

Název mapy se speciálním obsahem:

25769/2023 - MZE - 16232

Stanovení rizika dosažení kritických hodnot kyslíku v rybnících

**Miroslav Trnka^{1,2}, Radovan Kopp², Jan Mareš¹, Matěj Orság^{1,2}, Milan Fischer^{1,2},
Zahradníček Pavel¹, Štěpánek Petr¹, Balek Jan^{1,2}, Semerádová Daniela^{1,2}, Jan Hanuš¹,
Martin Možný^{1,3}, Kudláčková Lucie^{1,2}, Bláhová Monika^{1,2}, Adam Vizina^{1,4}, Jan Meitner^{1,2},
Zdeněk Žalud^{1,2}**

¹*Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Brno*

²*Mendelova univerzita v Brně*

³*Český hydrometeorologický ústav, Praha-Komořany*

⁴*Výzkumný ústav vodohospodářský TGM, v. v. i., Praha*

Oponenti:

Ing. Ján Regenda, Ph.D., Fakulta rybářství a ochrany vod, JU v Českých Budějovicích

RNDr. Pavel Punčochář, CSc., Sekce vodní hospodářství

Ing. Petr Chalupa, Ph.D., Ministerstvo zemědělství, Odbor státní správy lesů, myslivosti a rybářství,

Popis novosti mapy:

Mapa si klade za hlavní cíl poukázat na riziko, kterou rychlá změna klimatu představuje pro tradiční chov ryb v rybnících. Dílčím cílem je vyhodnocení rizika dosažení kritických hodnot kyslíku a to skrze posouzení míry překročení prahových teplot vody a změny klimatologické vodní bilance. Zároveň mapa vymezuje regiony, kde tato změna již probíhá a poskytuje odhad časového rámce a dynamiky změn pro celou ČR. Cílem autorského týmu je upozornit na nutnost zohlednit riziko výskytu vysokých teplot vzduchu a vody nejen v chovu ryb, ale i v běžné péči o nádrže a zahájit vážnou debatu o těchto problémech. Mapa přehledně vymezuje oblasti se zvláště vysokým rizikem a to pro 3 časové úseky, tj. současnost (1991-2020) a dále horizont roku 2030 (2016-2045) a 2050 (2036-2065). Takto zpracovaná mapa nebyla doposud pro území ČR předložena.

Úvod

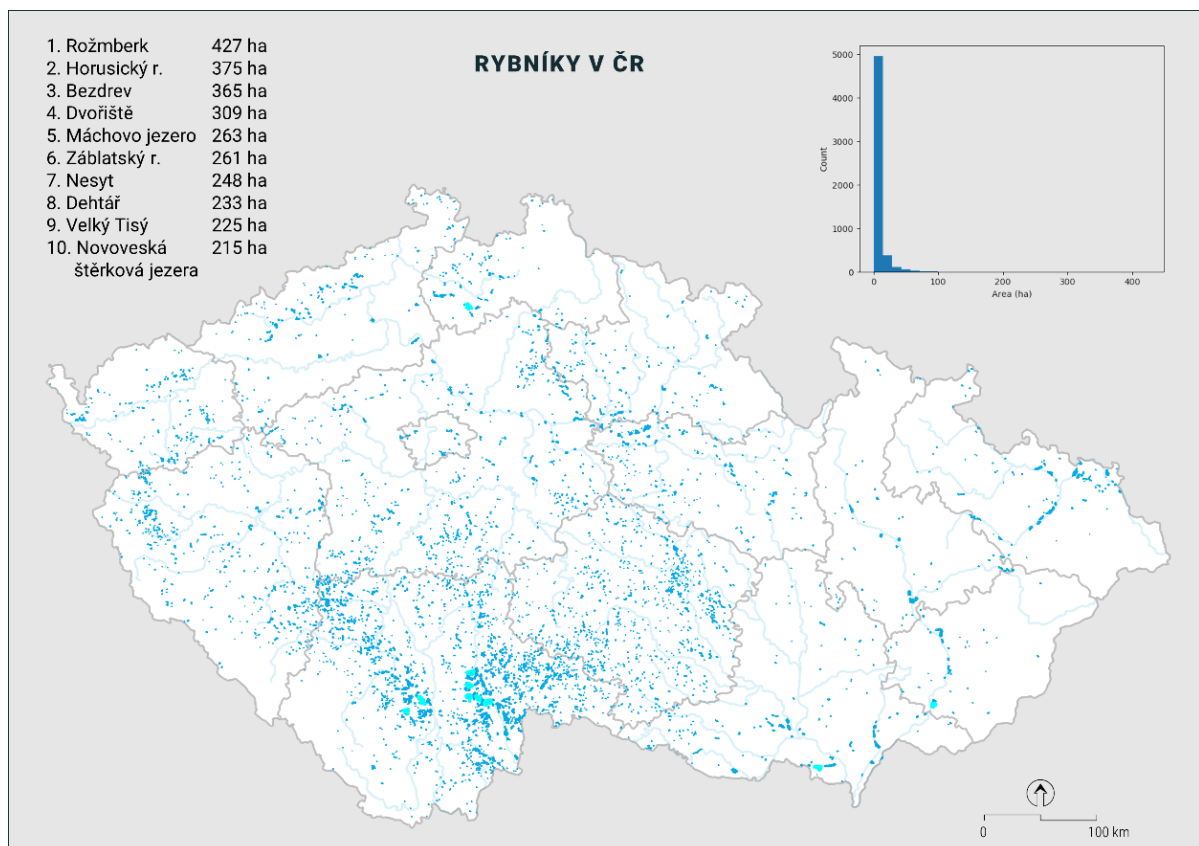
Chov ryb ve střední Evropě, včetně České republiky, je obecně charakterizován extenzivním a polo-intenzivním chovem ryb v rybnících. V mnoha oblastech sahají počátky existujících českých rybníčních soustav do 15. nebo 16. století a po staletí hrály tyto rybníky zásadní roli ve vodním hospodářství krajiny, například při zadržování vody a prevenci povodní, a při zachování a ochraně biologické rozmanitosti. Mnohé z těchto rybníků jsou napájeny dešťovými srážkami nebo jsou závislé na malých tocích či pramenech. V těchto rybnících nízký průtok znemožňuje udržení kvality nebo teploty pomocí chladnější a na kyslík bohatší vody z malého toku kvůli nízkému průtoku. V mnoha případech jsou potoky, které slouží jako zdroje vody pro rybníky, zatíženy vyčištěnou vodou z čistíren odpadních vod na horním toku, která je stále bohatá na živiny a to zvláště v období sucha. Přísun vody s vyšší teplotou vede ke snadnému zhoršení kvality vody.

Většina fyziologických procesů u ryb je silně ovlivněna teplotou, včetně tření, vývoje a růstu (Tonn, 1990) a proto jde o klíčový parametr, který je nutný sledovat. U většiny druhů ryb mírného pásma byly zjištěny obecné vztahy mezi teplotou, úmrtností a růstem. Klimatické faktory, jako je teplota současně ovlivňují druhové složení rybníčních populací a omezují rozšíření druhů (např. severní areál) (Casselman, 2002, Magnuson a kol., 1979, McCauley a kol., 1981).

Teplotní areály ryb jsou ohraničeny jejich kritickými teplotními maximy a minimy (Becker a Genoway, 1979). Aklimatizace na vyšší než okolní nebo téměř smrtelné teploty (v laboratorních nebo přírodních podmínkách) však umožňuje rybám tyto kritické hranice upravit o několik

stupňů (Myrick a Cech, 2000, Myrick a Cech, 2003). Sladkovodní druhy lze s ohledem na preferované teplotní podmínky rozdělit na druhy teplých, chladných a studených vod. Původně bylo toto vymezení navrženo pro ryby mírného pásma, které byly rozděleny na teplovodní (průměrná preferovaná teplota vody v létě 27-31 °C), chladnovodní (21-25 °C) a studenovodní (11-15 °C) druhy (Magnuson a kol., 1979). Kromě toho existuje další kategorie, která zahrnuje studenovodní druhy žijící při nízkých teplotách vody (letní teploty nižší než 10 °C) ve vysokých zeměpisných šířkách nebo nadmořských výškách (Reist et al., 2006). Rozsahy teplotní tolerance jsou druhově specifické a zahrnují jak stenotermní (úzký teplotní rozsah) druhy, jako je siven severní (*Salvelinus alpinus*), tak eurytermní (široký rozsah tolerance) druhy, jako je kapr obecný (*Cyprinus carpio*) (Ficke et al., 2007).

Předkládaná série map je vedena snahou poskytnout informace, které umožní posoudit riziko výskytu nezvykle vysokých teplot v současných, ale i připravovaných/navrhovaných rybnících. Hlavním cílem souboru map je napomoci adaptaci na probíhající klimatickou změnu, tak aby bylo maximálně omezeno riziko vzniku hypoxie (nedostatek kyslíku v těle) a úhynů ryb.



Obr. 1 Přehled umístění rybníků v ČR, výčet deseti největších a histogram rozdělení vodních ploch rybníčního typu podle výměry. Zdroj: DIBAVOD

Využití mapy

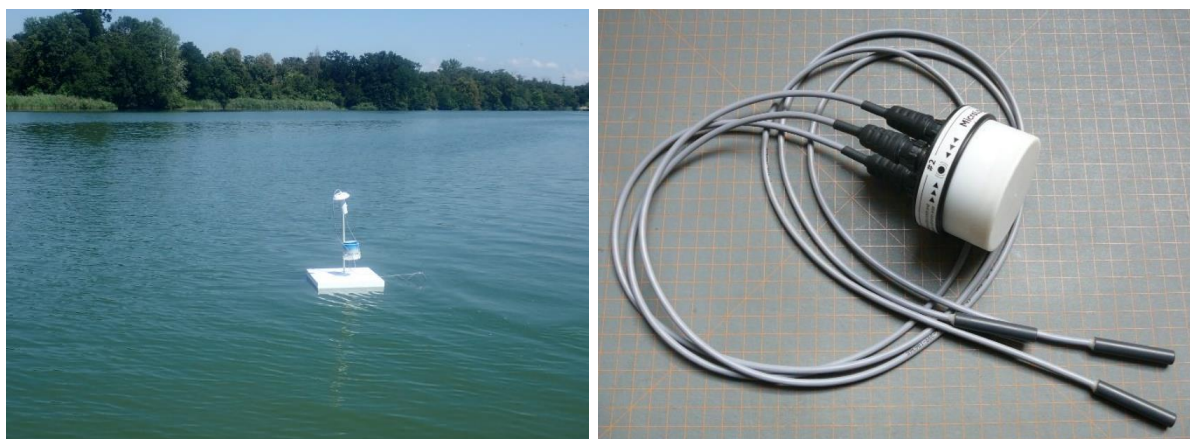
Při chovu ryb je nezbytné monitorovat základní faktory prostředí, které charakterizují situaci na lokalitě a mohou predikovat vznik problematických situací z hlediska chovu ryb. Teplota vody je pak klíčovým ukazatelem charakterizujícím fungování ekosystému. Teplotní výkyvy jsou ve vodě daleko menší než ve vzduchu díky vysoké měrné kapacitě vody. Přes poměrně úzké teplotní rozmezí přírodních vod a to od 0 °C do 33 °C významně ovlivňuje její chemickou a biochemickou reaktivitu. Teplota vody je jedním z významných ukazatelů jakosti vody z hlediska podmínek pro život vodních organismů. Z hlediska chovu ryb je hlavní význam teploty vody v ovlivnění nasycení vody kyslíkem (vyšší teplota snižuje obsah kyslíku) a vlivu na míru toxicity amoniakálního dusíku (vyšší teplota zvyšuje podíl toxické formy amoniakálního dusíku). Optimální hodnoty teploty vody pro růst a vývoj kaprovitých ryb jsou 18-28 °C, u lososovitých 8-18 °C (Svobodová a kol., 1987; Heteša a Kočková, 1997; Pitter, 2009, Kopp, 2015).

Ve svých počátcích byly rybníky budovány, tak aby zajišťovaly spíše vyšší teplotu vody, neboť klima bylo vlhčí a chladnější než dnes. Změna klimatu, ale přináší velmi rychle rostoucí riziko výskytu teplotních poměrů, které potenciálně k chovu ryb ovlivní zásadně a negativně. Navíc pokud nejsou brány v potaz všechny aspekty změny klimatu a lpí se na tradičním pojetí, mohou adaptační opatření (i budování rybníků v nevhodných podmínkách) na měnící se klima mít nedostatečný efekt nebo dokonce vést k maladaptaci (více škody než užitku). Správná a na změnu klimatu reagující opatření jsou klíčová. Proto připravil autorský tým sérii map pro producenty ryb, potenciální investory, a to soukromých i veřejných korporací, ale také rybářské organizace, majitele areálů pro sportovní rybolov i vědecké pracovníky. Informace o tempu a zvyšujícím se riziku nárůstu teplot vody může být velmi prospěšná pro přijetí nezbytných opatření, plánování investic, ale také pro vývoj adaptačních opatření. Mapy mohou využívat pracovníci oddělení ministerstva zemědělství, ale i životního prostředí, stejně jako Státní pozemkový úřad, Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka, v.v.i. apod.

Využití pro aktuální klasifikaci rybníků z pohledu výskytu rizikových teplot

Na území České republiky (ČR) doposud nebyla teplota vody v rybnících systematicky analyzována a porovnávána. Její měření bylo a je prováděno pouze v omezeném rozsahu a většinou nesystematicky. Proto byl pro monitoring a predikci teploty vody v rybnících vyvinut a otestován model, do kterého pro jednoduchost vstupuje jako jediná veličina pouze průměrná denní teplota vzduchu. Model je založen na předpokladu, že teplota povrchové vrstvy vody (hloubka 0,15 m) je lineárně závislá na klouzavém průměru teploty vzduchu, kterou kopíruje

s jistým časovým zpožděním. Pro účely vývoje a testování modelu byla použita data teplot vody a vzduchu z devíti rybníků širokého rozpětí rozloh (3–300 ha) a nadmořských výšek (170–740 m. n. m.) v ČR. Měření bylo realizováno elektronickými odporovými čidly Microlog T3 (firma EMS Brno) s vlastním dataloggerem. Celá sestava byla umístěna na ukotveném plováku (Obr. 2). Jedno čidlo měřilo teplotu vody v hloubce 0,15 m a druhé teplotu vzduchu v 0,5 m nad vodou.



Obr. č. 2 Nainstalovaná měřící platforma (vlevo) a přístroj Microlog T3 se třemi odporovými teploměry, jež byl na platformě umístěn (vpravo).

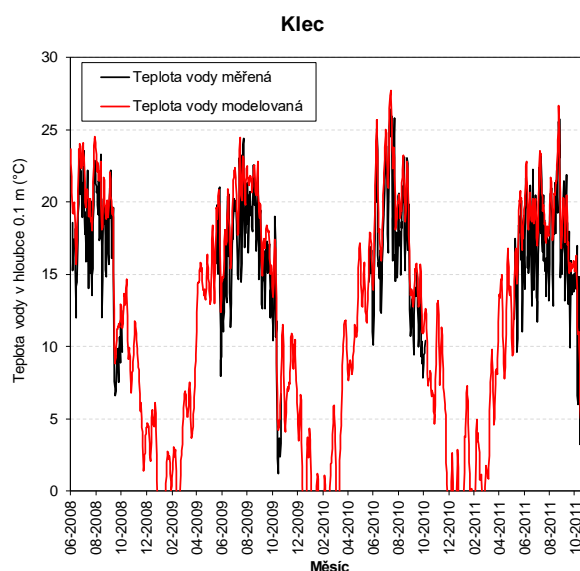
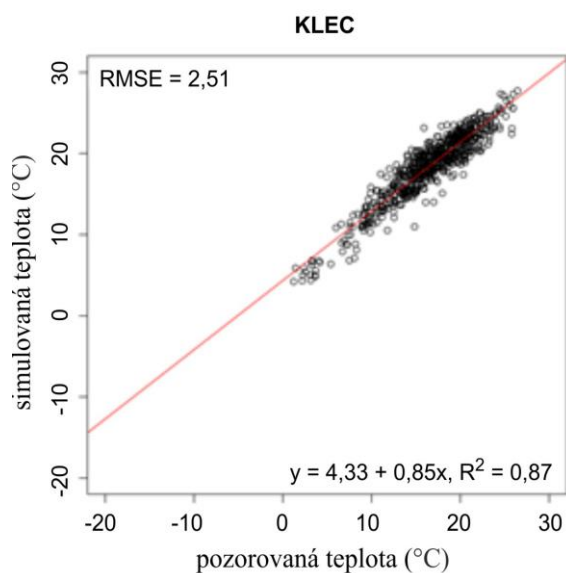
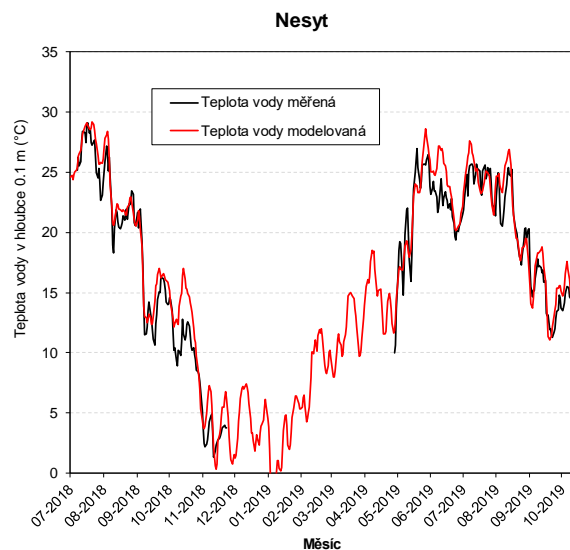
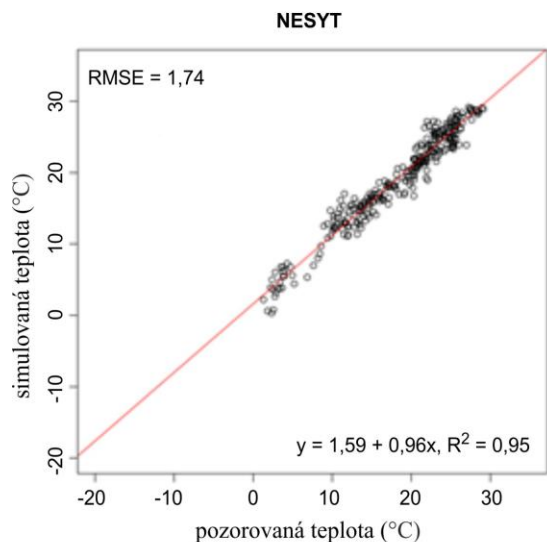
Pro vývoj a testování modelu byl použit statistický software R, který iterativně hledal kombinaci parametrů, vedoucích k nejnižšímu RMSE (odmocnina ze střední kvadratické chyby). Model byl optimalizován pro nejvyšší přesnost v období duben až září, aby nejlépe vystihoval období s nejvyššími teplotami vody. Výsledek je ve formě lineárního vztahu:

$$y = 2,120 + 1,021 * x$$

y = teplota vody v hloubce 0,15 m (°C)

x = klouzavý průměr průměrné teploty vzduchu za posledních pět dní (°C), s časovým posunem (zpožděním) o jeden den.

Tato parametrizace vede k nejnižšímu RMSE 2,09 °C. Model lze využít pro simulaci teploty vody rybníků v různých nadmořských výškách ČR a také v různých časových obdobích. Při využití dat teploty vzduchu dle scénářů očekávaného klimatu lze modelovat i variabilitu teploty vody v budoucích podmínkách.



Obr. č. 3 Ukázka shody měřené a modelované teploty vody v hloubce 0,15 m na rybnících Nesyt a Klec.

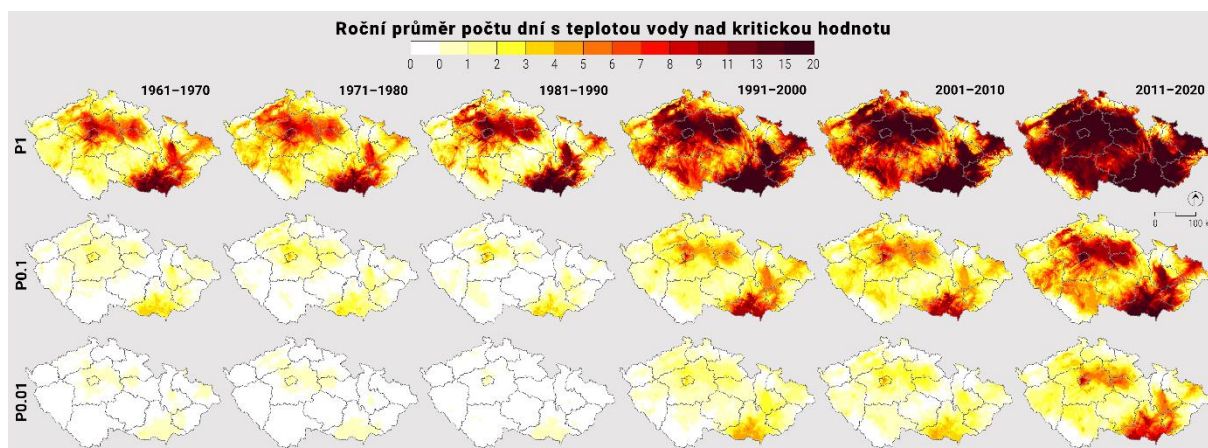
Uspokojivé výsledky modelu umožnily následně odhadnout teplotu vody ve všech rybnících a také uvážit hodnotu teploty vody i v rybnících uvažovaných/plánovaných na celém území. Byla proto připravena série map odhadující výskyt vysokých teplot na celém území. Mapa pracuje se základním rozlišením 500 x 500 m a následně agreguje riziko na úroveň katastrálních území a vymezuje (kategorizuje) obecně pásma podle míry rizika.

Základním předpokladem bylo, že rybníky jsou umístěny v oblastech, kde se mimořádně vysoké teploty prakticky nevyskytují. Proto hodnota prahu (teploty vody) vychází z hodnoty

99,99. percentilu ve všech gridech, ve kterých v ČR je rybník s plochou alespoň 1 ha (viz. Obr. 1), a to v teplém půlroce (duben-září).

Základem vyhodnocení je odhad počtu dní s teplotou vody nad tuto relativně stanovenou hranici 99,99 percentilu, a to ve vybraném referenčním období. Výběr této hranice pro stanovení skutečně extrémního teplotního režimu umožnil objektivní a opakovatelné určení teplotní hranice, jako teploty, která v referenčním období je dosahována skutečně výjimečně. Byla použita dvě referenční období, konkrétně třicetiletí 1961-1990 a 1981-2010. Hodnota 99,99. percentilu odpovídá teplotě vody rovné nebo větší $+27,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1961-1990) a $+29,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1981-2010). Již zde je vidět zásadní posun a rozdíl mezi oběma referenčními obdobími.

Pro ilustraci jsme vizualizovali na Obr. 4 níže, hodnoty počtu dní s hodnotou teploty vody na úrovni 90. (P1), 99. (P0,1) a 99,99 (P0,01) percentilu pro referenční období 1961-1990. Série map ukazuje zásadní změny v počtu dní s prahovou teplotou vody a výjimečnost období 2011-2020.



Obr. č. 4 Ukázka map změny počtu dní s roční průměrnou teplotou nad práh stanovený jako 1%, 0,1% a 0,01% nejvyšších teplot v lokalitách současných rybníků (viz. Obr. 1).

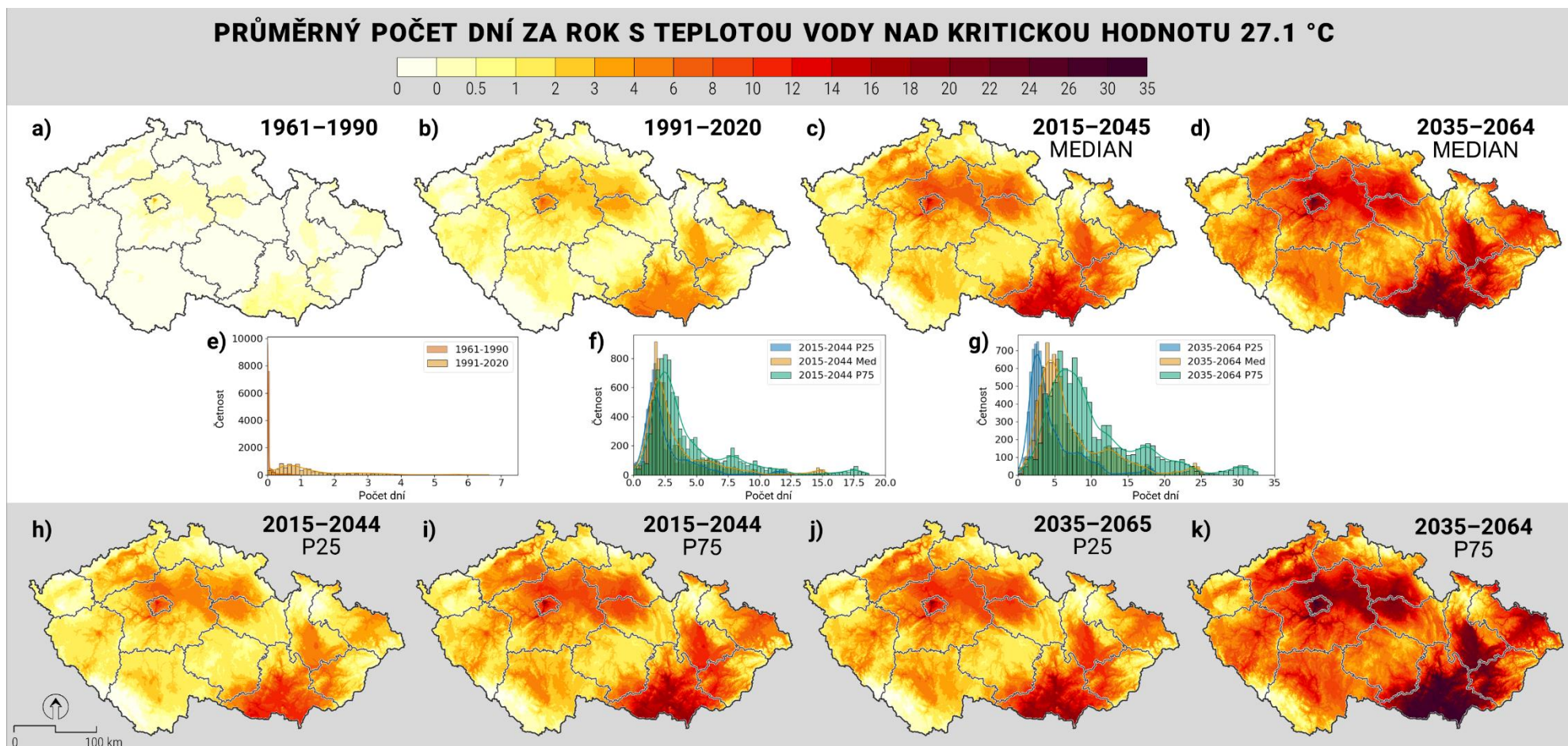
Mapa jasně dokumentuje trend k dramatickému nárůstu teplot nad vybrané prahy zejména v posledních 10 letech. Pro finální mapy byl použit 99,99 percentil.

Po definování metod pro odhad teploty vody (povrchové vrstvy) v rybnících a následném stanovení objektivních teplotních prahů, lze přistoupit k interpretaci výsledků. Pro prahovou teplotu $27,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ je počet dní dokumentován na Obr. 5. Mapy jasně dokumentují dynamiku nárůstu počtu dní s teplotou nad $27,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, která se v rybnících před rokem 1980 prakticky nikdy nevyskytla. Na druhou stranu v období 1991-2020, je v průměru ve většině rybníčních pánví dosažena alespoň jednou ročně. Nicméně počet dní s překročením této hodnoty byl i v období 1961-2020 poměrně nízký, s výjimkou jižní Moravy a okolí Prahy jen zřídka dochází k řetězení

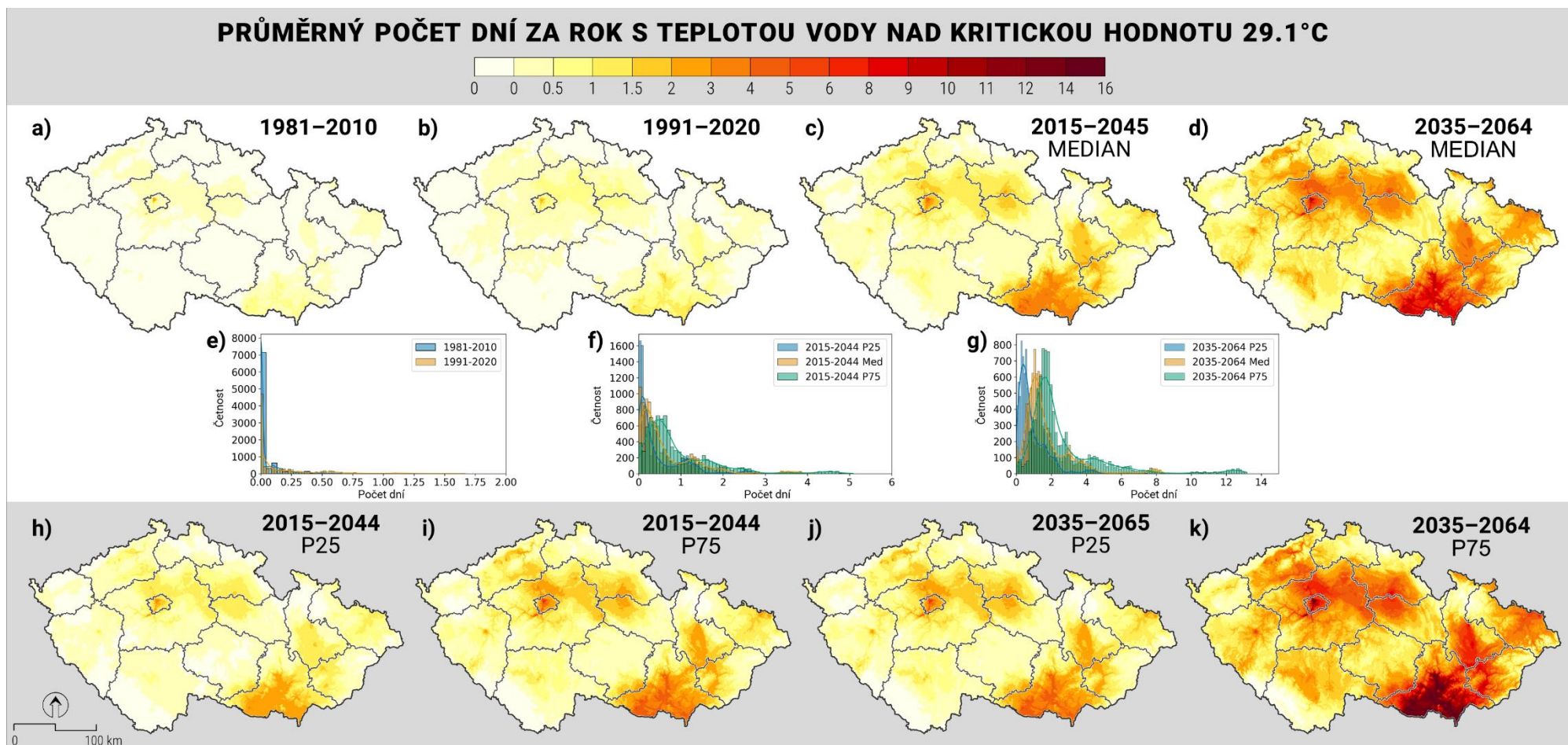
několika dní s takto vysokou teplotou. To se ale mění podle odhadů pro horizonty let 2030 a 2050. V tomto období se většina jinak „bezpečné“ jihočeské pánve stává rovněž rizikovou oblastí.

Při použití prahové teploty 29,1 °C, která je výrazně přísnější a překračuje obvykle uváděné teplotní rozmezí pro chov kapra, je z Obr. 6 zřejmé, že během období 1981-2020 bylo této hodnoty dosahováno jen vzácně, nicméně v průměru 3 dny s takto vysokou teplotou se vyskytují na jižní Moravě. Druhou výrazně postiženou oblastí jsou střední a východní Čechy. Ve stejných oblastech očekáváme výrazné zvýšení počtu dní s rizikovou teplotou vody v horizontu roku 2030 pokud uvažíme medián ze všech modelových běhů. Nicméně v horizontu roku 2050 lze očekávat navýšení rizika ve všech hlavních rybníčních pánvích včetně jižních Čech. Nárůst rizika je konzistentní v podstané části uvažovaných scénářů a do roku 2050 bude na všech rybnících v ČR dosahováno alespoň v některých letech velmi vysokých teplot. V oblasti jižní Moravy se pak v horizontu roku 2050 začínáme běžně setkávat s teplotami vody nad 30 °C.

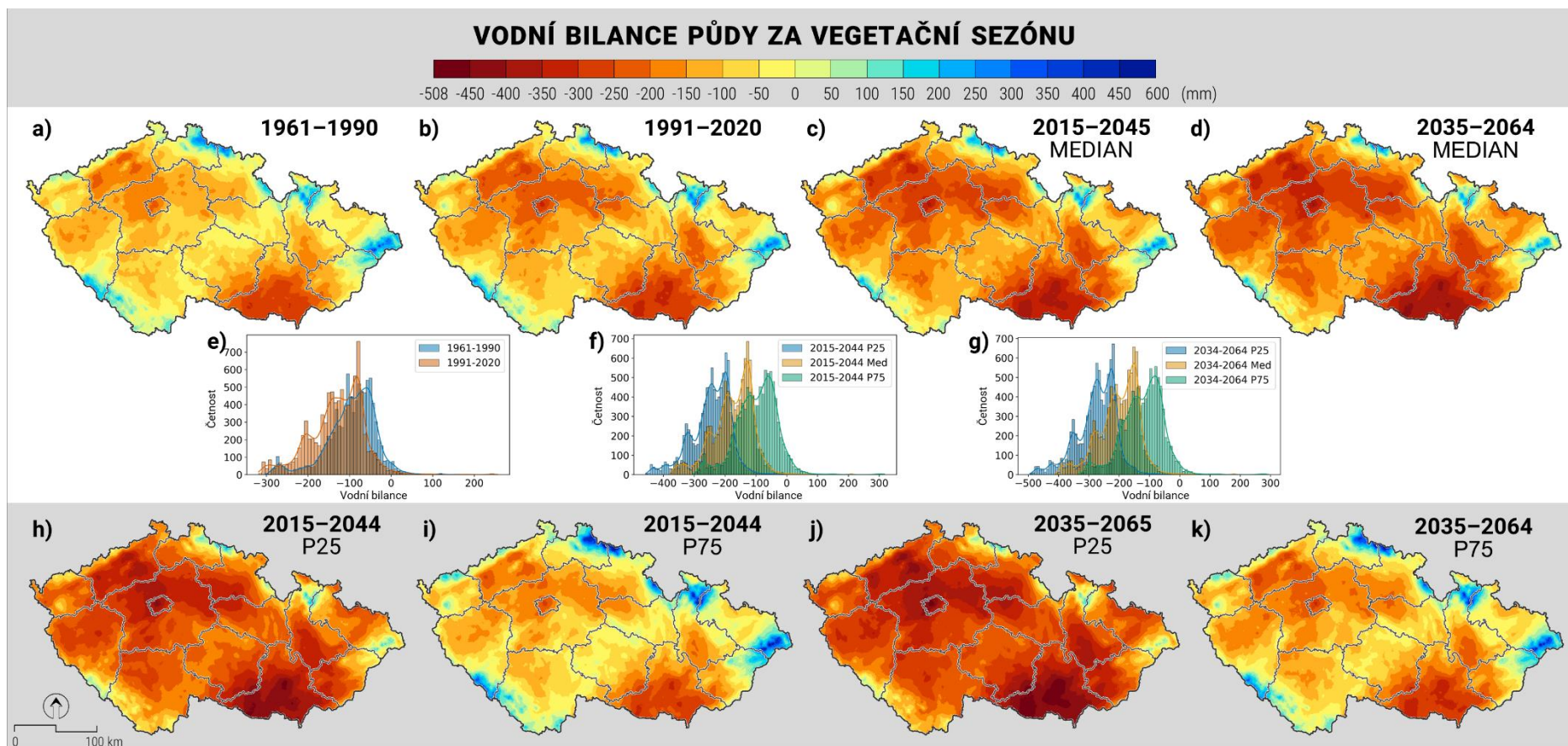
Jak dokumentuje Obr. 7 změna teplot nebude jediným rizikem pro rybníční soustavy. Je zřejmé, že probíhající klimatická změna může mít značný dopad na klimatologickou vodní bilanci. Kombinace extrémně teplé vody a minimálního přítoku může zesilovat dopad obou rizikových faktorů. Mapové podklady jasně ukazují, na zhoršení klimatologické vodní bilance na naprosté většině území a ve všech rybníčních pánvích.



Obr. 5 Průměrný počet dní s teplotou vody nad 27,1 °C pro jednotlivá časová období v rozlišení 500 m. Odhady pro období 2015-2044 a 2035-2064 jsou prezentovány jako střední odhad (medián) a dále hodnoty dolního (P25) a horního (P75) kvartilu.



Obr. 6 Průměrný počet dní s teplotou vody nad 29,1 °C pro jednotlivá časová období v rozlišení 500 m. Odhady pro období 2015-2044 a 2035-2064 jsou prezentovány jako střední odhad (medián) a dále hodnoty dolního (P25) a horního (P75) kvartilu.



Obr. 7 Klimatologická vodní bilance (rozdíl sumy srážek a potenciální evapotranspirace) za teplý půlrok tj. období duben-září, které reprezentuje hlavní vegetační období. Vodní bilance vyjadřuje průměr pro jednotlivá časová období v rozlišení 500 m. Odhady pro období 2015-2044 a 2035-2064 jsou prezentovány jako střední odhad (medián) a dále hodnoty dolního (P25) a horního (P75) kvartilu.

Metodika posouzení rizika stresu vysokými teplotami v rybnících

Příprava datových vrstev

Pro vytvoření samotných mapových vrstev bylo využito celkem 268 klimatologických a 787 srážkoměrných stanic sítě ČHMÚ s pozorovanými denními údaji o počasí od roku 1961 do roku 2020, které prošly kontrolou kvality dat a byly homogenizovány pomocí softwaru ProClimDB (Štěpánek a kol., 2013). Výjimečně chybějící denní údaje o počasí u některých stanic, byly poté interpolovány pomocí lokálně vážené regrese, která zahrnovala i vliv nadmořské výšky. Denní údaje o počasí pak byly interpolovány pomocí regresního krigování (pomocí různých terénních charakteristik jako prediktorů) do mapy v prostorovém rozlišení 500 m. Následně byla s pomocí výše popsaného modelu odhadnuta povrchová teplota vody a to jak pro všechny 500 x 500 m gridy, tak pouze pro ty z gridů v jejichž ploše ležela alespoň část rybníka s plochou > 1 ha. Teplotní práh byl stanoven percentilovou metodou jako hodnota 99,99. percentilu všech teplot vody v teplém půlroce (duben-září) v daném referenčním období. V této analýze bylo uvažováno 9030 gridů, na kterých se aktuálně nachází rybník s plochou nejméně 1 ha. Výstupy jsou shrnuty na Obr. 5 a 6. Současně byla odhadnuta hodnota klimatologické vodní bilance tj. rozdílu srážek a potenciální vegetace v teplém půlroce tj. od dubna do září. Výpočet potenciální evapotranspirace byl proveden primárně na základě denního časového kroku na Penman-Monteithově metodě (Allen a kol. 2005) pomocí modelu SoilClim (Hlavinka a kol. 2011). Výstupy jsou shrnuty v Obr. 7. Na základě denních vstupů byly zjištěny hodnoty teploty vody resp. počtu dní, v nichž byl překročen definovaný práh a hodnotu vodní bilance pro každý rok v hodnoceném období Obr. 4-7.

Klíčovou částí mapy jsou vrstvy reprezentující výhled pro budoucí klima. V rámci poslední zprávy IPCC (vydané v roce 2021) jsou k dispozici CMIP6 simulace (Eyring et al., 2016), které mají oproti předešlým CMIP5 simulacím mj. lepší prostorové rozlišení: některé modely zůstávají v rozlišení 250 km, ale pak jsou modely s 100 km rozlišením a 5 simulací dokonce s 50 km rozlišením – tzv. high resolution simulace (tyto jsou bohužel k dispozici, s jednou výjimkou, pouze do roku 2050). V rámci řešení projektu bylo provedeno zpracování všech v danou dobu dostupných modelů CMIP6, které reprezentují správně klima České republiky. Mezi použité statistické charakteristiky patřily zejména: prostorová korelace, korelace průměrných ročních chodů a vzdálenost od centra. Toto bylo spočteno pro všechny základní meteorologické prvky, potřebné pro výpočet tzv. referenční evapotranspirace (ET_0) podle metodiky FAO56 využívající model Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Ze zbývajících modelů bylo vybráno 6 tak, aby dobře reprezentovaly rozptyl všech modelů. Byly preferovány modely s rozlišením 100 km. Modelové výstupy byly zpracovány pro denní data a čtyři emisní scénáře (SSP1-26, SSP2-45, SSP3-70, SSP5-85). Tyto modely zahrnují:

- 1) Klimatický model CMCC-ESM2 je produktem Italského CMCC (Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici) centra Detaily v práci Cherchi a kol., 2019.
- 2) Model EC-Earth3 je global climate model postavený na datech ECMWF (European Centre of Medium Range Weather Forecast) vyvinutý evropským EC-Earth konsorciem. consortium with SMHI as coordinating partner. Detaily v práci Döscher a kol., 2022
- 3) Model GFDL-ESM4 je produktem Geophysical Fluid dynamics Laboratory NOAA (U.S. Department of Commerce National Oceanic & Atmospheric Administration Office of Oceanic & Atmospheric Research). Detaily v Krasting a kol., 2018.
- 4) Model MPI připravil Max Planck Institute for Meteorology, Německo. Detaily jsou v práci Gutjaht a kol., 2019.
- 5) Model MRI-ESM2-0 byl vytvořen MRI/JMA (Meteorological Research Institute of the Japan Meteorological Agency). Základní dokumentace je opublikována v práci Yukimoto a kol., 2019.
- 6) Model TaiESM1 (Taiwan Earth System Model verse 1) je produktem RCEC (Research Center for Environmental Changes), Academia Sinica, Taiwan. Model je podrobně popsán v práci Wang a kol., 2021.

Simulace klimatických modelů nelze přímo použít pro simulaci ani teplotního stresu ani klimatologické vodní 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. 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 extrémny 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. Tabulka 1 pak zahrnuje odhad budoucího vývoje teplot a srážkových úhrnů.

Tab. 1 Ve srovnání s referenčním obdobím 1961–1990 pro ČR jsou uvedena data průměrné měsíční teploty (°C) a změny měsíčních úhrnů srážek (%) pro scénář SSP2 a RCP4.5 pro období roku 2050.

	Změna průměrné teploty [°C]					
	CMCC-ESM2	EC-EARTH3	GFDL-ESM4	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAIESM1
Leden	3	3,8	2,9	2,3	2,1	3
Únor	2,6	3,4	2,9	1,9	1,6	2,5
Březen	2,6	3,5	3,3	2,3	2	2,6
Duben	2,7	3,5	3,3	2,4	2,6	2,9
Květen	3	0,5	2,9	2,5	2,9	3,3
Červen	3,2	3,4	2,4	2,5	2,8	3,3
Červenec	4,1	4,2	2,9	3,3	3,4	4,2
Srpen	3,9	4,2	2,7	3,1	3,2	4,3
Září	2,8	3,1	1,6	1,7	2,2	3,2
Říjen	2,3	2,9	1,5	1,5	2	2,8
Listopad	2,1	2,8	1,4	1,7	2	2,3
Prosinec	2,1	3	1,6	1,8	2	2,3
Rok	2,9	3,4	2,4	2,3	2,4	3

	Změna sumy srážek [%]					
	CMCC-ESM2	EC-EARTH3	GFDL-ESM4	MPI-ESM1-2-HR	MRI-ESM2-0	TAIESM1
Leden	16	20	11	16	5	10
Únor	23	25	8	16	7	16
Březen	50	43	26	39	27	42
Duben	5	-2	-6	3	-6	5
Květen	-2	-8	2	1	-2	10
Červen	-10	-16	3	-7	-2	-1
Červenec	8	-3	26	-7	25	11
Srpen	2	-7	16	5	15	-5
Září	13	6	30	26	18	4
Říjen	5	7	24	22	-5	-2
Listopad	1	6	15	13	-11	-6
Prosinec	11	19	16	17	1	5
Rok	7	3	14	11	6	6

Multikriteriální analýza

V rámci přípravy map se speciálním obsahem s názvem „Stanovení rizika dosažení kritických hodnot kyslíku v rybnících“ byly jako ukazatele pro multikriteriální analýzu vybrány následující parametry:

- Průměrný počet dní za rok s teplotou nad hodnotu 27,1 °C (Obr. 5);
- Průměrný počet dní za rok s teplotou nad hodnotu 29,1 °C (Obr. 6);
- Klimatologická vodní bilance za vegetační sezónu (Obr. 7).

Všechny uvedené parametry byly zpracovány v rozlišení 500 m (Obr. 4-7), nicméně pro mapu se speciálním obsahem byly agregovány na katastrální území (KU). Katastrální území reprezentují funkční a zažitý administrativní celek s jasně danými a v rámci území známými hranicemi. Pro účely státní správy se jevílo jako vhodné připravit podklady právě pro jednotlivá KU.

Pro všechny zmiňované parametry byly hodnoty agregovány do území KU a následně byl proveden výpočet tzv. Z-skóre, kdy hodnota Z-skóre pro dané území byla vypočtena jako:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma},$$

kde:

x je hodnota parametru v daném KU v daném časovém období,

μ je průměrná hodnota pro všechny KU v období 1991-2020,

σ směrodatnou odchylku pro všechny KU v období 1991-2020.

Podle hodnoty Z-skóre pak bylo území klasifikováno podle stupně ohrožení následujícím způsobem:

- zanedbatelné ($0 \leq Z$ skóre
- velmi nízké ($0 < Z$ skóre $\leq 0,5$),
- nízké ($0,5 < Z$ skóre $\leq 1,0$),
- střední ($1,0 < Z$ skóre $\leq 1,5$),
- vysoké ($1,5 < Z$ skóre $\leq 2,0$),
- velmi vysoké (Z skóre $> 2,0$).

Multikriteriální mapa pak integruje všechny tři výše popsané vrstvy. Prvním krokem multikriteriální analýzy byl výpočet průměrné hodnoty Z-skóre prostým aritmetickým průměrem. Na základě Z-skóre jsou pak oblasti ve finální mapě rozčleněny do 6 kategorií.

Prezentovaná multikriteriální analýza se pokouší vymezit zvláště ohrožená území v ČR z pohledu výskytu kombinace rizikových klimatických faktorů pro vznik nedostatku kyslíku v rybnících, a to jak pro současné referenční období (1991-2020) tak pro horizonty let 2030 a 2050.

Z map je zřejmé výrazný nárůst rizika ze strany klimatických faktorů, a tedy nutnost brát na výskyt kombinace vysokých teplot vody a potenciálně nízkého stavu vody velmi vážně již v současné době v oblasti jižní Moravy a střední i východních Čech. V horizontu roku 2030 a zejména roku 2050 se riziko výrazně zvyšuje na celém území ČR. Je třeba si uvědomit, že teploty vody dále rostou a v těchto časových horizontech není výjimečné zaznamenat teploty výrazně nad 30 °C. Současně teplotní model zachycuje nikoliv denní maximum ale denní průměr. Mapa zachycující rozložení hlavních soustav rybníků (Obr. 1) ukazuje, že území, multikriteriální analýzou vytipovaná jako nejvíce ohrožená, mají poměrně značnou plochu rybníků a především, že změna postupuje s mimořádnou rychlostí.

Informace o přínosech mapy pro uživatele

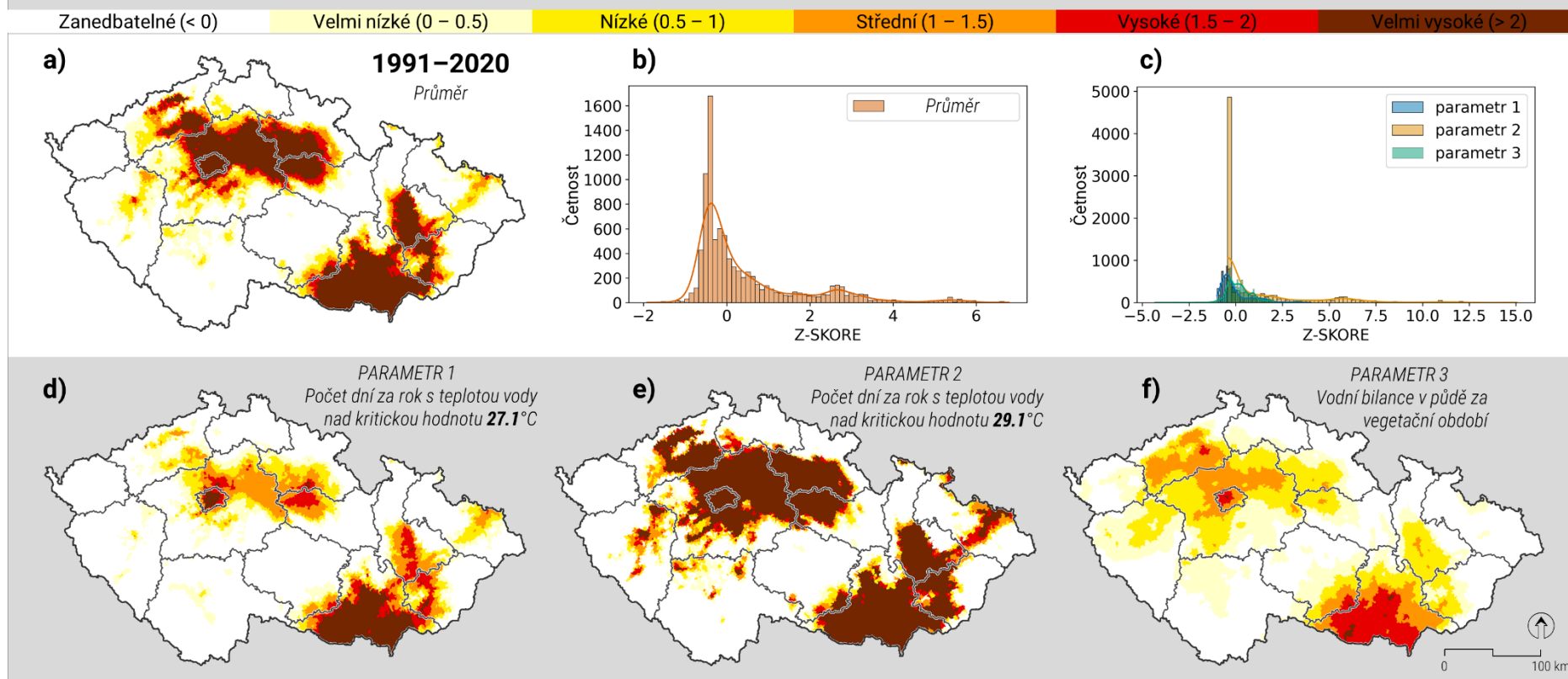
Aby byla zachycena časová dynamika vývoje teplotních parametrů a změny klimatologické vodní bilance, a zejména změny v prostorovém rozložení změn jsou mapy rozděleny do časových úseků průměrující hodnoty z období, kdy jsou k dispozici pozorovaná data tj. 1991–2020 (Mapa 1) a pro budoucí klima 2015–2044 (horizont 2030-Mapa 2) a 2035–2064 (2050-Mapa 3).

Závěr

Mapu, resp. mapové vrstvy pro tři období, lze využít pro argumentaci v oblasti posouzení potenciálních investic, strategického plánování adaptačních opatření, ale i v plánování dlouhodobě udržitelného hospodaření v krajině. I když je změna v míře rizika značná a vyžaduje vývoj adaptačních opatření v horizontu této, maximálně příští dekády, zůstává otázkou, nakolik se zásadní zvýšení rizika projeví ve snížení obsahu kyslíku s fatálními důsledky pro rybí osádku. Zatímco změny teplotního charakteru můžeme pro budoucí období odhadovat s poměrně vysokou přesností a jistotou, je přímý dopad na rybníční hospodářství komplikován specifičností každé jedné vodní nádrže, jejím konkrétním managementem a samotným průběhem epizody vysokých teplot. Nicméně mapy jasně ukazují bezprecedentní nárůst počtu dní s teplotami, které na našem území byly ještě v nedávné minulosti dosahovány jen výjimečně a současně kombinovaných s prohloubením deficitu vodní bilance. Tuto kombinaci rizikových faktorů nelze přehlížet, zvláště u rybníků a rybníčních soustav napájených pouze z lokálních zdrojů a bez možnosti výrazně modulovat teplotu vody. Musíme vzít v úvahu, fakt, že změna klimatu, tak jak ji prezentují předložené mapy, nemá v dějinách rybníkářství na našem území obdoby. Změna nastane nikoli během století, ale v příštích 3 dekádách a adaptace bude ztížena jak panující nejistotou v odhadech budoucího vývoje, tak změnami v celé zemědělské krajině.

STANOVENÍ RIZIKA DOSAŽENÍ KRITICKÝCH HODNOT KYSLÍKU V RYBNÍCÍCH

Stupeň rizika vyjádřený pomocí z-skóre



Mapa 1 Mapa rizika výskytu kritických hodnot kyslíku v rybnících (a) v současném klimatu (1991-2020) na základě 3 parametrů a to z-skóre odvozeného z počtu dní s teplotou vody nad 27,1 °C (d), nad 29,1 °C (e) a zhoršení záporné vodní bilance (f) vyjádřené jako Z-skóre vrstev definovaných v Obr. 5, 6 a 7. Mapa (a) reprezentuje průměrné z-skóre na základě map (d-f) pro jednotlivá katastrální území a umožňuje stanovit relativní riziko výskytu extrémních teplot. Histogramy (b) a (c) představují rozložení hodnot Z-skóre na výsledné mapě. Mapa reprezentuje období 1991-2020 a vychází z pozorovaných dat. Parametry Z-skóre byly odvozeny z období 1991-2020.

STANOVENÍ RIZIKA DOSAŽENÍ KRITICKÝCH HODNOT KYSLÍKU V RYBNÍCÍCH

Stupeň rizika vyjádřený pomocí z-skóre

Zanedbatelné (< 0)

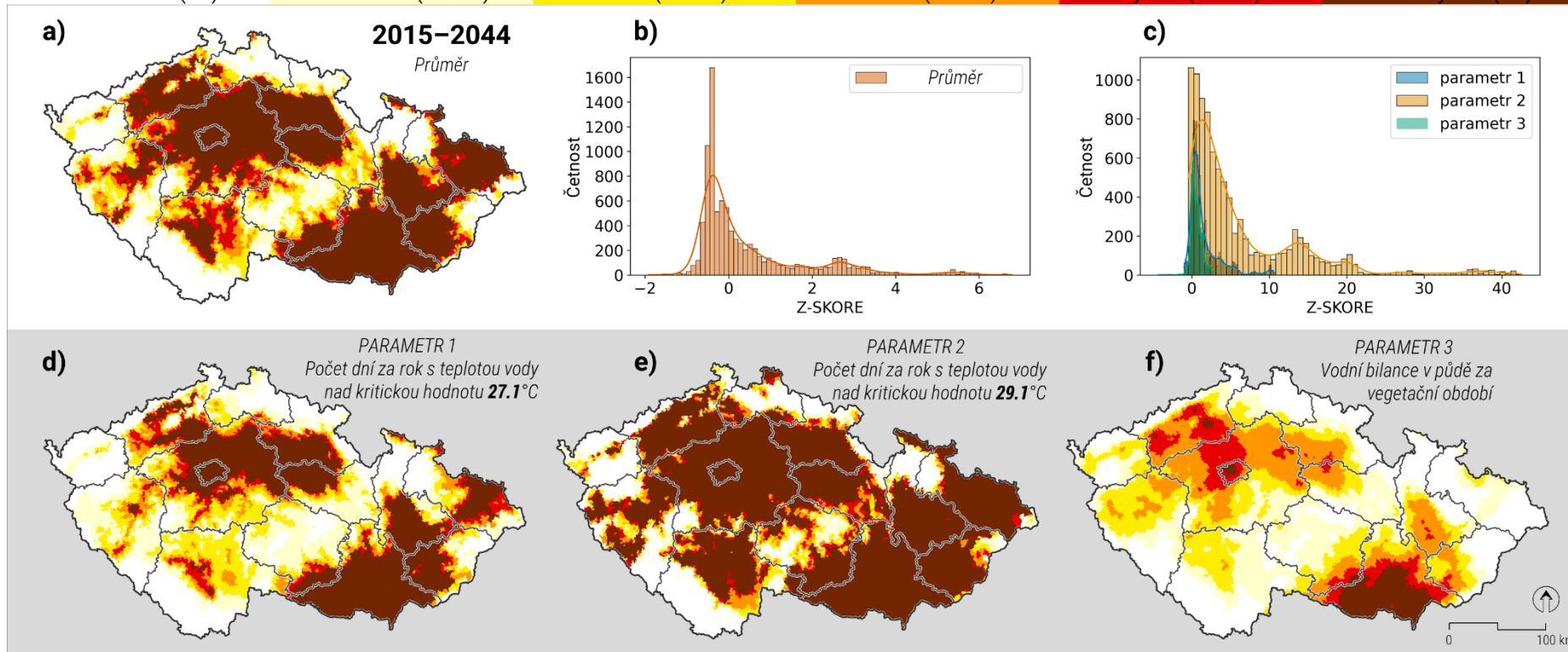
Velmi nízké (0 – 0.5)

Nízké (0.5 – 1)

Střední (1 – 1.5)

Vysoké (1.5 – 2)

Velmi vysoké (> 2)



Mapa 2 Mapa rizika výskytu kritických hodnot kyslíku v rybnících (a) v k horizontu roku 2030 na základě 3 parametrů a to z-skóre odvozeného z počtu dní s teplotou vody nad 27,1 °C (d), nad 29,1 °C (e) a zhoršení záporné vodní bilance (f) vyjádřené jako Z-skóre vrstev definovaných v Obr. 5, 6 a 7. Mapa (a) reprezentuje průměrné z-skóre na základě map (d-f) pro jednotlivá katastrální území a umožňuje stanovit relativní riziko výskytu extrémních teplot. Histogramy (b) a (c) představují rozložení hodnot Z-skóre na výsledné mapě. Mapa reprezentuje období 2030 a vychází z odhadu 24 kombinací emisních scénářů a globálních klimatických modelů. Parametry Z-skóre byly odvozeny z období 1991-2020.

STANOVENÍ RIZIKA DOSAŽENÍ KRITICKÝCH HODNOT KYSLÍKU V RYBNÍCÍCH

Stupeň rizika vyjádřený pomocí z-skóre

Zanedbatelné (< 0)

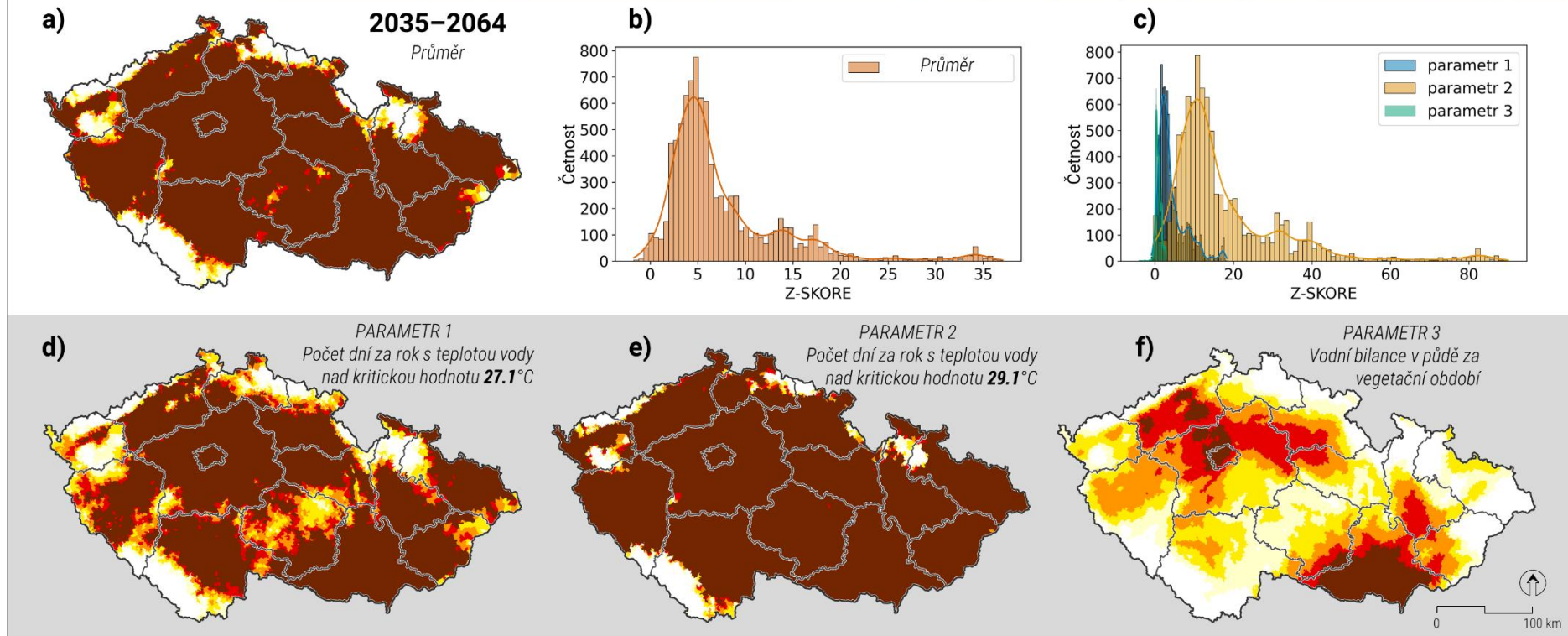
Velmi nízké (0 – 0.5)

Nízké (0.5 – 1)

Střední (1 – 1.5)

Vysoké (1.5 – 2)

Velmi vysoké (> 2)



Mapa 2 Mapa rizika výskytu kritických hodnot kyslíku v rybnících (a) v k horizontu roku 2050 na základě 3 parametrů a to z-skóre odvozeného z počtu dní s teplotou vody nad 27,1 °C (d), nad 29,1 °C (e) a zhoršení záporné vodní bilance (f) vyjádřené jako Z-skóre vrstev definovaných v Obr. 5, 6 a 7. Mapa (a) reprezentuje průměrné z-skóre na základě map (d-f) pro jednotlivá katastrální území a umožňuje stanovit relativní riziko výskytu extrémních teplot. Histogramy (b) a (c) představují rozložení hodnot Z-skóre na výsledné mapě. Mapa reprezentuje období 2050 a vychází z odhadu 24 kombinací emisních scénářů a globálních klimatických modelů. Parametry Z-skóre byly odvozeny z období 1991-2020.

Seznam odborných podkladů, které předcházely vypracování mapy:

- Allen G.A., Walter I.A., Elliot R.L., Howell T.A. (2005): ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Reston, American Society of Civil Engineers. ISBN: 9780784408056
- Becker, C.D.; Genoway, R.G. Evaluation of the critical thermal maximum for determining thermal tolerance of freshwater fish. *Environmental Biology of Fishes* 1979, 4, 245-256.
- Casselman, J.M. In *Effects of temperature, global extremes, and climate change on year-class production of warmwater, coolwater, and coldwater fishes in the great lakes basin*, American Fisheries Society Symposium, 2002; American Fisheries Society: pp 39-60.
- Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., Anthoni, P., Arsouze, T., Bergman, T., Bernardello, R., Boussetta, S., Caron, L.-P., Carver, G., Castrillo, M., Catalano, F., Cvijanovic, I., Davini, P., Dekker, E., Doblas-Reyes, F. J., Docquier, D., Echevarria, P., Fladrich, U., Fuentes-Franco, R., Gröger, M., v. Hardenberg, J., Hieronymus, J., Karami, M. P., Keskinen, J.-P., Koenigk, T., Makkonen, R., Massonnet, F., Ménégos, M., Miller, P. A., Moreno-Chamarro, E., Nieradzic, L., van Noije, T., Nolan, P., O'Donnell, D., Ollinaho, P., van den Oord, G., Ortega, P., Prims, O. T., Ramos, A., Reerink, T., Rousset, C., Ruprich-Robert, Y., Le Sager, P., Schmith, T., Schrödner, R., Serva, F., Sicardi, V., Sloth Madsen, M., Smith, B., Tian, T., Tourigny, E., Uotila, P., Vancoppenolle, M., Wang, S., Wärlind, D., Willén, U., Wyser, K., Yang, S., Yepes-Arbós, X., and Zhang, Q.: The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6, *Geosci. Model Dev.*, 15, 2973–3020, <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>, 2022.
- Ficke, A.D.; Myrick, C.A.; Hansen, L.J. Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 2007, 17, 581-613.
- Gutjahr, O., Putrasahan, D., Lohmann, K., Jungclaus, J. H., von Storch, J.-S., Brüggemann, N., Haak, H., and Stössel, A.: Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP), *Geosci. Model Dev.*, 12, 3241–3281, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3241-2019>, 2019.
- Harlfinger O., Knees G. (1999): Climate Handbook of the Austrian Soil Assessment. Wien, Communication from the Austrian Soil Science Society. ISBN 3703003413 (In German)
- Heteša, J., Kočková, E. (1997): Hydrochemie. – Skriptum MZLU Brno, 106 s.
- Cherchi, A., Fogli, P. G., Lovato, T., Peano, D., Iovino, D., Gualdi, S., Masina, S., Scoccimarro, E., Materia, S., Bellucci, Navarra, A. (2019). Global Mean Climate and Main Patterns of Variability in the CMCC-CM2 Coupled Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(1), 185-209.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Krasting, John P.; John, Jasmin G; Blanton, Chris; McHugh, Colleen; Nikonov, Serguei; Radhakrishnan, Aparna., et al. (2018). NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1407>
- Magnuson, J.J.; Crowder, L.B.; Medvick, P.A. Temperature as an ecological resource. *American Zoologist* 1979, 19, 331-343.
- McCauley, R.; Casselman, J.; Tiews, K. The final preferendum as an index of the temperature for optimum growth in (freshwater) fish. 1981.

- Mooney H., Larigauderie A., Cesario M., Elmquist T., Hoegh-Guldberg O., Lavorel S., Mace G.M., Palmer M., Scholes R., Yahara T. (2009): Biodiversity, climate change, and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1: 46–54.
- Myrick, C.; Cech, J. Temperature influences on California rainbow trout physiological performance. *Fish Physiology and Biochemistry* 2000, 22, 245-254.
- Myrick, C.; Cech, J. The physiological performance of golden trout at water temperatures of 10-19°C. *California Fish and Game* 2003, 89, 20-29
- Pitter, P. (2015): Hydrochemie. VŠCHT Praha. 792 s.
- Reist, J.D.; Wrona, F.J.; Prowse, T.D.; Power, M.; Dempson, J.B.; Beamish, R.J.; King, J.R.; Carmichael, T.J.; Sawatzky, C.D. General effects of climate change on arctic fishes and fish populations. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 2006, 35, 370-380.
- Svobodová, Z. (ed.) (1987): Toxikologie vodních živočichů. MTZ Olomouc, 232 s.
- Štěpánek P., Zahradníček P., Farda A. (2013): Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the Czech Republic in the period 1961–2010. *Időjárás*, 117: 123–141.
- Tonn, W.M. Climate change and fish communities: A conceptual framework. *Transactions of the American Fisheries Society* 1990, 119, 337-352.
- Wang, Yi-Chi & Hsu, Huang-Hsiung & Chen, Chao-An & Tseng, Wan-Ling & Hsu, Pei-Chun & Lin, Cheng-Wei & Chen, Yu-Luen & Jiang, Li-Chiang & Lee, Yu-Chi & Liang, Hsin-Chien & Chang, Lex & Lee, Wei-Liang & Shiu, Chein-Jung. (2021). Performance of the Taiwan Earth System Model in Simulating Climate Variability Compared With Observations and CMIP6 Model Simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 13. 10.1029/2020MS002353.
- Yukimoto, S., H. Kawai, T. Koshiro, N. Oshima, K. Yoshida, S. Urakawa, H. Tsujino, M. Deushi, T. Tanaka, M. Hosaka, S. Yabu, H. Yoshimura, E. Shindo, R. Mizuta, A. Obata, Y. Adachi, and M. Ishii, 2019: The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *J. Meteor. Soc. Japan*, 97, 931-965, doi:10.2151/jmsj.2019-051.
- Zahradníček P., Brázdil R., Štěpánek P., Trmka M. (2020): Reflection of global warming in trends of temperature characteristics in the Czech Republic, 1961–2019. *International Journal of Climatology*, 41: 1211–1229.

Dedikace: Mapa je realizačním výstupem výzkumného projektu MZe ČR QK1810161 Udržitelná produkce ryb v rybnících v podmínkách klimatických změn. Výsledky by nebylo možné dosáhnout bez výzkumného programu SustES - Adaptační strategie pro udržitelnost ekosystémových služeb a potravinové bezpečnosti v nepříznivých přírodních podmínkách (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000797).