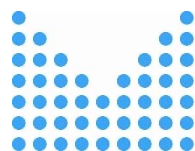




Příjemci podpory:

Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.,
IFER – Ústav pro výzkum lesních ekosystémů, s.r.o.,
Český hydrometeorologický ústav



MINISTERSTVO VNITRA
ČESKÉ REPUBLIKY

Poskytovatel: Ministerstvo vnitra ČR

Název projektu ze Smlouvy či Rozhodnutí + identifikační kód:

Prognóza, indikace rizika a prevence vzniku přírodních požárů v kontextu aktuálního stavu poznání a podmínek změny klimatu (VH20172020025)

Název předkládaného výsledku:

Systém indikátorů rizik přírodních požárů (ověření různých postupů stanovení rizika vzniku přírodních požárů) včetně návodu na použití integrovaného předpovědního systému

Typ výsledku dle UV č. 837/2017	Evidenční číslo (příjemce)	Rok vzniku
N_{met}S1	MZP/2020/020/326	2020
ISBN-ISSN	Webový odkaz na výsledek	Kde a kdy publikováno
	www.firerisk.cz	Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.

Anotace k výsledku:

Předkládaná metodika představuje vylepšení doposud používaného systému sledování a předpovědi rizika meteorologických podmínek vhodných pro vznik přírodních požárů. Na základě obšírného testování definuje dva indexy požárního počasí, jejichž kombinací lze dospět k robustním odhadům požárního rizika. Oba indexy byly použity pro generování předpovědi požárního počasí, ale také ke kvantifikaci vztahu mezi četností příznivých podmínek pro vznik přírodních požárů a jejich reálného počtu, a to v několika časových krocích (od 1 dne po sezónu). Metodika je nyní rutinně implementována v rámci portálu www.firerisk.cz, kde slouží jako nástroj operativní předpovědi požárního rizika. Text metodiky tak zároveň obsahuje i návod na použití portálu firerisk.cz.

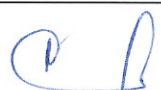


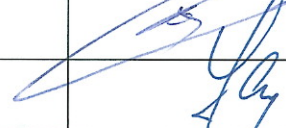
Řešitelský tým:

Glocová P., Trnka M., Čermák P., Kudláčková L., Balek J., Semerádová D., Brovkina O., Zemek F., Štěpánek P., Zahradníček P., Skalák P., Bláhová M., Jurečka F., Janouš D., Žalud Z., Marek M.V., Cienciala E., Beranová J., Zatloukal V., Albert J., Tumajer J., Možný M., Hájková L., Chuchma F.

**Osvědčení / Protokol o schválení (certifikaci) metodiky
na Ministerstvu životního prostředí**

Číslo jednací	MZP/2020/020/326
Identifikace výzkumné aktivity (projekt, výzkumný záměr apod.), poskytovatel dotace	Ministerstvo vnitra, projekt č. VH20172020025 Program Bezpečnostního výzkumu pro potřeby státu
Číslo nebo jiné označení udělené certifikace přidělené vnějším certifikačním / akreditačním orgánem (maximální délka 254 znaků) Nevyplňovat u metodik, které schválila sekce MŽP	
Název metodiky (maximální délka 254 znaků)	Systém indikátorů rizik přírodních požárů (ověření různých postupů stanovení rizika vzniku přírodních požárů) včetně návodu na použití integrovaného předpovědního systému
Interní identifikační označení metodiky (maximální délka 32 znaků)	Požáry I.
Místo uložení metodiky (maximální délka 254 znaků)	Ministerstvo vnitra, Ministerstvo životního prostředí
Ekonomické parametry	Metodika nemá povahu přímého generování tržeb nebo zisku a uživatelům bude poskytována bezplatně a formou zveřejnění.
Sekce MŽP, která metodiku schválila a doporučila pro využití v praxi	odbor bezpečnosti a krizového řízení – 020
Certifikační / akreditační orgán, který metodiku schválil a doporučil pro využití v praxi Nevyplňovat u metodik, které schválila sekce MŽP	
Datum schválení (certifikace) metodiky (datum, kdy bylo příslušnou sekcí MŽP, resp. vnějším certifikačním orgánem vydáno osvědčení o schválení metodiky, resp. rozhodnutí o certifikaci)	<i>19.5. 2020</i>
Identifikace tří nezávislých oponentních posudků (jméno, datum zpracování, zpracovatel)	prof. RNDr. Bernard Šiška, Ph.D. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 16.4.2020 RNDr. Pavol Nejedlík, CSc., Ústav vied o Zemi Slovenské akademie vied, 3.4.2020 Mgr. Livia Labudova, Ph.D., Slovenský hydrometeorologický ústav, 6.4. 2020

<p>Popis metodiky v českém jazyce včetně popisu novosti postupů (minimální délka 64 znaků, maximální délka 1016 znaků)</p>	<p>Předkládaná metodika představuje vylepšení doposud používaného systému sledování a předpovědi rizika meteorologických podmínek vhodných pro vznik přírodních požárů. Na základě obšírného testování definuje dva indexy požárního počasí, jejichž kombinací lze dospět k robustním odhadům požárního rizika. Oba indexy byly použity pro generování předpovědi požárního počasí, ale také ke kvantifikaci vztahu mezi četností příznivých podmínek pro vznik přírodních požárů a jejich reálného počtu, a to v několika časových krocích (od 1 dne po sezónu). Metodika je nyní rutinně implementována v rámci portálu www.firerisk.cz, kde slouží jako nástroj operativní předpovědi požárního rizika. Text metodiky tak zároveň obsahuje i návod na použití portálu firerisk.cz. Velká pozornost je v metodice věnována měnícím se klimatickým podmínkám a odhadu dopadu tohoto jevu na frekvenci přírodních požárů v ČR.</p>
<p>Popis metodiky v anglickém jazyce včetně popisu novosti postupů (minimální délka 64 znaků, maximální délka 1016 znaků)</p>	<p>The presented methodology represents an improvement of the currently used system of wildfire monitoring and forecast. Based on extensive testing, it defines two fire weather indices. The method shows how the combination of both indices can lead to robust fire risk estimates. Both indices were used to generate a forecast of fire weather, but also to quantify the relationship between the frequency of favorable conditions for the occurrence of natural fires and their observed numbers, in several time steps (from 1 day to the entire season). The methodology has been implemented within the www.firerisk.cz portal, where it serves as a tool for operational fire risk forecasting. The text of the methodology therefore contains instructions for using the firerisk.cz portal. Great attention is paid in the methodology to the aspect of climate change and estimating the impact of this phenomenon on the frequency of wildfires in the Czech Republic.</p>
<p>Uživatel metodiky (název, adresa, jméno pracovníka, e-mail, telefon)</p>	<p>Ministerstvo životního prostředí</p>
<p>Datum uzavření smlouvy/potvrzení o využití výsledku s uživatelem metodiky</p>	

<p>odborný garant – podpis/datum MUDr. Marie Adámková, CSc. odbor bezpečnosti a krizového řízení</p>		<p>18.5.2020</p>
<p>vedoucí oddělení – podpis / datum Mgr. Marie Bajerová zástupce ředitele a vedoucí oddělení krizového řízení</p>		<p>18.5.2020</p>
<p>ředitel odboru – podpis / datum Ing. Jiří Bednář ředitel odboru bezpečnosti a krizového řízení</p>		<p>18.5.2020</p>
<p>státní tajemník – podpis / datum Ing. Jan Landa</p>		<p>19.5.2020</p>

Přílohy: Metodika, oponentní posudky 3 x

System indikátorů rizik přírodních požárů (ověření různých postupů stanovení rizika vzniku přírodních požárů) včetně návodu na použití integrovaného předpovědního systému

Certifikovaná metodika

Projekt:

Prognóza, indikace rizika a prevence vzniku přírodních požárů v kontextu aktuálního stavu poznání a podmínek změny klimatu

Číslo projektu: VH20172020025

Poskytovatel: Ministerstvo vnitra ČR



MINISTERSTVO VNITRA
ČESKÉ REPUBLIKY

Zpracovali:

Koordinátor projektu: Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.

prof. Ing. Mgr. Miroslav Trnka, Ph.D. (*koordinující autor*)

Doc. Ing. Petr Čermák, Ph.D.

Mgr. Lucie Kudláčková

Bc. Jan Balek

Ing. Daniela Semerádová, Ph.D.

Ing. Olga Brovkina, CSc

Doc. Mgr. Ing. František Zemek, Ph.D.

Mgr. Petr Štěpánek, Ph.D.

Mgr. Pavel Zahradníček, Ph.D.

Mgr. Petr Skalák

Mgr. Monika Bláhová

Ing. František Jurečka

Doc. Ing. Dalibor Janouš, CSc.

prof. Ing. Zdeněk Žalud, Ph.D.

prof. RNDr. Ing. Michal V. Marek, Dr.Sc., dr. h.c.



Řešitel projektu: Český hydrometeorologický ústav

Dr. Ing. Martin Možný (*koordinující autor*)

Ing. Lenka Hájková, Ph.D.

RNDr. Filip Chuchma, Ph.D.



Řešitel projektu: IFER – Ústav pro výzkum lesních ekosystémů, s.r.o.

Doc. Ing. Emil Cenciala, Ph.D. (*koordinující autor*)

RNDr. Jana Beranová

Ing. Vladimír Zatloukal

Ing. et Ing. Jan Albert

Mgr. Jan Tumajer, Ph.D.



Prosinec 2019

Obsah

Certifikovaná metodika	1
Obsah.....	2
1. Úvod.....	4
1.1. Trendy požárního počasí	4
1.2. Faktory přispívající k šíření požárů.....	5
1.3. Trendy požárů – pozorované.....	5
1.4. Existující systémy	7
1.5. SIVS – Motivace zlepšení předpovědi požárního počasí.....	12
1.6. Motivace zlepšení předpovědi požárního počasí	15
2. Cíl metodiky.....	16
3. Popis metodiky.....	17
3.1. Posouzení rizika přírodních požárů na území ČR v období 1961–2015.....	17
3.1.1. Klimatické podmínky- trendy.....	17
3.1.2. Základní vláhová bilance.....	19
3.1.3. Stav vody v půdě charakterizovaný zásobou využitelné vody v půdě	24
3.1.4. Změna základních parametrů „požárního počasí“	28
3.1.4.1. Teplota vzduchu.....	28
3.1.4.2. Srážky	30
3.1.4.3. Vlhkost vzduchu	32
3.1.4.4. Rychlost větru	33
3.1.4.5. Teplotní indexy zvyšující výrazně riziko přírodního požáru.....	35
3.1.5. Geomorfologické a porostní charakteristiky	38
3.1.5.1. Geomorfologie	38
3.1.5.2. Charakter stanoviště na bázi lesnické typologie	39
3.1.5.3. Charakter stanoviště na zemědělské půdě.....	40
3.1.5.4. Aktuální porostní charakteristiky.....	41
3.1.5.5. Prostorový kontext lesa s ostatními krajinnými prvky	41
3.1.5.6. Další rizikové faktory (osídlenost, komunikační a infrastrukturní trasy apod.)	42
3.2. Popis algoritmů pro monitoring, předpověď a odhad míry aktuálního rizika přírodních požárů ⁴²	
3.2.1. Fire weather index (FWI).....	43
3.2.2. Forest fire danger index (FFDI).....	43
3.2.3. Finnish forest fire index (FFI)	43
3.3. Výsledky indexů pro odhad požárního počasí – validace metod odhadu rizika výskytu přírodních požárů s daty reálného výskytu lesních požárů	44

4. Předvídání požárního rizika v podmínkách měnícího se klimatu a využití znalostí pro posouzení rizik	50
4.1.1. Trendy požárního počasí v období 1956–2018	50
4.1.2. Očekávaný vývoj požárního počasí v období 2021–2080	54
5. Monitoring a předpověď rizika lesních požárů jako nástroj pro operativní redukci míry rizika.....	59
5.1. Krátkodobé a střednědobé numerické předpovědi počasí pro vyhodnocení vlivu meteorologických podmínek na vznik přírodních požárů.....	59
5.2. Spolehlivost operativní předpovědi rizika přírodních požárů ansámblem numerických předpovědních modelů	66
5.3. Reálný příklad: předpověď požárního rizika na 23. dubna 2019	67
5.4. Silné a slabé stránky předpovědi požárního rizika a jednotlivých meteorologických prvků	72
6. Návod krok za krokem k použití portálu FireRisk.cz	73
6.1. Popis + ovládání aplikace Firerisk	73
7. Srovnání a zdůvodnění novosti postupu metodiky	78
8. Uplatnění metodiky	79
9. Seznam použité literatury	80

1. Úvod

Přírodní požáry (v terminologii Hasičského záchranného sboru - HZS také požáry v přírodním prostředí) zahrnují primárně požáry lesních porostů, křovin a suché trávy. Tento termín v zásadě odpovídá termínu *wildfires/bushfires* a jde o termín, který zahrnuje všechny nekontrolované, volně se šířící požáry ve výše popsaném prostředí. Pro účely této metodiky budeme tímto termínem rozumět nejen požáry, které vzplály volně v přírodě (např. účinky blesků), ale také požáry, které byly založeny člověkem, ať již úmyslně nebo v důsledku nezodpovědného jednání.

Je zřejmé, že probíhající změny klimatu zvyšují riziko vzniku přírodních požárů ve středoevropském prostoru (např. Jurečka et al., 2019; Možný et al., 2019) a některé regiony na našem území navíc mají díky svým přírodním předpokladům vyšší riziko vzniku požárů (např. Adámek et al., 2015 a 2018). Především v posledních letech (a zvláště od roku 2015) zažívá česká krajina výrazný vláhový deficit, což negativně postihuje zemědělskou půdu a lesní porosty (např. Zahradníček et al., 2015; Trnka et al., 2020a). Půda je navíc historicky negativně ovlivněna hospodářskou činností člověka, která byla zaměřena na odvodnění krajiny jako nástroj zvýšení její produktivity. Výsledkem je ohrožení zemědělské produkce, zhoršování stavu půd (eroze, degradace), chřadnutí lesních porostů (zejména smrku a borovice). To vede až k jejich plošnému rozpadu s prudkým nárůstem počtu suchých stromů v lesích, ale také ke snížení dostupnosti vody pro obyvatele ve venkovské zástavbě. Ačkoliv vlastní příčinou požáru je především nedbalost člověka (Jankovská 2006, Holuša et al. 2018), riziko požáru vegetace se v podmínkách vláhového deficitu výrazně zvyšuje. Nejpodrobnějším zdrojem informací o požárech vegetace v České republice jsou záznamy Hasičského záchranného sboru ČR (HZS ČR) z nichž lze vybrat zásahy proti přírodním požárům vegetace. Velmi silný trend růstu požárů vegetace byl zaznamenán ve všech krajích s výjimkou Moravskoslezského kraje, který byl ovlivněn strukturálními změnami v průmyslu a útlumem těžby uhlí.

V České republice jsou přírodními požáry ohroženy jak lesní společenstva, tak i travní porosty na zemědělské půdě. Vzhledem k charakteru krajiny a hustotě osídlení nedosahují lesní požáry katastrofických rozměrů a následků ve srovnání se suššími (jižní Evropa) nebo lesnatějšími oblastmi (Švédsko) Evropy. Zvyšující se prevence a kvalita technické základny stabilizovala rozlohu požárů, ale jejich počet v České republice se v posledních deseti letech (2009–2018) zvyšuje.

1.1. Trendy požárního počasí

Trendy požárního počasí jsou mimo jiné ovlivňovány i probíhající změnou klimatu. Mezi nejdůležitější projevy počasí, které rozhodují o požárním riziku, jsou určitě srážky, vítr a teplota vzduchu. Nejviditelnější změna je u teploty vzduchu, kdy od 60. let 20. století je pozorován postupný růst teplot vzduchu, který se zintenzivnil především od 80. let 20. století. Poslední teplotně podprůměrný rok byl 1996 a od té doby se nám střídají pouze průměrné nebo teplotně nadprůměrné roky. Nejteplejší roky za dobu měření jsme zaznamenali v posledních pěti letech a jsou to 2018, 2015 a 2014. Nárůst teploty má pak neblahé následky například ve výraznějším nárůstu tropických dnů a nebo horkých vln během kterých riziko vzniku přírodních požárů výrazně stoupá.

Srážky v České republice jsou velmi variabilní. Suché a vlhké roky/periody/měsíce se významně střídají. To je důvod, proč u srážek není vykazován statisticky významný trend. Dochází ale ke změně charakteru srážek. Statisticky významně nám roste počet dní s vyššími úhrny srážek, které jsou způsobeny většinou bouřkovou činností v letních měsících. Oproti tomu roste počet a délka epizod, kdy prší jen velmi málo či vůbec. Díky kombinaci toho, že se srážky na území republiky prakticky nemění a zároveň roste teplota

vzduchu, tak dochází k nárůstu výparu, který způsobuje vysušování půdy či porostu. To se pak stává jednodušším palivem při vzniku požáru.

Vítr, který výrazně napomáhá šíření požárů za posledních 50 let, pomalu klesá. Jednou z příčin této změny je i narůstání drsnosti terénu a to jak antropogenními stavbami, tak například zalesňováním. Ve volné krajině bude tento trend poklesu rychlosti větru menší. Pozitivním faktorem je, že v letních měsících bývají rychlosti větru slabší. To například v létě 2018, kdy sucho vrcholilo, zabránilo ještě většímu množství lesních požárů, než který byl nakonec pozorován.

1.2. Faktory přispívající k šíření požárů

Mezi nejvýznamnější faktory, které ovlivňují šíření požárů, patří počasí, druh a stav vegetace a charakteristika terénu (topografie). Nejpříznivější podmínky pro šíření požárů jsou v obdobích sucha při vysokých teplotách, nízké vlhkosti vzduchu a větrném počasí.

Kromě meteorologických podmínek hraje důležitou roli i druh a stav vegetace představující množství hořlavého materiálu. K rychlému šíření požárů významně přispívá suchá travní či bylinná vegetace. Velmi dobře hoří i suché kletí, vyschlé borové jehličí a obecně suchá dřevní hmota, která se v lesním porostu nachází, ať už se jedná o odumřelé stromy, těžební zbytky, pařezy nebo kořeny. Pomocí kořenů se navíc oheň může šířit mezi stromy. Dobře hoří i vyschlé dubové a bukové listí, zatímco listí některých jiných listnáčů (např. osiky) odolává vznícení poměrně dobře.

V lesním prostředí patří mezi nejohroženější lokality vřesoviště, jehličnaté porosty s trávou či vřesem a borové porosty na suchých stanovištích. Důležitým faktorem je i expozice, protože slunné svahy lépe vysychají, a tedy i lépe hoří. Na slunných svazích je často nižší zastoupení stromů a vyšší pokryvnost travního či bylinného dorostu, který snadněji a dříve zasychá. Zároveň svažité nebo terén komplikuje následné hašení požáru.

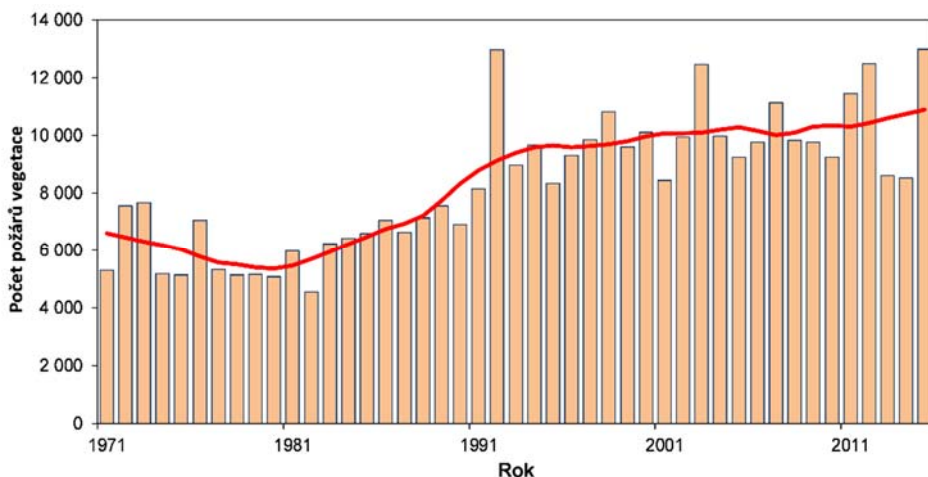
Negativní vliv na šíření požárů má i bohatá prostorová struktura lesních porostů, kdy se pozemní požár z nízkých mladých porostů a podrostu rozšiřuje v korunový požár zasahující vyšší patro porostu. Důležitou roli hraje i blízkost vodních zdrojů a dostupnost dané lokality (např. pomocí lesních cest).

1.3. Trendy požárů – pozorované

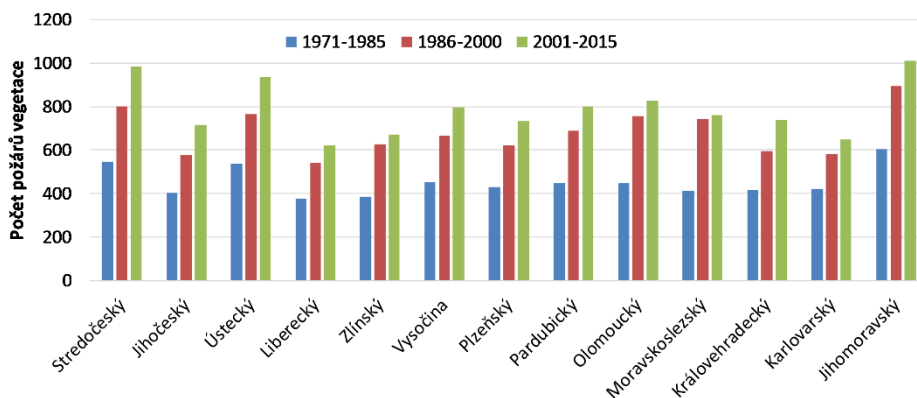
Nejpodrobnějším zdrojem informací o požárech vegetace v České republice jsou záznamy Hasičského záchranného sboru ČR (HZS ČR). Databáze obsahuje všechny výjezdy HZS ČR k požárům, z nich byly vybrány všechny zásahy proti přírodním požárům vegetace ve všech krajích s výjimkou Prahy. Celkem bylo v letech 1971–2015 zaznamenáno 375 044 výjezdů. Největší počet požárů byl zaznamenán v roce 2015 (12 986), 1992 (12 968), 2012 (12 488) a 2003 (12 455), naopak nejméně v roce 1982 (4 551). V období 1971–2015 byl zaznamenán statisticky významný rostoucí trend požárů vegetace v České republice (nárůst 1 400 požárů za 10 let, Obr. 1). Velmi silný trend růstu požárů vegetace byl zaznamenán ve všech krajích s výjimkou Moravskoslezského kraje, který byl ovlivněn strukturálními změnami v průmyslu a útlumem těžby uhlí.

Ve srovnání s obdobím 1971–1990 došlo k největšímu nárůstu počtu požárů v Jihomoravském, Středočeském, Ústeckém a Pardubickém kraji (nárůst o 68 až 72 %). Nejvíce požárů vegetace bylo zaznamenáno v letech 1971–2015 v Jihomoravském, Středočeském a Ústeckém kraji. Největší počet požárů na 1000 km² byl pozorován v Libereckém kraji (166 požárů), naopak nejmenší v Jihočeském kraji (31 požárů). Pokud porovnáme období 1971–1985, 1986–2000 a 2001–2015, největší průměrný

počet požárů vegetace ve všech krajích byl zaznamenán v období 2001–2015, naopak nejmenší v období 1971–1985 (Obr. 1). Při detailnější analýze dat v okresech v období 1971–2015 je patrný růst počtu požárů vegetace v okolí větších měst oproti sousedním okresům vlivem suburbanizace. Největší zvýšení požárů vegetace bylo zaznamenáno v okolí Plzně, Praze a Ústí nad Labem (nárůst o 18 až 40 %, Možný et al., 2019).



Obr. 1. Počet požárů vegetace v České republice v období 1971–2015. Zdroj údajů Hasičský záchranný sbor ČR.



Obr. 2. Průměrný počet požárů vegetace v jednotlivých krajích České republiky v období 1971–1985, 1986–2000 a 2001–2015. Zdroj údajů Hasičský záchranný sbor ČR.

1.4. Existující systémy

Indikovat riziko nebezpečí požárů vegetace ve volné krajině lze pomocí speciálních předpovědních modelů a metod pro detekci požárů.

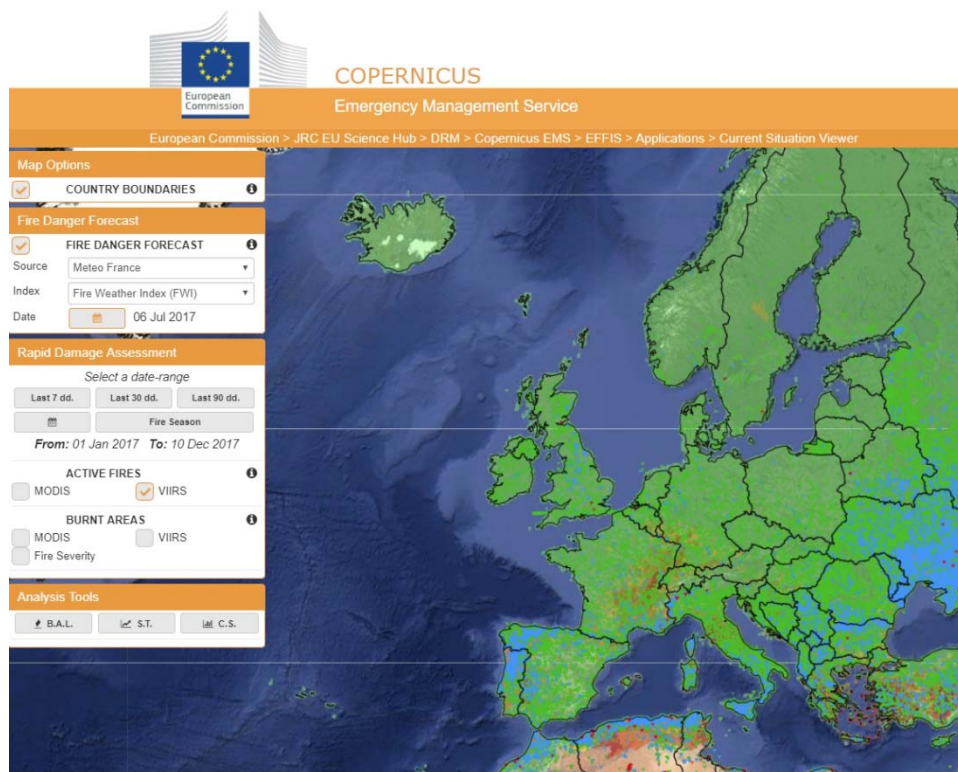
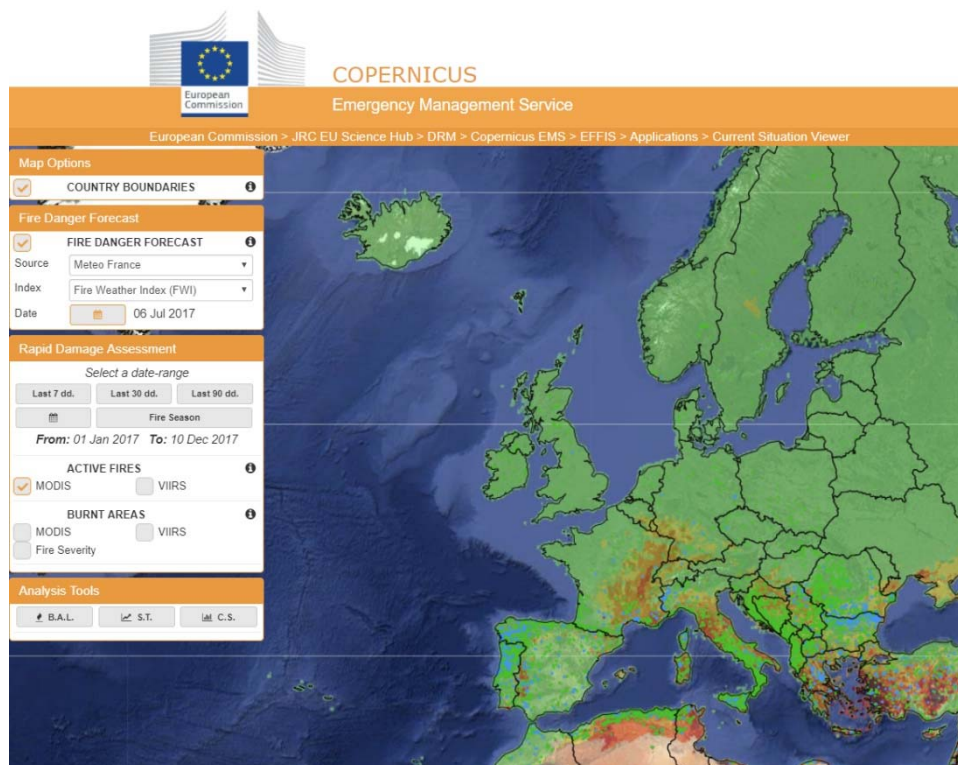
Předpovědi nebezpečí a detekce velkých lesních požárů

Evropská komise iniciovala vznik Evropského informačního systému o lesních požárech (EFFIS). Systém používá pro týdenní předpověď nástroj *Canadian Fire Weather Index* (FWI). Index FWI se skládá z pěti dílčích komponent, první tři komponenty (FFMC, DMC a DC) určují vlhkost hrabanky, případně rašeliny a jiného paliva. Další komponenty (ISI a BUI) určují chování ohně, reprezentují hlavně rychlost šíření ohně a předpovídají plošné rozšíření požáru. Z těchto komponent je počítána číselná hodnota relativního potencionálního rizika ničivých požárů – *Fire weather index* (FWI). Výpočty jednotlivých komponent jsou závislé na denních předpovědaných datech o teplotě, relativní vlhkosti, rychlosti větru a čtyřadvacetihodinovém úhrnu srážek. Systém využívá vstupy z předpovědních modelů počasí (Météo-France, ECMWF a DWD) a přihlíží k údajům o nadmořské výšce.



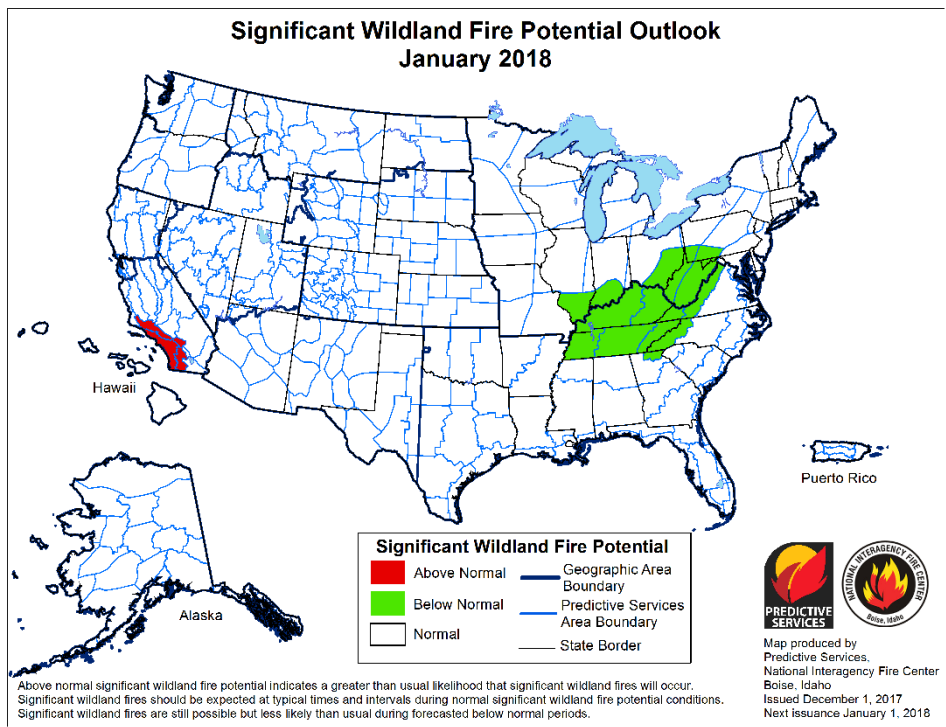
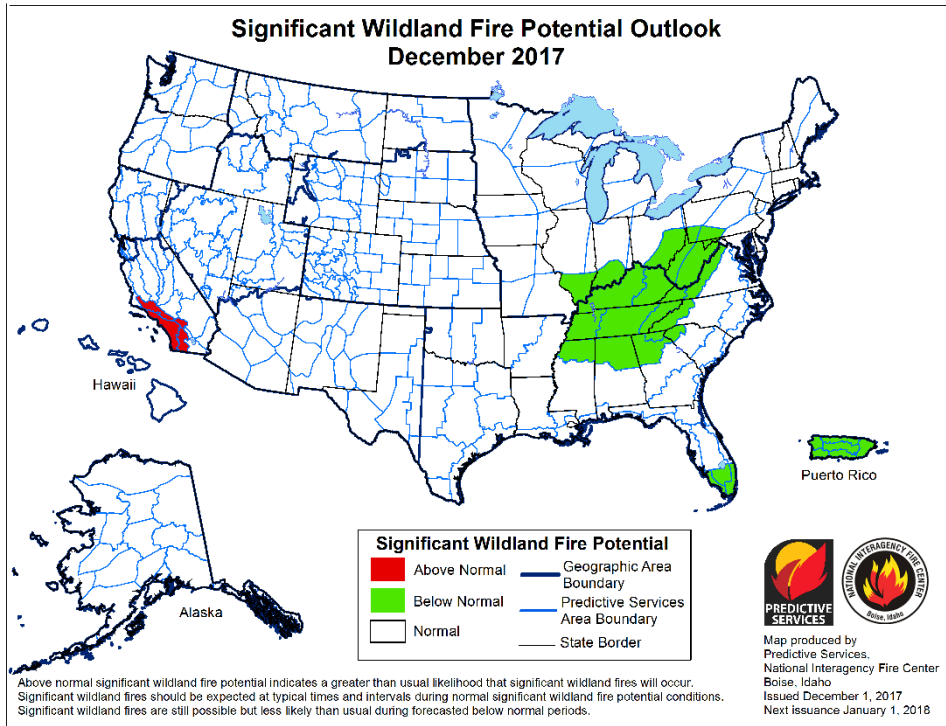
Obr. 3. Ukázka předpovědi Fire weather indexu (FWI) z evropského centra EFFIS

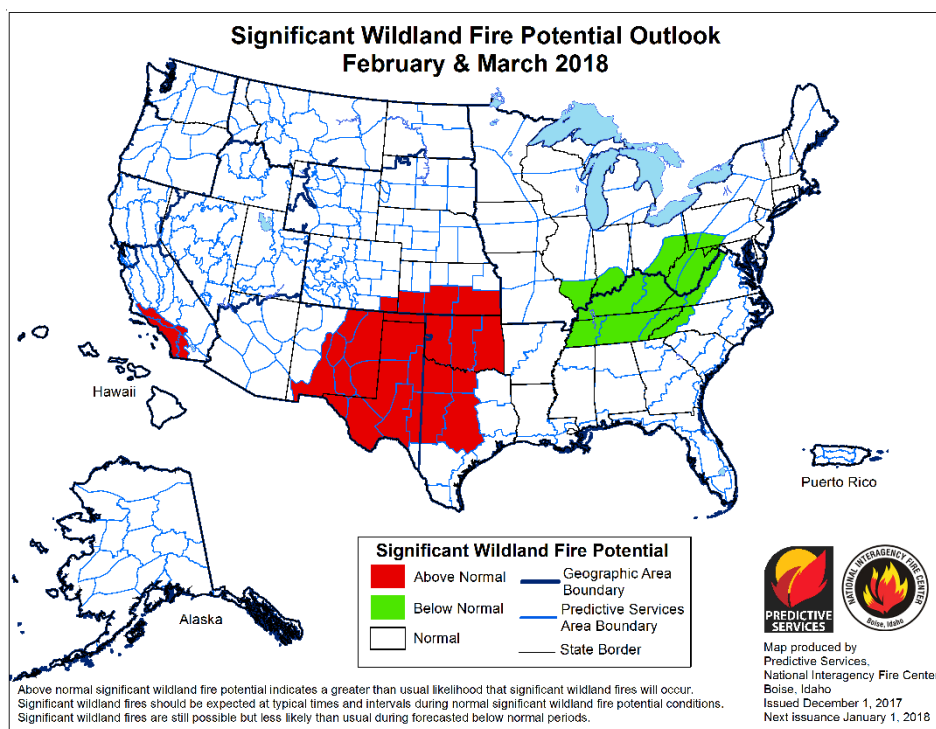
Systém EFFIS je doplněn o detekci již vzniklých požárů s využitím satelitních dat. Snímač MODIS na palubě satelitů TERRA a ACQUA identifikuje oblasti na zemi, které jsou zřetelně horké oproti jejich okolí a označuje je jako aktivní požár. Prostorové rozlišení aktivního pixelu pro detekci požáru z modelu MODIS je 1 km. Prostorové rozlišení aktivního pixelu pro detekci požáru pro VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) umístěného na satelitu NOAA/NASA Suomi NPP (*National Polar-orbiting Partnership*) je 375 m.



Obr. 4. Ukázka detekce aktivních požárů MODIS a VIIRS ze satelitů z evropského centra EFFIS

Index FWI se kromě Evropy používá i na severoamerickém kontinentu (Kanada a USA). Mapové výstupy indexu FWI jsou v USA v různém prostorovém a časovém rozlišení (od denního po měsíční či sezónní).



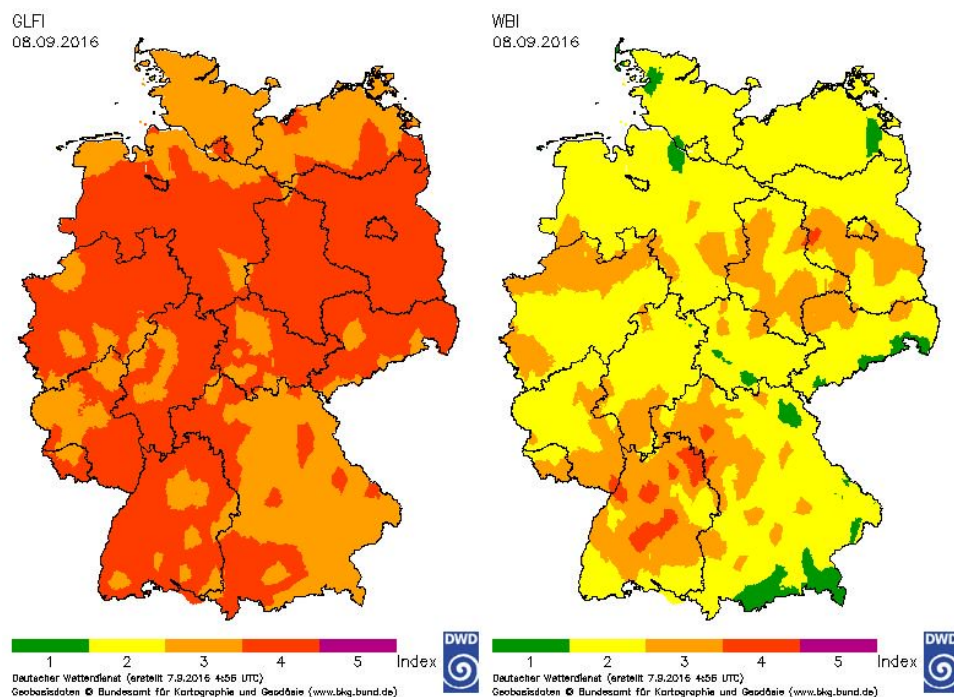


Obr. 5. Ukázka sezónní předpovědi FWI z USDA Forest service

Výhodou systému EFFIS je jednotné posuzování požárního nebezpečí pro celou Evropu, ale v některých oblastech a za určitého typu počasí může dávat horší výsledky. Index dává velmi dobré výsledky především pro velké lesní plochy a je vhodný zejména pro předpovědi požárů velkého měřítka s rozlohou nad stovky hektarů.

Předpovědi nebezpečí lokálních lesních požárů

Vzhledem k podobným fyzicko-geografickým podmínkám je pro nás zajímavý předpovědní model využívaný v Německu. Německo má zázemí v podobě Institutu Maxe Plancka pod Freiburgskou univerzitou, kde probíhá výzkum přírodních požárů. Ve spolupráci s Německou povětrnostní službou jsou provozovány dva předpovědní modely nebezpečí požárů. Předpověď je vydávána pro lesní a travní porosty. Pro předpověď lesních požárů se používá starší model M-68. Index má pět stupňů intenzity nebezpečí požáru (velmi nízké, nízké, mírné, vysoké a velmi vysoké nebezpečí). Vstupními daty do modelu jsou meteorologické prvky: teplota vzduchu, relativní vlhkost, rychlost větru a srážky. Model přihlíží k aktuálnímu fenologickému vývoji. Model je počítán i pro travní porost, který simuluje požáry vegetace v otevřené krajině mimo lesní porosty.



Obr. 6. Ukázka předpovědi nebezpečí požárů pro travní porost (index GLFI, vlevo) a lesní porost (index WBI, vpravo) pro Německo

Výhodou německého systému je, že využívá datovou a předpovědní základnu DWD. Předpovědi jsou pro dané území přesnější a ve vyšším rozlišení než u systému EFFIS. Navíc přihlíží k tomu, že nejvíce požárů vegetace ve volné krajině vzniká lidskou činností mimo lesní porosty.

Zajímavý přístup má italský model *Final Fire Hazard Index* (FHI). Tento model je dobře použitelný pro předpovídání požárů malého měřítka. Vstupními parametry modelu jsou digitální model terénu (nadmořská výška, sklon a orientace svahů), regionální seznam lesů (klasifikace podle tříd krajinného pokryvu), infrastruktura a meteorologické parametry vycházející ze sítě regionálních meteorologických stanic. Vyhodnocení zranitelnosti daného území je klíčovým faktorem pro předcházení vzniku požárů a snížení dopadů požárů na vegetaci, nebo antropogenní objekty, jako jsou domy a infrastruktura. V některých zemích, které se každoročně potýkají s požáry vegetace (např. Francie), již vznikl systém, který řeší komplexně předpověď nebezpečí požárů na základě meteorologických údajů v kombinaci s modelováním zranitelnosti konkrétního území.

Od roku 2006 je pro posouzení nebezpečí požárů vegetace v otevřené venkovské krajině využíván v České republice index nebezpečí požárů (INP), který byl inspirován německým modelem GLFI. Index má také pět stupňů intenzity nebezpečí požáru (velmi nízké, nízké, mírné, vysoké a velmi vysoké nebezpečí). Vstupními daty do modelu jsou meteorologické prvky: maximální denní teplota vzduchu, minimální denní relativní vlhkost, maximální denní rychlost větru, měřená a modelovaná půdní vlhkost. Model je provozován v rámci Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Ve vegetačním období jsou denně publikovány předpovědi indexu na 3 dny, v kritických obdobích na 5 dnů. První tři dny jsou počítány z výstupů modelu Aladin, další dva dny z modelu ECMWF.

1.5.SIVS – Motivace zlepšení předpovědi požárního počasí

Systém integrované výstražné služby (SIVS) je společně poskytovaná výstražná služba Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) ve spolupráci s meteorologickou službou armády ČR v oblasti operativní meteorologie a hydrologie pro území ČR. Vydávání výstražných informací v rámci SIVS je zčásti naplněním Hlásné a předpovědní povodňové služby (HPPS), kterou ČHMÚ zabezpečuje podle §73 vodního zákona.

Výstrahy vydává ČHMÚ v souladu s doporučením Světové meteorologické organizace (www.wmo.int) a filozofií evropského výstražného systému Meteoalarm (www.meteoalarm.eu) poskytujícím nejdůležitější informace před následky nebezpečných projevů počasí očekávaných v rámci Evropy. Výstrahy jsou vydávány na nebezpečné meteorologické a hydrologické prvky a jevy (dále jen jevy) rozdělené do osmi skupin. Každý z jevů může mít rozdílnou úroveň nebezpečí. Ta se přiřazuje na základě vyhodnocení kombinace očekávané intenzity nebezpečného jevu a pravděpodobnosti jeho výskytu.

Intenzita nebezpečného jevu je výstražné informací stanovena na základě kritérií pro vydávání výstražných informací. Tato kritéria byla určena na základě statistické četnosti výskytu jednotlivých jevů a obvyklých následků (způsobené škody na majetku a infrastrukturu, ohrožení zdraví a lidských životů), ke kterým tyto nebezpečné jevy zpravidla vedou. Pokud se předpokládá, že jev s určitou intenzitou s ohledem na konkrétní okolnosti (časný zimní jev na podzim, pozdní zimní jev na jaře, vliv dopravní špičky, stav vegetace apod.) povede k horším následkům, než je u takového jevu obvyklé, může být vydána výstraha i na jev, který nesplňuje kritéria SIVS nebo může být zvýšen stupeň intenzity jevu.

Pravděpodobnost výskytu nebezpečného jevu je vyjádřena třemi úrovněmi odrážejícími míru nejistoty předpovědi výskytu a konkrétní lokalizace jevu v okamžiku, kdy je předpovídán, resp. pozorován:

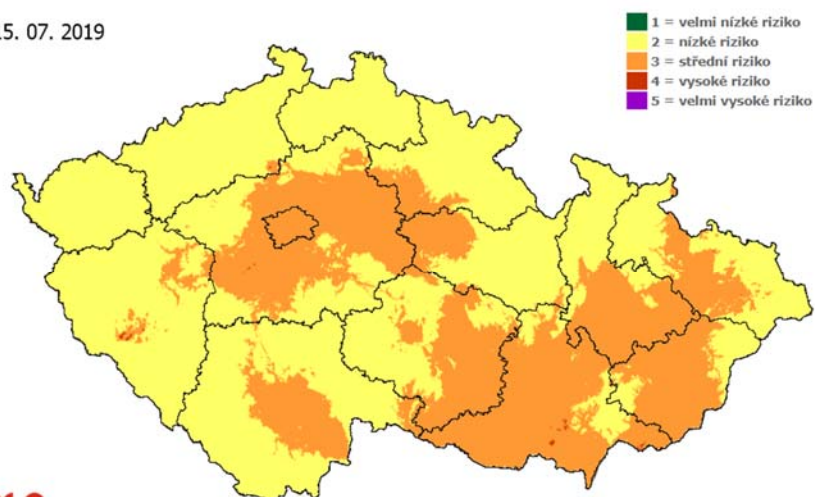
- Nízká pravděpodobnost ($P < 50 \%$)
- Vysoká pravděpodobnost ($P > 50 \%$)
- Pozorovaný jev ($P = 100 \%$)

V rámci SIVS se rozlišuje dle kombinace očekávané intenzity jevu a pravděpodobnosti jeho výskytu 3 úrovně nebezpečí rozlišené na výstražné mapě barevně:

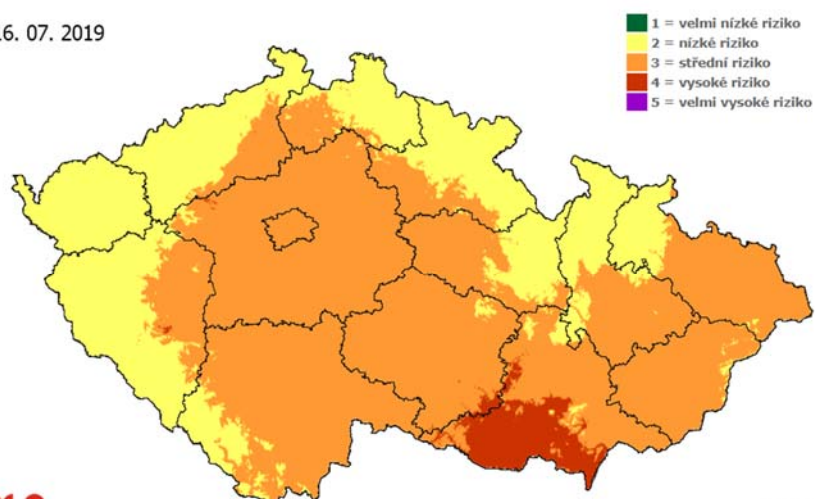
- NÍZKÝ STUPEŇ NEBEZPEČÍ (ŽLUTÁ)
- VYSOKÝ STUPEŇ NEBEZPEČÍ (ORANŽOVÁ)
- EXTRÉMNÍ STUPEŇ NEBEZPEČÍ (ČERVENÁ)

Výstražné informace SIVS jsou vydávány ve formě bulletinů ve formátu CAP (*Common Alerting Protocol* – všeobecný výstražný protokol) dle doporučení Světové meteorologické organizace. V protokolu CAP je pro každý nebezpečný jev, území a časový úsek, v nichž je tento nebezpečný jev popisován, vytvořen odpovídající element obsahující dále informaci o intenzitě a pravděpodobnosti jevu a textový popis jevu. Výhodou formátu CAP je možnost vytváření výstupů na míru jednotlivých uživatelů a následné technologické zpracování informací. Kromě informací ve tvaru CAP ČHMÚ vydává i textové výstražné informace zejména pro média, ale i pro další uživatele, a ve větší míře než dosud jsou zaměřeny na předpokládané následky nebezpečných jevů a na doporučení preventivních opatření k jejich eliminaci.

15. 07. 2019



16. 07. 2019



Obr. 8. Ukázka předpovědi indexu nebezpečí požárů v rámci SIVS.

Motivace pro zlepšení vydávání výstrah před nebezpečím požárů vegetace

Vzhledem ke klesající úspěšnosti předpovědi na 3. až 5. den by měla mít předpověď ansámblový charakter, ukazující na možné odlišné vývojové scénáře počasí. Tato možnost zatím stávajícím systému chybí. Chybí i delší dlouhodobý výhled nebezpečí požárů po vzoru USDA Forest service.

Stávající výstražný systém v České republice zatím důsledně nezohledňuje místní podmínky (sklon a orientaci svahů), klasifikaci lesů, infrastrukturu a hodnocení zranitelnosti daného území. Informace o těchto parametrech jsou v České republice dostupné a stačí je jen využít při tvorbě map a tím zpřesnit výsledky. Díky posilujícímu trendu suburbanizace dochází k vyšší zranitelnosti území v blízkosti příměstských sídel. Zkušenosti z Itálie a Francie přitom ukazují, že je nutné řešit komplexně předpověď nebezpečí požárů na základě meteorologických údajů v kombinaci s modelováním zranitelnosti konkrétního území. Stávající systém zatím nevyužívá výstupy ze satelitů pro detekci aktuálních požárů. V poměrech České republiky ale nejsou tak rozsáhlé plochy lesů a travních ploch, aby se oheň mohl nekontrolovatelně šířit a byl odhalen až za několik dnů, takže lze satelitní data využívat v omezenější míře

1.6. Motivace zlepšení předpovědi požárního počasí

Pro vyhodnocení, zda vyhlásit výstrahu před požáry v Systému výstražné signální služby (SIVS) chybí možnost předpovědi na další dny ansámblového charakteru (použití více předpovědních modelů), která umožní zohlednit odlišnosti výstupů jednotlivých předpovědních systémů. Je to zvláště důležité u předpovědi srážek, kde jsou rozdíly mezi předpovědními modely na 3. až 5. den značné. Stávající systém publikoval výstupy pouze z jednoho modelu a pro centrální předpovědní pracoviště bylo mnohdy obtížné rozhodnout např. o pokračování či přerušení výstrahy v důsledku změny počasí. Navíc HZSČR často potřebuje plánovat na několik dní dopředu pohotovost v případě hrozby nebezpečí požárů, proto bylo vydávání ansámblových předpovědí velmi potřebné.

Zatím chybí hodnocení stability zvrstvení atmosféry, které je důležité pro hodnocení rychlosti šíření požárů. Domníváme se, že nové pojetí rizika požárů v České republice je potřeba, i s ohledem na probíhající změnu klimatu, která zvyšuje nebezpečí požárů v České republice.

2. Cíl metodiky

Cílem metodiky je ucelený návod k:

- Posouzení míry rizika ohrožení zejména lesních a zemědělských porostů v krajině ČR v důsledku změn charakteristik požárního počasí;
- Identifikaci míry aktuální míry rizika vzniku přírodních požárů a jeho bezprostřední předpovědi;
- Poskytnout metodické vedení k použití portálu www.firerisk.cz.

Pro dosažení těchto cílů byly detailně analyzovány parametry požárního počasí na našem území a to jak klimatické prvky samotné tak zejména ty, které jsou již jako indikátory požárního počasí používány v jiných oblastech světa. Tyto indikátory požárního počasí byly přímo konfrontovány s počty požárů vegetace mimo intravilán získaných ze statistických údajů Hasičského záchranného sboru. Následně byly vyhodnoceny jak trendy v období 1961–2018 tak i pro budoucí klima až do druhé poloviny tohoto století.

Zevrubná analýza indexů požárního počasí umožnila výběr dvou indikátorů použitých pro většinu výše uvedených analýz a jejich adaptace pro předpovědi rizika pro požár příznivého počasí. Tato metodika nejen představuje konkrétní postup přípravy takové předpovědi, ale také vyhodnocení její úspěšnosti a konkrétní případy předpovědí v sezónách 2018 a 2019.

Všechny poznatky byly pak využity při přípravě portálu www.firerisk.cz, který je v poslední části metodiky představen a popsán.

3. Popis metodiky

3.1. Posouzení rizika přírodních požárů na území ČR v období 1961–2015

3.1.1. Klimatické podmínky- trendy

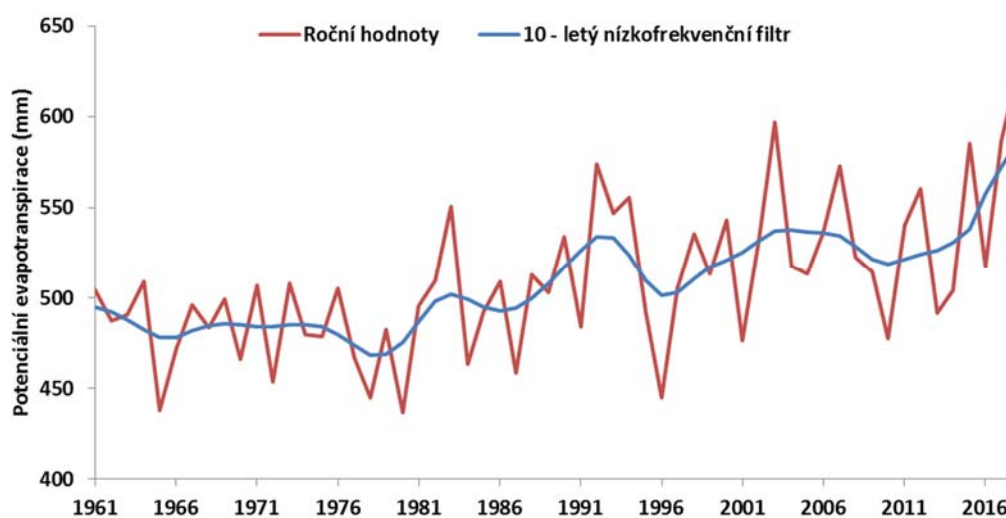
Dlouhodobý vývoj základních meteorologických prvků zákonitě ovlivňuje výsledné klima v dané oblasti. Z hlediska indikace území s možným rizikem vzniku a šíření přírodních požárů je nutné se zabývat i jejich vlivem na vláhové podmínky krajiny. Z tohoto důvodu je vhodné analyzovat vývoj a prostorové rozložení hodnot některých vlhkostních charakteristik v období 1961–2018 mimo jiné využívaných k monitorování vlivu meteorologických podmínek na stav a intenzitu sucha. Základními zkoumanými veličinami jsou potenciální výpar, základní (klimatická) vláhová bilance a jako charakteristika prezentující stav vody v půdě je zde využito analýz hodnot zásoby využitelné vody v půdě.

Pro výpočet výše zmíněných charakteristik byly jako vstupní data použity časové řady meteorologických prvků z uceleného souboru 268 stanic tzv. technických řad. Jedná se o datové řady kontinuálně vytvářené v ročním kroku na ČHMÚ Brno, kdy tyto časové řady procházejí kontrolou kvality dat, procesem homogenizace a interpolačními metodami jsou případně doplněny všechny chybějící údaje v denním kroku (Štěpánek a kol. 2011, 2013).

Potenciální evapotranspirace

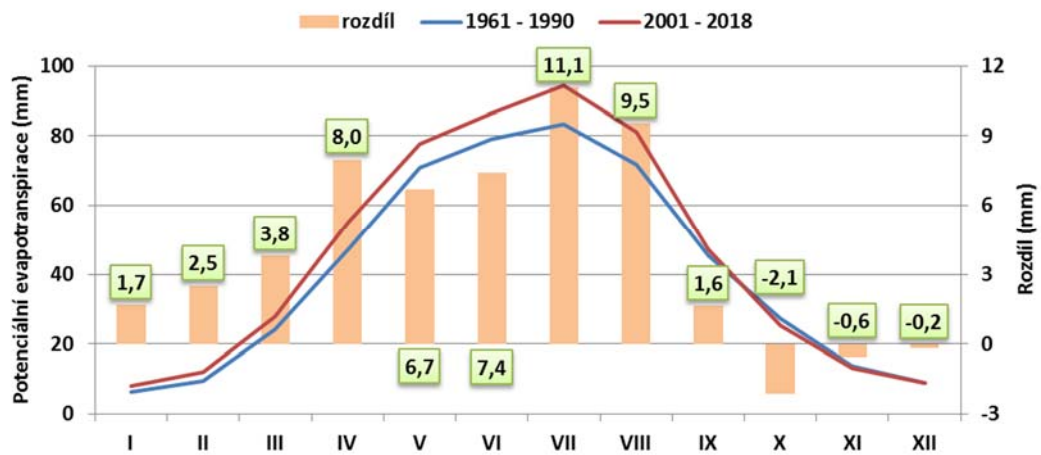
Potenciální evapotranspirace jako ztrátová složka bilance vody v krajině je ovlivňována mnoha faktory, z nichž jedním z nejvýznamnějších je teplota vzduchu. Evapotranspirace ve své potenciální podobě je prakticky shodná s maximálně možnými hodnotami výparu při optimálních vláhových podmínkách v půdě.

Jak je patrné z Obr. 9, dochází od 60. let minulého století k nárůstu hodnot výparu díky zvyšování teploty vzduch s tím, že nejvyšší průměrné roční úhrny jsou logicky dosaženy v posledním období 2001–2018, kdy se průměrná hodnota roční potenciální evapotranspirace zvýšila vůči období 1961–1990 o 10 % na hodnotu 537 mm. Z jednotlivých měsíců jsou pak nejvyšší úhrny výparu dlouhodobě v červenci. V letních měsících červenec a srpen také došlo v období 2001–2018 k nejvyššímu průměrnému nárůstu výparu vůči normálu 1961–1990 (Obr. 10).



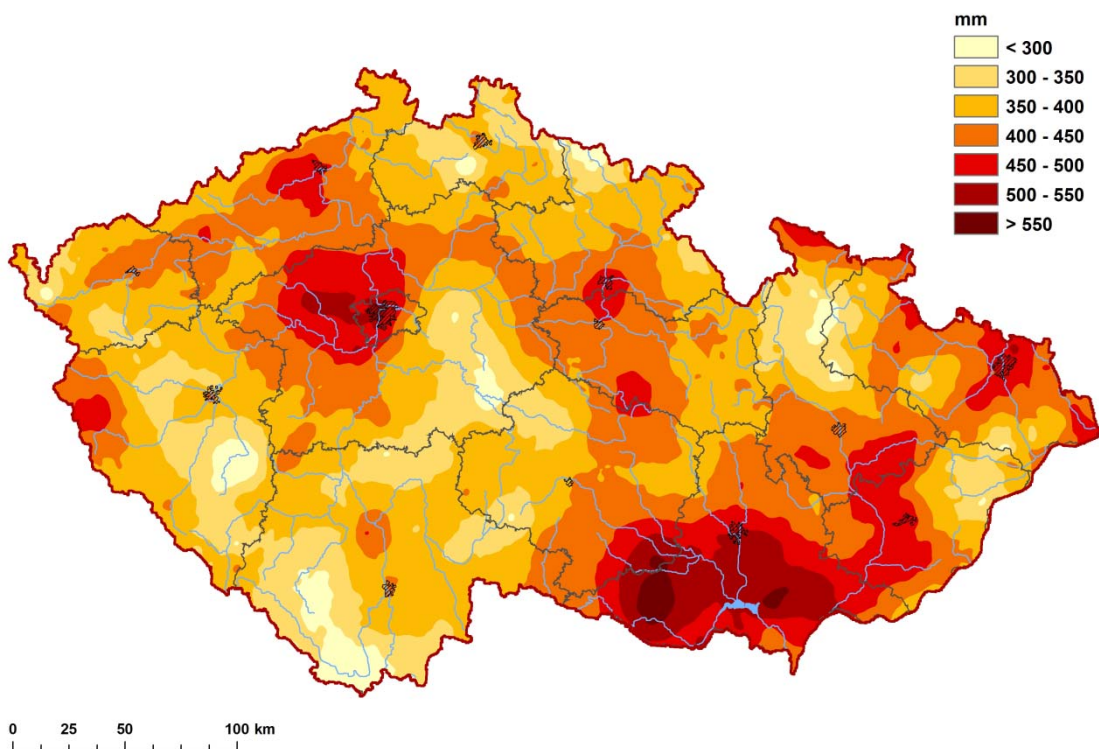
Obr. 9. Průběh ročních úhrnů potenciální evapotranspirace v období 1961–2018 v České Republice

Nejvhodnější klimatické podmínky pro vysoké hodnoty výparu a tím pádem i pro zvyšování deficitu vody panují během roku obecně v nejteplejších oblastech republiky (Obr. 11). Jmenovitě se jedná hlavně o jižní Moravu, Hanou, střeň Čechy, Podkrušnohoří a Ostravskou pánev.

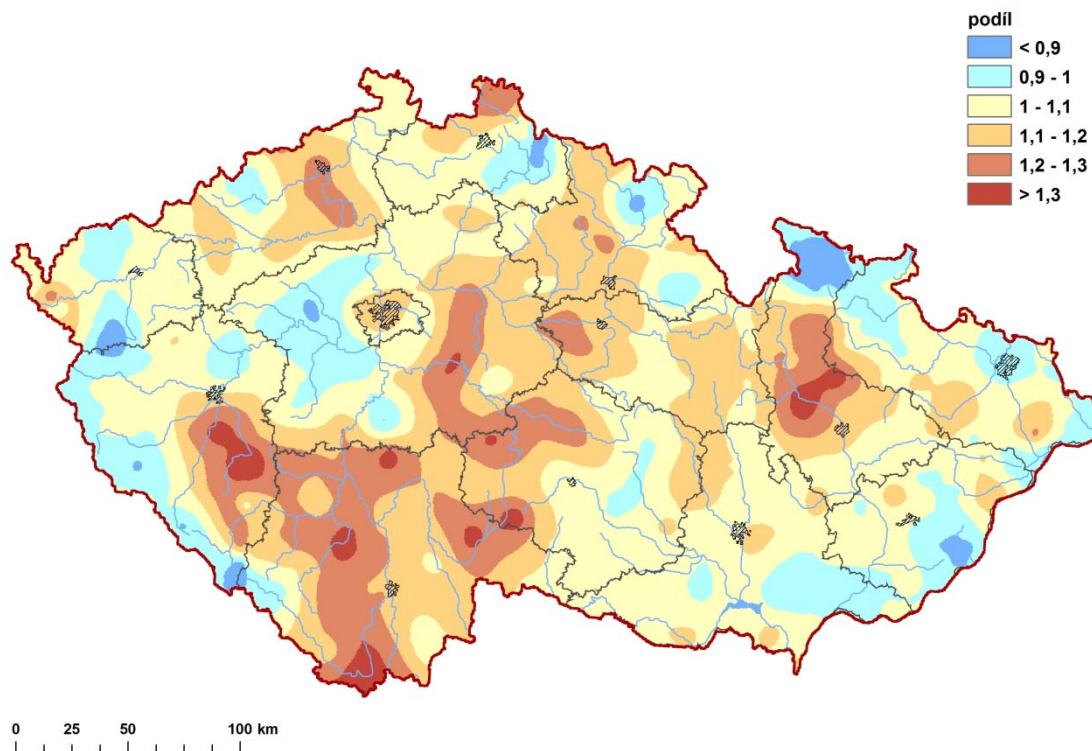


Obr. 10. Průměrný úhrn potenciální evapotranspirace v jednotlivých měsících v letech 1961–1990 a 2001–2018 a jejich rozdíl

Statisticky významný trend nárůstu hodnot výparu je zřejmý v období od ledna do května a pak také v měsících červenec a srpen kde dosahuje hodnoty 2,8 mm/10 let. V ročních hodnotách je pak statisticky významný nárůst o 13,7 mm / 10 let a trend růstu výparu je přítomný i v jarním a letním období (Tab. 1). K výraznému nárůstu hodnot výparu vzhledem k dlouhodobému průměru 1961–1990 (Obr. 12) dochází v posledních letech hlavně v oblasti jižních a jihozápadních Čech, ve Středočeském kraji a také na Olomoucku.



Obr. 11. Průměrný roční úhrn potenciální evapotranspirace v období 1961–2015



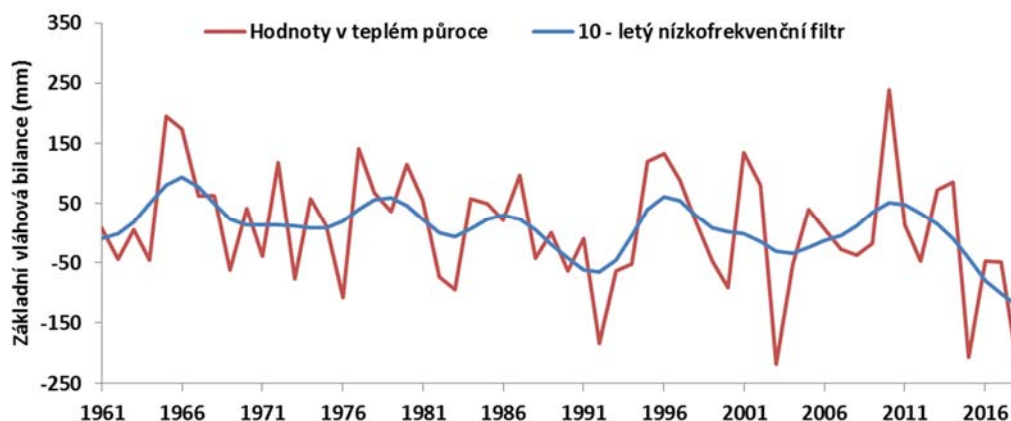
Obr. 12. Podíl průměrné sumy potenciální evapotranspirace v letech 2001–2015 vzhledem k normálu 1961–1990

3.1.2. Základní vláhová bilance

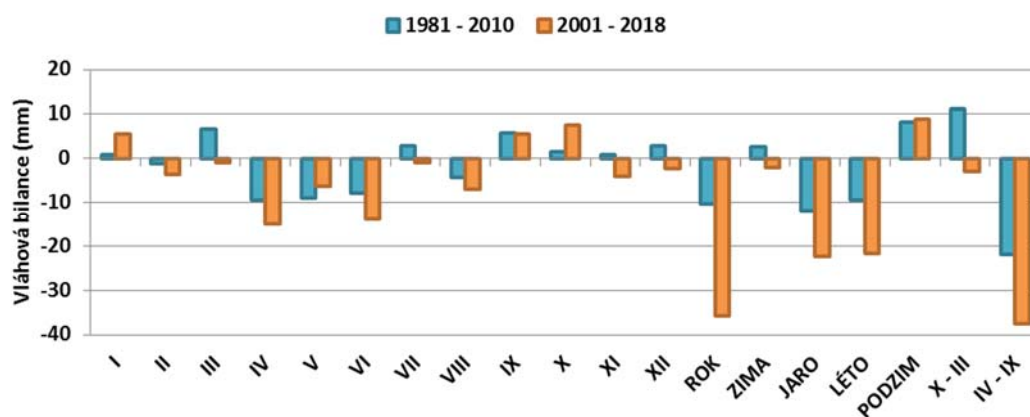
Charakteristika vláhové bilance je dána kombinací úhrnu srážek a potenciální evapotranspirace. Díky tomu se v jejích hodnotách z dlouhodobého pohledu aplikuje vliv vzrůstajících teplot a zároveň výrazná časová a prostorová proměnlivost srážek. U základní vláhové bilance se při výpočtu potenciální hodnoty evapotranspirace neberou v úvahu vlhkostní podmínky podloží, tvořené půdním horizontem. V podstatě vyjadřuje vliv klimatických podmínek na bilanci (a taktéž na výpar) při současném potlačení všech ostatních činitelů, které výpar ovlivňují (půdní vlhkost apod.). Lze tedy hovořit o tzv. klimatické či základní vláhové bilanci (VLBI). Toto je nutno mít na zřeteli při případném vzájemném porovnávání základní vláhové bilance jednotlivých míst či oblastí

Z grafu ročních hodnot je patrné (Obr. 13), že od roku 1961 dochází v průměru k mírnému snižování hodnot vláhové bilance na území ČR, nicméně je v hodnotách pozorovatelná velmi výrazná meziroční variabilita. Výrazný pokles ročních hodnot vláhové bilance je však markantní v posledních letech. V průměru je roční suma vláhové bilance v České republice v období 1961–2018 kladná s hodnotou okolo 181 mm, na druhou stranu je nutné zdůraznit, že na velké části území (Obr. 15) je roční suma vláhové bilance na koci roku záporná a to i velmi výrazně.

U průměrných dlouhodobých hodnot vláhové bilance nebyl až na jednu výjimku zaznamenán statisticky významný trend. Pouze v jarních měsících březen až květen je patrný pokles vláhové bilance o 8,5 mm / 10 let.



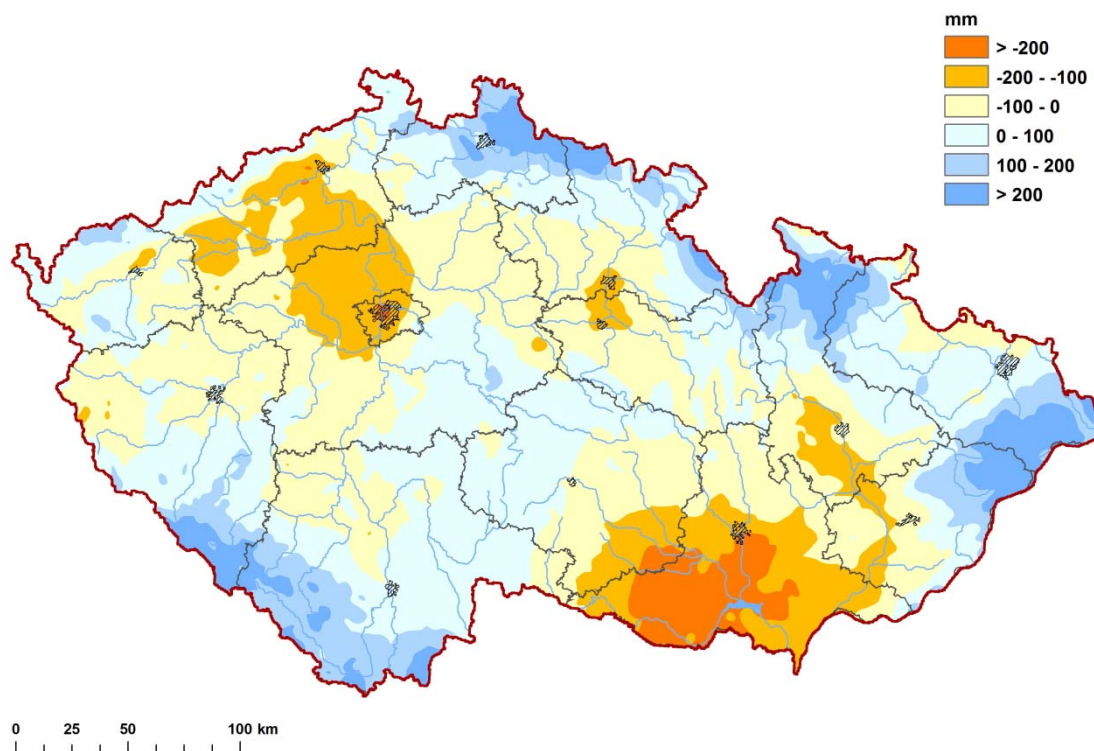
Obr. 13. Průběh úhrnů vláhové bilance za teplý půlrok (duben až září) v období 1961–2018 v České Republice



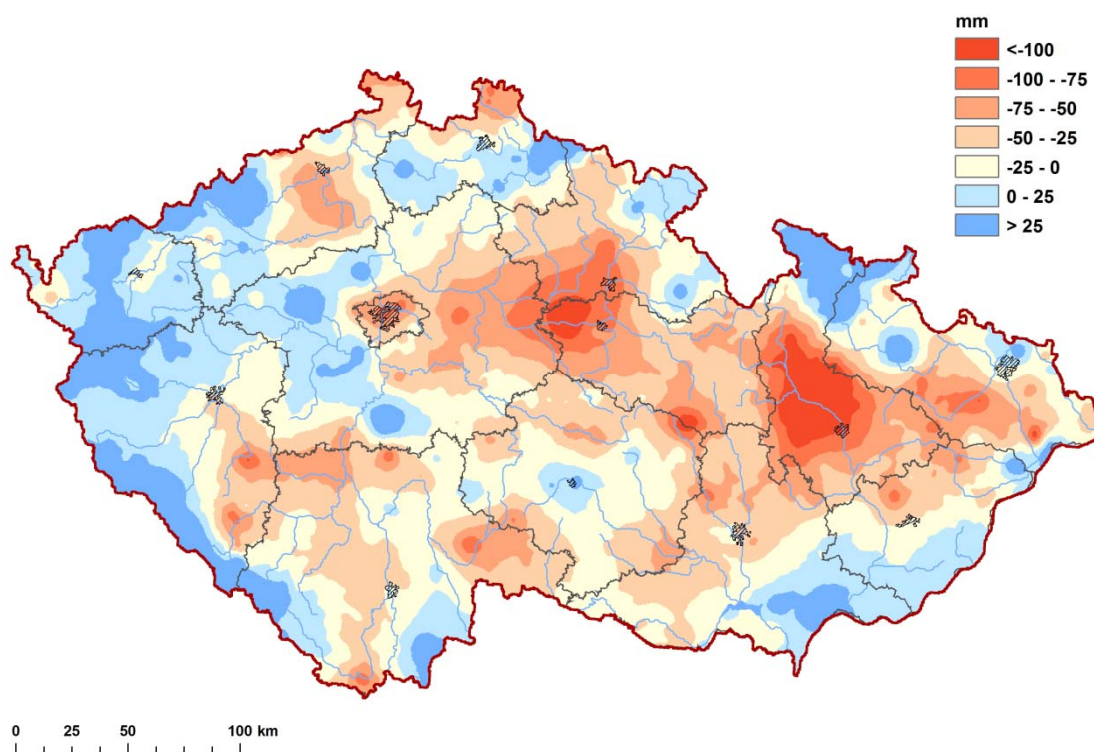
Obr. 14. Změna hodnoty vláhové bilance v České republice ve dvou obdobích 1981–2010 a 2001–2018 oproti dlouhodobému průměru 1961–1990

Nejvíce záporné hodnoty úhrnu vláhové bilance v teplém půlroce jsou patrné (Obr. 15) dlouhodobě na jižní Moravě a pak také v severozápadní části Čech. Ostatně negativní hodnoty vláhové bilance jsou za toto období zaznamenány zhruba na ½ území ČR. Pokud si srovnáme období 2001–2018 s dlouhodobým průměrem 1961–1990 (Obr. 14) tak k nejvyššímu poklesu stavu vláhové bilance dochází v teplém půlroce tedy na jaře a v létě hlavně na Olomoucku a v Polabí. K výraznému snížení hodnot pak dochází také na jižní a severní Moravě a v jižních Čechách (Obr. 16).

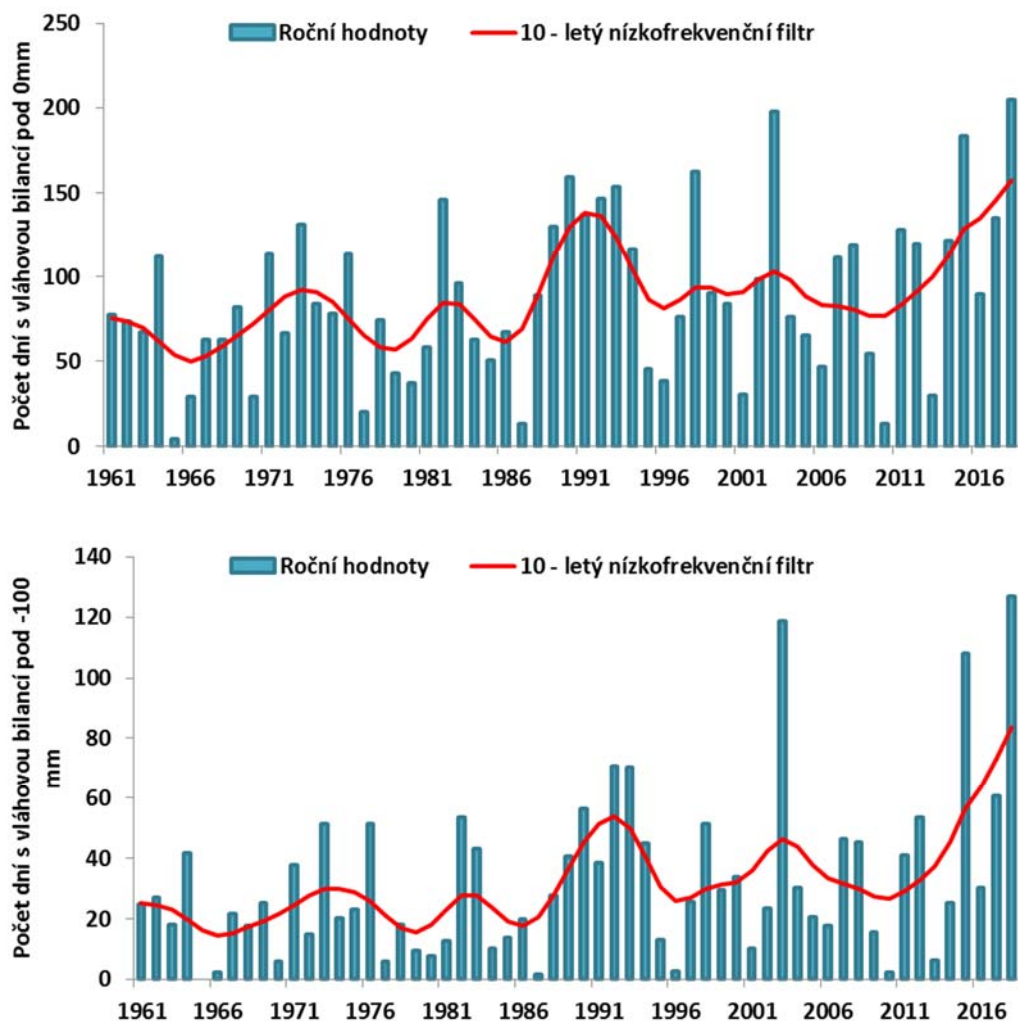
Sumy vláhové bilance za zkoumané období mohou být výrazně ovlivněny vysokými úhrny srážek ve dnech s bouřkami s vysokými srážkovými úhrny. Ty mohou v celkovém hodnocení nadlepnout vláhovou bilanci i v období s jinak převažujícím silně negativním stavem vláhové bilance a výrazným deficitem srážek. Analyzovány byly kumulativní hodnoty vláhové bilance od 1.1. do konce roku a byly zjištěny počty dnů, kdy se suma vláhové bilance od 1.1. během roku pohybovala pod 0 mm a jako výrazně negativní přetrvávající stav pak také pod -100 mm. Na Obr. 17 je patrný postupný nárůst počtu dnů s negativní kumulativní vláhovou bilancí pod 0 mm a stejný nárůst je patrný i u ročních počtů dnů s hodnotou vláhové bilance pod -100 mm. Na grafech jsou ostatně velmi dobře identifikovatelné velmi suché roky 2003, 2015 a 2018. Je vidět, že v suchých letech s vysokým výparem a deficitem srážek výrazně stoupá počet dní s negativní kumulativní hodnotou vláhové bilance.



Obr. 15. Suma vláhové bilance v období od dubna do září - průměrná hodnota v letech 1961–2015



Obr. 16. Rozdíl průměrné sumy vláhové bilance během období duben až září v letech 2001–2015 vzhledem k normálu 1961–1990

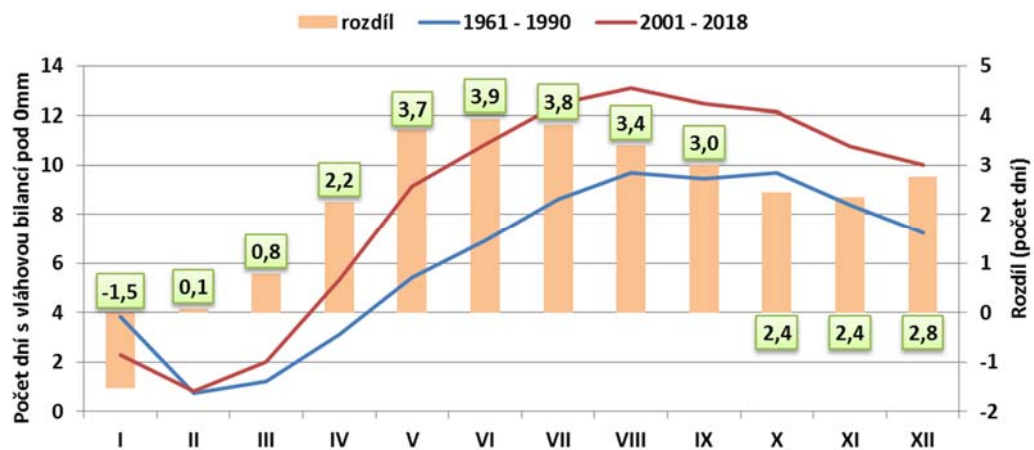


Obr. 17. Průběh ročních počtů dní s kumulativní hodnotou vláhové bilance (kumulativní suma od 1.1.) pod 0 mm (nahore) a pod -100 mm (dole) v období 1961–2018 v České republice

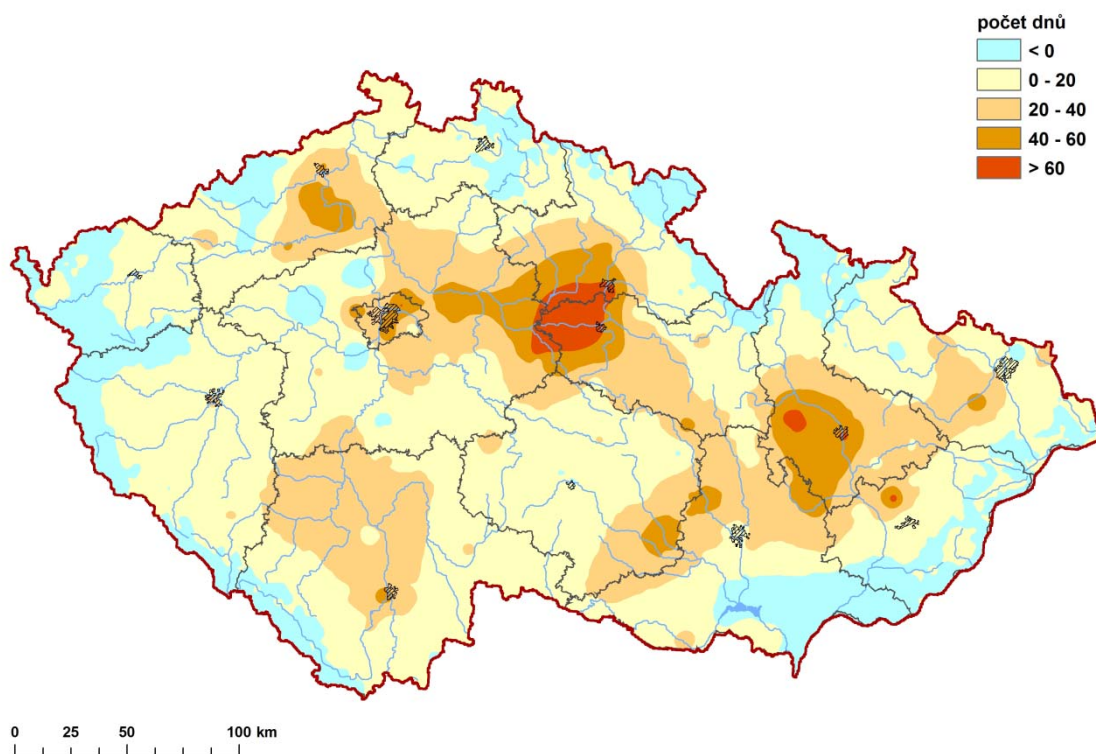
V období se suchem se pak dny s výrazně negativními kumulativními hodnotami vláhové bilance vyskytují zpravidla kontinuálně v delších periodách, které mohou být v některých případech přerušeny vlivem intenzivních srážek z konvektivních bouřek. Z rozdílu průměrných počtů dnů s kumulativní hodnotou vláhové bilance pod -100 mm za období 2001–2018 a dlouhodobého normálu 1961–1990 (Obr. 19) je vidět nárůst počtu dnů na většině území ČR s výjimkou nejvyšších partií hor. Nejvyšší nárůst je patrný v oblasti Polabí, na Královéhradecku a Pardubicku a částečně v Olomouckém kraji. V těchto oblastech je tedy možné poukázat na probíhající zvyšování srážkového deficitu společně s rostoucími úhrny výparu během roku, což nám zároveň indikuje v posledních letech vzrůstající predispozici k intenzivnějšímu vysušování krajiny. Stejně tak je patrné zvýšení průměrného počtu dnů s negativní sumou vláhové bilance v období 2001–2018 ve srovnání s normálovým obdobím 1961–1990 ve většině měsíců (Obr. 18).

Stejný poznatek je možné odvodit i ze zkoumání trendů, kdy statisticky významný trend mírného nárůstu počtu dnů s kumulovanou hodnotou vláhové bilance pod 0 mm a -100 mm vykazují měsíce květen až prosinec a všechny sezóny s výjimkou zimy (Tab. 1). V ročních hodnotách je trend nárůstu počtu dnů s vláhovou bilancí pod 0 mm 7,7 dne/10 let, u počtu dnů s vláhovou bilancí pod -100 mm je to pak 5,9 dne/10 let. To nám vlastně indikuje rozšiřování období s nepříznivými srážkovými a

teplotními (výparnými) podmínkami v rámci roku s negativním dopadem na dostupnost vody či vláh v krajině, její výsušnost a predispozici k rizikům typu přírodních požárů.



Obr. 18. Průměrný počet dní s kumulativní hodnotou vláhové bilance (kumulativní suma od 1.1.) pod 0 mm v jednotlivých měsících v letech 1961–1990 a 2001–2018 a jejich rozdíl



Obr. 19. Rozdíl průměrného ročního počtu dnů s kumulativní hodnotou (od 1.1.) vláhové bilance pod -100 mm v letech 2001–2015 od normálu 1961–1990

Tab. 1. Trendy potenciální evapotranspirace (mm/10 let), základní vláhové bilance (mm/10 let), počtu dní s kumulovanou hodnotou vláhové bilance od 1.1. pod 0 mm a pod -100 mm (dní/10 let) v České republice za období 1961–2018 pro jednotlivé měsíce, sezóny a rok (zvýrazněny jsou statisticky významné na hladině $p = 0,05$)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Potenciální evapotranspirace	0,530	0,770	1,210	2,060	2,400	1,430	2,800	2,790	0,130	-0,300	-0,250	0,150
Základní vláhová bilance (VLBI)	1,520	-1,480	-0,330	-3,990	-4,180	-3,590	0,160	-3,560	2,320	1,590	-1,370	-0,370
Počet dní s kum. VLBI pod 0 mm	0,000	0,000	0,010	0,120	0,650	1,020	1,110	1,130	1,040	0,940	0,830	0,850
Počet dní s kum. VLBI pod -100 mm	0,000	0,000	0,000	0,010	0,210	0,600	0,810	1,010	0,940	0,850	0,760	0,720

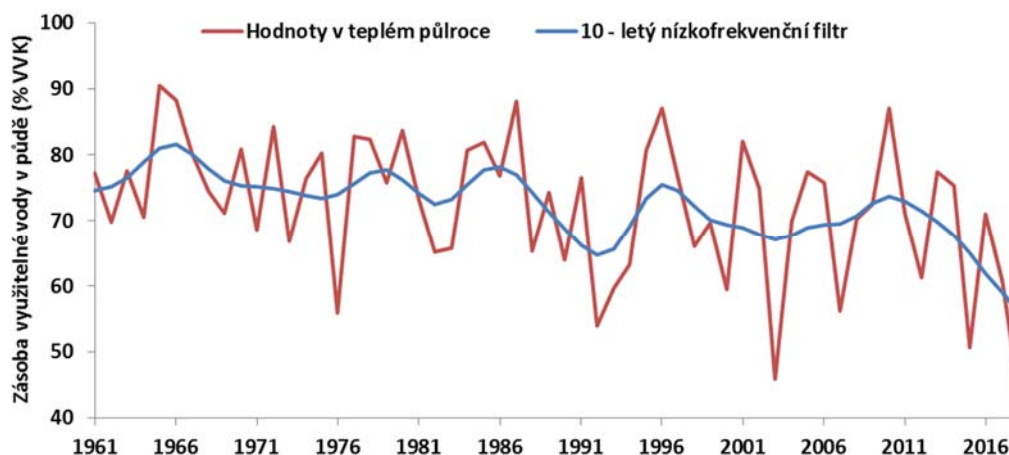
	ROK	ZIMA	JARO	LÉTO	PODZIM
Potenciální evapotranspirace	13,720	1,300	5,670	7,030	-0,420
Základní vláhová bilance (VLBI)	-13,280	-0,320	-8,510	-6,990	2,540
Počet dní s kum. VLBI pod 0 mm	7,710	0,390	0,780	3,260	2,820
Počet dní s kum. VLBI pod -100 mm	5,910	0,300	0,220	2,420	2,550

3.1.3. Stav vody v půdě charakterizovaný zásobou využitelné vody v půdě

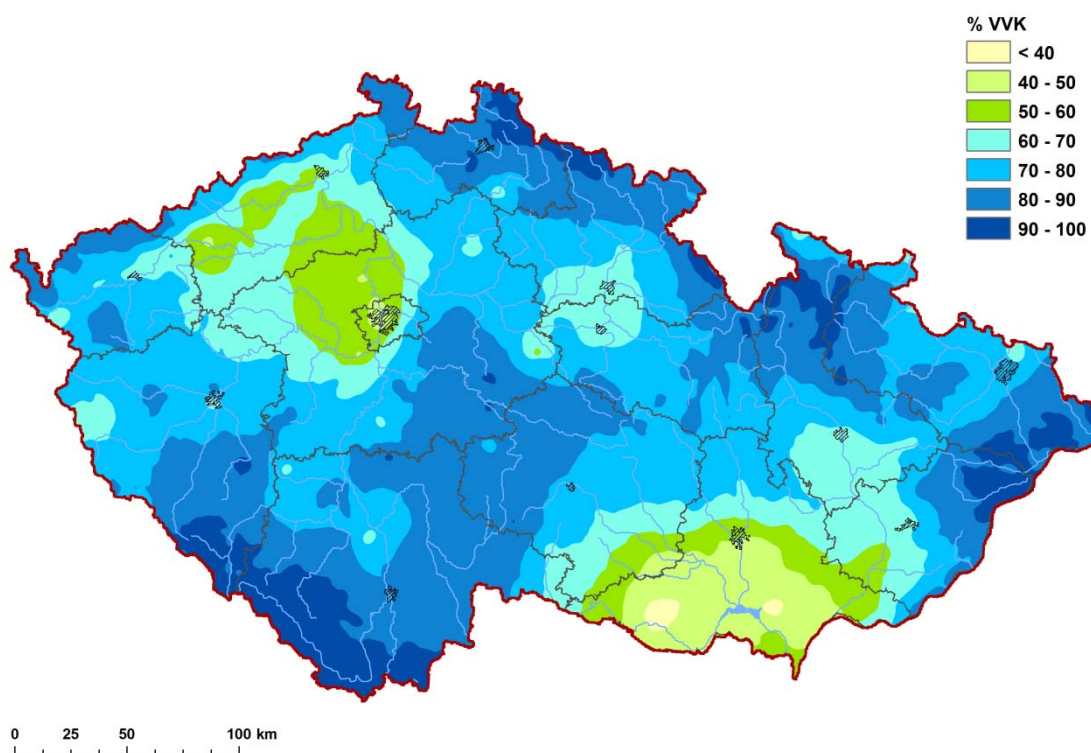
Problematika klimatických charakteristik a jejich nepříznivého vývoje se logicky odráží také v disponibilních zásobách vody v půdě. Co se týká analýzy stavu vody v půdě, jednou z možných charakteristik je počítaný aktuální deficit půdní vody pod travním porostem vyjádřený v mm, který charakterizuje množství vody v půdě, nedostávající se do polní vodní kapacity. K němu inverzní charakteristikou je pak hodnota zásoby využitelné vody v půdě, v našem případě pod travním porostem v mm či v % využitelné vodní kapacity (VVK). S její pomocí je možno obecně zjednodušenou formou určovat množství půdní vody v mm, které je v půdě obsaženo mezi základními půdními hydrolimity polní vodní kapacitou a bodem vadnutí. Obdobné vyjádření je možné v % využitelné vodní kapacity (VVK), která se bere jako vzájemný rozdíl mezi polní vodní kapacitou a bodem vadnutí. Jako vypařující povrch se pro zobecnění v tomto případě uvažuje travní porost. V rámci výstupů je tedy obsah vody v půdě vyjádřen pomocí vypočítané zásoby využitelné vody v půdě ve vrstvě 0–100 cm za předpokladu středně těžké půdy pokryté travním porostem v % využitelné vodní kapacity půdy (dále již jen % VVK). Toto zobecnění bylo zvoleno pro porovnání jednotlivých oblastí z hlediska obsahu vody v půdě v závislosti na různém vlivu měnících se meteorologických podmínek během roku v jednotlivých oblastech ČR a také z důvodu, že problematika vody v půdě je výrazně komplikována skutečností, že naše půdní poměry jsou velmi pestré a v naprosté většině případů různorodé i jen v širším okolí klimatologických stanic, kde probíhá měření vstupních meteorologických prvků do modelu. Proto pro analýzu a určení oblastí s nepříznivým vývojem dlouhodobých klimatických vlivů na stav zásob půdní vody bylo zvoleno toto zpracování.

Z hlediska vývoje hodnoty zásoby vody v půdě v období 1961–2015 (Obr. 20) je patrné snižování průměrných hodnot a to jak v roční zásobě, tak také v jednotlivých sezónách, převážně pak v létě. V časové řadě je zřejmá meziroční variabilita způsobená návazností této charakteristiky na srážkové úhrny v daných letech. Zároveň je v grafu velmi dobře možné identifikovat výrazně suché roky a také razantní snížení průměrných hodnot v posledních letech. Z hlediska sezón je pak statisticky významný pokles hodnot zaznamenán hlavně v jarní (o 1,2 % VVK / 10let) a letní sezóně (o 2,8 % VVK / 10let) a také velmi mírně v únoru (Tab. 2).

Z mapy na Obr. 21 je pak patrné rozložení lokalit s nejnižšími průměrnými hodnotami zásoby využitelné vody v období duben až září s výskytem hlavně na jižní Moravě, v Podkrušnohoří a v SZ části středních Čech.

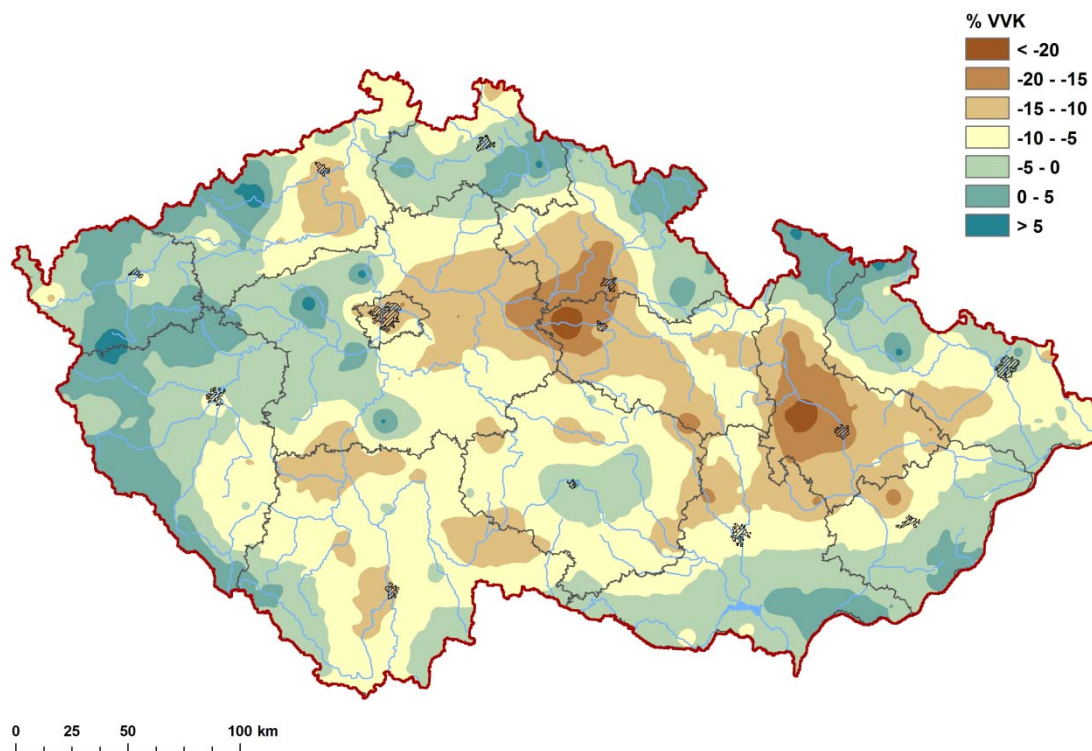


Obr. 20. Časový průběh průměrných hodnot zásoby využitelné vody v půdě za teplý půlrok (duben až září) v období 1961–2018 v České Republice



Obr. 21. Průměrná hodnota zásoby využitelné vody v půdě (v % VVK) v teplém půlroce (duben až září) v období 1961–2015

Z rozdílu mezi obdobími 2001–2015 a 1961–1990 (Obr. 22) je možno vyčíst ve kterých oblastech dochází v současnosti k nevýraznějšímu zhoršení podmínek ovlivňujících zásobu využitelné vody v půdě. Jedná se o oblasti Olomoucka a Hornomoravského úvalu, SZ část Českomoravské vysočiny, Polabí a Královéhradecka. Toto prostorové rozložení do značné míry koresponduje s analýzami rozdílů pro stejná období u charakteristiky základní vláhové bilance.

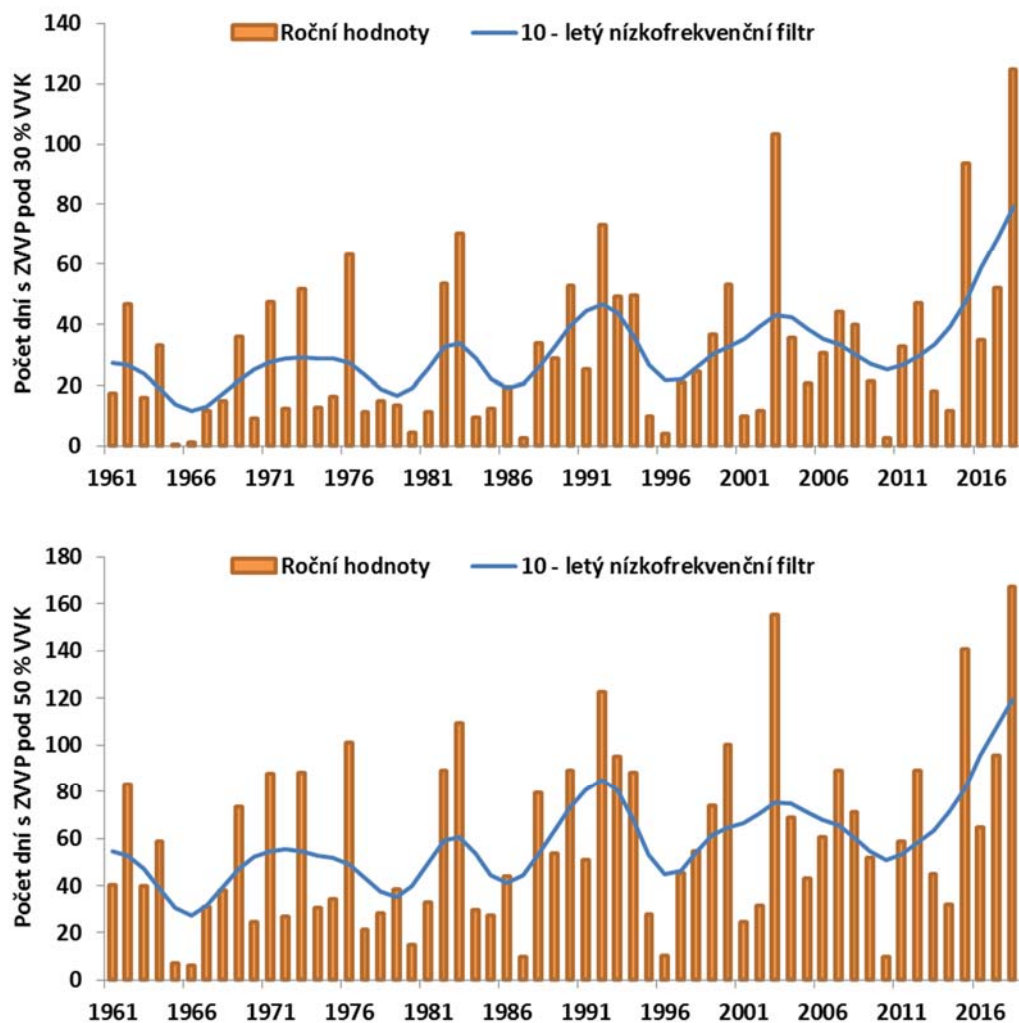


Obr. 22. Rozdíl průměrné zásoby využitelné vody v půdě během období duben až září v letech 2001–2015 vzhledem k normálu 1961–1990

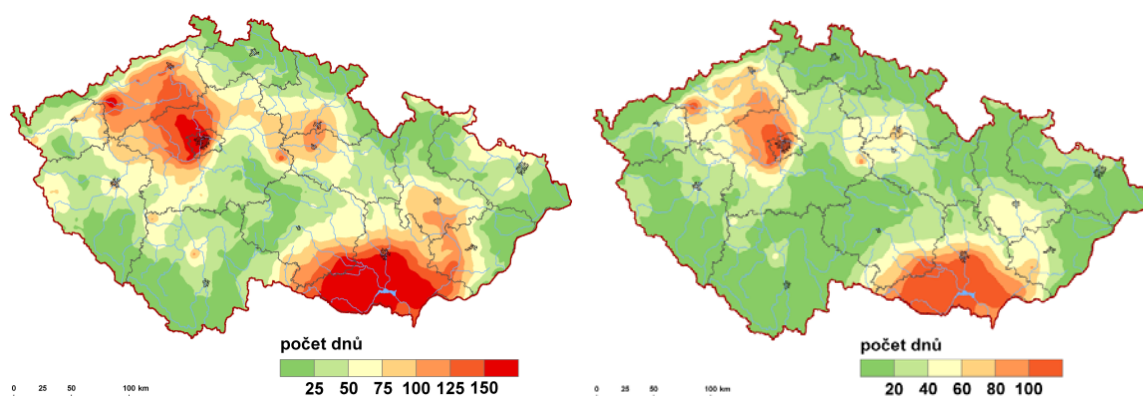
S ohledem na negativní dopady a rizika plynoucí z nedostatku zásoby využitelné vody v půdě pro krajinu a s tím spojené vysychání půdního profilu, byly pro celé období 1961–2015 analyzovány charakteristiky počtu dnů s hodnotami zásoby využitelné vody v půdě (ZVVP) pod 50 % VVK, ukazující na sníženou dostupnost půdní vláhly pro rostliny a také počty dnů s hodnotami ZVVP pod 30 % VVK, které už znamenají stres suchem. V oblastech vyznačujících se v dlouhodobém hledisku vysokým počtem takových dnů panuje při součinnosti dalších faktorů, např. porostních podmínek či působení nevhodné lidské činnosti, značná pravděpodobnost možnosti výskytu sucha i s jeho dalšími doprovodnými negativními projevy a riziky včetně požárů vegetace.

Analýza dat od roku 1961 ukazuje na pozvolný nárůst ročních počtů dní s ZVVP pod 50 i 30 % VVK. V průměru bylo v letech 2001–2018 v ČR za rok dní se ZVVP pod 50% VVK 72, z toho v teplém půlroce (období duben až září) pak 47. Počet dní s ZVVP pod 30 % VVK bylo ve stejném období v průměru za rok 41 a v období duben až září 26. Statisticky významný nárůst počtu dnů s ZVVP pod 50 % VVK byl zaznamenán v měsících květen až červenec a ze sezón pak v teplém půlroce o 2,6 dne/10 let. U charakteristiky počtu dní s ZVVP pod 30 % VVK pak byl statisticky významný nárůst zaznamenán v měsících květen a červen a pak také v teplém půlroce (o 3,7 dne / 10 let) (Tab. 2).

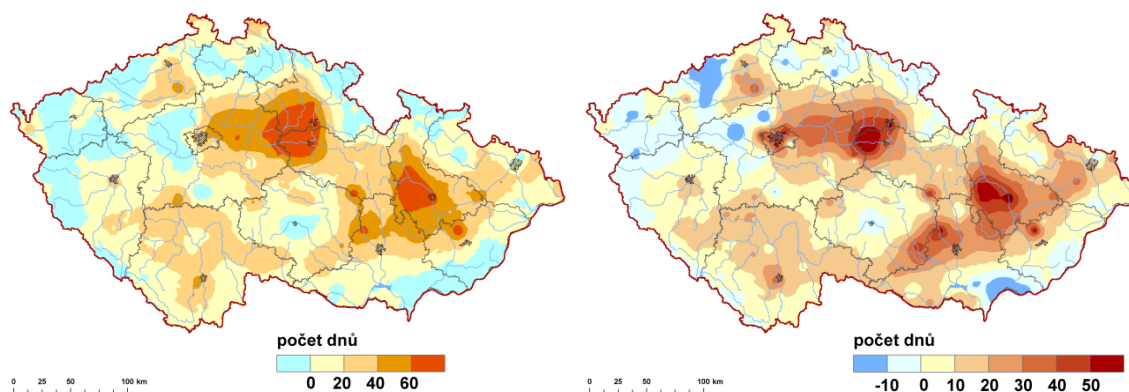
Oblastmi s nejvyššími počty dnů s nízkými hodnotami zásoby využitelné vody v půdě jsou podobně jako u výše analyzovaných charakteristik jižní Morava, Haná a pak také SZ středních Čech a oblast srážkového stínu v Podkrušnohoří (Obr. 24). Na rozdílových mapách na Obr. 25 je pak vidět míru nárůstu počtu dní. Oblasti s nejvyšším nárůstem jsou hlavně v Polabí, dále je to Královéhradecko a Pardubicko a na Moravě pak Haná, Olomoucko a SZ část Jihomoravského kraje.



Obr. 23. Průběh ročních počtů dní se zásobou využitelné vody v půdě pod 30 % VVK (nahore) a pod 50 % VVK (dole) v období 1961–2018 v České Republice



Obr. 24. Průměrný roční počet dní se zásobou využitelné vody v půdě pod 50 % VVK (vlevo) a pod 30 % VVK (vpravo) v období 1961–2015



Obr. 25. Rozdíl průměrného ročního počtu dní se zásobou využitelné vody v půdě pod 50 % VVK (vlevo) a pod 30 % VVK (vpravo) v letech 2001–2015 vzhledem k normálu 1961–1990

Tab. 2. Trendy zásoby využitelné vody v půdě (% VVK/10 let), počtu dní se zásobou využitelné vody v půdě pod 50 % VVK a pod 30 % VVK (den/10 let) v České republice za období 1961–2018 pro jednotlivé měsíce, sezóny a rok (zvýrazněny jsou statisticky významné na hladině $p = 0,05$)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Zásoba využitelné vody v půdě	-0,030	-0,150	-0,220	-0,930	-2,520	-3,140	-2,720	-2,680	-2,200	-1,260	-1,590	-1,640
Počet dní s ZVVP pod 50 % VVK	0,000	0,000	0,000	0,000	0,160	0,610	0,880	1,070	0,860	0,620	0,540	0,330
Počet dní s ZVVP pod 30 % VVK	0,000	0,000	0,000	0,020	0,770	1,240	1,320	1,110	0,970	0,700	0,710	0,620

	ROK	ZIMA	JARO	LÉTO	PODZIM
Zásoba využitelné vody v půdě	-1,590	-0,310	-1,220	-2,850	-1,680
Počet dní s ZVVP pod 50 % VVK	5,060	0,130	0,160	2,560	2,010
Počet dní s ZVVP pod 30 % VVK	7,470	0,290	0,790	3,680	2,380

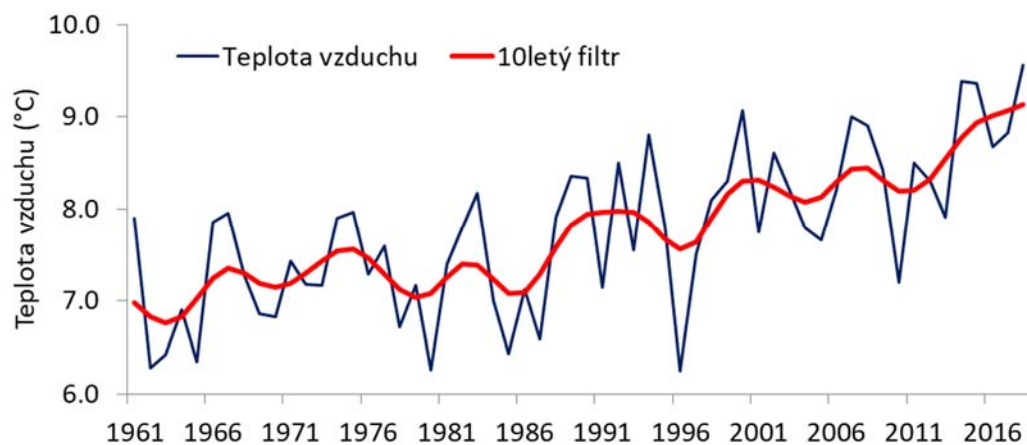
Prezentované charakteristiky podléhají samozřejmě určitému stupni zjednodušení a zobecnění v důsledku použitého výpočetního postupu a také s ohledem na potřebu jednotného srovnání oblastí v rámci ČR s dominantním zohledněním vlivu klimatických podmínek na výsušnost krajiny. Nicméně využití analýzy výstupů jednotlivých charakteristik pro stanovení potenciálně ohrožených oblastí a míry jejich ohrožení s ohledem na stav klimatických podmínek se jeví jako vhodné. Stejně tak, jako jejich použití v ansámblu metod při kontinuálním monitoringu vláhových podmínek v krajině dle průběhu pozorovaných meteorologických prvků a určování míry rizika např. pro vznik požárů. Tak je možné definovat lokality s vláhově nepříznivými podmínkami a to jak z dlouhodobého hlediska, tak i v průběhu daného sledovaného období v reálném čase.

3.1.4. Změna základních parametrů „požárního počasí“

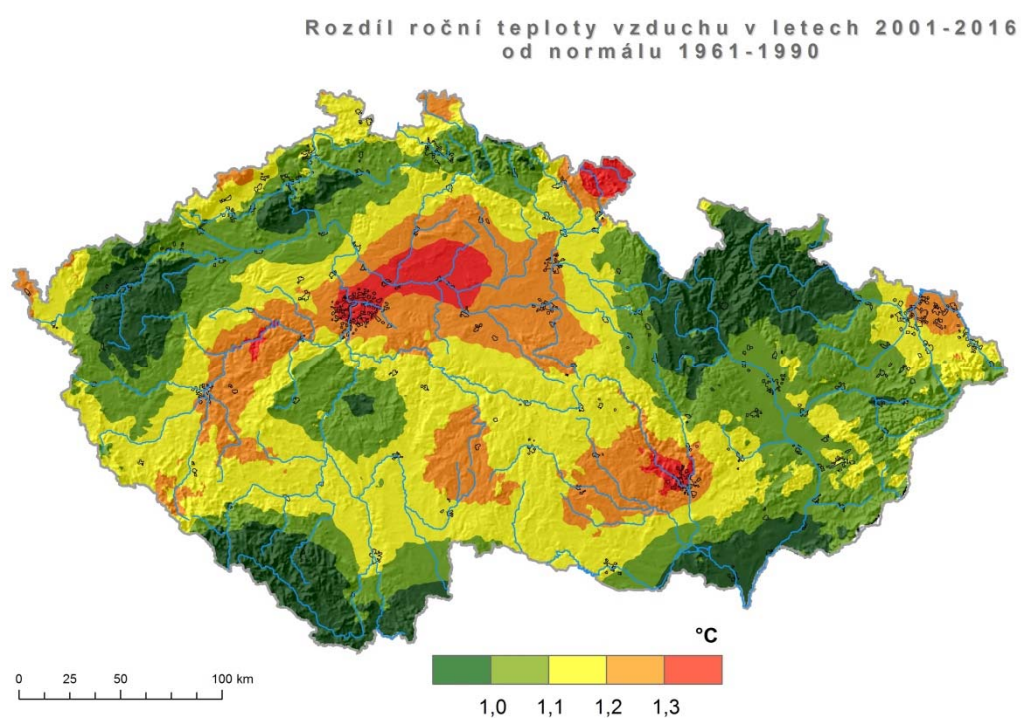
Za základní parametry požárního počasí je brána teplota vzduchu, srážky, vlhkost vzduchu a rychlost větru. Změny těchto základních prvků ovlivňují riziko vzniku a šíření přírodních požárů.

3.1.4.1. Teplota vzduchu

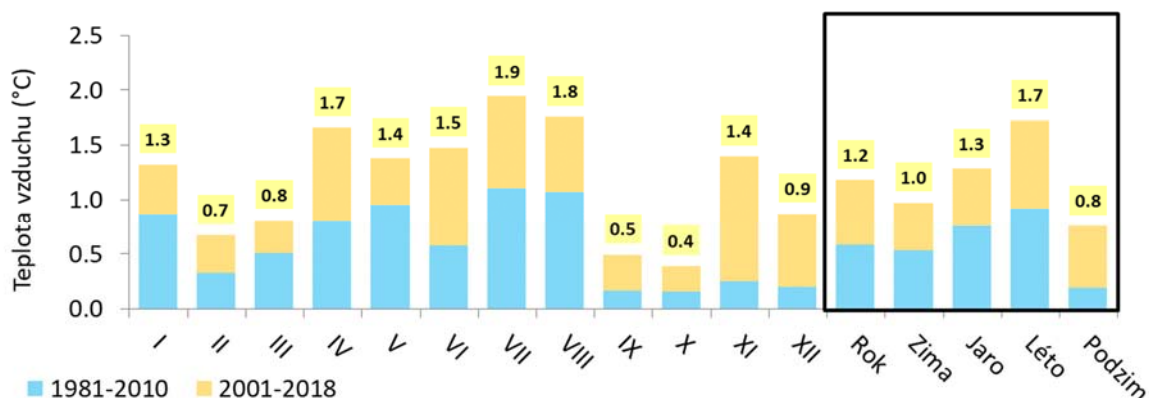
Od 60. let 20. století je pozorován postupný růst teplot vzduchu, který se zintenzivnil hlavně od 80. let 20. století. Jak lze vidět na Obr. 26, tak nejteplejší období ze všech zvolených je období od roku 2001. Zde byla průměrná teplota vzduchu pro Českou republiku 8,4 °C. Oproti tomu v normálovém období 1961–1990 jen 7,2 °C, tedy o 1,2 °C nižší než je současný stav (Obr. 28). Období 1981–2010 bylo teplejší než normál 1961–1990 o 0,6 °C. Největší oteplení je pozorováno hlavně ve velkých městech jako je Praha a Brno, kde působí tepelný ostrov města (Obr. 27). Dále k výraznějšímu nárůstu teplot vzduchu došlo v Polabí a v okolí Brna.



Obr. 26. Průměrná teplota vzduchu v České republice v letech 1961–2018



Obr. 27. Rozdíl roční teploty vzduchu v letech 2001–2016 od normálu 1961–1990



Obr. 28. Změna teploty vzduchu v České republice ve dvou obdobích 1981–2010 a 2001–2018 oproti dlouhodobému průměru 1961–1990

Růst teplot vzduchu je statisticky významný ve všech sezónách. K největší změně došlo v létě (0,44 °C/10 let). Jaro a zima se otepluje podobnou rychlostí (0,37 °C/10 let). Jak lze vidět na Obr. 28, tak naopak nejmenší trend se vyskytuje na podzim (0,18 °C/10 let), ale i zde došlo v posledních letech k intenzivnějšímu nárůstu. Ve všech měsících je pozorován statisticky významný nárůst teplot vzduchu s výjimkou února, září a října. Nejsilnější trend je v červenci a srpnu (0,49 °C/10 let) a také v lednu (0,45 °C/10 let).

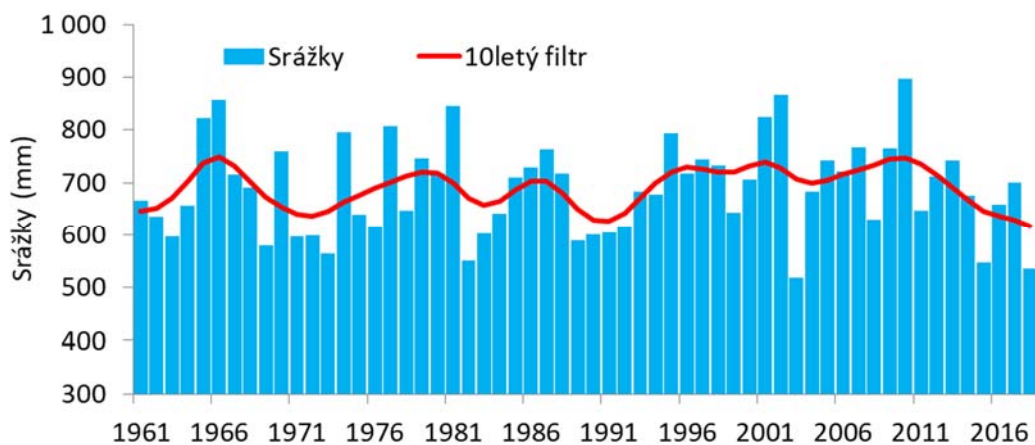
3.1.4.2. Srážky

Srážky v České republice jsou velmi variabilní. Suché a vlhké roky/periody/měsíce se významně střídají (Obr. 29). To je důvod, proč u srážek není vykazován statisticky významný trend (Tab. 3). Dochází ale ke změně charakteru srážek. Statisticky významně nám roste počet dní s vyššími úhrny srážek (nad 10 až 50 mm/den), které jsou způsobeny většinou bouřkovou činností v letních měsících. Oproti tomu roste počet a délka epizod, kdy nám prší jen velmi málo či vůbec.

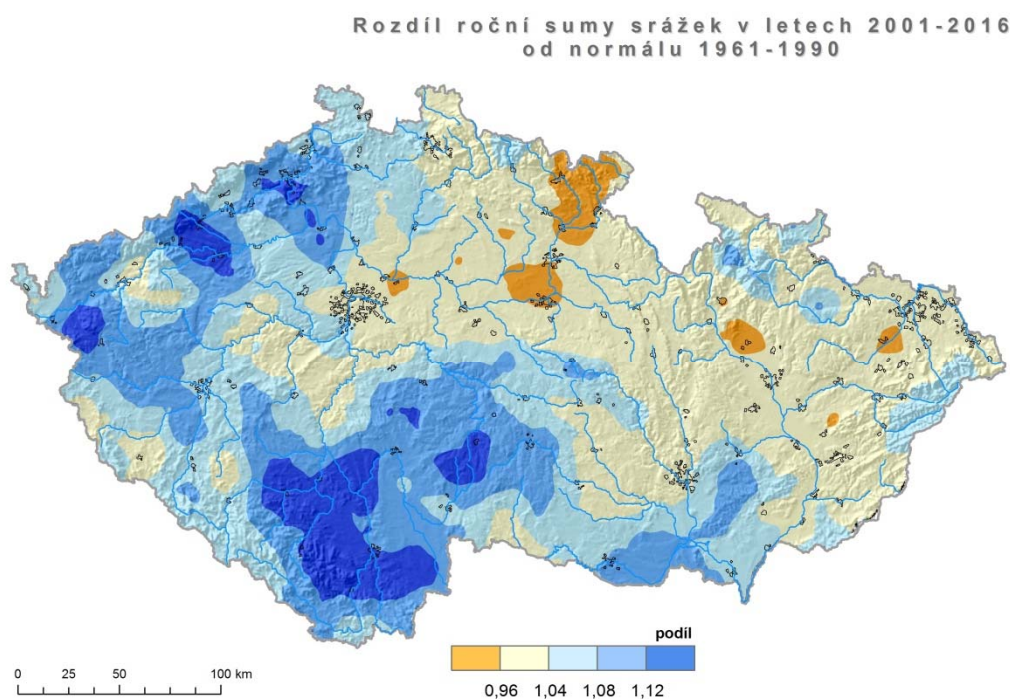
V normálovém období 1961–1990 byla průměrná suma srážek za Českou republiku 682 mm, což bylo o něco méně, než je pozorováno v současné době. V období 1981–2010 byla naměřeny průměrné srážky na hodnotě 703 mm a v posledních 18 letech (2001–2018) 702 mm. K největší změně srážek došlo na území jižních Čechách, kde je nárůst i přes 10 %. K nárůstu srážek došlo i na západě republiky. Na zbytku republiky jsou většinou změny do 4 % (Obr. 30).

Větší srážkový deficit byl pozorován od roku 2015, kdy průměrná hodnota ročních srážek dosahuje 601 mm (2015–2018) a v České republice až do poloviny roku 2019 je pozorován kumulovaný deficit 402 mm, což je o 14 % méně než je obvyklé (Obr. 31).

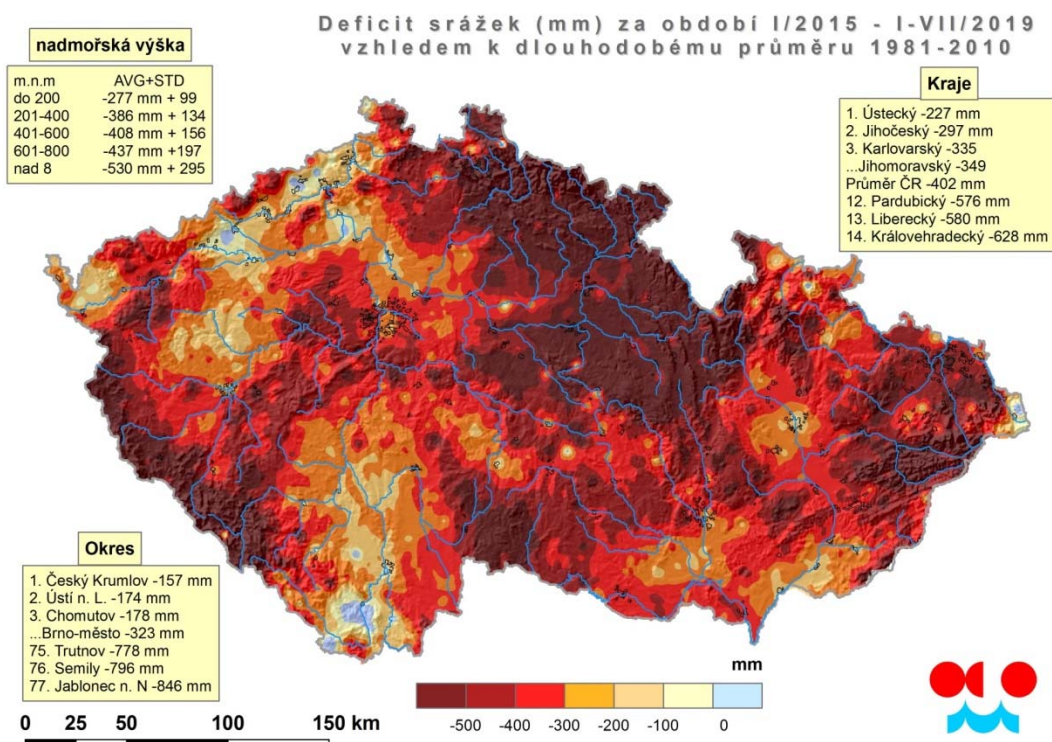
Nejvíce srážek spadne v letních měsících a to hlavně díky bouřkových situacím, které mají za následek spíše odtok vody z krajiny. Naopak nejméně srážek spadne v zimě. K nejmenší změně dochází v jarních měsících, kdy úhrny jsou prakticky shodné skrz všechny zkoumané období.



Obr. 29. Průměrná roční suma srážek na území České republiky v letech 1961–2018



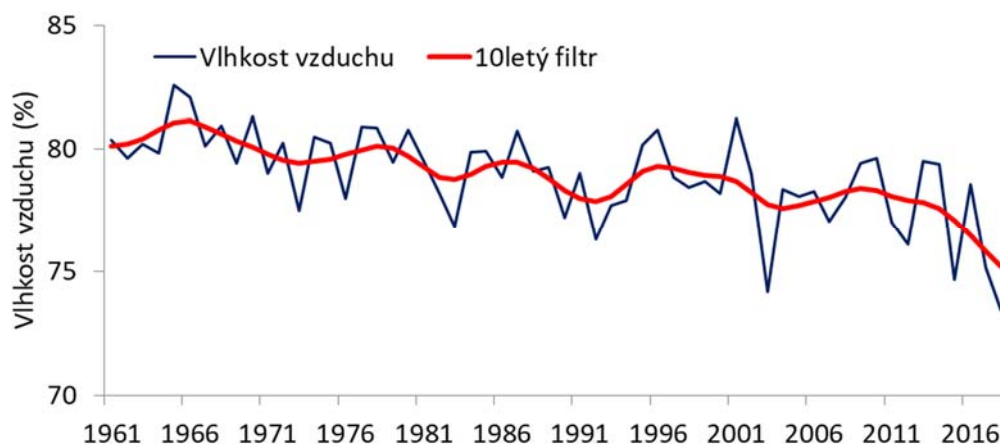
Obr. 30. Rozdíl sumy srážek v letech 2001–2016 vzhledem k normálu 1961–1990



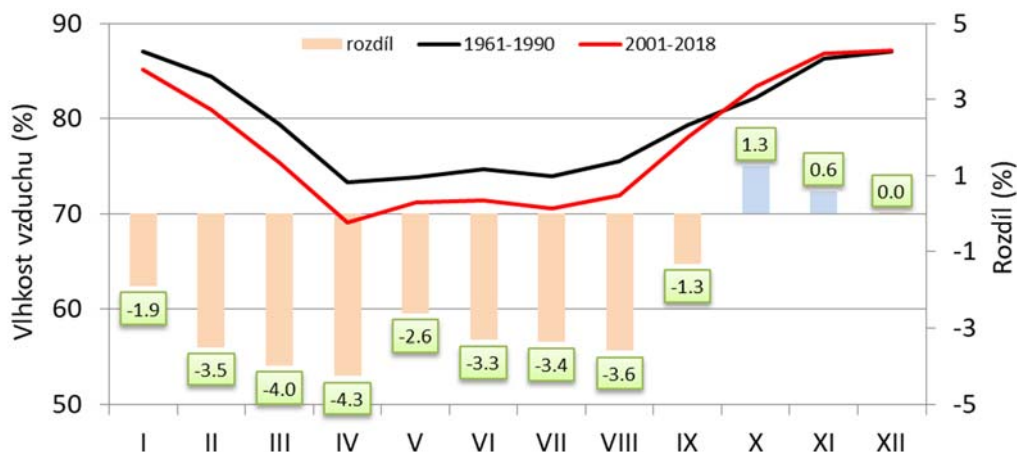
Obr. 31. Deficit srážek (mm) za období leden 2015 až červenec 2019 vzhledem k dlouhodobému průměru 1981–2010

3.1.4.3. Vlhkost vzduchu

Díky vyšším teplotám, slunečnějšímu počasí a nevýznamné změně srážek dochází k poklesu vlhkosti vzduchu. Průměrná vlhkost vzduchu v normálovém období 1961–1990 byla 79,8 % (Obr. 32). Oproti tomu v posledních 15 letech (2001–2018) to už bylo jen 77,6 %. Největší vlhkost vzduchu je v zimních měsících a to 86,2 % v období 1961–1990. Naopak v letech 2001–2018 klesla průměrná vlhkost vzduchu v zimě v České republice na 84,4 %. Nejmenší vlhkost je v jarních a letních měsících. Ta se pohybovala okolo 75 % v letech 1961–1990, ale v současných podmínkách změněného klimatu je průměr 71 % (Obr. 33).



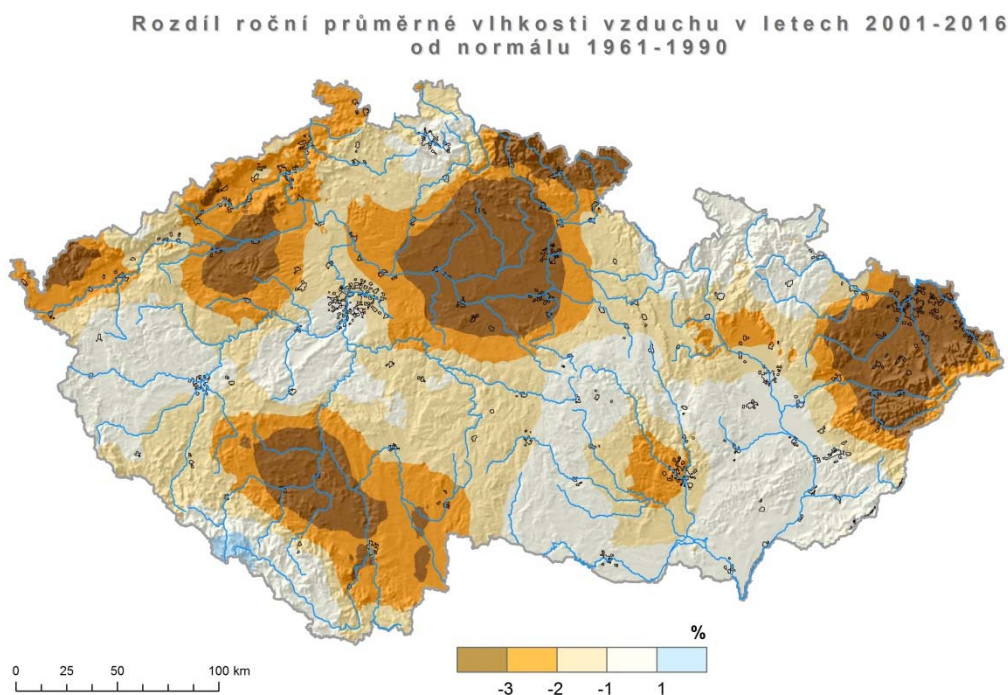
Obr. 32. Průměrná roční vlhkost vzduchu na území České republiky v letech 1961–2018



Obr. 33. Vlhkost vzduchu v jednotlivých měsících v letech 1961–1990 a 2001–2018 a jejich rozdíl

Statisticky významná změna vlhkosti vzduchu je pozorována u všech sezón s výjimkou podzimu (Tab. 3). K největšímu poklesu dochází na jaře (-1,10 %/10 let) a v létě (-0,99 %/10 let). Z jednotlivých měsíců je statisticky významný pokles pozorován od ledna po srpen. Po zbytek roku jsou změny již nevýznamné.

Největší změny jsou lokálně významně ohraničeny. Pokles o více než 3 % v posledních letech oproti normálu je pozorován v Polabí, Slezsku, jižních Čechách, v Krkonoších a v závětrné straně Krušných hor. Růst vlhkosti je slabě lokalizován na malém území na Šumavě (Obr. 34).

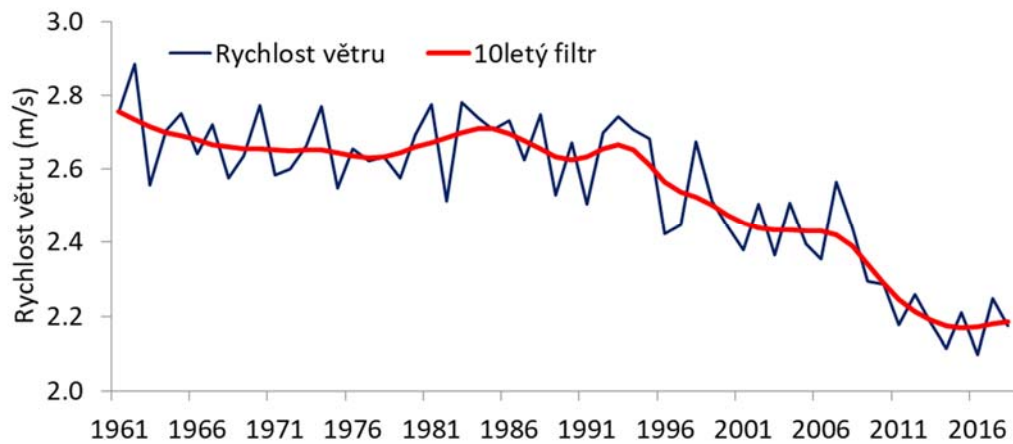


Obr. 34. Rozdíl vlhkosti vzduchu v letech 2001–2016 vzhledem k normálu 1961–1990

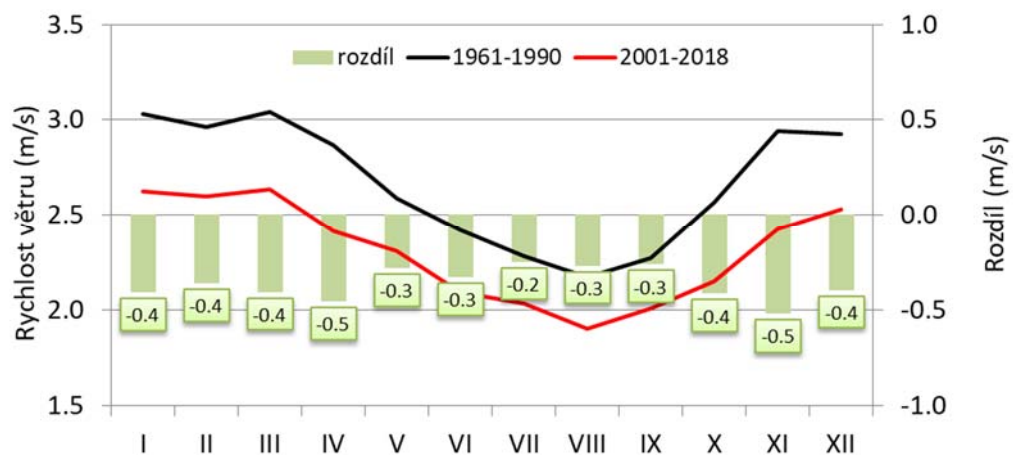
3.1.4.4. Rychlost větru

Jak bylo popsáno v publikacích Brázdil (2016, 2017) tak nejen v České republice je pozorován viditelný pokles rychlosti větru (Obr. 35). Ten je dán hlavně změnou drsnosti terénu (výstavba, zalesňování atd.).

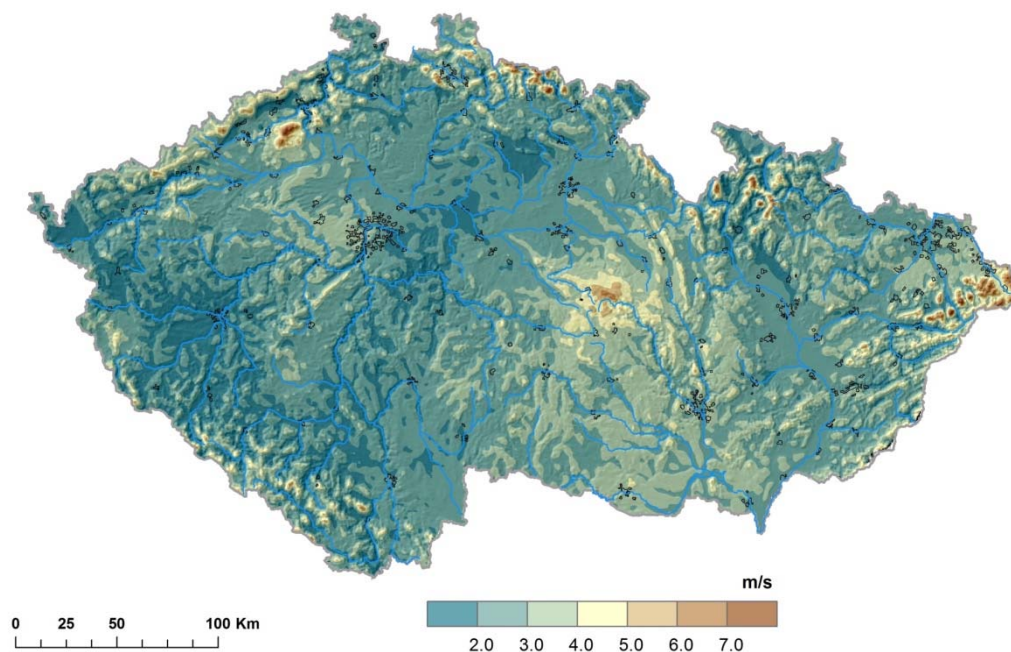
Průměrná roční rychlost větru je v celém zkoumaném období 2,5 m/s. Větrnější počasí je pozorováno během zimy (2,8 m/s), naopak v létě je vítr převážně vázán na bouřkové situace, tedy na krátkodobé situace a průměr je jen 2,2 m/s. Nejvyšší rychlosti větru jsou dosahovány na horách (Lysá hora, Milešovka), naopak nejméně větrnou oblastí jsou západní a jižní Čechy (Obr. 37).



Obr. 35. Průměrná roční rychlost větru na území České republiky v letech 1961–2018



Obr. 36. Rychlost větru v jednotlivých měsících v letech 1961–1990 a 2001–2018 a jejich rozdíl

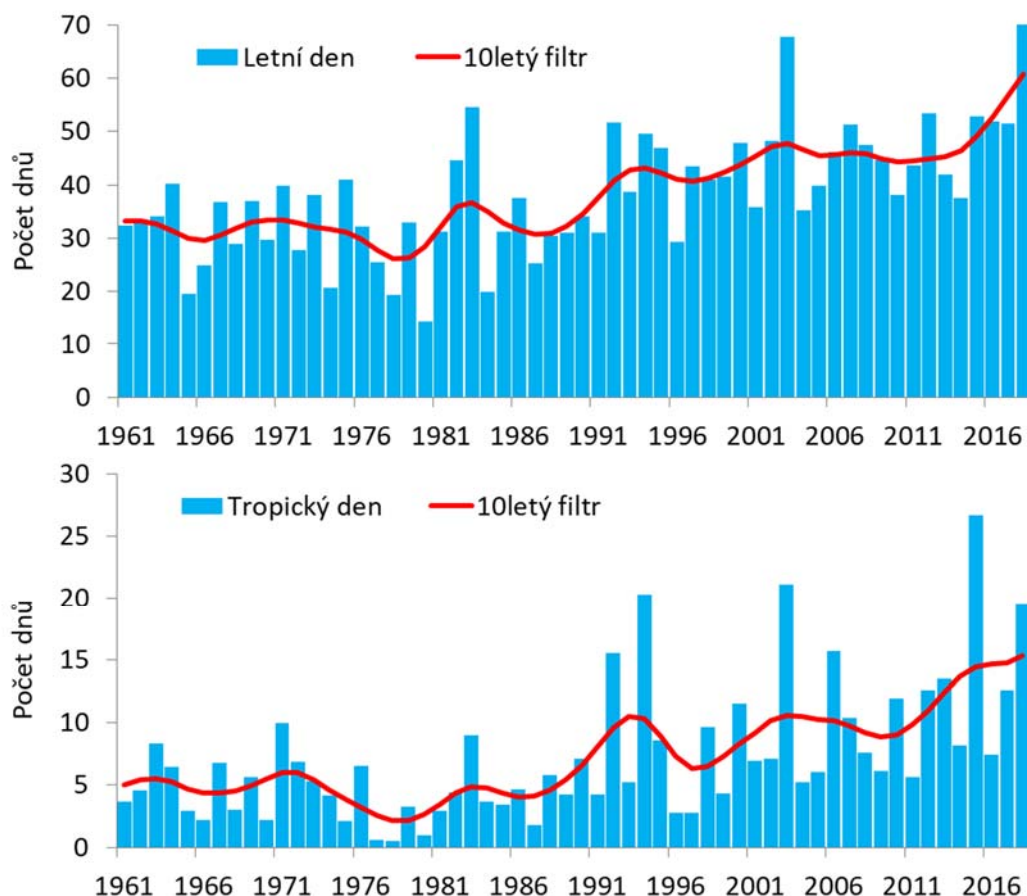


Obr. 37. Průměrná roční rychlost větru na území České republiky v letech 1961–2015

Jak lze vidět na Obr. 36, tak ve všech měsících je pozorován pokles průměrné rychlosti větru v posledních 18 letech o 0,4 až 0,5 m/s oproti 1961–1990. Statisticky významný záporný trend je pozorován v České republice v letech 1961–2018 ve všech sezónách a měsících. Tento pokles je od 0,07–0,16 m/s za dekádu. Největší záporný trend je v listopadu. Výraznější pokles rychlosti větru je pozorován v horských oblastech, naopak změna v nížinách je podstatně menší (Zahradníček a kol. 2018).

3.1.4.5. Teplotní indexy zvyšující výrazně riziko přírodního požáru

Jelikož růst teplot je výrazně pozorován v letních měsících, tak se to logicky projevuje ve zvýšeném počtu letních a tropických dní (maximální teplota vzduchu vyšší než 25 °C resp. 30 °C). V tyto dny riziko požáru výrazně roste.

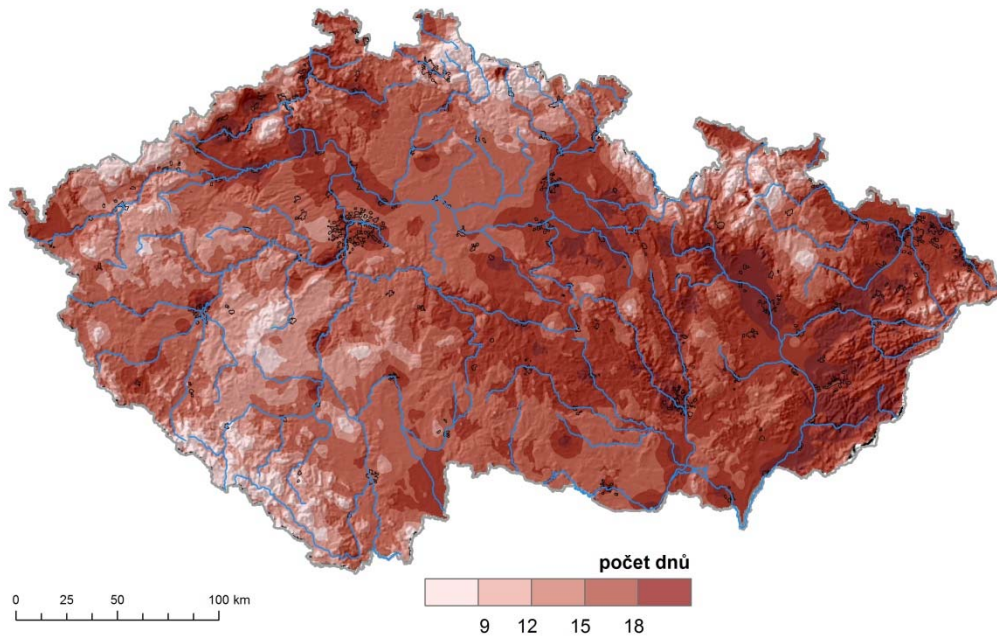


Obr. 38. Počet letních (nahore) a tropických (dole) dnů v letech 1961–2018 na území České republiky

V České republice se vyskytovalo v průměru 38,5 letních dnů za rok v období 1961–2018. Je zde pozorována velká změna mezi normálovým obdobím 1961–1990 a současným změněným klimatem 2001–2018. Průměrná hodnota v letech 1961–1990 byla 31,6 dní. V posledních 18 letech byl nárůst těchto dní o 52 % a to na průměrnou hodnotu 48 dní za rok (Obr. 38).

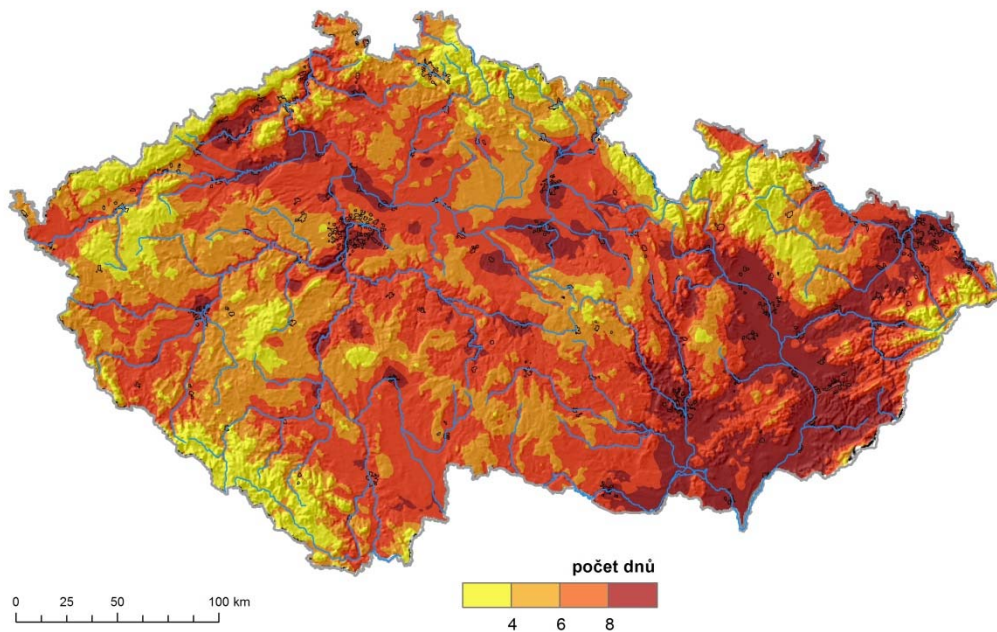
Podobná situace je i v případě tropických dní. Těchto dnů se v průměru objevuje jen pár za rok (7,2 dní v období 1961–2018), ale v posledních letech pozorujeme výrazný nárůst (Obr. 38). Například v roce 2015 se vyskytovalo kolem 26 tropických dnů, což je klimatickými projekcemi modelováno až pro konec tohoto století a to podle nejalarmističtějšího emisního scénáře RCP 8.5. V letech 1961–1990 bylo pozorováno v průměru jen 4,4 tropických dní za rok. V období 1981–2010 je již výrazný nárůst o 70 % na 7,6 dní za rok. V posledním období 2001–2018 bylo zaznamenáno v průměru 11,3 dní za rok, což je skoro třikrát více oproti normálovému období.

Rozdíl roční sumy počtu letních dní v letech 2001-2016
od normálu 1961-1990



Obr. 39. Rozdíl počtu letních dnů v letech 2001–2016 od normálu 1961–1990

Rozdíl roční sumy počtu tropických dní v letech 2001-2016
od normálu 1961-1990



Obr. 40. Rozdíl počtu tropických dnů v letech 2001–2016 od normálu 1961–1990

U letních i tropických dní je pozorována podobná prostorová variabilita změn v chování vybraných teplotních indexů (Obr. 39 a Obr. 40). Jak v případě letních, tak tropických dní, dochází k většímu nárůstu na Moravě. V Moravských úvalech je více než 18 letních a 8 tropických dní v současném klimatu

než v období 1961–1990. Dále více dnů s vyššími teplotami vzduchu je pozorováno také ve velkých městech, jako je Praha a Brno, což je způsobené již zmíněným efektem tepelného ostrova města.

U obou vybraných indexů je vypočten statisticky významný trend a to u ročních sum a také v letních a jarních měsících. Počet tropických dní (nad 30 °C) se zvedá o 1,7 dne/10 let a počet letních dnů (nad 25 °C) o 4,2 dne/10 let (Tab. 3).

Tab. 3. Trendy teploty vzduchu (°C/10 let), srážek (mm/10 let), vlhkosti vzduchu (%/10 let), rychlosti větru (m/s/10 let), počtu ledních a tropických dní (den/10 let) v České republice za období 1961–2018 pro jednotlivé měsíce, sezóny a rok (tmavě jsou statisticky významné na hladině $p = 0,05$)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Teplota vzduchu	0.450	0.210	0.300	0.380	0.420	0.330	0.490	0.490	0.130	0.130	0.280	0.420
Srážky	2.230	-0.620	0.950	-1.900	-1.500	-1.860	3.130	-0.560	2.540	1.460	-1.480	-0.090
Vlhkost vzduchu	-0.520	-1.100	-1.140	-1.160	-1.020	-0.830	-0.950	-1.190	-0.250	0.160	0.090	-0.030
Rychlost větru	-0.100	-0.100	-0.100	-0.110	-0.070	-0.090	-0.070	-0.080	-0.070	-0.090	-0.160	-0.080
Letní dny	0.000	0.000	0.000	0.070	0.550	0.720	1.260	1.380	0.230	0.010	0.000	0.000
Tropické dny	0.000	0.000	0.000	0.000	0.060	0.310	0.680	0.670	0.020	0.000	0.000	0.000

	Rok	Zima	Jaro	Léto	Podzim
Teplota vzduchu	0.340	0.370	0.370	0.440	0.180
Srážky	2.300	0.860	-2.450	0.710	2.520
Vlhkost vzduchu	-0.660	-0.570	-1.100	-0.990	0.000
Rychlost větru	-0.090	-0.100	-0.090	-0.080	-0.100
Letní dny	4.220	0.000	0.630	3.360	0.240
Tropické dny	1.740	0.000	0.060	1.660	0.020

3.1.5. Geomorfologické a porostní charakteristiky

Vliv samotného terénu, jeho porostní situace a samozřejmě hořlavost a množství dostupného „paliva“ je z hlediska intenzity, šíření a také důsledků přírodních požárů kromě meteorologických předpokladů a klimatických trendů klíčovým předpokladem pro posouzení reálného požárního rizika v jakémkoliv území. V tomto materiálu se však věnujeme této problematice jen okrajově, stejně jako opomíjíme možnosti jak omezit vznik a případný rozsah přírodních požárů. Této problematice se podrobně věnuje metodika paralelně zpracovaná Trnkou et al. (2020). Nicméně z této práce uvádíme některé dílčí aspekty nutné pro využití této metodiky zaměřené na předpověď požárního počasí a také rizika spojeného s dalším pokračováním dosavadního klimatického vývoje.

3.1.5.1. Geomorfologie

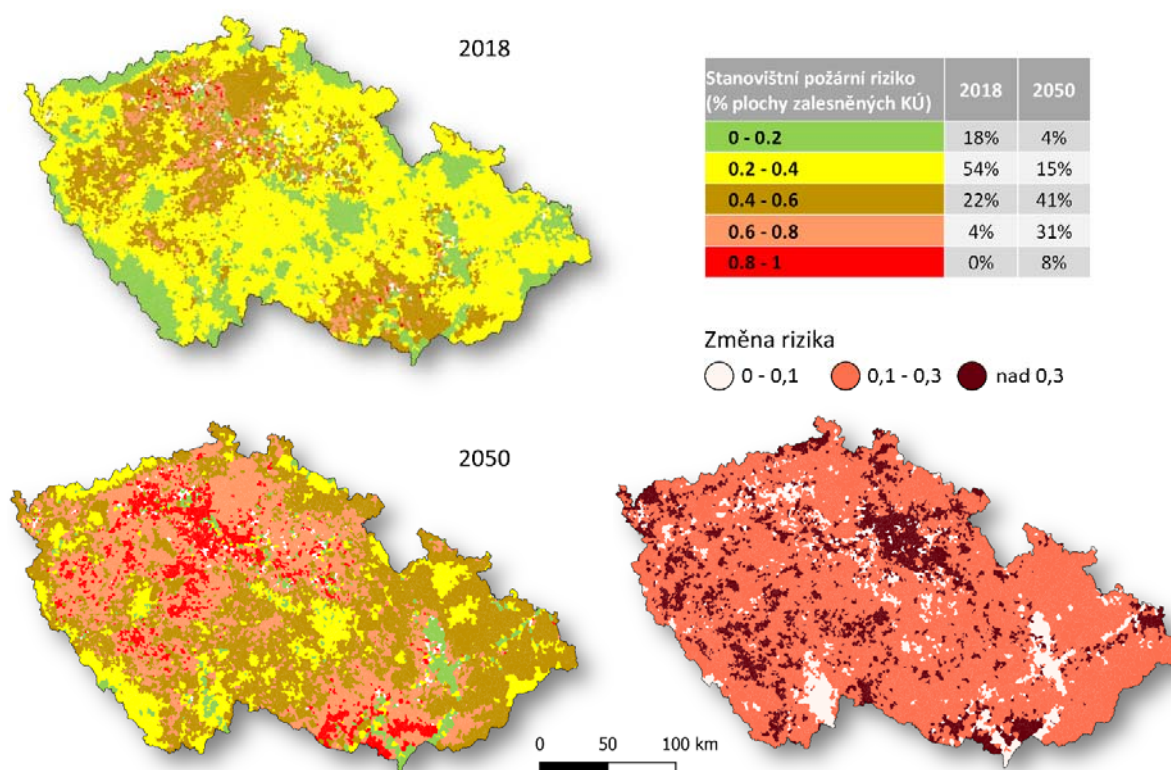
Z geomorfologických charakteristik, které mohou potenciálně ovlivnit možnost vzniku a šíření požárů, jsou zřejmě nejdůležitější vlastnosti místa odvozené z orografie území. V rámci posouzení rizika šíření požárů jsou zahrnuty nadmořská výška, orientace k světovým stranám (expozice), svažitost a syntetický parametr charakterizující vlhkostní podmínky daného místa - topografický vlhkostní index (Beven & Kirkby, 1979). Všechny výše uvedené atributy lze vypočítat jako spojitá obrazová pole z digitálního modelu reliéfu terénu DMR 4G. Produkt DMR 4G, který je výsledkem odvozeným z dat leteckého lidarového skenování ČR, představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v pravidelné síti (5 x 5 m) bodů. Tyto body byla pro potřeby projektu převedena do rastrového formátu s prostorovým rozlišením 5 m.

3.1.5.2. Charakter stanoviště na bázi lesnické typologie

Hodnocení požárního rizika na bázi lesnické typologie bylo podrobně popsáno v návazném metodickém materiálu „Doporučená adaptační a mitigační opatření v rizikových oblastech výskytu přírodních požárů s přihlédnutím k měnícímu se klimatu – Certifikovaná metodika (Trnka et al., 2020c). Stručný excerpt z tohoto zdroje je uveden níže, včetně výsledné klasifikace lesních stanovišť extrapolovaných na jednotky individuálních katastrů v plošném zobrazení České republiky (Obr. 41).

Stanovení požárního rizika z hlediska stanoviště vychází z lesnické typologie, která je v ČR legislativně zakotvena v příloze č. 2 vyhlášky 298/2018 Sb. o zpracování oblastních plánů rozvoje lesů a o vymezení hospodářských souborů. Uvedená příloha obsahuje přehled tzv. souborů lesních typů (SLT). SLT jsou jednotky sdružující lesní typy (LT) na základě podobnosti růstových poměrů. Ty jsou podkladem pro diferenciaci lesnického hospodaření. SLT jsou definovány lesními vegetačními stupni (LVS) a edafickými kategoriemi. LVS představující výškový klimatický gradient a mají číselné označení 1 až 10 (azonální společenstva borů označena 0). LVS 10 je arktóalpinum, které je primárním bezlesím a do odvození požárního rizika není zahrnut. Edafické kategorie (celkem 25) pak vyjadřují půdní a vláhové poměry. Ty jsou ovlivněny geologickým substrátem a morfologií terénu. Uvedené charakteristiky vypovídají o vláhových poměrech stanoviště a charakteru vegetace (ať již potenciální nebo aktuální). Takto pojaté charakteristiky SLT (tj. průnik LVS a edafických kategorií) podle lesnické typologie tvoří rámec a jednu z vrstev pro odvození míry rizika vzniku a rozvoje lesních požárů. Do hodnocení míry rizika požárů podle charakteru stanoviště tedy implicitně vstupují i) vláhové poměry stanoviště, ii) morfologie terénu, potenciální charakter iii) přízemní a iv) dřevinné vegetace a některá další hlediska. Podrobný popis je uveden v návazném metodickém materiálu Trnka et al. (2020c). Výsledná klasifikace požárního rizika na bázi lesnické typologie uvádí Obr. 41, a to pro situace současného stavu (2018) a předpokládané změny stanovištního rizika k roku 2050.

POŽÁRNÍ RIZIKO - LESNÍ STANOVIŠTĚ

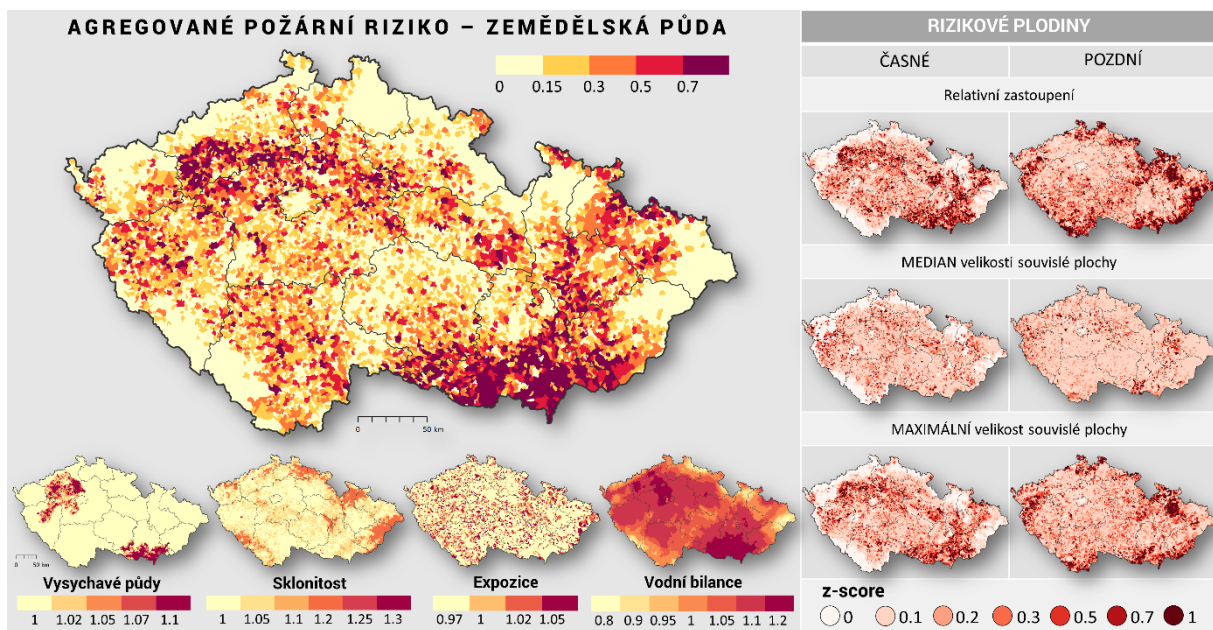


Obr. 41. Klasifikované stanovištní riziko v celoplošném zobrazení na bázi lesnické typologie a klimatických projekcí, zobrazeno průměrné riziko v prostorových jednotkách katastrálních území pro nedávný/aktuální stav (2018) a projekci k roku 2050, včetně změny rizika pro toto období (převzato z Trnka et al. 2020c).

3.1.5.3. Charakter stanoviště na zemědělské půdě

Hodnocení požárního rizika na zemědělských pozemcích bylo podrobně popsáno v návazném metodickém materiálu „Doporučená adaptační a mitigační opatření v rizikových oblastech výskytu přírodních požárů s přihlédnutím k měnícímu se klimatu – Certifikovaná metodika (Trnka et al., 2020c). Stručný excerpt z tohoto zdroje je uveden níže, včetně výsledné klasifikace zemědělských stanovišť extrapolovaných na jednotky individuálních katastrů v plošném zobrazení České republiky (Obr. 42).

Podobně jako u lesních porostů, i u zemědělské půdy platí, že subjektivní odhad je nejrychlejší cestou k posouzení zájmového území z hlediska požárního rizika a volbě adekvátních opatření k jeho snížení. Předpokládá se dostatečná znalost vlivu jednotlivých faktorů stanoviště, vegetačního krytu a prostorového kontextu na riziko vzniku a šíření požárů. Podobně jako v případě lesních porostů je použita metoda numerického stanovení rizika, které představuje částečně objektivizovaný odhad. Jeho výhodou je možnost uplatnění stejného algoritmu na různá hodnocená území, nicméně je důležité rozumět aplikačním úskalím výsledku, který umožňuje spíše orientační posouzení pro stanovení celkové míry rizika a kvantifikaci nejvíce ohrožených regionů. Algoritmus numerického stanovení požárního rizika zahrnuje podíl typu plodin, medián velikosti souvislé plochy s požárně rizikovými plodinami (dle LPIS) a také maximální velikost souvislého bloku s rizikovými plodinami stejné kategorie. Tyto základní faktory jsou doplněny o podíl vysychavých půd, expozice a sklonitosti pozemku, a také charakteru vodní bilance území. Podrobná metodika je součástí práce Trnky a kol. (2020) a je prezentována na Obr. 42.



Ob. 42. Klasifikované stanovištní riziko přírodních požárů na zemědělské půdě zpracované na úrovni katastrů v rámci ČR a vycházejícího z dat z klimatických dat 1981–2010 a reálného zastoupení plodin a velikosti pěstebních ploch v roce 2018.

3.1.5.4. Aktuální porostní charakteristiky

Charakter vegetace výrazně ovlivňuje riziko vzniku a šíření požárů v krajině. U lesních porostů má vliv druhová skladba a charakter přízemní vegetace, růstové stádium (věk) a zápoj, zdravotní stav porostu (podíl souší), množství odumřelé organické hmoty a prostorové uspořádání lesa (horizontální a vertikální struktura).

Informace o některých porostních charakteristikách lze dohledat v údajích Lesních hospodářských plánů (LHP). Ty obsahují informace o druhové skladbě porostů, věkové struktuře a zakmenění (které má vazbu na zápoj). Nevýhodou tohoto zdroje, stejně jako zdrojů statistických pozemních inventarizačních šetření (např. Národní inventarizace lesa – www.uhul.cz, nebo projekt krajinné inventarizace CzechTerra – www.czechterra.cz) však je časová náročnost a především neaktuálnost těchto údajů – např. průměrné „stáří“ dat LHP při jejich desetiletém cyklu je pět let. Tato nevýhoda se projevuje především v případech dynamických změn, jaké představuje současná dramatická situace v lesích ČR s velkoplošným odumíráním porostů vlivem sucha a kůrovcové kalamity. Z těchto důvodů je stále významnější nasazení nástrojů DPZ k aktuálnímu monitoringu porostních údajů a stavu lesa, které výše uvedené nevýhody pozemního šetření stavu lesní vegetace efektivně řeší. Detailní popis obsahuje práce Trnky et al. (2020).

3.1.5.5. Prostorový kontext lesa s ostatními krajinnými prvky

Prostorový kontext – riziko vzniku a šíření požáru se snižuje s větší prostorovou heterogenitou územního pokryvu, tj. střídání lesních a nelesních prvků a vlastní členitost lesní a polní vegetace. Prostorový kontext (prostorovou heterogenitu) lze získat z mapy krajinného pokryvu vytvořené z dat DPZ a poskytující tematické charakteristiky biotických a abiotických vlastností zemského povrchu

(Belward 2007). Klíčovým parametrem hodnocení prostorové heterogenity území je prostorové měřítko. Pro účely této metodiky řešené pro území celé ČR je prostorovou jednotkou plocha 500x500 m a heterogenita je hodnocena z detailnějších podkladů v rámci této jednotky. Pro vytvoření mapy krajinného pokryvu se používají satelitní multispektrální data s prostorovým rozlišením 30 m a vyšším (např. Landsat TM/ETM/OLI, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/a-landsat-timeline/>), která jsou schopna zachytit hlavní třídy pokryvu a variability vegetačního krytu (Carrigues et al. 2006).

Pro posouzení požárního rizika vzhledem k prostorovému kontextu prvků vegetace v krajině byl připraven postup (Trnka et al. 2020c), který hodnotí heterogenitu území podle fragmentace lesní a nelesní vegetace, včetně heterogenity uvnitř lesních ploch podle růstových fází. Zdrojovými údaji jsou mapy krajinného pokryvu k vylišení pěti základních územních kategorií (les, vodní plocha, orná půda, louky a pastviny a zástavba) – např. Copernicus CORINE Land Cover (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>). Dalším potřebným zdrojovým údajem jsou mapy růstových fází porostů (holina, tyčkovina, tyčovina a kmenovina) zpracovaná Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem.

3.1.5.6. Další rizikové faktory (osídlenost, komunikační a infrastrukturní trasy apod.)

Rozhodující roli při výskytu a rozvoji požáru hraje komplex přírodních a antropogenních faktorů. Na základě těchto faktorů je možné hodnotit požární nebezpečí různých částí území a identifikovat zóny primární ochrany. Podle publikovaných výsledků jsou antropogenní faktory hlavní příčinou výskytu požárů (Martinez et al. 2009, Parente et al. 2017). Za základní rizikové faktory jsou považovány dopravní infrastruktura, komunikační trasy, osídlení, zemědělské pozemky, rekreační plochy a lidské aktivity v přírodě (Ganteaume et al. 2013, Le Page et al. 2010).

Riziko nebezpečí požárů se odhaduje na základě rizikových faktorů získaných v podobě vektorových dat z databáze ZABAGED měřítka 1 : 10 000 (ČÚZK) v rámci jednotlivých ploch 500x500 m pro určité území. Zranitelnost přiřazená jednotlivým plochám se vypočítává jako dílčí indikátor rizika označený I_{drf} (drf – další rizikové faktory):

$$I_{drf} = 1 - \sum_{i=1}^n k_i * p_i$$

kde k_i [(-1..)0..1] je váha jednotlivého faktoru, určující zvýšení (snížení) rizika přírodního požáru při výskytu daného faktoru (stanovíme ji expertně a dle databáze požárů z minulosti); p_i [0..1] je podíl plochy jednotlivého faktoru v dané dlaždici; n je počet základních rizikových faktorů. $I_{drf} = [0..1]$, kde $I_{drf} = 1$ znamená, že riziko požáru pro jednotlivé dlaždice je maximální a $I_{drf} = 0$ znamená, že riziko požáru je minimální. Detailní příklady využití jsou k dispozici v práci Trnky et al. (2020).

3.2. Popis algoritmů pro monitoring, předpověď a odhad míry aktuálního rizika přírodních požárů

Na evropské úrovni jsou požáry sledovány Evropským informačním systémem o lesních požárech (The European Forest Fire Information System – EFFIS, <https://effis.jrc.ec.europa.eu>). Od roku 2007 poskytuje systém EFFIS informace o riziku výskytu požárů za pomoci kanadského indexu *Fire weather index* (FWI) (Stocks et al., 1989), který byl za tímto účelem modifikován na evropské podmínky. Index FWI je důležitou součástí Kanadského systému hodnocení nebezpečí lesních požárů (*Canadian Forest Fire Danger Rating System* – CFFDRS), který byl původně vyvinut pro podmínky boreálního lesa. Později

byl však kanadský FWI adoptován i do oblastí, které se od klimatických podmínek Kanady značně liší, např. v zemích v oblasti Středomoří, jako je Řecko (Karali et al., 2014; Dimitrakopoulos et al., 2011), Portugalsko (Carvalho et al., 2015) nebo Španělsko (Paddilla a Vege-García, 2011). Dalším indexem, který se v Evropě používá k odhadu rizika požárů je finský *Finnish forest fire index* (FFI) (Heikinheimo et al., 1998). V období od května do září nebo začátku října Finský meteorologický institut na svých stránkách zveřejňuje riziko výskytu požárů (<https://en.ilmatieteenlaitos.fi>). V Austrálii se pro předpověď rizika požárů, kterou zveřejňuje australské Bureau of Meteorology (<http://www.bom.gov.au>), využívá index *Forest fire danger index* (FFDI) (McArthur, 1967).

V následujícím textu jsou popsány vstupní data a výpočet tří indexů pro odhad požárního počasí: FWI, FFDI, FFI.

3.2.1. Fire weather index (FWI)

FWI je finální index systému FWI, který je součástí kanadského systému monitoringu požárního nebezpečí – CFFDRS. Systém FWI má dohromady šest výstupů. Dva z těchto výstupů definují index FWI: index počátečního šíření (*Initial spread index* – ISI) a index nahromadění (*Buildup index* – BUI). Na základě normálových limitů indexu, může být FWI vyjádřen několika stupni: B, D, I a S, přičemž v této metodice bylo použito stupeňů S a B. Jednotlivé stupně byly odvozeny z grafu intenzity požárů na experimentální stanici Petawawa v Ontariu (Kanada) a to je i jeden z důvodů, proč před např. před použitím v oblasti středomoří nebo střední Evropy je nutné provést lokální kalibraci. V současnosti používaný stupeň B byl Van Wagnerem (1974) popsán následovně:

$$\ln S = 2.72 \times (0.434 \times \ln B)^{0.647}$$

kde S a B reprezentují stupně S a B indexu FWI.

Van Wagner definoval stupeň B indexu FWI takto:

$$B = 0.1 \times R \times f(D)$$

kde R je index počátečního šíření (Initial spread index) a f(D) je funkce vlhkosti humusové vrstvy.

3.2.2. Forest fire danger index (FFDI)

Australský index FFDI (Noble et al., 1980) lze vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$FFDI = 2e^{(-0.45 + 0.987 \ln(DF) - 0.0345 RH + 0.0338 T + 0.0234 u)}$$

kde T je teplota (°C), u je rychlost větru (km h⁻¹) a RH je relativní vlhkost (%). DF je Drought factor, (faktor sucha), tedy číslo od 1 do 10, které reprezentuje vliv nedávného průběhu teplot a srážek na dostupnost hořlavého materiálu.

3.2.3. Finnish forest fire index (FFI)

Hodnota FFI v zásadě vyjadřuje odhad půdní vlhkosti v povrchové vrstvě půdy, kterou lze určit následujícím vztahem (Heikinheimo et al., 1998):

$$DW = E_{pot} \times DE + P_i$$

kde DW (m³ m⁻³) je změna v objemové vlhkosti v povrchové vrstvě půdy, E_{pot} (mm) je potenciální evapotranspirace (ET). Pro operativní použití byla E_{pot} nahrazena denními úhrny referenční ET (ET_o) odvozené na základě výpočtu podle Penman-Monteithe (Allen et al., 1998). DE je efektivita vysoušení (z anglického „drying efficiency“), P_i (mm) je množství vody obsažené v povrchové vrstvě půdy.

Původní rovnici pro výpočet DW lze vyjádřit i takto (Vajda et al., 2014):

$$DW = E_{pot} \times \frac{0.757}{1 + e^{(2.74 - 16.67 \times (W_{vol} - 0.1))}} + 5.612 \times (1 - e^{(-P/5.612)})$$

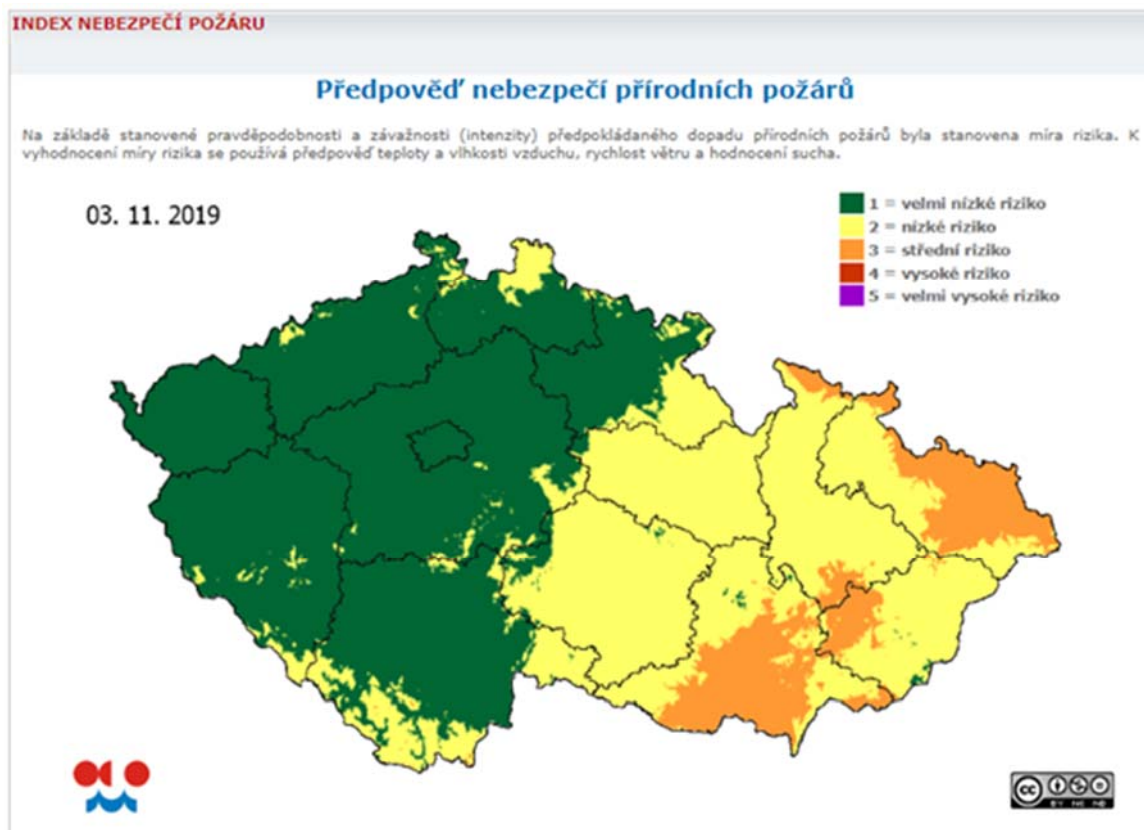
kde E_{pot} (mm) je potenciální ET, která byla pro operativní použití nahrazena denními úhrny referenční ET (ET_o) odvozené na základě výpočtu podle Penman-Monteithe (Allen et al., 1998). W (m³ m⁻³) je objemová vlhkost v povrchové vrstvě půdy a P (mm) jsou srážky.

Tab. 4. Kategorie nebezpečí požáru pro jednotlivé indexy pro odhad požárního počasí.

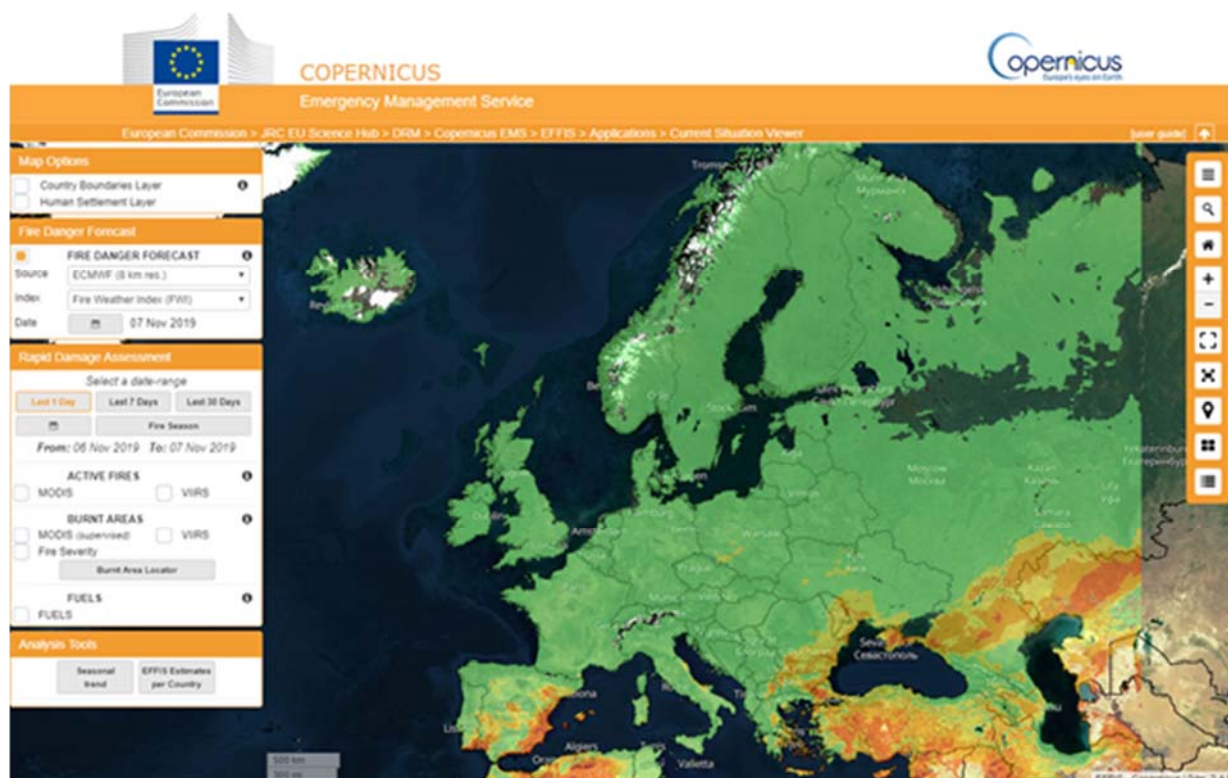
Index	FWI	FFDI	FFI
Zdroj původních kategorií	Van Wagner (1987)	Dowdy et al. (2010)	Vajda et al. (2014)
Nízké nebezpečí požáru	0–1	0–4	1.0–1.9
	2–4	5–11	2.0–2.9
	5–8	12–23	3.0–3.9
	9–16	24–49	4.0–4.9
Extrémní nebezpečí požáru	17–29	>50	5.0–5.9
	>30		6.0

3.3. Výsledky indexů pro odhad požárního počasí – validace metod odhadu rizika výskytu přírodních požárů s daty reálného výskytu lesních požárů

Jednou z možností, jak ověřit metody odhadu výskytu požárů je porovnat jejich výsledky s reálným výskytem požárů. Mezi nejpoužívanější metody odhadu výskytu požárů patří indexy pro odhad požárního počasí (anglicky *fire danger indices*). Od roku 2006 se pro hodnocení výskytu přírodních požárů v ČR používá index nebezpečí požáru (INP) (Možný a Bareš, 2013). Na základě INP uveřejňuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMI) na svých stránkách předpověď nebezpečí přírodních požárů (<http://portal.chmi.cz/predpovedi>).

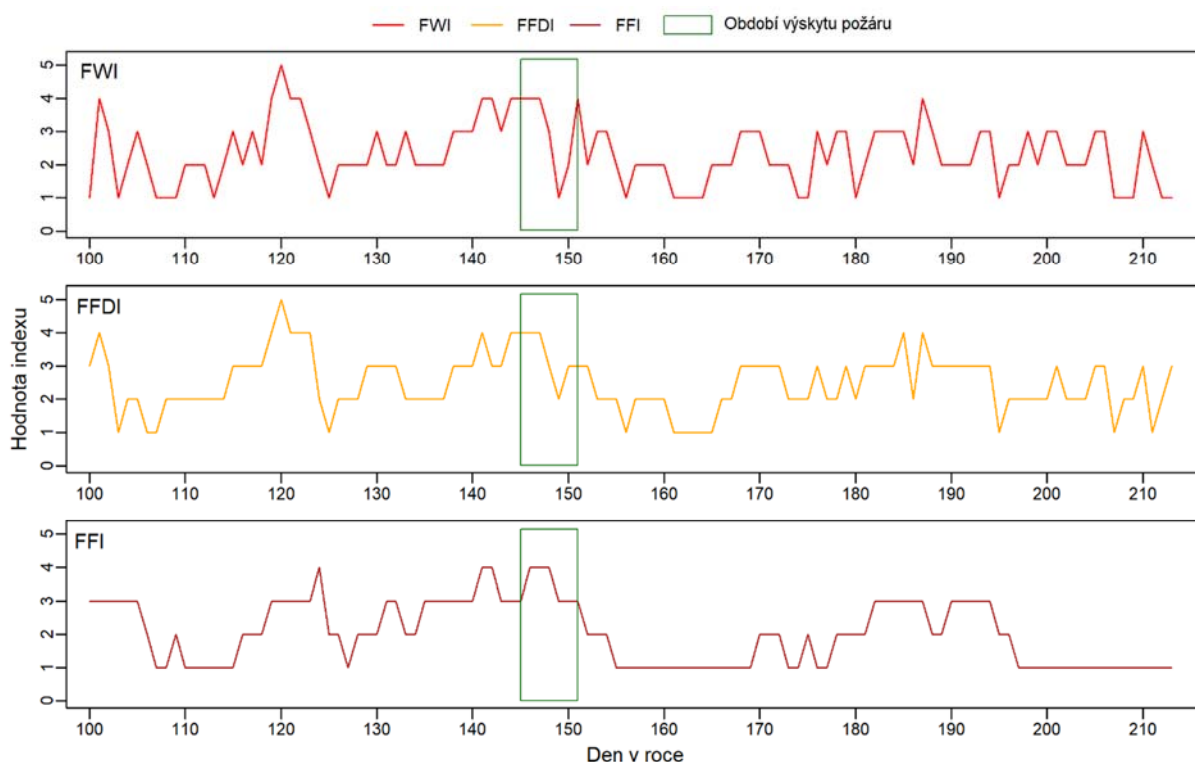


Obr. 43. Předpověď nebezpečí přírodních požárů podle indexu INP zveřejněná na portálu ČHMÚ.



Obr. 44. Mapa zobrazující riziko výskytu požárů na webových stránkách EFFIS. Předpověď je založena na kanadském indexu FWI.

Na rozdíl od jiných zemí střední Evropy (např. Slovensko v roce 1991, Polsko v roce 1992) se extrémní požáry s plošným rozsahem nad 1 000 ha v ČR zatím nevyskytly. Největší lesní požár na území ČR za posledních 20 let propukl v roce 2012 na Bzenecku, kdy byl zasažen borový porost o výměře 174 ha. Požár byl ohlášen 24. května v 16 hodin a hašení požáru bylo ukončeno 30. května v 10 hodin. V období od 20. do 28. května dosahoval index INP ≥ 4 , což odpovídá vysokému riziku výskytu požárů. K podobným výsledkům došel ve své studii i Jurečka et al. (2019). V této studii byl porovnán průběh tří indexů pro odhad požárního počasí (FWI, FFDI a FFI) pro oblast Bzenecka. Od 20. do 26. května všechny tři indexy téměř denně překročily hodnotu 4 (velmi vysoké riziko požárů). Poté až do 30. května indexy nepřesáhly hodnotu 3 (vysoké riziko požárů). Pouze FWI dosáhl hodnotu 4, avšak pouze v jediný den – 30. května (viz Obr. 45). V případě studií Jurečka et al. (2019) a Trnka et al. (2020b) byla použita pro tyto tři indexy společná stupnice od 1 do 5, kdy číslo 1 reprezentuje nízké nebezpečí požáru a číslo 5 extrémní.



Obr. 45. Průběh indexů pro odhad požárního počasí (FWI, FFDI a FFI) pro oblast Bzenecka, kde došlo v květnu 2012 k lesnímu požáru. Graf vykresluje období od 9. dubna do 31. července 2012 (100. – 213. den v roce). Zelený obdélník znázorňuje období výskytu požáru (24. až 30. května).

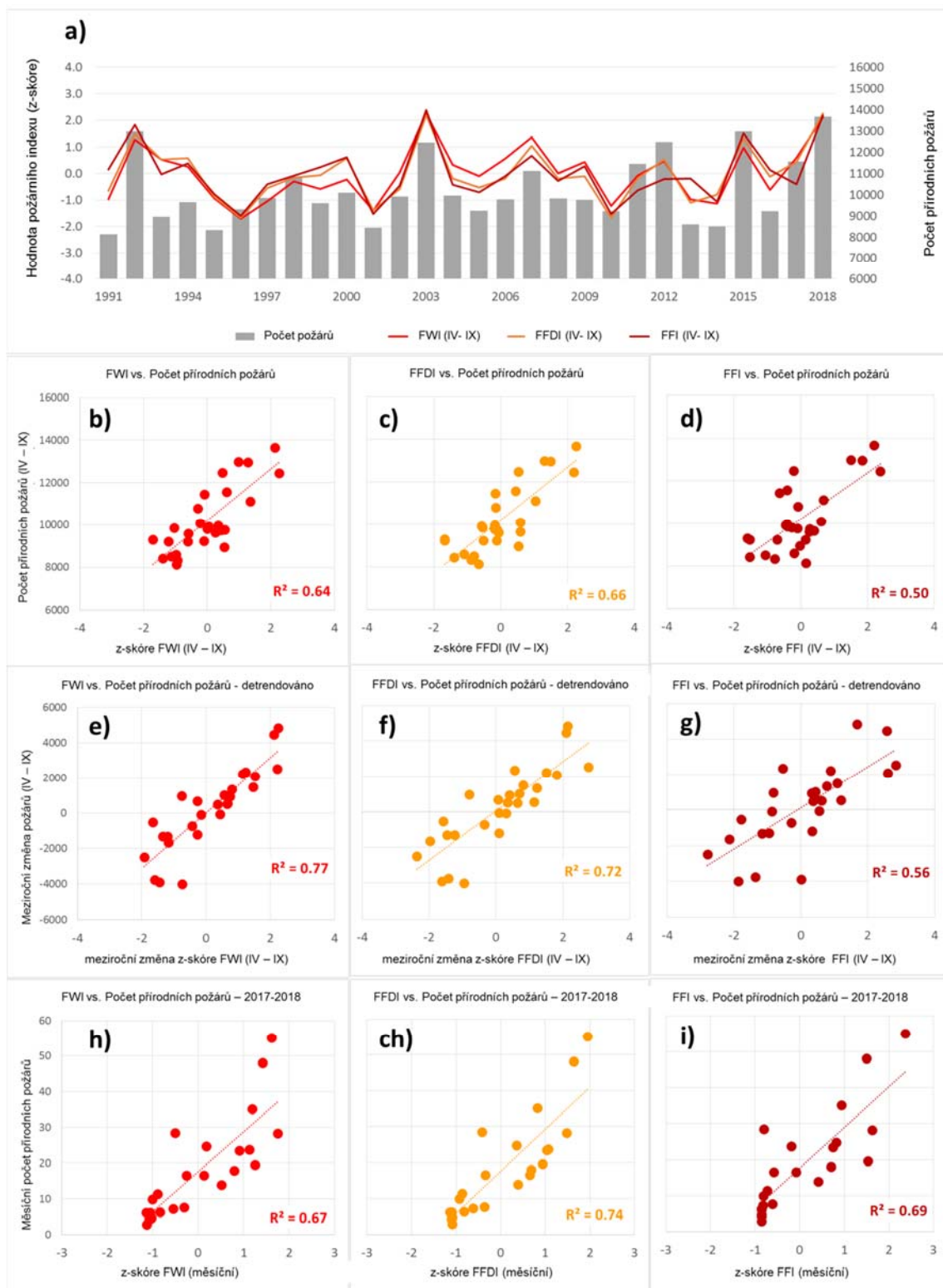
Zajímavé výsledky přináší porovnání indexů pro odhad požárního počasí s výskytem požárů na území ČR. Jurečka et al. (2019) porovnal průběh tří indexů pro odhad požárního počasí (FWI, FFDI a FFI) s počtem lesních požárů na území Jihomoravského kraje v průběhu roku 2018. Zdrojem dat o výskytu požárů byla databáze Hasičského záchranného sboru ČR (HZS ČR). Pro porovnání indexu s lesními požáry bylo vybráno období od ledna do září 2018. Hodnoty indexů se shodovali s výskytem lesních požárů zejména ve dnech, kdy došlo k vyššímu počtu požárů. Nejpatrnější byl tento jev ve dnech, kdy se vyskytlo alespoň pět požárů. Během těchto dnů dosahovaly indexy hodnoty mezi 3 a 4 (vysoké a velmi vysoké riziko požárů). Indexy FWI a FFDI často prokazovali podobný průběh, zatímco index FFI se v mnoha případech choval jinak a dosahoval nižších hodnot.

Trnka et al. (2020a) provedl porovnání těchto tří indexů (FWI, FFDI a FFI) s přírodními požáry během období 1991–2018 (viz Obr. 46a). Všechny tři indexy dosahovaly vysokých hodnot v letech s velkým

počtem požárů. Jmenovitě se jedná o roky 1992, 2003, 2007, 2011, 2012, 2015, 2017 a 2018. V letech 1992, 2003, 2012, 2015 a 2018 se počet požárů na území ČR pohyboval mezi 12 a 14 tisíci ročně (podle databáze HZS ČR).

K podobným závěrům dospěl i Možný a Bareš (2013), kteří analyzovali nebezpečí výskytu požárů na území ČR pomocí INP během období 1951–2013. Nejvyšší počet dnů s $IPN \geq 4$ byl zaznamenán v letech 2012 (102 dnů), 1976 (95), 2007 (81), 1973 (78), 2011 (76), 1992 (71) a 2003 (68). Podle této studie roky 1992, 2003, 2007 a 2012 zároveň představovaly roky s nevyšším počtem lesních požárů za posledních 22 let.

Avšak studie Trnky et al. (2020) přináší nejpodrobnější srovnání charakteristik požárního počasí a počtu zaznamenaných incidentů s požárem (tj. Hlášeného požáru vegetace mimo intravilán). Tato analýza byla provedena za období 1991–2018, pro které byly k dispozici roční záznamy o počtu incidentů. Poté ještě detailnější za období 2017–2018 kdy Hasičský záchranný sbor České republiky poskytl podrobnější denní záznamy. Výstupy v práci Trnky et al. (2020) ukazují, že mezi všemi v této metodice použitými indikátory požárního počasí existoval statisticky významný vztah a celkovým počtem požárů v České republice, a to jak v ročním souhrnu, tak v denním, týdenním a měsíčním kroku úrovně. Indikátory požárního počasí, které představovali jednoduché a dlouhodobé indexy sucha, tj. PDSI a SPEI-6, obecně vykazovaly méně těsný vztah než zbytek indexů. Slibné výsledky poskytovaly metriky založené na podrobnějším modelu vlhkosti půdy (AWR1, AWD1) nebo evapotranspirace (ETO). Ve všech časových škálách, které byly testovány, výsledky ukázaly, že změny v počtu požárů lze do značné míry vysvětlit pomocí indexů požárního počasí, tj. FFDI, FWI a FFI, jakož i sytostní doplněk (VPD). Přestože se VPD jevil jako velmi slibný ukazatel výskytu požárů v České republice, je jeho interpretace obtížnější v případě indexů požárního počasí. Proto byla dána přednost výše zmíněným indexům i v této metodice. Obr. 46a převzatý z práce Trnky et al. (2020) dokumentuje, že roční fluktuace v celostátních FWI a FFDI mohly vysvětlit 64 % a 66 % odpovídající variability v počtu požárů během období 1991–2018 a FFI vysvětlila 52% variability (Obr. 46b–d). Zdá se, že tento výsledek naznačuje důležitost zahrnutí údajů o rychlosti větru jako důležitého faktoru při výpočtu rizika požárního počasí za podmínek v České republice. V případě že byly absolutní hodnoty nahrazeny ročními změnami sezónní hodnoty daného indexu požárního počasí a změnou počtu požárů (Obr. 46e–g) výše zmíněné vazby se dále potvrdily. Podrobnější údaje o požáru umožnily analyzovat vztah mezi měsíčními (Obr. 46h–j) a denními (neuvezeno) charakteristikami požárního počasí a výskytem požáru v letech 2017 až 2018. Výsledky potvrdily robustní vztah mezi měsíčním a denním počet požárů a indexů požárního počasí použité v této metodice. Všechny tři indexy požárního počasí do značné míry odrážely sezónní i meziroční změny v počtu požárů (Obr. 46b–j) a vysvětlily 44 % (FFI) až 61% (FFDI) denních výkyvů v počtu požárů (během 2017 a 2018 sezón). Pro důkladné posouzení dopadů budoucích klimatických změn na požární povětrnostní podmínky v regionu byly pro následné analýzy použity všechny tři diskutované indexy požárního počasí (tj. FWI, FFDI a FFI) a v případě portálu FireRisk pak dva nejlépe se osvědčující indexy tj. FWI a FFDI.



Obr. 46. a) Kolísání celkového počtu požárů a plošných průměrů tří indexů požárního počasí (FWI, FFDI a FFI) za duben–září. b–d) Vztah mezi agregovanými hodnotami tří indexů požárního počasí (vyjádřených jako z-skóre) a celkovým počtem požárů od dubna do září. e–f) Vztahy mezi diferencí 1. stupně ve třech indexech požárního počasí (vyjádřeno jako z-skóre) a celkovým počtem požárů od dubna do září. Panely b–g zachycují období mezi lety 1991 a 2018. Panely h–i představují vztahy mezi měsíčními součty tří indexů požárního počasí (vyjádřeno jako z-skóre) a celkovým měsíčním počtem požárů mezi lety 2017 a 2018.

4. Předvídání požárního rizika v podmínkách měnícího se klimatu a využití znalostí pro posouzení rizik

4.1.1. Trendy požárního počasí v období 1956–2018

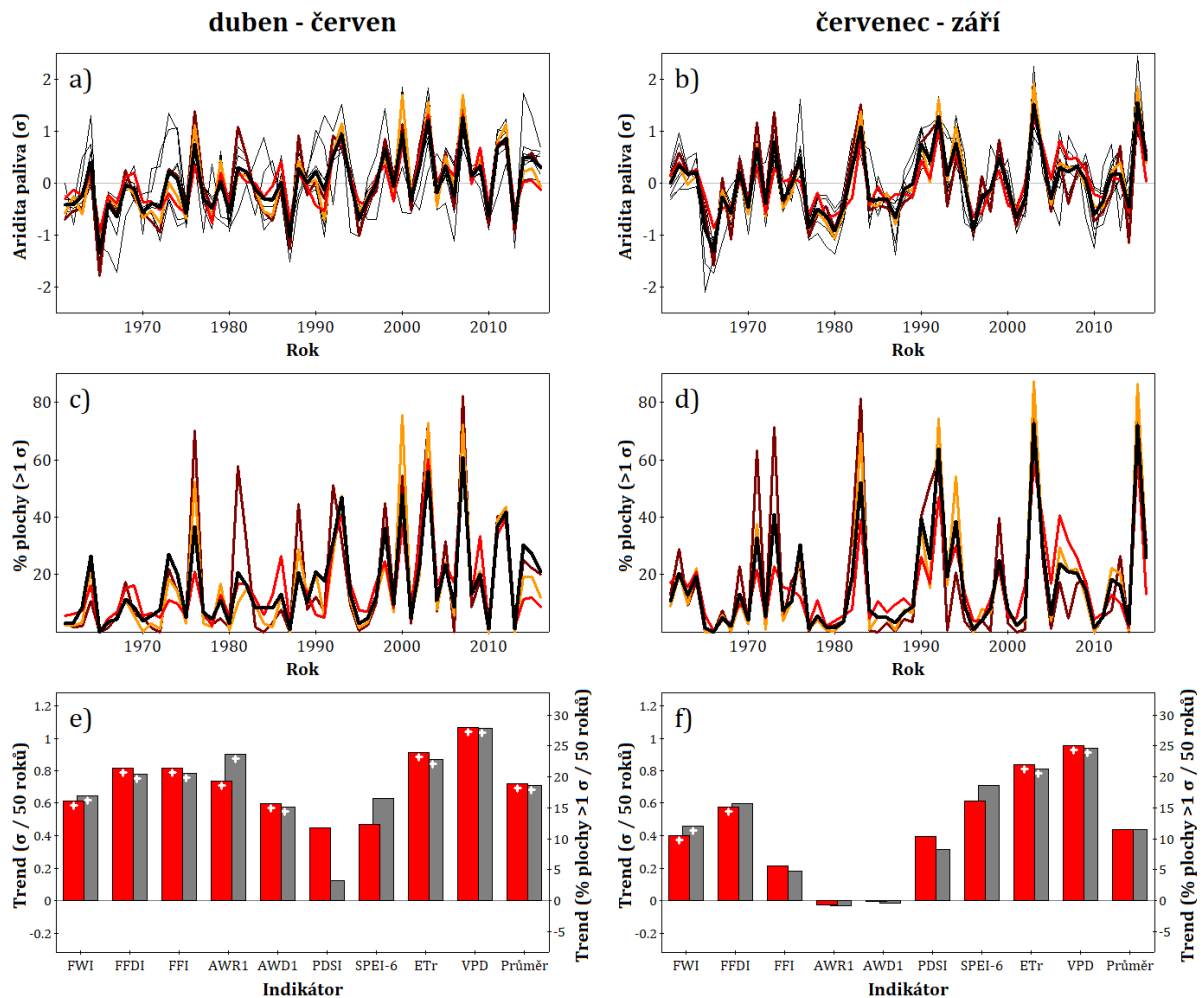
V České republice se doposud požáry s rozsahem v řádu hektarů až desítek hektarů vyskytují výjimečně a naprostá většina požárů je rychle uhašena. Nedávné analýzy Trnky et al. (2015) a Brázdila et al. (2016) však jasně poukázaly na obecný pokles vlhkosti půdy a nárůst počtu suchých a horkých dnů v posledních dekádách, což jsou dva velmi důležité faktory ovlivňující četnost a intenzitu přírodních požárů. Tyto změny pravděpodobně přispěly ke statisticky významnému zvýšení četnosti požárů mezi lety 1971 a 2015 (Možný et al., 2019). Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, na území České republiky se v jejích moderních dějinách dosud nevyskytly požáry s rozlohou větší než 1 000 hektarů, nicméně rozsáhlé požáry jsou známé ze sousedních zemí: 1975 - Německo (Lüneburg) - zasažená plocha 7 418 ha; 1991 - Slovensko (Lozorno a Malacky) - 1 171 ha; 1992 - Polsko (Kuźnia Raciborska) - 9 062 ha. K největšímu požáru v České republice za posledních 30 let došlo v borovém lese u Bzence na jihovýchodní Moravě v roce 2012, kdy v přímém důsledku sucha v letech 2011–2012 shořelo 174 hektarů lesa (Zahradníček et al., 2015).

Abychom posoudili dopady klimatických trendů na vlhkost potenciálního paliva a tím i míru požárního rizika použili jsme devět indikátorů požárního počasí (IPP), z nichž některé byly použity v podobných studiích v nedávné minulosti. Díky tomu je prokázána jejich vazba na rozsah a intenzitu požárů (např. Abatzoglou a Williams, 2016; Williams a kol., 2015). Tyto se skládají z následujících parametrů (i) referenční evapotranspirace (ET₀) založené na metodice FAO56 (Hlavinka et al., 2011); (ii) deficit tlaku vodních par (VPD); (iii) Fire weather indexu tzv. FWI (Stocks a kol., 1989); (iv) McArthurova indexu FFDI (McArthur, 1967); (v) Finského indexu lesních požárů tj. FFI (Heikinheimo et al., 1998); (vi) indexu intenzity sucha podle Palmera (PDSI) vypočteného s modifikacemi popsány v Buntgen et al. (2011); (vii) standardizovaného srážkově evapotranspiračního indexu (SPEI) agregovaný za 6 měsíců (Vicente-Serrano et al., 2010); (viii) relativního nasycení půdy ve vrstvě vrchní půdy (AWR₁); a (ix) sezónního deficitu dostupné vlhkosti půdy v horní vrstvě (AWD₁). Metriky (i), (viii) a (ix) byly brány jako výstupy z modelu SoilClim (Hlavinka a kol., 2011), poskytující ukazatele provozního sucha na národní úrovni (Trnka et al., 2015) v rámci systému InterSucho. Všechny metriky jsou součástí výpočtů prováděných v rámci národního systému pro monitoring přírodních požárů – www.firerisk.cz.

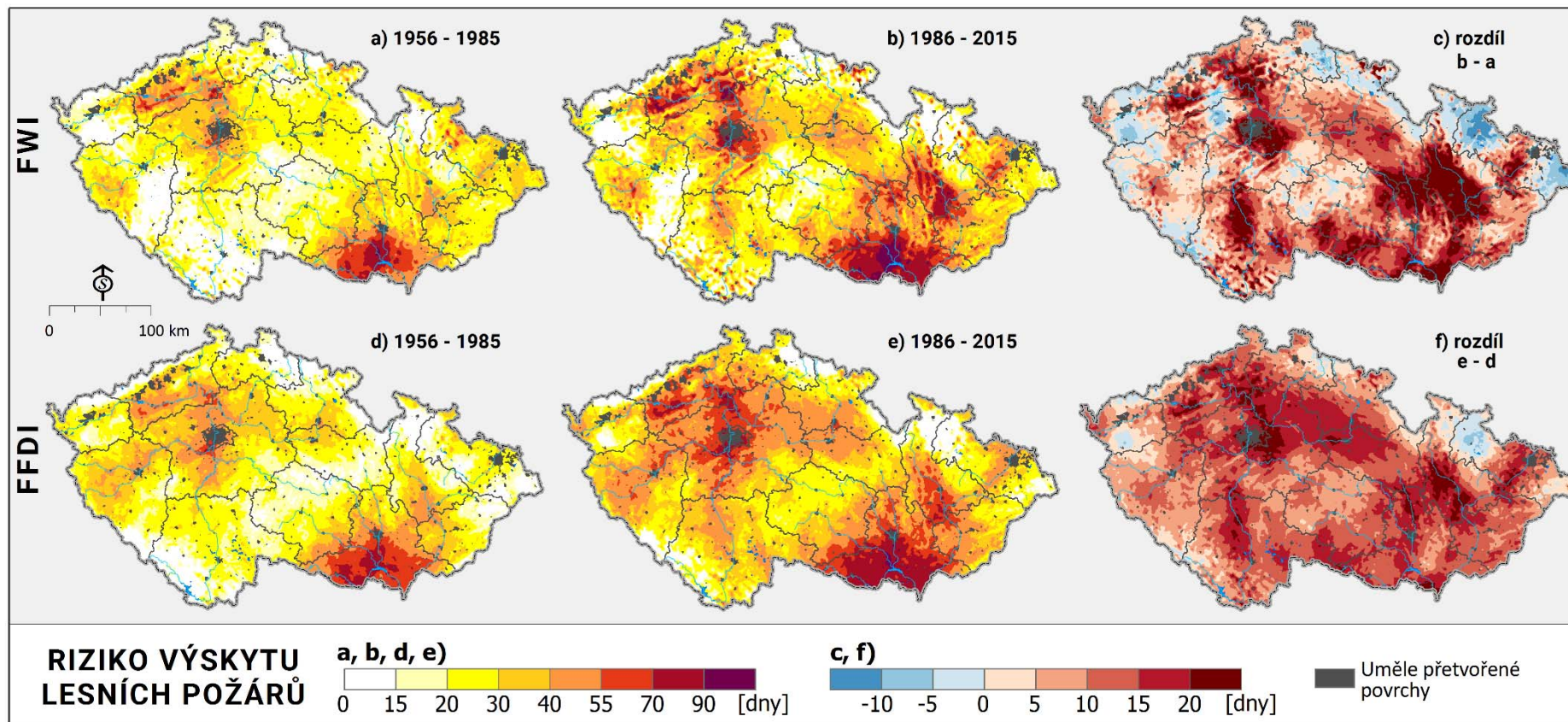
K výpočtu trendů jednotlivých IPP v rámci této studie byly použity denní dlouhodobá měření meteorologických dat z 268 klimatologických a 787 srážkoměrných stanic Českého hydrometeorologického ústavu. Tato data kombinují všechny klíčové proměnné počasí včetně denního průměru, teploty v 14:00 hod, maximální a minimální teploty [° C]; denní průměrné relativní vlhkosti vzduchu [%]; srážek [mm.den-1]; globálního slunečního záření [MJ-m-2. den-1] a rychlosti větru [ms-1]. Tato data jsou metodou používanou pro chod systému monitorování sucha (www.intersucho.cz), interpolovány do pravidelného rastru 500×500 m sítí. Srážky byly měřeny od 7:00 do daného dne do 7:00 následujícího dne. Všechny ostatní parametry počasí jsou založeny na datech za 0–24 hodin. Denní vstupní data byla použita pro výpočet ET₀, VPD, FWI, FFDI, FFI, AWR₁ a AWD₁. Pro výpočet PDSI a SPEI byly použity měsíční údaje. Ve všech indikátorech požárního počasí vyžadujících potenciální evapotranspiraci jako vstup jsme použili ET₀, protože zahrnuje jak vliv VPD, tak rychlosti větru na rozdíl od některých jiných dostupných alternativ výpočtu potenciální evapotranspirace.

PDSI byla vypočítána pomocí měsíčních údajů ETo, srážek a retenční schopnosti půdy v gridu rozlišením 500×500 m. Měsíční průměrný VPD byl odhadnut z denních rozdílů mezi střední specifickou vlhkostí a odhadovaným tlakem povrchového vzduchu na základě nadmořské výšky dle Abatzoglou a Williamse (2016). Výpočty FWI, FFDI a FFI použily své původní algoritmy. Stručný přehled výpočtových postupů pro tři požární indexy používané pro české podmínky je v předchozí kapitole a zhodnocen v práci Jurečky et al. (2018).

Trendová analýza všech indikátorů požárního počasí (IPP) agregovaných pro období duben–červen napříč zemědělskými a zalesněnými oblastmi České republiky jasně dokladují výrazný nárůst svých hodnot v letech 1956–2015, s lineárním trendem $0,6\sigma$ (Obr. 47). Stejný trend za červenec–září dosáhl $0,4\sigma$ a ačkoliv nebyl statisticky významný indikuje spíše zvýšení aridity paliva a tím i rizika požáru. Zatímco indikátory SPEI-6 a PDSI nevykazovaly významné trendy v žádném z posuzovaných částí vegetační sezóny u FWI byly potvrzeny statisticky významné trendy v obou částech teplého půlroku (Obr. 47e–f). Další dva specifické indexy tj. FFDI a FFI vykazaly statisticky významný nárůst rizika v dubnu až červnu. Oblasti zemědělské a lesní půdy zasažené zvyšujícím se výskytem požáru ($> 1\sigma$) se v letech 1956–2015 a zejména od roku 1990 výrazně zvýšily (Obr. 47c–d). Rozsahy oblastí s vysokou ariditou paliva se v letech 2000–2015 více než zdvojnásobil ve srovnání s hodnotami v letech 1961–1975 (z 10,6% na 22,4%). Významné pozitivní trendy v oblasti s vysokou ariditou paliva ($> 1\sigma$) byly pozorovány v období duben–červen pro všechny indikátory IPP (Obr. 47e – f), s výjimkou PDSI a SPEI-6. V období červenec–září vykazovaly významné zvýšení hodnot FWI, ETo a VPD, přičemž hodnoty SPEI-6 a FFDI byly blízko úrovně významnosti 0,05. Všechny indikátory však vykazovaly rostoucí tendence v obou analyzovaných obdobích (s výjimkou AWR1 a AWD1 za červenec–září). Ke změnám nedošlo na celém území ČR se stejnou intenzitou v období 1956–2015 (Obr. 48). Při analýze prvních 30 let tohoto období nebyl počet dní s velmi vysokým rizikem lesního požáru vyšší než 10% (tj. 9 dní) za období duben–červen a toto riziko se týkalo pouze malého regionu na jihovýchodě ČR. Ve druhé polovině teplého půlroku (červenec–září) byla situace podobná. Tato situace se v letech 1986 až 2015 výrazně změnila. Objevily se dva nové regiony s obecně vysokým počtem pro přírodní požáry příznivých podmínek a to jak na základě FWI tak i FFDI. Tyto regiony se dle obr. 48 nacházejí na jižní a střední Moravě, a dále v okolí Prahy a na severozápad od ní.



Obr. 47. Časová dynamika (a–d) a trendy (e–f) v hodnotách indexů požárního počasí (IPP) na zemědělské a lesní půdě v dubnu až červnu (a, c, e) a červenci až září (b, d, f) během let 1956–2015. Panely (a–b) zachycují sezónní změny ve standardizovaných hodnotách ISP a panely (c–d) zobrazují plochu s danou metrikou IPP vyšší než 1σ . Tučně černé čáry označují průměr všech testovaných IPP. Červené čáry ukazují hodnoty založené na FWI; oranžová, FFDI; a fialová, FFI. Tenké černé čáry v (a–b) ukazují zbývající IPP; lineární trendy standardizovaných IPP (e–f) zobrazují jak trendy v jejich celkových hodnotách (červené), tak trendy ploše s odchylkou větší než 1σ (šedé) v letech 1956–2015. Znaménko + označuje statisticky významný pozitivní trend na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.



Obr. 48. Průměrný počet dní (a, b, d, e) s vysokým rizikem výskytu požáru podle indexů lesního požáru FWI a FFDI a rozdíl (c, f) mezi lety 1986–2015 a 1956–1985 pro Období duben–září. Výpočet je založen meteorologických datech v rastru 500 × 500 m a zohledňuje převládající typ využití území.

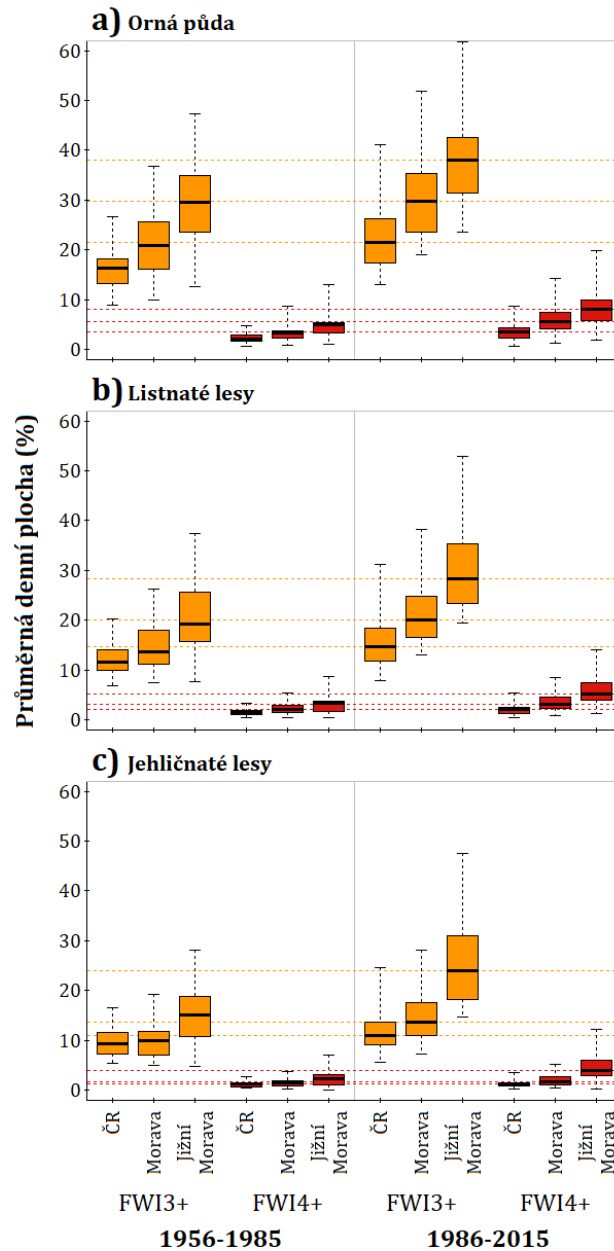
4.1.2. Očekávaný vývoj požárního počasí v období 2021–2080

K analýze budoucích klimatických podmínek jsme použili výstupů simulací globálních (GCM) i regionálních (RCM) modelů cirkulace atmosféry. V případě RCM se práce opírá o data EURO-CORDEX, (www.euro-cordex.net: poslední přístup 20. září 2018). Ta jsou založena na využití nejmodernějších RCM pro které vnější podmínky určují modely globální cirkulace (GCM) ze souboru *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5). V této studii jsme použili následujících pět párů GCM / RCM v prostorovém rozlišení 0,11 ° pro RCP4.5 (Clarke et al., 2007): EURO-CORDEX: CNRM-CM5 / ALADIN53, EC-EARTH / RACMO22E, EC-EARTH / RCA4, MOHC-HADGEM2-ES / RCA4 a MPI-ESM-LR / CCLM4.8.17. Jejich volba byla ovlivněna dostupností údajů EURO-CORDEX v době přípravy této metodiky a snahou zachytit různé RCM a jejich řídicí GCM. Všechny RCM simulace byly korigovány pomocí kvantilové korekce Štěpánek et al., (2016). Pro korekci zkreslení bylo použito celkem 212 meteorologických stanic s denními srážkami a 119 stanic v případě ostatních meteorologických prvků. Korekce byla založena na období 1981–2010.

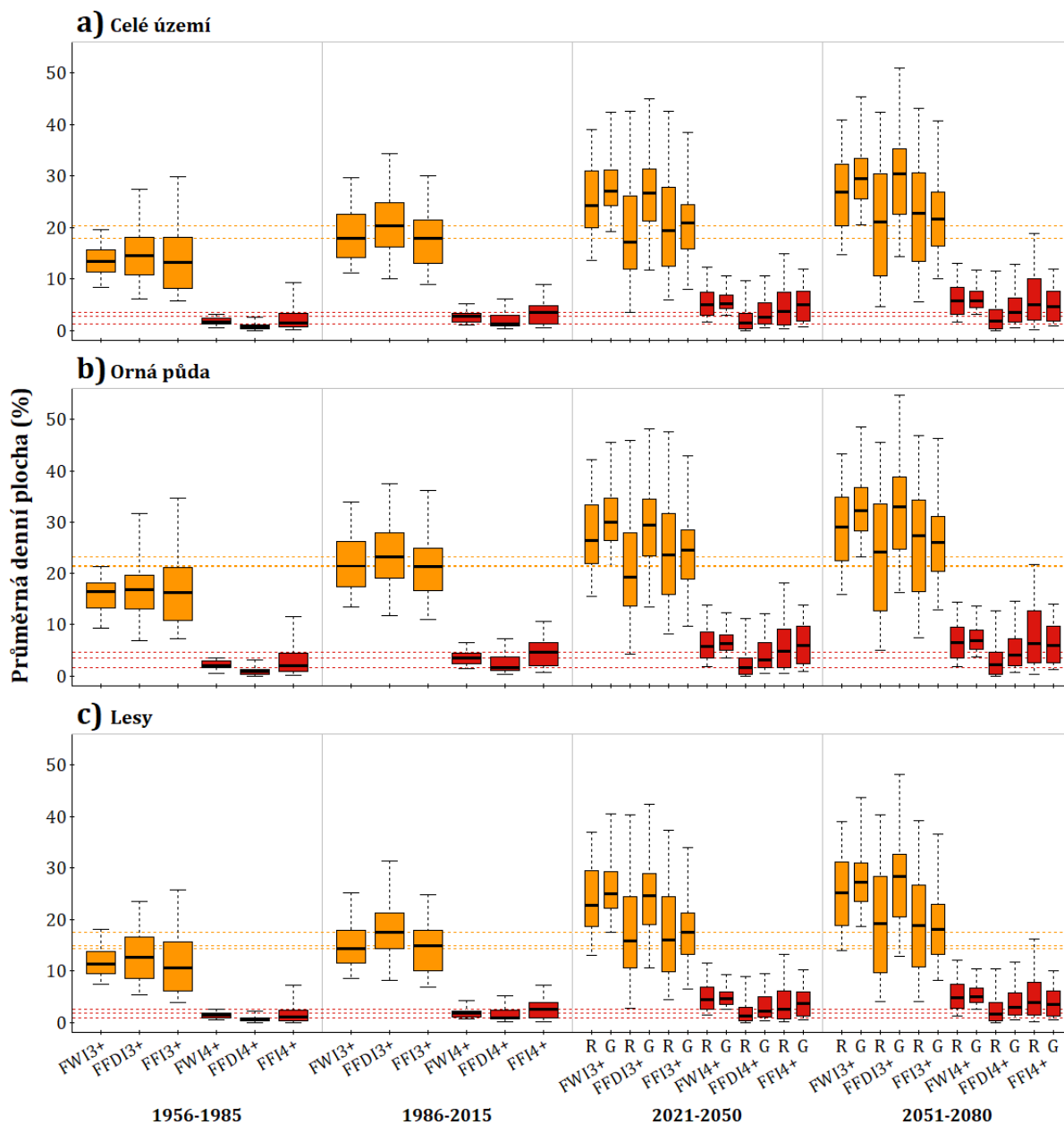
Kromě metody RCM byly současně využity i scénáře vývoje klimatu založené na pěti GCM metodou delta přístupu (více viz Trnka et al., (2016)). Z GCM dostupných v rámci CMIP-5 byl k reprezentaci středního odhadu využit model IPSL z institutu Pierre Simone Laplace, Francie. K co nejlepšímu zachycení variability očekávaných změn srážek a teploty pak následující čtveřice modelů (BNU - Pekingská univerzita v Číně; MRI - Meteorologický výzkumný ústav, Japonsko; CNRM - Národní středisko pro meteorologický výzkum, Francie a HadGEM - Hadley Center Global Environment Model, UK). Tyto modely byly vybrány ze 40 klimatických modelů dostupných v databázi CMIP5 (Taylor et al., 2011) a to podle metodiky popsané Dubrovským et al. (2014). I v případě GCM modelů je použit RCP4.5 a klimatická citlivost odpovídající 3,0 °C nárůstu teploty při zdvojnásobení koncentrace CO₂ oproti kontrolnímu období tj. 1961–2000. Odhady budoucího klimatu založená jak na RCM i GCM byly připraveny v rastru 500 x 500 m.

Všechny tři ukazatele požárního počasí jsme použili k znázornění důsledků očekávaných změn klimatických na četnost výskytu podmínek příznivých pro vznik požárů. Obr. A7 ukazuje, že počet dní s vysokým rizikem požáru se s největší pravděpodobností zvýší během 21. století, a to poměrně výrazně. Všechny tři ukazatele požárního počasí naznačují prokazatelné a statisticky významné zvýšení (ve srovnání s referenčním obdobím 1986–2015) během období 2051–2080, bez ohledu na to, zda byly použity scénáře založené na RCM nebo GCM, a totéž platilo pro dny s velmi vysokým rizikem požáru. Změny četnosti pro požár příznivých podmínek se u jednotlivých typů využití území lišily a výsledky jsou zde uvedeny pro celkovou plochu, ornou a zalesněnou půdu (Obr. 50). Zatímco mezi lety 1956–1985 a 1986–2015 je zřetelně patrné výrazné zvýšení četnosti vysokého a zejména velmi vysokého nebezpečí požárního počasí pro ornou půdu, nárůst byl pro zalesněnou půdu malý. V očekávaných klimatických podmínkách však dochází k výrazné zvýšení plochy území s výskytem pro požár příznivého počasí, které je vysokým rizikem požáru bez ohledu na index požárního počasí nebo použitý typ klimatického scénáře, i když různou rychlostí. Výskyt dní s velmi vysokým rizikem se výrazně zvýšil. Mezi jednotlivými RCM a GCM byly značné rozdíly, které představovaly širokou škálu proměnlivosti klimatu, ale i RCM s nejnižší předpokládanou změnou požárního počasí vedly ke zvýšenému výskytu dnů požárního počasí po 2051 ve srovnání s obdobím v období 1986–2015. Zároveň jsou patrné rozdíly mezi projekcemi založenými na RCM a GCM byly významné a představovaly nejistotu změny klimatu; jejich rozsahy vykazovaly značné celkové a shodné trendy. Odhady založené na GCM vedly k nejvyšší míře změny charakteristik požárního počasí (Obr. 50). Zatímco variabilita mezi odhady na základě jak RCM tak GCM existuje, výsledky prokázala jejich

poměrně dobrou shodu. O robustnosti výsledků také svědčí fakt, že celkové trendy napříč různými typy využití byly podobné bez ohledu na to, zda byly založeny na FWI, FFI nebo FFDI.



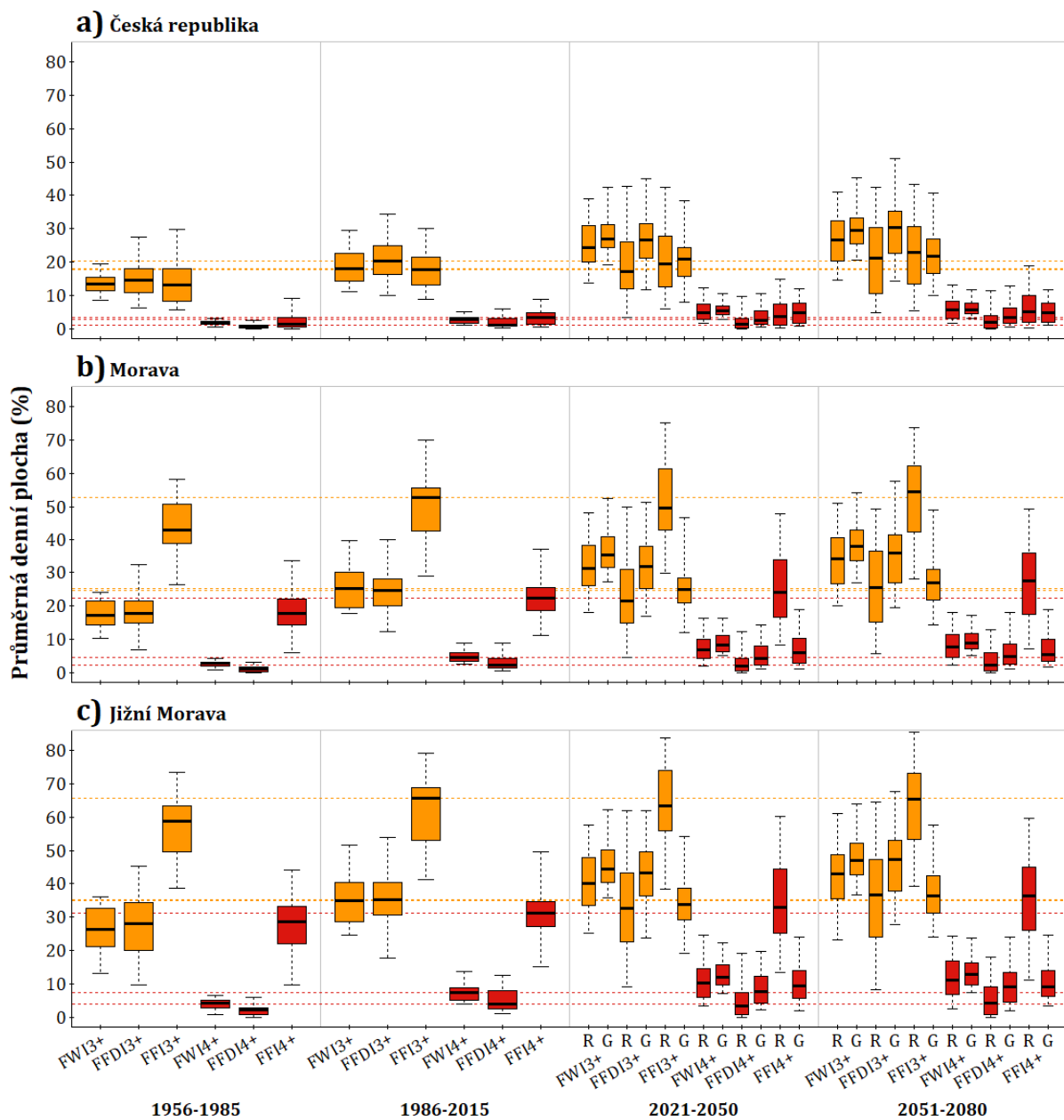
Obr. 49. Krabicové grafy (střední, dolní a horní kvartily, 5. a 95. percentily) průměrné denní plochy s požárním počasím s vysokým (FWI3+) a velmi vysokým (FWI4+) rizikem výskytu požáru, jak je hodnoceno FWI pro ornou půdu (a), listnaté lesy (b) a jehličnaté lesy (c) a jejich změny mezi obdobími 1956–1985 a 1986–2015. Tečkované čáry vymezují střední hodnoty pro každou oblast / kategorii v období 1956–1985. Údaje za všechny tři typy využití území jsou agregovány za celou Českou republiku (CZ), Moravu a jižní Moravu.



Obr. 50. Boxové parcely (střední, dolní a horní kvartily, 5. a 95. percentily) oblasti zasažené požárním počasím duben – září podle hodnocení indexů požáru FWI, FFDI a FFI s vysokým (3+) a velmi vysokým (4+) rizikem. Hodnoty indexů byly hodnoceny pro celé území České republiky (a), ornou půdu (b) a lesy (c) pro dvě sledovaná období 1956–1985 a 1986–2015 a dvě 30letá období do roku 2080. na základě souboru pěti RCM (R) a pěti GCM (G). Tečkované čáry vymezují střední hodnotu pro každou kategorii v období 1956–1985.

Nadmořská výška hraje důležitou roli při výskytu požárního počasí i při určování důsledků změny klimatu. Zatímco plochy pod 500 m n. m. vykazovaly výrazný nárůst výskytu dnů s vysokým a velmi vysokým rizikem požáru v období 1956–1985 a 1986–2015, oblasti nad 500 m n. m. vykazovaly téměř žádnou nebo velmi malou změnu. V tomto případě vykazovaly FFDI největší nárůst ve vysokých nadmořských výškách. Analýza rychlosti změny ukázala, že vysoké nadmořské výšky byly progresivně více ohrožovány výskytem požáru příznivého počasí. Během období 2021–2050 mohly výšky nad 500 m n. m. stejné úrovně rizika jako plochy pod 500 m n. m. dosáhnout v letech 1986–2015. Stejnou tendenci bylo možné pozorovat i pro dny s velmi vysokou pravděpodobností vzniku požáru.

Zatímco Obr. 47 a Obr. 49 znázorňují významné rozdíly v charakteristikách požárního počasí mezi celým českým územím a Moravou a jižní Moravou zvláště, celkový dopad změny klimatu byl srovnatelný ve všech třech oblastech agregace (Obr. 51). V budoucím klimatu bude na Moravě a na jižní Moravě zvláště mnohem větší pravděpodobnost dnů s vysokým nebo velmi vysokým rizikem požáru než ve zbytku země (Obr. 51). Na základě tří indexů požárního počasí bylo přibližně 15–20 % dnů ovlivněno vysoce rizikovým požárním počasím v období 1986–2015 v celé České republice ve srovnání s 35 až 60 % dní na jižní Moravě. Výrazně vyšší hodnoty FFI pro Moravu a jižní Moravu byly způsobeny mnohem vyšším výskytem suchých povrchů (a mnohem častějším překračováním prahových hodnot), které mají vysoký vliv na hodnoty FFI.



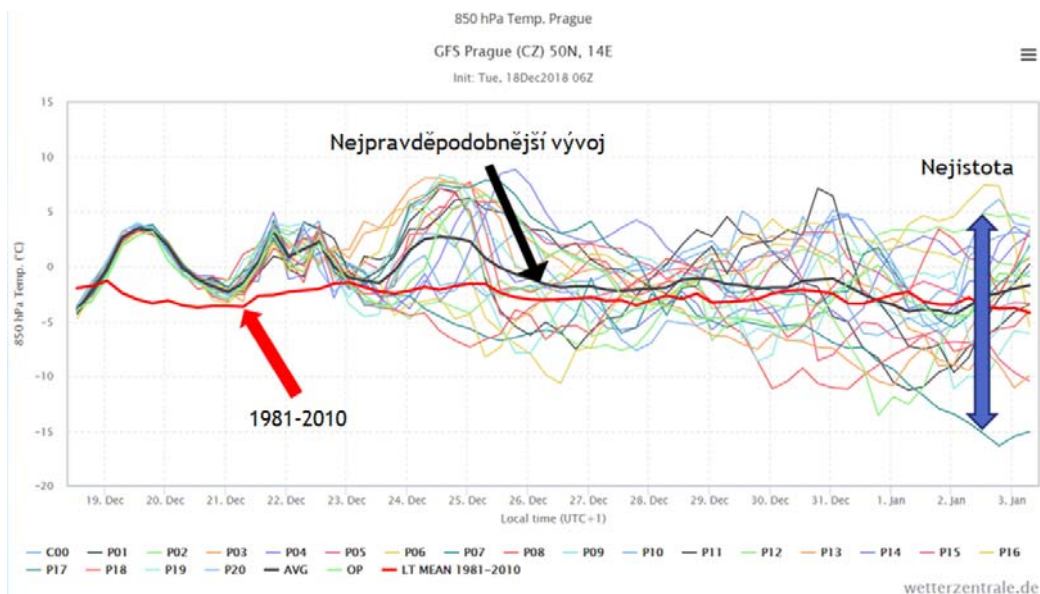
Obr. 51. Krabicové grafy (střední, dolní a horní kvartily, 5. a 95. percentily) oblasti zasažené požárním počasím duben–září podle hodnocení indexů požáru FWI, FFDI a FFI s vysokým (3+) a velmi vysokým (4+) rizikem. Hodnoty indexu byly vyhodnoceny pro všechny sítě nad územím České republiky (a), Morava (b) a Jižní Morava (c) pro dvě sledovaná období 1956–1985 a 1986–2015 a dvě 30letá období do roku 2080 na základě souborů pět RCM (R) a pět GCM (G). Tečkované čáry vymezují střední hodnotu pro každou kategorii v období 1956–1985.

5. Monitoring a předpověď rizika lesních požárů jako nástroj pro operativní redukci míry rizika

5.1. Krátkodobé a střednědobé numerické předpovědi počasí pro vyhodnocení vlivu meteorologických podmínek na vznik přírodních požárů

Rozvoj počítačové techniky a kosmonautiky společně se snahou lépe předpovídat živelné katastrofy se v meteorologii na sklonku 20. století projevily rozvojem nových přístupů k předpovědi počasí. Od této doby hraje v předpovědích stále důležitější roli použití modelů, které se zvyšující se přesností a spolehlivostí nahrazují starší, popisné metodologie předpovědi. Základním nástrojem numerické předpovědi počasí je takzvaný numerický předpovědní model. Jeho jádrem je soustava nelineárních parciálních diferenciálních rovnic, které v daném bodě nad zemským povrchem popisují probíhající fyzikální děje v atmosféře. Tyto rovnice nemají konvenční analytické řešení a musí se proto řešit metodami numerické matematiky. Tento způsob řešení dal jméno celému oboru.

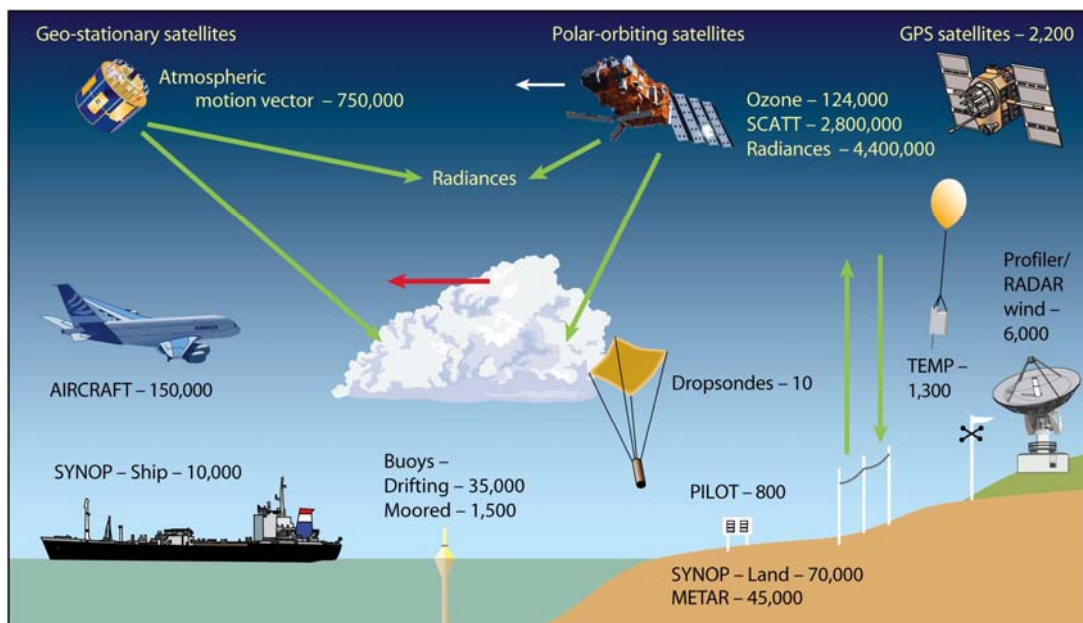
V předpovědi počasí panuje značná nejistota, a proto se v praxi nespolehneme pouze na výstupy jednoho modelu. V současné meteorologii existují dva základní přístupy k použití modelů. Jeden je deterministický, který předpokládá, že se počasí bude vyvíjet pouze jedním směrem. Druhým je předpověď ensemblová (skupinová), která uvažuje různé možné vývoje počasí za daných podmínek (Obr. 52). Medián (tedy střed) z těchto několika větví reprezentuje nejpravděpodobnější předpověď. Ensemblová předpověď se používá především v předpovědi počasí na více dní dopředu, typicky 10–15 (střednědobá předpověď). Každý individuální numerický předpovědní model (ty se počítají v různých centrech po celém světě) má svoje výhody a nevýhody, které jsou dané jeho fyzikálním nastavením a naladěním parametrů. To znamená, že za určitých meteorologických situací může předpovídat lépe než jiný model anebo je přesnější v určitém meteorologickém prvku, ale poskytuje naopak slabší výsledky za jiných situací nebo u jiného prvku. Jako příklad můžeme uvést americký model GFS, který například v létě nadhodnocuje srážky v bouřkových situacích, což je to dáno tím, že díky svému nastavení předpovídá více vzdušné vlhkosti. Proto náš koncept je založen na více modelech a tím se chyby v konečném výstupu eliminují. Kromě toho ještě navíc každý model statisticky korigujeme (opravujeme jeho chyby typické pouze pro naše území) na základě skutečných (naměřených) dat ze stanic.



Obr. 52. Ensemblová předpověď počasí z numerického předpovědního modelu GFS (www.wetterzentrale.de)

Pro výpočet rizika přírodních požárů používáme globální numerické modely předpovědi počasí v jejich deterministických verzích. Globální verze modelů upřednostňujeme z důvodu, že oproti regionálním verzím poskytují předpovědi počasí na delší dobu dopředu – typicky na více než 5 dní, ale mají naproti tomu menší prostorové rozlišení v porovnání s regionálními modely. To je dáno tím, že i když jsou k výpočtům používány super-počítače, děje v atmosféře jsou tak složité, že je potřeba určitých zjednodušení oproti realitě (např. zmíněným menším prostorovým rozlišením). Proto je nutné přistoupit ke kompromisům a stanovit určité prostorové a časové rozlišení modelu, případně (u regionálních modelů) jeho omezení na určitou geografickou oblast. Tento kompromis ovšem závisí nejen na dostupné výpočetní síle, ale také na matematicko-fyzikálních formulacích modelu. Potřeba dostatečně vysokého rozlišení modelu (časového i prostorového) vede k tomu, že kvalitní numerické modely vyžadují pro svůj efektivní provoz velmi výkonné superpočítače a s ohledem na s tím spojené vysoké náklady jsou provozovány zejména velkými meteorologickými službami.

Model předpovědi musí také mít v jejím počátku k dispozici informace o aktuálním stavu atmosféry. Z něj předpověď vychází a svými výpočty tento výchozí stav v jednotlivých časových krocích dále modeluje do podoby předpovědi. Je velmi důležité, aby tyto vstupní informace byly co nejpřesnější a bylo jich co nejvíce. Z těchto důvodů probíhá celosvětově v rámci meteorologických služeb ke sběru dat z měřících pozemních stanic, ale také například z radarů, sondáží atmosféry a zejména pomocí satelitního snímání zemského povrchu a oblačnosti (Obr. 53). Zároveň je potřeba tato data neustále kontrolovat: to provádějí především jednotlivé meteorologické služby, ale kontrola probíhá i v rámci modelování během takzvané asimilace dat. Výsledkem výpočtů modelu jsou pak časové řady jednotlivých meteorologických prvků (např. teplota, srážky, radiace apod.) v pravidelné geometrické síti bodů na zemském povrchu i v předem definovaných výškových hladinách ve volné atmosféře. Zatímco časový krok výpočtů je velmi hustý (řádově jednotky minut), výsledky výpočtů jsou uživatelům z technických důvodů poskytovány v hodinových či tříhodinových intervalech.



Obr. 53. Vstupní meteorologická data pro numerické předpovědní modely (zdroj: ECMWF; <https://www.ecmwf.int/en/research/data-assimilation/observations>)

Pro potřeby předpovědi počasí pro monitoring sucha bylo nakonec zvoleno 5 numerických předpovědních modelů, které patří ve světě k těm nejlepším a zároveň mají dostatečnou délku předpovědi. Modely se liší ve svém prostorovém rozlišení a délce předpovědi. Obecně platí, že čím delší předpověď, tak má model horší prostorovou vazbu. Předpověď pro monitoring sucha je omezena na maximální délku 9 dnů, kdy je ještě spolehlivost modelů přijatelná. Na delší období by bylo nutné zpracovávat jiné typy modelů (ensemblové členy jednotlivých modelů), což by výrazně zatížilo výpočetní kapacitu a předpověď by byla k dispozici až v pozdější čas a ztrácela by svoji relevanci. Nejlepší prostorové rozlišení má v našem výběru francouzský model Arpege (10 km), ale jeho předpověď je k dispozici pouze na 4 dny dopředu. Naopak nejhrubší prostorové rozlišení poskytuje americký model GFS a kanadský GEM (25 km), ale na druhé straně dávají nejdelší předpovědi. Např. model GFS předpovídá počasí až na 16 dní dopředu. Jak vypadá rozdíl v rozlišení modelů, ukazuje Obr. 54. Zde jsme záměrně zvolili jako ukázkou regionální model britské meteorologické služby GLOBAL UM, který má vysoké rozlišení (okolo 4 km) a oproti tomu americký model GFS (25 km). Je zde vidět, jak model s hustým pokrytím dokáže podstatně lépe postihnout regionální rozdíly. Bohužel takto prostorově podrobný model pak není možné spočítat na delší období, a proto je pro monitoring sucha nevyužitelný a je používána jeho globální verze. Modely ECMWF IFS a GLOBAL UM jsou placené, naopak ostatní modely lze zatím používat zdarma. Obecně platí, že modely za poplatek dávají kvalitnější výsledky.

Seznam použitých modelů:

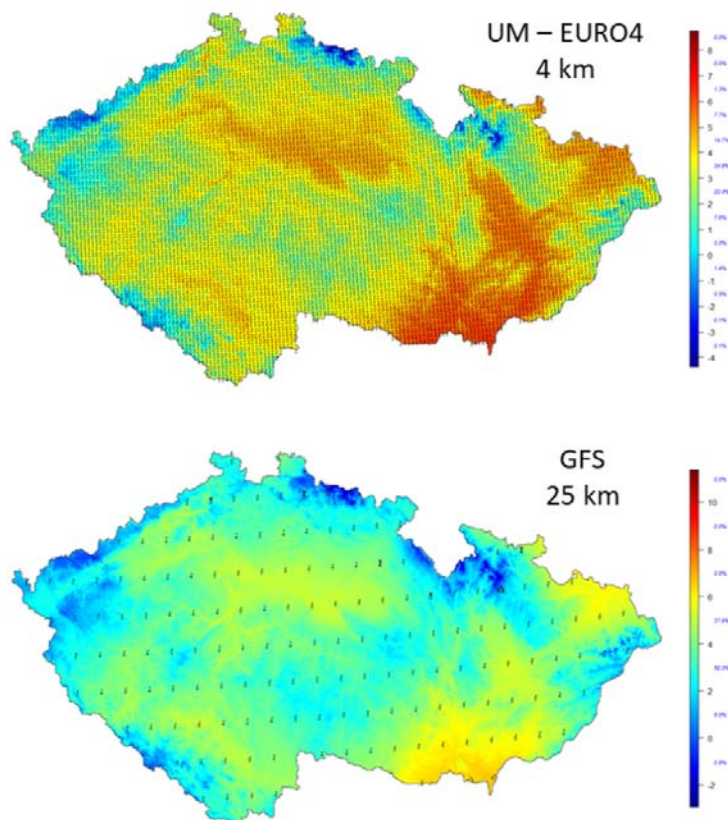
Model IFS Evropského centra pro střednědobou předpověď Integrated Forecasting System (ECMWF) s prostorovým rozlišením 12 km, v 3h časových intervalech a na 10 dní dopředu.

Model **ARPÈGE** francouzské meteorologické služby Centre National de Recherches Météorologiques/ Météo France (zkratka z Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) s prostorovým rozlišením v Evropě ~10km, v 1h časových intervalech na 4 dny dopředu.

Model Unified Model (**GLOBAL UM**) britské meteorologické služby United Kingdom Meteorological Office (UKMO) s prostorovým rozlišením ~10km, v 1h časových intervalech na 6 dní dopředu.

Model Global Forecasting System (**GFS**) meteorologické služby Spojených států National Office for Ocean and Atmosphere (NOAA) v prostorovém rozlišení 25km, v časových intervalech 3h a na 16 dní dopředu,

Model Global Earth Model (**GEM**) kanadské meteorologické služby Canadian Meteorological Centre (CMC) v prostorovém rozlišení 25km, v 3h časových intervalech a na 10 dní dopředu.

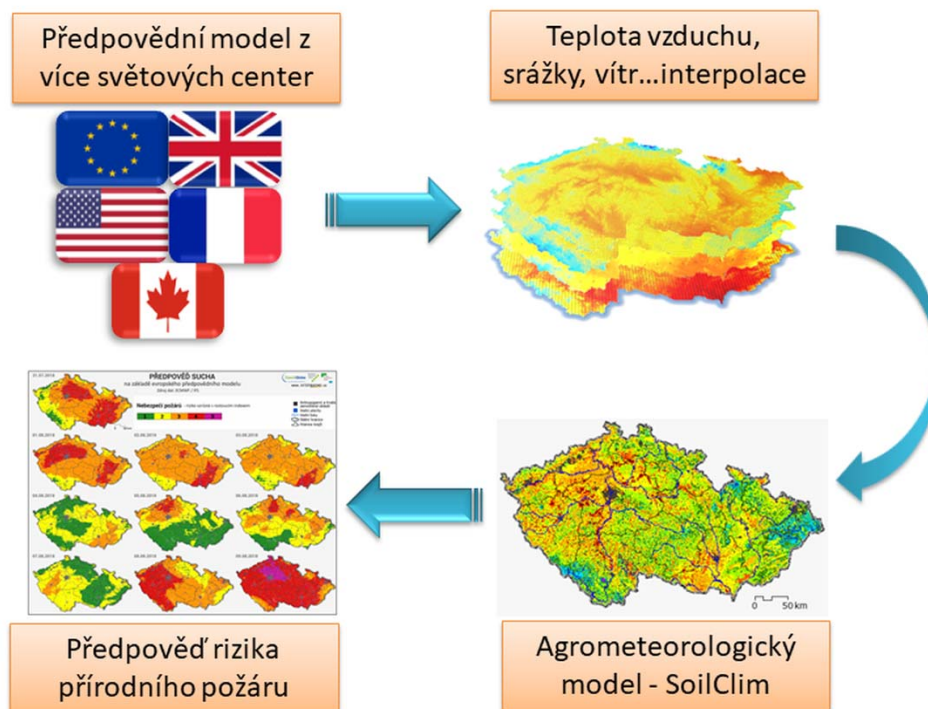


Obr. 54. Ukázka rozdílu rozlišení dvou numerických předpovědních modelů – regionálního a globálního

Numerické předpovědní modely nedokážou vždy zcela správně popsat lokální podmínky a různá geografická specifika dané oblasti. Je proto nutné je na základě historických dat, což jsou starší předpovědi a měření na meteorologických stanicích, pro dané místo korigovat. V prvním kroku se zjišťuje, jaká je systematická odchylka od skutečnosti. Ta je pak následně statistickými metodami odstraněna. Teprve takto opravené výstupy předpovědního modelu pokračují do dalšího zpracování (Obr. 55).

Aby došlo k odstranění problému s rozdílným prostorovým rozlišením modelů, tak jsou výstupy jednotlivých modelů prostorově interpolovány do jednotného rozlišení 500×500 m, jak lze vidět například na Obr. 54. Interpolace je prováděná s ohledem na geografické parametry, jako je např. nadmořská výška či sklonitost terénu.

Takto připravené rastrové vrstvy předpovědních dat slouží jako vstup do modelů indexů požárního rizika. Mezi hlavní prvky používané pro předpověď na 10 dní dopředu pomocí modelu SoilClim patří maximální a minimální teplota vzduchu, srážkové úhrny, vlhkost vzduchu, rychlost větru a délka slunečního svitu.



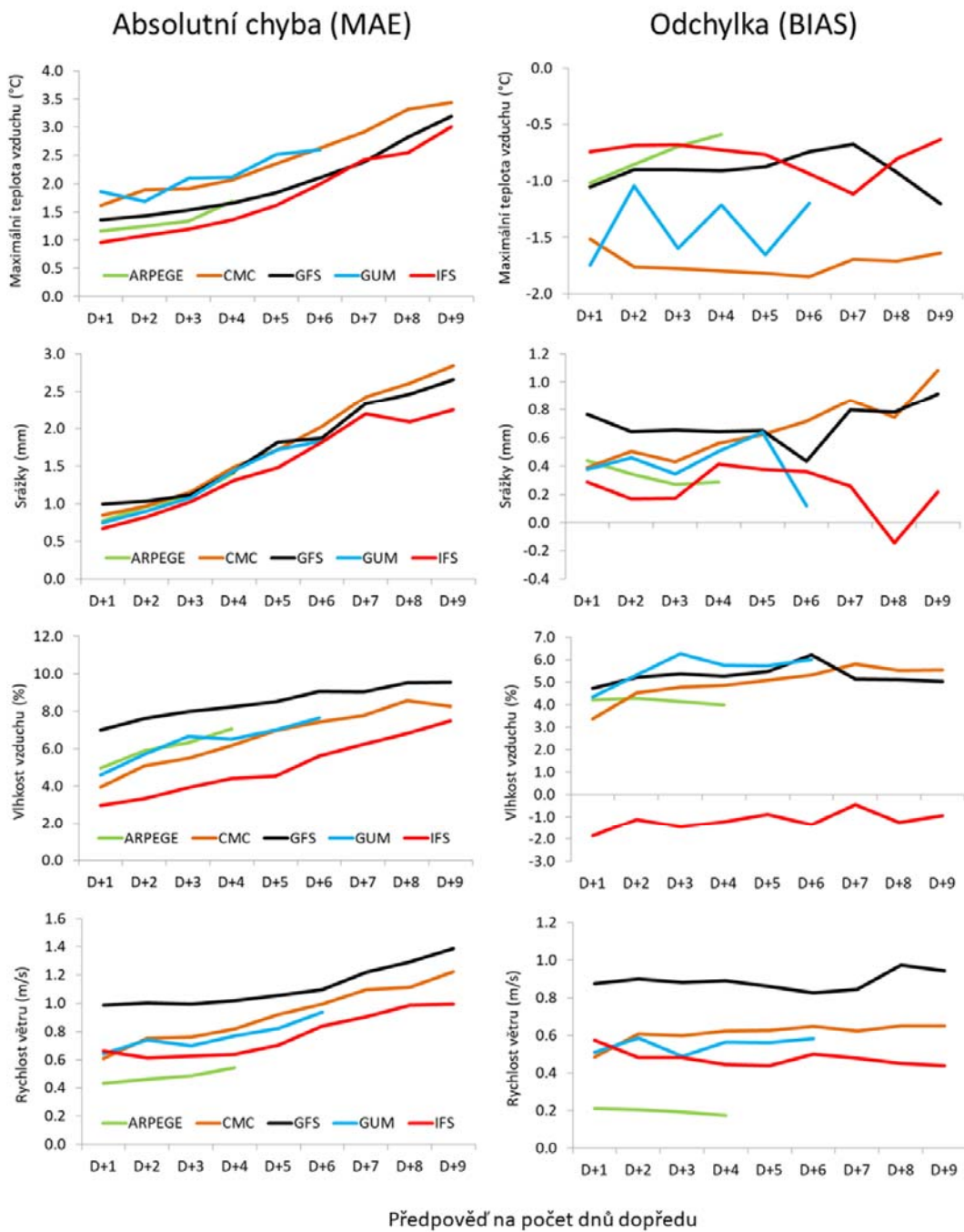
Obr. 55. Schéma přípravy předpovědi rizika přírodního požáru

Každý den po 8 hodině ráno dojde ke stažení aktuálních meteorologických dat (teplota vzduchu, srážky, vlhkost vzduchu, rychlost větru a slunečný svit) za uplynulých 24 hodin. Ty jsou interpolovány do prostoru a slouží jako vstup do softwaru SoilClim a modulů pro výpočet požárního rizika. Díky tomu je vypočten aktuální stav. Ten samozřejmě slouží jako počáteční podmínky pro vlastní předpověď. Každý numerický předpovědní model je k dispozici v jinou časovou dobu. Proto je v intervalech kontrolována dostupnost jednotlivých modelů a ihned stažena, jak se objeví jeho aktuální výpočet. Data jsou softwarově automaticky přetransformována do potřebných formátů. Na těchto datech je pak proveden proces bias korekce, který odstraní systematické chyby modelů. Takto ošetřená data vstupují do interpolace a stejně jako v případě operativních aktuálních dat (tedy za posledních 24 hodin) vstupují jednotlivé vrstvy jako podklady do softwaru SoilClim. U předpovědi je tato činnost časově náročnější, jelikož se pro jednotlivé modely počítá na 3–10 dní dopředu, tedy množství dat a výpočtů geometricky narůstá. V současné době je výsledný produkt předpovědi rizika lesních požárů na dalších 10 dní a aktuální stav hotov po 13 hodině.

Na možném zrychlení se bude dále pracovat, ale zde se naráží na vlastní rychlost dostupnosti předpovědních modelů z velkých výpočetních center.

Úspěšnost předpovědi prediktorů pro výpočet rizika přírodních požárů je hodnocena na základě porovnání předpovědí těchto prvků se skutečně naměřenými údaji získanými ze sítě meteorologických stanic (Obr. 56). S délkou časového výhledu předpovědi stoupá její chyba a ta se liší i podle použitého předpovědního modelu a meteorologického prvku. Obecně k nejlépe předpověditelným meteorologickým prvkům patří teplota vzduchu. U maximálních teplot vzduchu mají všechny modely tendenci předpovídat nižší hodnoty a to hlavně v jarních a letních měsících, které jsou pro monitoring sucha nejdůležitější. To by znamenalo, že by modely dávaly (bez opravy jejich chyby) tendenci k pomalejšímu vysušování.

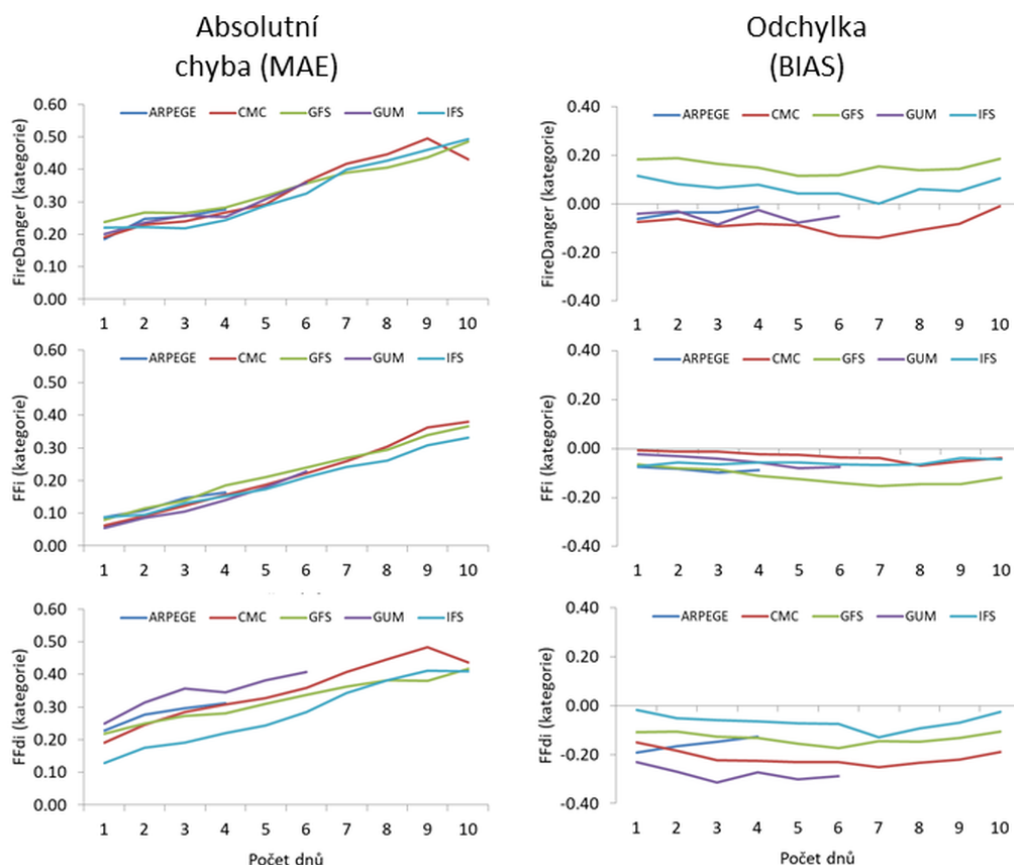
Problematické jsou naopak srážky, u kterých nepřesnost stoupá především v letních měsících za bouřkových situacích, kdy současné numerické předpovědní modely nejsou schopny přesně určit místo a čas výskytu srážek. Celkově modely nadhodnocují množství srážek spadlých na celé území České republiky. Mezi hůře předpověditelné prvky patří také rychlost větru, která je značně ovlivněna specifickými místními podmínkami. Předpovědní modely mají celkem značnou kladnou odchylku, kdy predikují o 0,5 až 1 m/s vyšší rychlosti než jsou ty skutečně změřené na stanicích. To je způsobeno tím, že modely nemají v sobě zahrnutou takovou drsnost povrchu (překážky), jaké se reálně vyskytují v okolí stanic. Proto ale nakonec rychlosti větru podle modelů budou pravděpodobně reálnější pro predikci požárního rizika než skutečná měření. U vlhkosti vzduchu se již začíná projevovat značný rozdíl mezi kvalitou jednotlivých předpovědních modelů, což se pak významně projevuje v predikci sucha. Nejblíže realitě je opět jako u ostatních prvků model IFS. Naopak velice špatně předpovídá vlhkost vzduchu model GFS. U něj je vidět, že hodnoty vlhkosti pro území České republiky se značně liší od reality. Kromě modelu IFS mají podobný problém i ostatní modely, kdy jsou výrazně vlhčí než je skutečnost. To platí především pro první polovinu roku, tedy pro zemědělsky nejdůležitější období.



Obr. 56. Průměrná absolutní chyba (vlevo) a systematická odchylka (vpravo) předpovězené a naměřené hodnoty pro maximální teplotu vzduchu, srážky, vlhkost vzduchu a rychlost větru podle jednotlivých modelů až na 9 dní dopředu

5.2. Spolehlivost operativní předpovědi rizika přírodních požárů ansámblem numerických předpovědních modelů

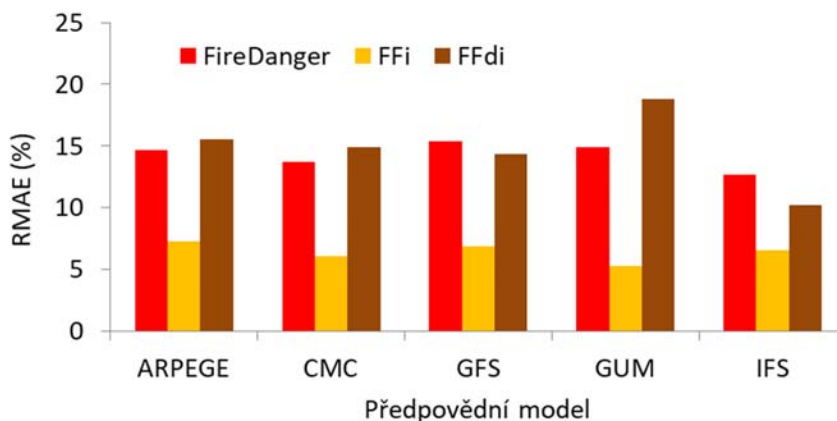
Výše popsané základní meteorologické prvky poté vstupují do výpočtu indexů požárního rizika. Teprve až jejich kombinace může spolehlivě ukázat, které numerické předpovědní modely jsou nejvhodnější. V operativním chodu byly postupně počítány tři indexy a to FireDanger, FFi a FFdi.



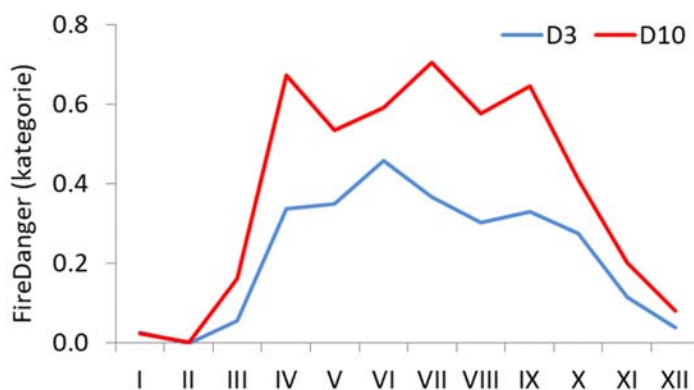
Obr. 57. Absolutní chyba (MAE) a odchylka (BIAS) předpovězeného indexů požárního rizika (FireDanger, FFi, FFdi) podle různých numerických předpovědních modelů na 10 dnů dopředu.

Stejně jako u základních prvků roste chyba předpovědi s délkou předpovědi (Obr. 57). Nejnižší relativní chybu ze všech tří požárních indexů má FFi a to na první den pod 4 %. Nejlépe vychází u tohoto indexu předpovědní model GUM. *FireDanger index* vykazuje dvakrát tak vysokou chybu jako FFi, stejně tak FFdi index, u kterého ovšem model IFS má v porovnání s ostatními modely o hodně nižší chybu. Pokud bychom analyzovali absolutní čísla indexů, tak v případě FFi se chyba pohybuje od 0,1 do 0,3 (první až 10. den), u FireDanger od 0,2 to 0,45, obdobně je to u FFdi kromě IFS modelu, kde se hodnoty pohybují od 0,15 do 0,4. Pokud porovnáme kvalitu předpovědi na 3 dny dopředu (Obr. 58), tak nejlépe vychází model ECMWF IFS a GUM. Indexy požárního rizika FFi a FFdi mají tendenci předpověď rizika spíše podceňovat. U FireDanger indexu model ECMWF IFS a GFS naopak riziko požárů přeceňoval. Chyba předpovědi je rozdílná pro jednotlivé fáze roku. V zimě je chyba prakticky nulová a to vyplývá z toho, že i samotné požární riziko prakticky neexistuje. Chyba je poté vyšší v teplém půlroku, kdy je samozřejmě i složitější otázka správné

předpovědi srážek (bouřkové situace). Na Obr. 59 je vidět rozdíl chyby v předpovědi na 3 a 10 dnů dopředu v jednotlivých měsících podle modelu ECMWF IFS. Nejvyšší chyba podle této analýzy vychází v červnu u předpovědi na 3 dny dopředu a v červenci na 9 dnů. Výsledky jsou uvedeny souhrnně za celou Českou republiku.



Obr. 58. Relativní absolutní chyba [%] předpovědi na 3 dny dopředu podle jednotlivých předpovědních modelů pro vybrané požární indexy



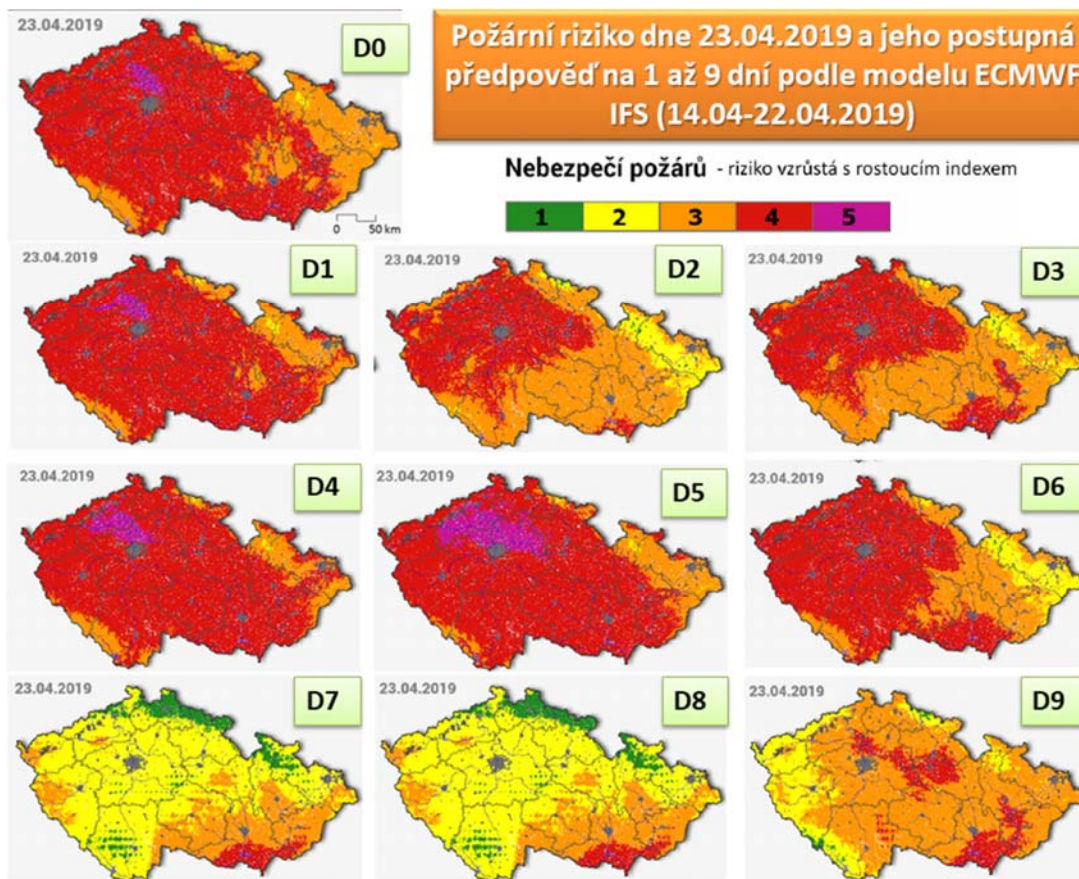
Obr. 59. Absolutní chyba (MAE) předpovědi požárního indexu FireDanger podle modelu ECMWF IFS na 3 a 10 dnů dopředu v jednotlivých měsících

5.3. Reálný příklad: předpověď požárního rizika na 23. dubna 2019

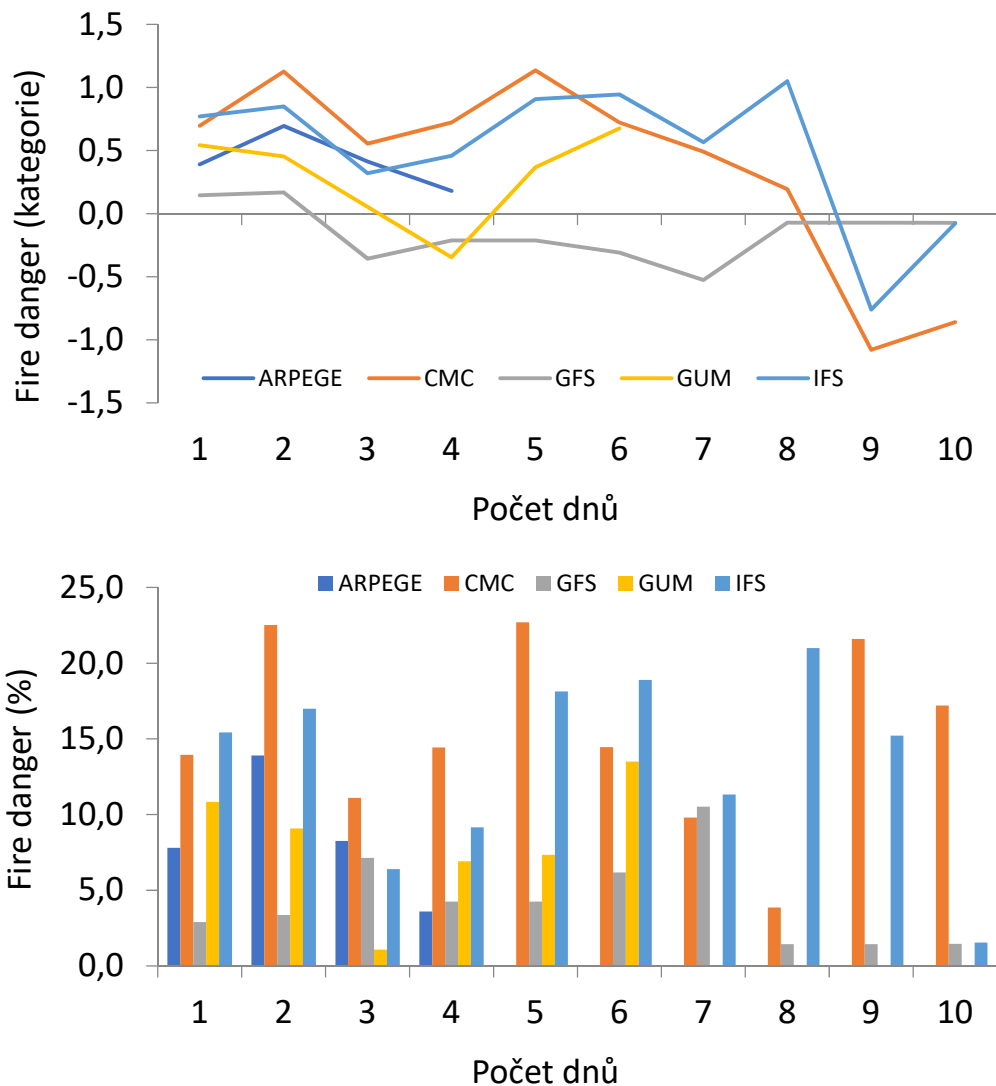
Na ukázkou fungování předpovědi požárního rizika byl vybrán den 23. dubna 2019. V dubnu 2019 panovalo výrazné suché a zároveň větrné počasí. To způsobilo nadprůměrné množství přírodních požárů. Výsledky se výrazně liší podle jednotlivých indexů a to v závislosti na započítání rychlosti větru nebo ne.

Podle *FireDanger indexu* bylo průměrné riziko nebezpečí přírodního požáru na území České republiky 3,0 z 5,0 škály. Podle všech numerických modelů předpovědi počasí bylo na celé období 10 dnů prakticky

predikováno stejný stupeň rizika (Obr. 60). To znamená, že vysoké riziko přírodních požárů bylo známo dostatečně dlouhou dobu dopředu a dalo se na tuto informaci dobře spolehnout. Nejmenší chybu na tento den podle daného indexu vykazoval model GFS (Obr. 61), který spíše riziko lehce podceňoval. Ostatní modely naopak predikovaly ještě vyšší riziko, než ve skutečnosti nastalo. Nejvíce nadhodnocoval předpověď model ECMWF IFS a to zhruba o 0,5 kategorie.

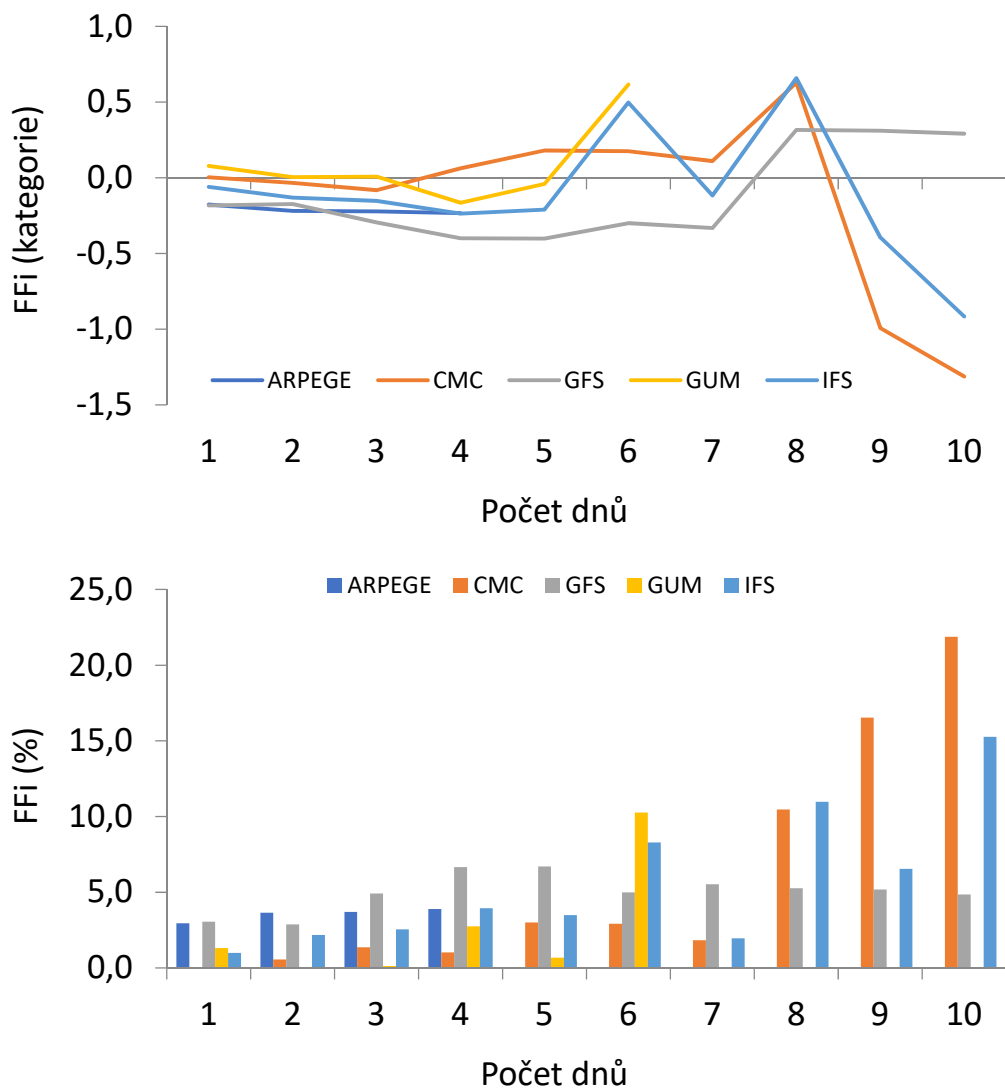


Obr. 60. Předpověď přírodního požárního rizika podle modelu ECMWF IFS na 23. dubna 2019 z předchozích 9 dnů.



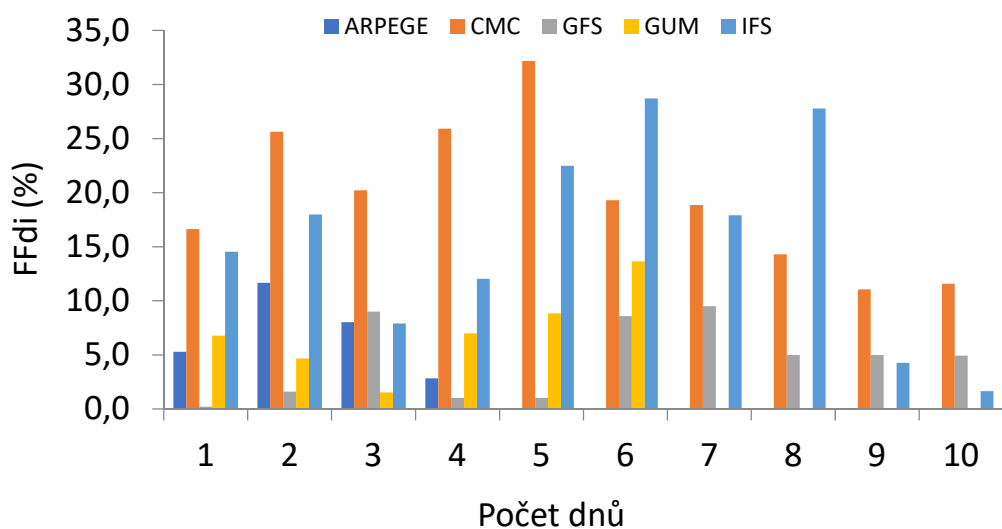
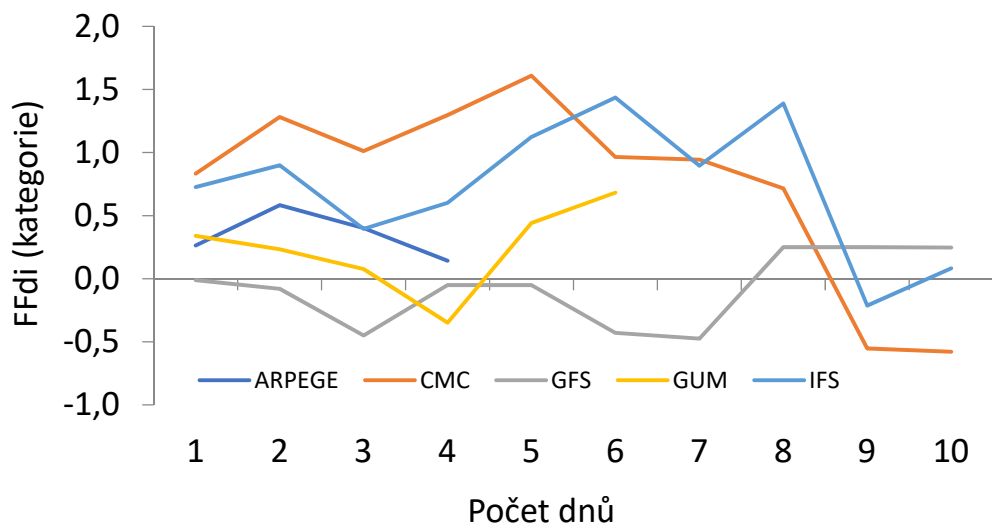
Obr. 61. Odchylka předpovědi FireDanger indexu podle jednotlivých numerických předpovědních modelů na 23. dubna 2019.

Index FFi vykazuje podstatně menší chybu než *FireDanger index* na tento den, jelikož nezapočítává vítr, takže je jeho predikce jednodušší. Na prvních pět dní je podle všech modelů chyba zcela minimální a to většinou do 5 % (Obr. 62). Na 8–10 den vykazuje nejlepší předpověď model GFS a to pouze průměrnou chybu 0,3 kategorie ze šesti. Většina modelů riziko požárů lehce podceňovaly, ale ten rozdíl byl minimální.



Obr. 62. Odchylka předpovědi FFi indexu podle jednotlivých numerických předpovědních modelů na 23. dubna 2019.

Požární index FFdi vykazoval nejnižší míru rizika přírodního požáru. Podle jeho výpočtu byla průměrná kategorie rizika přírodního požáru 2,3 z 5 (Obr. 63). Nejblíže realitě byla předpověď podle modelu GFS stejně jako v případě obou předešlých indexů. Ostatní modely požární riziko na daný den přeceňovaly.



Obr. 63. Odchylka předpovědi FFdi indexu podle jednotlivých numerických předpovědních modelů na 23. dubna 2019.

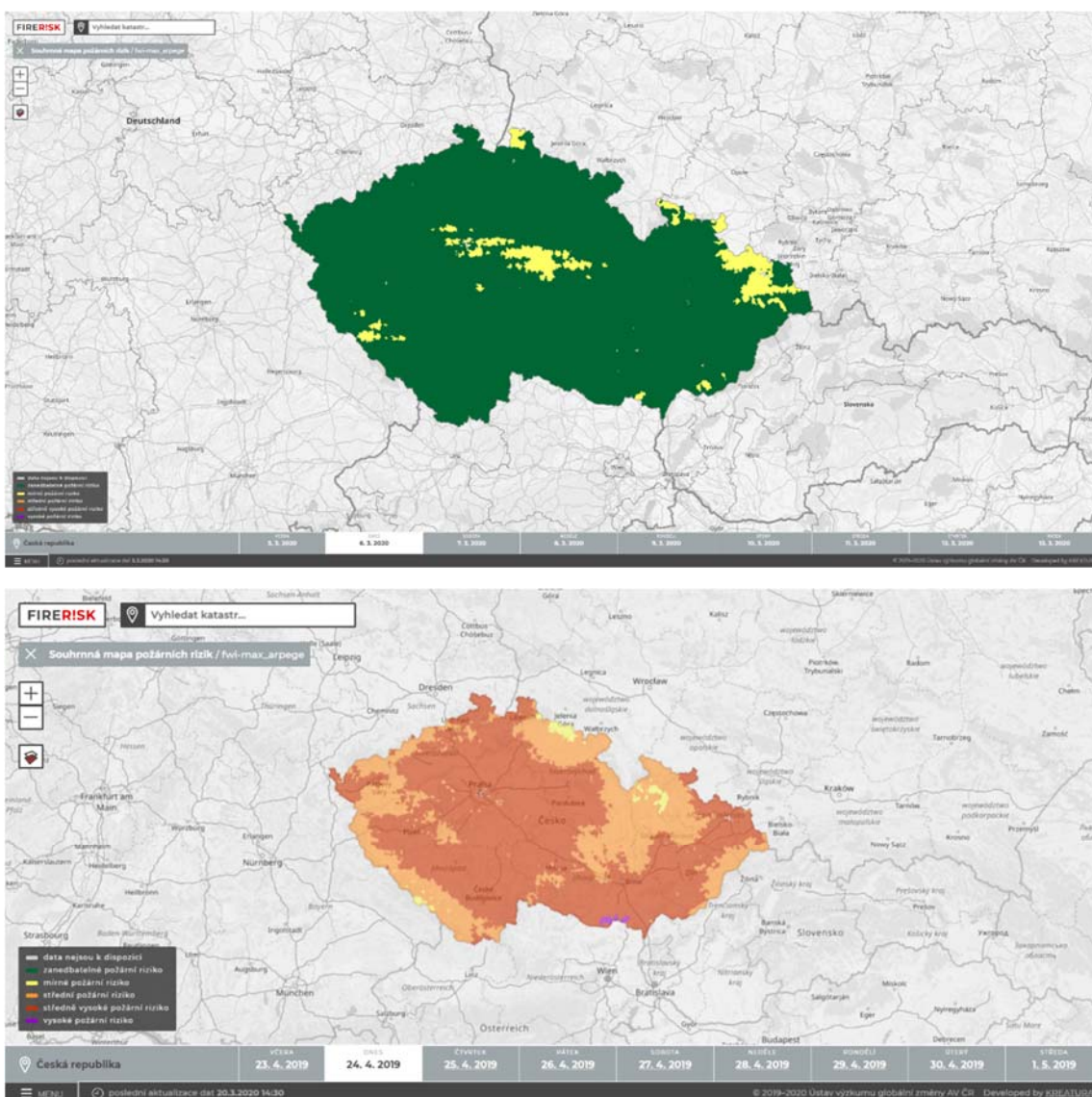
5.4. Silné a slabé stránky předpovědi požárního rizika a jednotlivých meteorologických prvků

Plusy			Minusy		
Maximální teplota	Prostorově stabilní prvek Dobře předpověditelný	IFS model	Podhodnocování vysokých teplot	GFS model	
Minimální teplota	Prostorově stabilní prvek Dobře předpověditelný	IFS model	Podhodnocování nočních teplot za horkých vln	Arpege model	
Srážky	Relativně spolehlivé na první dny	IFS model	Vyšší chyba předpovědi na více dnů Lokalizace srážek	CMC model	
Vlhkost vzduchu	Dobré výsledky modelu IFS na celých 10 dnů, reálné předpovědi	IFS model	Rozdílná kvalita modelů Modely nadhodnocují	GFS model	
Rychlost větru	Modely jsou výše než staniční data a pravděpodobně reálnější	Arpege model	Nesoulad mezi modely a staničními měření danou drsností povrchu	GFS model	
FireDanger	Ve výpočtu se počítá s rychlostí větru	IFS model	Přeceňování rizika Větší chyba než u FFi	GFS model	
FFi	Nejmenší chyba předpovědi požárního rizika	GUM model	Nepočítá s rychlostí větru	GFS model	
FFDi	Přesná předpověď na první dny podle IFS	IFS model	Podhodnocování rizika Větší chyba než u FFi	GFS model	

6. Návod krok za krokem k použití portálu FireRisk.cz

6.1. Popis + ovládání aplikace Fiererisk

Interaktivní aplikace Fiererisk slouží k detailnímu monitoringu a předpovědi rizika výskytu přírodních požárů. V rámci aplikace lze získat informaci o míře rizika na úrovni katastrálního území. Informace na portálu jsou denně aktualizovány a kromě popisu situace pro vybraný den, je informace dostupná také jeden den zpětně a ve formě předpovědi i na 7 dní dopředu. Informace o míře rizika je pro všechny modely popsána jednoduchou škálou od zanedbatelného až po vysoké požární riziko.



Obr. 64. Úvodní stránka aplikace firerisk.cz v období 6.3. 2020 – zanedbatelné riziko (nahore) a 24.4. 2019 (střední až vysoké požární riziko)

Na portálu firerisk.cz je k dispozici několik základních map, které shrnují prostorové rozložení současného a očekávaného požárního počasí a to v rozlišení pro katastry. Základní mapa je však k dispozici v rozlišení 500 x 500 m. Portál tuto informaci zpřehledňuje a agreguje na úroveň jednotlivých katastrů. Portál obsahuje tři základní a řadu doplňkových mapových vrstev. Mezi tři základní náleží:

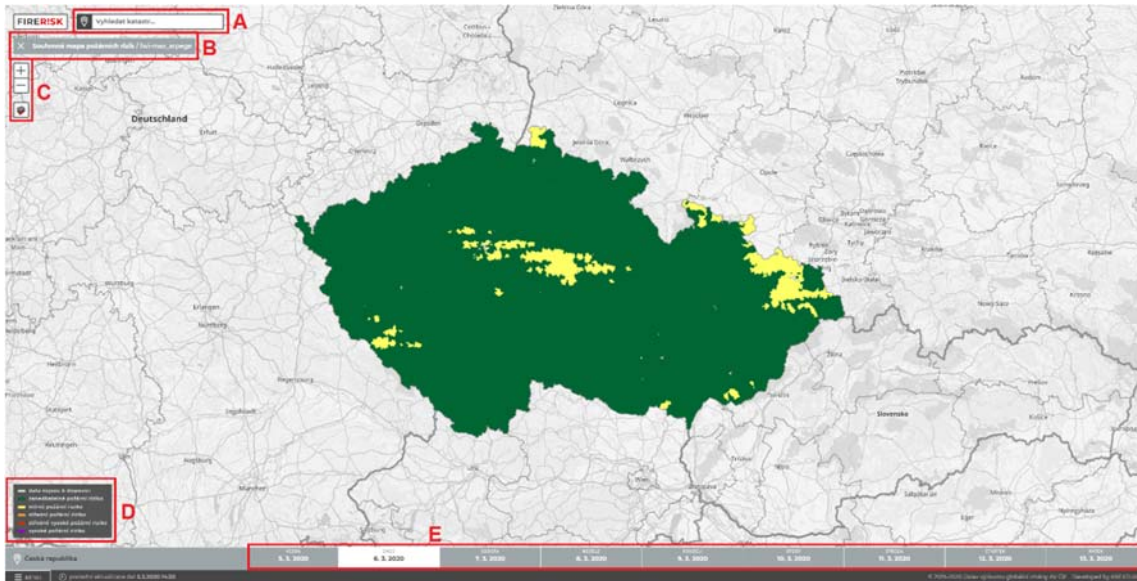
- „**Požární riziko**“ představuje základní mapu portálu, týkající se souhrnného rizika požáru. Jedná se o vyšší z kategorií indexu mediánu hodnot gridů FWI a FFDI v rámci každého katastru.
- „**Požární riziko – MAX**“ prezentuje vždy nejvyšší hodnotu z kategorie rizika FWI a FFDI z toho nejkritičtějšího bodu v katastru pokud jde o míru rizik vycházejícího z požárního počasí.
- „**Hainesův index**“ – reflektuje nestabilitu vzduchu v atmosféře a suchost a tím očekávané chování teplého vzduchu vystupujícího z eventuálního požáru. Pokud teplota okolního vzduchu klesá s výškou rychleji, než odpovídá hodnotě suchoadiabatického gradientu, pak se jedná o případ labilního zvrstvení v nenasyceném vzduchu a to urychluje vertikální pohyb teplých spalin z přírodního požáru. To následně přivádí do systému více vzduchu (a tedy i kyslíku) z okolí požáru a zvyšuje jeho intenzitu. Obecně platí, že zvrstvení atmosféry s k. udává, jak velké požáry mohou nastat. Hodnoty dosahují od 2 do 6 s tím, že 6 je nejvyšší kategorie.
- Zároveň je portál www.firerisk.cz doplněn o mapové vrstvy:
 - „**Vlhkost paliva**“ určena na základě IFS modelu. Tyto údaje vstupují i do mapy „Požárního rizika“ pokud je dosažena hodnota „bez rizika“ tedy stavu kdy relativní nasycení půdy do 40 cm dosahuje 90 % a vyšších hodnot, pak je i požární riziko považována za zanedbatelné.
 - „**Maximální teploty**“ – jedná se o integrovanou hodnotu Tmax katastru podle modelu IFS.
 - „**Vítr**“ – odhadnutá nejvyšší hodnota větru pro katastr podle modelu IFS.

Při pokliknutí do mapy se objeví grafy pro vybraný katastr, kde se zobrazí linky na Požární riziko, Požární riziko – MAX, Hainesův index a na detailní předpověď. Po rozkliknutí předpovědi se zobrazí řádky pro požární riziko na základě FWI a 5 modelů, FFDI a 5 modelů. Jedná se tedy o průměrný odhad pro katastr podle jednoho a druhého indexu vč. varianty pro předpověď 5 modelů. Tímto je ukázána nejistota předpovědi.

Na stránkách firerisk.cz bude k dispozici pravidelně aktualizovaný popis aktuální situace (rizika), zároveň je zde dostupný odkaz na aktuální situaci požárů v Evropě, která je zveřejněná pod záštitou Copernicus (Global Wildfire Information System - https://gwis.jrc.ec.europa.eu/static/gwis_current_situation/public/index.html).

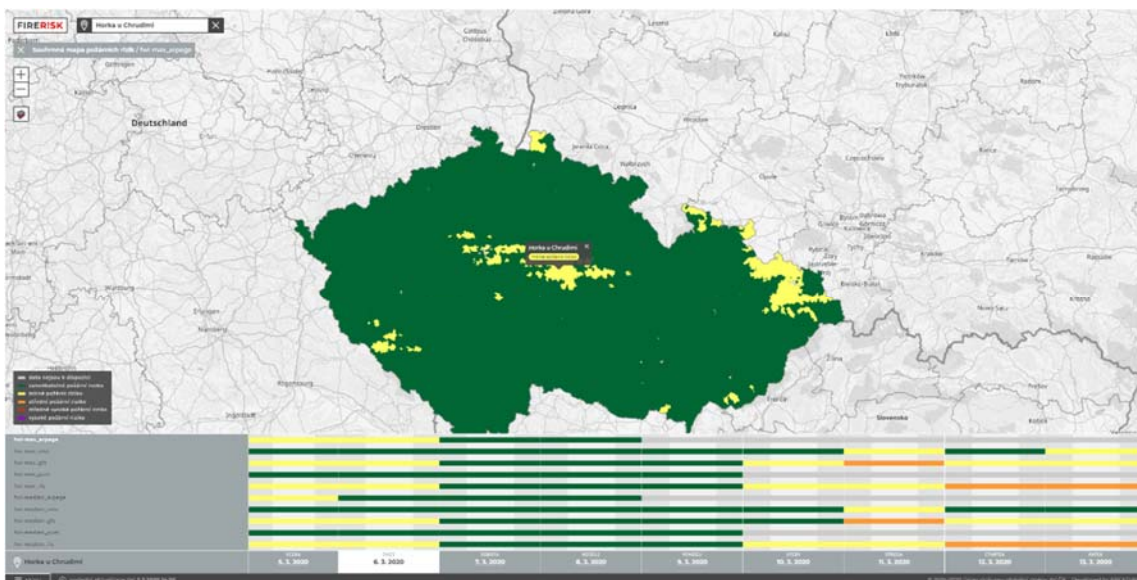
Mapy dostupné na webu budou moci uživatelé stáhnout. Na webu jsou umístěny informace o projektu a zároveň sem budou umístovány zprávy týkající se firerisku v médiích případně požární situace v České republice. Pro uživatele je zde umístěno vysvětlení trendů požárů včetně klimatické situace a také návod jak používat web.

Na úvodní straně aplikace (Obr. 64) je vždy k aktuálnímu datu dostupná souhrnná mapa požárního rizika, pro celé území České republiky. Uživatel má dostupnou také informaci o datu poslední aktualizace dat a hlavní ovládací prvky aplikace (Obr. 65). Pomocí těchto prvků je umožněna základní interaktivita, jako je práce s mapovým polem (zoom, nastavení průhlednosti vrstvy) nebo vyhledávání.

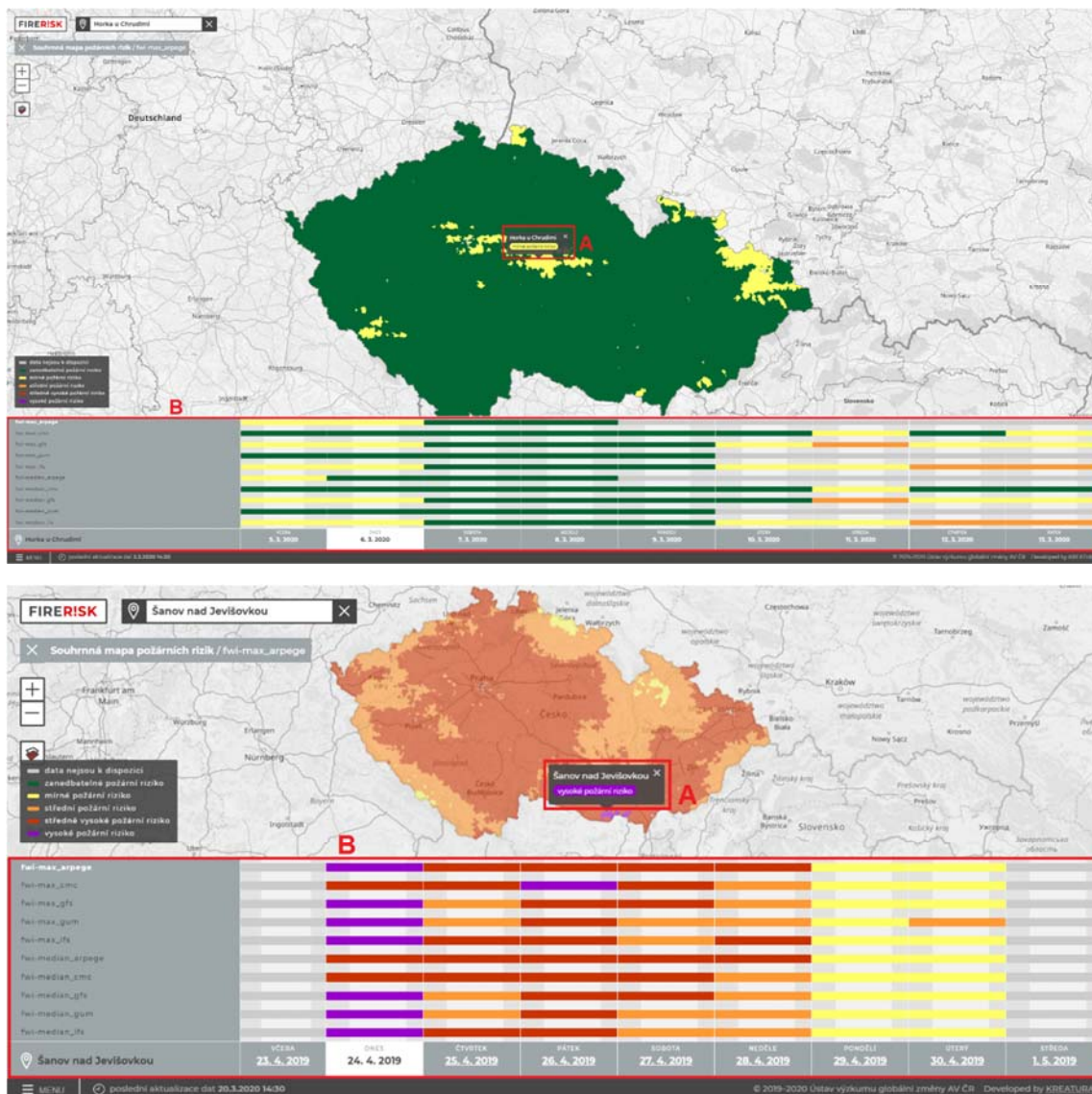


Obr. 65. Ovládací prvky mapy v aplikaci firerisk.cz (A: Vyhledání katastrálního území, B: Název zobrazené mapové vrstvy, C: Ovládání přiblížení mapy a nastavení průhlednosti, D: mapová legenda, E: Výběr zobrazeného dne)

Po využití vyhledávacího pole nebo kliknutí do mapy se pak zobrazí detailní informace popisující situaci v daném katastrálním území (Obr. 66). Uživatel aplikace má k dispozici panel s informací o riziku dle jednotlivých modelů, přímo pro vybrané katastrální území. Opět zde najde mimo informaci pro aktuální den také pohled o jeden den zpět a předpověď na 7 dní dopředu. Riziko je v panelu pro přehlednost zobrazeno pomocí stejné barevné škály, jakou užíváme v legendě mapy (Obr. 67). Po kliknutí na daný model, je pak hlavní mapa překreslena a je zobrazen podklad právě pro tento model.



Obr. 66. Zobrazení detailu pro vybraný katastr



Obr. 67. Zobrazení detailu katastru (A: poloha v mapě, B: detailní náhled na situaci ve vybraném, katastru dle více předpovědních modelů – informace je dostupná vždy 1 den zpětně a také jako výhled na 7 dní dopředu). Horní obrázek zachycuje situaci během zanedbatelného požárního rizika 6.3. – 13.3 2020; zatímco dolní obrázek demonstruje situaci během rizikového období 24.4. – 1.5. 2019.

Další obecné informace o projektu, aplikaci a odpovědnosti jsou vždy dostupné pod nabídkou Menu v dolní levé části aplikace.

V České republice dosud metodika doporučených protipožárních opatření zohledňující vlastnosti stanoviště a vegetace nebyla připravena. Metodika je vázána na zavedenou klasifikaci lesních stanovišť. Zároveň zohledňuje změny těchto stanovišť vlivem postupující klimatické změny, a to diferencovaně v lokálních podmínkách. Doporučená opatření jsou provázána s adaptačními a mitigačními opatřeními ke změně klimatu v lesích a krajině a zohledňují i vodní režim území. Pro hodnocení lokalit a související volbě doporučených opatření je možné využít dostupná data LHP a DPZ.

7. Srovnání a zdůvodnění novosti postupu metodiky

V České republice dosud nebyla k dispozici podrobná metodika pro kvantifikaci a předpověď rizik vzniku přírodních požárů v závislosti na aktuálních meteorologických podmínkách. Předkládaná metodika obsahuje nejen popis datových zdrojů a srovnání metod kvantifikace rizika přírodních požárů, ale hodnotí také klimatologii tohoto rizika v plné šíři. Přináší přehled systémů využívaných v jiných zemích a jinde osvědčené metody testuje v prostředí České republiky v období 1961–2018. Současně je doplněna o podrobnou analýzu budoucího vývoje v trendech požárního počasí, které jasně ukazují nutnost systematického zkoumání předpověditelnosti požárního počasí a využívání těchto předpovědí na území našeho státu. Analytickou část pak uzavírá popis monitorovacího systému www.firerisk.cz. Metody, které prošly výše zmíněným testováním, nejlépe prakticky aplikujeme v podobě plně funkčního portálu. Portál je a bude provozován institucemi spoluautorů této práce.

8. Uplatnění metodiky

V první řadě je metodika monitoringu a předpovědi požárních rizik, přímo využita na portálu www.firerisk.cz, který byl připraven autory metodiky, a je a bude sloužit, jako podklad předpovědní službě Českého hydrometeorologického ústavu a tedy i široké odborné a laické veřejnosti. Současně najde tato metodika uplatnění jako nástroj pro vlastníka lesních i zemědělských pozemků (organizace hlídkové služby, tvorba požárních plánů, přípravy sklizňových prací), pro hospodářskou úpravu (podklad pro tvorbu LHP ale i pozemkové úpravy) a také pro potřeby HZS ČR či krajských samospráv. Dostupnost nástroje pro predikci vývoje požárního počasí díky specializovanému portálu by měla přispět ke snížení rizika výskytu a šíření požárů vegetace by měla být vlastníkem (správcem) lesa průběžně uplatňována při realizaci hospodářských opatření v lesích, dále při tvorbě protipožárních plánů a při organizaci požární hlídkové služby.

Hasičská záchranná služba může metodiku využívat jednak při operativním plánování s ohledem na požární rizikovost konkrétních území, jednak při kontrolách požární připravenosti subjektů hospodařících v lesích. Samosprávy jak krajské tak ORP získají nástroj pro detailní posouzení míry rizika ze strany požárů.

9. Seznam použité literatury

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, Italy.

Belward, A.S. Glc2000: A new approach to global land covermapping from Earth observation data. *Int. J. Remote Sens.* **2007**, 26, 1959–1977.

Beven, K. J., Kirkby, M. J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin [online]*, 24, 1, 43-69, ISSN 0303-6936.

Bartno, I., Kiraly, G., Czimber, K., Hollaus, M., Pfeifer, N. 2017. Treefall gap mapping using Sentinel-2 images. *Forests*, 8 (426).

Breiman, L., Friedman, J., Stone, Ch. J., Olshen, R.A. 1984. Classification and regression trees. ISBN: 0412048418

Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J., Herzig, F., Heussner, U., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J. (2011c): 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 331, 578–582.

Carvalho, A., Flannigan, M. D., Logan, K., Miranda, A. I., Borrego, C., 2008. Fire activity in Portugal and its relationship to weather and the Canadian Fire Weather Index System. *International Journal of Wildland Fire*, 17(3): 328–338.

Dimitrakopoulos, A., Bemmerzouk, A. And Mitsopoulos, I. D., 2011. Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorological Applications*, 18(1): 83–93.

Heikinheimo, M., Venäläinen, A., Tourula T., 1998. A soil moisture index for the assessment of forest fire risk in the boreal zone. In: *Proceedings of the International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology*. Volos, Greece, 549–555.

Hrnčiarová, T., Mackovčín, P., Zvara, I., eds. (2009): Atlas krajiny České republiky. Ministerstvo životního prostředí ČR, Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, v.v.i., Praha, 331 s.

Immitzer, M., Vuolo, F., Atzberger, C. 2016. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe. *Remote Sensing*, 8 (3).

Jurečka, F., Možný, M., Balek, J., Žalud, Z., Trnka, M. (2019): Comparison of Methods for the Assessment of Fire Danger in the Czech Republic. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 67(5): 1285–1295.

Kahrman, A., Gunlu, A., Karahalil, U. 2014. Estimation of crown closure and tree density using Landsat TM satellite images in mixed forest stands. *J Indian Soc Remote Sens* 42 (3)

- Karali, A., Hatzaki, M., Giannakopoulos, C., Roussos, A., Xanthopoulos, G., Tenentes, V., 2014. Sensitivity and evaluation of current fire risk and future projections due to climate change: the case study of Greece. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 143–153.
- Healey, S.P., Cohen, W.B., Yang, Z.Q., Krankina, O.N. 2005. Comparison of tasseled cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*, 97, 301-310.
- Garrigues, S.; Allard, D.; Baret, F.; Weiss, M. Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models. *Remote Sens. Environ.* 2006, 103, 81–96.
- Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., S.-M.-Ayaz, J., L.-Fournel, M., Lampin, C. 2003. A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental Management* 51(3): 651-662.
- Le-Page, Y., Oom, D., Silva, J., Jonsson, P., Perera, J. 2010. Seasonality of vegetation fires as modified by human action: observing the deviation from eco climatic fire regimes. *Global Ecology and Biogeography* 19: 575-588.
- Martínez, J., Vega-García, C., Chuvieco, E. 2009. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management*.90: 1241-1252.
- McArthur, A. G., 1967. Fire Behaviour in Eucalypt Forests. Leaflet 107. Canberra: Department of National Development Forestry and Timber Bureau.
- Možný, M., Bareš, D. 2013. Czech Fire-Danger Rating System. The Integrated Warning Service System. Methodological Guideline No. 3/2013. Prague: Czech Hydrometeorological Institute Noble, I.R., Gill, A.M., Bary, G.A.V., 1980. McArthur's fire-danger meters expressed as equations. *Aust. J. Ecol.* 5, 201–203.
- Ntale, H. K., Gan, T. Y. (2003): Drought indices and their application to East Africa. *International Journal of Climatology*, 23, 1335–1357.
- Padilla, M. and Vega-García, C. 2011. On the comparative importance of fire danger rating indices and their integration with spatial and temporal variables for predicting daily human-caused fire occurrences in Spain. *International Journal of Wildland Fire*, 20(1): 46–58.
- Parente, J., Pereira, M., Amraoui, M., Tedim, F. 2017. Negligent and international fires in Portugal: the role of human and biophysical drivers on the spatial distribution. *Geophysical Research*, Vol. 19, EGU2017-19074-1.
- Trnka M, Brázdil R, Balek J, Semerádová D a kol. 2015, Drivers of soil drying in the Czech Republic between 1961 and 2012. *Int J Climatol* 35:2664–2675
- Trnka M, Semerádová D, Novotný I, Dubrovský M a kol. 2016), Assessing the combined hazards of drought, soil erosion and local flooding on agricultural land: a Czech case study. *Clim Res* 70:231–249
- Trnka M, Hlavinka P, Možný M, Semerádová D a kol. 2020a. Czech Drought Monitor System for monitoring and forecasting agricultural drought and drought impacts. *Int J Climatol*, přijato v tisku
- Trnka M, Možný M, Balek J, Semerádová D and others 2020b. Observed and estimated consequences of climate change for the fire weather regime in the moist-temperate climate of the Czech Republic. *Agr Forest Meteorol*, v recenzním řízení

Trnka M. Cienciala E., Beranová J. Možný M. a kol. (2020c), Doporučená adaptační a mitigační opatření v rizikových oblastech výskytu přírodních požárů s přihlédnutím k měnícímu se klimatu, certifikovaná metodika,

Vajda, A., Venäläinen, A., Suomi, I., Junila, P. and Mäkelä, H. M., 2014. Assessment of forest fire danger in a boreal forest environment: Description and evaluation of the operational system applied in Finland. *Meteorological Applications*, 21(4): 879–887.

Van Wagner, C.E., 1974. Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index. Publication No. 1333. Canadian Forestry Service, Ottawa.