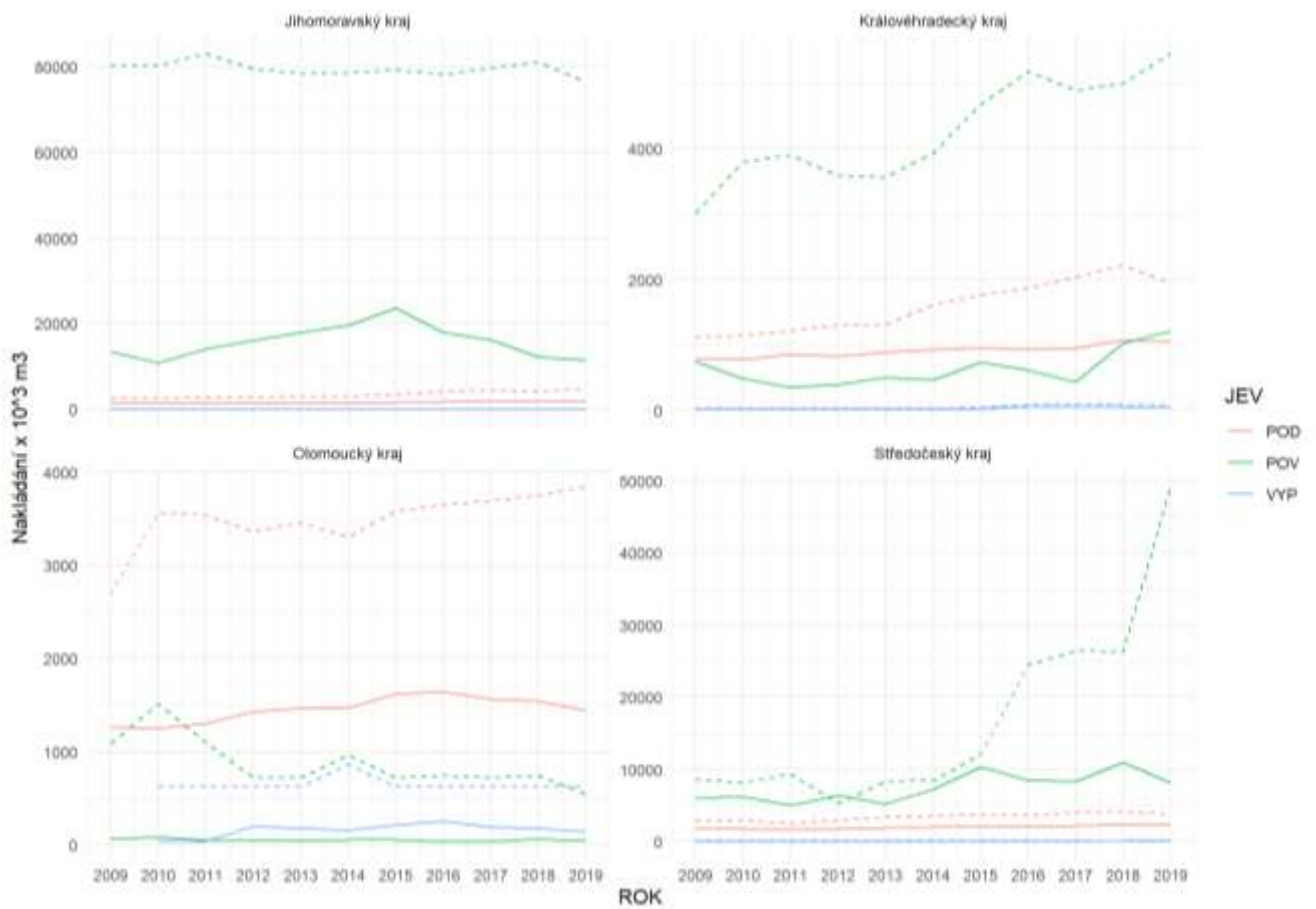
Obr. 3-4: Dlouhodobý vývoj nakládání s vodami (suma pro celou Českou republiku v měsíčním časovém kroku)

Dále byly analyzovány hodnoty pouze pro "Zemědělství, lesnictví, rybářství", které jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 3-5) V posledních letech lze pozorovat v rámci ČR významný pokles.

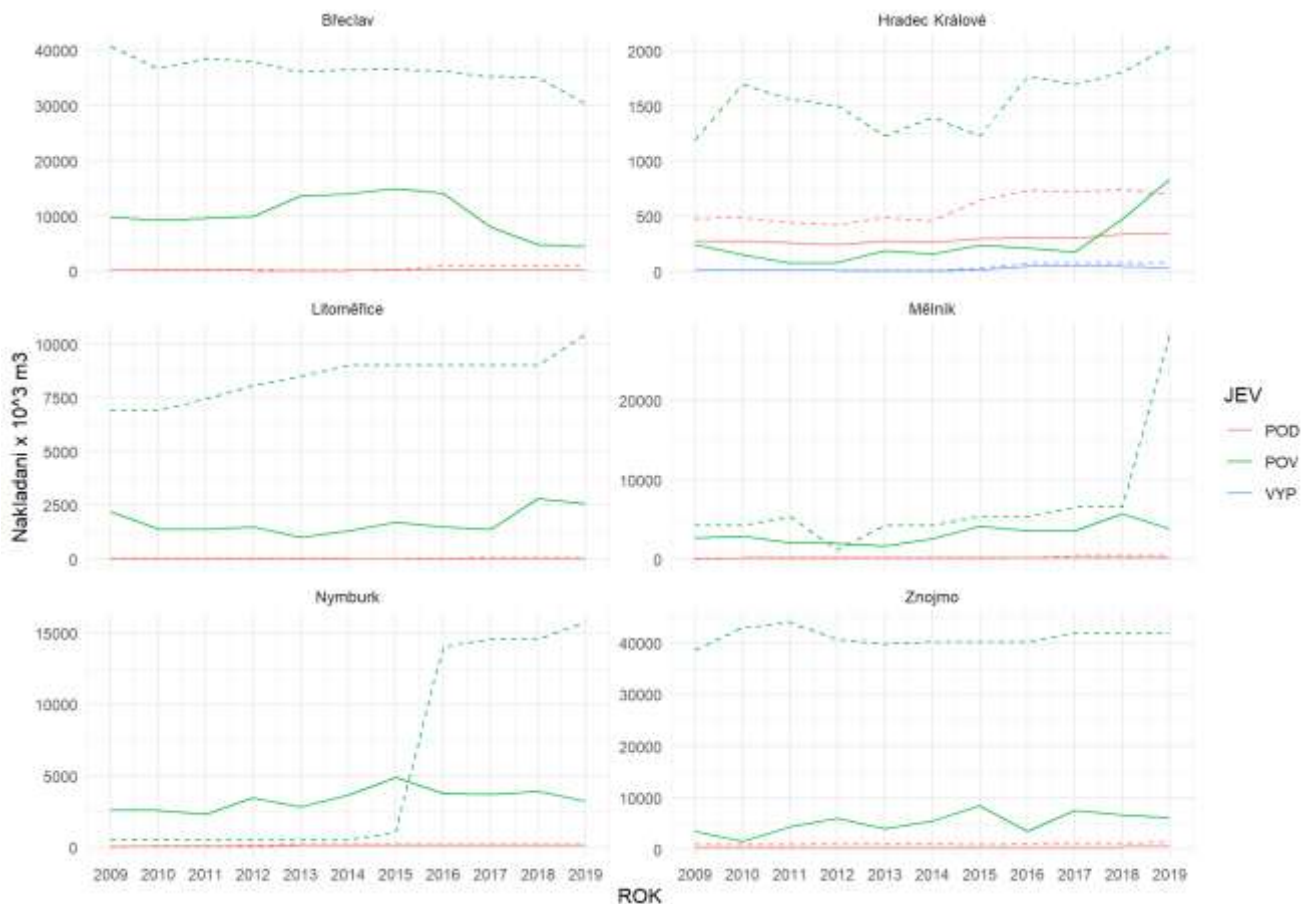


Obr. 3-5: Odběry z podzemních a povrchových vod pro sektor "Zemědělství, lesnictví, rybářství"

Posouzení bylo také provedeno pro správní jednotky krajů a okresů. Na Obr. 3-6 jsou zobrazeny hodnoty pro 4 kraje s největším nakládáním v zemědělství v rámci ČR a na Obr. 3-7 poté pro 6 okresů. Plné čáry zobrazují reálné odběry, čárkované linie potom povolená množství. Lze vidět, že povolená množství významně převyšují reálné odběry, tak jak jsou uvedeny v databázi. S navýšením povolení v jednotlivých oblastech lze odvodit, že v těchto místech může být tlak na rozšíření závlahových systémů.



Obr. 3-6: Nakládání s vodou ve vybraných krajích (plná čára – reálné nakládání, čárkovaná čára – povolené nakládání)



Obr. 3-7: Nakládání s vodou ve vybraných okresech (plná čára – reálné nakládání, čárkovaná čára – povolené nakládání)

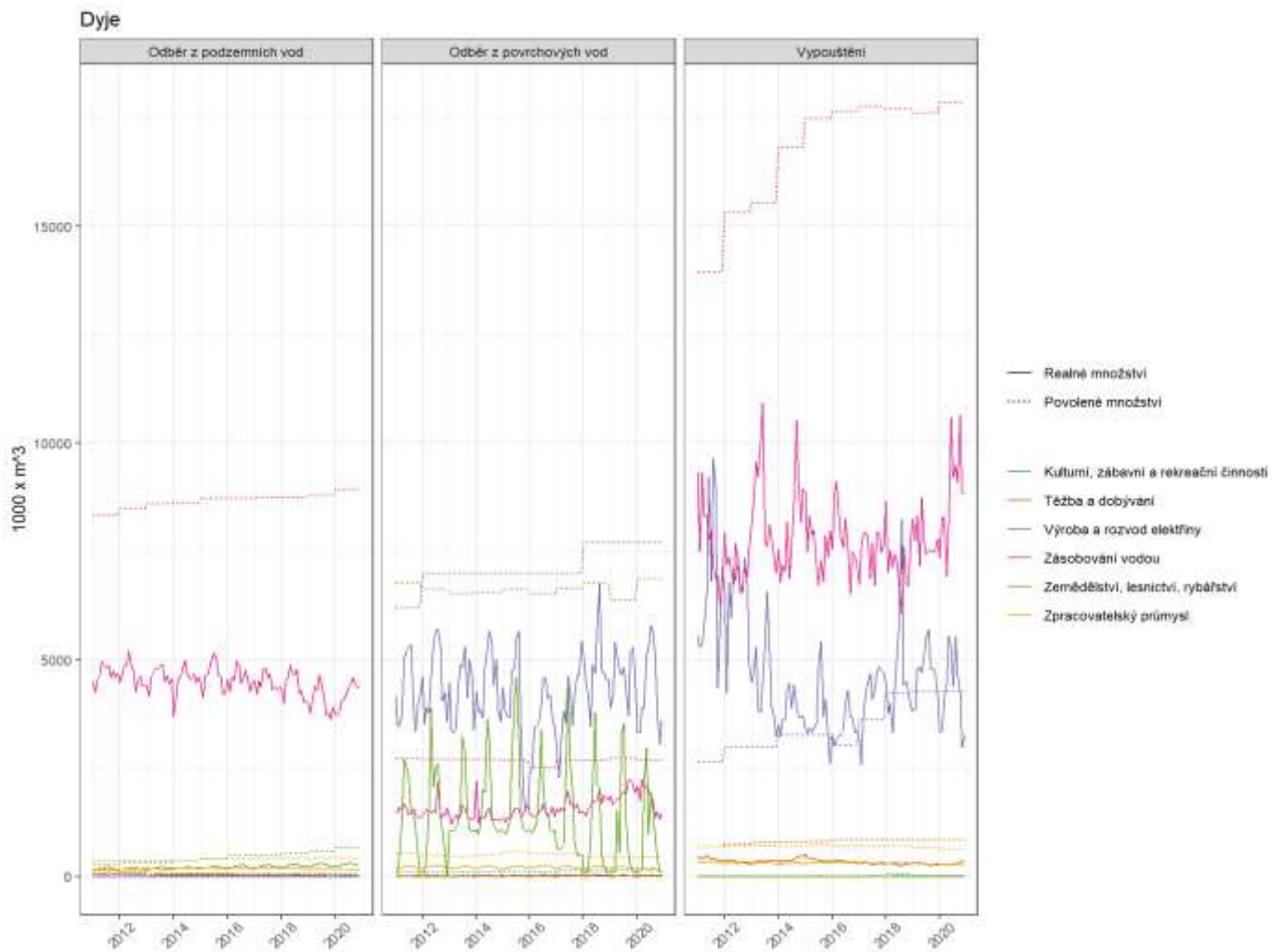
3.2.1 Potřeba a využití vody pro závlahy

Posouzení potřeb vody bylo založeno na databázi nakládání s vodami, kterou disponuje VÚV TGM. Tato databáze eviduje nakládání s vodou (POV: odběr z povrchové vody, POD: odběr z podzemní vody a VYP: vypouštění do povrchových) všech uživatelů, kdy povolení je větší než 500 m³/měsíc, případně 6000 m³/rok. Práce pokračovaly v roce 2021 vyhodnocením potřeb vody v zemědělství a potřeb vody využité za období 2009-2020 pro závlahy. Pro filtraci tohoto požadavku bylo provedeno na základě CZ-NACE, kde byla vybrána kategorie A (Zemědělství, lesnictví, rybářství: Tato sekce zahrnuje činnosti spojené s využíváním rostlinných a živočišných přírodních zdrojů. Patří sem činnosti jako pěstování zemědělských plodin, chov hospodářských zvířat, těžba dřeva a výroba jiných rostlinných a živočišných produktů v zemědělských podnicích nebo jejich získávání z volné přírody) a dále kódy 011, 012 a 013. Jednotlivé kategorie jsou uvedeny na Obr. 3-8 a Obr. 3-9 jsou zobrazeny časové řady nakládání dle jednotlivých sektorů (vybrány jsou nejvýznamnější sektory). Analýza byla provedena pro všechna dílčí povodí České republiky, pro prezentaci bylo vybráno povodí Dyje, kde jsou velké závlahové soustavy, a zemědělství je jedním z nejvýznamnějších sektorů využívající povrchové vodní zdroje. V rámci celého povodí Dyje se jedná v maximech přes 4 000 000 m³/měsíc. Analogicky je zobrazeno pouze zemědělství, kdy lze pozorovat, že ve vybraném dílčím povodí Dyje se prakticky veškerá voda spotřebuje a nevrací se zpět do toku. V rámci zemědělství je většina odběrů realizována z povrchových zdrojů ve vegetačním

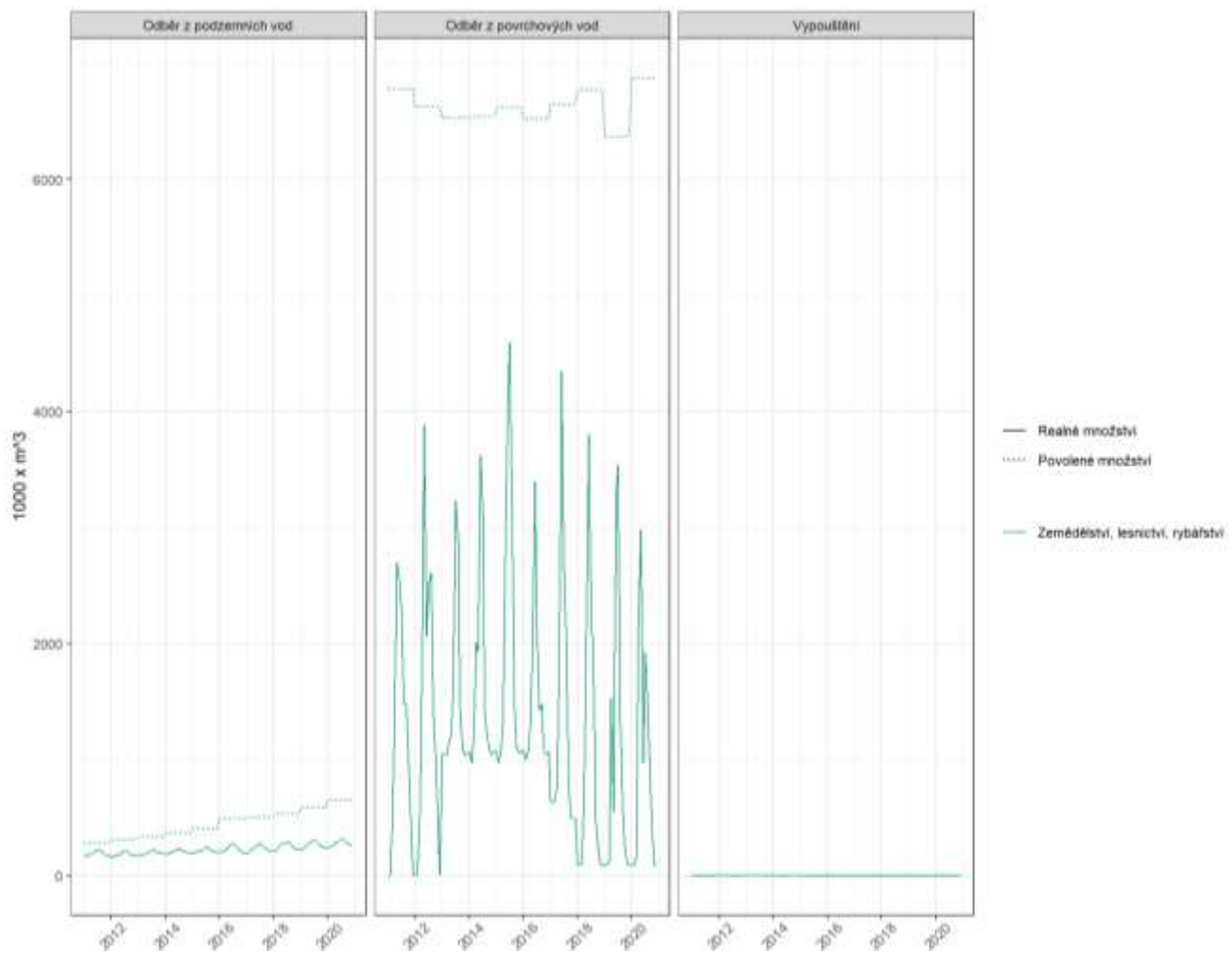
období. Pro řešení projektu bylo snahou odfiltrovat potřebu vody pro závlahy (na základě databáze o nakládání s vodou). Výsledek pro dílčí povodí Dyje lze vidět na Obr. 3-10, kde je možné potvrdit fakt, že odběry pro závlahy jsou téměř výhradně z povrchových zdrojů a největší tlak na ně byl v suchých letech 2014-2018, kdy na konci této epizody bylo zvýšeno povolené množství pro závlahy, i když souhrnně nebylo využíváno, nicméně některé odběry byly vyšší, než je povolené množství, a to i přes agregaci na územní jednotku vodních útvarů.



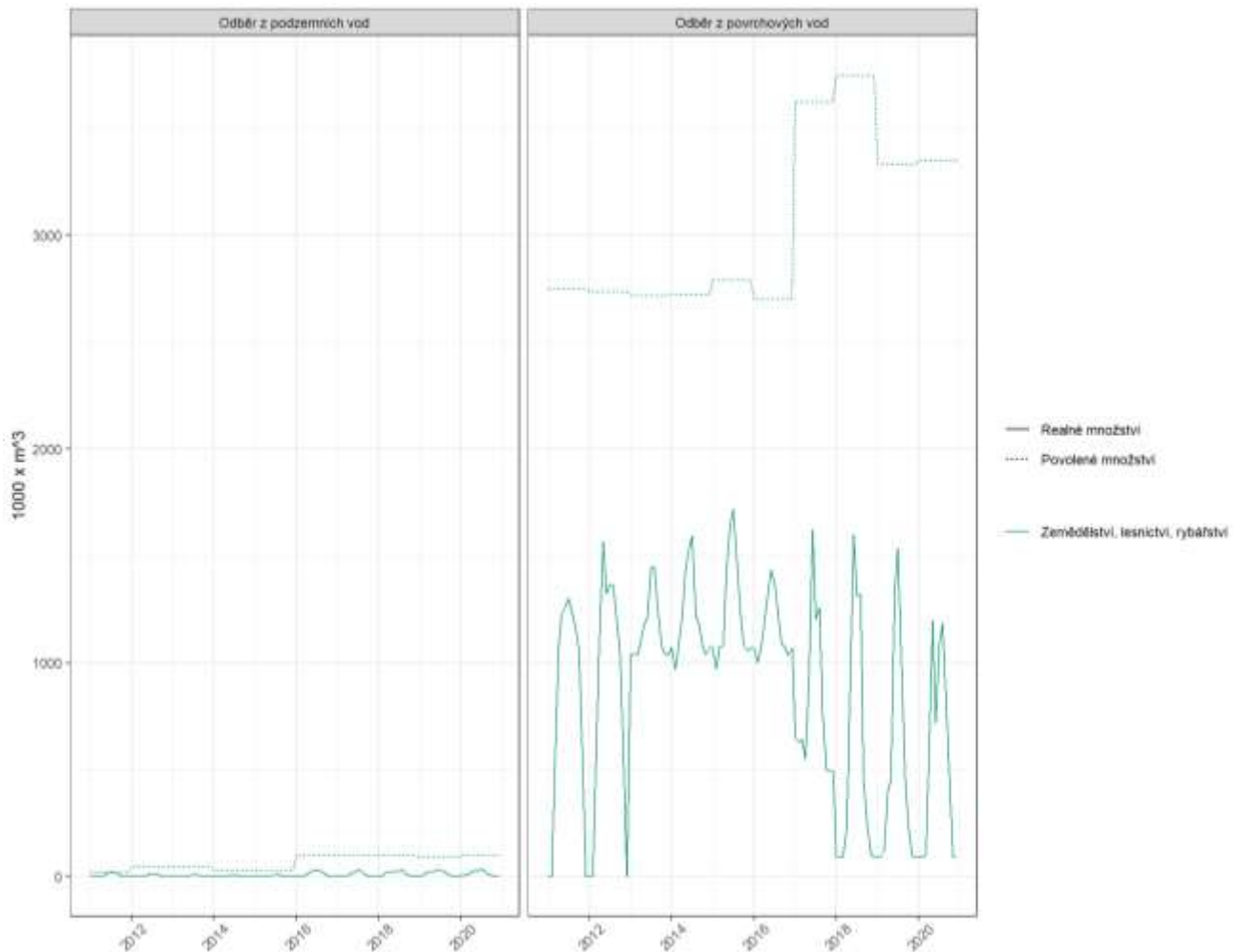
Obr. 3-8: Kategorizace ekonomických činností na základě CZ-NACE (Zdroj: <http://www.nace.cz/A-zemedelstvi-lesnictvi-rybarstvi>).



Obr. 3-9: Souhrnné nakládání s vodou pro dílčí povodí Dyje (v. tis. m³/měsíc).



Obr. 3-10: Nakládání s vodou v sektoru zemědělství pro dílčí povodí Dyje (v. tis. m³/měsíc).



Obr. 3-11: Potřeba vody (povolené/reálné odběry) pro závlahy a dílčí povodí Dyje (v. tis. m³/měsíc).

Na Obr. 3-11 jsou zobrazeny potřeby (povolené-nahoře a reálné dole) vody pro závlahy v letech 2014-2019 pro měsíc červenec v rámci české republiky. Potřeba vody se týká cca 1/4 území České republiky a jsou logicky soustředěny do zemědělských oblastí České republiky a většinou se jedná pro dílčí vodní útvar o desítky až statisíce m³ za měsíc. Analýzy byly provedeny pro všechny měsíce, zde je uveden ukázkově jeden zvolený měsíc.

Závlahy [tis. m3/měsíc - povolená množství] Měsíc: 7



Závlahy [tis. m3/měsíc - reálné odběry] Měsíc: 7

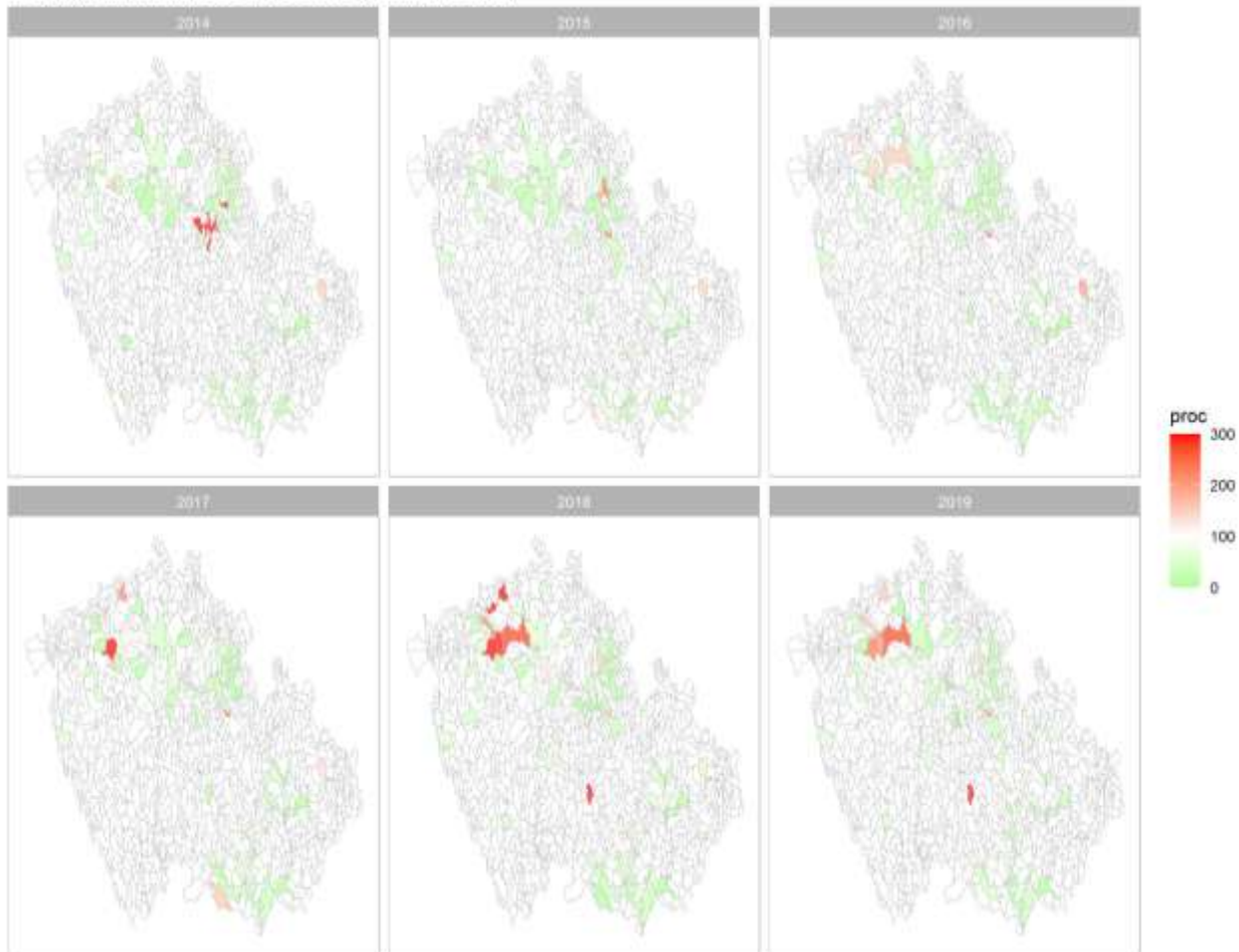


Obr. 3-12: Povolené (nahore) a reálné (dole) odběry pro závlahy v červenci za 2014-2019.

Dále byla provedena analýza, jak jsou jednotlivé odběry naplněny v rámci jednotlivých měsíců a let. Na Obr. 3-12 lze pozorovat vývoj v červenci za období 2014-2019, kdy, pokud jsou odběry naplněny, tak se

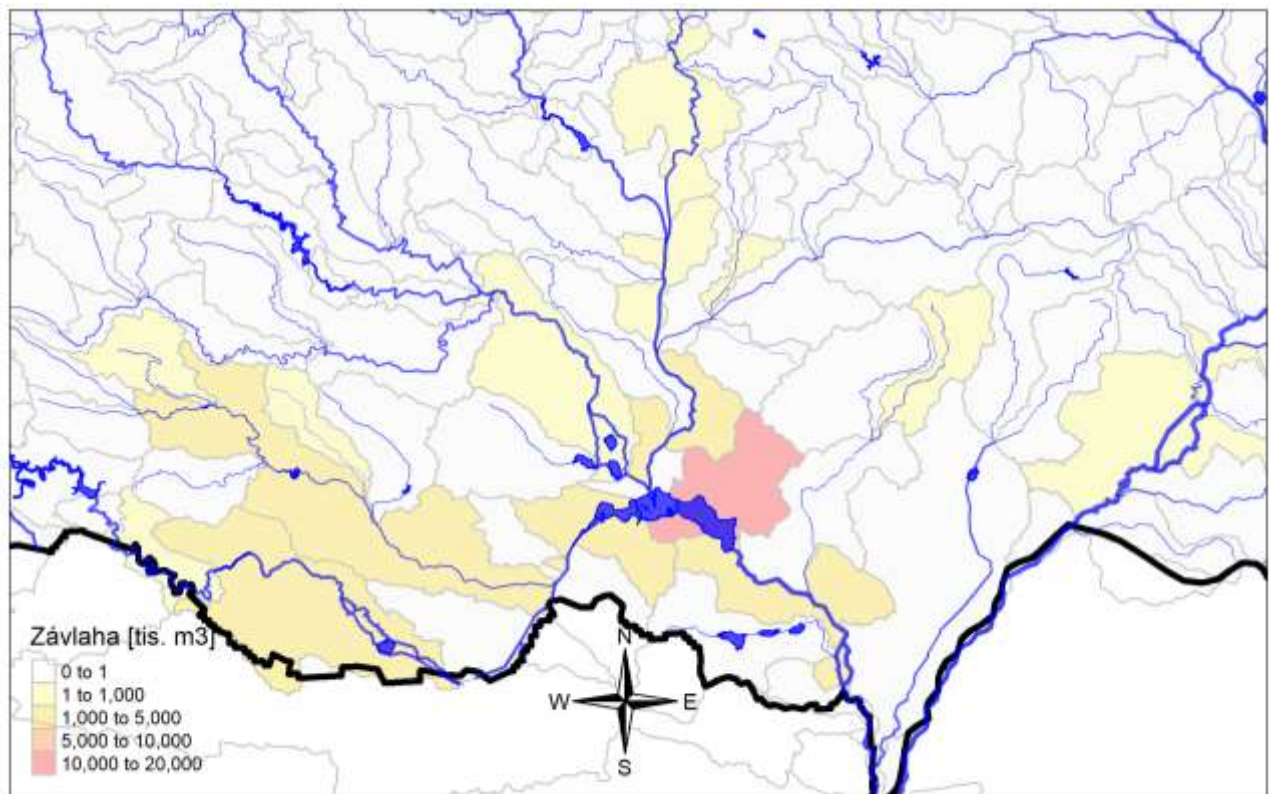
mapa blíží bílé, pokud jsou překročeny, tak červené a naopak nenaplněny, tak zelená. Odběry (dle dostupné databáze) byly někde výrazně překročeny.

Závlahy [tis. m³/měsíc - procento využití] Měsíc: 7



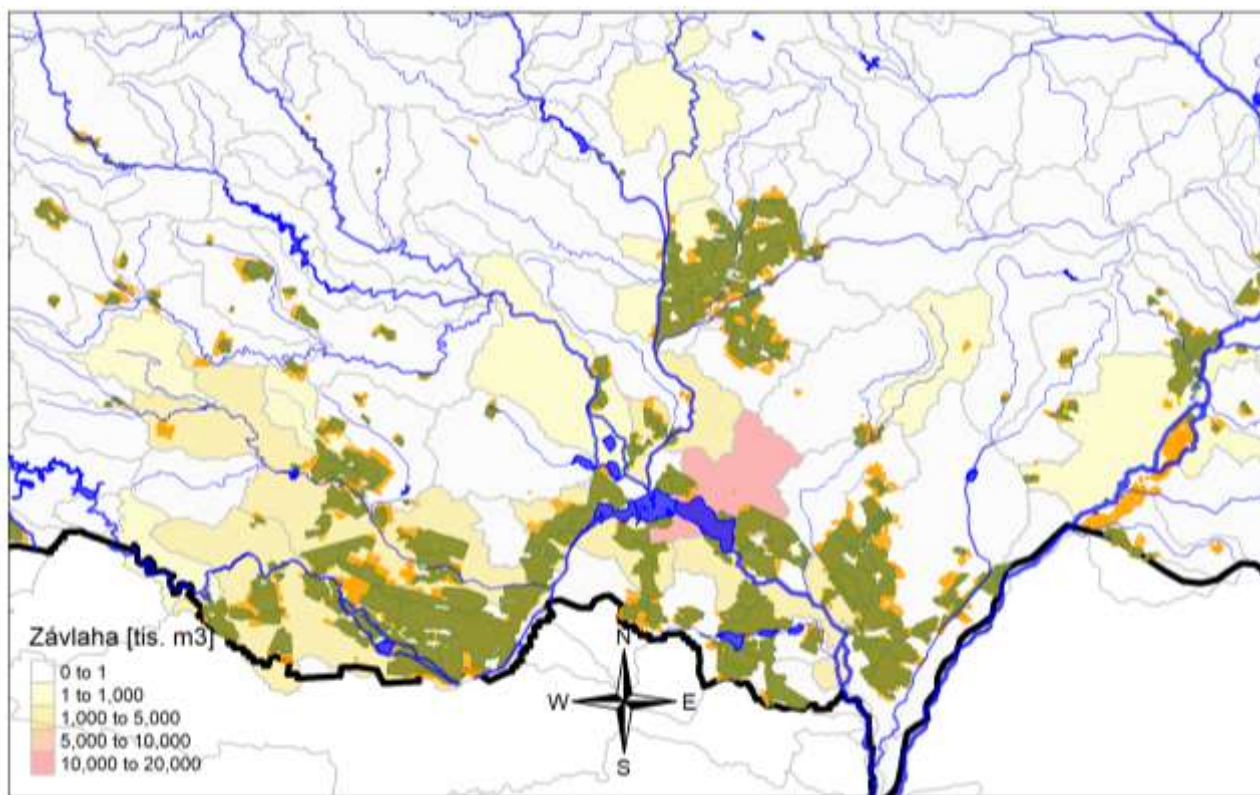
Obr. 3-13: Povolené vs. reálné odběry pro závlahy v procentech v červenci 2014-2019.

Na základě GIS analýzy byly identifikovány oblasti, kde je evidována závlahová potřeba a není závlaha (dle dostupných podkladů, oranžové a zelené polygony) a naopak, kde se nachází závlahy a není evidováno nakládání s vodou. Tento jev je ukázán následujícím obrázkem (Obr. 3-13), kde lze tyto oblasti vidět. Databáze o evidenci nakládání s vodou nemusí být kompletní, a to z důvodu sníženého tlaku tuto vodu evidovat, protože v období vláhového deficitu není zpoplatněna nebo závlahová potřeba nesplňuje podmínky evidence 500 m³/měsíc potažmo 6000 m³/rok. Tento jev se změnit na základě schválené návrh novely vodního zákona (č. 254/2001 Sb.) z dílny ministerstev životního prostředí a zemědělství, kde dle § 10 (1) Měřit množství vody, se kterou nakládá, a předávat výsledky tohoto měření příslušnému správci povodí postupem podle § 22 odst. 2 je povinen oprávněný, který má povolení k nakládání s vodami podle § 8 odst. 1 písm. a) bodu 1 nebo § 8 odst. 1 písm. b) bodu 1 v celkovém množství alespoň 1000 m³ vody v kalendářním roce nebo 100 m³ vody v kalendářním měsíci.



Obr. 3-14: Oblast Jižní Moravy a závlahové potřeby dle databáze nakládání s vodou v tis. m³/rok

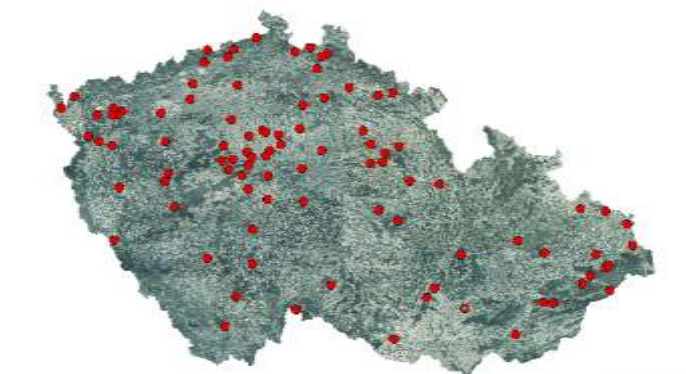
Analýza evidovaných odběrů na závlahy a evidovaných závlah byla zpracována pro celé území České republiky. Na základě této analýzy byly identifikovány například oblasti, kde reálné odebrané množství je větší než povolené odběry vody. V poslední době v lokalitách se sníženou dostupností vody vznikají tlaky využívat i zdroje podzemní vody pro závlahy, tento jev řešitelé projektu nepodporují a v období sucha ještě větším snížením hladin podzemních vod mohou být více ohroženy ekosystémové služby toku.



Obr. 3-15: Oblast Jižní Moravy a závlahové potřeby dle databáze nakládání s vodou v tis. m³/rok, zelené a oranžové polygony označují závlahy na základě dostupných dat.

3.2.2 Nezemědělský odběr pro účely závlah golfových areálů

Golfová hřiště se začala v ČR znovu budovat zhruba od roku 2002 a během posledních dvaceti let byl rozmach v jejich budování největší (Golfová ročenka 2010 uváděla již 84 hřišť). V poslední době zájem o výstavbu vlivem ekonomické i vodohospodářské situace klesl, v současnosti se dokonce již první hřiště uzavřela. Realizována jsou 9, 18, 27 a 36 jamková hřiště.



Obr. 3-16: Přehled golfových hřišť v ČR (2020).

Metodika vymezení zavlažovaných ploch.

Při vytváření metodiky výpočtu byly v dalším kroku na jednotlivých hřištích vymezeny plochy, které jsou pravděpodobně zavlažované. Bylo vycházeno z teorie, že většina hřišť má navržený automatizovaný závlahový systém, který se liší podle kategorie hřiště, půdních a klimatických podmínek, i podle provozních podmínek. Podíl zavlažované plochy se liší. Na hřištích nejvyšší kategorie jsou zavlažovány nejen jamkoviště (greeny), odpaliště (tee) a dráhy (fairwaye), ale i okolí greenů (forgreeny), cvičné plochy (akademie) nebo i pískové překážky (bunkery) a další, viz Obr. 3-17. Podíl zavlažované plochy tak může být až 30–40 % z celkové plochy hřiště.



Obr. 3-17: Golf Club Mstětice, Praha-východ.

U hřišť nižší významnosti mohou být naopak zavlažované například pouze greeny, které mají většinou umělou skladbu půdního profilu, neboť jsou nejvíce namáhanou částí hřiště. Dochází zde ke kompresi povrchu intenzivním pohybem hráčů a vrstva písku v podloží tak umožňuje rychlou infiltraci srážek. Byly vymezeny plochy hřiště, pro které je patrné, že jsou zavlažované (potenciální zavlažované plochy s ohledem na vývoj teplot díky klimatické změně).



Obr. 3-18: Golfklub Klášter Teplá, okres Cheb.

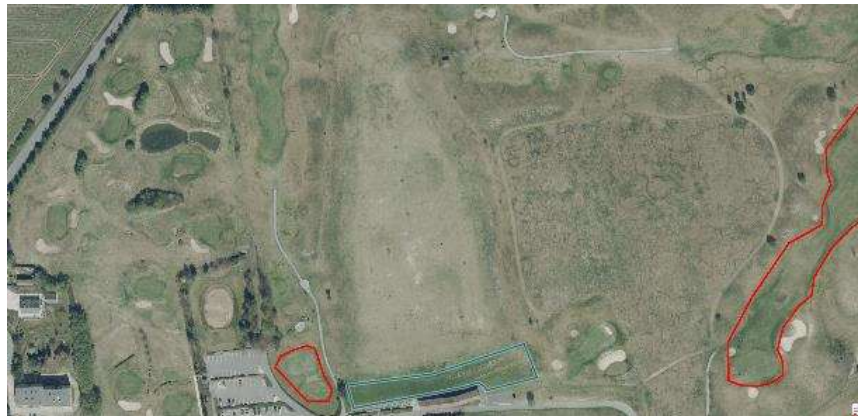
Závlaha golfového hřiště je významná z důvodu zajištění kvality trávníků a požadované estetiky hřiště. Zálivku, ale i pravidelné hnojení a pískování vyžadují zejména exponované greeny. Golfové hřiště jsou proto často jedním z největších odběratelů závlahové vody v intravilánech. Velká množství závlahové vody vyžadují ekonomicky únosné vodní zdroje (voda povrchová, průmyslové vodovody, případně voda podzemní) a v poslední době se většina systémů pokouší precizněji využívat i vodu srážkovou. Kluby reagují na zvyšující se vodní deficit vlivem klimatické změny i růst cen za vodu. Úspora závlahové vody je na hřišti zajišťována především rovnoměrností zavlažení hracích povrchů (využitím optimálních sponů postřikovačů) a správnou velikostí a rozdělením závlahových dávek, a výhradně nočním

T A Č R

(respektive pozdně večerním) provozem závlahy. V metodice výpočtu potřeby vody pro závlahu golfových hřišť byly vyznačeny nejen plochy prokazatelně zalévané, viz obr. 5, ale také viditelné plochy hřiště, na nichž zatím ani závlahový systém nemusí být vybudován. Určení řady ploch se na hřištích jeví jako problematické. Například cvičné odpaliště je poměrně velkou plochou na golfových hřištích a na Obr. 3-18 a Obr. 3-19 je vidět obtížné a neregulární vymezení závlahy těchto ploch.



Obr. 3-19: Cvičná louka Golf Club Poděbrady.



Obr. 3-20: Cvičné odpaliště Golf Beřovice, okres Kladno.

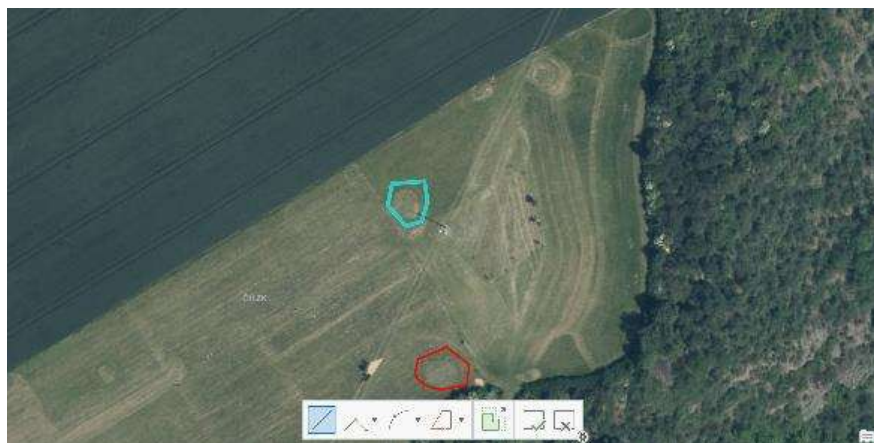
Potíže působila neexistence typického uspořádání prvků, viz následující obrázky od jednoduchých GH Hrádek (Obr. 3-22) u Nechanic po komplikované Albatross Golf Resort (Obr. 3-24).



Obr. 3-21: Zavlažované pískové bunkery GH Kunětická Hora.



Obr. 3-22: Jednoduché Golfové hřiště Hrádek u Nechanic.



Obr. 3-23: Golf Snail Klub Úholičky.



Obr. 3-24: Vyznačení potenciálně zavlažovatelných ploch Albatross Golf Resort.



Obrázek 3-21: ukázka hřiště, značná odlišnost mezi vymezenými hracími plochami a „zalévanou“ zelenou plochou



Obrázek 3-22: Ukázka rozdílu mezi zavlažovanou a nezavlažovanou plochou

Metodika stanovení potřeby závlahové vody.

Velká množství závlahové vody zde vyžadují ekonomicky únosné vodní zdroje. Ve světě je běžnou praxí, že golfový areál musí mít vybudovanou akumulaci nádrží, dostatečně kapacitní na celou sezónu. K závlaze se využívá voda povrchová, průmyslové vodovody, voda srážková a případně i voda podzemní. V poslední době, kdy je vyvíjen tlak na úspory závlahové vody z důvodu nedostatku vodních zdrojů, se většina systémů pokouší precizněji využívat i vodu srážkovou nebo recyklovanou. Kluby tak reagují na zvyšující se vodní deficit vlivem klimatické změny i růst cen za vodu. Podle článku [2], Sláma, 2018 bylo provedeno posouzení klimatických charakteristik a po provedené analýze bylo potenciálním suchem a negativní hydrologickou bilancí ohroženo cca 18 % golfových hřišť na území ČR. Samotný zavlažovací systém a následné provozní náklady (platby za závlahovou vodu) jsou jednou z nejdůležitějších a také největších položek výstavby a provozu golfového hřiště. Zavlažovací systém musí být důkladně navržen, pečlivě instalován (proti únikům závlahové vody) i optimálně provozován pro každou unikátní plochu, aby byla zajištěna jeho správná funkce i efektivita. Pro dosažení maximálních úspor musí být závlaha dodávána v optimálním množství, ve správných intervalech i ve správném čase.

V rámci moderních trendů úspory závlahové vody se zohledňuje hospodaření se srážkovou vodou, zavlažují se pouze plochy s pískovým podložím (jamkoviště a odpaliště), nebo se využívá suchomilných travních směsí a omezuje se zavlažovaná plocha roughu. Zajištění optimálního stavu trávníku drah se řeší bez využití závlahového systému, využitím optimálního druhu trav, zvládajících delší bezsrážková období nebo jsou šlechtěny trávníky kořenící do větších hloubek. Tato opatření napomáhají snížení nákladů za odběr vody a zároveň zlepšují vodní bilanci v krajině.

Například golf Hostivař. Díky delším dobám provozu hřišť 10-20 let je mikroklimatický přínos dlouhodobý, i s ohledem na častější výskyt suchých let. (viz Obr. 3-25).



Obr. 3-25: Golf Club Hostivař, intravilán Prahy 15.

Jak již bylo řečeno, doporučené množství závlahové vody na jednotlivé prvky hřiště se liší podle druhu prvku (odpaliště, dráha, jamkoviště atd.), podle klimatu (teplota, úhrn srážek, vlhkost vzduchu a rychlosti větru), ale také podle půdních vlastností, oslunění ploch, parametrů travního porostu a dalších. Obecné hodnoty závlahových množství trávníků pro golfová hřiště v ČR, empiricky zjištěné na základě dlouholetých zkušeností, jsou udávány například v příloze N v ČSN 75 0434, viz tabulka XX [7].

Pro letní dny, s teplotami nad 25 °C: je doporučováno závlahové množství pro fairwaye cca 20 mm/týdně (nejméně, neboť travní porost zde koření v rostlém terénu a je umožněna kapilární vztlínavost vody), pro odpaliště cca 25 mm/týdně a pro jamkoviště 35 mm/týdně (neboť greeny, a částečně i odpaliště, mají extrémně propustný půdní profil). Se vzrůstající teplotou potřeba vody stoupá a závlaha je často dodávána dvoufázově. Dodávky závlahové vody závisí také na výšce sečení trávníků, standardní hodnoty se udávají 4 mm pro greeny, 10 mm pro tee, forgreen (límeč jamkoviště) a 15 mm pro fairwaye. V horkých dnech jsou výšky sečení často upravovány na vyšší hodnoty k omezení evapotranspirace, nebo se ponechává ochranná biomasa jako mulčování.

Tabulka XX: Příloha N, zjednodušená metodika výpočtu závlahy.

Tabulka N.1 – Návrhové týdenní závlahové množství mm/týden

Měsíc	Návrhové závlahové množství NMz mm/týden				
	Zahrady a parky (rostlý terén)	Fotbal	Sportovní plochy		
			Golf		
			Green (Jamkoviště)	Fairway (Dráha)	Tee (Odpaliště)
květen	20	20 až 25	40 až 45	15 až 18	20 až 25
červen	20 až 25	25 až 30	45 až 50	18 až 20	25 až 30
červenec ^a	20 až 25	25 až 35	50 až 70	18 až 25	30 až 35
srpen	20 až 25	25 až 30	50 až 60	18 až 20	30
září	15	15 až 20	35 až 40	15	25
říjen	10	15	30 až 35	10	15

^a Maximální návrhové týdenní závlahové množství NMz_{max}.

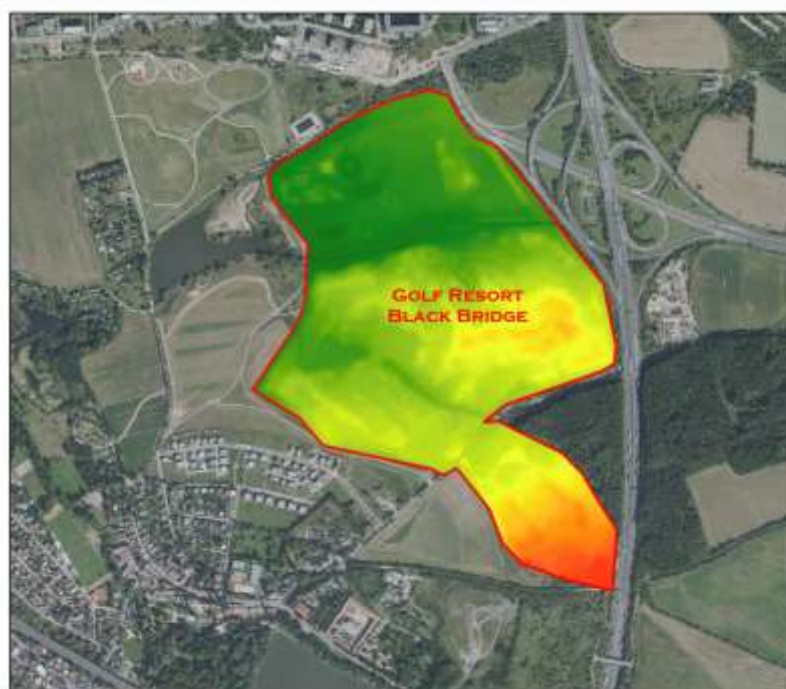
Tabulka 3-1: Orientační závlahové dávky pro prvky golfových hřišť. (nevím odkud hodnoty jsou)

Hrací prvek	Orientační závlahová (mm)	denní dávka
Odpaliště	2,5	
Dráha	1,5	
Jamkoviště	3,5	
Cvičné odpaliště	2	
Cvičné jamkoviště	3,5	

Pro vymezená hřiště v podkladové databázi bylo potřeba vytvořit zjednodušený odhad týdenního závlahového množství, pro jednotlivé druhy ploch (odpaliště, dráhy, jamkoviště).

Metodika stanovení potřeby závlahové vody byla vzorově vytvářena pro golfové hřiště Černý Most. Tento areál byl využit pro upřesnění ploch hřiště i pro základní ověření komplexní vodní bilance (potřeby závlahové vody). Osmnáctijamkové hřiště Golf Resort Black Bridge, viz obr. 16, se nachází na jihovýchodě Prahy na pomezí katastrálních území Horní a Dolní Počernice. Zasahuje do ochranného

pásma maloplošného chráněného území Xaverovský háj, které přímo sousedí s přírodním parkem Klánovice-Čihadla (Klánovický les) (10). Tento prostor tudíž figuruje v rámci Územního Systému Ekologické Stability, což mělo zásadní vliv na projektování na samotném hřišti a ve výsledku i na cenu stavby. Bylo nutné napojení hřiště na stávající ÚSES, zachování krajinného rázu i biodiverzity. Výstavba započala roku 2007 na ploše více než 75 ha přesunem velkého množství stavebních materiálů (zejména navážky) pro vytvarování terénu hřiště na území původní orné půdy. Navážka dosahuje místy až 10 m a původně vysázeno zde bylo cca 180 000 kusů keřové i stromové vegetace na celkové ploše 11 ha pro dva biokoridory ÚSES, pro přirozený průchod živočichů skrz plochy golfového hřiště a napomáhání zvyšování biodiverzity v krajině. K zahájení provozu hřiště došlo 16. července 2011 a díky navážce se jednalo o velmi propustnou zeminu, která nedokáže účinně zadržovat vodu [9]. Větší část ploch, trávníků a výsadeb, proto bylo nutné zavlažovat a rovněž byl na hřišti vytvořen pokročilý systém odvodnění. Díky značnému převýšení (cca 40 metrů) je v nejnižší části hřiště akumulováno značné množství srážkové vody ze zpevněných ploch, a také vod průsakových, jímaných v terénních depresích. Tyto vody jsou sváděny do uměle vytvořených vodních nádrží. Nejvýznamnější z nich, Dolní rybník, je využíván jako jeden ze zdrojů vody pro závlahu.



Legenda

 Golf Resort Black Bridge

 Ortofoto

Výškopis Golfové
hráště Černý Most

Value

 262,67
224,76



Obr. 3-26: Výškopisná mapa hřiště Černý Most (M1:10 000),



Obr. 3-27: Výškopisná mapa hřiště Černý Most (M1:10 000),

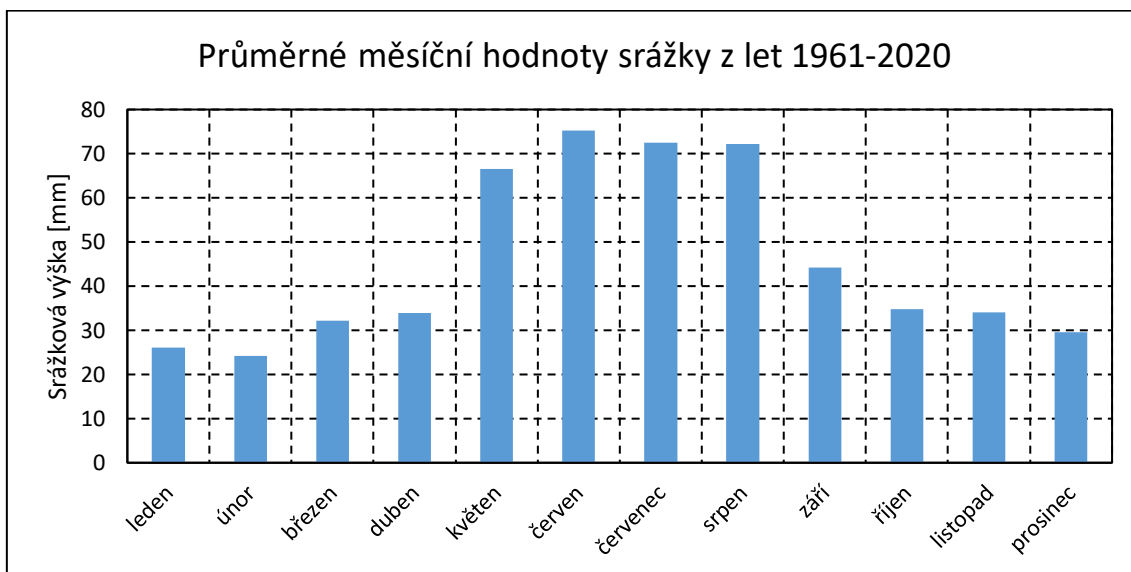
Pro toto vybrané hřiště byly vymezeny výměry základních herních ploch, viz tabulka č. 4. Odhad maximálního potřebného množství závlahové vody pro období letních teplot (cca 25–30 °C) a bezdeštného období, uvažoval závlahové dávky 1,5 mm pro dráhy, 2,5 mm pro odpaliště a 3,5 mm pro jamkoviště. Tabulka 4 pak uvádí potřeby závlahové vody pro jednotlivé plochy hřiště v letních dnech i celkovou denní potřebu vody. Sumy jsou přehledně zobrazeny v obr. č. 22. Výsledné hodnoty však nezahrnují vlivy počasí (srážky, výpar, vliv větru) a nedosahují tudíž požadované přesnosti. Hypotetické potřeby byly proto porovnávány s poskytnutými daty ČHMÚ a Soil Clim. Z nich byly zjištěny skutečné úhrny srážek, které dopadnou na plochu hřiště a na jeho zpevněné plochy, a následně byl stanoven podíl retence srážkové vody. Dále byl vypočten výpar, který snižuje účinnou závlahovou dávku, která je na hřiště aplikována. Zohledněn byl i vliv teploty vzduchu, která zvyšuje evapotranspiraci a zvyšuje tak potřebu závlahové vody. Stanovena byla celková potřeba závlahové vody v průběhu vegetačního období, ale i podíl srážkové a průsakové vody navracený do oběhu zavlažování hřiště. Výsledkem byla komplexní vodní bilance hřiště a skutečné objemy závlahové vody. Tato metodika byla poté aplikována na všechna hřiště uvedená v databázi.



Obr. 3-28: Celkový denní objem závlahové vody v letních bezdeštných dnech (dle jednotlivých jamek)

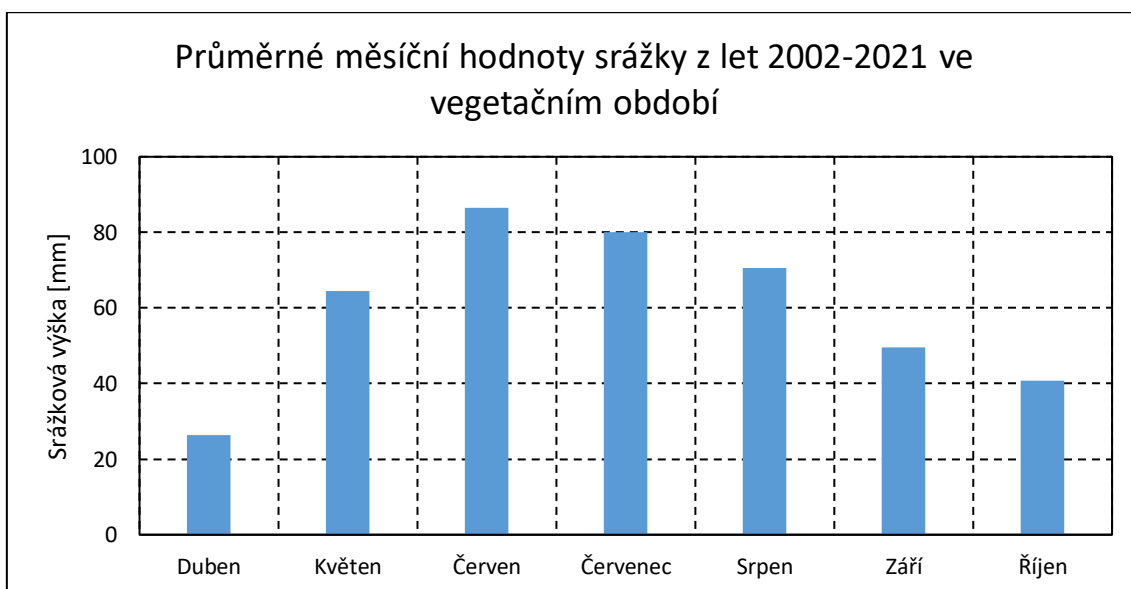
Dva různé datové soubory, které byly využity pro zpřesnění potřeby závlahové vody na golfovém hřišti Černý Most byly z databáze ČHMÚ (data z meteorologické stanice na hřišti) a vstupní hodnoty pro výpočetní model SoilClim. Srážková data byla z období 2002-2021 (celkem 20 let) v desetiminutových intervalech pouze ve vegetačním období (tzn. od 1. 4. do 31. 10.) a pro SoilClim (Model vyhodnocující agroklimatické aspekty a indikátory pro současné i v budoucnu očekávané klimatické podmínky a jejich změny) šlo o širokou škálu meteorologických dat na denní bázi pro výpočet referenční a aktuální evapotranspirace, vodní bilance, vlhkosti a teploty půdy a popis půdního klimatu.

Z uvedených dat byl pro srážková data v denních intervalech od 1. 1. 1961 do 31. 12. 2020 proveden výpočet, který byl následně porovnán s daty z meteorologické stanice Černý Most (databáze ČHMÚ). Z databáze SoilClim (denní intervaly naměřené průměrné denní relativní vlhkosti vzduchu (RH), maximální a minimální naměřené denní teploty a hodnoty průměrné denní rychlosti větru pro stejné období jsou vyhodnoceny na obrázcích 23-25.



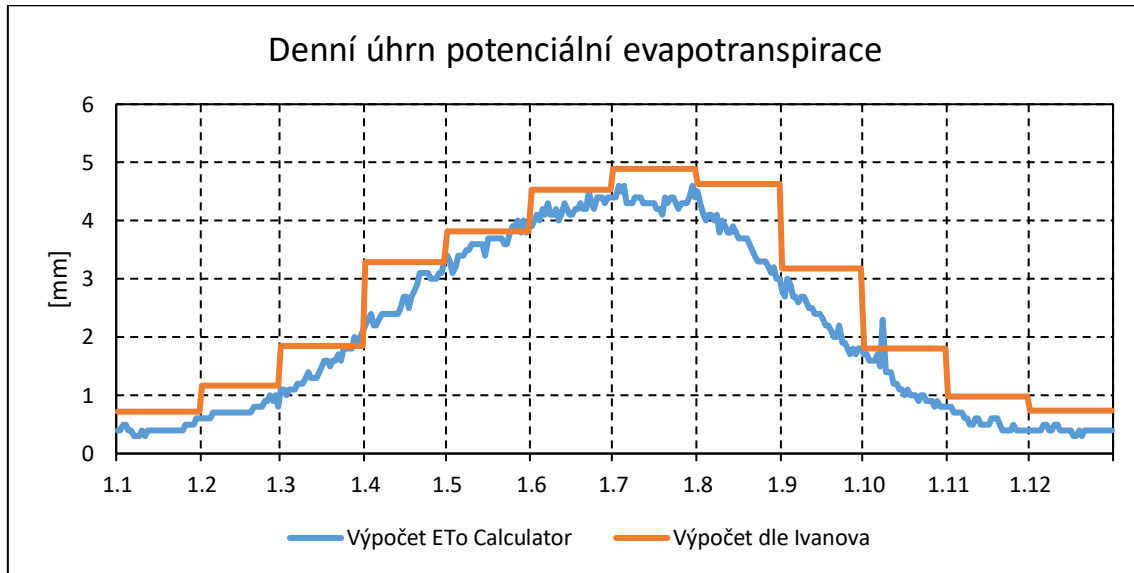
Obr. 3-29: Průměrné hodnoty srážkové výšky pro jednotlivé měsíce v období 1961-2020 (hodnoty z databáze modelu SoilClim).

Obrázky 23 a 24 srovnávají průměrné měsíční hodnoty srážek (SoilClim a ČHMÚ). Hodnoty naměřené v meteostanici nacházející se přímo na golfovém hřišti Černý Most za roky 2002-2021 jsou více rozkolísané a v červenci a srpnu dosahují mírně vyšších hodnot, nejsou ovlivněny historickými extrémy delší časové řady. Zohledňují tak výrazněji probíhající změnu klimatu. ČHMÚ databáze obsahovala pouze hodnoty naměřené během vegetačního období a hodnoty byly měřené v desetiminutových intervalech, mají proto vyšší relevanci pro výpočet.



Obr. 3-30: Průměrné hodnoty srážkových výšek pro jednotlivé měsíce vegetačního období 2002-2021 (hodnoty z poskytnuté databáze ČHMÚ).

Výsledkem výpočtu evapotranspirace programem ETo Calculator bylo celkem 366 průměrných hodnot denního úhrnu potenciální evapotranspirace pro každý den běžného roku. Výsledná data byla graficky porovnána s původním měsíčním výstupem viz následující obrázek.



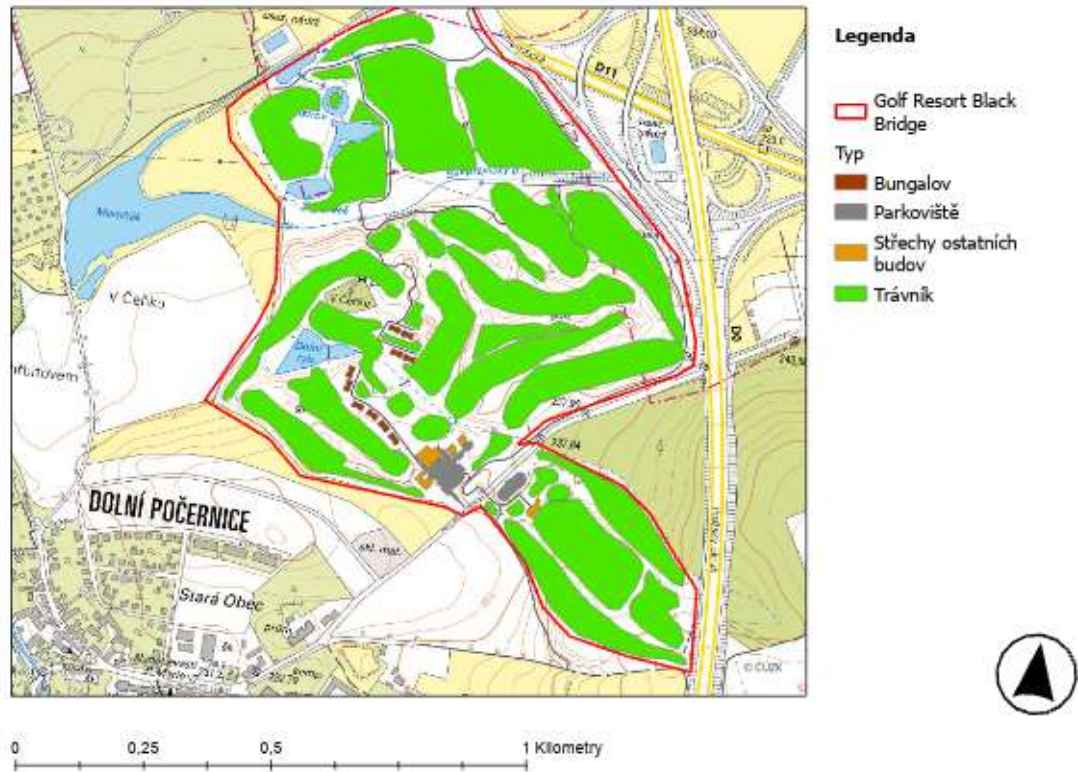
Obr. 3-31: Porovnání přesnosti hodnot potenciální evapotranspirace, vypočítané 2 různými metodami.

Veškerý povrchový odtok ze střech zde vyskytujících se budov je sveden do čističky odpadních vod, odkud vyčištěná voda proudí opět do Dolního rybníka pro další využití k závlaze. V následující tabulce je uvedena rozloha zpevněných i nezpevněných ploch, na kterých je tento povrchový odtok zachytáván.

Tabulka 3-2: Vymezení ploch zachytávajících povrchový odtok

Bungalovy	2300	m ²
Parkoviště	5900	m ²
Střechy ostatních budov	2720	m ²
Trávník	369870	m ²
Skutečně zavlažované plochy	235542	m ²
Zpevněné	10920	m²
Nezpevněné (Rough)	134328	m²
Celkem	145248	m²

Nezavlažování drah by mělo jednoznačně pozitivní vliv na zdejší vodní bilanci z hlediska významného snížení spotřeby vody. Podíl drah na celkové rozloze zavlažovaných ploch má významnou roli. Na tomto hřišti je zastoupeno z více než 69 %, viz následující obrázek. Během výpočtu bylo také zjištěno, že voda pocházející ze zachyceného povrchového odtoku retenčními prvky má poměrně významný podíl na celkové spotřebě vody pro závlahu. Toto tvrzení dokumentuje tabulka č. 10.



Obr. 3-32: Schéma retence povrchového odtoku (M1:7 500)

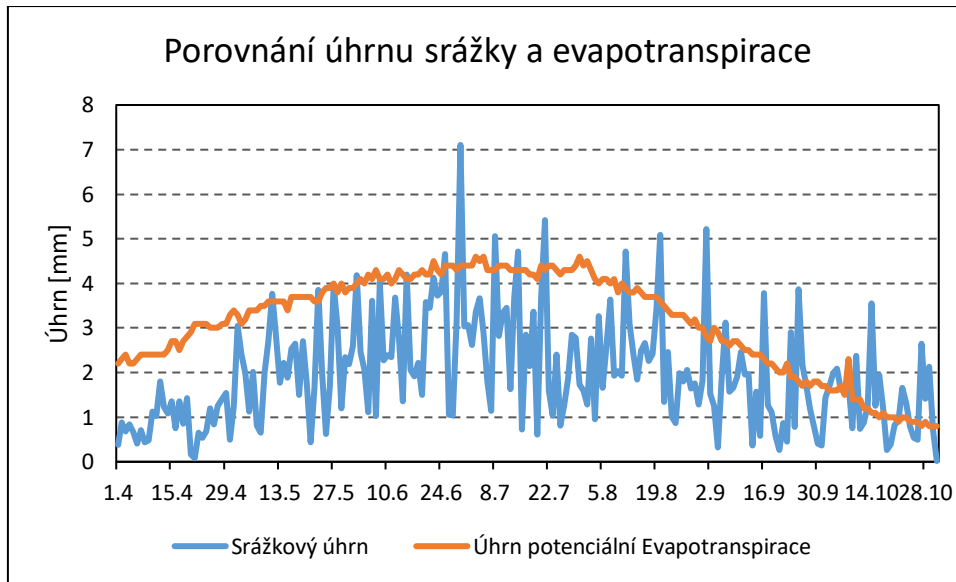
Pro výpočet vodní bilance byly zpevněné a nezpevněné plochy přenásobeny koeficienty. Hodnota **1** byla použita pro plochy zpevněné a součinitel **0,4** byl uvažován pro plochy nezpevněné (zemní násep s hlinito-písčitou půdou). Součinitel vyjadřuje podíl srážkového úhrnu, který se při srážkové události ve formě povrchového odtoku zachytává příslušným odvodňovacím systémem a na tyto plochy byl aplikován vypočtený srážkový úhrn.

Z výsledných denních hodnot byly pro zpracování deficitů uvažovány pouze záporné hodnoty. Ty byly sumarizovány jako celkový měsíční vláhový deficit, který vyjadřuje množství vody, které je nutné na golfové hřiště dodat ve formě doplňkové závlahy. Hodnoty úhrnu srážky a úhrnu potenciální evapotranspirace v jednotlivých měsících udávají vláhovou bilanci (rozdíl úhrnu srážky a výparu z travních ploch. Viz graf na obrázku 33.

Tabulka 3-3: Statistika vodní bilance

Měsíc	Celková měsíční ztráta	Průměrná denní ztráta	Počet dní, ve kterých se zavlažuje
[-]	[m ³]	[m ³]	[-]
Duben	-10 969	-367	30
Květen	-8 022	-259	26
Červen	-6 891	-230	17
Červenec	-9 520	-307	23

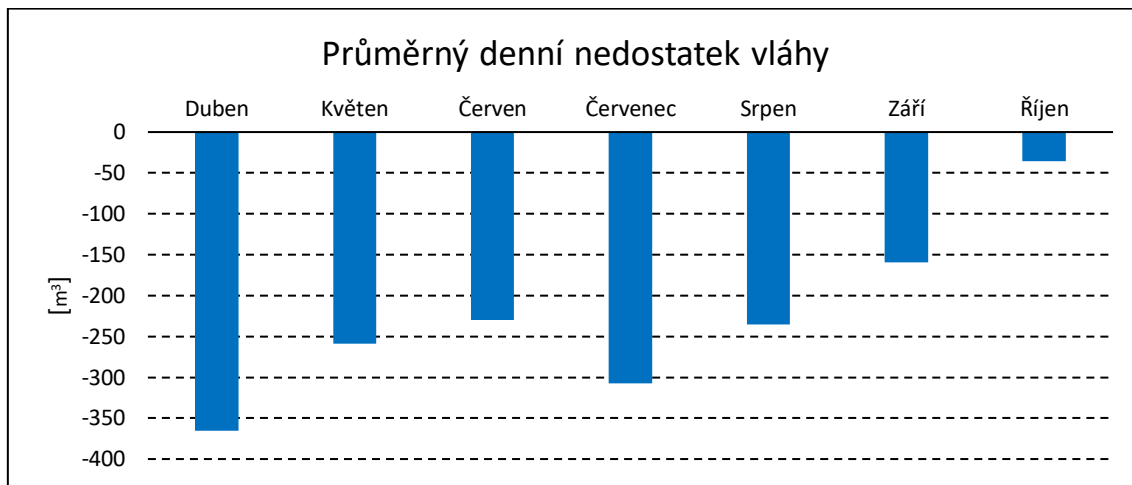
Srpen	-7 290	-235	25
Září	-4 777	-159	22
Říjen	-1 105	-36	10



Obr. 3-33: Porovnání srážkového úhrnu a úhrnu potenciální evapotranspirace .

Tabulka 3-4: Podíl retence na celkovém množství závlahy.

Měsíc	Podíl retence na závlaze
Duben	9 %
Květen	16 %
Červen	19 %
Červenec	16 %
Srpen	17 %
Září	20 %
Říjen	31 %



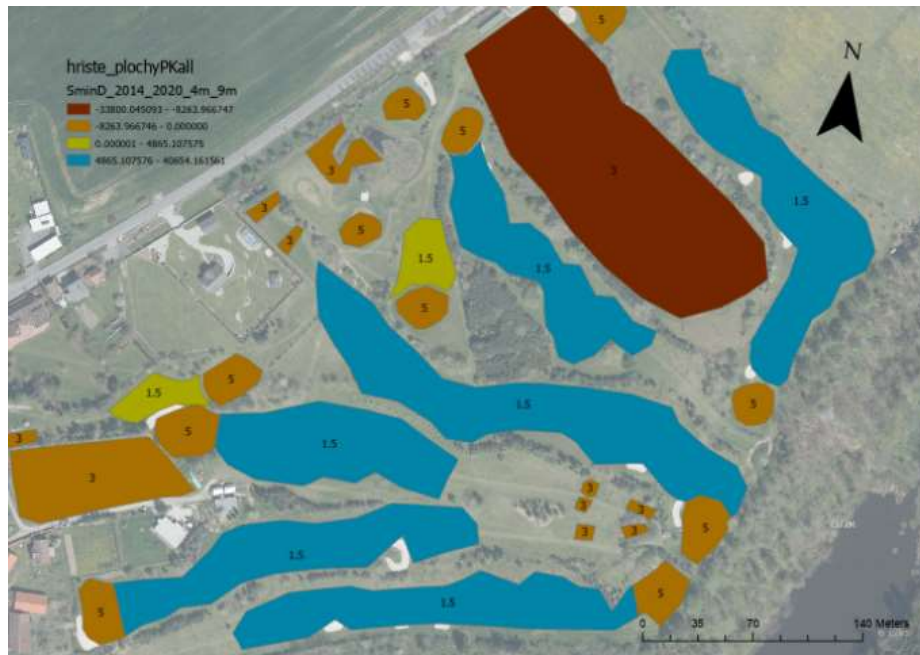
Obr. 34 Zjištěné průměrné vláhové deficity.

Vláhová bilance jednotlivých areálů

Na základě orientačních závlahových dávek, plošného vymezení jednotlivých povrchů je možné odhadnout objem vody pro závlahy jednotlivých areálů. Z hlediska vodní bilance je klíčové určení dvou charakteristik:

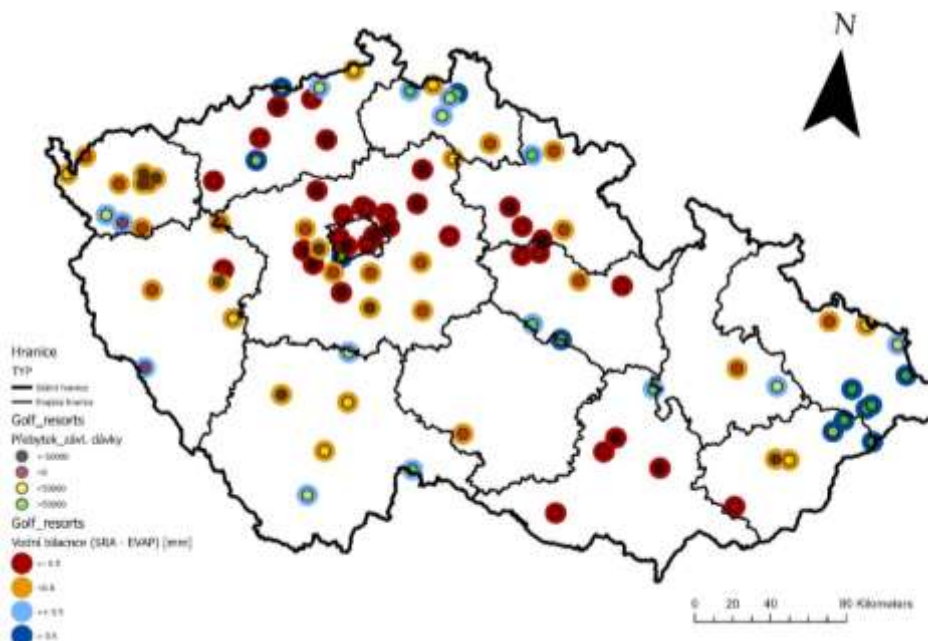
- Celkové vláhové bilance dané lokality
- Vodní bilance mezi srážkou a očekávanou závlahovou dávkou.

Celková vláhová bilance nebyla přímo řešena v tomto projektu, ale odvozené hodnoty denních průměrných srážek a evapotranspirace byla odvozena v rámci souběžně běžícího projektu „Centrum Voda“. Z těchto hodnot byla vypočtena vodní bilance v místech golfových areálů. Z tohoto parametru lze určit vláhový nedostatek či přebytek příslušného areálu. Vedle toho byl určen rozdíl mezi očekávanou a tabelární hodnotou průměrné denní dávky pro jednotlivé typy povrchu a průměrnou denní srážkou. Z tohoto parametru je možné určit, zdali a kde je tato průměrná tabelární (manuálová) hodnota denní dávky nadbytečná a kde zle naopak předpokládat vyšší průměrné denní odběry vody pro závlahy. Na ukázce vybraného golfového areálu je pak zobrazena bilance jednotlivých zavlažovaných ploch.



Obrázek 3-23: Ukázka rozdílu mezi srážkou a závlahovou dávkou konkrétního areálu. Červená a oranžová, nedostatek s vyznačeným objemem a žlutá a modrá nadbytek

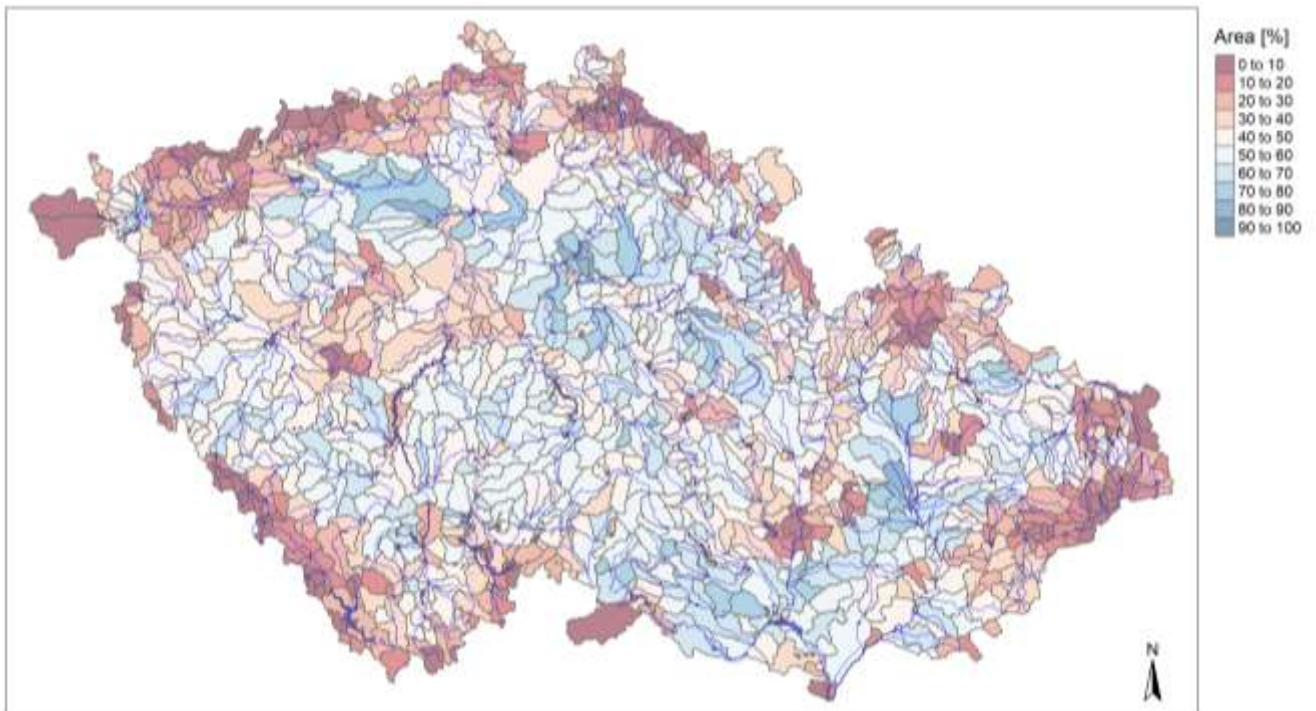
Hodnoty pro jednotlivé golfové areály byly sumarizovány a jsou zobrazeny na následujícím obrázku. Na kterém jsou vyznačeny pomocí soustředných kružnic charakteristiky příslušné lokality z hlediska vodní bilance za letní měsíce – vnější kružnice. A rozdíl mezi srážkou a závlahovou dávkou. Z této hodnoty pak byl sumarizován celkový objem vody nutné pro závlahu areálu, což značí potenciální větší nároky, než je uvedeno v tabulce 2.3 anebo nadbytek.



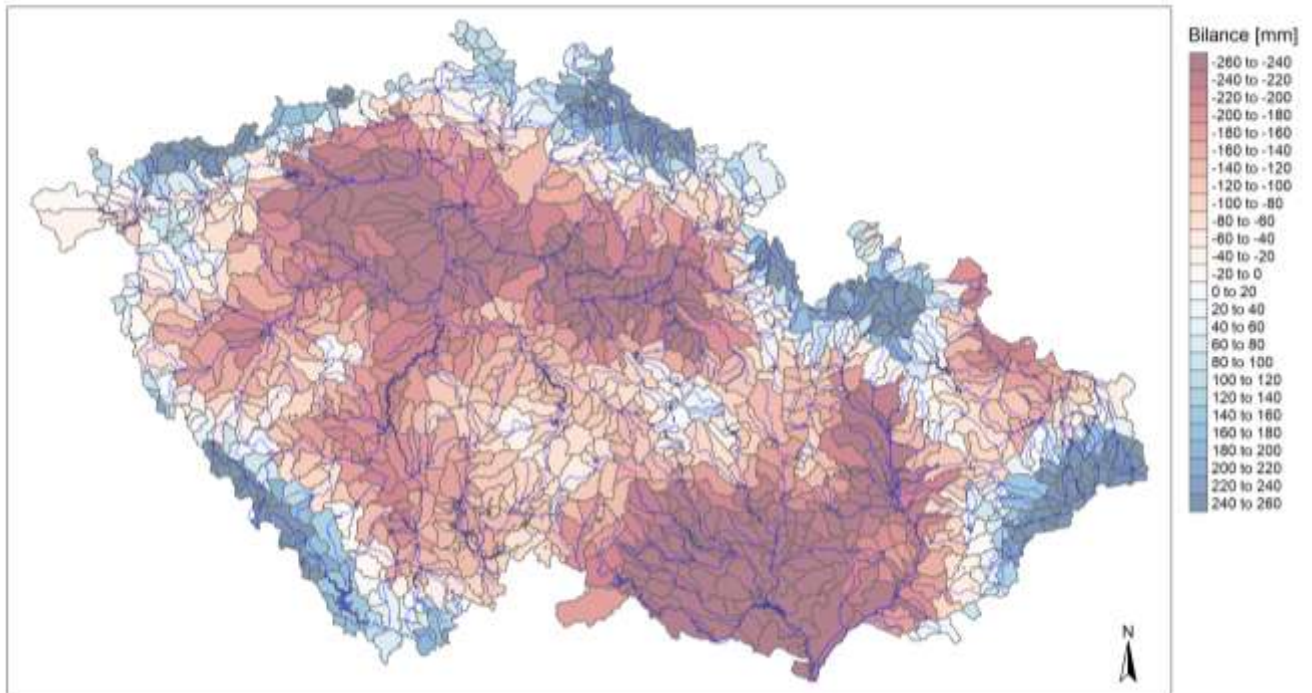
Obrázek 3-24: mapa ČR s vyznačenými areály a jejich vodní bilancí a velikostí závlahové dávky

3.2.3 Zavlažovatelná území

Pro výsledné stanovení potřeb zavlažovaných ploch byla využita databáze LPIS a z ní odvozená plocha obdělávaných a tím teoreticky zavlažovatelných pozemků, bez kategorií TTP, les na orné atp., viz Obr. 3-34, který popisuje poměr zavlažovatelných ploch v rámci jednotlivých UPOV. Tyto plochy se v rámci výpočtu modelem WATERES zavlažovaly průměrnou výškou závlahy dle jednotlivých scénářů na potřebu vody pro závlahy. Na Obr. 3-35 je uvedena klimatologická vodní bilance za celý rok pro období 1991-2020. Na obrázku lze pozorovat klasické deficitní oblasti, ve kterých se zároveň vyskytují oblasti, kde existuje, historicky existovala nebo se uvažuje o závlahách.



Obr. 3-34: Poměr zavlažovatelných ploch v jednotlivých UPOV



Obr. 3-35: Průměrná roční klimatologická vodní bilance za období 1991-2020

3.3 Modelování hydrologické bilance a disponibilní vodní zdroje

Pro modelování hydrologické bilance byl využit model BILAN (bilan.vuv.cz) na modelování hydrologické bilance k simulaci neovlivněné (přirozené) odtokové podmínky, pro další simulace modelem bylo využito kalibrační nastavení modelu, které využívá systém HAMR, výpočetní jednotkou pro simulace jsou vodní útvary povrchových vod. Výstupy z modelu (odtokové výšky) byly využity pro simulace modelem vodohospodářské bilance WATERES.

Model počítá v denním či měsíčním časovém kroku chronologickou hydrologickou bilanci povodí či území. 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 bilance energie, která hydrologickou bilanci významně ovlivňuje, je použita průměrná 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.

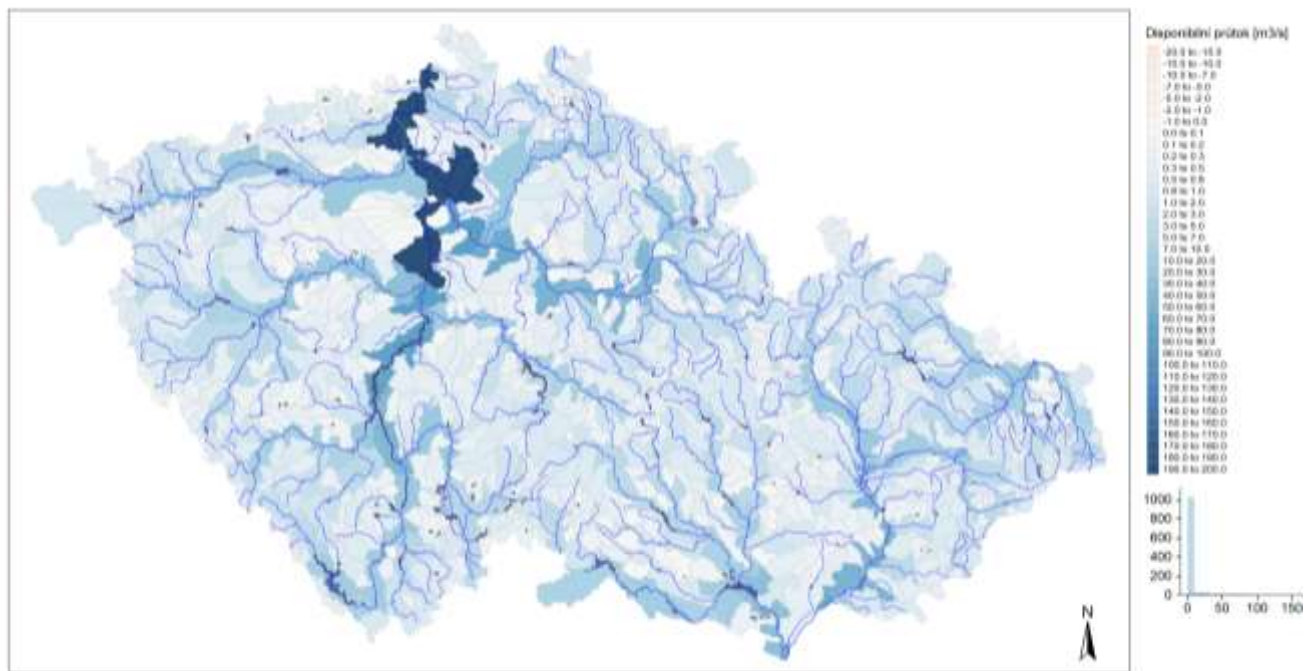
Vstupem do modelu jsou denní či měsíční veličiny:

- srážkové úhrny (mm)
- průměrné teploty (°C)
- průměrná vlhkost vzduchu (%)
- pozorované odtokové výšky (mm)
- užívání vody (odběry, vypouštění)
- potenciální evapotranspirace (mm)

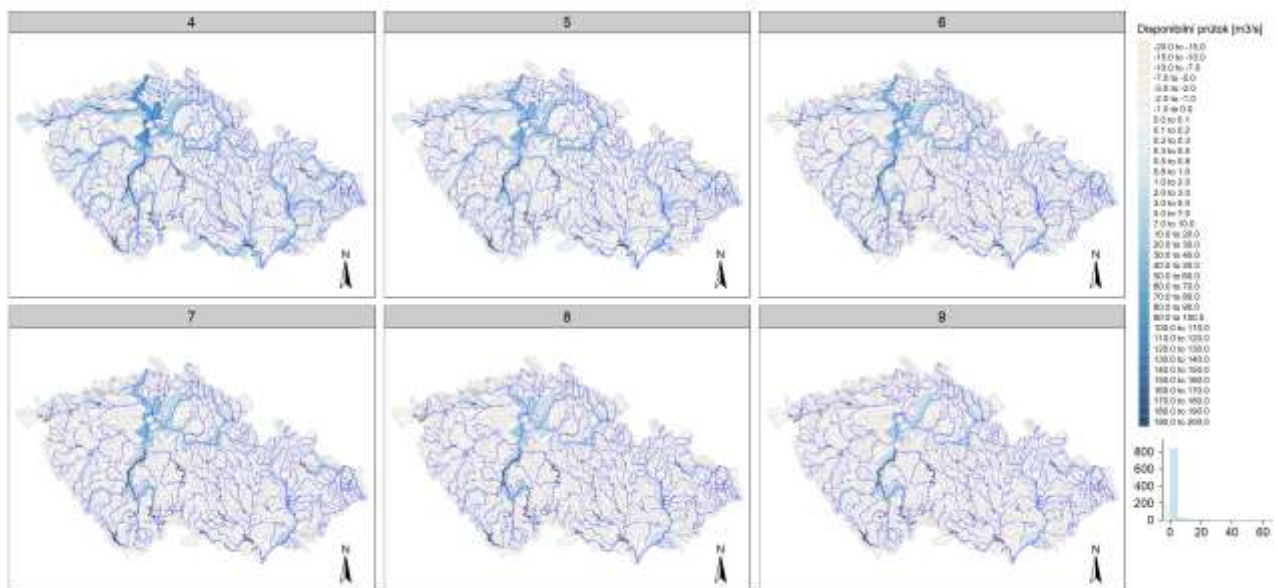
T A Č R

Na systém SoilClim (definující vlahovou potřebu) a hydrologický model Bilan navazuje zjednodušený model říční sítě a nádrží WATERES. Model WATERES je vodohospodářský model vyvinutý ve VÚV TGM, v. v. i., v Praze a je zaměřený na výpočet charakteristik a provádění simulací na vodních nádržích. Model WATERES lze využít k výpočtu dlouhodobé vodní bilance nádrží a vodohospodářských soustav, charakteristik vodních nádrží a odhadu účinnosti vodní nádrže, nedostatkových objemů (pro posouzení sucha) v povodí nádrže a vodohospodářské soustavy a transformace povodňových vln. Obdobná kaskáda modelů je využita v rámci systému HAMR.

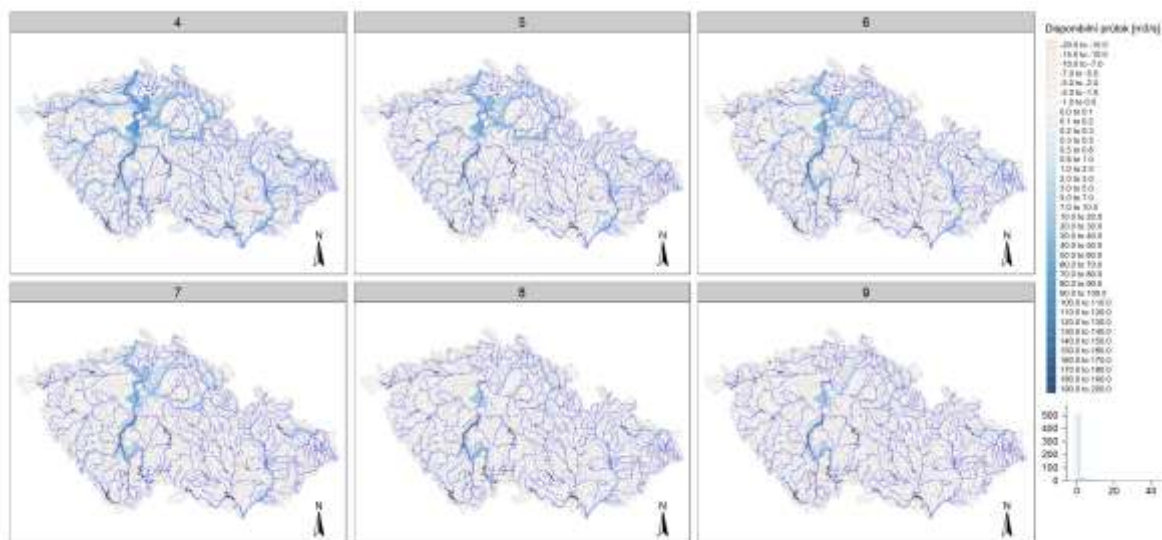
Na Obr. 3-36 jsou zobrazeny průměrné disponibilní zdroje za období 1991-2020 se současnými potřebami pro závlahy. Výpočet probíhal v denním časovém kroku a lze tedy pro jednotlivé vodní útvary definovat například disponibilní vodní zdroje pro pětileté či desetileté sucho, které jsou zobrazeny na Obr. 3-37 a Obr. 3-38. Jednotlivé kvantily byly vypočteny také pro zvýšenou potřebu závlah i dle scénářů klimatické změny.



Obr. 3-36: Disponibilní vodní zdroje, průměrná hodnota za referenční období 1991-2020



Obr. 3-37: Disponibilní vodní zdroje (20% kvantil reprezentující pětileté sucho) ve vegetačním období, průměrná hodnota za referenční období 1991-2020

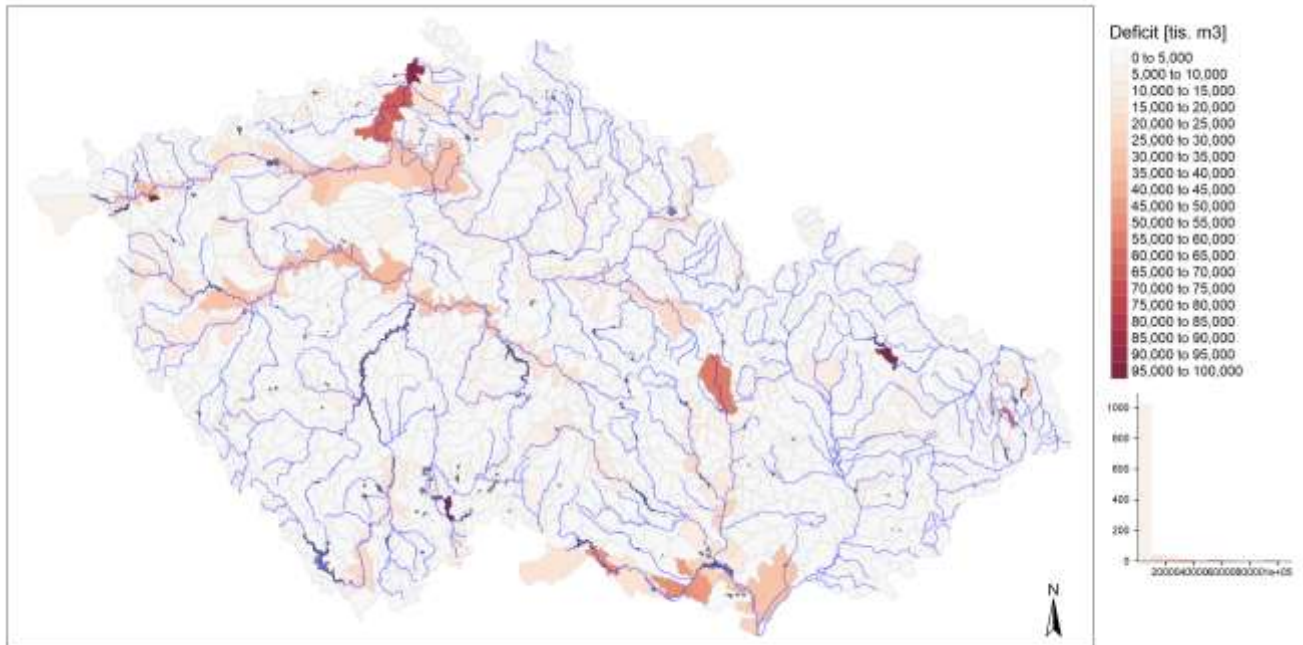


Obr. 3-38: Disponibilní vodní zdroje (10% kvantil, reprezentující desetileté sucho) ve vegetačním období, průměrná hodnota za referenční období 1991-2020

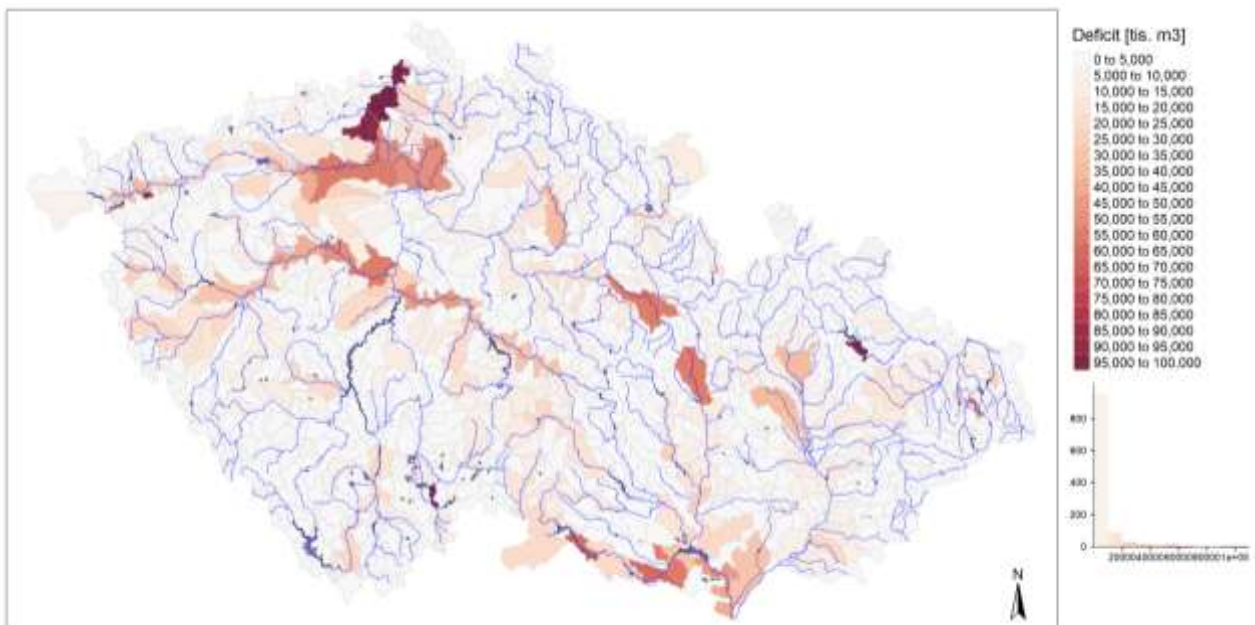
Analogicky jako disponibilní zdroje byly vyhodnoceny deficitní objemy v jednotlivých UPOV. Na Obr. 3-39 jsou uvedeny průměrné deficity se současným nakládáním (dle vodního zákona¹) za suchý rok

¹ Pro potřeby vodní bilance je ten, kdo je podle § 10 odst. 1 nebo 2 povinen měřit množství vody, se kterou nakládá, a dále ten, kdo má povolení k vypouštění odpadních vod nebo vypouští důlní vody do vod povrchových nebo podzemních v množství přesahujícím v kalendářním roce 6000 m³ nebo 500 m³ v kalendářním měsíci, povinen jednou ročně ohlašovat příslušným správcům povodí údaje o tomto nakládání nebo vypouštění způsobem a v rozsahu, který stanoví Ministerstvo zemědělství ve spolupráci s Ministerstvem životního prostředí a Ministerstvem zdravotnictví vyhláškou.

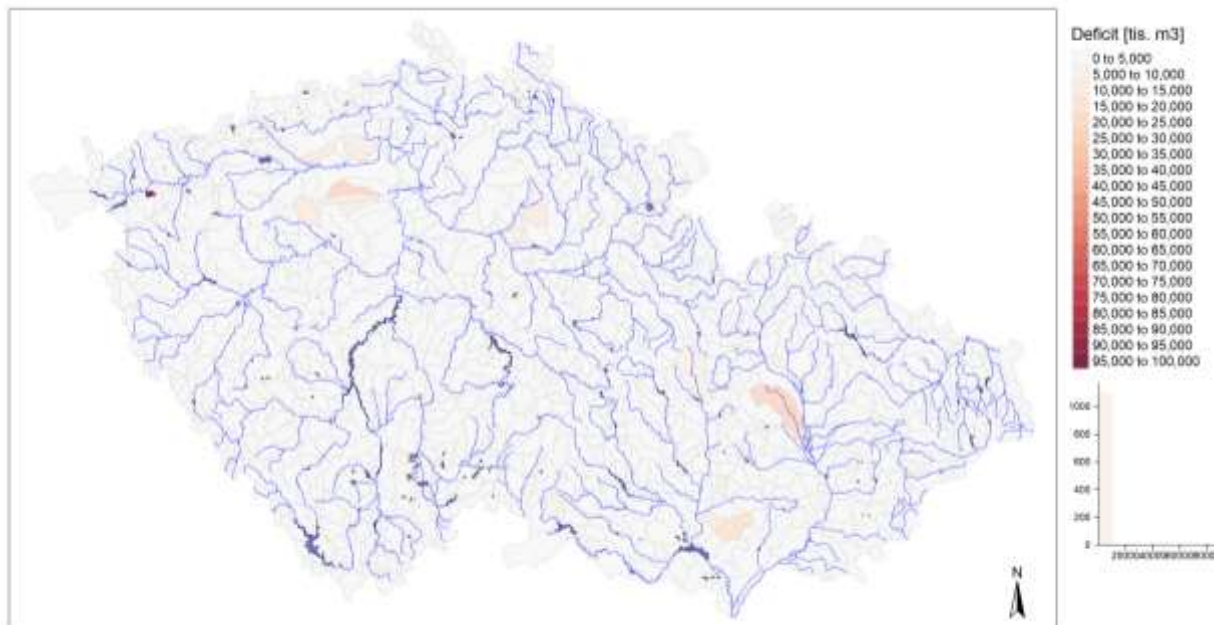
2018. Obr. 3-40 potom deficity, pokud se uvažuje se zvýšenou potřebou pro závlahy a na Obr. 3-41 deficity, pokud je nadprůměrná vodnost.



Obr. 3-39: Průměrné deficitní objemy pro současné závlahové potřeby za období 1991-2020



Obr. 3-40: Průměrné deficitní objemy pro navýšené závlahové potřeby za období 1991-2020



Obr. 3-41: Deficitní objemy pro vodné roky a se zvýšenou potřebou závlah za období 1991-2020

Výstupy z modelování hydrologické bilance modelem BILAN a WATERES pro současné a výhledové podmínky byly podkladem pro databázi RIGH (shiny.vuv.cz/RIGH).

4 Vývoj klimatických scénářů

Cílem této části projektu byla příprava klimatických scénářů nejprve pro vybrané pilotní lokality a následně pro celou ČR. Metoda vychází z kombinace Globálních a regionálních klimatických modelů. Globální klimatické modely (GCM) jsou matematické modely cirkulace atmosféry a oceánu a jsou základním nástrojem pro pochopení klimatu a jeho vývoje v minulosti i do budoucnosti. V průběhu posledních 50 let vývoje GCM tyto modely získaly schopnost simulovat nejen samotnou cirkulaci atmosféry či oceánu, nýbrž děje spjaté s kryosférou, zemským povrchem, vegetací na souši či biochemií oceánu. Současná generace GCM, která byla použita v poslední hodnotící zprávě IPCC AR5, bývá též nazývána jako Earth System Model (ESM). Z důvodů vzrůstající komplexity GCM – ESM rovněž rostou i výpočetní nároky těchto modelů na počítačovou techniku, a proto i dnes zůstává horizontální prostorové rozlišení výpočetní sítě těchto modelů velmi hrubé, cca okolo 100 km či více. To znamená, že GCM modely nejsou stále dobře schopny postihnout všechny procesy v klimatickém systému, které se odehrávají na jemnější prostorové škále. Území České republiky stále zůstává v GCM representováno jako severní předhůří či svah Alp. Tato nedokonalá representace vede k hledání dalších cest, jak získat informaci o simulovaném podnebí na regionální či lokální úrovni.

4.1 Validace modelů a jejich výběr

Jednou z cest „zjemnění“ GCM je tzv. „dynamický downscaling“, neboli zpřesnění výpočtu GCM na menším území pomocí regionálního klimatického modelu (RCM). Tento přístup je analogií cesty používané v numerické předpovědi počasí, kdy předpověď z globálního modelu je dále modifikována jiným předpovědním modelem nad omezenou oblastí (např. střední Evropa) a na krajích této oblasti lokální model přebírá informaci z modelu globálního. Horizontální prostorové rozlišení RCM se za posledních cca 15 let zlepšilo ze zhruba 50 km až na jednotky kilometrů. Samotné vyšší rozlišení modelu nejen lépe postihne procesy spjaté se zemským povrchem, ale především zlepší zastoupení tzv. klimatických extrémů v simulovaných datech. Simulace současné generace RCM, které byly vypracovány pro Evropu v rámci evropské části celosvětového CORDEX experimentu, nabízí rozlišení 12,5 km. Jak již bylo naznačeno, síla a univerzálnost poskytované informace z klimatických modelů spočívá v co možná nejpřesnější možné reprodukci fyzikálních a fyzikálně biologických procesů, které probíhají v přírodě. Je nasnadě, že vzhledem k různým formulacím výpočtů (včetně jejich přesnosti) v jednotlivých modelech a dalších odlišnostech např. v časovém a prostorovém rozlišení se pak výstupy modelů vzájemně liší, často i velmi významně.

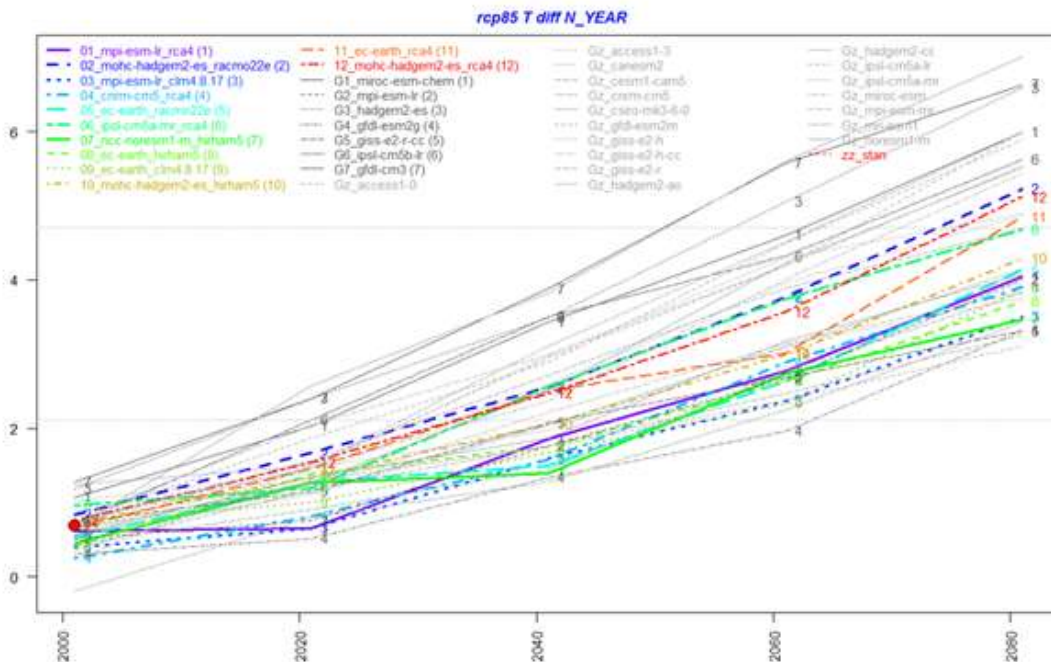
Před samotnou analýzou modelových výstupů byly z řad odstraněny chyby modelu, tedy byla provedena tzv. korekce biasu. Výstupy jednotlivých klimatických modelů byly nejprve validovány pomocí měření na stanicích, na základě tohoto porovnání byla poté provedena korekce aktuálního biasu daného modelu, a to pro všechny zpracovávané meteorologické prvky (klimatické charakteristiky). Korekce na chybu modelu (bias) se provádí proto, aby modelové výstupy odpovídaly realitě zkoumaného území, přičemž v prvním kroku jsou porovnány výstupy modelů v kontrolním běhu se skutečnými naměřenými údaji. Po korekci jsou vypočteny stejné klimatické charakteristiky jako pro současné klima. Výstupy modelů byly dále interpolovány do gridové vrstvy s rozlišením 500 m pro vyhodnocení prostorového rozložení zkoumaných veličin.

Bylo využito 27 globálních klimatických (GCM) modelů z CMIP5 ansámbly, jejichž měsíční data vybraných základních meteorologických prvků (teplota, srážky, vítr, tlak) pro tzv. „historický kontrolní běh“ (minimálně 1971-2005) a projekci klimatu dle RCP8.5 scénáře (2006-2100) byla dostupná na

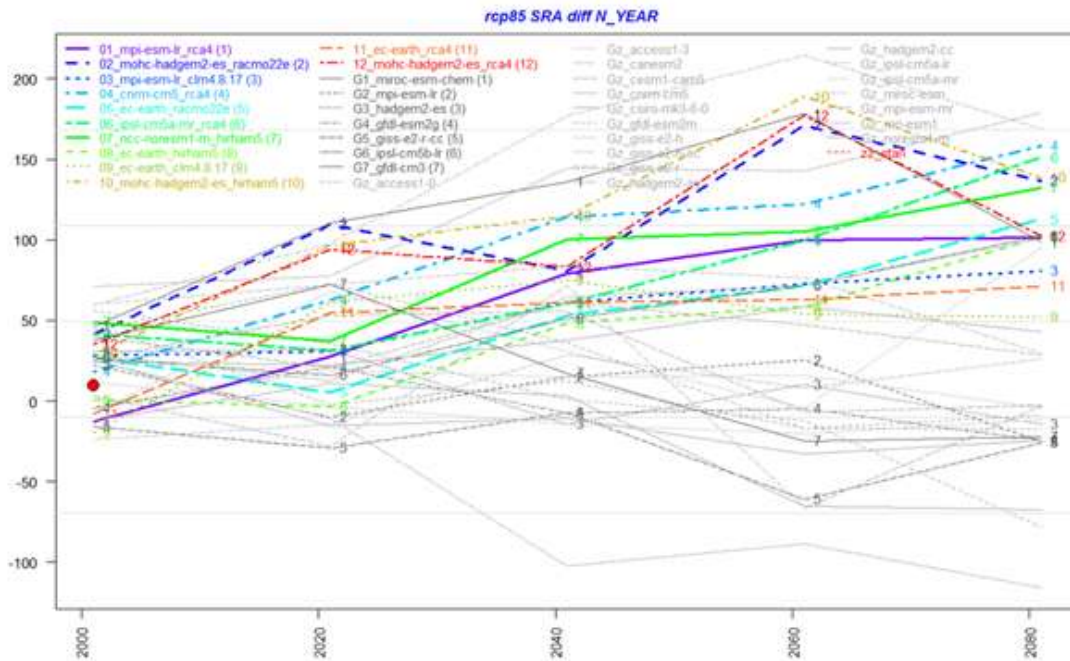
přelomu let 2018 a 2019 na datových nódch Earth System Grid Federation (ESGF) anebo v databázi World Data Center for Climate (WDCC) hostované v German Climate Computing Center (DKRZ) v Hamburku.

Podobným způsobem jako GCM budeme v projektu využívat celkem 19 simulací regionálních klimatických modelů (RCM) o vysokém prostorovém horizontálním rozlišení 0,11 stupně (~ 12,5 km), u nichž byla dostupná denní data pro „historický kontrolní běh“ (minimálně 1971–2005) a projekce budoucího vývoje klimatu (2006–2100) dle alespoň jednoho RCP scénáře. Výběr odpovídá dostupnosti zmíněných dat v závěru roku 2018 na datových nódch Earth System Grid Federation (ESGF).

Ukázku rozpětí modelů pro odhad očekávané teploty prezentují následující obrázky (Obr. 4-1) a v případě srážek Obr. 4-2.



Obr. 4-1: Rozdíl budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a současného (1981–2010) klimatu pro teplotu vzduchu (ve °C), pro GCM (šedě) a RCM (barevně) simulace jako průměr pro pilotní lokality. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018



Obr. 4-2: Rozdíl budoucího (20letí postupně od roku 2001, označeno počátkem daného období) a současného (1981–2010) klimatu pro srážkové úhrny (v mm), pro GCM (šedě) a RCM (barevně) simulace jako průměr pro pilotní lokality. Červenou tečkou jsou znázorněna měření na stanicích pro období 2001–2018

Na základě nepřímé validace existujících scénářů založených modelech RCM EUROCORDEX vedla k návaznému využití scénářů odvozených pomocí pokročilé delta metody, a to na základě kombinace ansámblů z databází CMIP5 a CMIP6. Použitý postup umožní testování a odhad budoucího vývoje ve stávajícím prostorovém rozlišení modelu Soubor simulací globálních klimatických modelů projektů CMIP5 a CMIP6, které jsou zpracovány pomocí pokročilé přírůstkové metody a dále interpolovány do 500 m sítě, kterou využívá model SoilClim, na který navazuje v měřítku útvarů povrchových vod hydrologický model Bilan a vodohospodářský model Wateres. Finální scénáře jsou připravovány rámci jiných výzkumných projektů (přesahující rámec tohoto projektu) do kterých jsou zapojena řešitelská pracoviště ČZU a AVGZ.

Po dokončení přípravy sklenářových dat pro odhad dopadů změn klimatu na závlahy, v kterých byly posuzovány odhady na základě globálních (GCM) a regionálních modelů (RCM). V případě obou ansámblů modelů vidíme rozdílné změny průměrné měsíční teploty vzduchu v poslední čtvrtině 21. století **dle scénáře RCP8.5** a to především **v období červen až září, kdy oteplení u GCMs je o 1 až 1.4 stupňů intenzivnější.** Tento **rozdíl je částečně podmíněn vysokým nárůstem teploty v GCM MOHC** (až +9 stupňů v létě). Ovšem i v případě, že tento konkrétní GCM vynecháme a podobně u RCM ansámblu vynecháme dvě simulace řízení právě tímto GCM, je oteplení u GCMs v období červen až září o cca 0.7 stupně výraznější. V ostatních měsících roku (tedy hlavně mimo vegetační sezónu) jsou rozdíly mezi GCM a RCM ansámblem v rámci menších desetin stupně K. V řešení této části byly aplikovány znals, s využitím poznatků získaných v projektech SustES a AdaptDyje.

Tabulka 4-1: Ansámbl vstupních dat modelu RCP

4.9	3.7	6.1	3.7	3.0	4.3	3.4	3.6	3.4	5.4	4.9	3.4	3.7	4.5	3.5	4.0	4.1
5.2	5.1	4.8	3.9	3.4	4.5	3.5	3.2	3.8	4.5	6.0	4.2	5.5	4.0	4.0	4.3	4.6
3.3	4.1	4.4	3.2	3.2	3.6	2.6	2.5	4.0	4.0	4.1	4.5	4.6	3.7	3.5	3.7	3.8
3.1	4.0	4.2	2.5	2.9	3.3	2.1	2.4	3.7	4.2	3.0	3.7	3.4	3.1	2.8	3.1	3.1
3.0	4.2	4.9	2.6	2.3	3.4	1.8	2.4	1.9	3.8	1.9	3.2	3.5	3.7	3.0	2.8	2.8
2.9	5.8	7.5	3.3	3.0	4.5	2.0	3.1	2.9	5.0	2.7	3.7	4.5	4.8	3.0	3.5	3.6
3.8	5.9	9.0	4.5	3.3	5.3	3.1	3.5	3.6	4.9	2.6	4.3	4.6	5.2	4.1	4.0	3.9
4.5	5.7	8.8	5.5	3.8	5.7	4.1	3.6	3.5	5.5	2.6	5.1	4.7	4.9	4.5	4.3	4.2
4.2	6.5	8.1	4.6	4.2	5.5	3.4	3.9	4.3	5.8	2.9	4.6	5.9	5.9	3.4	4.5	4.5
3.3	4.0	6.9	3.4	3.4	4.2	2.8	3.5	3.8	6.0	2.7	4.1	3.7	5.5	2.9	3.9	3.8
4.1	3.6	4.6	4.1	3.9	4.1	3.4	2.5	3.9	4.6	3.7	3.6	3.4	4.6	3.8	3.7	3.7
3.8	3.6	6.5	2.9	2.7	3.9	2.6	3.7	3.0	6.0	4.5	4.1	3.8	5.2	3.0	4.0	4.1

V případě srážek je pro většinu GCMs dle scénáře RCP8.5 typický jejich úbytek opět v období červen až září a po zbytek roku větší či menší nárůsty. Celková roční bilance srážek u GCMs je kladná, cca +43 mm, což odpovídá 5% zvýšení ročního úhrnu. Naproti tomu u RCMs není úbytek srážek v období červen až září natolik silný. V ostatních částech roku je zvýšení srážek srovnatelné či nepatrně větší. V celkové roční bilanci srážky u RCMs narostou o + 80 mm, což představuje jejich zvýšení o zhruba 10 %.

Tabulka 4-2: Ansámbl vstupních dat modelu RCM

7	8	29	10	6	12	9	14	6	35	16	4	12	28	13	15	16
15	7	10	10	3	9	10	15	-5	13	14	3	14	15	19	11	12
18	15	8	9	15	13	11	9	15	12	12	15	28	10	16	14	15
16	8	12	1	15	10	11	16	12	12	12	4	15	12	8	11	12
12	-8	4	10	24	9	14	5	31	18	27	5	0	9	4	13	13
16	-27	-12	-6	4	-5	6	6	-7	15	12	-13	-18	8	0	1	1
2	-28	-31	-35	-7	-20	-28	-3	-11	2	15	-18	-11	-10	-16	-9	-7
21	-11	-33	-23	1	-9	-26	-5	6	-8	16	-11	-5	-5	-15	-6	-4
17	-14	-20	-8	-9	-7	-4	3	-5	-3	11	-10	-12	-3	2	-2	-2
10	11	-7	0	5	4	3	-1	3	5	5	10	12	-5	5	4	5
14	20	10	4	11	12	8	16	7	8	15	14	23	7	13	12	14
9	22	24	7	15	15	13	11	15	21	14	16	27	14	12	16	17
156.2	2.7	-5.1	-20.7	82.9	43.2	29	86	66	131	169	18	86	81	60	81	92

V radiační části radiačně tepelné bilance zemského povrchu vidíme mezi oběma ansámblly modelů dosti velké rozdíly. V případě GCMs vidíme nárůst globálního záření (G) a s ním spjaté celkové bilance krátkovlnného záření na zemském povrchu (Net SW) v období května až října s maximem přes +20 W/m² v letních měsících. U RCMs ale s výjimkou období červen až září vidíme úbytky G, zejména v jarních měsících až o 10-15 W/m².

Zatímco u GCMs zůstává Net SW celoročně zvýšená, u RCMs zemský povrch vykazuje zvýšenou bilanci jen v období červen až září. Rozdíly mezi G i Net SW v zimní polovině roku pak odráží snížení albeda zemského povrchu, patrně v důsledku absence sněhové pokrývky. U RCMs je s ohledem na lepší rozlišení modelů tento rozdíl významnější.

V původním návrhu bylo počítáno s využitím více-staničního generátoru a RCM modelů, případně pro srovnání přímé modifikace klimatických dat. Bohužel výstupy více-staničního generátoru nejsou doposud k dispozici a jsou nadále vyvíjeny v rámci programu SustES. Ani výstupy regionálních klimatických modelů pro Českou republiku nejsou dobře použitelné, a to ani po bias-korekci. Jak ukazují předchozí tabulky je zřejmé, že RCM zimní a jarní srážky, což vede k nerealistickým průtokům v hydrologickém modelování. Současně nadhodnocení zimních a jarních srážek výrazně zvyšuje půdní vlhkost a vede ke třem efektům: a) nereálně vysoká půdní vlhkost vede k nižší závlahové potřebě; b)

součástí vyšších srážek v jarním období je i vyšší oblačnost a tím snižena hodnota potenciální i aktuální evapotranspirace; c) nereálně vysoké akumulaci vodních zdrojů. Ačkoliv stále existuje poměrně značná nejistota a mezimodelový rozptyl, kterého jsou si řešitelé dobře vědomi, nelze přehlédnout skutečnost, že v posledních letech, pro které jsou k dispozici simulace (historický běh trvá do roku 2005, od roku 2006 potom probíhají simulace budoucího klimatu), vidíme značný rozchod s realitou (srážek byl ve skutečnosti nedostatek). Proto bylo rozhodnuto pro potřeby projektu zpracovat a vycházet z globálních klimatických modelů.

Simulace globálních klimatických modelů nelze přímo použít pro simulaci hydrologické bilance. Z toho důvodu je nutné simulace klimatické změny buď korigovat za účelem odstranění systematické chyby, nebo transformovat pozorované řady tak, aby změny mezi pozorovanou a transformovanou řadou odpovídaly změnám v simulaci klimatických modelů. Druhý uvedený přístup se označuje jako "přírůstková metoda" nebo "přímá modifikace" a je v ČR tradičně používán pro modelování dopadů klimatických změn na hydrologickou bilanci, jelikož je modelovaná hydrologická bilance robustnější ve srovnání s využitím korigovaných simulací. Současně tato metoda je osvědčená i pro odhady evapotranspirace a agrometeorologické modelování obecně, protože zachovává relativně dobře konsistenci mezi klimatickými prvky, pokud není uplatňovaná změna příliš veliká. Pro využití v denním kroku je vhodné aplikovat transformace, které uvažují nejen změny průměrů, ale i variability. To umožňuje například pokročilá přírůstková (Advanced Delta Change – ADC) metoda. ADC metoda umožňuje zahrnout do transformace i změny variability. To zjednodušeně znamená, že extrémy se mohou měnit jinak než průměr. Při odvození změn srážek z klimatického modelu ADC metoda uvažuje i systematické chyby simulace. Jelikož teplota je transformována lineárně, nemá systematická chyba na výslednou transformaci teploty vliv.

Srážky jsou transformovány pomocí vztahu

$$P^* = \begin{cases} aP^b & \text{pro } P < P_{90} \\ \frac{E^F}{E^C}(P - P_{90}) + a(P_{90})^b & \text{pro } P > P_{90} \end{cases}$$

kde P^* jsou transformované srážky, P pozorované srážky, P_{90} je 90% kvantil srážek, indexy C a F indikují pozorovaná data, simulovaná data pro kontrolní období a simulovaná data pro scénářové období. a a b jsou transformační parametry, které jsou odvozeny pro 7denní bloky, což zaručuje sezónní variabilitu změn. Lineární transformace pro hodnoty nad P_{90} zabraňuje výskytu nerealisticky vysokých hodnot, které jsou relativně často výsledkem nelineární transformace pro $P > P_{90}$ a $b > 1$.

Pro srážky vyšší než 90% kvantil srážek v daném měsíci je vypočtena nadprahová hodnota $E = P - P_{90}$. Průměrné nadprahové hodnoty v simulaci klimatického modelu pro kontrolní a scénářové období jsou vypočteny dle

$$\bar{E}^C = \frac{\sum P^C - P_{90}^C}{n^C} \quad \text{a} \quad \bar{E}^F = \frac{\sum P^F - P_{90}^F}{n^F}$$

kde n^C a n^F je počet nadprahových hodnot v kontrolním a scénářovém období. Transformační parametry a a b jsou odvozeny z hodnot 60 % (P_{60}) a 90 % (P_{90}) kvantilu srážek dle

$$b = \frac{\log \left[g_2 \frac{P_{90}^F}{(g_1 P_{60}^F)} \right]}{\log \left[g_2 \frac{P_{90}^C}{(g_1 P_{60}^C)} \right]}$$

$$a = \frac{P_{60}^F}{(P_{60}^C)^b g_1^{1-b}}$$

kde g_1 a g_2 jsou korekční faktory vyjadřující systematické chyby v P_{60} a P_{90} v simulaci klimatického modelu pro kontrolní období.

$$g_1 = \frac{P_{60}}{P_{60}^C}$$

$$g_2 = \frac{P_{90}}{P_{90}^C}$$

Jelikož hodnoty P_{60} , P_{90} , E_C a E_F jsou časově relativně variabilní, jsou průměrné týdenní hodnoty těchto veličin vyhlazeny prostřednictvím Gaussovského filtru.

Transformace teploty je v ADC metodě prováděna následovně:

$$T^* = \frac{\sigma^F}{\sigma^C} (T - \bar{T}) + \bar{T} + \bar{T}^F - \bar{T}^C$$

kde T^* je transformovaná teplota, T pozorovaná průměrná teplota, T^C a T^F je průměrná měsíční teplota pro kontrolní simulaci klimatického modelu a scénářovou simulaci klimatického modelu a σ^C a σ^F jsou směrodatné odchylky denní teploty pro kontrolní a scénářové období v simulaci klimatického modelu. Podobně jako u srážek je provedeno vyhlazení parametrů transformace.

4.2 Finální výběr výhledových klimatických scénářů

Množina nejnovějších CMIP6 GCM simulací zahrnuje modely s různým stupněm prostorové podrobnosti. Většina simulací vývoje klimatu v 21. století má horizontální prostorové rozlišení okolo 100 nebo 250 km. Existuje i malá podmnožina GCM v rozlišení okolo 50 km, ale jejich simulace končí v polovině 21. století. Jednotlivé GCM se od sebe též liší komplexností popisů dějů v klimatickém systému, způsoby parametrizací jevů menšího měřítka i formulací a numerickým řešením základních fyzikálních rovnic. Zákonitě pak dochází k tomu, že se do určité míry rozcházejí simulované klima s realitou a tento rozdíl se mění v prostoru, čase či napříč fyzikálními veličinami. Pro simulace budoucího klimatu střední Evropy byly proto upřednostněny GCM, které nejlépe postihují klima střední Evropy. Zároveň je potřeba zajistit, aby preferované GCM, které tvoří jen podmnožinu všech dostupných GCM, postihly budoucí vývoj klimatu stejně, se stejnou mírou neurčitosti, jako úplná množina všech dostupných GCM. Tedy aby vybraná podmnožina GCM nerepresentovala modely, které za stejných podmínek očekávají např. vyšší nárůst teploty (či změny srážek, větru, slunečního svitu apod.) než modely, které stojí mimo výběr. Zúžení ansámblu klimatických modelů bylo provedeno postupem navrženým Meitnerem et al. (2023).

V souladu s uvedenou metodikou byly z množiny přibližně dvaceti CMIP6 GCM, které měly dostupné všechny nezbytné prvky a emisní scénáře, na základě validace vyloučeny ty modely, které nebyly schopny věrohodně simulovat klima Střední Evropy nedávné minulosti. Z ostatních modelů pak bylo vybráno 6 GCM (Tabulka 4-3) s rozlišením 100 km a reprezentujících všechny 4 emisní scénáře tak, aby tento užší výběr svými statistickými vlastnostmi reprezentoval celou původní množinu modelů, ale umožnil pracovat s menším počtem simulací. Výběr GCM byl proveden s ohledem na všechny základní meteorologické prvky, které jsou dále analyzovány, resp. použity pro výpočet referenční evapotranspirace a půdní vlhkosti modelem SoilClim. Výběr modelů spolu s dostupnými scénáři klimatické změny je uveden v následující tabulce. Byly preferovány GCM s jemnějším prostorovým rozlišením (100 km oproti 250 km).

Scénáře klimatické změny slouží jako zdroj tzv. okrajové podmínky pro GCM a reflektují různé možné budoucí trajektorie vývoje světa nejen z pohledu emisí či výsledných koncentrací skleníkových plynů v atmosféře nýbrž i z hlediska různého hospodářského a společenského vývoje na planetě. Poslední 6. hodnotící zpráva IPCC (AR6) pracuje se scénáři socioekonomického vývoje, tzv. Shared Socioeconomics Pathways (SSP).

V jednoduchosti lze jednotlivé scénáře změny klimatu používané na vstupu GCM simulací interpretovat takto:

- SSP1–2.6: udržitelná cesta vývoje,
- SSP2–4.5: „střední cesta“: degradace environmentálních systémů, ale některá zlepšení týkající se využívání zdrojů a energie,
- SSP3–7.0: „regionální rivalita“ a konflikty umožňující jen malý ekonomický rozvoj
- SSP5–8.5: vývoj založený na fosilních palivech

Tabulka 4-3: Vybrané modely GCM ze simulací CMIP6, jejich prostorové rozlišení a dostupných scénářů socioekonomického vývoje

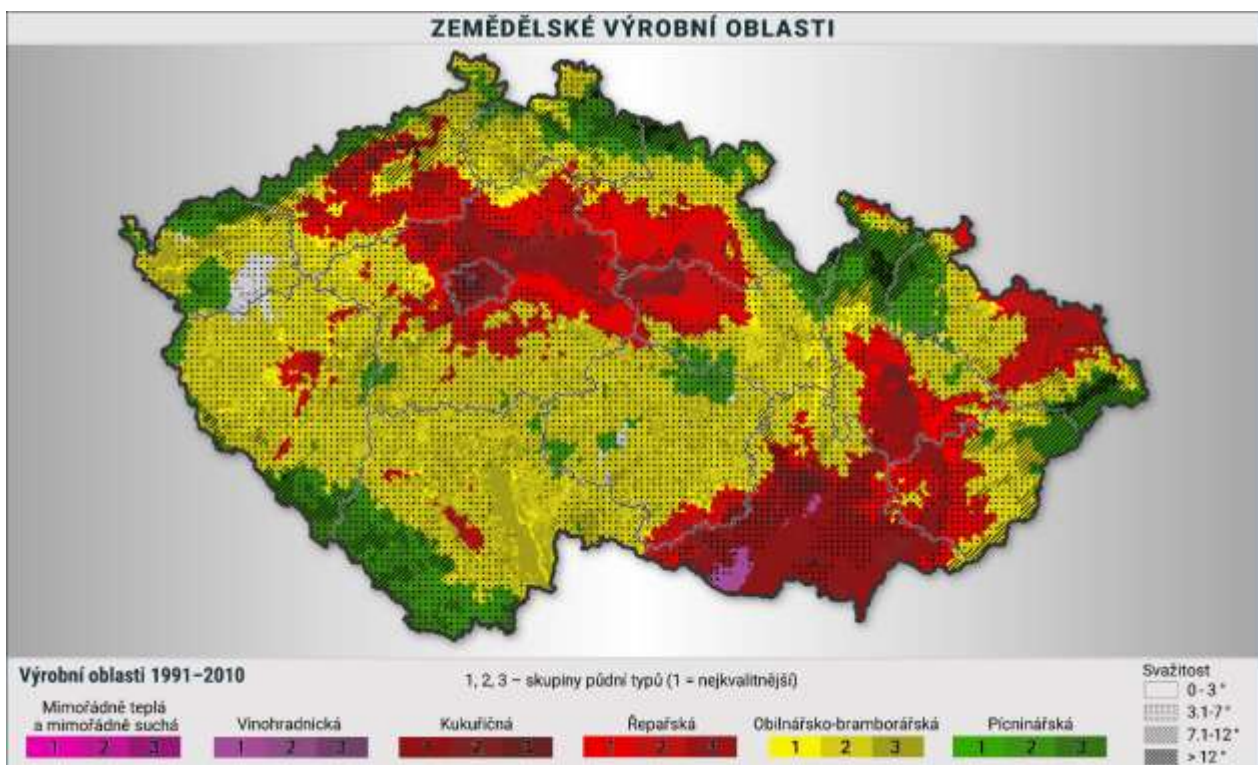
Model GCM	Dostupné scénáře klimatické změny	Prostorové rozlišení modelu v km
CMCC-ESM2	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	100
EC-EARTH3	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	100
GFDL-ESM4	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	100
MPI-ESM1–2-HR	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	100
MRI-ESM2–0	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	100
TAIEM1	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	100

5 Dopady změn a jejich klasifikace mezi současným stavem a výhledy klimatických změn.

5.1 Změny v agroklimatických oblastech

Klíčovým faktorem krom změny v dostupnosti vody pro klimatických podmínek je také případný posun ve vláhových potřebách rostlin. V rámci této aktivity byla provedena rešerše vláhových potřeb rostlin z různých zdrojů a sledování rozptylů vzhledem k odhadu potřeb a v konečném důsledku i zdrojů vody, viz. kapitola 2.10. Pro vymezení změn jsou dále využity i scénáře změn subdenních srážek založené na souboru simulací regionálních klimatických modelů v denním kroku.

V rámci řešení projektu kromě stanovení konkrétních závlahových potřeb a jejich optimalizace je využíván alternativní přístup vycházející z podstatně jednodušší metody, který slouží pro kontrolu konzistence výstupů a komunikaci výsledků s odbornou veřejností. Pokud použijeme zažité členění zemědělské půdy na tzv. výrobní oblasti, tj. oblast kukuřičnou, řepařskou, obilnářsko-bramborářskou a pícninářskou získáme poměrně dobrou, byť zjednodušenou představu o možné změně závlahových potřeb. V rámci výrobních oblastí, je právě oblast kukuřičná a nejteplejší regiony výrobní oblasti řepařské považovány za regiony, kde je závlaha vodním a na lehkých půdách nutným předpokladem dosahování stabilních výnosů. Proto lze, zjednodušeně předpokládat, že zvýšení rozsahu kukuřičné výrobní oblasti sebou nese odpovídající zvětšení plochy potenciálně vyžadujících závlahu. Hrubé agroklimatické členění a jeho trendy představili Trnka et al. (2021), kdy na základě probíhající klimatické změny pracovali s výrobními oblastmi „vinohradnickou“ a „velmi suchou a velmi teplou“. Tyto dvě výrobní oblasti byly rámcově definovány, protože reálné podmínky zejména po roce 2010, již zdaleka neodpovídali podmínkám kukuřičné výrobní oblasti tak jak byla definována.

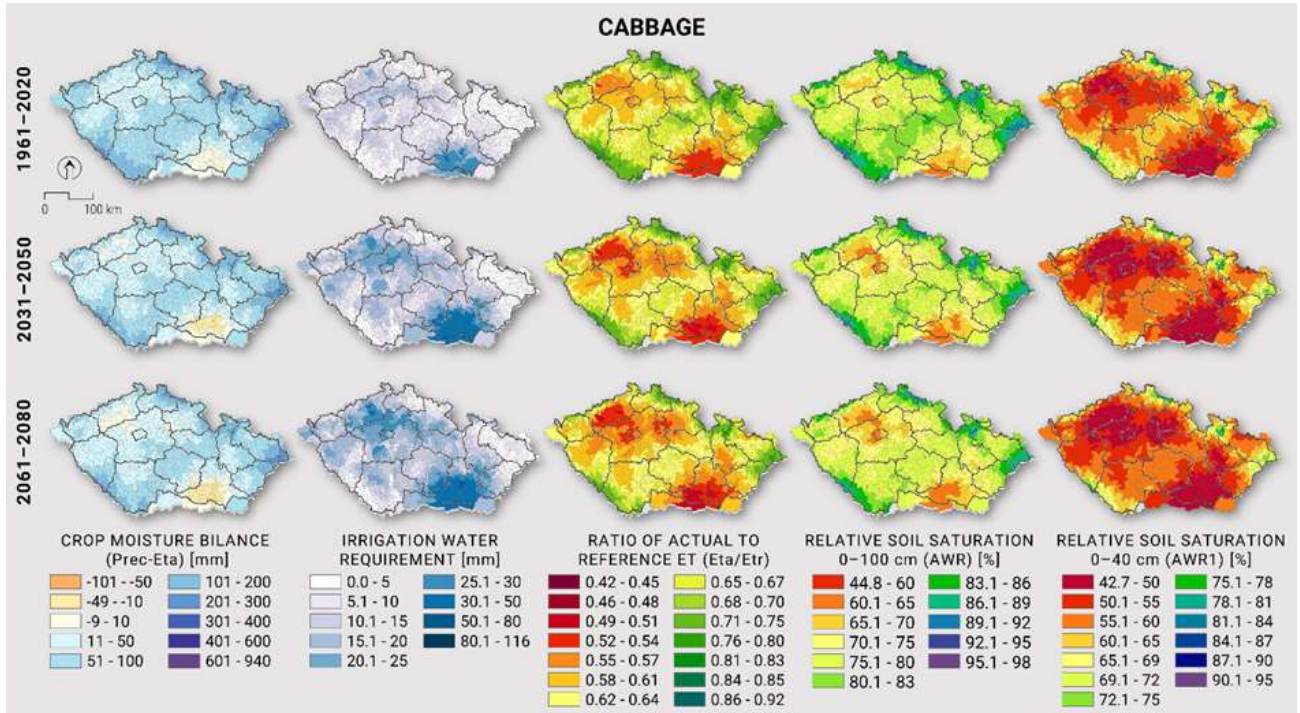


Obr. 5-1: představuje zjednodušené agroklimatické členění zpracované metodou podle Trnky et al. (2021) s využitím pozorovaných dat pro období 1991-2010.

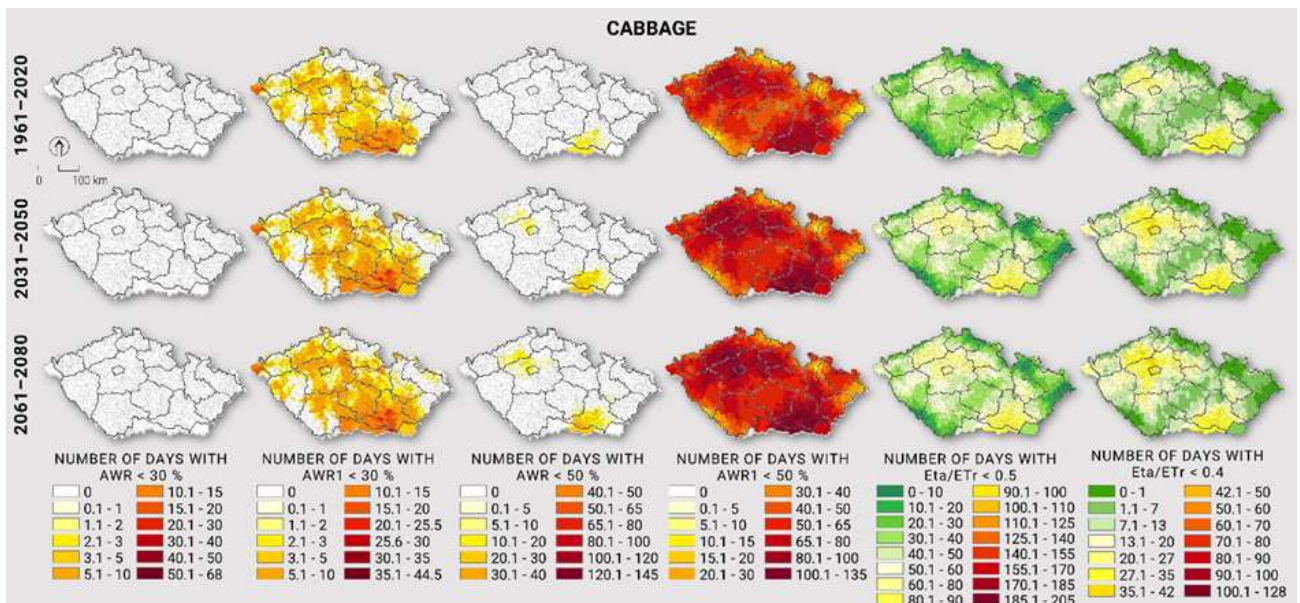
5.1.1 Výhled nároků na závlahy při různých plodinách (osevních postupech)

V rámci řešení v roce 2021 byly vypočteny hypotetické potřeby vody pro vybrané plodiny pro současné (1981–2020) a výhledové podmínky (2031–2050 a 2061–2080) v pěti klimatických modelech pro jednotlivé vodní útvary na území České republiky na základě Indexu optimální vlhkosti na výnos podle metodiky podle normy ČSN 75 0434. Potřeba vody pro jednotlivé plodiny byla zpracována v modelu

SoilClim (viz. následující obrázky) a následně byla potřeba vody agregována do vodních útvarů a byla vstupem pro simulaci vodo hospodářským modelem. V rámci reportu je ukázka simulací pro plodinu zelí.

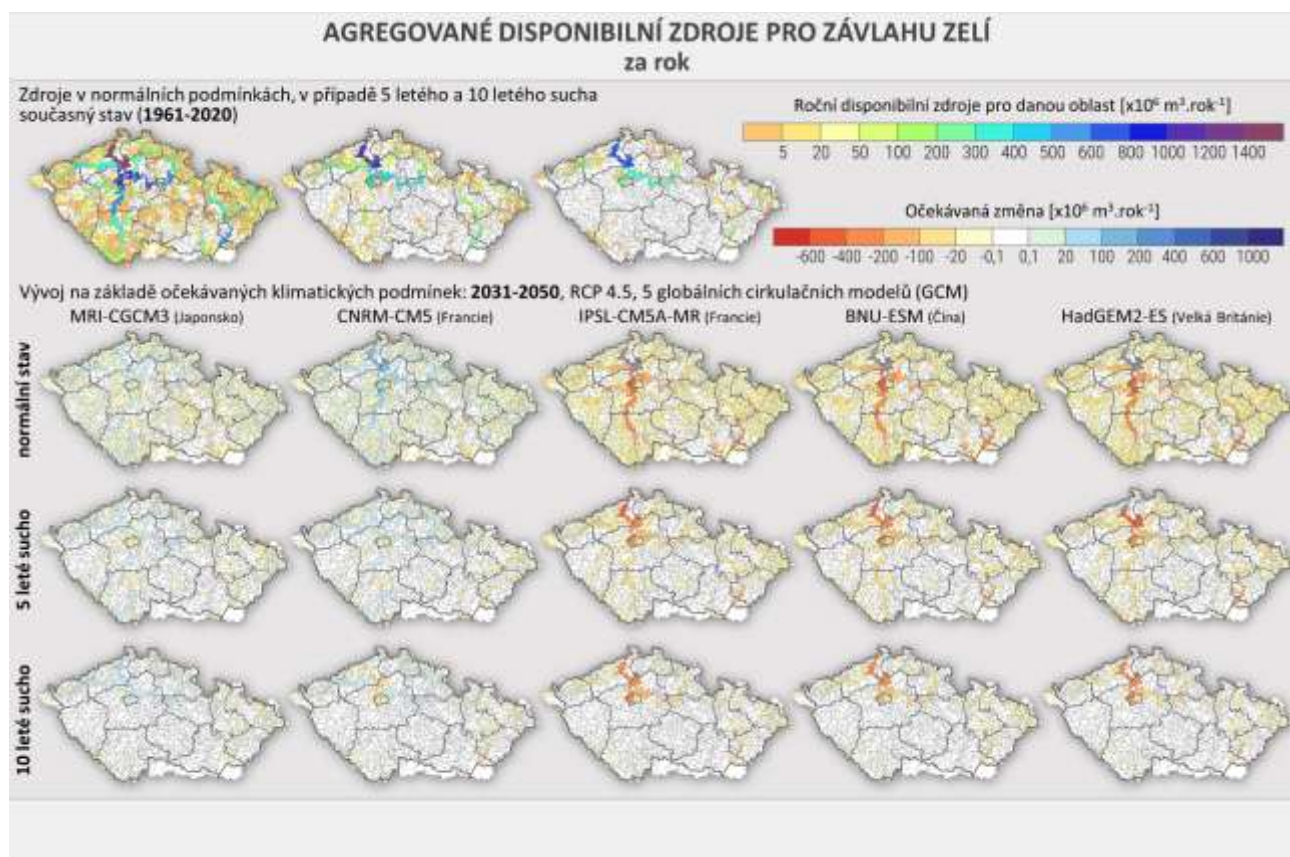


Obr. 5-2: Vlhkostní bilance, závlahové množství v mm, evapotranspirace a půdní vlhkost pro plodinu zelí.



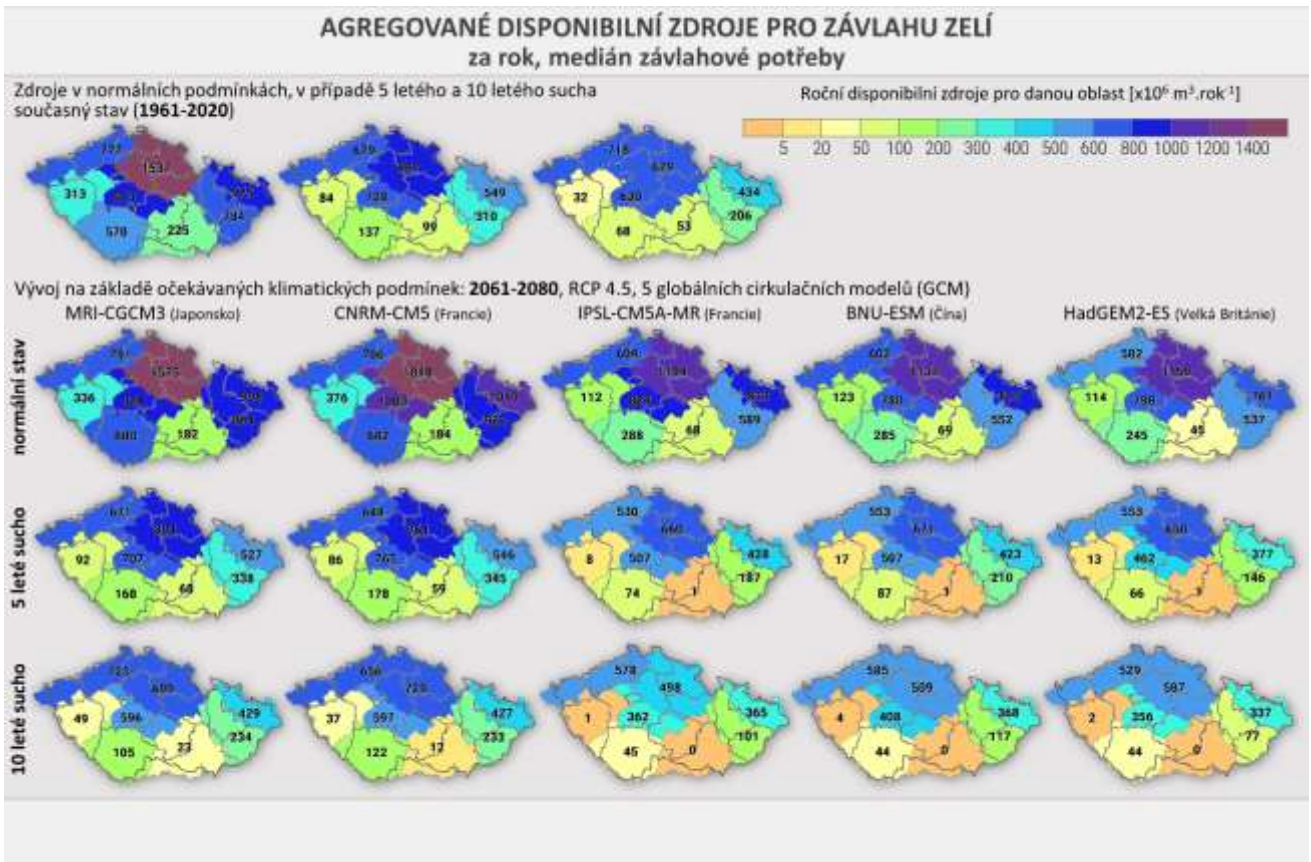
Obr. 5-3: Vyhodnocení půdní vlhkosti a evapotranspirace pro plodinu zelí.

Pro hodnocení vodních zdrojů byly scénáře založené na současných požadavcích na vodu a výhledových závlah pro současné klimatické podmínky (1961-2020) a výhledové klimatické podmínky dle 5 klimatických modelů. Ve variantě současných požadavků se uvažuje s reálnými odběry nikoliv odběry povolenými, které jsou na území České republiky cca o 40 % vyšší. V rámci modelování hydrologické a vodohospodářské bilance jsme se snažili odpovědět na otázku, zda jsou alespoň teoreticky vodní zdroje na území České republiky v jednotlivých UPOV, které by mohly pokrýt případné vyšší požadavky na budování závlah. Obr. 5-4 ukazuje disponibilní zdroje v jednotlivých vodních útvarech, logicky nejvyšší jsou kolem toků s vyšším průtokem.

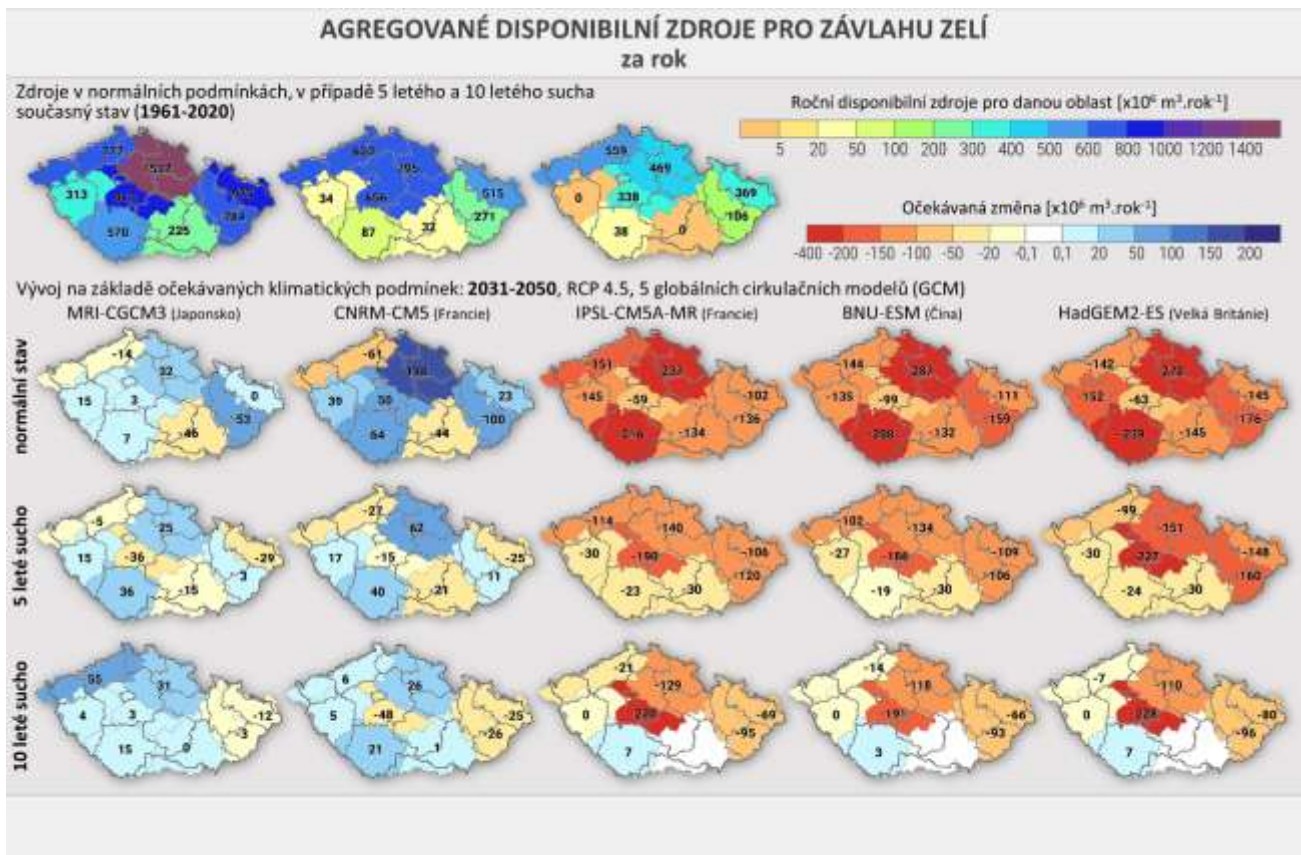


Obr. 5-4: Disponibilní zdroje v jednotlivých vodních útvarech.

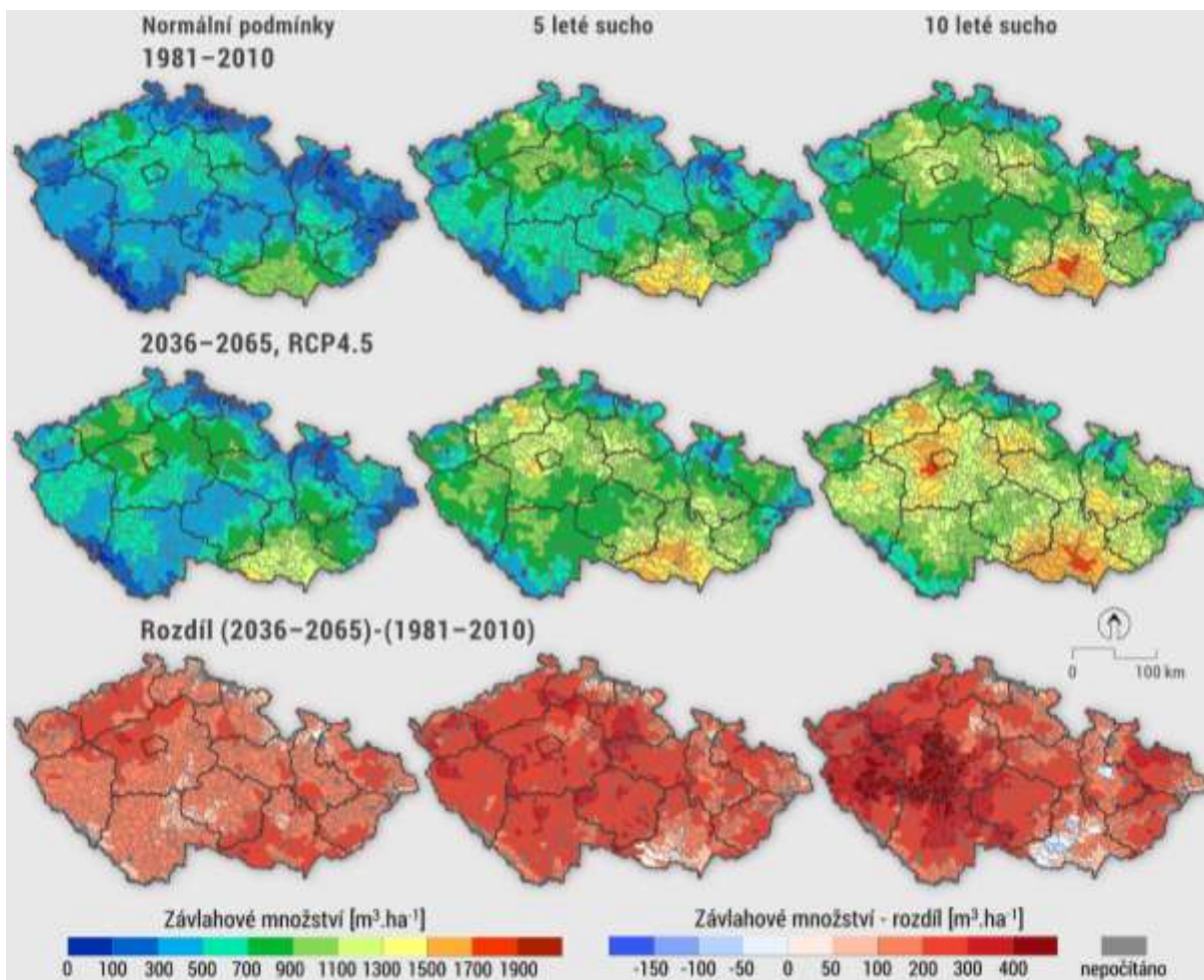
Výsledky modelování byly agregovány na dílčí oblasti povodí a pro celé území České republiky. V rámci výpočtu byly vypouštěny pouze minimální zůstatkové průtoky z nádrží (do naplnění retenčního prostoru) resp. mezipovodí a byly uspokojeny nároky na všechno užívání vody (tj. odběry povrchové a podzemní a vypouštění). Agregované disponibilní zdroje jsou na Obr. 5-5 a Obr. 5-6.



Obr. 5-5: Agregované disponibilní zdroje pro závlahu zelí (medián závlahové potřeby).



Obr. 5-6: Agregované disponibilní zdroje pro závlahu zelí a očekávaná změna v rámci jednotlivých dílčích povodí.



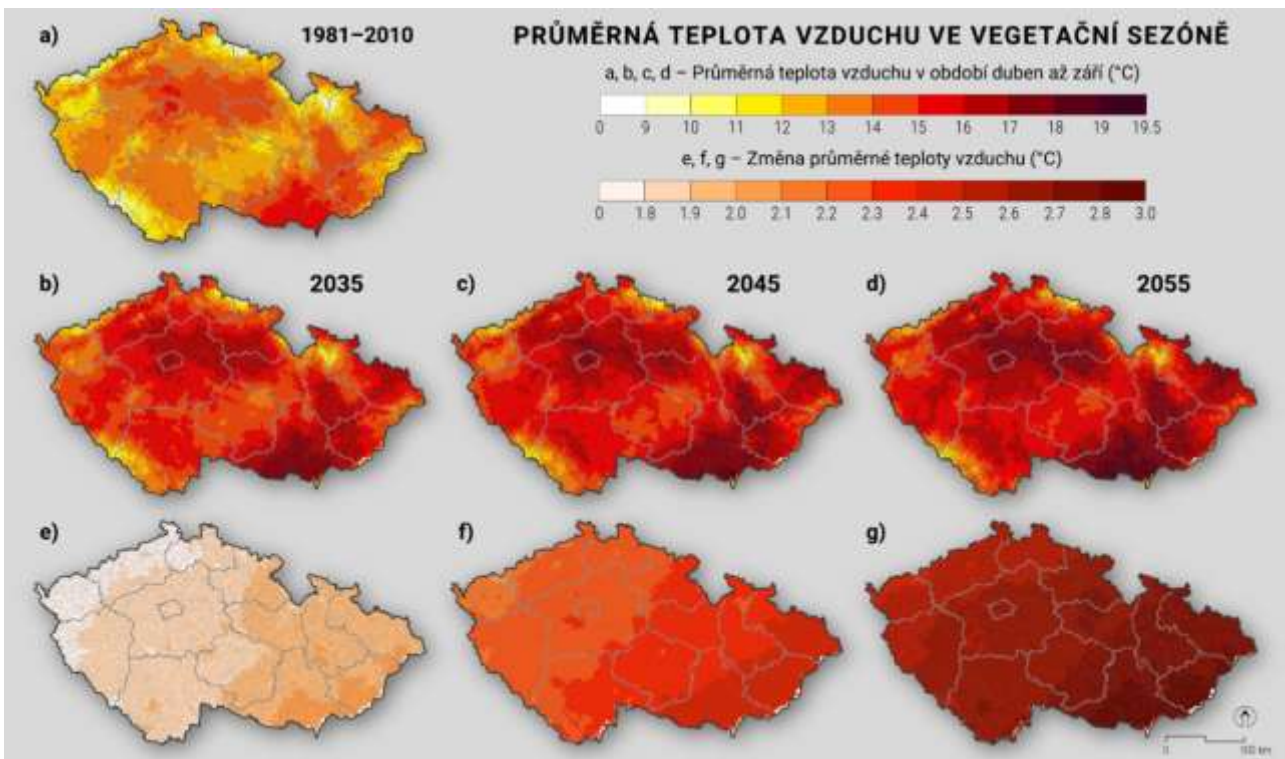
Obr. 5-7: Vláhová potřeba pro jabloně odhadnutá pro běžný rok a rok kvalifikovaný jako indikativní pro 5 a 10leté sucho

5.1.1 Výsledky odhadů změny klimatických faktorů a posun agroklimatických výrobních oblastí

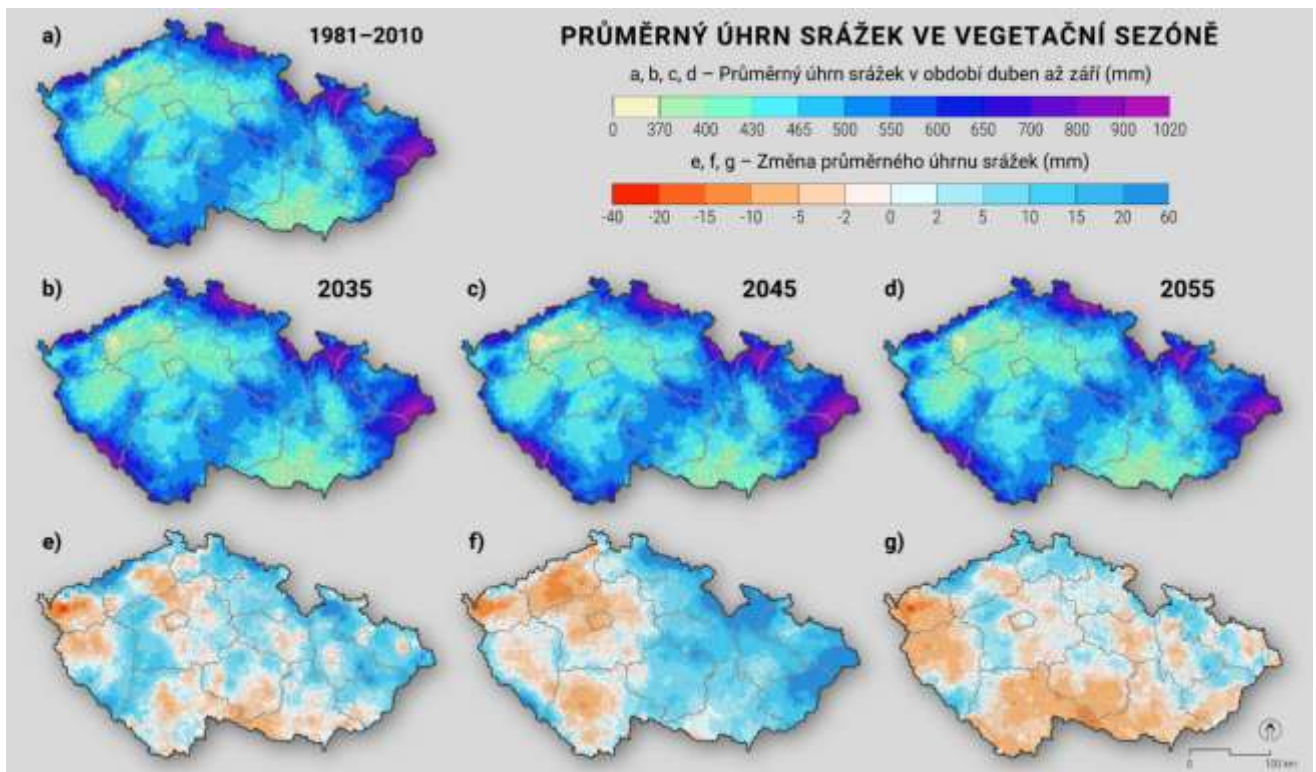
Jak je zřejmé z Obr. 5-8 až Obr. 5-11i relativně realistický scénáře vývoje emisí SSP2-4.5 v kombinaci s konkrétním klimatickým modelem (v tomto případě modelu Ústavu Maxe Plancka v Německu, MPI-ESM1-2-HR), vede k výraznému nárůstu teploty ve vegetačním období oproti období 1981-2010 na celém území, ale zvláště ve východní a jihovýchodní části ČR. Charakter změny srážek ve vegetačním období sice není výrazný, ale lze vysledovat tendenci k mírnému úbytku srážek na jihu a západě území a mírného nárůstu na severu a severovýchodě ČR. Nárůst referenční evapotranspirace je ale značný a promítá se do značného prohloubení záporné klimatologické vodní bilance ve vegetačním období, jak ukazuje. Očekávané prohloubení vodního deficitu je opravdu výrazné a zesiluje ve všech klíčových zemědělských oblastech, a ne nejméně v oblastech s funkčními závlahovými systémy. Těmto očekávaným změnám klimatických parametrů odpovídá pak i posun agroklimatických oblastí, který zachycuje Obr. 5-12. Pro tuto konkrétní realizaci klimatického modelu a emisního scénáře, se v horizontu roku 2035 dostávají prakticky všechny v současnosti zavlažované oblasti z režimu kukuřičné výrobní oblasti v referenčním období (1981-2010) do podmínek oblasti mimořádně teplé a

T A Č R

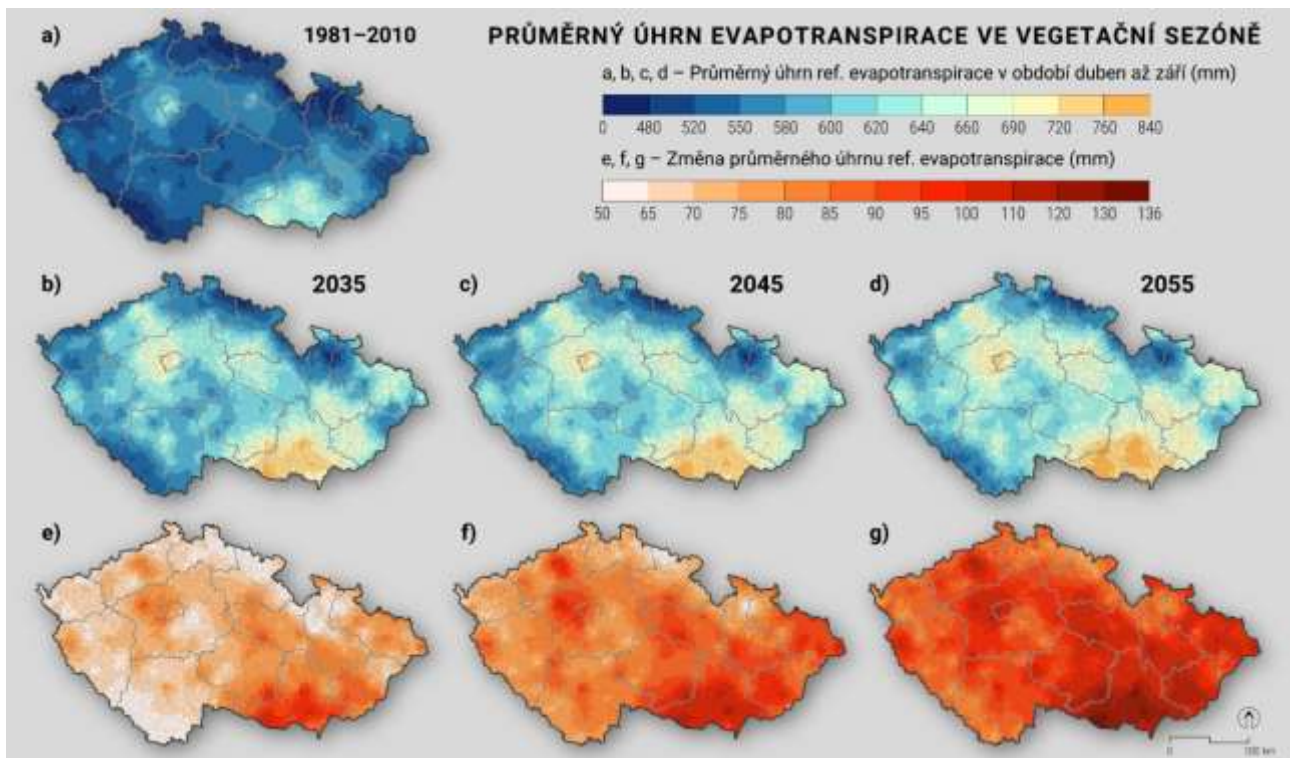
mimořádně suché. Je zapotřebí uvést, že takové agroklimatické podmínky z našeho území v setrvalé podobě neznáme. Zle ale předpokládat zvýšenou nejistotu v zemědělské produkci, zvýšenou potřebu dodatkové závlahy a případně změny ve sloužení pěstovaných komodit – změny osevních postupů. Příklad ukazuje vizualizaci výsledků modelu MPI-ESM1-2-HR, tedy jednoho ze 6 modelů, který z pohledu změny teploty a vodní bilance reprezentuje z těchto šesti modelů hodnoty spíše výraznějšího oteplení a zhoršení klimatologické vodní bilance. K těmto závěrům vedou v závislosti na míře zvýšení koncentrací skleníkových plynů 4-6 modelů ze 6 posuzovaných. Odhad na základě jednoho z modelů slouží pouze pro ilustraci charakteru změny a postupu prací. Kompletní výsledky jsou připravovány do finálních výstupů projektu. Data jsou zpracovávána v rozlišení pro povodí IV. řádu s možnou agregací pro základní prostorové rozlišení – UPOV.



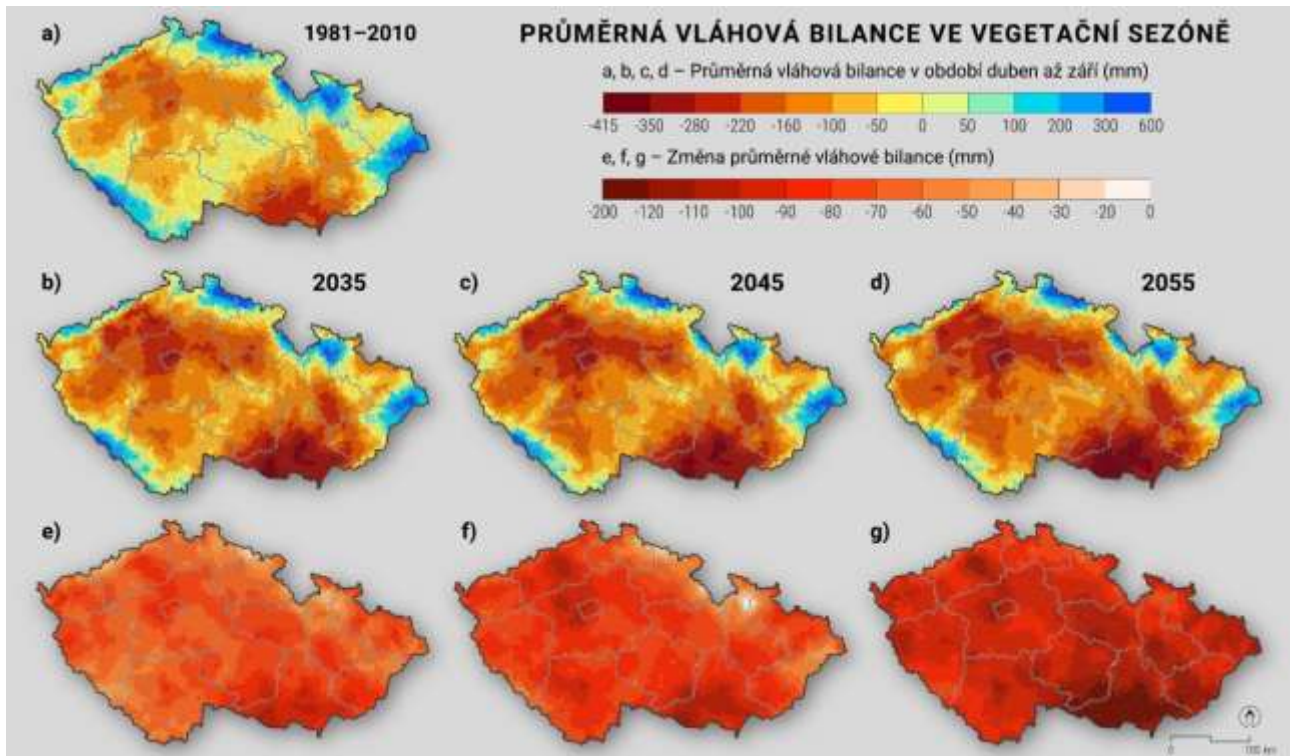
Obr. 5-8: Ukázka průměrné teploty vzduchu v tzv. teplém půlroce (duben-září) pro referenční období (a) 1981-2010 a období (b, e) 2020-2050 tj. 2035, (c, f) 2030-2060 tj. 2045 a (d, g) 2040-2070 tj. 2055 pro úroveň povodí IV. Řádu a pro model MPI-ESM1-2-HR a emisní scénář SSP 2-4.5. Mapy b-d ukazují změnu v absolutní hodnotě, mapy e-g pak charakter klimatického signálu, tj. relativní změnu.



Obr. 5-9: Ukázka úhrnu srážek v tzv. teplém půlroce (duben-září) pro referenční období (a) 1981-2010 a období (b, e) 2020-2050 tj. 2035, (c, f) 2030-2060 tj. 2045 a (d, g) 2040-2070 tj. 2055 pro úroveň povodí IV. Řádu a pro model MPI-ESM1-2-HR a emisní scénář SSP 2-4.5. Mapy b-d ukazují změnu v absolutní hodnotě, mapy e-g pak charakter klimatického signálu, tj. relativní změnu.



Obr. 5-10: Ukázka sumy referenční evapotranspirace v tzv. teplém půlroce (duben-září) pro referenční období (a) 1981-2010 a období (b, e) 2020-2050 tj. 2035, (c, f) 2030-2060 tj. 2045 a (d, g) 2040-2070 tj. 2055 pro úroveň povodí IV. Řádu a pro model MPI-ESM1-2-HR a emisní scénář SSP 2-4.5. Mapy b-d ukazují změnu v absolutní hodnotě, mapy e-g pak charakter klimatického signálu, tj. relativní změnu.

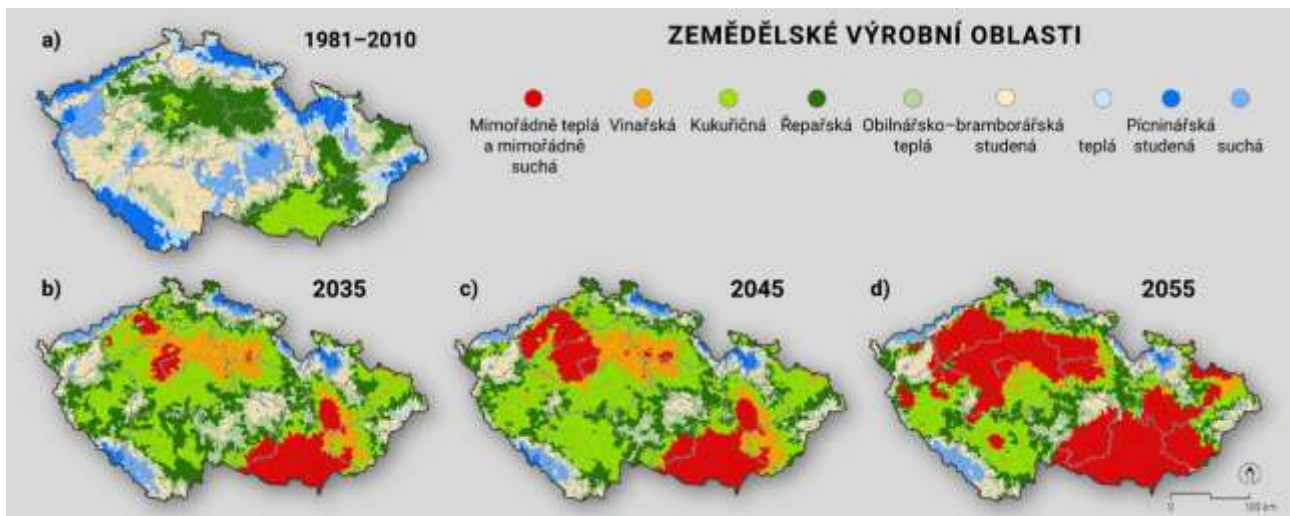


Obr. 5-11: Ukázka rozdílu sumy srážek a referenční evapotranspirace v tzv. teplém půlroce (duben-září) pro referenční období (a) 1981-2010 a období (b, e) 2020-2050 tj. 2035, (c, f) 2030-2060 tj. 2045 a (d, g) 2040-2070 tj. 2055 pro úroveň povodí IV. Řádu a pro model MPI-ESM1-2-HR a emisní scénář SSP 2-4.5. Mapy b-d ukazují změnu v absolutní hodnotě, mapy e-g pak charakter klimatického signálu, tj. relativní změnu.

5.1.1 Posun agroklimatických výrobních oblastí

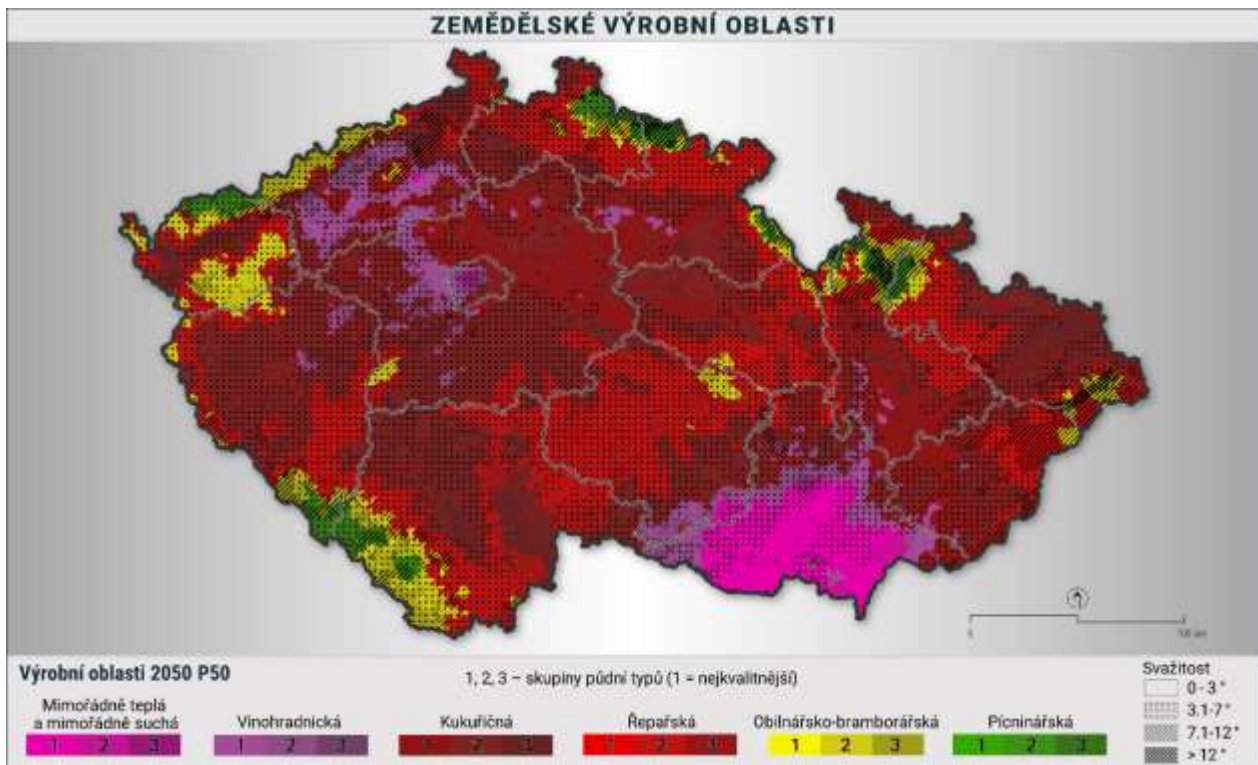
Metoda pokročilé přímé modifikace byla vyvinuta v rámci programu SustES a ověřena v hydrologických aplikacích v projektu AdaptDyje právě na povodí této řeky. V rámci tohoto řešeného projektu byly zpracovány scénáře změny klimatu pro celou ČR a to pro jak pro gridovou vrstvu 500 m tak pro následně agregované hodnoty pro útvary povrchových vod. Tyto scénáře byly použity pro: a) odhad půdní vlhkosti modelem SoilClim; b) výpočet vláhové potřeby a spolu s týmem VUV k c) stanovení disponibilní vody pro závlahy. V neposlední řadě byla data kombinována v modelech SoilClim a následně AgriClim pro odvození agroklimatických oblastí v rámci ČR.

Scénáře změny klimatu tak byly připraveny pro gridovou vrstvu 500x500 m a to pro všechny emisní scénáře uvažované v rámci CMIP6 a pro 7 výše vybraných GCM. Vznikla tak kombinace 28 možných odhadů budoucího vývoje. Ty byly následně použity v modelové kaskádě SoilClim-AgriClim a odvozen rozsah výrobních oblastí v současném a očekávaném klimatu. Obrázek Ya zachycuje rozsah výrobních oblastí včetně zahrnutí kvality půdy a také svažitosti v rámci ČR. Je zde patrný poměrně značný rozsah kukuřičné výrobní oblasti v Polabí a zejména nově se formující výrobní oblast vinohradnická v okolí Znojma a dále na JV. Zatímco v oblasti kukuřičné je závlaha nezbytná pro dosažení vysokých výnosů, v případě vinohradnické oblasti nelze např. u polních plodin čekat průměrný výnos bez závlah. Vývoj změny zemědělských výrobních oblastí v následujících obdobích ukazuje následující obrázek.



Obr. 5-12: Ukázka rozložení tzv. výrobních oblastí pro referenční období (a) 1981-2010 a období (b) 2020-2050 tj. 2035, (c) 2030-2060 tj. 2045 a (d) 2040-2070 tj. 2055 pro úroveň povodí IV. řádu a pro model MPI-ESM1-2-HR a emisní scénář SSP 2-4.5. Mapy b-d ukazují změnu v absolutní hodnotě.

Střední odhad pro rok 2050 však ukazuje naprosto odlišný obraz agroklimatického členění Česka s dramatickým nárůstem rozsahu oblasti vinohradnické, ale zejména nástup velmi teplé a velmi suché agroklimatické oblasti. Současně vidíme „migraci“ kukuřičné výrobní oblasti na území pahorkatin a vysočin a praktické vymizení dvou nejchladnějších výrobních oblastí. Dopady na závlahy, resp. poptávku po nich budou v případě naplnění tohoto scénáře značné. Je nutné uvést, že mapa Yb, představuje rozsah výrobních podle středního odhadu, ale i odhady pro horní a dolní kvartil uvažovaných kombinací vedou k podobným výsledkům.



Obrázek 5-25: představuje zjednodušené agroklimatické členění zpracované metodou podle Trnky et al. (2021) pro střední odhad pro rok 2050.

5.2 Dopady změn na dostupnost vody pro závlahové účely

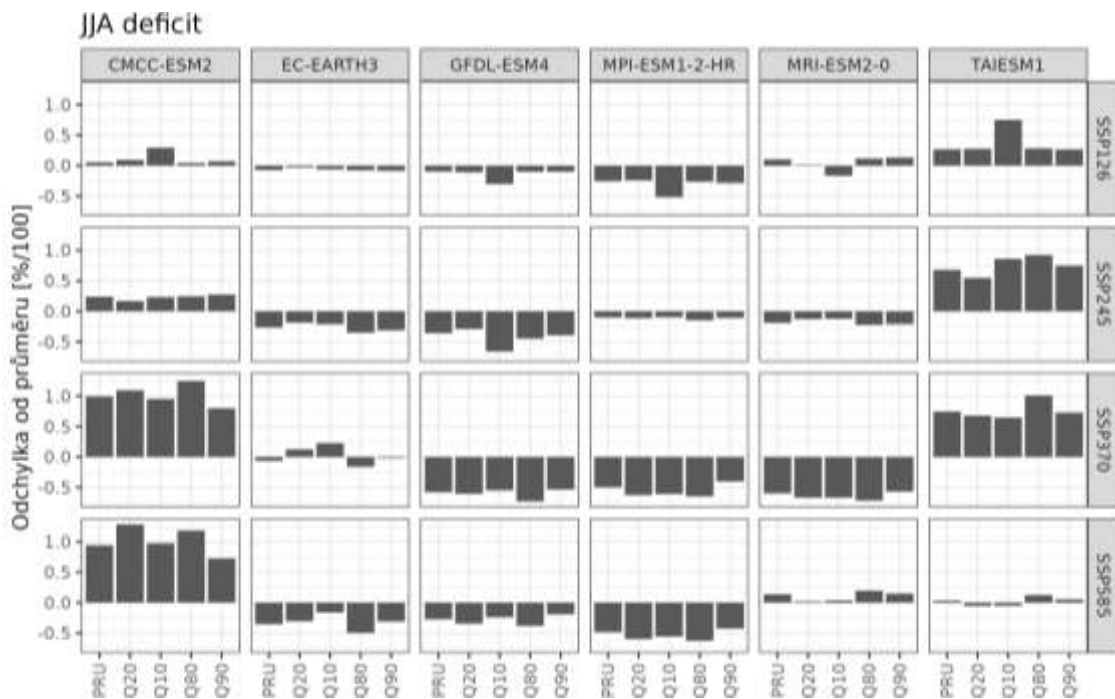
K modelování hydrologické bilance byl použit model Bilan, je vyvíjen více jak 20 let na oddělení hydrologie Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka, v. v. i. Model počítá v denním či měsíčním časovém kroku chronologickou hydrologickou bilanci povodí či území. Vyjadřuje základní bilanční vztahy na povrchu povodí, v zóně aerace, do níž je zahrnut i vegetační kryt povodí a v zóně podzemní vody. Jako ukazatel bilance 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. Pro modelování hydrologické bilance byla použita měsíční verze modelu.

5.2.1 Shluková analýza simulovaných dopadů

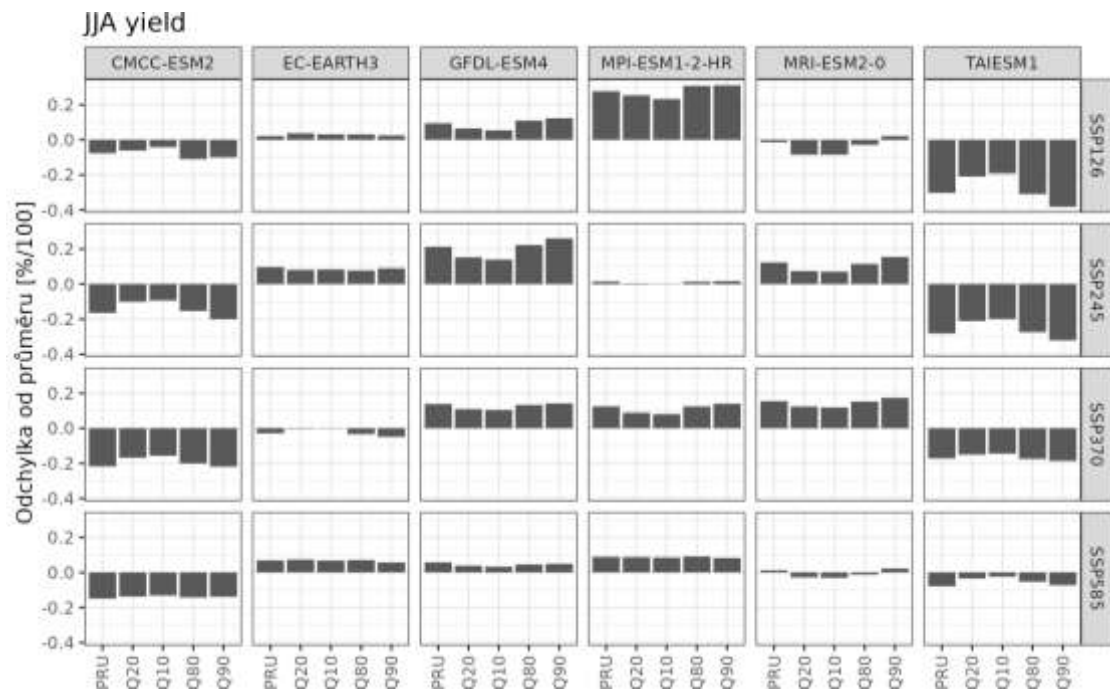
Z hlediska využití v praxi je často nezbytné redukovat celkový počet variantních řešení na jedno až tři, přestože z metodického hlediska je doporučováno spíše uvažovat co nejvíce dostupných variant a sumarizaci simulací provést až na konci analýzy. Samotné projekce klimatických modelů jsou zatíženy značnou nejistotou a informace o míře této nejistoty by měla být nedílnou součástí odhadu. Kompromisem mezi zpracováním celého souboru simulací a výběrem jedné, je výběr menšího počtu simulací, které reprezentují chování celého souboru, a to co nejdále v řetězci jednotlivých kroků analýzy.

Za účelem redukce počtu variant byla provedena analýza variability souboru simulací vzhledem k projekcím deficitů a dostupné vody. Příklady jsou uvedeny na následujících obrázcích, na kterých jsou

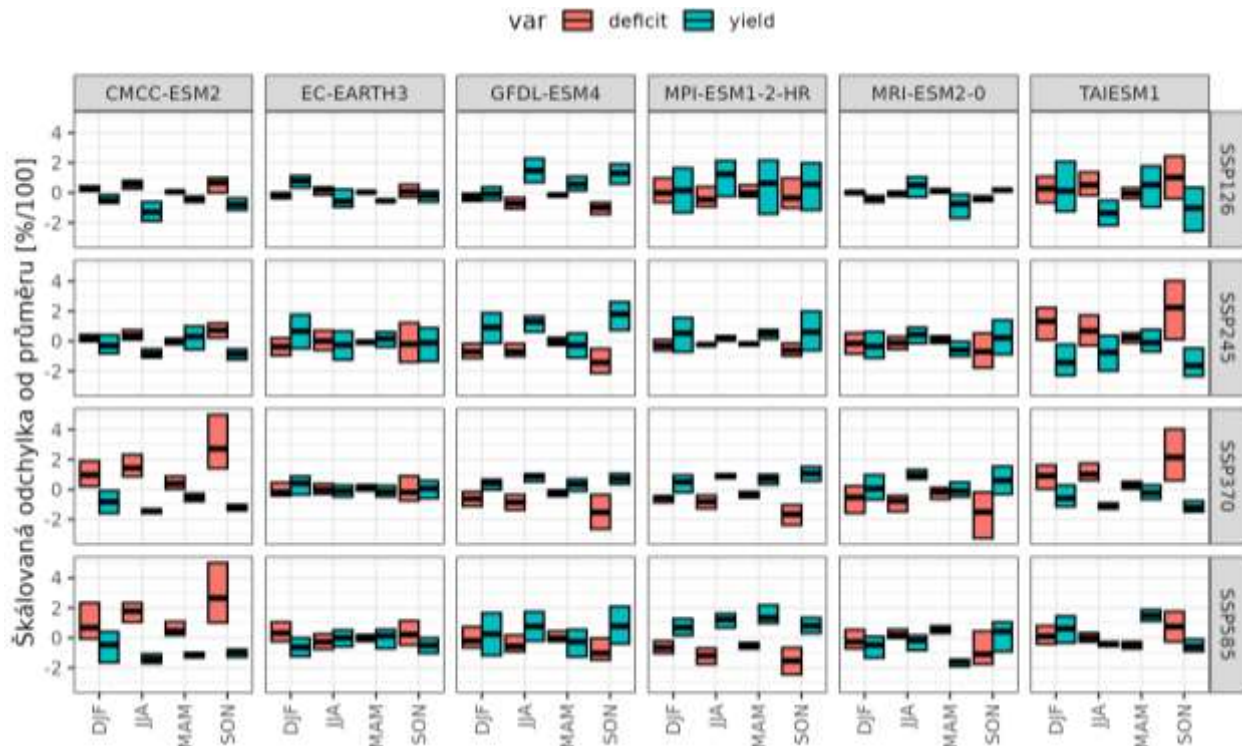
zobrazeny odchylky od průměrné změny deficitu (Obr. 5-13) a od průměrné změny množství dostupných vodních zdrojů (Obr. 5-14) v letním období pro jednotlivé globální klimatické modely a scénáře SSP. Podobně byly analyzovány deficity i množství dostupné vody pro ostatní roční období. I na základě vizuálního porovnání je možno konstatovat existenci skupin/shluků simulací – zejména evidentní je to pro simulace vykazující poměrně optimistické chování (CMCC-ESM2 a TAIESM1). Zbývající 4 simulace jsou v zásadě v řadě charakteristik srovnatelné. Sumarizace odchylek je uvedena na Obr. 5-15.



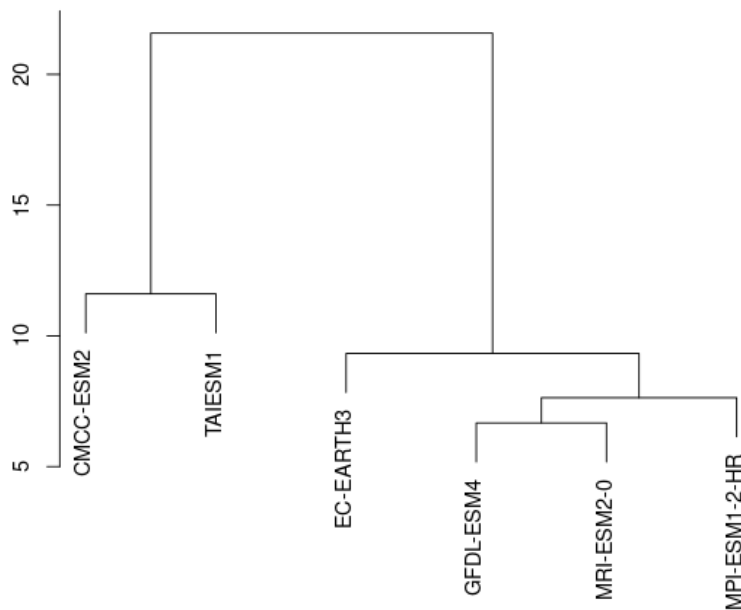
Obr. 5-13: Odchylky od průměrné změny charakteristik (průměr a vybrané kvantily) deficitu [%/100] v letním období (JJA – červenec až srpen) pro jednotlivé globální klimatické modely a scénáře SSP.



Obr. 5-14 Odchyly od průměrné změny charakteristik (průměr a vybrané kvantily) množství dostupné vody v letním období [%/100] pro jednotlivé globální klimatické modely a scénáře SSP.



Obr. 5-15 Odchylyka od průměrných změn.



Obr. 5-16: Hierarchická shluková analýza deficitů a množství dostupné vody v souboru GCM simulací.

Pro prozkoumání struktur uvnitř souboru simulací byla použita shluková analýza. Odhady shluků se dle jednotlivých algoritmů částečně liší, nicméně existence shluku CMCC-ESM2 – TAIESM1 se robustně objevovala ve všech testovaných analýzách. Průměrné odchylky pro deficit a dostupné množství vody (yield) udává následující tabulka.

Z analýzy je evidentní, že nejbližše středu souboru simulací leží EC-EARTH3 a je tak jasným kandidátem na zařazení do výběru simulací. Z robustně identifikovaného shluku CMCC-ESM2 – TAIESM1 byla do výběru zvolena o něco konzervativnější simulace TAIESM1. Jako třetí byla do redukovaného výběru zvolena simulace MPI-ESM1-2-HR, jako představitel simulací s poměrně závažnými negativními dopady. Pro prezentaci ve specializované mapě byly tedy vybrány simulace: EC-EARTH3, TAIESM1 a MPI-ESM1-2-HR. Pro různé kombinace veličin, SSP scénářů a charakteristik nemusí odpovídat chování vybraných simulací vždy chování průměrnému. Nicméně vzhledem k tomu, že změny ze souboru simulací nepokrývají rozmezí změn rovnoměrně, je vhodnější vybrat několik simulací než charakterizovat soubor simulací průměrem a rozptylem (nebo jinou mírou variability).

Tabulka 5-1: Průměrné odchylky pro deficit a množství vody (yield).

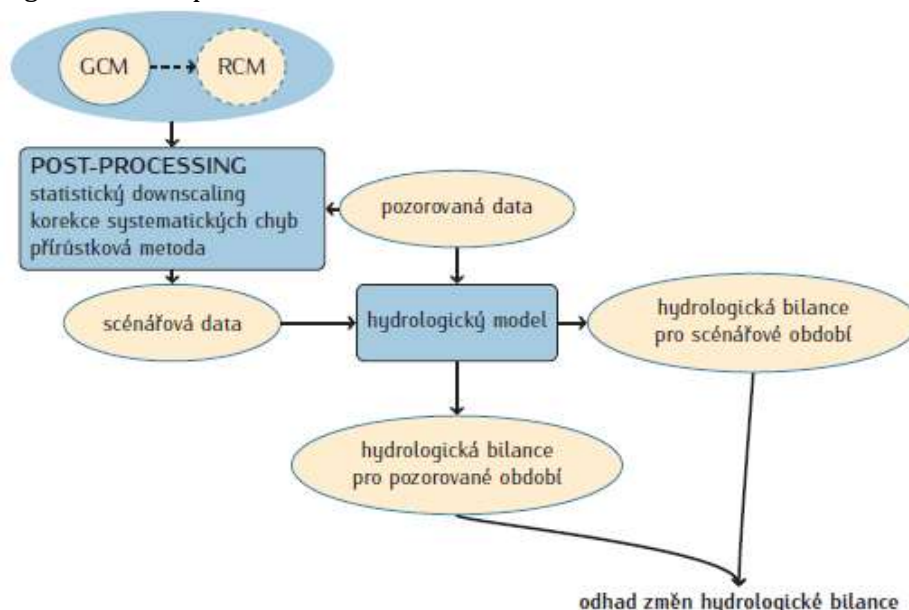
GCM	deficit	yield	deficit * yield
CMCC-ESM2	1.0576	-1.0159	-1.07445
EC-EARTH3	-0.01686	-0.1906	0.00321
GFDL-ESM4	-0.7552	1.0291	-0.77715
MPI-ESM1-2-HR	-0.6624	0.7478	-0.49533
MRI-ESM2-0	-0.4344	0.3618	-0.15718
TAIESM1	0.8112	-0.9321	-0.75618

5.2.2 Hydrologické modelování změn klimatu

Postup modelování dopadu změny klimatu na hydrologický režim (viz Obr. 5-17) lze stručně shrnout následovně:

1. Zvolený hydrologický model je pro vybrané povodí nakalibrován pomocí pozorovaných dat. Hydrologický model by měl být fyzikálně založen, aby bylo zaručeno, že i pro nepozorované podmínky bude poskytovat fyzikálně přijatelné výsledky.
2. Vstupní veličiny z globálního, popřípadě vnořeného regionálního klimatického modelu jsou převedeny na scénářové řady pro jednotlivá povodí, a to:
 - (a.i.1.a) statistickým downscalingem,
 - (a.i.1.b) „postprocessingem“ výstupu klimatického modelu, tj. využitím přírůstkové metody či korekce systematických chyb.

Často je nutné pomocí prostorové interpolace vztáhnout data z výpočetních buněk klimatického modelu k těžišti daného povodí. Pro korektní využití všech metod (a–b) je nezbytné mít k dispozici pozorovaná data.
3. Pomocí nakalibrovaného hydrologického modelu a scénářových řad je provedena simulace hydrologické bilance pro scénářové období.



Obr. 5-17 Schéma hydrologického modelování dopadů změny klimatu.

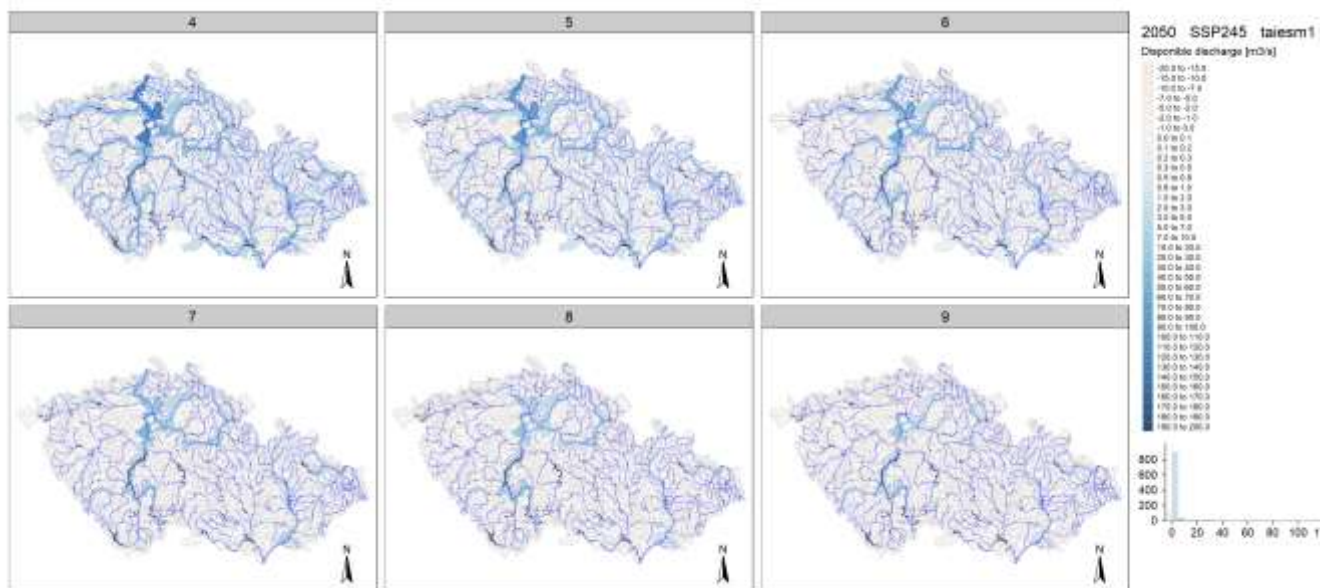
Na systém SoilClim (definující vláhovou potřebu) a hydrologický model Bilan navazuje zjednodušený model říční sítě a nádrží WATERES. Model WATERES je vodohospodářský model vyvinutý ve VÚV TGM, v. v. i., v Praze a je zaměřený na výpočet charakteristik a provádění simulací na vodních nádržích. Model WATERES lze využít k výpočtu dlouhodobé vodní bilance nádrží a vodohospodářských soustav, charakteristik vodních nádrží a odhadu účinnosti vodní nádrže, nedostatkových objemů (pro posouzení

sucha) v povodí nádrže a vodohospodářské soustavy a transformace povodňových vln. Obdobná kaskáda modelů je využita v rámci systému HAMR.

Pro modelování hydrologické a vodohospodářské bilance byla použita selekce klimatických modelů, která je popsána v kapitole *Výběr modelů*, tzn. kombinace:

- 6 GCM,
- 4 výhledová období,
- 4 emisní scénáře.

Základní běhy tedy obsahovaly 96 variant v denním časovém kroku dle výhledových scénářů + historický běh. Tento počet byl ještě 15 x navýšen, na základě variantního (1-15 mm) řešení navýšení závlahové potřeby vody. V rámci všech variant byly následně hodnoty agregovány a vypočteny charakteristiky (jednotlivé kvantily) ohledně průtoku, disponibilních zdrojů, deficitu a zabezpečení, tak aby byly podkladem pro veřejnou databázi. Agregace byly provedeny na bázi roční, sezónní a měsíční. Ukázka agregací pro měsíce ve vegetační sezóně a disponibilní vodní zdroje je na Obr. 5-18: (SSP245, výhled k roku 2050, GCM: taiesm1).



Obr. 5-18: Disponibilní vodní zdroje pro měsíce ve vegetační sezóně pro simulaci: SSP245, GCM: taiesm1, Rok: 2050

5.2.3 Popis zpřístupnění dat databáze RIGH – Specializovaná veřejná databáze

Na základě výstupů projektu, a především dopadů klimatické změny na vodní režim a vodní zdroje byla vytvořena databáze RIGH (Risk Irrigation Hydrology), která je dostupná na shiny.vuv.cz/RIGH. Databáze poběží na technice VÚV TGM v Praze.

Cílem databáze je poskytnout uživatelům ucelené informace o dostupnosti vody pro současné a výhledové podmínky s důrazem na jednotlivé simulace GCM.

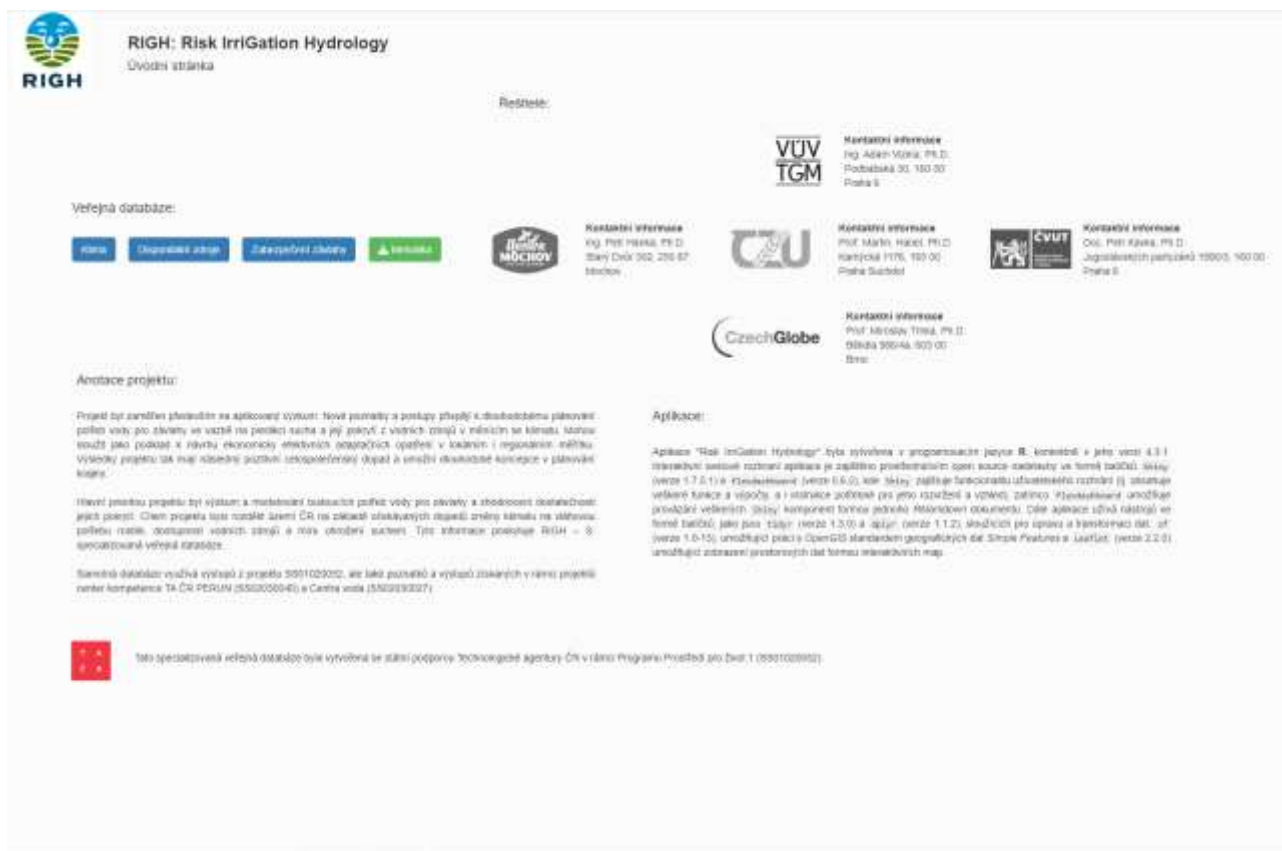
Technická specifikace

Databáze „Zabezpečení závlahy“ byla vytvořena v programovacím jazyce R, konkrétně v jeho verzi 4.3.1. Interaktivní webové rozhraní aplikace je zajištěno prostřednictvím open source nadstavby ve formě balíčků Shiny (verze 1.7.5.1) a flexdashboard (verze 0.6.2), kde Shiny zajišťuje funkcionalitu uživatelského rozhraní (tj. obsahuje veškeré funkce a výpočty, a i instrukce potřebné pro jeho rozvržení a vzhled), zatímco flexdashboard umožňuje provázání veškerých Shiny komponent formou jednoho RMarkdown dokumentu. Dále aplikace užívá nástrojů ve formě balíčků, jako jsou tidy (verze 1.3.0) a dplyr (verze 1.1.2), sloužících pro úpravu a transformaci dat, sf (verze 1.0-13), umožňující práci s OpenGIS standardem geografických dat Simple Features a Leaflet (verze 2.2.0) umožňující zobrazení prostorových dat formou interaktivních map.

Úvodní strana

Rozcestník pro databázi je přes úvodní stranu (Obr. 5-19), na které je zobrazeno:

1. Logo a název projektu: V horní části je logo "RIGH", což je zkratka pro "Risk IrriGation Hydrology".
2. Sekce s veřejnou databází: Obsahuje odkazy na sekce, jako jsou **Klima**, **Dostupné zdroje**, **Zabezpečení závlahy**, a **Metodika**, které uživatelům poskytují přístup k relevantním informacím a datům.
3. Kontaktní informace: Na pravé straně jsou uvedeny kontaktní informace na řešitele včetně jejich institucí a umístění.
4. Aplikace: Sekce "Aplikace" poskytuje informace o aplikaci "Risk IrriGation Hydrology" a popisuje technické detaily jako verzi aplikace, použité programovací jazyky a knihovny (např. R, Shiny, Flexdashboard).
5. Anotace projektu.



Obr. 5-19: Úvodní strana databáze RIGH

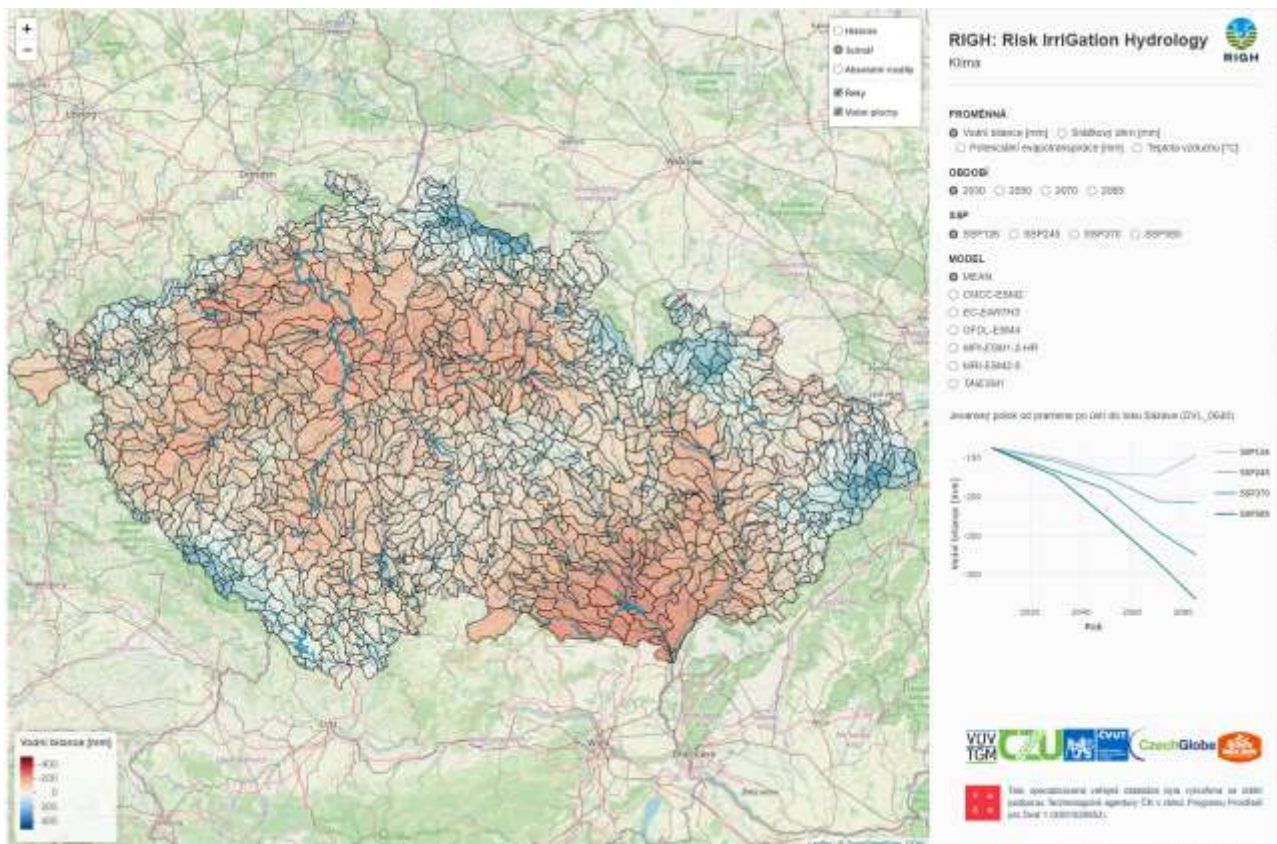
Klima

Komponenta Klima zobrazuje souhrn základních klimatologických veličin ve vegetačním období pro jednotlivé vodní útvary. Na obrázku je znázorněno uživatelské rozhraní s různými možnostmi výběru. Uživatel si může vybrat různé proměnné, jako je vodní bilance (mm), srážkový úhrn (mm), teplota vzduchu (°C) a potenciální evapotranspirace (mm). Dále je možné vybírat mezi různými obdobími (2030, 2050, 2070, 2085) a různými socioekonomickými cestami (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585), což naznačuje možné budoucí vývojové scénáře.

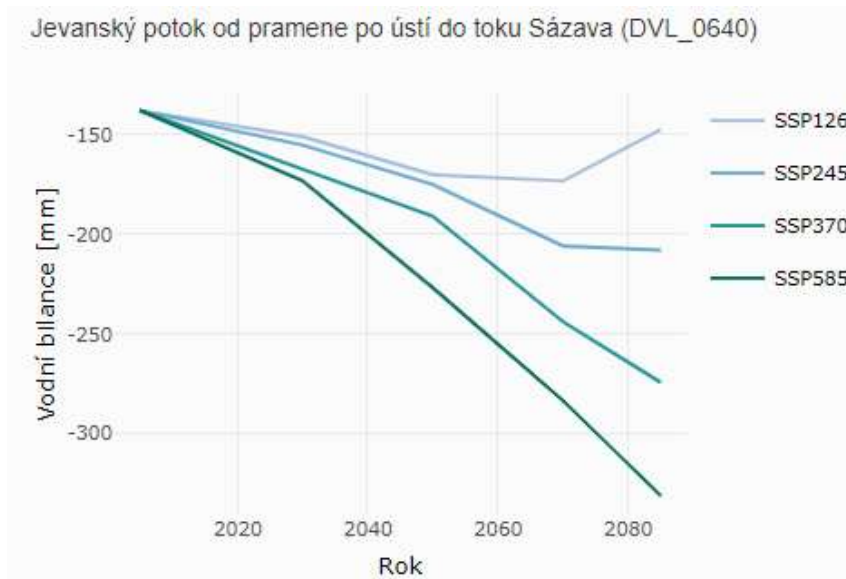
Pod tímto výběrem jsou uvedeny modely klimatu, jako je MEAN (průměr ze všech modelů), CMCC-ESM2, EC-EARTH3, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 a TAI/ESM1, které pravděpodobně představují různé klimatické modely používané pro simulace. Dále je možné zobrazovat hodnoty pro současnost (1991-2020), scénářové hodnoty k roku 2050 a absolutní rozdíly mezi výhledem a současností pro zvolenou veličinu. Rozdělovník je uveden na Obr. 5-20. Na Obr. 5-21 je zobrazena vodní bilance pro variantu: výhled k roku 2030, SSP126 a MEAN (průměr ze všech simulací). V pravé části je uveden graf (Obr. 5-22) který zobrazuje vývoj zvolené veličiny a vodní útvar dle jednotlivých SSP scénářů.

Analogicky je uživatelské prostředí i pro další komponenty.

Obr. 5-20 Rozdělovník databáze RIGH: možnosti výběru veličin a časového výhledu v komponentě Klima



Obr. 5-21 Vodní bilance pro variantu: výhled k roku 2030, SSP126 a MEAN (průměr ze všech simulací)



Obr. 5-22 Vývoj zvolené veličina a vodní útvar dle jednotlivých SSP scénářů

Disponibilní zdroje

Mapové okno zobrazuje vodní útvary, přičemž každé povodí je obarveno podle dostupnosti vodních zdrojů (disponibilní zdroje) v jednotkách m^3/s a v jednotlivých měsících. Dostupnost vodních zdrojů je rozdělena do kategorií od $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ až po více než $500.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

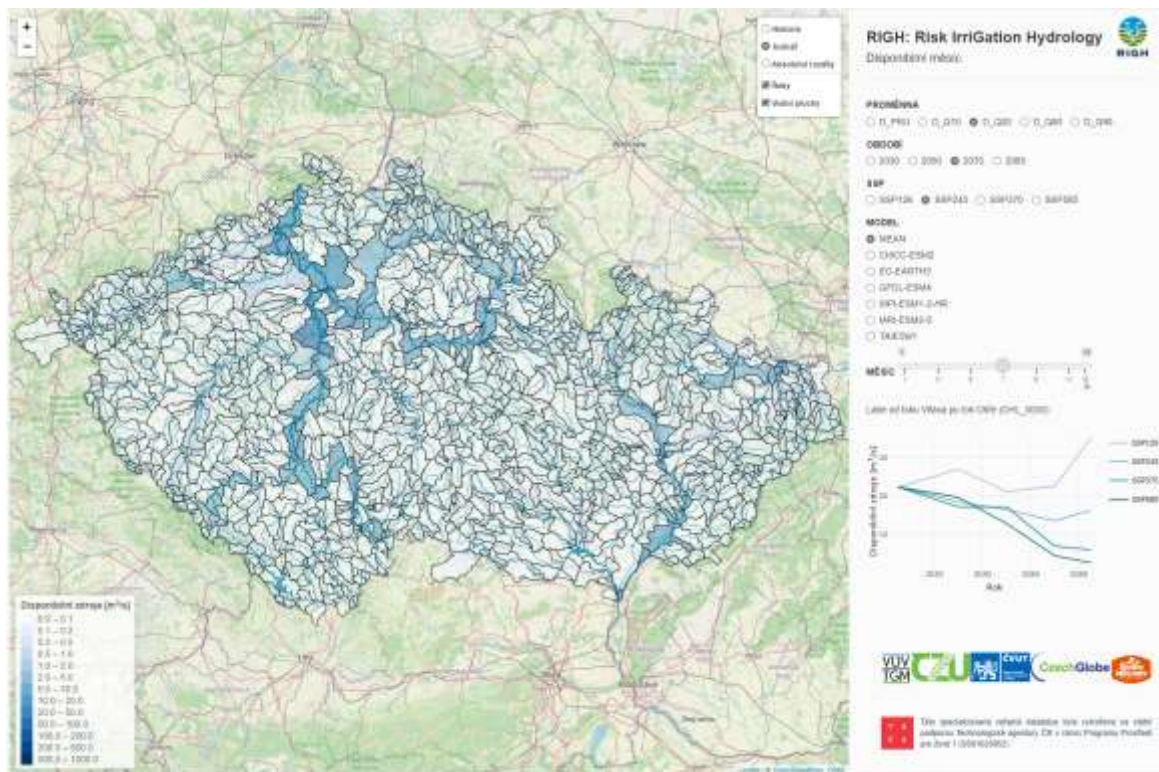
Výpočet byl proveden v denním kroku a agregován do jednotlivých měsíců, ve kterých byly napočteny charakteristiky:

- Průměr (D_PRU)
- D_Q10 (desetileté sucho), D_Q20 (pětileté sucho)
- D_Q10 (desetiletá vodnost), D_Q80 (pětiletá vodnost)

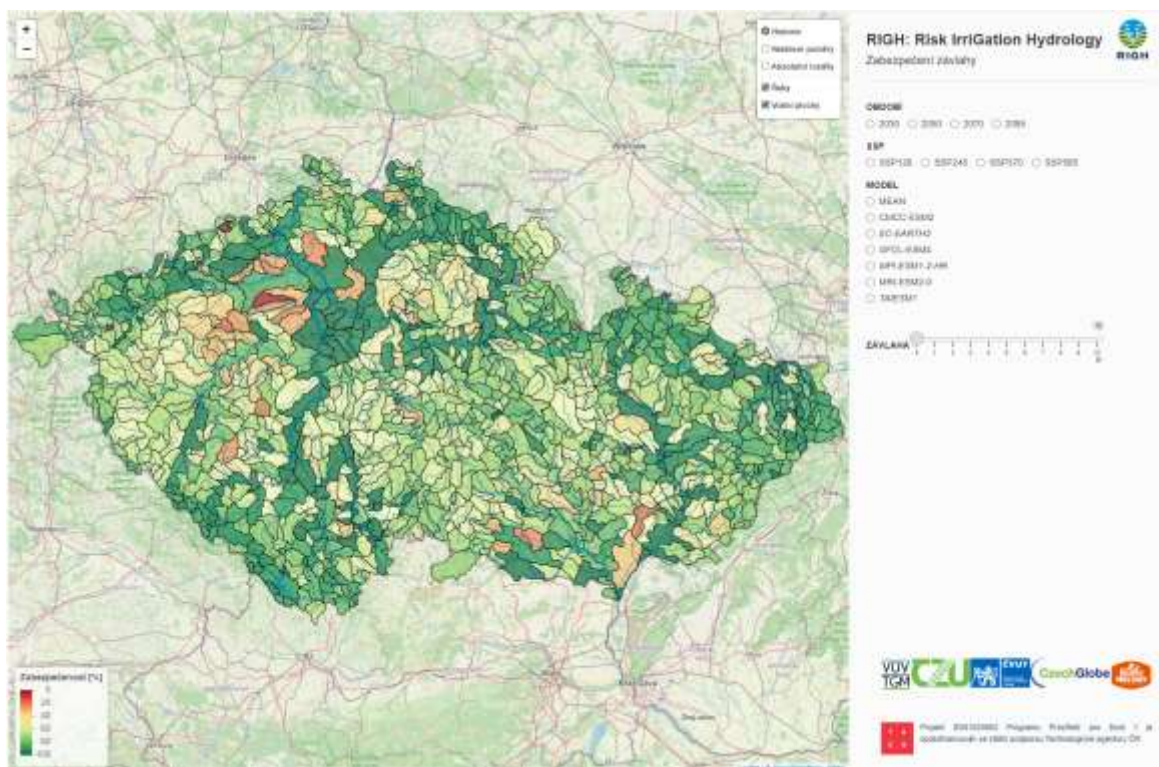
Disponibilní množství je v tomto rozdíl mezi modelovaným průtokem a minimálními zůstatkovými průtoky (MZP). Následující obrázek zobrazuje disponibilní zdroje a scénář k roku 2070, SSP245 a MEAN (průměr ze všech simulací GCM). U výhledových simulací lze zvolit mezi absolutními hodnotami (Scénář) a Absolutními rozdíly (rozdíl mezi výhledem a současností/Historie).

Zabezpečení závlahy

Mapové okno zobrazuje zabezpečení dodávky vody (zabezpečení závlahy, s barevnou škálou v levém dolním rohu indikující procentuální zabezpečení od 0 % do 100 %) na základě simulací výše zmíněnými modely (BILAN + WATERES). Na pravé straně je posuvník s nápisem "ZÁVLÁHA", který zřejmě umožňuje uživateli vybrat parametry závlahy, kde lze volit mezi množstvím vody (0-10 mm/den), o které se modelově dodávala závlaha na zavlažovatelné pozemky specifikovaných v rámci řešení/analýz projektu.



Obr. 5-23 Komponenta disponibilní zdroje a scénář k roku 2070, SSP245 a MEAN (průměr ze všech simulací GCM)



Obr. 5-24 Komponenta zabezpečení závlahy pro variantu současnost (Historie)

5.3 Analýza charakteristik UPOV z pohledu dopadů klimatických změn

Vedle dlouhodobých hydro-klimatologických charakteristik popsaných výše je hydrologická bilance, dostupnost vody a možnosti její retence a akumulace ovlivněna celou řadou dalších charakteristik. Mezi tyto charakteristiky patří zejména:

- Retenční vlastnosti půd ve vazbě na využití povrchu (Land Use)
- Intenzita krátkodobých srážek a intenzita déletrvajících srážek
- Rizika rychlého odtoku v návaznosti na výskyt konvektivních (bouřkových) srážkových událostí, kdy dochází k rychlému odtoku a kdy se snižuje schopnost zachycení vody ve zdrojových povodích.
- Potenciální potřeba vody pro závlahy. Zejména se jedná o plochy zemědělství a v lokálním měřítku se může rovněž jednat o závlahy golfových hřišť.

Společně s hydroklimatickým charakteristikami je soubor těchto charakteristik natolik široký, že pro celkové hodnocení možných dopadů je třeba kategorizovat území, v případě tohoto projektu jednotlivé prostorové jednotky UPOV, do skupin (clusterů) se shodnými znaky. Pro toto hodnocení se využívá tzv. clusterové analýzy, do které vstupují jednotlivé odvozené charakteristiky. Korektně provedená clusterová analýza pak předpokládá nezávislost sledovaných parametrů. V případě silné závislosti dvou a více vstupujících parametrů je jejich vliv posílen. V rámci řešení projektu byla provedena tato analýza s řadou parametrů pro současné, tak pro budoucí scénáře pro jednotlivé UPOV. Výsledná kategorizace těchto povodí může být další součástí výsledné mapy. Do samotné kategorizace pak vstupovali následující charakteristiky:

Tabulka 5-2: hodnocené charakteristiky UPOV

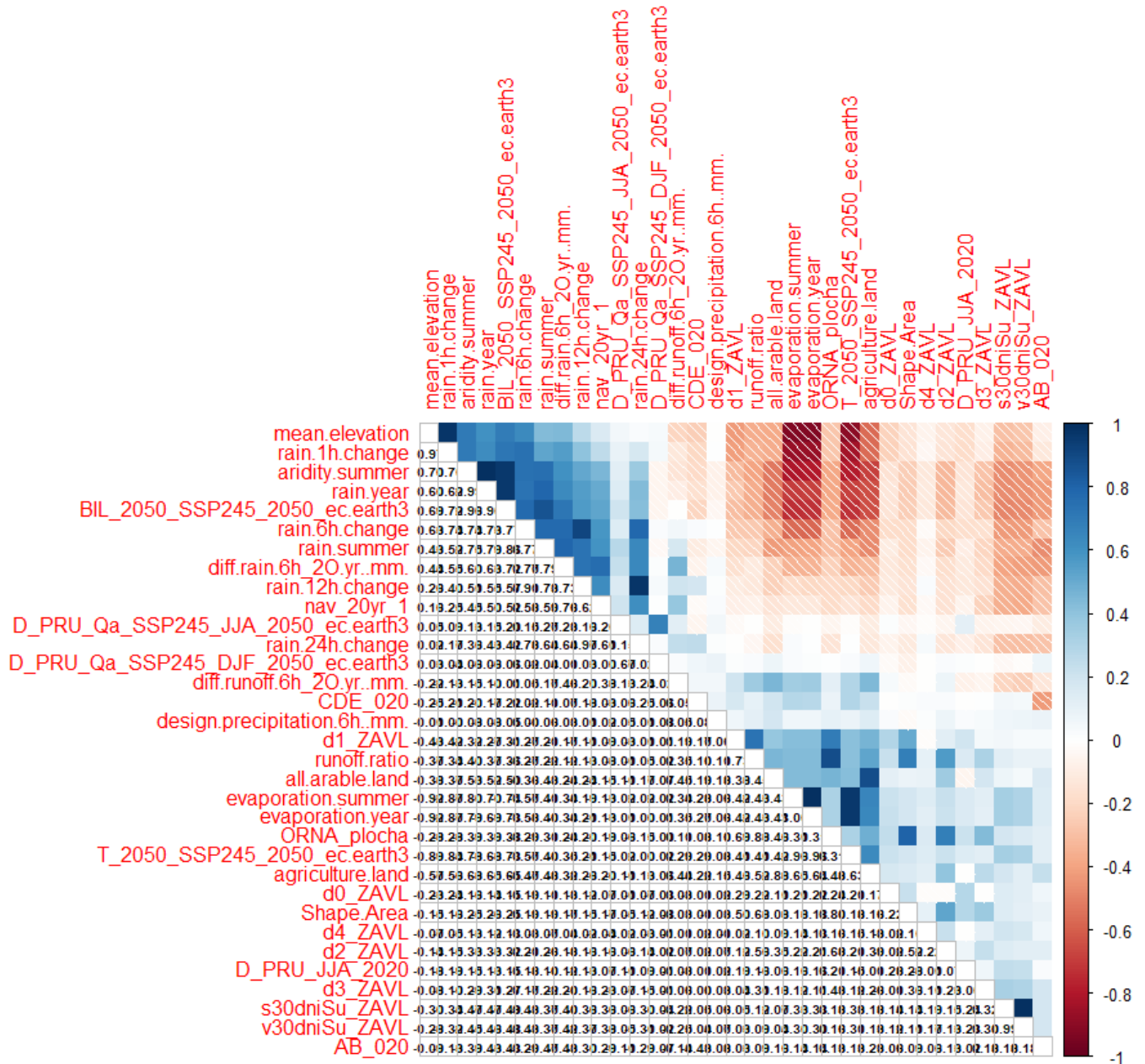
	typ dat	Název	Popis
Současnost	Fyzickogeografické údaje	velikost území	velikost jednotlivých UPOV
Současnost	Fyzickogeografické údaje	průměrná nadmořská výška	průměrná nadmořská výška pro jednotlivé UPOV
Současnost	Hydrologická bilance	Deficit - normál	Hydrologický deficit pro jednotlivé UPOV. Akumulováno po ročních obdobích
Současnost	Hydrologická bilance	Vláhová potřeba - normál	Potřeba vody pro referenční období pro jednotlivé UPOV. Akumulováno po ročních obdobích
Současnost	Hydrologická bilance	Disponibilní zdroje - normál	Disponibilní voda pro jednotlivé UPOV. Akumulováno po ročních obdobích
Současnost	Hydrologická bilance	Deficit - sucho	Hydrologický deficit pro jednotlivé UPOV pro víceleté sucho. Akumulováno po ročních obdobích
Současnost	Hydrologická bilance	Vláhová potřeba - sucho	Potřeba vody pro referenční období pro jednotlivé UPOV pro víceleté sucho. Akumulováno po ročních obdobích
Současnost	Klimatologická bilance	průměrný roční výpar	průměrný roční výpar
Současnost	Klimatologická bilance	průměrný výpar letní měsíce	průměrný výpar pro letní měsíce
Současnost	Klimatologická bilance	průměrné roční srážky	průměrné roční srážky
Současnost	Klimatologická bilance	průměrné letní srážky	průměrné srážky pro letní měsíce
Současnost	Klimatologická bilance	index sucha	index popisující možný výskyt sucha
Současnost	Klimatologická bilance	průměrný roční výpar - sucho	průměrný roční výpar
Současnost	Klimatologická bilance	průměrný výpar letní měsíce - sucho	průměrný výpar pro letní měsíce
Současnost	Klimatologická bilance	průměrné roční srážky – sucho	průměrné roční srážky

Současnost	Klimatologická bilance	průměrné letní srážky – sucho	průměrné srážky pro letní měsíce
Současnost	Srážky	návrhové šestihodinové srážky	návrhové šestihodinové srážky (rain.fsv.cvut.cz)
Současnost	Zemědělství	obdělávaná půda	veškerá orná půda v databázi LPIS
Současnost	Zemědělství	zavlažovatelná orná půda	obdělávaná půda z které jsou vyřazeny pozemky bez uvažované potenciální závlahy (TTP, les na orné atp.)
Současnost	Zemědělství	výrobní oblasti	Zemědělské výrobní oblasti - současnost
Výhled	Hydrologická bilance	bilance	Výhledové hydrologické bilance, po sezónách, různé klimatické modely, různé SSP (90 scénářů)
Výhled	Hydrologická bilance	Deficit - sucho	Hydrologický deficit pro jednotlivé UPOV pro víceleté sucho. Akumulováno po ročních obdobích. Spočteno v pro různé klimatické scénáře, SSP a výhledy.
Výhled	Hydrologická bilance	Vláhová potřeba – sucho	Potřeba vody pro referenční období pro jednotlivé UPOV pro víceleté sucho. Akumulováno po ročních obdobích. Spočteno v pro různé klimatické scénáře, SSP a výhledy.
Výhled	Hydrologická bilance	Deficit – normál	Hydrologický deficit pro jednotlivé UPOV. Akumulováno po ročních obdobích. Spočteno v pro různé klimatické scénáře, SSP a výhledy.
Výhled	Hydrologická bilance	Vláhová potřeba – normál	Potřeba vody pro referenční období pro jednotlivé UPOV. Akumulováno po ročních obdobích. Spočteno v pro různé klimatické scénáře, SSP a výhledy.
Výhled	Hydrologická bilance	Disponibilní zdroje	Disponibilní voda pro jednotlivé UPOV. Akumulováno po ročních obdobích
Výhled	Klimatologická bilance	průměrný roční výpar	průměrný roční výpar
Výhled	Klimatologická bilance	průměrný výpar letní měsíce	průměrný výpar pro letní měsíce
Výhled	Klimatologická bilance	průměrné roční srážky	průměrné roční srážky
Výhled	Klimatologická bilance	průměrné letní srážky	průměrné srážky pro letní měsíce
Výhled	Klimatologická bilance	průměrný roční výpar – sucho	průměrný roční výpar

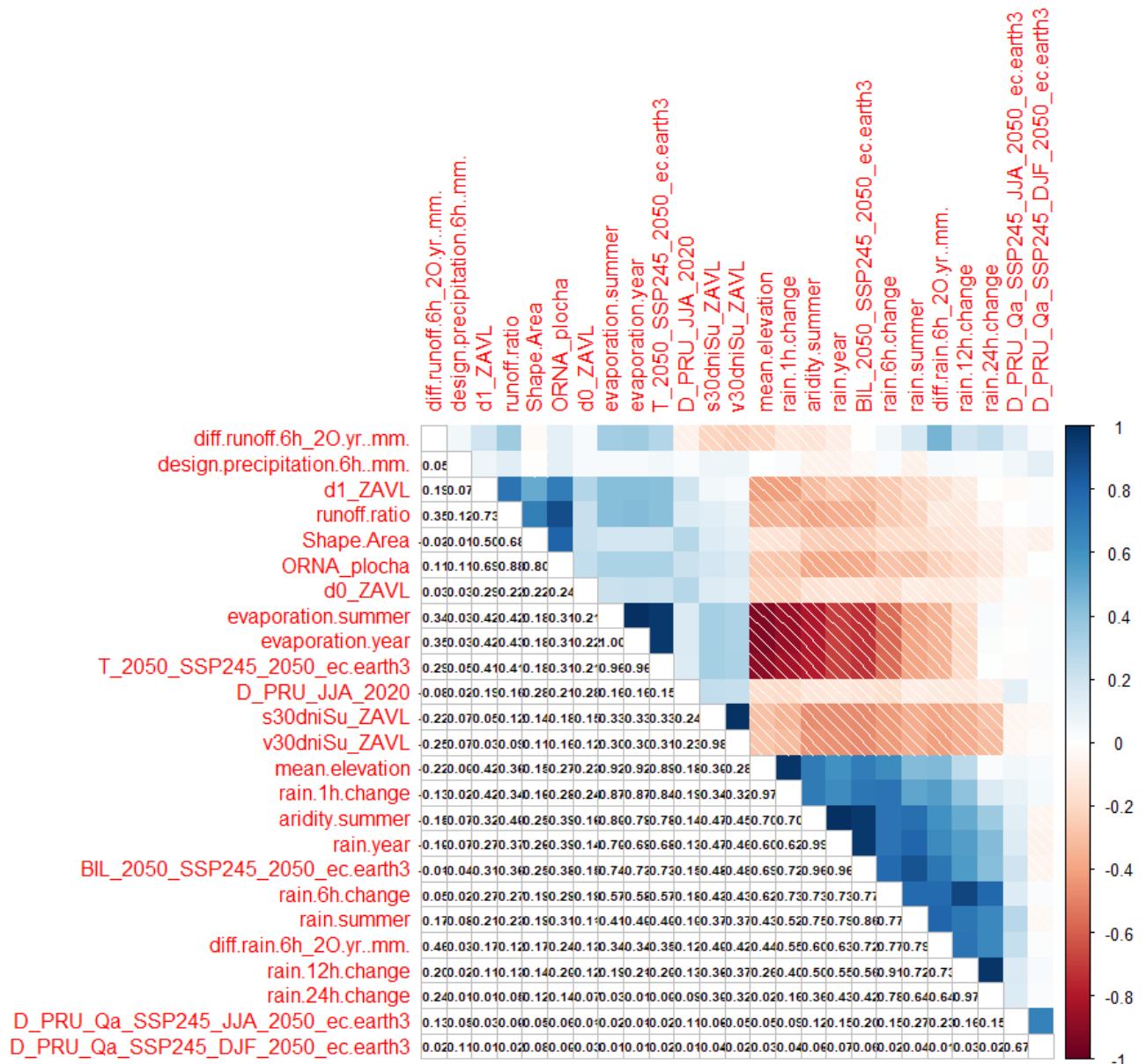
T A Č R

Výhled	Klimatologická bilance	průměrný výpar letní měsíce – sucho	průměrný výpar pro letní měsíce
Výhled	Klimatologická bilance	průměrné roční srážky – sucho	průměrné roční srážky
Výhled	Klimatologická bilance	průměrné letní srážky – sucho	průměrné srážky pro letní měsíce
Výhled	Zemědělství	výrobní oblasti	Zemědělské výrobní oblasti – současnost
Změna	Klimatologická bilance	změny v odezvě na krátkodobé srážky	změny v odezvě na krátkodobé srážky na malých povodích. Vypočteno na základě hydrologické metody SCS-CN pro současný stav a s připočtením změny srážek – průměrný scénář. Tyto hodnoty v době integrují infiltrační potenciál půd na celkové využití území ve zdrojových povodích (odezvy na doby opakování návrhových srážek)
Změna	Klimatologická bilance	změny srážek na malých povodích	změny ve srážkách krátkodobé srážky na malých povodích s dobou opakování 20 let. (jiné doby opakování silně korelují s dobou opakování 20 let)
Změna	Klimatologická bilance	poměr odtoku z malých povodí	poměr odtoku z malých povodí spočtený jako poměr objemu odtoku ku objemu příčinné srážky na malých povodích. Tento parametr popisuje schopnost povodí zachytit srážkovou vodu.
Změna	Srážky	změny srážek s délkou trvání 1 h	změny srážek ve středním výhledovém klimatickém scénáři pro srážky o délce trvání jednu hodinu
Změna	Srážky	změny srážek s délkou trvání 12 h	změny srážek ve středním výhledovém klimatickém scénáři pro srážky o délce trvání dvanáct hodin
Změna	Srážky	změny srážek s délkou trvání 24 h	změny srážek ve středním výhledovém klimatickém scénáři pro srážky o délce trvání dvacet čtyři hodin
Změna	Srážky	změny srážek s délkou trvání 6 h	změny srážek ve středním výhledovém klimatickém scénáři pro srážky o délce trvání šest hodin
Změna	Zemědělství	změny ve vymezení výrobních oblastí	Změny zemědělských výrobních oblastí (metoda pixel by pixel), spočítané změny na zavlažovatelné orné půdě po jednotlivých UPOV

Vzájemné vazby mezi hodnocenými vstupními charakteristikami pak ukazují následující korelační matice. Pro velký rozsah dat je korelační matice rozdělena na několik navazujících kroků, kde byly nejprve hledány vzájemné vazby mezi příbuznými parametry a z kterých byli vybrány ty nejcharakterističtější. Ty byly následně porovnávány s méně příbuznými parametry a další závislosti byly hledány již mezi méně zjevnými vazbami.

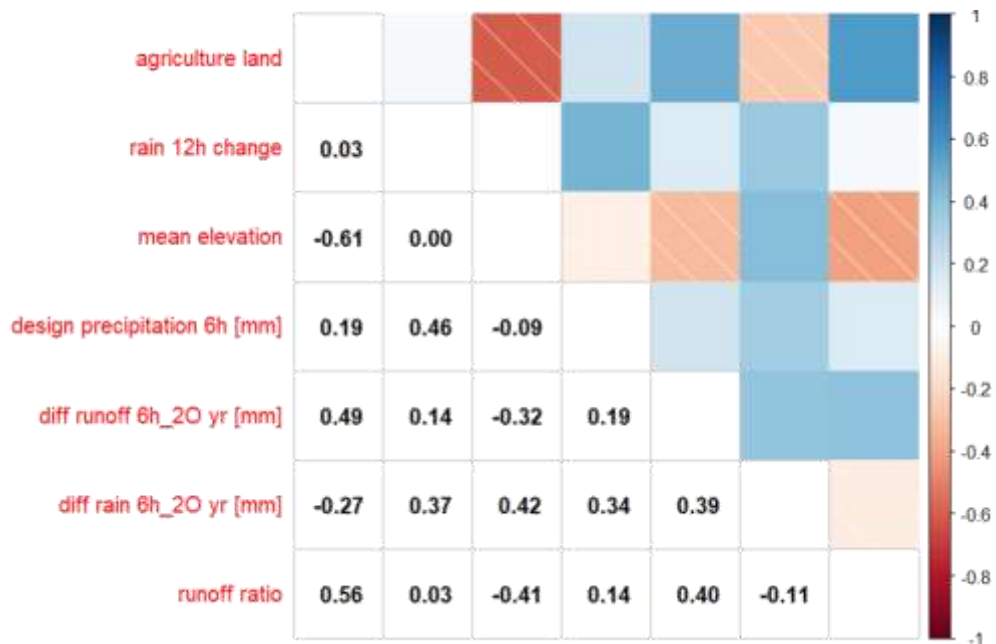


Obr. 5-25: Matice závislostí jednotlivých charakteristik I



Obr. 5-26: Matice závislostí jednotlivých charakteristik II

Výběr dat byl zúžen na jeden výhledový klimatická scénář **ec.earth3** pro výhledové období **2050** a jeden emisní scénář- **SSP245**. Ze stovek spočtených a hodnocených dat bylo vybráno na základě vzájemné korelace 34 parametrů Mezi těmito parametry byly hledány nejméně závislé proměnné, které zároveň charakterizují současný stav a možné výhledy pro jednotlivé UPOVs a které vstupovali do tzv. clustrové analýzy.



Obr. 5-27: Výsledné nezávislé charakteristiky vstupující do clusterové analýzy

Shluková analýza jednotlivých UPOV je pak vizualizována v následujících mapách. S tím že za nejvhodnější je považován rozpad UPOV do pěti skupin. V případě většího počtu skupin již vznikají skupiny o malém počtu povodí.



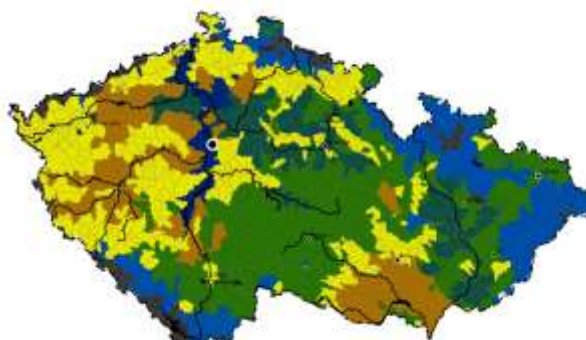
a.)



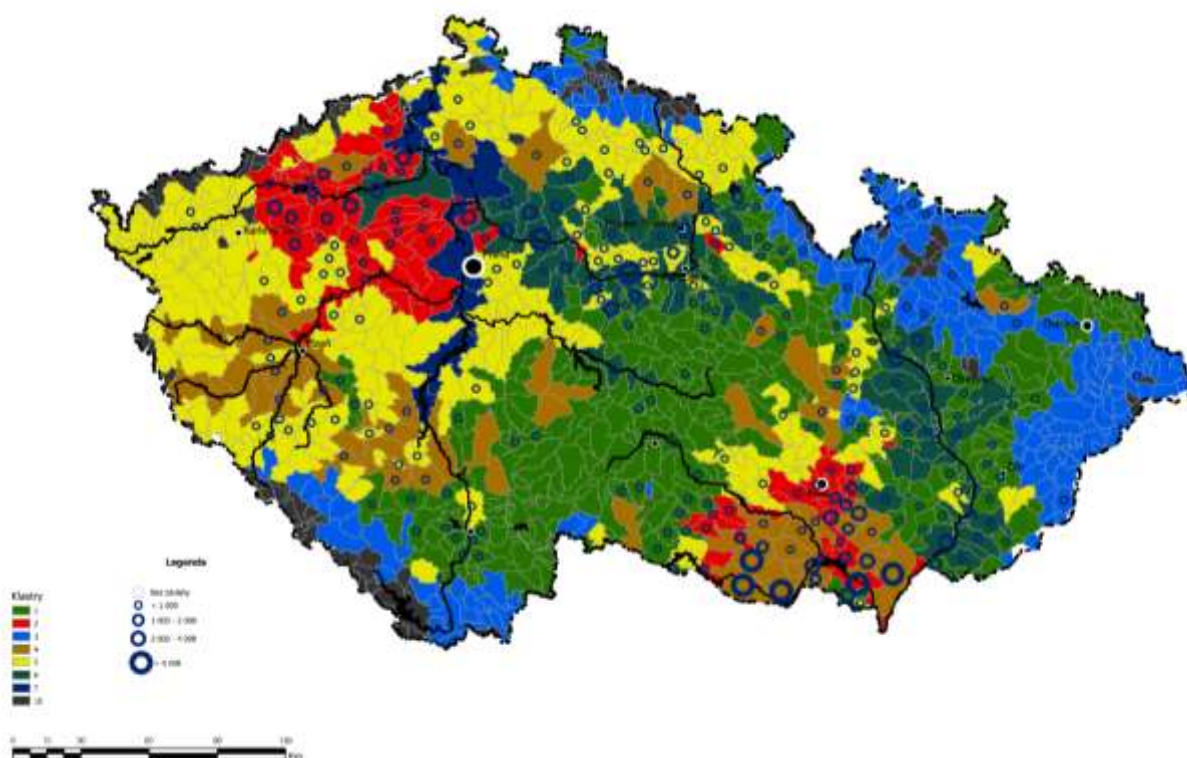
b.)



c.)



d.)



e.) rozpad UPOV do finálních 5ti clusterů

Obr. 5-28: postupný vývoj tvorby clusterů

Z hlediska této shlukové analýzy tvoří tedy pět skupin, které lze definovat podle hodnotících kritérií podle následující tabulky.

Tabulka 5-3: popisné charakteristiky clusterů z pohledu potenciálu a rizika závlah

číslo	barva	popis
1	světle modrá	Podhorská povodí zahrnující Pošumaví, Podkrkonoší, Orlické hory, Novohradské hory, Beskydy, Jeseníky a Bílé Karpaty. Tyto UPOV se vyznačují nízkou změnou na

		rychlé složce odtoku i díky malému chodu přívalových srážek, nejmenším počtem suchých dní a nejmenšími změnami výrobních oblastí. Zároveň ale povodí s nejmenší disponibilním množstvím vody, protože se jedná většinou o zdrojová povodí.
2	tmavě modrá	Tato povodí vznikají již při předchozích vznikajících clustrech a jedná se o UPOV zahrnující odtoky z vltavské kaskády a jsou specifické vysokou zabezpečeností.
3	zelená	Povodí s průměrnými hodnotami současné a výhledové vodní bilance, protože se jedná o oblast pahorkatin, jedná se o skupinu s podprůměrnou letní disponibilní vodou, skupina těchto povodí je ohrožena budoucími změnami rychlé složky odtoku
4	žlutá	Podprůměrná povodí z hlediska letní vodní bilance a relativně malými změnami rychlého odtoku. Celkově povodí s očekávaným průměrným vývojem.
5	olivová	Povodí s relativně dobrou dostupností vody v letních měsících, nízkou bilancí ve výhledovém období ale s nadprůměrným poměrem mezi dostupností vody ve vztahu k základním průtokům, na těchto UPOV je největší změna v zemědělských oblastech o jeden stupeň.
6	hnědá	Kategorie povodí, kde je největší zastoupení orné půdy s předpokládanou změnou výrobní oblasti o dva stupně, při zachování průměrné dostupnosti vody a průměrných změnách klimatu
7	červená	Povodí s výrazným výskytem suchých dní, nejmenším množstvím disponibilní vody ve výhledových scénářích, jak v letním, tak i zimním období.
10	Šedá	Horská povodí okrajových hora nehodnocená povodí v některém z atributů

Výsledky shlukové analýzy slouží k vymezení rizikových oblastí.

6 Experimentální měření a vývoj monitorovacího systému bilance vody v půdě pro potřeby závlahových systémů

6.1 Cíle monitoringu

Na experimentálních lokalitách byla vyhodnocována bilance vodních toků v systému půda – rostlina – atmosféra. Plochy byly během prvního roku řešení byla zajištěna vybavenost monitorovací infrastrukturou pro měření meteorologických veličin a objemové vlhkosti mělkého půdního profilu (10 cm, 30 cm a 60 cm). Standardní meteostanice slouží pro kontinuální monitorování srážkových úhrnů, na základě měření celkové radiace, teploty a vlhkosti vzduchu a rychlosti větru je metodou Bowenova poměru vypočítávána denní potenciální evapotranspirace. Při známém režimu zavlažování a charakteristikách plodin budeme schopni stanovit vodní bilanci na experimentálních plochách a určit, zda a kdy dochází na plochách k vodnímu deficitu. Na základě monitorování dynamiky zásoby vodních zdrojů určených pro závlahu budeme analyzovat udržitelnost daných zdrojů.

6.1.1 Klimatická data

V návaznosti na plánovaný výstup projektu SS01020052-V8, Monitorovací systém bilance vody v půdě pro potřeby závlahových systémů – užitný vzor, jsou na obou lokalitách instalovány standardně vybavené meteostanice (EMS Brno), jedná se o typ meteostanice EMS 33s upravené pro konkrétní sestavu měřených veličin, které jsou:

- Celková radiace
- Teplota a vlhkost vzduchu ve dvou výškách
- Rychlost a směr větru
- Intenzita srážek
- Objemová vlhkost půdy ve třech hloubkách v rozmezí 10 a 60 cm

Stanice je vybavena záznamovou jednotkou, solárním panelem pro dobíjení baterie. Data jsou ukládány do paměti dataloggeru a současně odesílány na datové úložiště, odkud jsou kdykoliv k dispozici.

6.1.2 Měření

Přístup k monitoringu se liší na velkoplošné závlaze a ostrovním závlahovém systému. V případě velkoplošné závlahy jsou monitorovány pouze některá vytipovaná pole pod závlahou a bilance je počítána nad nimi. Jsou zde měřena klimatická data, průtok jednotlivými závlahovými agregáty a čas a délka používání závlahy. V případě ostrovního systému je možné celou soustavu považovat na ucelený systém a ambicemi projektu je sledovat celkovou vodní bilanci ve vztahu k závlahovým potřebám. Bilance vody v nádrži je měřena na požeráku, kde je umístěno měření výšky hladiny pomocí ultrazvuku. Dále je nádrž vybavena výparoměrem z volné hladiny, pro měření množství vody, která se odpaří z jejího povrchu. Odběr vody pro závlahu je měřen odečtem kW na čerpadle a průtokoměrem. Ve fóliovnících je měřena výška a čas závlahové dávky odděleně pro jednotlivé foliovníky, dále teplota a vlhkost vzduchu a vlhkost půdy.

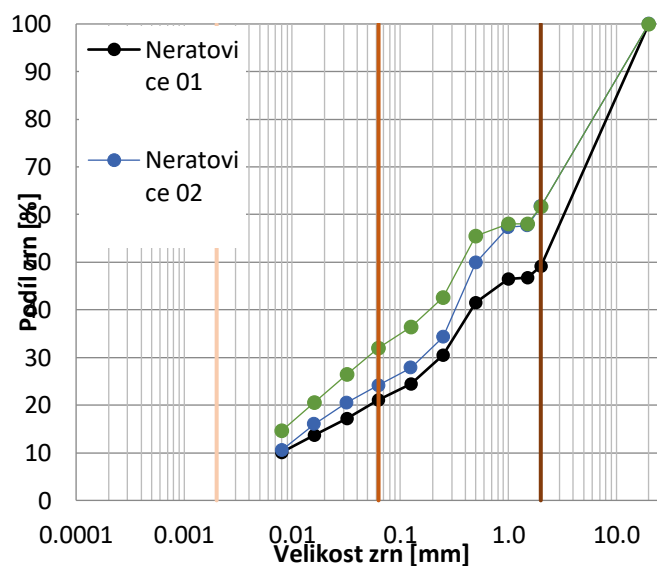
Velkoplošná závlaha	Ostrovní systém
Meteostanice	Meteostanice
Průtok závlahovými agregáty	Čas a délka používání čerpací stanice
Čas a délka používání závlahy	Čas a délka používání závlahy
	Hladina v nádrži

Tabulka 6-1 Přehled použitých čidel dle lokality

Analýza půdních vzorků

Z vytipovaných ploch byly odebrány porušené půdní vzorky. Odebrané vzorky byly použity pro zjištění čáry zrnitosti. Dále bude provedena analýza chemického složení půdy, především množství organického uhlíku.

Dva půdní vzorky označené Neratovice 01 a 02 byly odebrány z pole Libiš Prostředek, vzorek Neratovice 03 byl odebrán z pole Višňová 1.



Obr. 6-1: Zrnitostní křivka odebraných vzorků

Průtok závlahovými agregáty

Moderní pásové zavlažovací stroje umožňují velmi přesně regulovat pracovní tlak závlahové vody vstupující do stroje, čímž je zajištěna přesná rychlost navíjení hadicového bubnu a tím i aplikovaná závlahová dávka. Dále jsou pásové zavlažovače vybaveny mechanickými vodoměry. Lze tedy odečítat proteklé množství strojem během závlahové sezóny.

Na polním bloku Višňová 1 bude umístěna automatizovaná meteostanice. Tato meteostanice umožní sledovat srážkovou výšku, teplotu, rychlost větru a další hodnoty v zájmové lokalitě.

Čas a délka používání závlahy

Pomocí vyvíjených čidel bude měřena délka používání závlahy, zároveň bude měřen čas, kdy byla závlaha používána. Princip měření spočívá v měření vibrací, hluku, vlhkosti a teploty vzduchu a vlhkosti půdy v okolí čidla připevněného na závlahové potrubí. Zároveň je zaznamenáván čas měření. Z následné analýzy časové řady bude určen čas začátku závlahy a čas ukončení závlahy, z rozdílu těchto hodnot se určí délka závlahy.

Půdní vlhkost v okolí čidla

Instalovaná meteostanice je vybavena čidly půdní vlhkosti. Tyto profesionální čidla umožní vyzkoušet spolehlivost a přesnost velmi dostupných jednoduchých čidel půdní vlhkosti. Bude instalováno několik čidel od různých výrobců.

Hladina v nádrži

Hladina v nádrži je zaznamenávána pomocí ultrazvukového čidla s přesností 5 mm a rozsahem 40 cm. Dále je čidlo hladiny oseto dvěma kontaktními sondami. Jedna sonda je osazena v úrovni horní hrany vrchní dlužky v požeráku a její aktivace tak znamená přepad vody přes horní dlužku. Druhá sonda je umístěna na dolní hraně přesnosti ultrazvukového senzoru, tedy zhruba 30 cm pod horní hranou dlužky.

Čas a délka používání čerpací stanice

Pomocí vyvíjených čidel bude měřena délka provozu závlahové čerpací stanice, zároveň bude měřen čas, kdy byla závlaha používána. Princip měření spočívá v měření vibrací, hluku, vlhkosti a teploty vzduchu v okolí čidla připevněného na závlahové čerpadlo. Zároveň je zaznamenáván čas měření. Z následné analýzy časové řady bude určen čas spuštění čerpadla závlahy a čas ukončení čerpání, z rozdílu těchto hodnot se určí délka závlahy.

6.2 Experimentální měření na příslušných lokalitách

Experimentální měření je základní metodou pro ověření sledovaných a případně matematicky popsaných procesů. Přírodní půdní prostředí je obecně velmi heterogenní a vyznačuje se významnou sezónní a prostorovou variabilitou. Monitoring probíhá na lokalitách zapojených pracovišť na různých místech ČR (Polabí, Jižní Morava a Haná).

Rozšířené, a především cenově dostupné řešení je tak jedním z kroků, jak půdní prostředí popsat ve více lokalitách. Fyzikální modelování spojené s měřením nám umožňuje získat důležité veličiny z hlediska vývoje rostlin a jejich potřeb, které jsou obtížně měřitelné na základě jednodušeji určitelných veličin.

6.2.1 Monitoring závlahových soustav Polabí



Obr. 6-2: Poloha monitorovaných lokalit v ČR.

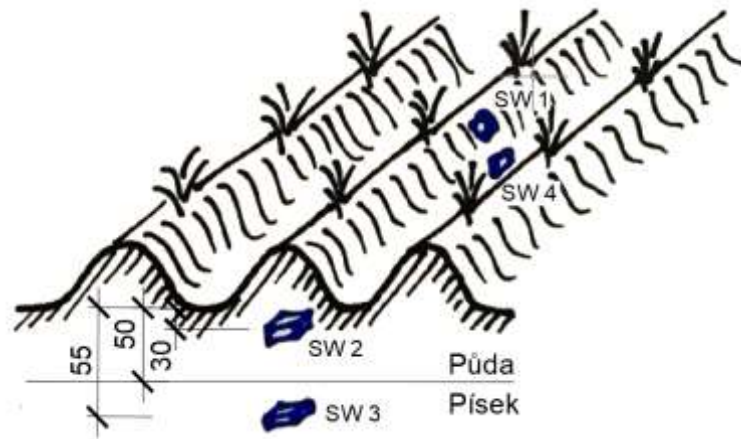
Monitoring byl v roce 2021 prováděn na třech lokalitách. Jedna lokalita (Hlavenec) po celý rok. Dvě další (Libiš, Zálezlice) během závlahové sezóny.

Libiš

Meteostanice zaznamenává dvě skupiny dat. První skupinou jsou meteorologická data. Jedná se o celkovou radiaci ve W/m^2 . Vzdušnou vlhkost v % ve dvou výškách. Vzdušnou teplotu ve $^{\circ}C$ ve dvou výškách. Srážkovou výšku v mm za měrný krok a kumulativní srážkovou výšku za den. Dále rychlost větru v m/s a směr větru ve úhlových stupních.

Z půdních dat je to teplota půdy ve $^{\circ}C$ a vlhkost půdy v m^3/m^3 . Pro čtyři různé úrovně hloubky půdy. Sondy pro měření teploty a vlhkosti půdy byly umístěny do povrchové vrstvy půdy v meziřadí, zbylá do 10 cm, 30 cm a 50 cm. Meteostanice dále měří provozní hodnoty napájecího napětí ve V, vnitřní teplotu ve $^{\circ}C$ a vnitřní vzdušnou vlhkost v %.

Na polním bloku jsou pěstovány Brambory pozdní.



Obr. 6-3: Schéma umístění senzorů půdní vlhkosti SoilWatch.

Celkový počet aplikovaných závlahových dávek během pěstební sezóny byl třináct. Velikost závlahové dávky se pohybovala od 108 m³/ha po 1704 m³/ha.

Tabulka 6-2: Datумы a časy závlahy, intenzita závlahové dávky a celková závlahová výška.

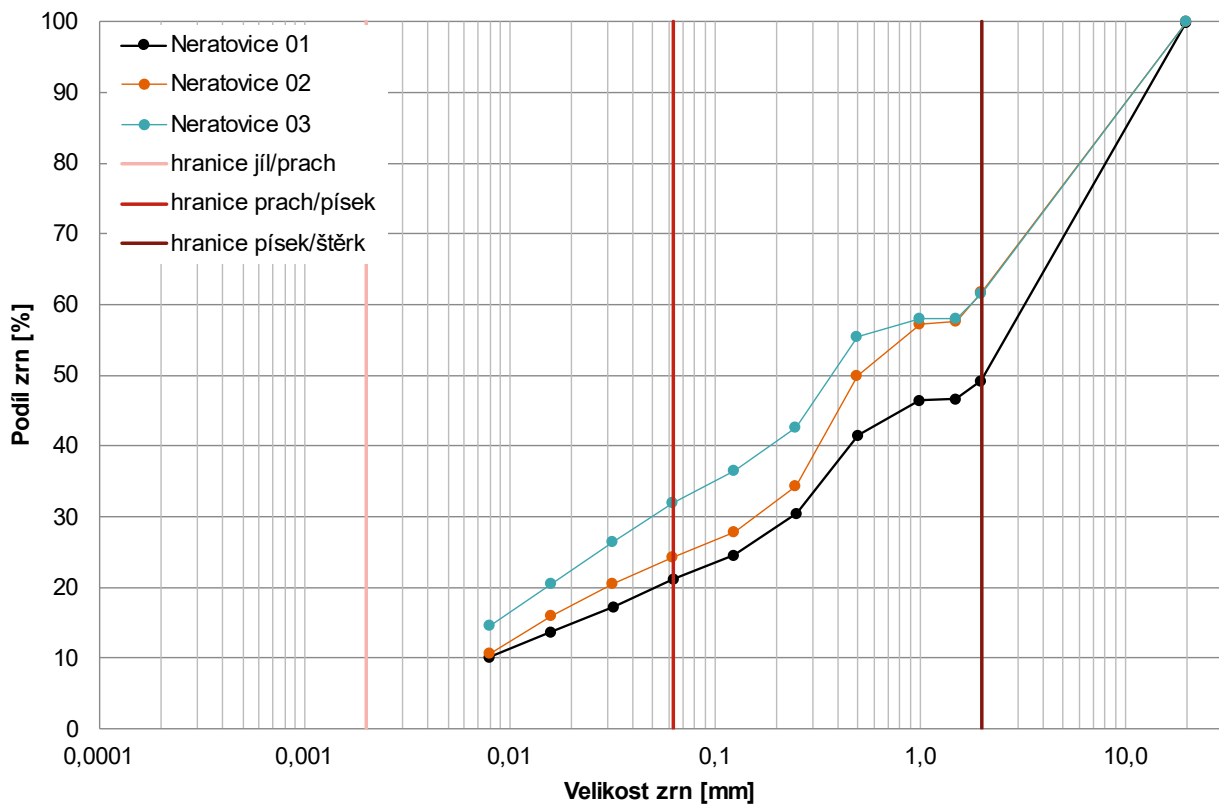
Datum	Čas	Úhrn (mm/10min)	Úhrn (mm/h)
12.05.2021	11:30	3,40	20,40
14.05.2021	17:30	3,40	20,40
11.06.2021	13:10	28,40	170,40
22.06.2021	8:30	1,80	10,80
24.06.2021	17:10	5,40	32,40
29.06.2021	21:40	20,40	122,40
01.07.2021	14:40	5,40	32,40
02.07.2021	9:40	4,20	25,20
28.07.2021	14:20	8,80	52,80
01.08.2021	8:10	8,80	52,80
05.08.2021	15:40	2,00	12,00

V lokalitě Libiš byly odebrány a vyhodnoceny celkem tři vzorky půdy. Tyto vzorky byly odebrány z vrchní vrstvy půdy na třech rozdílných místech dvou polních bloků. Vzorek Neratovice 01 byl odebrán z okraje polního bloku na kterém byla umístěna meteostanice. Vzorek Neratovice 02 byl odebrán z blízkosti hydrantu na stejném polním bloku. Vzorek Neratovice 03 byl odebrán z polního bloku vzdáleného zhruba 1 km. Tato lokalita byla prověřována jako alternativní umístění meteostanice.



Obr. 6-4: Místa odběru vzorků povrchové vrstvy půdy.

Následující graf (Obr. 6-5) ukazuje zrnitostní složení odebraných vzorků půdy. Prostorově nejbližší vzorky půdy jsou svým zrnitostním složením podobné, vzorek z druhého polního bloku je odlišný.

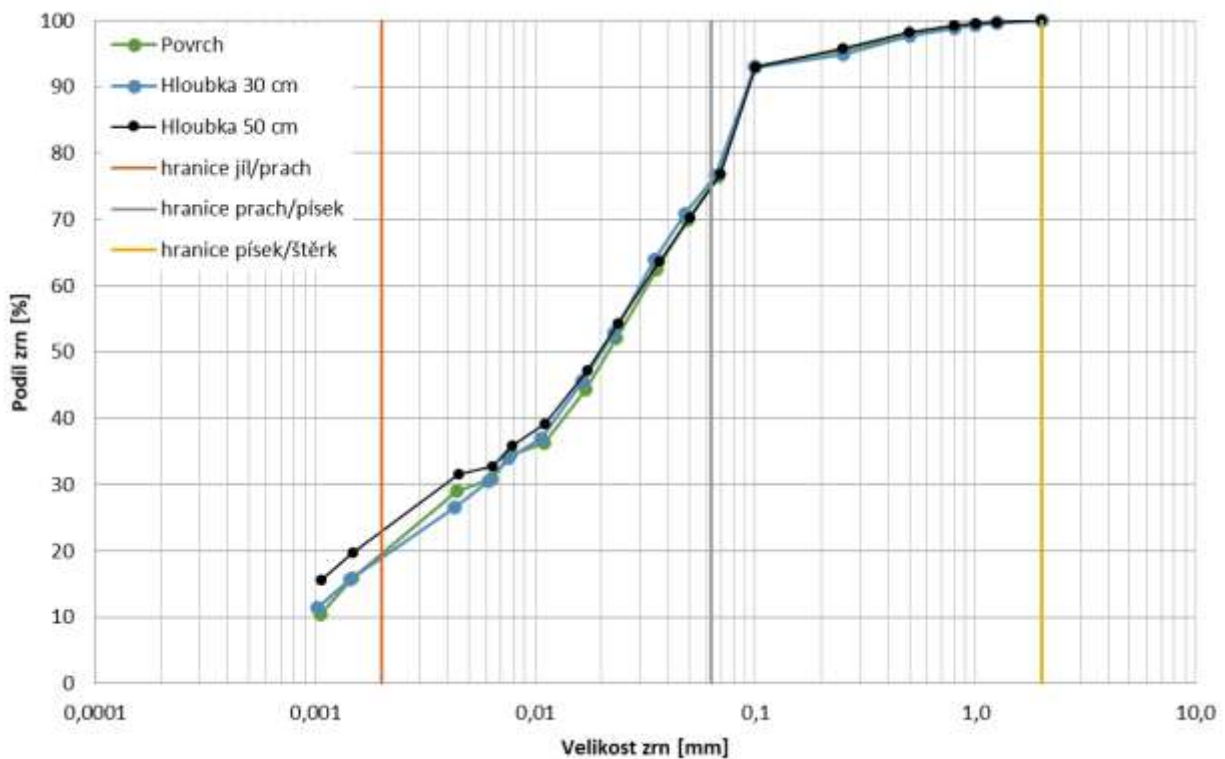


Obr. 6-5: Granulometrický rozbor vzorků povrchové vrstvy půd z lokality Neratovice – Libiř.

Zálezlice

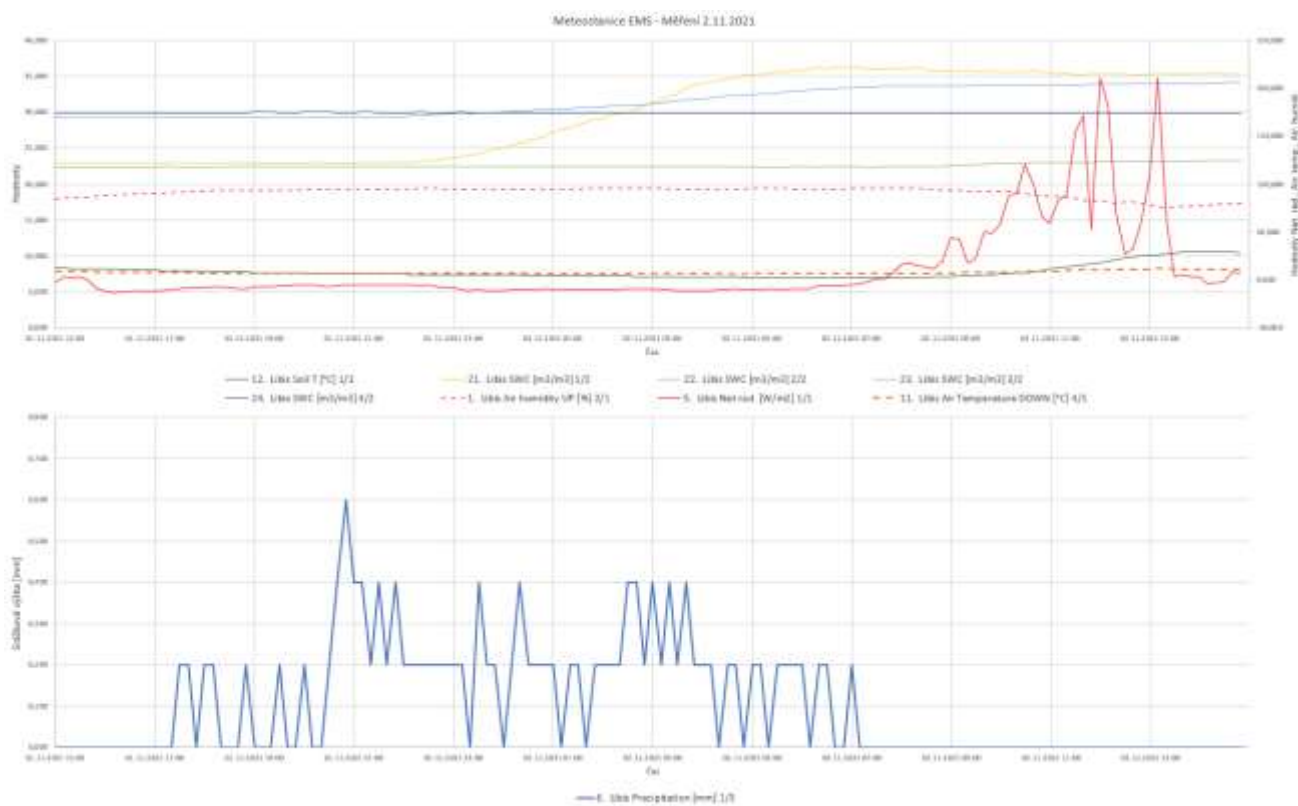
Experimentální lokalita Zálezlice se nachází v blízkosti řeky Vltava, před jejím soutokem s řekou Labe. Lokalita leží na spojnici mezi obcemi Lužec nad Vltavou a Obříství. Polní blok, na kterém je meteostanice umístěna se nachází v blízkosti provozního střediska Hanka Mochov. Polní blok je napojen na velkoplošnou závlahovou soustavu Vltava III. Na polním bloku byly během pozorovaného období pěstovány cibule pozdní. Měření bylo přesunuto na tento polní blok z důvodu ukončení sezóny na lokalitě Libiš.

Půda v lokalitě je hlinitá hluboká 30 cm, s písčítým podložím tvořeným Vltavskými sedimenty. Na Obr. 6-6 je zatřídění vzorků odebraných z jednotlivých vrstev.



Obr. 6-6: Granulometrický rozbor vzorků jednotlivých horizontů půdy z lokality Zálezlice.

Stanice úspěšně měří. Byl zaznamenán výpadek proudu, jenž byl vyřešen výměnou baterie a kontrolou zapojení napájecího zdroje. Od tohoto okamžiku funguje stanice bez významných problémů. Následující snímek ukazuje naměřené hodnoty stanice během dne s vytrvalým deštěm s nízkou intenzitou. Z grafu je patrná rychlá reakce čidla SWC 1/2 umístěného na povrchu v řádku, následuje čidlo SWC 2/2 umístěné v meziřadí. Čidlo SWC 3/2 umístěné 30 cm pod terénem reaguje velmi pomalu. Čidlo SWC 4/2 umístěné 50 cm pod povrchem na probíhající dešť zcela nereaguje.



Obr. 6-7: Průběh teploty půdy (°C) - tmavě zelená, vlhkosti půdy na povrchu řádku (%) - žlutá, vlhkosti půdy v meziřadí (%) - světle modrá, vlhkosti půdy 30 cm pod povrchem (%) - světle zelená, vlhkosti půdy 50 cm pod povrchem (%) - tmavě modrá, vlhkosti vzduchu (%) - červená čárkovaná, celkové radiace (W/m²) - červená, teploty vzduchu (°C) - oranžová čárkovaná a srážek (mm) – fialová.

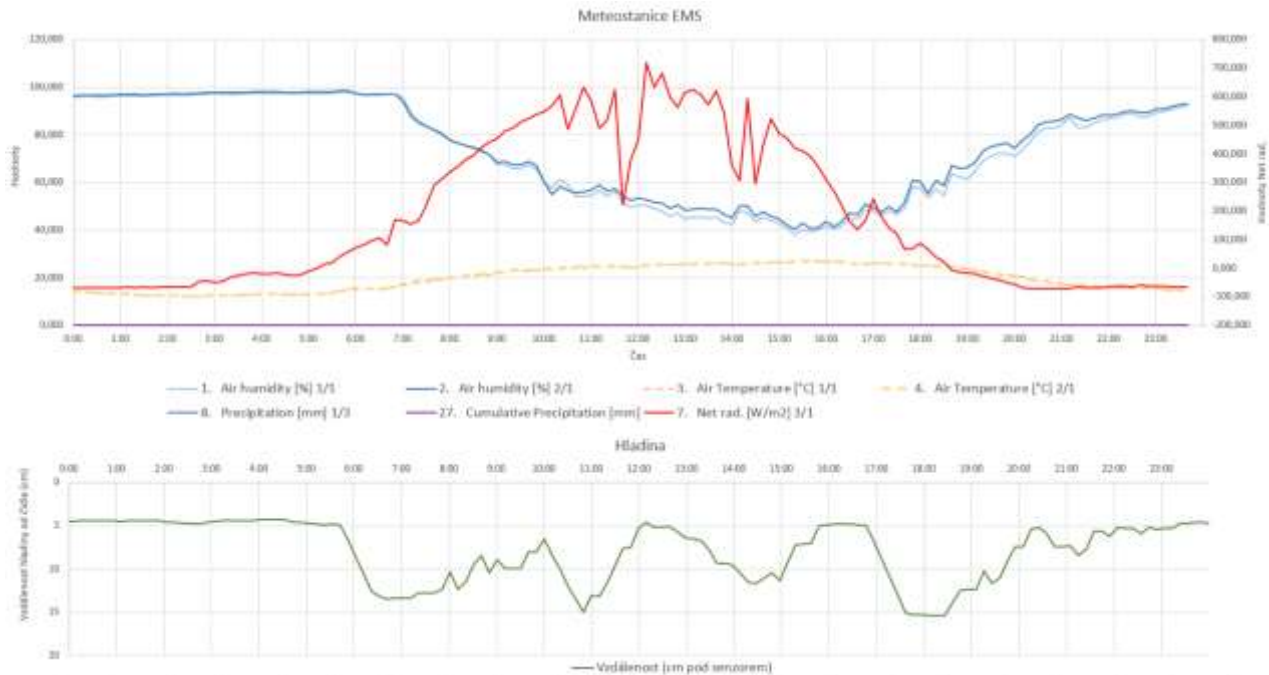
Hlavenec

Experimentální lokalita Hlavenec se nachází v blízkosti lesního masivu rozkládajícího se v okolí souměstí Brandýs nad Labem – Stará Boleslav. Lokalita se nachází na spojnici mezi obcemi Stará Boleslav a Kostelní Hlavno. Drobný polní blok, na kterém je meteostanice umístěna se nachází uvnitř soukromé farmy. Polní blok je napojen na ostrovní závlahovou soustavu napájenou z malé vodní nádrže. Na polním bloku byly během pozorovaného období pěstovány cibule pozdní a kapusta.

Půda v lokalitě je hlinitá hluboká až 50 cm, s písčitým podložím tvořeným Labskými sedimenty a sedimenty řeky Jizery.

Hladina v malé vodní nádrži je měřena experimentálním ultrazvukovým hladinoměrem. Hladinoměr je umístěn v 3D tištěném krytu a je umístěn na skružích chránících sání závlahových čerpadel. Hladinoměr je doplněn dvěma 3D tištěnými kontaktními čidly měřícími dosažení konkrétních výšek hladiny. Jedno čidlo je umístěno 40 cm pod ultrazvukem a druhé čidlo je umístěno 10 cm pod hladinoměrem. Tato čidla lze použít k dokalibrování ultrazvukového měření. Čidlo umístěné 50 cm pod ultrazvukem bylo trvale ponořené pod hladinou. Záznamová jednotka hladinoměru je tvořena mikrokontrolérem Arduino Nano, dále modulem hodin reálného času a čtečkou microSD karet, na kterou jsou zaznamenány hodnoty ukládány.

Na následujícím grafu je zobrazen průběh vybraných meteorologických hodnot ze stanice EMS a porovnání s hodnotami výšky hladiny v zásobní vodní nádrži. Během tohoto dne došlo k závlaze foliovníků. Závlaha se projevila snížením hladiny v zásobní nádrži. Jednalo se o 4 závlahové epizody. První epizoda začíná v 6:00, následuje epizoda v 10:00, 12:00, 17:00 a 20:20. Na záznamu je vidět opětovné doplňování nádrže spodní vodou a drenáží z okolních pozemků (Obr. 6-8).



Obr. 6-8: Průběh celkové radiace (W/m²) - červená, vlhkosti vzduchu (%) - světle modrá a tmavě modrá, teploty vzduchu (%) - žlutá čárkovaná, srážek (mm) - fialová a hladiny (cm pod senzorem) – zelená.

6.3 Vývoj Užitého vzoru - Meteorologicko-pedologická jednotka pro podporu řízení závlahy

Probíhá ověřování technického a softwarového řešení Meteorologicko-pedologické jednotky pro podporu řízení závlahy. Jednotka je vybavena šesti čidly půdní vlhkosti Soilwatch 10, tyto čidla se osvědčili svojí jednoduchostí a nízkou cenou. Jednotku lze však vybavit jakýmkoliv čidly s analogovým výstupem. Bude však nutné změnit kalibrační hodnoty. Dále je jednotka vybavena čidlem vzdušné vlhkosti a teploty DHT 11. Toto čidlo je umístěno v 3D tištěném krytu, který zároveň slouží jako přípojný bod srážkoměru a anemometru. Srážkoměr je tvořen 3D tištěnými díly a skleněným mikrosplínačem (reed switch), čtení je pulsní. Anemometr je tvořen také 3D tištěnými díly, čtení zajišťuje miniaturní stejnosměrný elektromotor sloužící jako dynamo, čtení je tedy napěťové.

Intenzita solárního záření je měřena pomocí záznamu napětí na solárních článcích, které zároveň zajišťují napájení jednotky. Solární články jsou umístěny na krytu jednotky, mohou však být umístěny i samostatně. Kryt jednotky je tvořen plastovou technickou skříní pro elektroniku s odolností IP 68. V této skříní jsou umístěny dvě PCB, napájecí PCB, řídicí PCB a komunikační modul. Napájecí PCB obsahuje napájecí modul baterií, tento modul přijímá proud ze solárních článků a mění ho na napájecí proud pro baterie. Dále je zde držák dvou Li-Po baterií. Posledním modulem na napájecím PCB je step-up měnič, který zajišťuje požadovaných 5V pro řídicí jednotku. Napájecí PCB také obsahuje několik rezistorů, pro

úpravu napětí ze solárních článků před analogovým měřením, a svorkovnici pro elektrické připojení desky k ostatním prvkům.

Řídící PCB je tvořeno především piny pro připojení mikrokontroléru Arduino Mega. Dále je na desce osazen modul reálného času s vlastní baterií. Tento modul udržuje informaci o čase a datumu, pro zápis dat a řízení jednotky. Posledním modulem je čtečka microSD karet, tento modul slouží k zápisu dat na fyzický nosič. Řídící PCB je dále osazeno několika rezistory a svorkovnicemi. Svorkovnice slouží pro připojení jednotlivých čidel, spojení s napájecím PCB a odesílání dat do komunikačního modulu.

Komunikační modul je tvořen Arduino SigFox modulem, který zajišťuje odesílání dat přes síť SigFox. Tento modul je připojen na SDA, SCL výstupy mikrokontroléru Arduino Mega, napájení 3,3V a zemnění.

Řídící software jednotky v pravidelných intervalech probudí jednotku, odečte hodnoty jednotlivých čidel a zapíše je na microSD kartu. Odečítání čidel probíhá postupně, v pěti opakováních se zpožděním 1 sekunda, následně je vypočten průměr měření a ten je zapsán. V přednastavený čas jsou údaje zároveň odeslány přes síť SigFox. Model výpočtu potřeby závlahy z naměřených hodnot určí potřebu závlahy a v případě dosažení limitních hodnot je odeslán i požadavek na závlahu.

V průběhu testovací fáze v terénu bylo zjištěno zatékání do ochranných krabic. Toto zatékání nezpůsobilo zásadní problémy elektronice, díky jejímu umístění nad montážní plochou pomocí vymezovačů. Nicméně přítomnost vody zvyšuje vzdušnou vlhkost v okolí zařízení a tím i riziko snížení životnosti a spolehlivosti jednotky. Dalším problémem se ukázalo umístění solárních panelů na vrchním krytu jednotky. Panely byly zakryty polyetylenovou fólií a přilepeny. Polyetylenová folie nechránila dostatečně panely proti intenzivnímu slunečnímu záření a došlo k rychlému stárnutí krycí vrstvy panelu a tím ke snížení produkce elektrické energie a tím i zneřádnění měření intenzity slunečního záření. Byly tak hledány cesty, jak zjištěné nedostatky odstranit. Umístění jednotky v krabici se dále ukázalo jako nepraktické z hlediska přístupnosti jednotky v případě montáže či úprav kabelových rozvodů po nainstalování jednotky v terénu.

Rešerší bylo nalezeno řešení v podobě umístění jednotky do odpadní KG trubky průměru 100 mm. Toto řešení je běžně používáno pro umístění elektromagnetických sond a radarů pro hloubkové studium půdního podloží. Potrubí disponuje pevnou a nepropustnou stěnou, potrubní systém jako takový je levný a zahrnuje celou řadu prvků pro vodotěsné ukončení ochranného pouzdra. Vlastní jednotka a příslušenství je pak umístěno na plastové montážní vložce vybavené 3D tištěnými vymezovači, která umožňuje vysunout celou jednotku z ochranného pouzdra a v případě montáže či opravy bez omezení pracovat. Trubní pouzdro je dále možné připevnit pomocí standardizovaných trubních zděří k jakékoliv opěře bez potřeby narušení stěny pouzdra.

Uzávěr pouzdra je tvořen 3D tištěným poklopem umožňujícím vodotěsný průchod spojovacím kabelům pomocí těsnícího hřebenu, stlačujícího těsnící polymerní pěnu. Tímto byla odstraněna potřeba instalace nákladných a montážně složitých konektorů. Kabely jsou následně vedeny přímo ke konektorům vlastní jednotky či příslušenství. Další výhodou trubního pouzdra je kapacita. Plošné spoje mohou být umístěny z obou stran plastové montážní vložky a tím je možné do jednoho pouzdra umístit až 9 plošných spojů o rozměrech 10x8 cm. Vzniká tak dostatečná kapacita pro umístění komunikační jednotky pro dálkový přenos dat, případně umístění další bateriové jednotky.

Nové trubní pouzdro ovšem neumožňuje montáž solárních článků na jeho povrch. Zároveň je nutné solární články vybavit lepší ochranou proti povětrnostním vlivům. Byl tak vyvinut ochranný a montážní kryt solárních článků. Tento se skládá z polykarbonátového ochranného skla, plastové nosné desky a 3D tištěného vymežovače. Posledním prvkem je montážní trojúhelník vyrobený taktéž 3D tiskem. Tento trojúhelník zajišťuje patřičný úhle solárních článků cca 45° od svislice, pro jejich maximální výrobu elektrické energie. Celý ochranný kryt je pevně a trvale spojen šrouby průměru 3 mm po nalepení solárních článků na podkladní desku. Kabelový prostup je řešen standardizovanou kabelovou průchodkou. Ochranný kryt je k trubnímu pouzdru připevněn rychlovazacími páskami. Integrita ochranného pouzdra tak není narušena.

Detailní popis samotného užitého vzoru a předmět ochrany je detailně popsán v přihlášce užitého vzoru s č. 37841 v seznamu užiténých vzorů patentového úřadu ČR. Krom samotné konstrukce byla testována jak jeho aplikace v testovacím a provozním režimu a dále byl na základě změřených dat odvozován matematický model popisu vodní bilance při závlahách.

6.3.1 Testování cenově dostupných čidel pro vývoj užitého vzoru

Jedním z plánovaných výstupů projektu je systém umožňující průběžný monitoring a bilance závlahové vody v půdě, což je základem pro určení dostupnosti vody pro rostliny a určení efektivity závlahových systémů. Dosavadní výzkum v prvním roce řešení směřoval k výběru jednoduché a cenově dostupné záznamové jednotce. Z průmyslově vyráběných základních záznamových jednotek jsou nejzajímavější produkty řady Arduino a RaspberryPI. Jedná se o mikropočítače s minimální cenou. V prvním roce řešení byla zvolena jako první pro testování levnější, ale méně výkonná platforma Arduino.

Za relativně nejnáročnější součást jsou považována čidla půdní vlhkosti, která by měla v několika profilech (co nejbližší povrchu, v kořenové zóně a pod ní) zaznamenávat stav půdní vlhkosti. V rámci vývoje byl proveden experiment, jehož cílem bylo zjištění kvality měření cenově dostupných sond pro měření vlhkosti, které je možné k systému Arduino připojit. První část spočívala v kalibraci v malém vzorku půdy, ve kterém byla homogenní distribuce vlhkosti. Výhoda tohoto měření spočívá ve znalosti vlhkosti prostředí a její relativně homogenní distribuci.

Materiál a metody

Měření vlhkosti se dělí na přímé a nepřímé. Jedna z přímých metod spočívá v odebrání vzorku a porovnání hmotnosti vzorku po odebrání a hmotnosti vzorku po vysušení. Z rozdílu těchto hodnot získáme množství vody, které se ve vzorku nachází a při podělení objemem vzorku získáme objemovou vlhkost. Tato metoda je velmi přesná, nicméně nevýhodou je nemožnost kontinuálního měření a destruktivnost této metody (odběr vzorku z plochy). Pro kontinuální měření se musí používat nepřímé metody, které neurčí vlhkost půdy jako takovou, ale měří jiné veličiny, které jsou vlhkostí ovlivněné.

První možností je měřit elektrický odpor či elektrickou vodivost prostředí. S tím, jak se zvyšuje vlhkost prostředí, tak roste i elektrická vodivost (respektive klesá odpor). Nevýhodou je, že měření je silně ovlivněno salinitou prostředí, navíc u čidel může docházet k elektrolyze, která vede k jejich postupné degradaci. To je způsobeno tím, že elektrody musí být v přímém kontaktu s okolím, aby toto měření bylo vůbec možno provádět.




V případě měření dielektrické permitivity v okolí čidla je tento problém vyřešen, jelikož všechny vodivé části můžou být schovány v izolátoru. Tato metoda je často používána u drahých a přesných čidel.

T A Č R

Měření je založené na tom, že relativní permitivita vody je 80, zatímco relativní permitivita pevných látek bývá v rozmezí 2–6 a relativní permitivita vzduchu je 1. Z toho je patrné, že celková dielektrická permitivita v okolí čidla je nejvíce ovlivněna přítomnosti vody. Měření vlhkosti přes dielektrickou permitivitu pak má mnoho podob. Metoda TDR (time domain reflectometry) využívá toho, že dielektrikum způsobuje zpomalení pulzu ve vodiči, který je tímto dielektrikem obklopen. Porovnáním vyslaných a odražených impulsů lze zjistit jaké bylo zpomalení impulsu ve vodiči a z toho odvodit vlhkost prostředí. Tato metoda patří mezi nejmodernější, ale tomu odpovídá i cena. Další metody pracují s čidlem a půdou v okolí jako s kondenzátorem. Jedná se o měření nabíjecí doby kondenzátoru či měření kapacitance, což lze chápat jako odpor pro obvod se střídavým proudem. Výhodou oproti přímému měření elektrického odporu je zmíněné oddělení vodivých části od vlhkého půdního prostředí. Existují i další nepřímé metody (např. neutronová metoda), ale ty již využívají měřící přístroje, které není reálné vyrábět levně.

Čidla pro Arduino

Bylo použito 5 čidel, která používají různé principy měření. Bylo použito jedno čidlo, které měří elektrickou vodivost prostředí, jedno čidlo, které měří elektricky odpor prostředí, a tři čidla, která využívají měření dielektrické permitivity v okolí čidla. V následující tabulce (Tabulka 6-3) jsou vypsány charakteristiky čidel.

Označení	Název	Cena v roce 2020	Obrázek
Čidlo 1	RobotDyn Soil Moisture Sensor	13 Kč*	
Čidlo 2	Senzor vlhkosti půdy	39 Kč	
Čidlo 3	Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2	128 Kč	

Čidlo 4	Soilwatch 10	780 Kč*	
Čidlo 5	HD-38	328 Kč	

Tabulka 6-3 Výpis a popis použitých čidel. * udává kde došlo k přepočtu ceny z cizí měny

Půdní materiál

Materiálem byl půdní substrát pro travní porost. Změřené charakteristiky jsou vypsány v Tabulka 6-4 Základní charakteristiky použitého půdního materiálu. Objemová hmotnost (ρ) byla vypočtena z hmotnosti sušiny, a objemu do kterého byla v nádobě nahutněna, zatímco pórovitost (p) byla vypočtena z hmotnosti plně nasyceného vzorku. Z těchto dvou hodnot byla doložena měrná hmotnost zeminy (ρ_s), která nabývá u minerálních půd průměrných hodnot $2.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Nižší hodnota v tomto případě je výsledkem přítomnosti organické hmoty v půdním vzorku.

Vlastnost	jednotka	
ρ	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.30
ρ_s	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.10
p	$\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	0.37

Tabulka 6-4 Základní charakteristiky použitého půdního materiálu

Průběh kalibrace

Byly provedeny 2 experimenty, ale jejich postup byl shodný. Půda byla vysušena při 105°C . Poté byla nahutněna v měřicí nádobě do určité výšky. Objem půdy byl v prvním případě 3950 cm^3 , ve druhém případě 2200 cm^3 . Poté byly do půdy umístěna čidla, každé na jiné místo, tak aby nedocházelo k jejich. Po měření byla půda vysypána a bylo do ní vlito určité množství vody a půda byla pečlivě promíchána. Poté byla vlhká půda přemístěna do nádoby a po provedení měření se postup se zvlhčováním opakoval. Objem vody (v cm^3), která byla přidávána byl v prvním případě: 500, 500 a 500; ve druhém případě: 50, 50, 50, 100, 100, 200, 150.

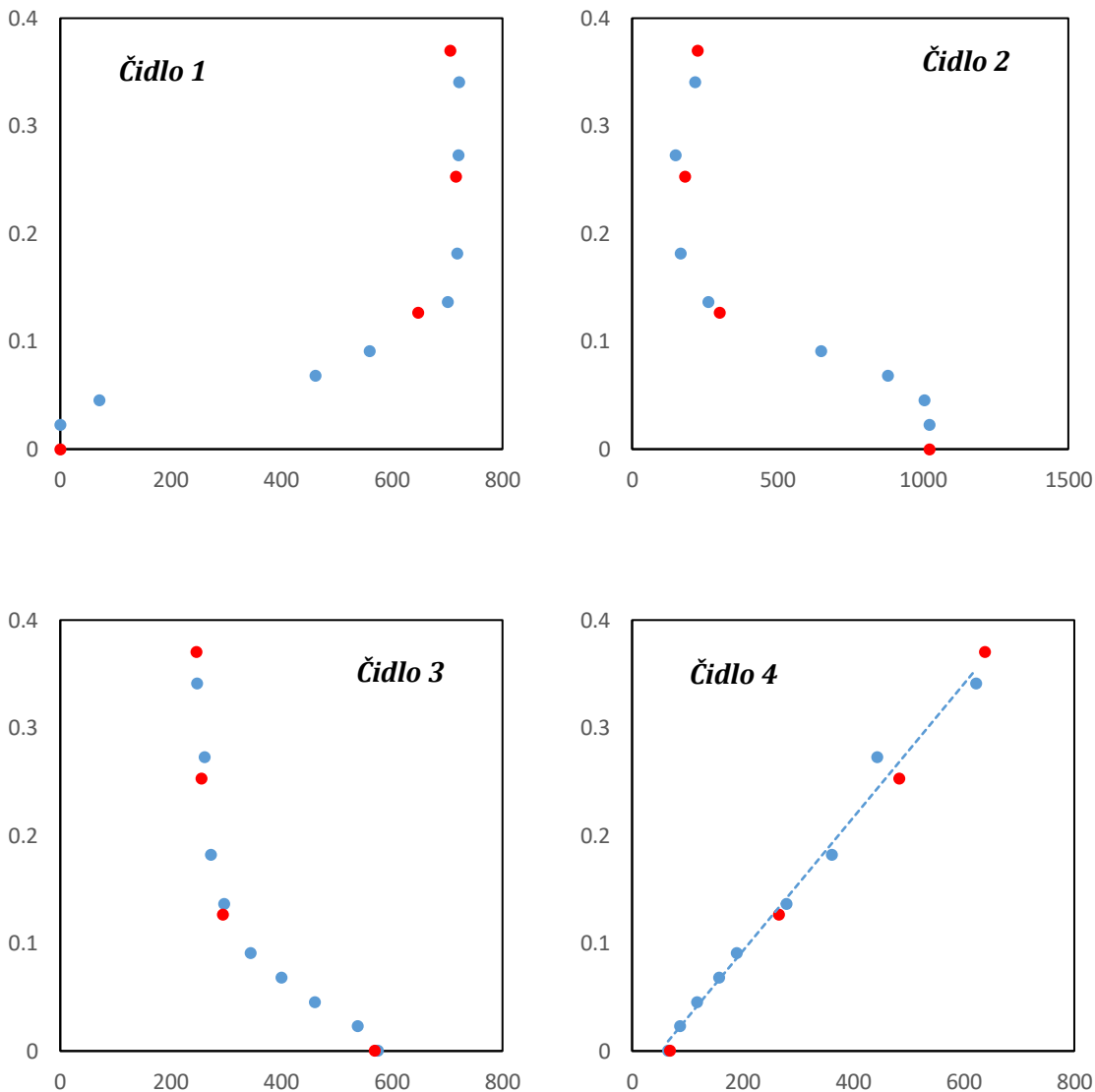
Výsledky

Byly získány výsledky pro čidla 1 až 4. U čidla číslo 5 docházelo k ustálení měření velmi pomalu, bylo tedy z prvních experimentu vyřazeno. Nicméně toto čidlo bude použito pro dlouhodobější experiment.

T A Č R

Z výsledků lze vidět, že oba experimenty (modrá a červená barva) vytváří průběh, který je relativně podobný. V případě čidel 1 až 3 lze vidět, že průběh ležící v rozmezí vlhkosti 0.13 až 0.37 odpovídá velmi úzkému rozsahu měřených hodnot. To znamená, že i malá chyba v měření může být vyhodnocena jako velká změna vlhkosti.

Proložení je zobrazeno pouze u čidla 4, protože ostatní proložení jsou velmi špatná. Navíc jak je patrné, tak v případě čidla 4 je průběh lineární, což je ideální z pohledu, že malá chyba v měření má jen malý vliv na změnu vypočtené vlhkosti.



Obr. 6-9: Výsledky kalibrace. Na vodorovné ose jsou zobrazeny naměřené hodnoty (rozsah 0–1023) na svislé ose jsou vyneseny vlhkosti prostředí.

Závěr

Čidla fungující na principu měření elektrického odporu či vodivosti se ukázala jako nejméně vhodná pro použití už jen z výsledků kalibrace. Navíc bylo při jiném měření dosaženo stavu, kdy díky elektrolýze došlo k narušení elektrod těchto čidel. Proto je nelze doporučit i přes jejich nízkou cenu.

Z čidel fungujících na principu měření konduktivity prostředí lze jednoznačně doporučit čidlo Soilwatch 10, které vykazovalo lineární průběh vlhkosti získané z naměřených hodnot. Navíc má toto čidlo obal kolem elektroniky, díky čemuž je připraveno na zavedení pod zem. Vývoj dalšího testování je popsán v kapitole 4.

6.3.2 Prototypová výroba měřící sestavy a ochrana řídicí jednotky

Vývoj na úrovni užitého vzoru předpokládá krom vlastního měření příslušných veličin, také design vyvíjeného čidla začíná sbíráním podkladů a inspirací současnými vyráběnými čidly. Do designu dále promlouvá elektronika, kterou bude čidlo obsahovat. Především se jedná o počet prvků a jejich tvar a velikost. Dalším faktorem jsou zástavbové parametry čidla, jeho umístění v terénu, na zařízení, či v blízkosti vodní hladiny, či stříkající vody. Vlastní design je prováděn v CAD softwaru vhodném pro 3D modelování.

Výsledný model je exportován ve vhodném formátu, většinou STL. Následně je soubor konvertován pro tisk v Slicer programu k příslušné tiskárně. Zde je prvek závěrečně zkontrolován, je zvolena hustota a přesnost prvku, materiál a rozložení tisknutých prvků na tiskové ploše. Výsledkem je soubor ve formátu pro 3D tiskárnu.

Tisk

Vlastní tisk probíhá automaticky v 3D tiskárně. Operátor pouze vloží soubor pro 3D tiskárnu do 3D tiskárny na SD kartě. A zvolí tisk požadovaného souboru. Dále je možné průběžně měnit teplotu trysky či podložky pro zajištění kvality tisku. Vytisknutý prvek je odloupen z podložky a po manuálním odstranění nečistot je připraven k montáži elektroniky. Prvky skládající se z více částí jsou před montáží elektroniky lepeny či šroubovány do finálního tvaru.

Elektronika

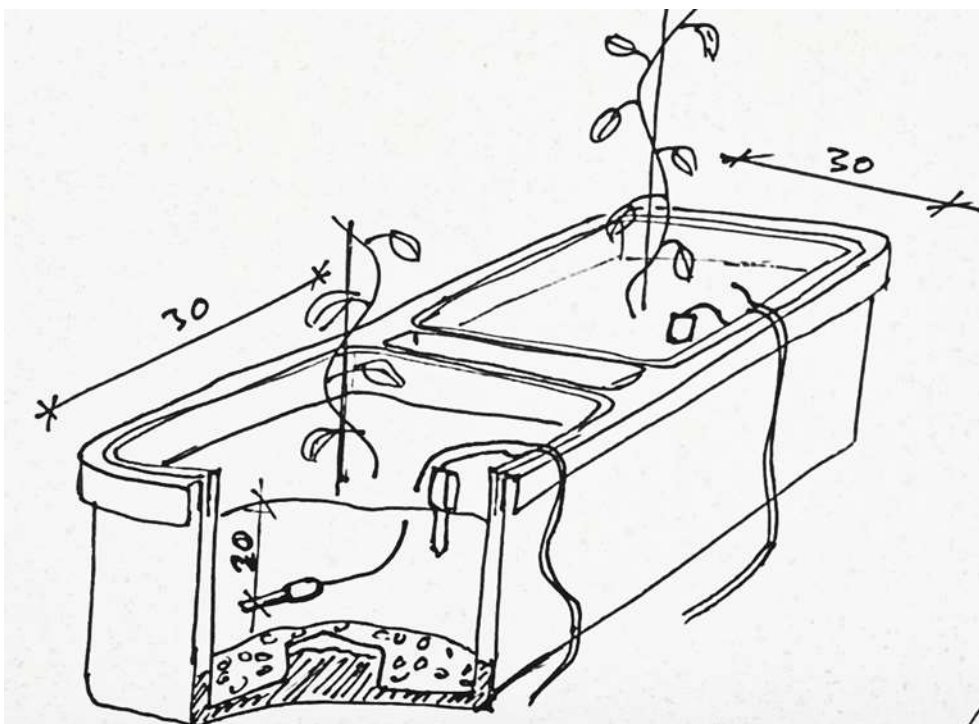
Pro zajištění dlouhodobé životnosti čidel je volena technologie instalace elektronických modulů na plošné spoje. Ty jsou vyráběny pomocí leptání polotovaru tzv. Cuprexitů. Návrh elektroniky je proveden v CAD software a zde je vytvořena předloha pro vrtání otvorů. Předloha je vytištěna na 3D tiskárně a následně dočasně přilepena ke Cuprexitu. Vlastní vrtání probíhá na stojanové rychloběžné vrtačce. Vyvrtaný Cuprexit je očištěn a pomocí fixu na kreslení plošných spojů je na něj nakreslena předloha drah plošných spojů. Po zaschnutí je Cuprexit ponořen do lázně s leptacím roztokem a za stálého míchání a pozorování je nezakrytá vrstva mědi odleptávána. Odleptaný plošný spoj je důkladně omyt a očištěn. Následuje napájení elektronických součástí či montážních prvků elektronických modulů. Po připojení elektronických modulů je elektronika připravena pro zabudování do 3D vytištěného prvku.

Montáž

Finální etapou výroby čidla je vložení elektroniky do 3D vytištěného nosiče a její připevnění. Následuje nahrání příslušného software a kontrola funkce. 3D vytištěný prvek je také doplněn o standardizované prvky jako jsou průchodky a těsnění.

6.3.3 Laboratorní testovací setup

Experimentální testovací setup je vybaven dvěma samozavlažovacími kontejnery. Každý kontejner obsahuje dvě pěstební nádoby. Kontejnery byly doplněny spodní výpustí umožňující téměř zcela odvodnit kontejner, nebo naopak zvyšovat hladinu vody v kontejneru, a tedy i v substrátu v pěstebních nádobách.



Obr. 6-10: Schéma kontejneru s pěstebními nádobami a umístění čidel půdní vlhkosti (cm).

Klimatické vlastnosti prostředí pěstebního stanů jsou sledovány vyvíjeným prototypem závlahové monitorovací jednotky. Měřeny jsou hodnoty vlhkosti půdy, pomocí šesti čidel Soilwatch 10. Každý kontejner obsahuje tři čidla, jedna pěstební nádoba obsahuje čidlo v povrchové vrstvě a druhé čidlo 20 cm pod povrchem, v druhé pěstební nádobě je umístěno čidlo pouze v povrchové vrstvě. Teplota a vlhkost vzduchu jsou měřeny čidlem DHT 11. Toto čidlo je umístěno v 3D tištěném krytu. Pěstební stan je vybaven umělým osvětlením dvou typů. Jsou to pěstební lampy Lumatek Attis 200 W a TLed Secret Jardin 26 W pro růstové osvětlení. Míšení vzduchu je zajištěno ventilátorem. Spínání světel a ventilátoru je řízeno časovým spínačem. Světla jsou spínána v 8:00 a vypínána v 18:00.

Pro simulaci přirozených podmínek půdního profilu jsou pěstební nádoby osazeny rostlinami, jedná se o tyčková rajčata odrůdy Brutus. Kořenový systém rostlin odebírá vlhkost z celého objemu pěstební nádoby a experimenty tak nejsou závislé pouze na výparu z povrchu půdy. Toto značně zrychluje změny vlhkosti půdy.

V současné době jsou pěstební nádoby naplněny půdou z lokality Libiš a Hlavenec. V každém kontejneru jsou obě půdy, ve vlastních pěstebních nádobách. Pomocí spodní výpustí bude možné simulovat drenáž

jedné nádoby a zároveň pozorovat druhou nádobu při standardní závlaze z povrchu, dále porovnávat závlahu z povrchu a závlahu zvyšováním hladiny spodní vody.

6.4 Analýza pozorovaných hodnot a konstrukce matematického modelu reprezentující experimentální testovací setup

6.4.1 Vývoj prototypu a ověřování funkčnosti zvolených komponent

Testování nízkonákladových čidel jen ve vzorku půdy není dostatečně věrohodné. Půda vysychá pouze ze svého povrchu, případně je drénována zespodu. Rychlost vysychání je relativně stabilní během dne i noci. V případě půdy osázené rostlinami půda vysychá téměř v celém svém objemu skrze kořeny rostlin odsávající vodu pro metabolismus rostliny. Rychlost transpirace je také proměnlivá během dne a noci, tak jak se mění intenzita metabolismu rostliny. Takovéto chování je diametrálně odlišné od pouhého neosázeného vzorku půdy. Před aplikací řešení přímo v terénu bez možnosti každodenní kontroly byl za tímto účelem vytvořen testovací prostor z pěstebního stanu umožňující celoroční testování čidel v podmínkách blížících se realitě.

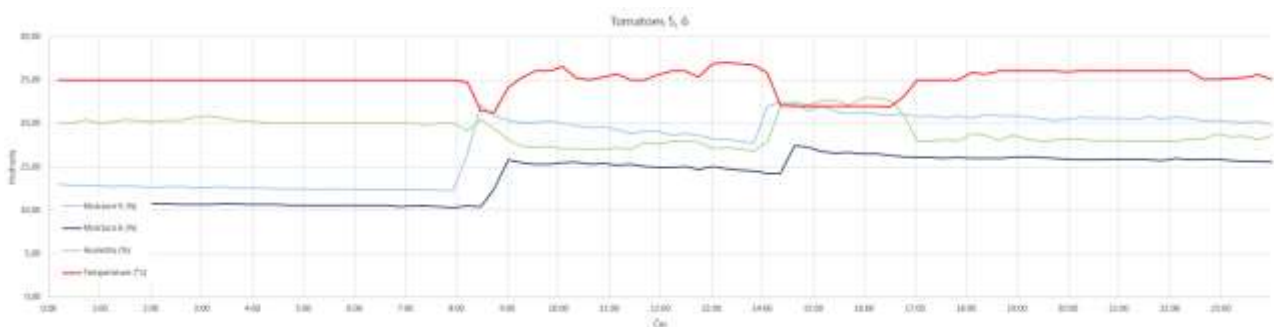
Testovací prostor je tvořen pěstebním stanem Hortosol o rozměrech 1x1x2 m. Materiál stanu je syntetický polymer MYLAR 210D s 95 % odrazivostí světla, tento materiál zároveň nepropouští světlo z vnějšího prostředí a umožňuje tak zcela ovládat klima ve stanu. Klima je dále ovládáno dvěma ventilátory pro cirkulaci vzduchu, odtahovým ventilátorem pro výměnu vzduchu. Osvětlení stanu je zajištěno růstovým LED světlem TLED 26 W Secret Jardin, a dále LED osvětlením Lumatek Attis 200 W. Větrání a osvětlení je řízeno časovačem.

Stan je vybaven dvěma pěstebními kontejnery, každý kontejner obsahuje dvě pěstební nádoby. Dále je pěstební kontejner vybaven dvojitým dnem umožňujícím drenáž či naopak závlahu pěstební nádoby. V kontejneru je umístěn zahradní substrát z kompostované zeminy, vhodný pro pěstování všech druhů rostlin.

Testovaný prototyp měřící a vyhodnocovací jednotky se skládá z čidel vlhkosti umístěných ve dvou hloubkách pěstební nádoby. Dále je zde umístěno čidlo teploty a vlhkosti vzduchu. Dalšími čidly jsou senzor barometrického tlaku vzduchu a solární článek nepřímo měřící intenzitu dopadajícího slunečního záření. Data jsou v pravidelných časových intervalech ukládána na microSD kartu. Řídící jednotka je tvořena mikrokontrolérem Arduino Mega. Napájení je provedeno pomocí připojení do sítě přes napájecí zdroj 12 V.

Umístění čidel do pěstebního stanu vybaveného zasazenými rostlinami bylo zvoleno z důvodu maximálního přiblížení se reálným podmínkám pěstování. Sycení a vysychání zeminy je časově náročné a průběh redistribuce vlhkosti v půdě není shodný s přirozeným vodním režimem půdy. Rostliny díky transpiraci zrychlují odběr vody z půdy a dále je možné sledovat jejich reakci na přílišnou či nedostatečnou závlahu. Zvolené pěstební kontejnery pak umožňují jak závlahu na půdu, tak ke kořenům rostlin a redistribuci vody pomocí vztlínání půdním profilem. Za rostliny umístěné v pěstebních nádobách byly vybrány masitá vroubkovaná rajčata typu Beef. Tyto rajčata se osvědčila k vnitřnímu pěstování v nádobách, tvoří velký objem nadzemní biomasy, tolerují převlhčení či krátkodobé přisušky. V neposlední řadě je k dispozici zdroj řízků pro opětovnou výsadbu, a tedy repetici růstového cyklu.

Na následujícím grafu (Obr. 6-11) je zobrazen záznam jednoho dne měření prototypu. Vidíme minimální fluktuační hodnoty během nočních úseků. K výraznému propadu teploty vzduchu [°C] (Temperature) a nárůstu vlhkosti vzduchu [%] (Humidity) dochází v 8:00 kdy je provedeno větrání místnosti ve které je pěstební stand umístěn. Zároveň dochází k povrchové zálivce pěstební nádoby. Po zálivce dochází k výraznému zvýšení půdní vlhkosti v povrchové vrstvě (Moisture 5), s mírným zpožděním následovaným nárůstem vlhkosti i ve spodnějších horizontu vrstvě (Moisture 6). S redistribucí půdní vlhkosti po zálivce dochází k razantnímu poklesu vlhkosti v povrchové vrstvě. Následuje pozvolný pokles půdní vlhkosti způsobený transpirací rostliny a evaporací z půdního povrchu. Podobný jev vidíme v případě odpolední zálivky a větrání ve 14:00.



Obr. 6-11: Průběh teploty vzduchu (°C) - červená, vlhkosti vzduchu (%) - zelená, povrchové vlhkosti půdy (%) - světle modrá a hloubkové vlhkosti půdy (%) - tmavě modrá v průběhu 24 hodin.

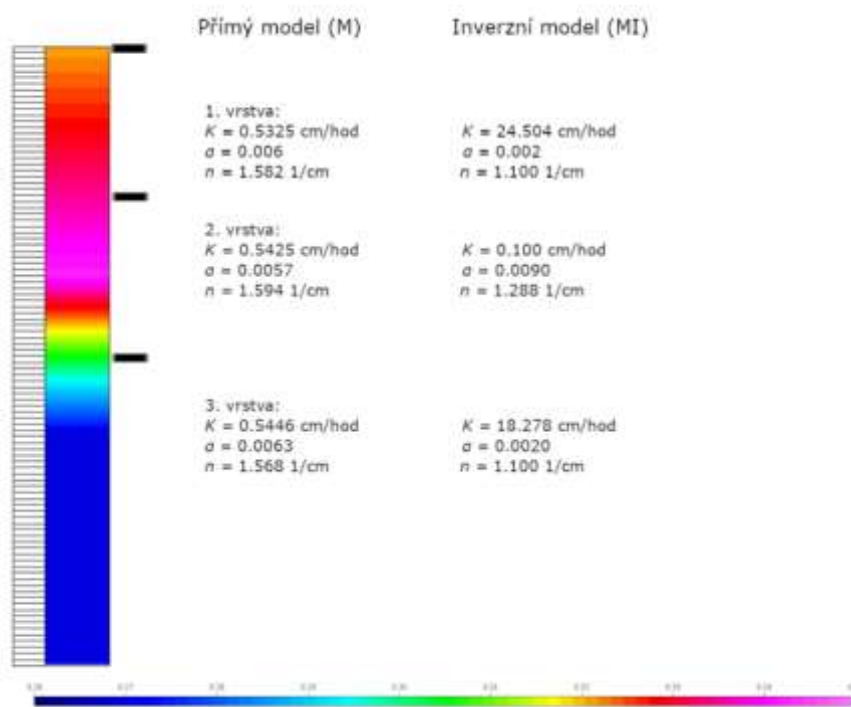
6.4.2 Fyzikální modelování pohybu vody v půdě nenasyceným prouděním

Cílem modelování vlhkostního režimu v půdním profilu je možnost předpovědi vlhkosti, zejména v kořenové vrstvě, na základě různých zavlažovacích a klimatických scénářů. Pro simulaci proudění vody v pórovém prostředí je důležité počítat se dvěma hlavními působícími silami. Jedná se o sílu gravitační a o sílu kapilární, která se projevuje na rozhraní více fází. Ve skutečnosti působí více silových složek, ale za normálních podmínek se ostatní složky zanedbávají. Pro modelování se nepoužívá výpočet sil samotných, ale pracuje se s potenciálovými poli, jejichž gradient pak určuje rychlost a směr proudění. Pro výpočty proudění vody v půdním prostředí se používá Richardsova rovnice. Rovnice je odvozena z rovnice kontinuity, do které byla dosazena Darcy-Buckinghamova rovnice pro proudění v nenasyceném pórovém prostředí. Tato rovnice je řídicí rovnicí i v použitém modelu Hydrus1D. Tento model se již prokázal jako užitečný v řadě aplikací.

Pro model je potřeba znát hydraulické parametry půdních materiálů, jejich prostorové rozložení a počáteční a okrajové podmínky. Základní vlastností materiálu je retenční čára. Ta udává schopnost pórového prostředí zadržet vodu, jedná se o vztah mezi tlakovým potenciálem půdní vody a vlhkostí. Je důležitá i z toho důvodu, že schopnost rostlin sát vodu je ve skutečnosti určena potenciálem půdní vody, který se ale dá velmi špatně měřit bez kontinuální údržby měřících sond. Díky retenční čáře můžeme naměřenou vlhkost převádět na příslušný potenciál. Další základní hydraulický parametr je nasycená hydraulická vodivost K_s , která udává rychlost proudění půdní vody v případě jednotkového gradientu v plně nasyceném prostředí. V případě poklesu vlhkosti dochází i k poklesu hydraulické vodivosti. Okrajové podmínky udávají chování modelu na okrajích a počáteční podmínka stanovuje počáteční stav systému.

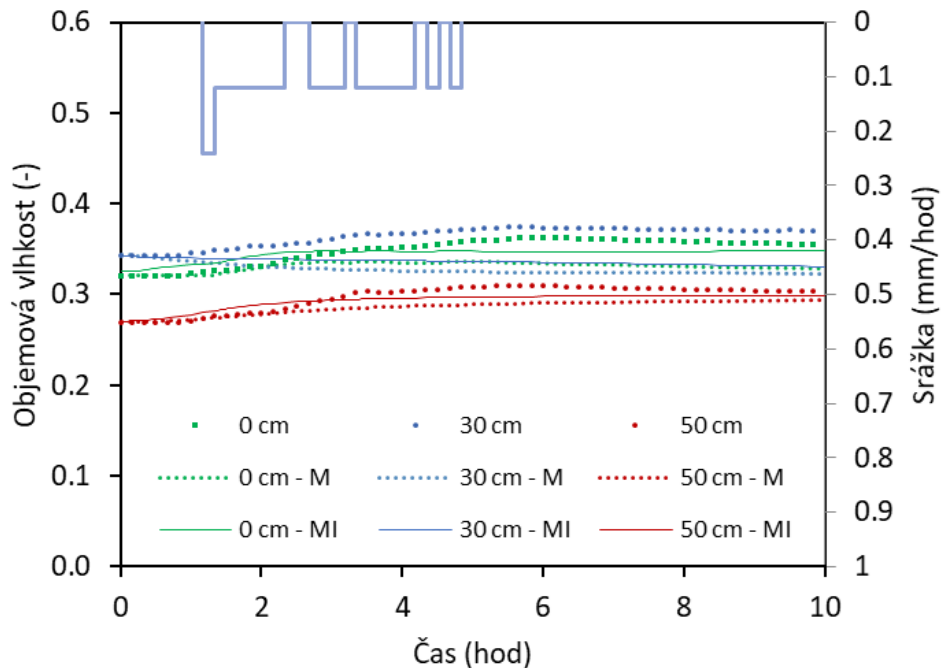
Pro simulaci byl použit van Genuchten – Mualemův model. Tento model používá dva parametry pro stanovení retenční čáry a popis změny hydraulické vodivosti při změně vlhkosti. Retenční čáry materiálů nebyly měřeny, ale byla použita neuronová síť, která se nachází v modelu Hydrus1D. Z procentuálních složek frakcí byly získány parametry pro zmíněný van Genuchten – Mualemův model. Nicméně tyto hodnoty jsou jen odhadem. Proto byly použity pro přímý výpočet, ale také jako výchozí bod pro inverzní modelování. Inverzní modelování se používá pro upřesnění různých parametrů modelu tak, aby se model co nejvíce shodoval s naměřenými daty. Použijí se některé (kalibrační) srážkové události, na kterých jsou hodnoty parametrů upraveny a pak jsou tyto hodnoty parametrů použité na modelování celého období.

Na povrchu byla nastavena atmosférická okrajová podmínka a na spodním okraji půdního profilu byla nastavena okrajová podmínka volná drenáž. Na horním okraji byly nastaveny hodnoty pro srážky a výpar, které se měnily v čase, spodní okrajové podmínky se neupřesňuje. Na Obr. 6-12 jsou zobrazeny parametry materiálů a počáteční podmínky pro plochu poblíž Hlavence.



Obr. 6-12: Zobrazení počáteční podmínky v modelu. Nastaveny byly vlhkosti, podle měření získaných z čidel. Dále jsou uvedeny parametry pro retenční čáry v každé vrstvě, jak pro přímé modelování, tak pro inverzní modelování. Monitorovací body byly v hloubkách 5, 30 a 50 cm. Výška profilu v modelu je 80 cm.

Na Obr. 6-13 jsou zobrazeny výsledky získané z přímého modelu a s pomocí inverzního modelování. Lze vidět, že podle měření vlhkost ve všech hloubkách dochází k růstu vlhkosti při srážce. Nicméně při použití přímého modelování (M) lze vidět relativně velké podhodnocení vlhkosti ve všech hloubkách a obzvláště pokles vlhkosti ve střední vrstvě, kde ve skutečnosti vlhkost roste. Použití inverzního modelu (MI) výsledky upravilo, nicméně i zde je zaznamenán pokles vlhkosti ve střední vrstvě, i když oproti přímému modelování je tento pokles méně výrazný.



Obr. 6-13: Porovnání měření a simulace pro srážku 14. dubna. Body vyznačují hodnoty naměřené, tečkovaná čára výsledky z přímého modelování a plná čára z inverzního modelování.

Simulace nemusí být úplně přesné, nicméně lze s jejich pomocí zachytit základní trendy změny vlhkosti v kořenové vrstvě jako například vysychání. Nicméně je vhodné mít přesnější charakteristiky půdy jako například naměřit retenční čáru, což je ale dlouhodobá záležitost, která může zabrat i rok měření na speciálních přístrojích. Toto modelování je směřováno především pro určení disponibilní vody v půdě a její redistribuci v půdním prostředí vertikálním směrem. Zapojení dalších procesů vodní bilance (výpar, transpirace) se předpokládá v dalším období řešení projektu.

6.4.3 Řídící rovnice

Pro reprezentaci hydrodynamických procesů probíhajících v prostředí experimentálního stanu se samozavlažovacím květináčem bylo zapotřebí zahrnutí následujících hydrodynamických procesů:

- pohyb vody porézním prostředím
- výpar přes půdní povrch
- pohyb vodních par porézním prostředím
- odběr kořenovou zónou

Je zcela evidentní, že k popisu evaporace/kondenzace, pohybu vodních par je dále nezbytné uvažovat termodynamické procesy, které jsou reprezentovány:

- pohyb tepla prostředím
- efekt skupenského tepla
- povrchová bilance energie

Model byl na teoretické bázi publikován autory (Saito et al., 2006; Sakai et al., 2011) a jeho řídicí rovnice je formulována následovně:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \frac{\partial \theta_v}{\partial t} &= \nabla \cdot (K_{lh} + K_{vh}) \nabla h + \frac{\partial K_{lh}}{\partial z} + \\ &+ \nabla \cdot (K_{lt} + K_{vt}) \nabla T - S \\ \bar{C} \frac{\partial T}{\partial t} + \overbrace{L_0 \frac{\partial \theta_v}{\partial t}}^{\text{latentní teplo}} &= \nabla \cdot \lambda \nabla T - \\ &- \nabla \cdot (\vec{q}_l C_l + \vec{q}_v C_v) T \\ &- \nabla \cdot L_0 \vec{q}_v - C_l S T + S_{heat}, \end{aligned} \quad (1)$$

kde neznámé veličiny jsou zastoupeny:

1. θ_l [-] objemová vlhkost kapaliny
2. θ_v [-] objemový podíl vodních par
3. h [m] kapilární tlaková výška
4. T [°C] teplota prostředí

Rovnice má dále následující parametry: K_{lh} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je hydraulická vlhkost kapaliny vzhledem k hydraulickému gradientu, K_{vh} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je vodivost pro složku vodních par vzhledem ke gradientu kapilárního tlaku, $K_{lt,vt}$ [$\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] je hydraulická vodivost pro kapalinu(l)/vodní páru(v) vzhledem k teplotnímu gradientu, S [s^{-1}] je odběr kořenovou zónou, \bar{C} [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$] je objemová měrná tepelná kapacita směsi voda, pára, pevná fáze a vzduch, λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je tepelná vodivost prostředí, L_0 [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$] je objemové latentní teplo, $C_{l,v}$ [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$] je měrná tepelná kapacita vody/vodní páry a S_{heat} [W] je tepelný zdroj. Parametry rovnice jsou nelineární, jsou to funkce závislé na řešení této diferenciální rovnici. V rovnici se dále vyskytují toky $\vec{q}_{l,v,t}$ popisující toky vody/vodních par/tepla prostředím. Toky prostředím jsou kombinací konvekčně-difúzních vztahů popisující vzájemné vazby mezi řešením rovnice a gradienty řešení. Vzhledem k tomu, že se jedná o kombinaci dvou rovnic (pohyb vody a vedení tepla) je nezbytné zmíněné čtyři neznámé redukovat na neznámé dvě. Primární neznámé, které jsou v rovnici řešeny, tvoří vektor funkcí $\begin{pmatrix} h \\ T \end{pmatrix}$. Dále jsou definovány konstituční vztahy pro $\theta_l(h)$ a $\theta_v(h, T)$. Podrobnosti jsou definovány v pracech (Saito et al., 2006; Sakai et al., 2011)..

Rovnice (1) je dále řešena pro počáteční a okrajové podmínky. Počáteční podmínky jsou uvažovány prostorovou distribucí veličin h a T . Okrajové podmínky jsou pro obě rovnice u hranic, které nepopisují styk s atmosférou, uvažovány jako standardní hranice Dirichletova nebo Neumannova typu pro Richardsovu rovnici a rovnici vedení tepla. Hranice na styku s atmosférou je hranicí Neumannovského typu, kde pro rovnici pohybu vody je uvažován tok daný výparem a pro rovnici vedení tepla je to tok daný povrchovou bilancí energie

$$R_n - H - L_0 E - G = 0, \quad (2)$$

kde R_n je radiální bilance vypařujícího se povrchu (voda, půda, porost) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a v tomto, H intenzita konvektivního (turbulentního) toku tepla do atmosféry [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], E intenzita toku vodní páry z vypařujícího se povrchu do atmosféry [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], a G je intenzita toku tepla do půdy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a je to hodnotou okrajové podmínky Neumannova typu.

Pro Richardsovu rovnici je uvažována toková okrajová podmínka výparu přes půdní povrch, která je dána následujícím vztahem

$$E = \frac{\rho_{vs} - \rho_{va}}{r_H + r_s}, \quad (3)$$

kde ρ_{vs} je hustota vodních par na půdním povrchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], ρ_{va} je hustota vodních par v atmosféře [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], r_s je odporový koeficient půdního povrchu a r_H je aerodynamický odporový člen [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]. Podrobnosti stanovení těchto členů jsou uvedeny v (Saito et al., 2006; Sakai et al., 2011).

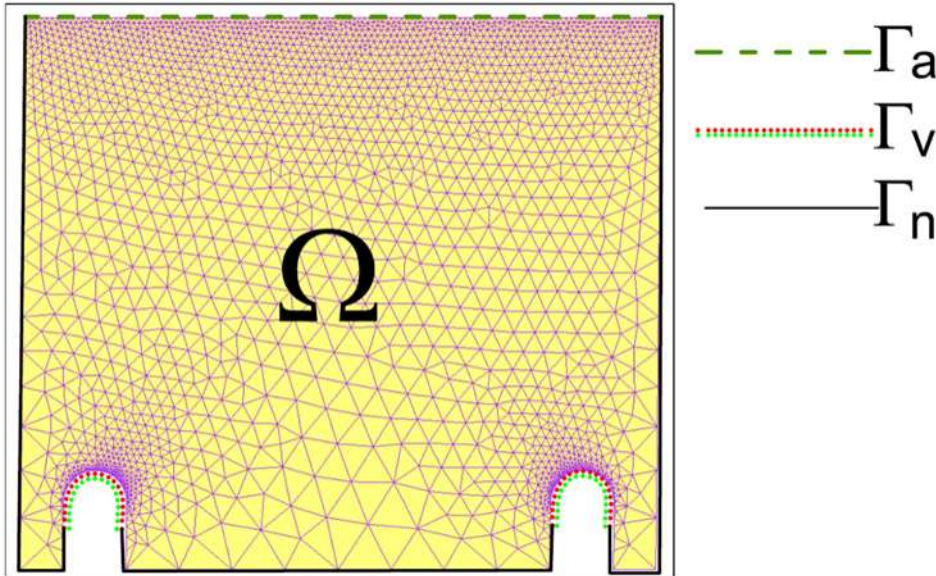
Výpar vody z půdy včetně termodynamických procesů popsaných v rovnici (2) probíhá v obdobích mezi srážkovými cykly. V rámci tohoto projektu byl model rozšířen pro uvažování dlouhodobých sezónních období, kdy je výpar střídán dešťovými srážkami. Této funkce bude využito v nadcházejícím roce, kdy bude prováděna modelace v reálných terénních podmínkách pro sezónní období. Pro systém se střídajícími se srážkami a výparem byla v tomto projektu definována okrajová podmínka pro hranici Γ_a představující atmosférickou hranici u rovnice vedení tepla následovně

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}}(\vec{x}, t) &= G \quad \forall \vec{x} \in \Gamma_a \times t \in (0, t_{end}) \quad \text{pokud } i(t) = 0 \\ T(\vec{x}, t) &= T_a \quad \forall \vec{x} \in \Gamma_a \times t \in (0, t_{end}) \quad \text{pokud } i(t) > 0, \end{aligned} \quad (4)$$

kde T_a [$^{\circ}\text{C}$] je měřená teplota atmosféry, $i(t)$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je intenzita srážky. Tato formulace okrajové podmínky předepisuje na půdní povrch v průběhu srážky pro rovnici vedení tepla Dirichletovskou okrajovou podmínku danou aktuální atmosférickou teplotou. Je uvažováno, že vzhledem k vysoké tepelné kapacitě vody, která je až čtyřnásobně větší než je měrná tepelná kapacita půdního povrchu, bude teplota půdního povrchu dosahovat teploty srážky, která bude blízká atmosférické teplotě. V průběhu běhu modelu tedy dochází k cyklickému střídání Dirichletovy a Neumannovy okrajové podmínky. Neumannova okrajová podmínka přináší do systému další stupně volnosti, zatímco Dirichletova okrajová podmínka stupně volnosti ubírá. Z tohoto důvodu má systém v průběhu simulace různý počet neznámých a je zde nutné netriviální řešení na úrovni softwarové implementace řídicích rovnic. Jedná se o podobnou problematiku jako okrajová podmínka výronová plocha u Richardsovy rovnice, strategie pro tento typ okrajové podmínky je řešena například (Dolejší et al., 2019).

Řídící rovnice (1) je numericky řešena metodou konečných prvků pro prostorové derivace a implicitní Rotheho metodou pro časové derivace v programu (Kuraz et al., 2022). Program DRUtES umožňuje prostorovou integraci diferenciálních rovnic pro jedno/dvě/tři rozměrné výpočetní oblasti. Slabé formulace pro podobný typ problému zahrnující transport mísitelných látek jsou uvedeny v (Kuraz et al., 2013). Strategie řešení soustav lineárních rovnic je řešena v (Kuraz and Mayer, 2013). V programu DRUtES byl již dříve řešen problém výše zmíněné okrajové podmínky volná drenáž. K implementaci této nové okrajové podmínky bylo využito již dříve realizované řešení pro okrajovou podmínku výronová plocha.

6.4.4 Konstrukce modelu, počáteční a okrajové podmínky



Obr. 6-14: Schema sítě reprezentující samozavlažovací květináč.

Modelový popis laboratorního experimentu byl proveden pomocí dvou-rozměrné úlohy. Výpočetní oblast Ω byla triangularizována pomocí GMSH [Geuzaine, Christophe and Remacle, Jean-Francois()]. Sít' je tvořena 2456 uzly a 4600 elementy, detail sítě je na předchozím obrázku. Oblast je ohraničena třemi hranicemi:

- Γ_a - atmosférická hranice,
- Γ_n - hranice s nulovým tokem,
- Γ_v - Dirichletova hranice definující plné nasycení. Je to hranice popisující styk samozavlažovacího květináče se zdrojem vody. Systém květináče ponechává tuto plochu vždy plně nasycenou.

Okrajová podmínka pro hranici Γ_a byla již formulována v rovnici (4). Pro hranici Γ_n budou okrajové podmínky definovány následovně

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial \vec{n}}(\vec{x}, t) &= n_z, \quad \forall \vec{x} \in \Gamma_n \times (t_0, t_{end}) \\ T(\vec{x}, t) &= T_a, \quad \forall \vec{x} \in \Gamma_n \times (t_0, t_{end}), \end{aligned} \quad (5)$$

kde n_z je svislá složka vnitřního normálového vektoru. Pro proudění je tedy na této hranici definována okrajová podmínka nulového toku, pro rovnici vedení tepla je uvažována Dirichletova podmínka předepsané teploty, teploty vzduchu T_a .

Nakonec pro hranici Γ_v budou okrajové podmínky definovány následovně

$$\begin{aligned} h &= 0, \quad \forall \vec{x} \in \Gamma_v \times (t_0, t_{end}) \\ T(\vec{x}, t) &= T_a, \quad \forall \vec{x} \in \Gamma_v \times (t_0, t_{end}). \end{aligned} \quad (6)$$

Počáteční podmínky je nutné předepsat rovněž pro proměnné h a T , což jsou primární řešené neznámé modelu (1). Stanovení počátečních podmínek je vždy komplikovaná úloha. Zpravidla se volí přibližný odhad. Počáteční fáze běhu modelu je vždy ovlivněna nepřesnou volbou počátečních podmínek, a mělo by toto být uvažováno při vyhodnocování modelu. Počáteční podmínky jsou tedy stanoveny následovně

$$\begin{aligned} h(x, t_0) &= z, \quad \forall x \in \Omega \\ T(x, t_0) &= T_a, \quad \forall x \in \Omega. \end{aligned} \quad (7)$$

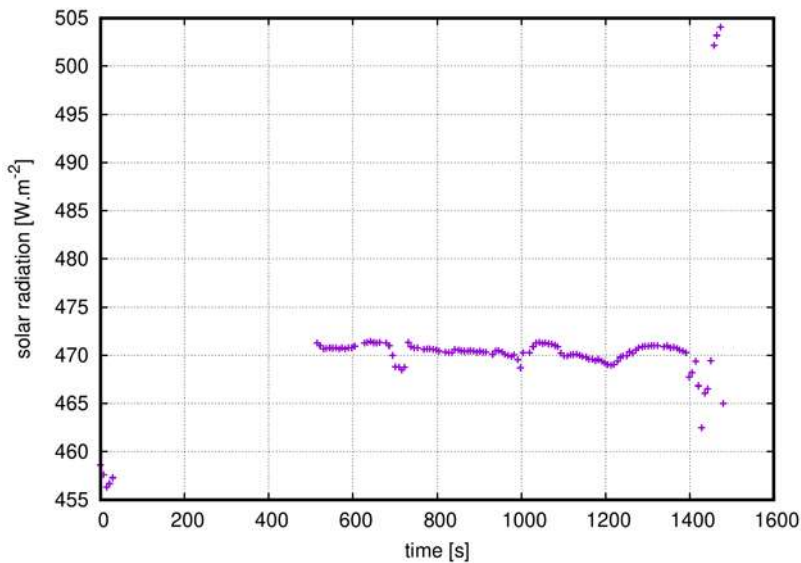
Celkový simulovaný čas byl 65 hodin.

6.4.5 Vstupní hodnoty modelu – rovnice bilance energie

Intenzita slunečního svitu je v modelu reprezentovaná pomocí tzv. krátkovlnné solární radiace S_t [$W \cdot m^{-2}$]. Pro reálné podmínky existují rovnice pro výpočet na základě zeměpisné polohy a dne v roce. V případě tohoto uzavřeného laboratorního experimentu je ovšem stanovení solární radiace pomocí těchto vztahů přirozeně nemožné. Protože pro daný typ žárovek neexistuje žádné měření, které by tyto hodnoty dokládalo, byly tyto hodnoty naměřeny pomocí pyranometru APOGEE INSTRUMENTS, SN 500, viz obrázek 2-32. Měřená data jsou zobrazena na obrázku 2-33. Po plném zahřátí žárovek byla pyranometrem naměřena krátkovlnná solární radiace $S_t = 470 W \cdot m^{-2}$. V průběhu experimentu dochází k monitoringu odběru elektrické energie v systému. Je tedy možné jednoznačně identifikovat okamžik, kdy LED osvětlení svítí a kdy nikoli.

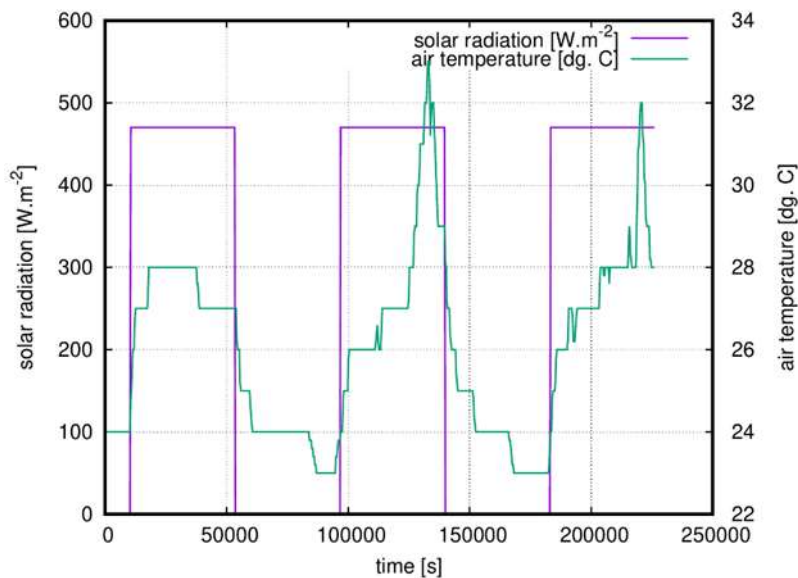


Obr. 6-15: Pyranometr APOGEE INSTRUMENTS, SN 500 použitý pro stanovení krátkovlnné solární radiace S_t

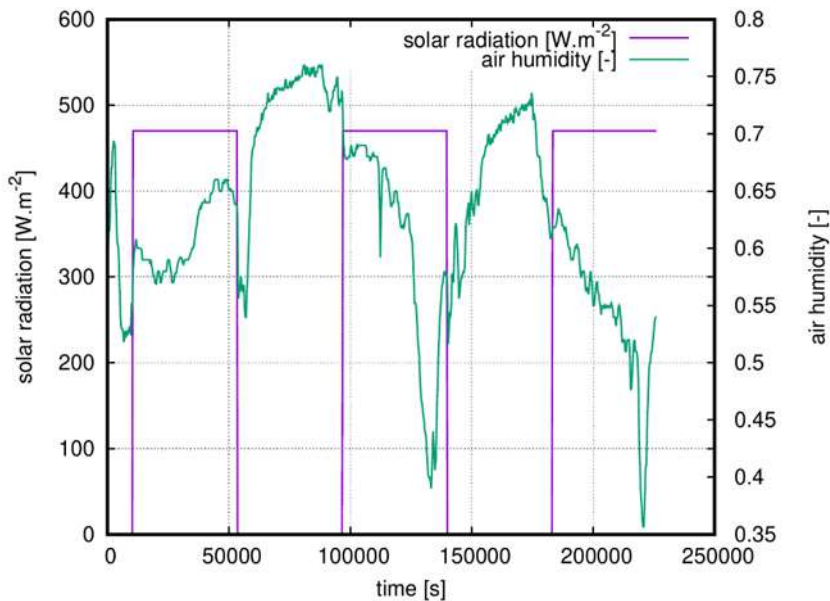


Obr. 6-16: Průběh měření krátkovlnné solární radiace S_t pod umělým osvětlením.

Experiment je kontinuálně monitorován. Z naměřených dat byl vybrán pro modelaci úsek dvou dnů, na obr. 2-35 jsou znázorněny průběhy solární radiace S_t a teploty vzduchu a solární radiace S_t a vlhkosti vzduchu. Při uvažování nulové rychlosti větru, což není zcela přesný předpoklad vzhledem k ventilátoru, a nulové hodnoty oblačnosti, byl z naměřených dat vytvořen vstupní soubor pro bilanci energie.



Obr. 6-17: Průběhy solární radiace S_t a teploty vzduchu a solární radiace S_t a vlhkosti vzduchu.



Obr. 6-18: Průběhy solární radiace S_t a teploty vzduchu a solární radiace S_t a vlhkosti vzduchu.

6.4.6 Vstupní hodnoty modelu – půdní hydraulické charakteristiky

Půdní hydraulické charakteristiky byly v této fázi projektu získány z literární rešerše. Porézní materiál je tvořen silně humózní zeminou, na základě (Dussaillant et al., 2004) byly stanoveny následující půdní hydraulické charakteristiky

- $\alpha = 2.8 \text{ m}^{-1}$
- $n = 2.239$
- $\theta_s = 0.55$
- $\theta_r = 0.03$
- $K_s = 0.00626e - 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

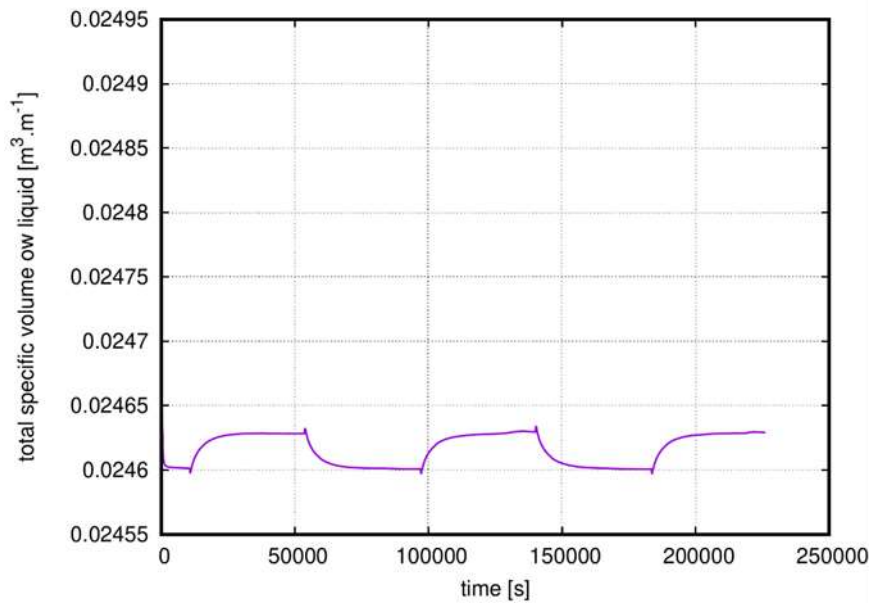
Tepelná vodivost půdy je uvažována podle modelu (Chung and Horton, 1987) funkčně závislá na vlhkosti. Parametrizace modelu vycházela z (Kodesova et al., 2013) a byla následující

- $b_1 = 0.173, b_2 = 1.350, b_3 = 1.160$

V květináčích se pěstují rajčata. Byl uvažován model odběru kořenovou zónou podle (Feddes et al., 1978). Parametry odběru kořenovou zónou při uvažování plodiny rajčata byl převzat z (Wang et al., 2021).

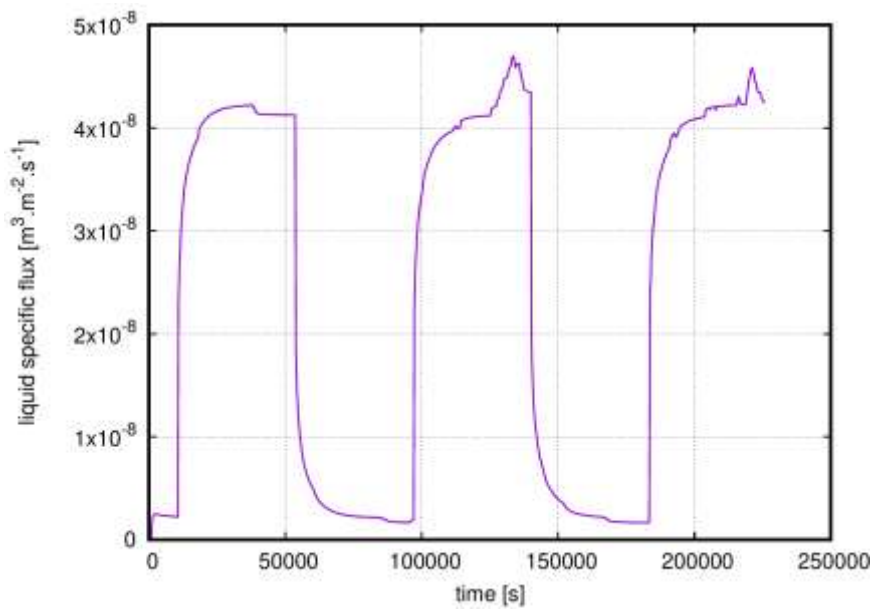
6.4.7 Simulace hydro/termodynamických procesů

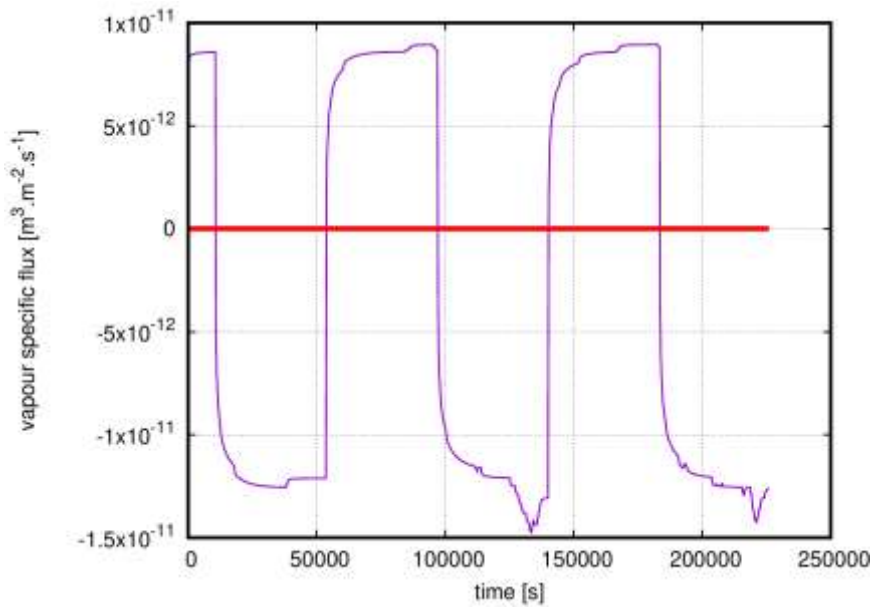
Na prvním obrázku je znázorněna závislost celkového objemu tekutiny v květináči na simulovaném čase. Ačkoli jsou patrné změny v objemu, jedná se o nepatrné výkyvy. Toto je dáno funkcí samozavlažovacího květináče, který udržuje na přítoku stále plnou nasycenost.



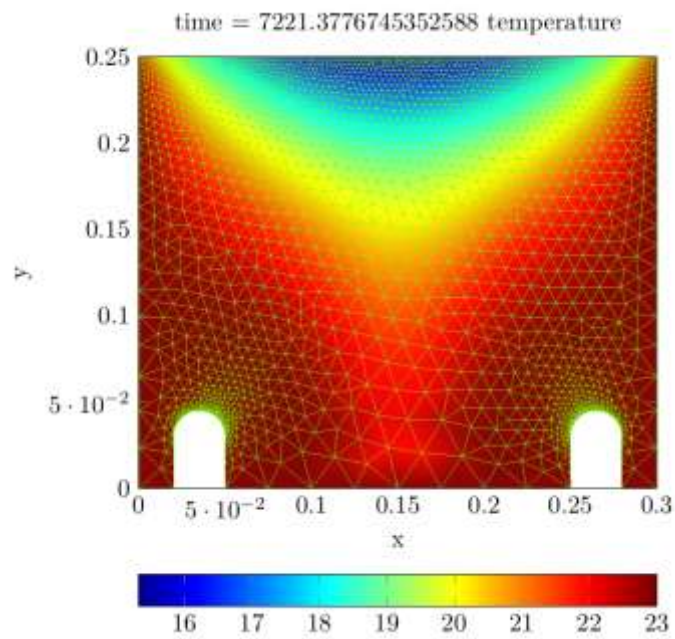
Obr. 6-19: Časová závislost objemu vody v květináči, jsou zde patrné minimální odchylky. Vzhledem k uvažovanému modelu je objem reprezentován jako specifický objem, tedy V/bm – objem na běžný metr.

Na dalších obrázcích jsou znázorněné energetické toky.

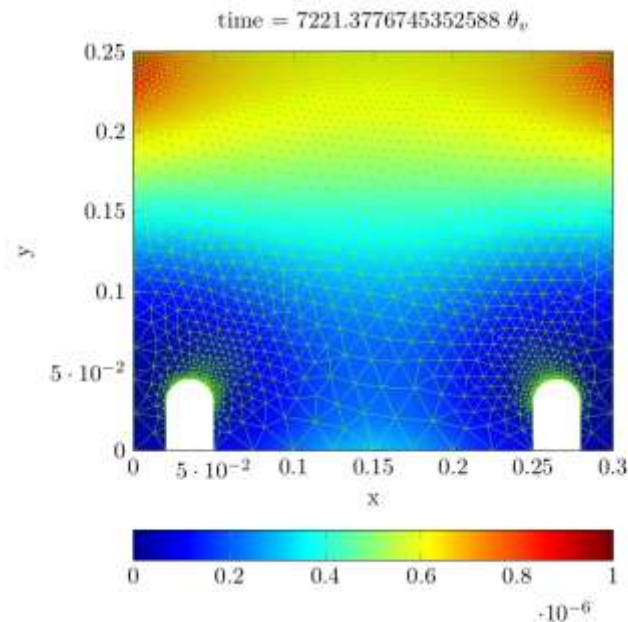




Obr. 6-20: Toky pod horní hranicí Γ_a . Dole jsou toky kapalné fáze, na pravo jsou toky plynné fáze.



Obr. 6-21: Průběh teplot na oblasti v čase 2 hod. od počátku simulace, světelný zdroj vypnut.



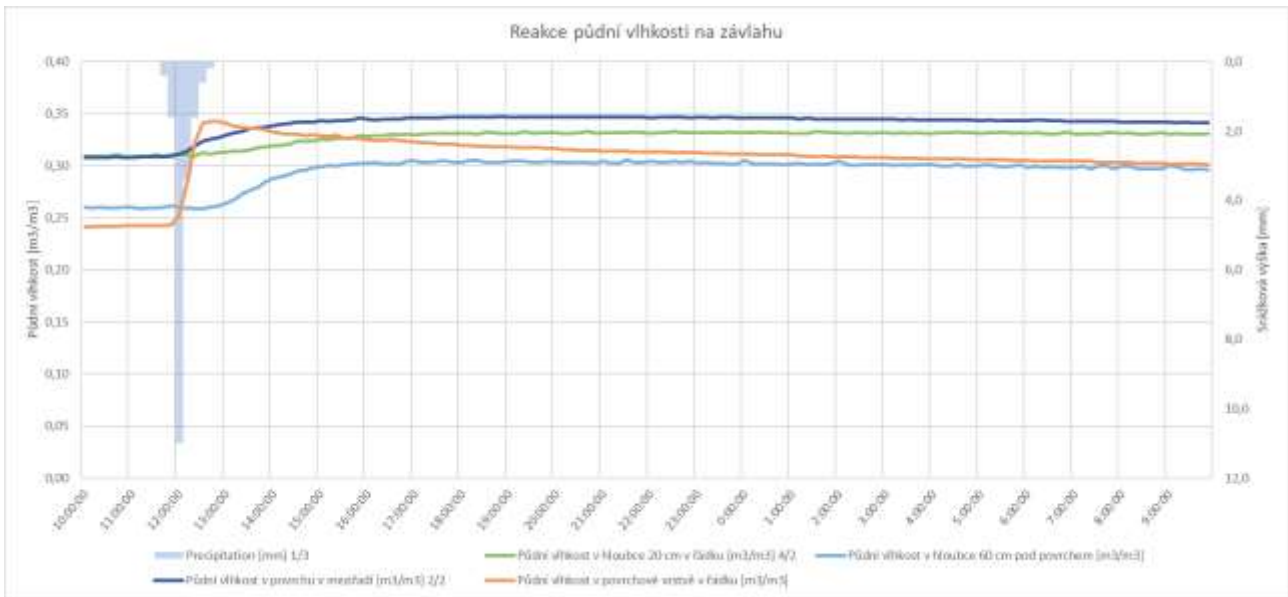
Obr. 6-22: Průběh objemového podílu vodních par na oblasti v čase 2 hod. od počátku simulace, světelný zdroj vypnut.

6.4.8 Shrnutí a význam modelování a monitoringu

Zkalibrovaný model procesů popisujících vodní režim v půdách předkládá podrobný a kontinuální popis distribuce a tedy i potenciálního deficitu vláhy v půdním profilu s ohledem na prostor a čas. Spolehlivost modelu ale může být zaručena jen v případě, pokud máme k dispozici monitorovací data pro vybrané lokace (pozorovací body) v půdním profilu. Je patrné, že i využití jednoduchých monitorovacích nástrojů umožňuje kalibraci robustního modelu popisující půdní dynamiku včetně toku vodních par. Nezbytnou součástí experimentálního zázemí je tedy monitoring půdní vlhkosti (či potenciálu) a půdních teplot.

6.4.9 Lokalita Libiř

Hodnoty srážkové výšky a půdní vlhkosti v několika horizontech stažené z meteorologických stanic EMS ukazují reakci půdního profilu na srážku. V prvním případě je pozorován vývoj následující po umělé závlaze s maximální intenzitou 60 mm/h a celkovou srážkovou výškou 20 mm. Vidíme okamžitou reakci čidel v povrchových vrstvách a zhruba o 1 hodinu opožděnou reakci čidla v nejhlubší vrstvě, 60 cm pod povrchem. V případě pěstování zeleniny je průnik vody do této hloubky možno považovat za ztrátu, protože z hloubky 60 cm, běžné druhy zelenin již nejsou schopny prokořenit.



Obr. 6-23: Reakce půdní vlhkosti na závlahu v lokalitě Libiš

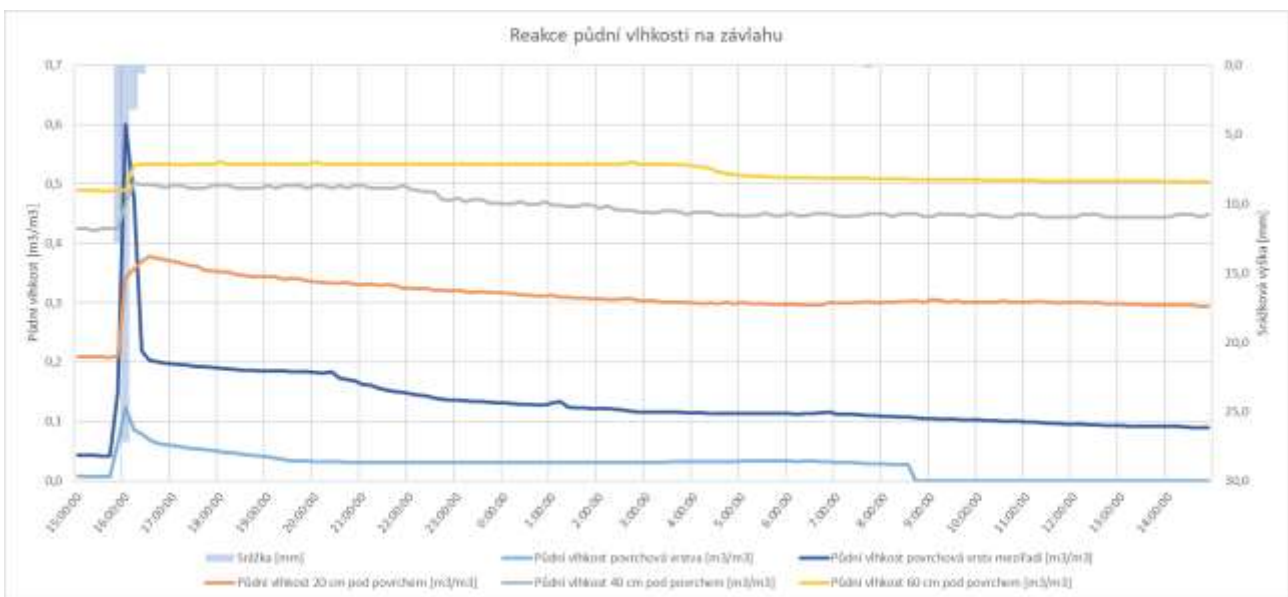
V případě závlahy ve formě přirozené srážky s delší dobou trvání a maximální intenzitou 18 mm/h a celkovou srážkovou výškou 20 mm, vidíme zcela odlišnou reakci půdního profilu. Po první části srážky, došlo k velmi malé pozitivní změně vlhkosti v povrchových vrstvách, většina srážky je zachycena intercepcí na povrchu rostlin a postupně ztéká na povrch. Druhá část srážky již smáčí přímo povrch půdy a vidíme pozitivní nárůst vlhkosti v půdních vrstvách. Nicméně nárůst vlhkosti v hlubších vrstvách nelze pozorovat, vlhkost v hlubších horizontech stoupá až s několikahodinovým zpožděním, tak jak se vlhkost redistribuuje z povrchových vrstev. To ukazuje pokles vlhkosti v povrchové vrstvě.



Obr. 6-24: Reakce půdní vlhkosti na přirozenou srážku v lokalitě Libiš

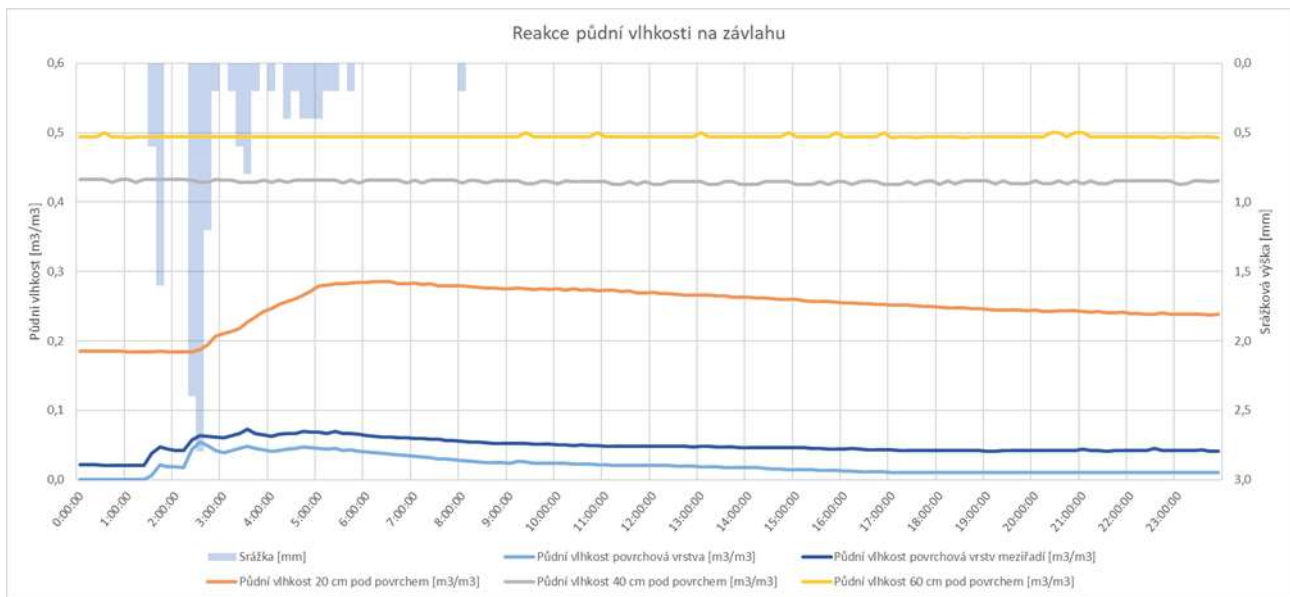
6.4.10 Hlavenec

Hodnoty srážkové výšky a půdní vlhkosti v několika horizontech stažené z meteorologických stanic EMS ukazují velmi podobnou reakci půdního profilu na srážku jako v lokalitě Libiš. V prvním případě je pozorován vývoj následující po umělé závlaze s maximální intenzitou 100 mm/h a celkovou srážkovou výškou 44 mm. Vidíme okamžitou reakci čidel v povrchových vrstvách a velmi rychlou, ale řádově menší reakci čidla v nejhlubší vrstvě, 60 cm pod povrchem. Hodnota v meziřadí má nejvyšší nárůst, což je způsobeno stékáním vody do nejhlubšího místa povrchu. Půdní vlhkost se během několika hodin redistribuuje a přibližuje původním hodnotám, pouze půdní vlhkost v meziřadí a v hloubce 20 cm pod povrchem zůstává zvýšena.



Obr. 6-25: Reakce půdní vlhkosti na závlahu v lokalitě Hlavenec

V případě závlahy ve formě přirozené srážky s delší dobou trvání a maximální intenzitou 9 mm/h a celkovou srážkovou výškou 13 mm, vidíme opět odlišnou reakci hlubších vrstev půdního profilu. Po srážce, došlo k nárůstu vlhkosti v povrchových a mělkých podpovrchových půdních vrstvách. Nicméně nárůst vlhkosti v hlubších vrstvách nelze pozorovat. Vlhkost v povrchových vrstvách se však opět vrací na původní hodnoty, pouze půdní vlhkost v hloubce 20 cm pod povrchem zůstává na zvýšených hodnotách.



Obr. 6-26: Reakce půdní vlhkosti na přirozenou srážku v lokalitě Hlavenec

7 Zdroje

A. R. Dussailant, C. H. Wu, and K. W. Potter. Richards equation model of a rain garden. J. Hydrol. Eng., 9(3):219–225, 2004.

Bauer, M., Dostal, T., Krasa, J. et al. Risk to residents, infrastructure, and water bodies from flash floods and sediment transport. Environ Monit Assess 191, 85 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7216-7>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geosci. Model Dev., 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.

Geuzaine, Christophe and Remacle, Jean-Francois. Gmsh.

H. Saito, J. Šimůnek, and B. P. Mohanty. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone. Vadose Zone J., 5(2):784–800, 2006.

J. Kapička, Ž. Daniel, J. Lang, and I. Novotný, “Monitoring eroze zemědělské půdy - Závěrečná zpráva,” Praha, CZ, 2021.

Kavka, Petr. 2021. “Spatial Delimitation of Small Headwater Catchments and Their Classification in Terms of Runoff Risks.” Water (Switzerland) 13 (23). <https://doi.org/10.3390/W13233458>.

L. Wang, S. Ning, X. Chen, Y. Li, W. Guo, and A. Ben-Gal. Modeling tomato root water uptake influenced by soil salinity under drip irrigation with an inverse method. Agric. Water Manag., 255:106975, 2021.

- M. Kuraz and P. Mayer. Algorithms for solving darcian flow in structured porous media. *Acta Polytechnica*, 53(4):347–358, 2013.
- M. Kuraz, P. Mayer, and J. R. Bloecher. DRUtes – an opensource library for solving coupled nonlinear convection-diffusion-reaction equations, 20. <http://www.drutes.org>.
- M. Kuraz, P. Mayer, V. Havlicek, P. Pech, and J. Pavlasek. Dual permeability variably saturated flow and contaminant transport modeling of a nuclear waste repository with capillary barrier protection. *Appl. Math. Comput.*, 219(13):7127 – 7138, 2013.
- M. Sakai, S. B. Jones, and M. Tuller. Numerical evaluation of subsurface soil water evaporation derived from sensible heat balance. *Water Resour. Res.*, 47(2), 2011.
- R. A. Feddes, P. J. Kowalik, and H. Zaradny. Simulation of field water use and crop yield, Wageningen : Centre for agricultural publishing and documentation, Wageningen, 1978.
- R. Kodesova, M. Vlasakova, M. Fer, D. Tepla, O. Jaksik, P. Neuberger, and R. Adamovsky. Thermal properties of representative soils of the czech republic. *Soil Water Res.*, 8(4):141–150, 2013.
- S.-O. Chung and R. Horton. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resour. Res.*, 23(12):2175–2186, 1987.
- V. Dolejší, M. Kuraz, and P. Solin. Adaptive higher-order space-time discontinuous galerkin method for the computer simulation of variably-saturated porous media flows. *Appl. Math. Model.*, 72:276 – 305, 2019.