

# SOUHRNNÁ ZPRÁVA

k vyhodnocení tornáda na jihu

Moravy 24. 6. 2021

*Na přípravě se podíleli: Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ), Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ), Amatérská meteorologická společnost, z. s. (AMS), Amper Meteo, s.r.o., zástupci European Severe Storms Laboratory (ESSL), Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy (PřF UK), METEOPRESS, spol. s r. o., Letecký ústav Vysokého učení technického v Brně a rakouská národní meteorologická služba (ZAMG).*

Říjen 2021

## **Upozornění**

Tato souhrnná zpráva není podkladem pro doložení nároku na náhradu škody, případně získání jakýchkoliv dotací, finančních kompenzací apod. Pro tyto účely si lze u ČHMÚ objednat odborný posudek, zda se v konkrétní lokalitě mohl či nemohl vyskytnout meteorologický jev, který mohl způsobit škody. ČHMÚ však není kompetentní k tomu, aby na základě popisu škod, zaslaných fotografií apod. rozhodoval o tom, zda škody budou či nebudou finančně kompenzovány.



Foto: Dominik Herka

# Obsah

<b>1.</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Podmínky pro vznik tornáda .....</b>	<b>5</b>
2.1.	Základní teorie.....	5
2.2.	Výskyt supercel a tornád na území České republiky v nedávné minulosti.....	9
<b>3.</b>	<b>Meteorologické podmínky při výskytu tornáda dne 24. 6. 2021 .....</b>	<b>10</b>
3.1.	Meteorologická situace .....	10
3.2.	Přízemní data .....	12
3.2.1.	Analýza přízemních dat.....	12
3.2.2.	Extremita naměřených hodnot.....	13
3.3.	Vertikální profily atmosféry.....	16
3.3.1.	Měřené vertikální profily .....	16
3.3.2.	Modelové vertikální profily atmosféry .....	20
3.4.	Operativní družicové informace .....	22
3.5.	Informace z radarů a detekce blesků .....	24
<b>4.</b>	<b>Předpovědi počasí a výstrahy .....</b>	<b>34</b>
4.1.	Předpovědi počasí a výstrahy na den 24. 6. 2021 .....	34
4.1.1.	Předpovědi počasí a výstrahy ČHMÚ .....	34
4.1.2.	Předpovědi SHMÚ, ZAMG, IMGW a ESTOFEX.....	37
4.2.	Možnosti předpovídání extrémních jevů.....	41
4.2.1.	Předpovědi numerických modelů.....	41
4.2.2.	Předpovědní parametry s větším předstihem .....	43
4.2.3.	Krátkodobá předpověď z aktuálních měření .....	45
4.3.	Úspěšnost meteorologických předpovědí .....	46
4.3.1.	Úspěšnost výstražných zpráv .....	46
4.3.2.	Výskyt nebezpečných jevů podle kritérií SIVS .....	48

<b>5.</b>	<b>Průzkum tornádem poškozené oblasti .....</b>	<b>53</b>
5.1.	Dokumentace a hodnocení škod .....	53
5.1.1.	K historii dokumentace škod.....	54
5.1.2.	Průběh a poznatky z dokumentace škod .....	56
5.2.	Mapování tornádem poškozené oblasti .....	62
5.2.1.	Mapování škod.....	62
5.2.2.	Snímky z družice Sentinel-2 .....	63
<b>6.</b>	<b>Shrnutí.....</b>	<b>67</b>
6.1.	Klimatologické souvislosti .....	72
<b>7.</b>	<b>Návrhy opatření .....</b>	<b>73</b>
7.1.	Zlepšování předpovědní a výstražné služby .....	73
7.2.	Vzdělávání a osvěta .....	74
7.2.1.	Jak se chovat při tornádu .....	74
<b>8.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>76</b>
<b>9.</b>	<b>Týmy podílející se na vyhodnocení.....</b>	<b>77</b>
<b>10.</b>	<b>Seznam použité literatury a zdrojů.....</b>	<b>78</b>

# 1. Úvod

Dne 24. června 2021 se v čase 19:14 až 19:53 SELČ vyskytlo na Břeclavsku a Hodonínsku velmi silné tornádo kategorie F4. Tornádo bylo spolu s dalšími nebezpečnými jevy součástí velmi silných konvektivních bouří na zvlněné studené frontě nad územím Rakouska, České republiky, Polska a částečně i Slovenska. Vyžádalo si šest lidských životů, stovky zraněných a škody na soukromém i veřejném majetku byly podle předběžných odhadů vyčísleny na 15 miliard korun. Kromě silně poničených budov (přibližně 200 z 1200 zasažených bylo určeno k demolici) byly poškozeny hospodářské objekty, velká část železniční tratě v úseku Břeclav-Hodonín, síť vysokého napětí a velké škody byly v dráze tornáda i na lesních porostech a zemědělských plochách.

Trasa tornáda procházela přes katastrální území deseti obcí, nejčetnější a nejrozsáhlejší škody v zastavěném území byly v obcích Hrušky, Moravská Nová Ves, Mikulčice, Lužice a Hodonín. V obcích byla často poškozena, nebo úplně zničena velká část budov (obr. 1). Méně četné škody, nebo škody mimo zastavěná území se týkaly obcí Břeclav, Kostice, Tvrdonice, Týnec a Ratíškovice. Ničivou sílu tornáda demonstruje dvojice snímků zobrazujících část obce Mikulčice delší dobu před tornádem a pár dní po něm (obr. 2). Celková délka trasy tornáda byla vypočtena na 27,1 km mezi katastry Břeclav a Ratíškovice. Šířka dráhy se zaznamenanými škodami se pohybovala od 250 m do 2,1 km. S intenzitou F4 určenou na základě pozemních průzkumů se jedná o historicky nejsilnější evidované tornádo na českém území. Jediný zaznamenaný doklad o podobně ničivém tornádu je z Kosmovy Kroniky české (30. 7. 1119 v oblasti pražského Vyšehradu), který se opírá o tehdejší výpovědi. Historické případy tornád a jejich četnost lze ale těžko posuzovat a porovnávat se současnými i proto, že mohly snadno uniknout pozornosti a také konstrukce budov, podle jejichž poškození se intenzita tornád mj. určuje, se významně lišily.



*Obr. 1 Pohled na obec Mikulčice z leteckého průzkumu 25. 6. 2021. Foto: Lukáš Ronge.*

Svou intenzitou a dobou trvání se tornádo na jihu Moravy dne 24. 6. 2021 zařadilo mezi nebezpečné meteorologické jevy, které se v rámci Evropy vyskytují jen velmi vzácně. Ve spolupráci s mnoha odborníky různých institucí a také s národními meteorologickými službami Slovenska a Rakouska proto vznikla tato souhrnná zpráva analyzující příčiny, které vedly k tak výjimečné události. Výskyt tornáda intenzity F4 ve střední Evropě oživil debatu o možnostech předpovědi tornád a varování před nimi. Zároveň poukázal na potřebu větší osvěty veřejnosti, jak se chovat při nebezpečí extrémních hydrometeorologických událostí a během nich. V neposlední řadě je třeba zabývat se opatřeními, která by mohla v případě opakování podobné situace zabránit zraněním a ztrátám na životech.

Souhrnná zpráva podrobně popisuje a analyzuje meteorologická data ze dne s výskytem tornáda a ze dnů předcházejících. Je potřeba zdůraznit, že rozsah informací dostupných během výskytu tornáda byl podstatně menší než množství materiálů, které bylo možné získat při následném rozboru. Na analýzu dat v souhrnné zprávě byl k dispozici delší čas, bylo možné využít pohledu mnoha odborníků a také podklady, které v reálném čase k dispozici nebyly. V některých rozborech bude potřeba jít do ještě větších detailů a lépe popsat a pochopit některé procesy, analyzovat stovky fotografií a přidružených materiálů. V následujících měsících proto bude publikována monografie, která bude mj. obsahovat větší množství výstupů, než je schopna pojmut tato shrnující zpráva.



Obr. 2 Srovnávací fotografie z obce Mikulčice v roce 2019, resp. 2012 vlevo a čtyři dny po výskytu tornáda vpravo. Zdroj dat: GoogleEarth (vlevo), terénní průzkum Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy (vpravo), zpracování: Šimon Kolář.

## 2. Podmínky pro vznik tornáda

### 2.1. Základní teorie

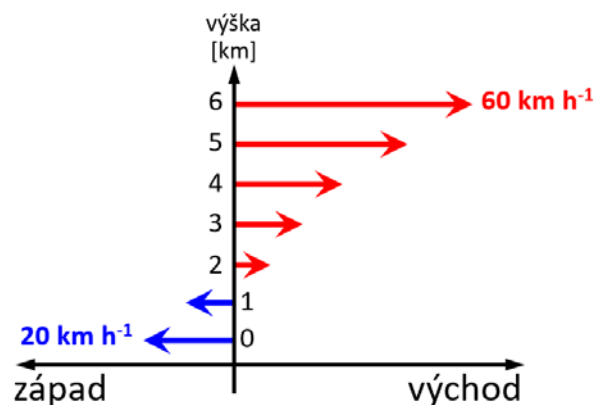
Pro předpovědi konvektivních bouří je v současnosti používána tzv. „metoda přísad“ (ingredient-based methodology, Johns a Doswell (1992)), která shrnuje základní podmínky („přísady“) nutné pro vznik konvektivní bouře. Tyto základní přísady jsou:



1. **Dostatečně vysoká vlhkost vzduchu** při zemi a ve spodních několika stech metrech atmosféry.
2. **Výrazný vertikální teplotní gradient ve střední troposféře** (výška 2–6 km), kdy s rostoucí výškou teplota klesá rychleji, než je obvyklé (hovoříme o tzv. instabilním teplotním zvrstvení ovzduší).
3. **Spouštěcí mechanismus**, který umožní výstup částice vzduchu do střední troposféry, kde při splnění první i druhé podmínky akcelerační vzduchová částice směrem vzhůru a pokračuje až do horní troposféry (výška nad 10 km).

Kombinace prvních dvou přísad je nutná pro přítomnost tzv. energie instability označované zkráceně jako CAPE (z angl. **C**onvective **A**vailable **P**otential **E**nergy), měřené v joulech na kilogram vzduchové hmoty. Vyšší hodnoty CAPE tedy znamenají vyšší množství energie uvolněné při výstupu částice, což vede k silnějšímu výstupnému proudu v konvektivní bouři. I při velmi vysokých hodnotách CAPE však nemusí k tvorbě bouřek vůbec dojít. Důvodem je často absence spouštěcího mechanismu, kterým může být např. studená fronta, čára konvergence (sbíhavosti proudění při zemi) nebo výrazná orografie. I proto nelze posuzovat možnosti vzniku konvektivních bouří jen podle dostupné energie instability, ale při předpovědích je nutné přihlídnout také k přítomnosti možných spouštěcích mechanismů.

Po spuštění tvorby konvektivní bouře trvá její stadium zralosti většinou jen několik desítek minut. Kvůli zahlcení výstupného proudu srážkami dochází rychle k jeho slábnutí a následně bouře přechází do stadia rozpadu. Právě krátké trvání zralé fáze limituje potenciál výskytu nebezpečných doprovodných jevů, což může ale výrazně ovlivnit ještě čtvrtá přísada, která se následně používá pro posouzení nebezpečnosti bouří a kterou je tzv. **vertikální stříh větru**. Ten popisuje změnu horizontálního proudění s výškou (viz obr. 3), resp. rozdíl větru v určitých výškových hladinách vůči větru při zemském povrchu. V nejjednodušším případě může jít o změnu rychlosti větru s výškou, ale obvykle se s výškou více či méně mění jak rychlost, tak i směr větru. Právě odlišný vítr ve výškách může vést k tomu, že ve výšce vznikající srážkové částice nevypadávají zpět do výstupného proudu, ale padají vedle něj. Při jejich vypadávání do okolního vzduchu dochází částečně k jejich vypařování, a tím i ochlazení okolního vzduchu, který následně začne klesat a vytváří sestupný proud. Ten se po dosažení zemského povrchu rozlévá do okolí v podobě chladnějšího a často nárazovitého větru spojeného s příchodem bouřky. Za určitých okolností může i čelo tohoto chladnějšího vzduchu fungovat jako spouštěcí mechanismus pro další nové bouřky a může tak docházet ke vzniku i větších organizovaných konvektivních bouří. Vertikální stříh větru výrazně usnadňuje tvorbu nových bouřkových buněk na čele studeného vzduchu.



Obr. 3 Ukázka změny směru a rychlosti větru s výškou, tzv. vertikální stříh větru.

Konvektivní bouře tvořící se v prostředí se silným vertikálním stříhem větru mohou za jistých okolností vykazovat výraznou rotaci výstupného proudu, nazýváme je supercely. Supercely nejsou nijak výrazně větších horizontálních rozměrů než jiné konvektivní bouře, jak je často mylně uváděno, ale liší se tím, že jejich výstupné proudy jsou širší, intenzivnější a déle trvající než výstupné proudy konvektivních bouří bez rotace. Rotující výstupný proud vytváří ve střední části bouře lokální snížení tlaku vzduchu, které nazýváme „mezocyklona“. To vše vede nejen k tomu, že supercely mohou stabilně existovat dlouhé hodiny, ale i k tomu, že pravděpodobnost výskytu nebezpečných doprovodných jevů je u tohoto typu bouří znatelně větší než u jiných typů konvektivních bouří. Zejména kroupy s průměrem nad 5 cm nebo silná tornáda (kategorie F2 a vyšší) jsou spojeny téměř výhradně se supercelami. Zdaleka ne každá supercela však musí být doprovázena takovými extrémními jevy a jen malá část z nich dá vzniknout tornádu. Supercely jsou známé mnohdy působivou vizuální strukturou, kterou vytvářejí v oblasti pod mezocyklonou bouře. Tak tomu bylo i 24. 6. 2021 u bouře na jižní Moravě (viz obr. 4).



*Obr. 4 Pohled na supercelu na Hodonínsku 24. 6. 2021 s oblačnou strukturou typickou pro supercely, uprostřed obrázku pod základnou oblaku lze rozpoznat nálevku tornáda. Foto: Miloslav Staněk.*

Pro posouzení podmínek vhodných pro vznik silných konvektivních bouří je tedy potřeba zohlednit větší množství různých parametrů. Jako jeden ze základních podkladů meteorologové používají mapy zobrazující překryv množství energie instability (CAPE) a míry vertikálního stříhu větru mezi zemí a obvykle výškou 6 km nad zemským povrchem (dále jen „vertikální stříh větru 0–6 km“). Supercely se sice mohou vyskytovat ve značném rozsahu hodnot CAPE, ale jsou striktně vázány na prostředí, kde vertikální stříh větru 0–6 km (počítaný jako velikost vektorového rozdílu) dosáhne hodnot alespoň kolem  $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (kolem  $65 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

Aby supercela vyprodukovala silné tornádo, je nutné splnění ještě dalších podmínek. Jako naprosto zásadní se jeví přítomnost silného vertikálního stříhu větru ve spodním 1 km nad zemským povrchem (dále jen „vertikální stříh větru 0–1 km“) dosahujícího hodnot alespoň kolem  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $36 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). S výškou se přitom musí měnit nejen rychlost, ale i směr větru (např. při zemi vane východní vítr, v 500 m nad zemí jižní, v 1 km nad zemí však již jihozápadní vítr). Obě tyto charakteristiky jsou reflektovány parametrem zvaným helicity, který se však počítá z větru relativního k pohybující se bouři, a proto pro ni používáme termín relativní helicity. Ta vyjadřuje tendenci vtoku teplého a vlhkého vzduchu do bouře k pohybu po dráze ve tvaru šroubovice (vívrtky). Supercely tvořící se v prostředí s výraznou relativní helicitou mohou vykazovat silnou rotaci i v jejich spodních částech (občas označovanou jako nízkohladinová mezocyklona), což zvyšuje pravděpodobnost tornadogeneze (tvorby tornád). Výrazná rotace ve spodní části bouře způsobuje lokální snížení tlaku vzduchu a následně silný výstupný proud mezi zemí a spodní částí supercely. Tento proud následně dokáže natáhnout a zintenzivnit vorticitu (rotaci) nacházející se přímo při zemi. Z původně horizontální vorticity se stává vertikální vorticity, která

může vytvořit tornádo. Ve většině případů tato rotace pochází z rozhraní výstupného a sestupného proudění v týlové části supercely. Je proto důležité, aby sestupné proudění nebylo příliš studené, a tudíž těžké ke zdvihu do bouře. Při posouzení vhodnosti podmínek pro vznik tornád vázaných na supercely meteorologové sledují kombinaci vysoké relativní helicity, reprezentující vhodné podmínky na silnou rotaci ve spodní části supercely, a zároveň vysoké relativní vlhkosti ve spodním 1 km, reprezentující podmínky vhodné k relativně teplému sestupnému proudění. Tyto parametry bývají prostorově proměnlivější na územích s výraznou orografií, a proto je předpověď tornád v podmínkách střední Evropy, kde je orografie velmi různorodá, komplikovanější než na rovinatých pláních. Tornadogeneze je navíc velmi složitý proces, o kterém dodnes zdaleka nevíme vše, a na dané téma i v současnosti probíhá velmi intenzivní výzkum, zejména ve Spojených státech amerických.

Vynikající shrnutí informací o tornadogenezi (v anglickém jazyce) je možné najít na popularizačních stránkách profesora Paula Markowského: <https://sites.psu.edu/pmarkowski/how-tornadoes-form/>. Další související literatura je uvedena v seznamu použité literatury a zdrojů níže.

## 2.2. Výskyt supercel a tornád na území České republiky v nedávné minulosti

Dokumentaci tornád v Česku je věnována větší pozornost přibližně až poslední čtvrtstoletí, řada ucelených záznamů o jejich výskytu je tak na našem území stále velmi krátká. I přes takto krátký časový interval lze ze zdokumentovaných případů usuzovat, že tornáda vždy byla jedním z doprovodných jevů silných konvektivních bouří i u nás, avšak se znatelně menší četností, než například v centrální části USA. Poslední práce zahraničních autorů ukazují, že tornáda se ve střední Evropě vyskytují asi se čtvrtinovou četností na plochu a dobu trvání konvektivních bouří oproti centrální části USA. Silná tornáda (F2+) jsou ve střední Evropě oproti Spojeným státům ale méně četná a ničivá tornáda (F4+) se vyskytují jen s četností cca 17krát menší na plochu a trvání bouře ve srovnání s USA (Taszarek a kol., 2020).

V průměru se u nás objeví několik tornád ročně, některé roky však nenevidujeme žádné, jiné roky se vyskytne den s výskytem několika tornád najednou. Silné tornádo se objeví několikrát za desetiletí, a to občas včetně velmi silných (F3). Události z posledních dvou dekad velmi dobře dokládají, že tornáda byla v Evropě velmi dlouho podceňovanou hrozbou a že se i zde setkáváme s případy, kdy silné tornádo zasáhne obydlenou oblast, či přímo části obcí a měst. Ať už šlo o případ silných tornád v Posázaví v roce 2001, velmi silné tornádo, jež poničilo část Litovle v červnu 2004, silné tornádo s downbursty, které přispělo ke škodám v několika obcích na Chrudimsku v červnu 2008, ale i případy tornád v Pardubicích v červnu 2011, nebo tornádo z června 2013 v Krnově a některá další. Při zpětné detailní analýze radarových dat z těchto situací lze v některých případech pozorovat náznaky zesílené rotace ve spodních hladinách bouře, ale jen na základě těchto radarových pozorování nelze jednoznačně určit,

že se v oblasti tornádo skutečně formuje. Velmi často takové náznaky při jiných situacích totiž neprovázely výskyt žádných mimořádných nebezpečných doprovodných projevů. Některá z tuzemských tornád byla vázána na supercely, ale většina se zřejmě vyskytovala na multicelách nebo jiných typech konvektivních bouří. Otázkou je i to, nakolik jsme v minulosti byli schopni posoudit, nakolik byla daná bouře skutečně supercelou či nikoli. Zároveň je potřeba podotknout, že jen malé procento supercel dá vzniknout tornádu a že jsou u nás často pozorovány případy velmi silných supercel, které tornádo nevytvořily, a přesto napáchaly obrovské škody působením velkých (průměr přes 2 cm) nebo dokonce obřích (přes 5 cm) krup. Dobrým příkladem byla supercela ze srpna 2010, která způsobila miliardové škody, když jí způsobené velmi silné krupobití zasáhlo jižní část Prahy.

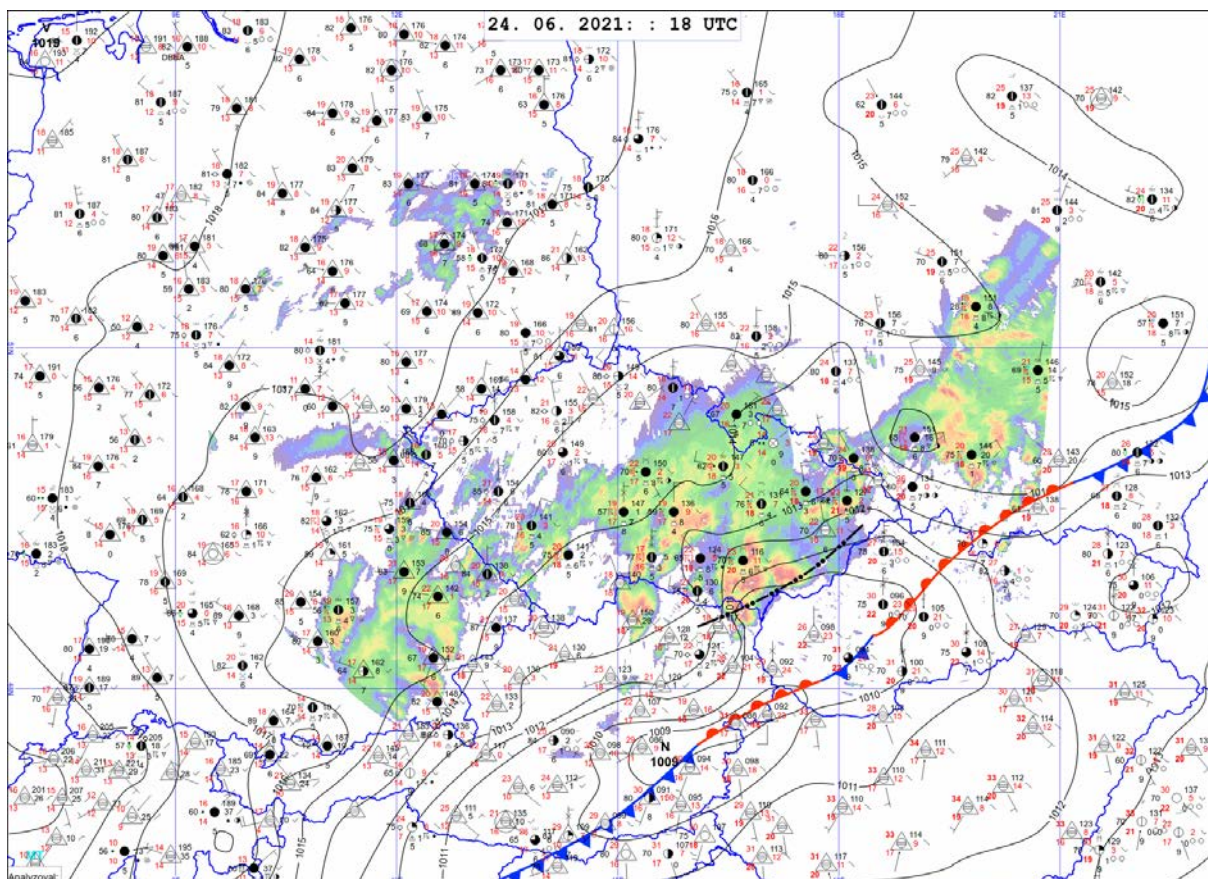
Byly to právě některé případy silných tornád, kdy došlo poprvé k prokázání výskytu supercel u nás (Setvák a kol. 2004). V současnosti je dokumentace a katalogizace výskytu supercel prováděna ve spolupráci s amatérskými pozorovateli počasí a lovci bouří a v průměru u nás evidujeme řádově desítky případů supercel každým rokem.

## **3. Meteorologické podmínky při výskytu tornáda dne 24. 6. 2021**

### **3.1. Meteorologická situace**

Projevy počasí ve střední Evropě v druhé polovině června 2021 byly významně ovlivněny přílivem teplého, nebo velmi teplého vzduchu od jihu před zvlněnou studenou frontou, která se od 19. do 22. 6. udržovala západně od území České republiky. Během 22. 6. se zvlněné frontální rozhraní přesunulo přes naše území zhruba nad západní Slovensko a svou pokračující aktivitou zvýrazňovalo horizontální teplotní gradient zejména nad Moravou až do 25. 6. V rámci celé republiky se vliv zvlněné studené fronty projevil na počasí s nebezpečnými projevy každý den od 19. až do 25. 6. (obrázek 5 zobrazuje synoptickou situaci 24. 6. ve 20:00 SELČ). Nebezpečné projevy počasí se objevovaly nejprve nad Čechami, postupně i nad Moravou a Slezskem. Například 21. 6. byl na Hodonínsku lokálně zaznamenán extrémní srážkový úhrn 176,4 mm za 2,5 hodiny (stanice síť AMET – sdružení Litschmann & Suchý v Dolních Bojanovicích). Nejvyšší denní teplotní maximum v Jihomoravském kraji se od 16. 6. až do 24. 6. pohybovalo v rozmezí 29 až 34 °C. Výrazná konvektivní činnost byla podporována teplotními podmínkami a vysokou vlhkostí vzduchu ve vhodném tlakovém poli. Důležitým faktorem pro podporu silné konvektivní činnosti byl vertikální stíh větru, který byl díky silnému výškovému proudění v oblasti zvlněné studené fronty výrazný.

Z nebezpečných meteorologických jevů byly v období od 19. do 25. 6. zaznamenány všechny projevy typické pro konvektivní bouře: přívalové srážky, výrazné porvy větru, silná blesková aktivita, velké kroupy a právě 24. 6. na Břeclavsku a Hodonínsku i na poměry ČR extrémně silné tornádo. Detailnějšímu popisu a rozboru meteorologických dat a informací z dostupných měření a pozorování jsou věnovány další kapitoly.



Obr. 5 Zvlněná studená fronta nad střední Evropou 24. 6. 2021 ve 20:00 SELČ (18:00 UTC), na jižní a východní Moravě je zvýrazněna čára konvergence. Pozice synoptického kroužku u některých stanic mohou být kvůli přehlednosti posunuty vůči jejich přesné geografické poloze. Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.

## 3.2. Přízemní data

### 3.2.1. Analýza přízemních dat

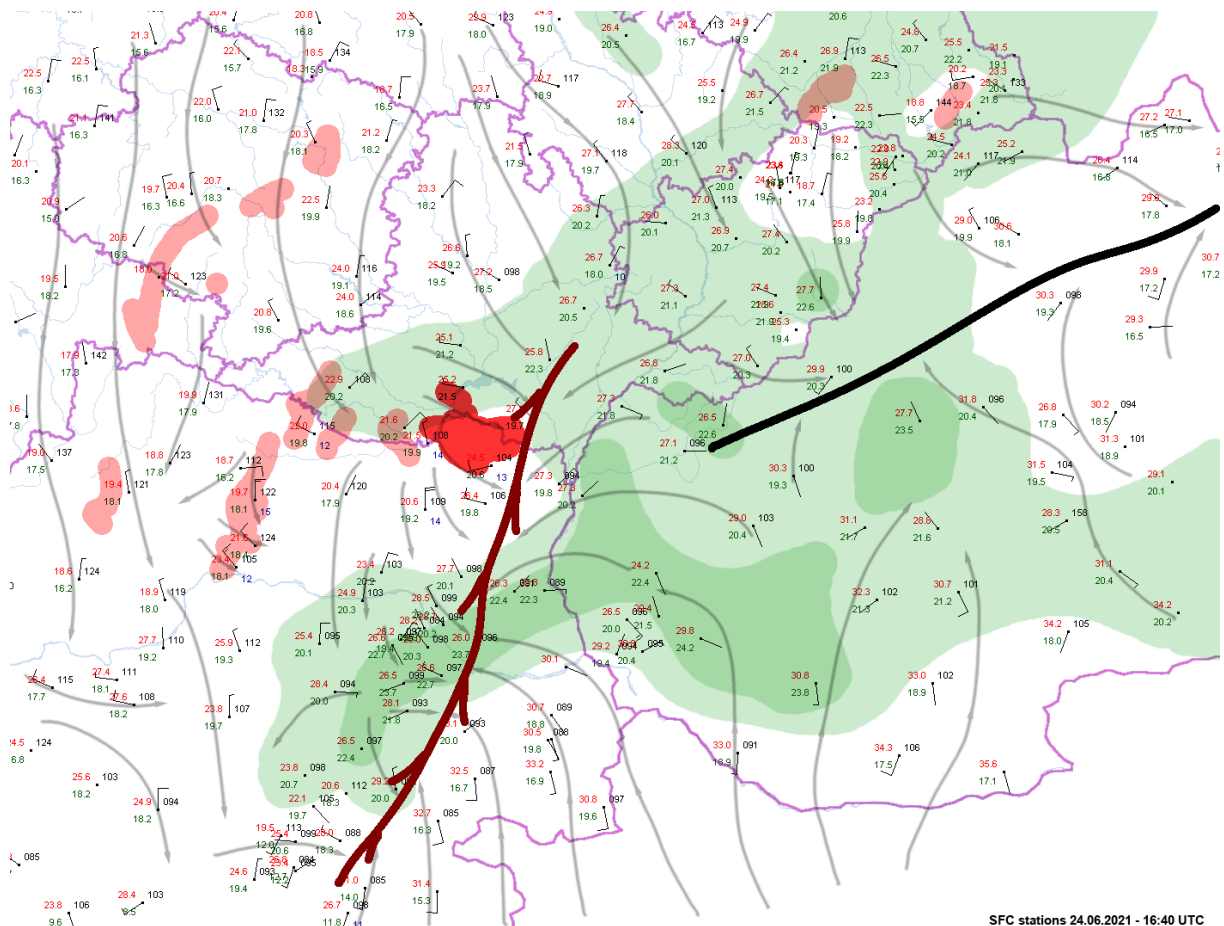
Kombinace retrospektivně analyzovaných 10minutových dat z automatických meteorologických stanic ČHMÚ a dat z Rakouska a Slovenska umožňuje detailněji popsat dění ve spodní troposféře oblasti o rozloze stovek čtverečních kilometrů. Tornadická supercela vznikala v severním Rakousku a zasáhla hraniční oblast mezi třemi státy. Před vznikem tornáda bylo proto prakticky nemožné detailně analyzovat meteorologické podmínky tak, jak je to uvedeno níže, protože data ze sousedních států jsou on-line dostupná pouze z omezeného počtu stanic.

Staniční data potvrzují v zájmové oblasti (sever Rakouska, jižní Morava, západní okraj Slovenska) v odpoledních hodinách přítomnost velmi vlhké a teplé vzduchové hmoty s hodnotami rosného bodu dosahujícími 19 až 23 °C. V 16:00 SELČ při zemi vál nad jižní Moravou a severním Rakouskem slabý vítr severních směrů a teplota vzduchu se stále pohybovala v rozmezí 29 až 33 °C. Následně teplota spíše stagnovala nebo slabě klesala z důvodů postupného přibývání oblačnosti, která se vytvořila v souvislosti se silnou konvekcí nad Rakouskem.

V následující hodině začala být nad severním Rakouskem, v prostoru údolí Dunaje, dobře patrná čára konvergence. Před ní vál mírný jihovýchodní až severovýchodní vítr. Mezi 17:00 a 18:00 SELČ bylo patrné rozšiřování čáry konvergence směrem na sever, což korespondovalo s postupnou iniciací bouřek na hranicích Rakouska a Moravy. Jasně zřetelný byl i její postup směrem na východ. Na několika stanicích byl při jejím přechodu identifikován pokles tlaku vzduchu a jeho následný vzestup spojený se stočením větru na severozápadní směr.

Přes jižní Moravu přecházela čára konvergence mezi 19:00 a 20:00 SELČ. Před jejím přechodem byl pozorován slabý až mírný východní vítr, teploty rosného bodu na stanicích ještě před srážkami rovněž dosahovaly hodnot až 23 °C a teploty vzduchu až 28 °C. První konvektivní bouře (zkoumaná tornadická supercela) přecházela Břeclavsko a Hodonínsko zároveň s čárou konvergence. Po jejím přechodu se mírně ochladilo na teploty vzduchu okolo 23 °C (vlivem intenzivních srážek i na hodnoty pod 20 °C) a vítr se stočil na severozápadní.

Další konvektivní bouře postupující v týlu čáry konvergence tak měly, oproti té první, ve spodním 1 km jednak stabilnější vertikální teplotní zvrstvení a zřejmě i slabší vertikální stříh větru. Je tedy možné usuzovat, že tento fakt mohl být jedním z důvodů, proč další konvektivní systémy, které během noci opakovaně zasáhly jižní a jihovýchodní Moravu, neměly podmínky dostatečně vhodné pro tornadogenezi. Přesto přetrvání výrazného vertikálního stříhu větru i vertikálního teplotního gradientu ve střední troposféře vedlo k zachování organizace konvektivních bouří do supercel a k produkci velkých krup a krátkodobých intenzivních srážek.



Obr. 6 Zjednodušené zobrazení detailní analýzy meteorologické situace 24. 6. 2021 v 18:40 SELČ (16:40 UTC) v oblasti výskytu tornáda. Vysvětlení legendy v textu. Zdroj dat: ČHMÚ, SHMÚ, ZAMG, zpracování David Rýva.

Na obrázku 6 jsou vykreslena data z pozemních automatických meteorologických stanic formou klasického tzv. „pavouku“ (červeně teplota vzduchu, zeleně teplota rosného bodu, černě tlak vzduchu a modře případné maximální rychlosti větru nad 10 m/s). Vykresleny jsou proudnice větru, zeleně jsou zvýrazněny oblasti s rosnými body nad 20 a 22 °C a světle červeně pak konvektivní bouře s maximální radarovou odrazivostí s hodnotami nad 50 dBZ. Zájmová supercela je zobrazena sytější červenou barvou než ostatní bouře. Černou čarou je naznačena osa brázdy nižšího tlaku vzduchu nad severozápadem Slovenska, nad východem Rakouska je hnědě vyznačena diskutovaná čára konvergence. Fialovou čarou jsou zobrazeny státní hranice a hranice krajů ČR. Preciznější analýza včetně časového vývoje situace v oblasti bude prezentována v rámci připravované monografie.

### 3.2.2. Extremita naměřených hodnot

Vybrané klimatologické charakteristiky dne 24. 6. 2021 z šesti stanic lokalizovaných v okolí oblasti zasažené tornádem byly vyhodnoceny a porovnány s dříve naměřenými hodnotami (tabulka 1).



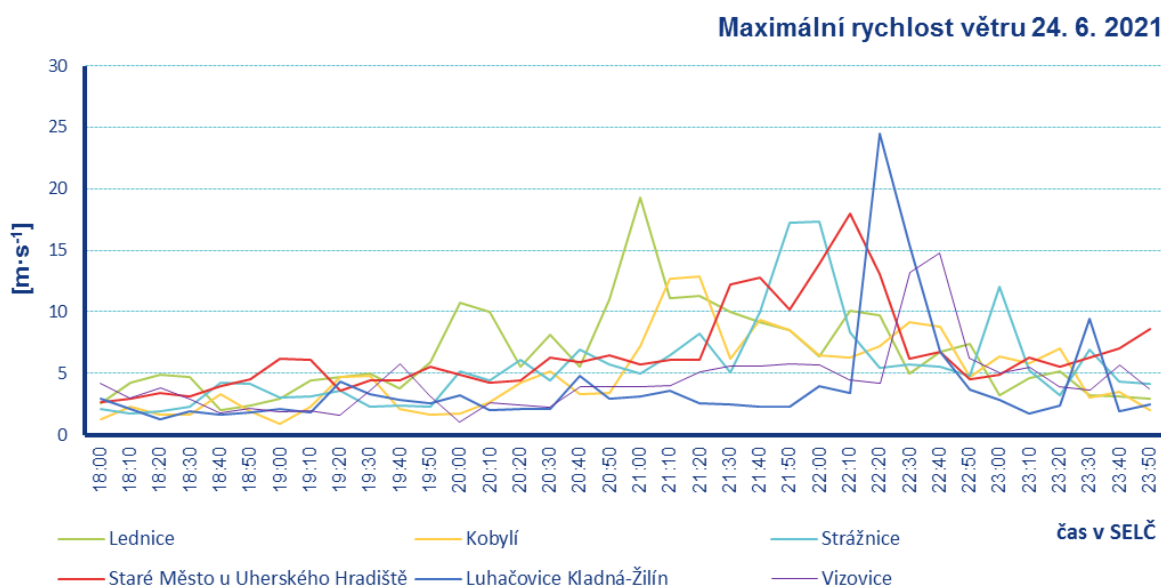
Tabulka 1 Vybrané klimatologické charakteristiky pro den 24. 6. 2021. Zdroj dat: ČHMÚ.

Stanice	Maximální rychlost větru	Čas zaznamenání max. rychlosti větru	Denní úhrn srážek 8–8 h SELČ	Maximální teplota vzduchu	Minimální teplota vzduchu	Průměrná denní teplota vzduchu	Průměrný denní tlak vodní páry
	(m·s <sup>-1</sup> )	SELČ	(mm)	(°C)	(°C)	(°C)	(hPa)
Lednice	19,3	19:52	24	31,8	18,1	22,9	21,7
Kobylí	12,9	20:16	37,7	30,5	17,8	22,1	21,9
Strážnice	17,3	20:53	18,2	33,7	17,8	23,1	22,9
Staré Město u Uher. Hradiště	18	21:09	32,6	31,9	18,5	22,8	22,1
Luhačovice, Kladná-Žilín	24,5	21:19	24,1	31,7	16,5	21,9	22,7
Vizovice	14,8	21:30	30,5	31,2	16	21,3	22,7

Nejvyšší maximální teplota vzduchu byla v Jihomoravském a Zlínském kraji zaznamenána 24. 6. 2021 na stanici Strážnice a činila 33,7 °C. Z hlediska extremity se nejednalo o nejvyšší pozorovanou hodnotu, vyšší červenová hodnota byla naměřena dne 10. 6. 2014, a to 35,9 °C. Zatím nejvyšší maximální teplota vzduchu 39,2 °C na stanici Strážnice byla zaznamenána 8. 8. 2013.

Tropické, nikoliv však extrémní teploty vzduchu, se dne 24. 6. 2021 vyskytovaly na většině sledované oblasti, nejtepleji pak bylo na Břeclavsku, Hodonínsku a v Bílých Karpatech. V celé oblasti byla vysoká vlhkost vzduchu, hodnoty tlaku vodní páry splňovaly definici dusného dne (tlak vodní páry v některém z termínu pozorování vyšší než 18,7 hPa). Dne 24. 6. 2021 přesahovaly maximální hodnoty tlaku vodní páry hodnotu 25 hPa, nejvyšší hodnota 28,4 hPa byla naměřena na stanici Luhačovice, Kladná-Žilín v 18:00 SELČ.

Vzhledem k tomu, že přímo v dráze tornáda neměří žádná meteorologická stanice rychlost větru, jsou uvedeny záznamy pouze ze stanic z okolí. Nejvyšší maximální rychlost větru v oblasti kolem trasy tornadické supercely dne 24. 6. 2021 byla naměřena na stanici Luhačovice Kladná-Žilín (obr. 7) a dosáhla 24,5 m·s<sup>-1</sup> (88,2 km·h<sup>-1</sup>). Takto vysoké hodnoty bývají zaznamenávány častěji mimo letní období v souvislosti s přechodem velkoprostorových hlubokých tlakových níží než při velmi lokálních větrných projevech bouří. Například ve Strážnici v období let 1999 až 2020 bylo zaznamenáno pouze šest dní s maximální rychlostí větru 24,5 m·s<sup>-1</sup> (88,2 km·h<sup>-1</sup>) a více, z toho pouze jeden v letním období. Právě ve Strážnici byla zaznamenána 1. 3. 2008 maximální rychlost větru 33,2 m·s<sup>-1</sup> (119,5 km·h<sup>-1</sup>), což představuje nejvyšší dosaženou hodnotu pro oblast jižní Moravy.



Obr. 7 Maximální rychlosti větru po 10 minutách na vybraných stanicích dne 24. 6. 2021. Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.

V zájmové oblasti spadlo dne 24. 6. 2021 (denní úhrn srážek od 08:00 SELČ 24. 6. do 08:00 SELČ 25. 6.) od 8,5 mm srážek v Radějově (jižně od Strážnice) do 44,3 mm na stanici Hýsly (východně od Kyjova). V dráze tornáda a blízkém okolí byl denní úhrn srážek na stanici Hrušky 24,5 mm, Prušánky 39,2 mm, Hodonín 21,5 mm a Dubňany 36,4 mm. Nejvyšším změřeným denním úhrnem srážek severněji od sledované oblasti byl úhrn 46,6 mm na stanici Ždánice. Prostorové rozložení srážkových úhrnů (kombinace naměřených úhrnů s radarovými odhady) je znázorněno v kap. 4.3.2 na obrázku 24. Přes sledovanou oblast přešly celkem čtyři konvektivní systémy. Srážky se vyskytovaly převážně v době od 18:00 SELČ a po půlnoci postupně doznívaly.

Na většině území měly srážky přívalový charakter. Nejvyšší zjištěnou intenzitu srážek  $3,7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  dosáhla stanice Hluk mezi Veselím nad Moravou a Uherským Brodem, a sice krátce po 21:00 SELČ, tedy až v druhé vlně konvektivních bouří. Nejvyšší klouzavá 10minutová suma srážek v této oblasti byla dosažena na stanici Luhačovice, Kladná-Žilín 19 mm za 10 min, rovněž v druhé vlně bouří. Přestože se během večera a noci 24. 6. 2021 v konvektivních bouřích vyskytovaly velmi intenzivní srážky, nepatří výše uvedené hodnoty desetiminutového deště k absolutním extrémům, ty mají hodnoty přes 30 mm za 10 min. Naopak minutové úhrny srážek nad 3 mm jsou vzácnější (nejvyšší naměřené hodnoty kolem  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

Dešťové srážky byly dne 24. 6. 2021 doprovázeny kroupami, v některých lokalitách o velikosti 4 a více cm. Podle pozorovatele srážkoměrné stanice Hrušky dosahovaly kroupy velikosti „slepičího vejce“.

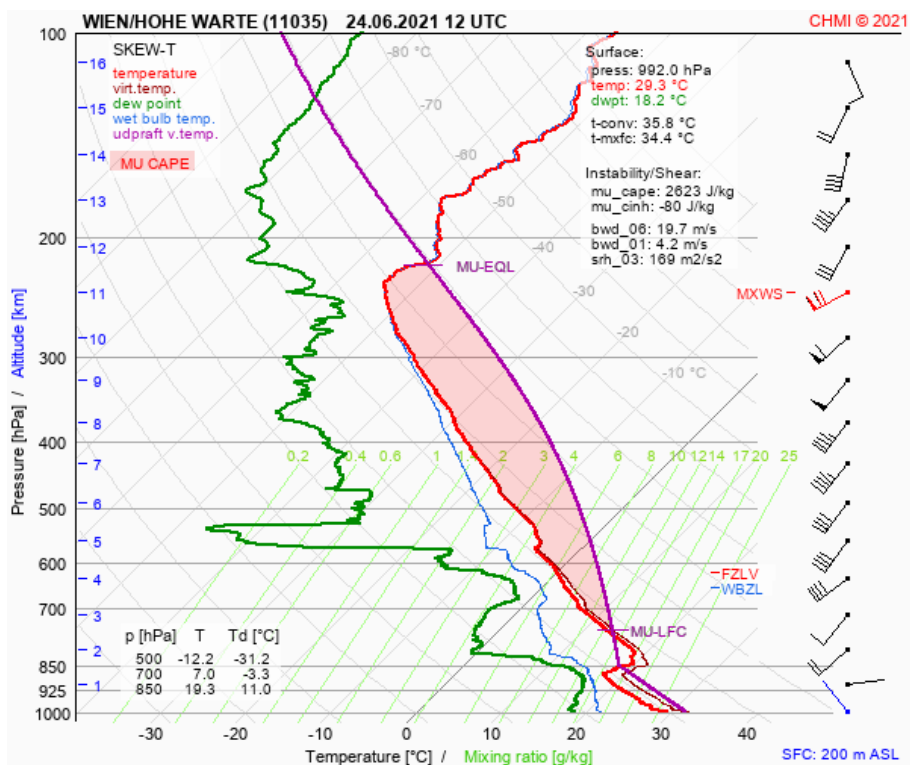
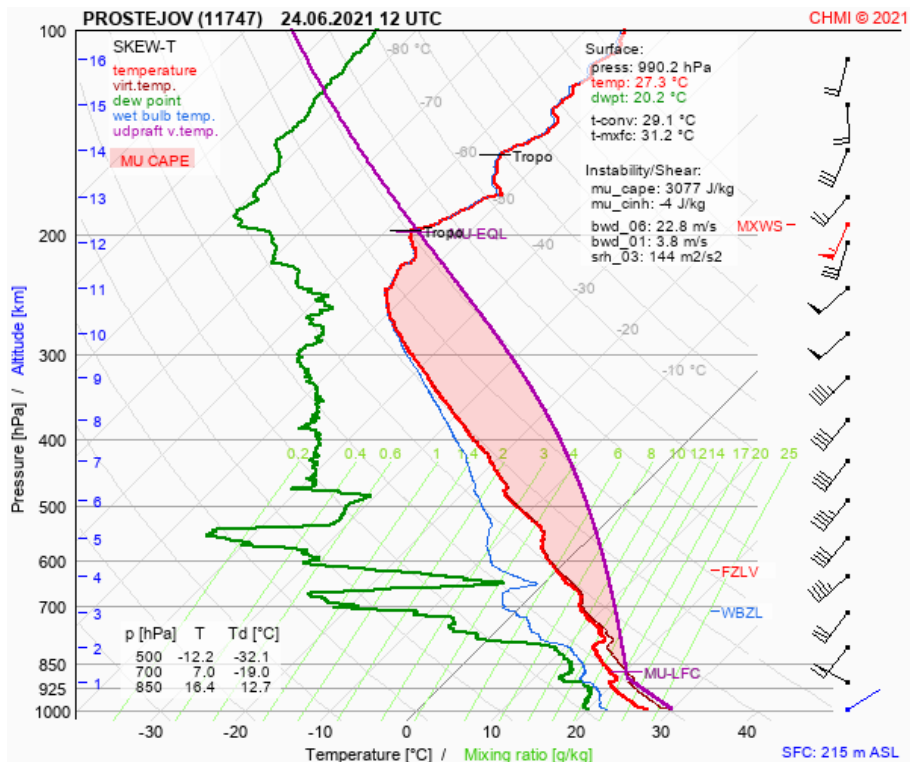
### 3.3. Vertikální profily atmosféry

Měření teploty, vlhkosti vzduchu a rychlosti a směru větru ve vertikálním profilu atmosféry pomocí radiosondy, nesené sondážním balonem (tzv. radiosondáž), umožňuje zpřesnit představu o povětrnostních podmínkách v celé troposféře, i když pouze bodově. Analýzou těchto prvků lze získat mnoho parametrů a indikátorů, které mohou sloužit k identifikaci podmínek vhodných například pro nebezpečné projevy silných konvektivních bouří. Síť radiosondážních stanic je ale velmi řídká. Jednotlivé stanice jsou od sebe vzdáleny obvykle stovky kilometrů, ale lokální podmínky mohou být výrazně odlišné v různých regionech a zejména tam, kde je členitý terén. Částečně lze tento problém řešit pomocí modelových nástrojů. Ty sice mají větší míru nepřesnosti (vzhledem ke zjednodušenému výpočtu modelů oproti skutečnosti), ale umožňují vytvářet modelové vertikální profily teploty a vlhkosti vzduchu spolu s modelovým prouděním v podobě tzv. pseudosondáží. I za cenu menší podrobnosti a přesnosti dat je však důležité vertikální profily modelovat. Kromě použití různých numerických předpovědních modelů (dále jen NWP modely), tzn. více scénářů předpovídaného počasí, lze provádět výpočty pro libovolné lokality. Pro den 24. 6. 2021 byly analyzovány parametry změřených sondážních dat ze stanic nejbližší jižní Moravě (Prostějov a Vídeň Hohe Warte) a využity byly i modelové reanalýzy pro dalších 10 zvolených bodů v okolí Břeclavi. Vytvořením pseudosondáží z nejaktuálnějších předpovědních dat kombinovaných s měřenými daty byl získán pro vybrané body pohled na profil atmosféry ve zkoumané oblasti, který byl skutečnosti nejbližší.

Sondáží mohou být měření doplněna daty z letadel, která prolétávají zájmovou oblastí (data AMDAR). Data vhodná k doplnění analýz v této zprávě poskytla 3 dopravní letadla.

#### 3.3.1. Měření vertikální profily

Sondáže z Prostějova a Vídně byly zpracovány v podobě operativně používaných diagramů, zejména pak SKEW-T diagramů a hodografů (obr. 8).



Obr. 8 Zpracování dat ze sondážního měření z Prostějova (nahore) a z Vídně (dole) v podobě SKEW-T diagramu z poledního termínu (14:00 SELČ) 24. 6. 2021. Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.

Mnohé z parametrů v poledních sondážních měřeních ve Vídni a v Prostějově sice naznačovaly výrazné podmínky pro vznik supercel, kdy dosahovaly značných hodnot jak energie instability (MUCAPE: Vídeň 2623 J·kg<sup>-1</sup>, Prostějov 3077 J·kg<sup>-1</sup>), tak hodnoty vertikálního stříhu větru 0–6 km (Vídeň 19,7 m·s<sup>-1</sup>, Prostějov 22,8 m·s<sup>-1</sup>), ale vertikální stříh větru ve spodním 1 km byl poměrně slabý (4,2, resp. 3,8 m·s<sup>-1</sup>). Je však nutné podotknout, že s možností použít tato měření a výsledky jejich zpracování narážíme na zásadní problém. Pro zájmovou oblast Břeclavska v čase výskytu tornáda (19:00 SELČ) nebylo možné použít polední sondáž jako reprezentativní ani z Prostějova, ani z Vídně vzhledem k velké časové i prostorové vzdálenosti od výskytu bouří. S ohledem na tyto skutečnosti bylo nezbytné použít pro další analýzy možných podmínek v místě výskytu tornáda zejména modelové reanalýzy, do kterých právě tato sondážní data vstupovala jako jeden z podkladů pro numerickou simulaci dalšího vývoje.

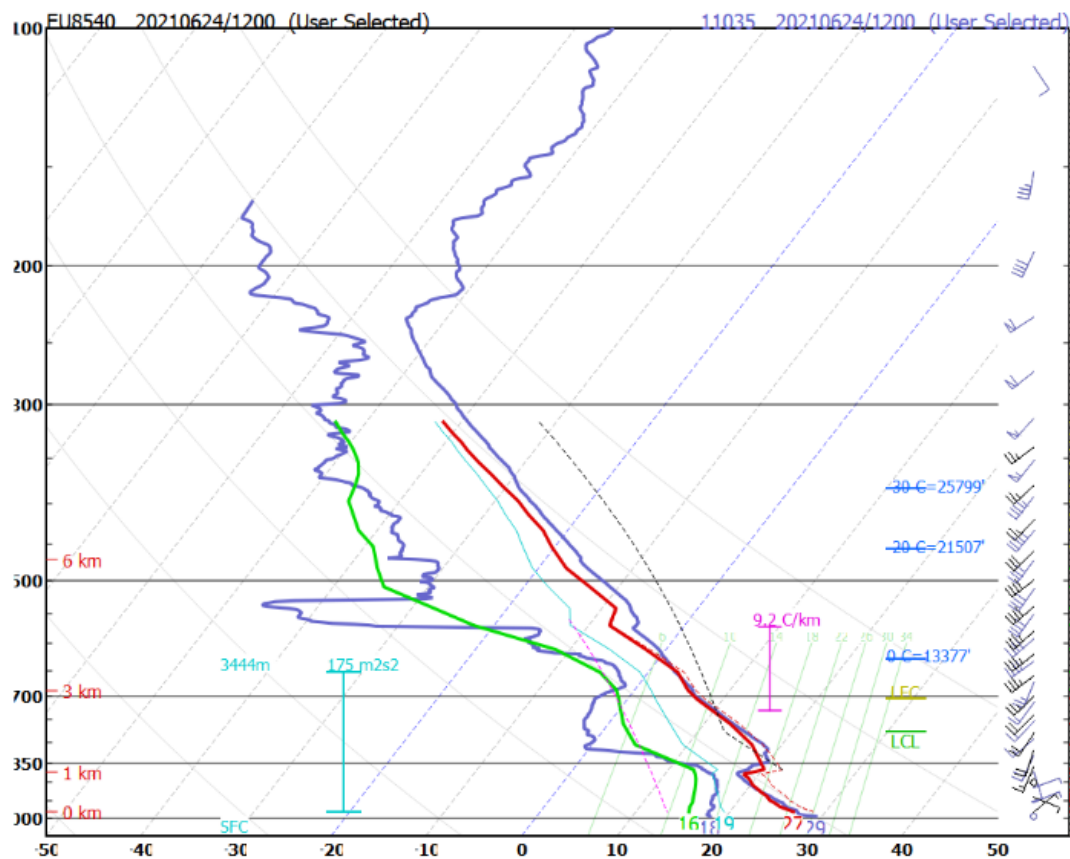
Ze sondážních měření z Prostějova a Vídně je nicméně nepochybné, že podmínky se značnými hodnotami energie instability a zároveň výrazný vertikální stříh větru panovaly na rozsáhlé ploše. Bylo tedy možné předpokládat výskyt intenzivních konvektivních bouří s nebezpečnými doprovodnými jevy, a to zejména v podobě silného krupobití.

Zprávy AMDAR poskytují meteorologická data z civilních letadel, což se ve většině případů omezuje na teplotu a vektor větru. V případě významnější změny výšky, tj. téměř výhradně při vzletu a přistání, lze s přihlédnutím k pozici letadla získat i rozumně přesné vertikální profily atmosféry, chyba měření je zhruba do půl stupně Celsia.

Z mnoha zpráv AMDAR v rámci Evropy byly pro zpřesnění odhadu atmosférických podmínek v oblasti jižní Moravy a severovýchodního Rakouska použitelné pouze tři profily, a to z následujících letů:

Identifikátor letu (ID letu)	Charakteristický čas (SELČ)	Směr letu
EU8540	14:00	Vzlet z letiště Wien Schwechat na V–JV
EU4300	15:00	Vzlet z letiště Wien Schwechat na Z–SZ
EU8544	19:27	Vzlet z letiště Wien Schwechat na V–SV do výšky 3 km

Na příkladu letu EU8540 z 14:00 SELČ, který směřoval z letiště Wien-Schwechat na východ až jihovýchod, je vidět, že teplotní data (doplněná vlhkostí z AM modelu) vykazovala podobné rysy jako sondáž z Wien-Hohe Warte z 14:00 SELČ (obr. 9), přičemž gradient teploty s výškou mezi hladinami 850 a 500 hPa byl o něco vyšší (8,3 vs. 7,6 °C/km), což indikuje slabé zvyšování instability. Sondáž s menším vertikálním dosahem z 19:27 SELČ (tedy v čase existence tornáda), doplněná rosným bodem z numerického modelu, naznačovala vyšší teplotu v mezní vrstvě (do cca 1500 m nad terénem), což vysoký potenciál pro silné konvektivní bouře jenom potvrzuje.



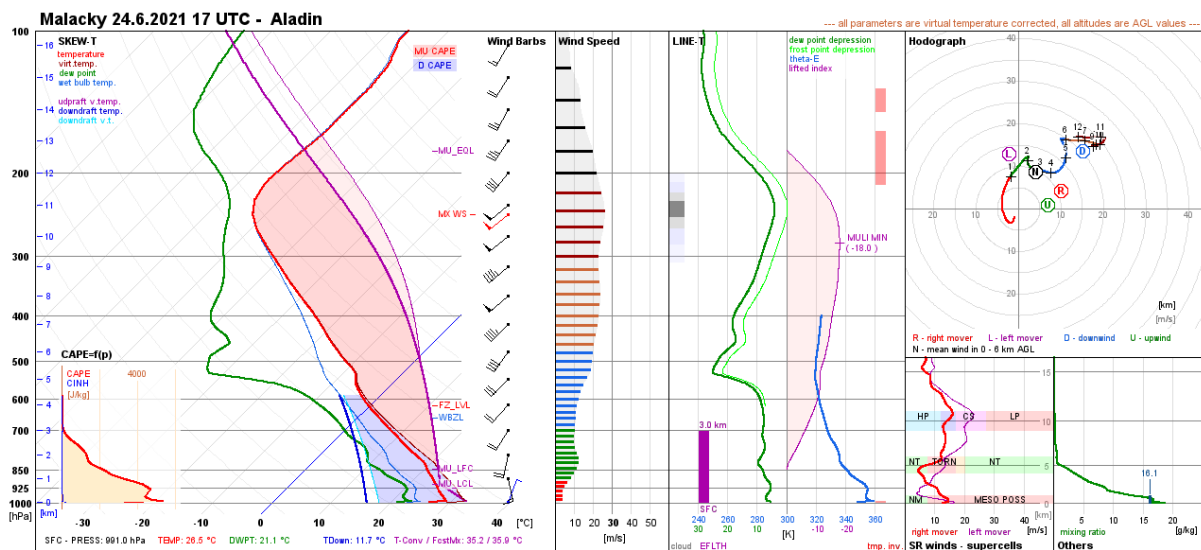
Obr. 9 Průběh teploty s výškou z letu EU8540 z Vídně (červeně), rosného bodu z AM modelu (zeleně), doplněné modrými křivkami ze sondáže z Vídně (Hohe Warte) z 24. 6. 2021, 14:00 SELČ (12:00 UTC). Zdroj dat: Amper Meteo, WMO AMDAR Panel, zpracování: Amper Meteo.

Zprávy AMDAR jsou k dispozici téměř v reálném čase a poskytují důležitý doplněk k radiosondážím, které jsou k dispozici v nejlepším případě v intervalech po šesti hodinách, ale většinou ještě méně často. Kromě jejich využití v podobě dalších údajů do NWP modelů je velmi žádoucí, aby byly v budoucnu ve větší míře k dispozici prognostikovi i širší meteorologické komunitě. A to jak ve formě vlastních zpráv, tak ve vhodné prezentační podobě (grafech) pro lepší odhad vývoje atmosféry, zejména pro stanovení velikosti instability a vertikálního střihu větru v porovnání s numerickými modely. Data jsou důležitá i přes nevýhody této sondáže, které spočívají v menší přesnosti a také ve skutečnosti, že profil atmosféry je vlivem trajektorie letadla výrazně skloněn, zejména ve srovnání s klasickými radiosondážemi.

### 3.3.2. Modelové vertikální profily atmosféry

Pro detailnější zhodnocení stavu atmosféry zkoumané oblasti byly pro 10 bodů z širšího okolí Břeclavi, ale i z radiosondážních stanic Vídeň a Prostějov, zpracovány a analyzovány profily z dat numerických předpovědních modelů (dále jen NWP modely) ALADIN (ČHMÚ), GFS (NOAA/NCEP) a AM modelu (WRF12, Amper Meteo). Využity byly modelové běhy z 14:00 SELČ (12:00 UTC), do kterých byla zahrnuta měřená data aktuálních sondážních měření. Pro získání prostorového modelu atmosféry co nejbližšího realitě byla na podkladech dat z NWP modelu ALADIN aplikována diagnostická analýza zahrnující aktuální měření a pozorování z poslední celé hodiny (mj. pozemní měření, meteorologická data z letadel a družicová data). Profily byly zpracovány jednak softwarem Davida Rývy, který je využíván k operativnímu zpracování radiosondážních dat v ČHMÚ, dále do podoby testovacích sondážních panelů, a také programem SHARPPy, který je mj. používán organizací Storm Prediction Center (NOAA/NWS) a v České republice firmou Amper Meteo. Z podrobného zpracování těchto vertikálních profilů atmosféry, které svým rozsahem překračuje rámec této zprávy, vyplývají následující poznatky.

V oblasti severovýchodního Rakouska, Moravy a západního Slovenska indikovaly NWP modely podmínky pro extrémní konvektivní bouře, největší hodnoty indexů naznačujících podmínky pro vznik supercel kulminovaly kolem 19:00 SELČ. Největší hodnoty MUCAPE (nejvyšší potenciální energie konvekce zjištěná v profilu) dosahovaly na pomezí Rakouska, jihovýchodní a východní Moravy a Slovenska podle modelu ALADIN i nad  $5000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , což jsou mimořádně vysoké hodnoty. Na obrázku 10 je zobrazen vertikální profil z modelu ALADIN pro oblast slovenské obce Malacky poblíž česko-slovensko-rakouského trojmezí v termínu 19:00 SELČ. V levé části (SKEW-T diagram) je růžovou plochou zvýrazněna dostupná energie instability s hodnotou MUCAPE  $5346 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , přičemž její část mezi izotermami  $0$  a  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  je značná – to je známka potenciálu tvorby velkých krup. Hodograf (pravá část obrázku) představuje spojnici vektorů větru změřených stoupající sondou. Linie v hodografu se od počátku souřadnic při výstupu stáčí doprava, a to poměrně výrazně ve spodní části troposféry (červená část linie značí výstup do  $1 \text{ km}$ ) – proto byly vypočteny vysoké hodnoty relativní helicity ( $152 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ).



Obr. 10 Ukázka modelových dat ALADIN formou testovacího zpracování v podobě SKEW-T diagramu (vlevo) a hodografu (vpravo nahoře) pro vertikální profil bodu Malacky (Slovensko) v 19:00 SELČ (17:00 UTC) 24. 6. 2021. Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.

Přestože mezi hodnotami některých veličin v obou použitých zpracováních pro vytvoření pseudosondáží jsou patrné menší rozdíly, které jsou způsobeny odlišnou metodikou dílčích výpočtů, byl ve výstupech indikován výrazný potenciál prostředí pro vznik až extrémně silných bouří včetně možnosti vzniku i silných tornád. Je ovšem nutné přihlídnout ke skutečnosti, že parametry a vypočtené indexy používané pro potenciál vzniku supercel a na supercely vázaných tornád nejsou v našich podmínkách verifikovány a mohou vykazovat mnohem horší výsledky, než v prostředí centrální části USA, pro kterou byly statisticky vytvořeny.

Přestože ostatní modely poukazovaly na relativně nižší hodnoty CAPE než ALADIN, šlo stále o velmi výrazné až extrémní hodnoty energie instability, a to na poměrně velkém území. Podle NWP modelů se v podvečer 24. 6. 2021 zároveň zvyšoval vertikální stříh větru 0–6 km s pravotočivým stáčením (s výškou) z hodnot kolem 22 m·s<sup>-1</sup> na hodnoty kolem 30 m·s<sup>-1</sup> (ALADIN) v nočních hodinách. Některé modely také indikovaly v podvečerních hodinách zesilování vertikálního stříhu větru 0–1 km a s tím související zesilování hodnot helicity na hodnoty řádu stovek m<sup>2</sup>·s<sup>-2</sup>. Variabilita modelových odhadů hodnot helicity v prostoru i v čase je velmi rozdílná, a tak nelze jen na jejich základě usuzovat na reálné hodnoty. Ty se pokusíme odhadnout věrohodněji na základě rekonstrukce vertikálního profilu v daném místě na základě kombinace většího množství dat, což bude předmětem dalších prací na tomto případě výskytu tornáda.

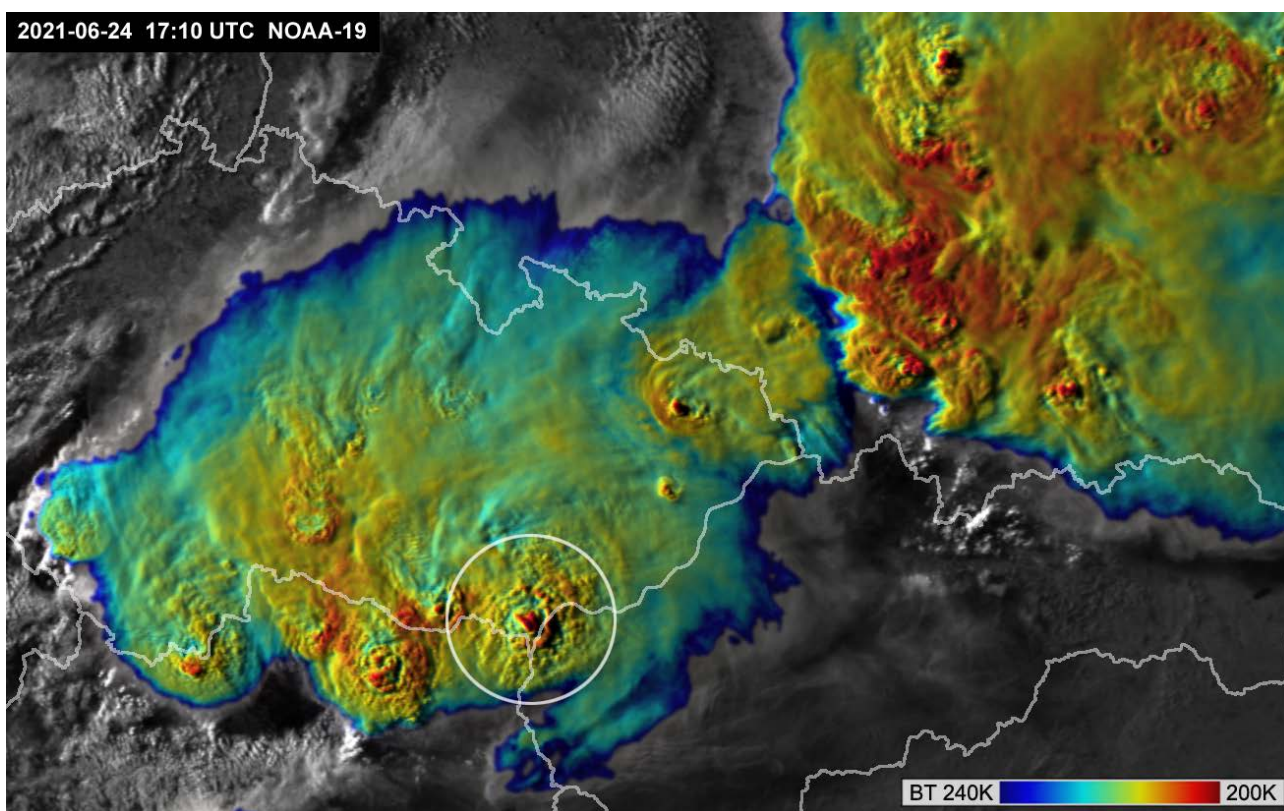
Indikátory silných konvektivních bouří byly podle sledovaných NWP modelů v čase i prostoru sice odlišné, ale potenciál jejich výskytu byl velmi vysoký, a to na ploše až desítek tisíc km<sup>2</sup>, stejně jako bylo potvrzeno radiosondážními měřeními. Rozhodujícím faktorem při iniciaci bouří byl vhodný spouštěcí impuls. Pro potenciální výskyt silného tornáda podmínky vykazovaly také vysokou časovou i prostorovou variabilitu. Jedním z ukazatelů nejednoznačnosti určení místa výskytu tornáda je například



to, že podle analýz byly vyšší pravděpodobnosti možného výskytu tornád v Rakousku a zejména na Slovensku, kde byly podle vybraných pseudosondáží vyšší hodnoty relativní helicity i vertikálního stříhu větru 0–1 km než na jihu Moravy.

### 3.4. Operativní družicové informace

Vývoj konvektivních bouří a zejména jejich rozsah je dobře patrný na snímcích z meteorologických družic, používaných pro detekci a sledování různých meteorologických jevů a jejich doprovodné oblačnosti. Pokročilejším zpracováním jednotlivých kanálů a jejich kombinací lze sledovat různé vlastnosti oblačnosti, jako např. morfologii horní hranice oblačnosti, její teplotu a mikrofyzikální složení, které do značné míry vypovídají o charakteru jevů skrytých pod oblačností.



*Obr. 11 Snímek z polární družice NOAA-19 z 24. 6. 19:10 SELČ (17:10 UTC) zobrazující bouře nad naším územím a jeho bezprostředním okolí. Zdroj dat: NOAA a ČHMÚ, zpracování: ČHMÚ.*

Tzv. sendvičový snímek (obr. 11) kombinující data z viditelného (kanál 2) a tepelného (kanál 4, barevně) pásma zobrazuje rozložení a vzhled konvektivních bouří nad částí střední Evropy přibližně v okamžiku počátku tornáda, tj. v 19:10 SELČ. Bouře, na níž tornádo na Moravě vzniklo, je vyznačena bílou kružnicí. Výrazně nebezpečněji na družicových snímcích toho dne však vypadaly jiné bouře. Jednak bouře západně od bouře s tornádem, jednak bouře nad Polskem, které byly doprovázeny jak rozsáhlým

výskytem obřích krup (místa dosahujících průměru nad 10 cm), tak tornádem stupně F2 na jihu Polska (obec Librantowa, cca 75 km jihovýchodně od Krakova).

Jediným význačným jevem, indikujícím potenciální nebezpečnost tornadické bouře, je přestřelující vrchol nad středem bouře (na obrázku zobrazený červeně ve středu kružnice) a gravitační vlna postupující k východu (červený chladnější oblouk), související s aktivitou předchozího přestřelujícího vrcholu. Přestřelující vrcholy, které jsou generovány silnějšími výstupnými konvektivními proudy (tzv. updrafty) uvnitř bouří, jsou však poměrně časté a z družicových indikátorů potenciální nebezpečnosti bouří je jejich přítomnost považována za méně významnou. Důležitým je ale rozdíl jejich minimální teploty (tj. teploty jejich nejvyšší části) a teploty okolní nižší vrstevnaté oblačnosti (kovadliny) bouře, který indikuje převýšení přestřelujícího vrcholu, a tedy nepřímo i intenzitu updraftu. V tomto případě byla teplota nejchladnější části přestřelujícího vrcholu 195 K ( $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), zatímco průměrná teplota okolní kovadliny bouře se pohybovala od 212 ( $-61\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) do 218 K ( $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Jako průměrná hodnota poklesu teploty přestřelujících vrcholů s výškou se udává cca 0,6 až 0,8 K / 100 m, teplotní rozdíl mezi teplotou okolní kovadliny a nejnižší teplotou přestřelujícího vrcholu na tomto snímku tedy naznačuje výšku přestřelujícího vrcholu kolem 2,5 až 3 km nad okolní kovadlinou. Tato hodnota je pro bouře mírných zeměpisných šířek méně častá, nikoliv však výjimečná (nicméně reprezentativní studie na toto téma, využívající družice s rozlišením 1 km, není pro oblast Evropy k dispozici). Další standardní významné indikátory potenciální nebezpečnosti bouří, jako tzv. studená-U nebo vlečky nad kovadlinami bouří (obojí zpravidla doprovázející supercely), se v tomto případě vyskytly pouze nad západnějšími bouřemi, které však nedosáhly takové intenzity jako bouře s tornádem; rovněž výšky jejich přestřelujících vrcholů byly v tomto konkrétním termínu přibližně poloviční. Dodejme, že načasování přeletu družice NOAA-19 nad oblastí bouře bylo zcela nahodilé, kdyby družice přelétala jen o několik minut dříve či později, hodnota minimální teploty přestřelujícího vrcholu (i přestřelujících vrcholů okolních bouří) by nejspíš byla výrazně odlišná (typická doba života přestřelujících vrcholů je cca 5 až 15 minut). Proto z tohoto jediného konkrétního snímku nelze porovnávat bouři s tornádem s okolními bouřemi z hlediska jejich možné nebezpečnosti. Vzhledem k tomu, že snímky z polárních družic jsou k dispozici cca 10 až 15 minut po přeletu družice, nejsou přímo využitelné pro výstražné účely, resp. nowcasting bouří, jejich hlavní přínos je tedy spíše v oblasti zpětného vyhodnocení významných případů.

Vývoj vzhledu bouře s tornádem na snímcích z družice Meteosat-9 (zde neuvedených) pro interval 18:00–20:00 SELČ pak ukazuje velkou variabilitu přítomnosti přestřelujících vrcholů a jejich teploty. Přestřelující vrcholy jsou přítomny v termínech 18:23, 18:33 až 18:43, 19:03 až 19:13, 19:33 a 19:58 SELČ, přičemž nejvýraznějšími jsou v termínech 18:23 SELČ (208 K, tj.  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 19:08 SELČ (209 K, tj.  $-64\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a 19:58 SELČ (210 K, tj.  $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), teplota okolní vrstevnaté oblačnosti kovadliny je kolem 215 K ( $-58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), tedy rámcově stejná jako z družice NOAA-19. Vyšší teploty přestřelujících vrcholů na snímcích z Meteosatu-9 oproti snímku z NOAA-19 jsou důsledkem výrazně horší rozlišovací schopnosti Meteosatu-9 (cca  $3 \times 9$  km) oproti NOAA-19 ( $1,1 \times 1,1$  km), a tedy výraznému průměrování minimálních teplot přestřelujících vrcholů s jejich teplejším okolím. Vzhledem k tomu, že se přestřelující vrcholy nad touto bouří na snímcích z Meteosatu-9 nevyskytovaly v uvedeném termínu nijak souvisleji a ani

nedosahovaly na Meteosatu žádných výraznějších hodnot (oproti jiným bouřím toho dne či jiným případům), nebylo možné z jejich přítomnosti na operativních snímcích jakkoliv usuzovat na mimořádnost bouře doprovázené tornádem.

Plánované detailnější zpracování družicových dat bude zahrnuto v návaznosti na radarová měření a měření bleskové aktivity v připravované monografii.

Pro výstražný systém na silné konvektivní bouře bude obrovským přínosem nástup družic Meteosat třetí generace (MTG) v nejbližších letech (starty prvních z nich jsou plánovány na roky 2022 až 2025), které budou mít jak výrazně lepší geometrické rozlišení (srovnatelné s polárními družicemi), tak kratší interval snímání (2,5 minuty). ČHMÚ počítá s přechodem na tyto nové družice, jakmile to bude možné z hlediska dostupnosti operativních dat.

### 3.5. Informace z radarů a detekce blesků

Pro sledování vývoje konvektivních bouří jsou v současné době nezbytná data z meteorologických radarů. Meteorologické radary jsou schopny identifikovat jednotlivé konvektivní bouře, sledovat jejich pohyb a v určité omezené míře umožňují i předpovídat jejich budoucí pohyb. Z radarových dat je též možné usuzovat na některé charakteristiky bouří jako je intenzita srážek nebo pravděpodobnost výskytu krup a odhad jejich maximálních velikostí. Radarová data radiálních rychlostí je za vhodných podmínek možné využít k identifikaci rotující mezocyklony v supercelách. Na supercelární povahu konkrétní bouře je možné též nepřímo usuzovat na základě výrazné odchylky její trajektorie v porovnání s pohybem okolních konvektivních (nesupercelárních) bouří, nebo na základě štěpení původně jedné bouře na dvě, postupující směrem od sebe. Jednoznačnější identifikaci lze provést i na základě jejich specifického tvaru v poli radarové odrazivosti (výskyt hákovitého echa z angl. *hook echo*), popř. ohraničené oblasti zeslabeného echa (tzv. Bounded Weak Echo Region, BWER).

V případě radarových měření si je třeba uvědomit jeden zásadní limitující faktor, a tím je fakt, že vlivem zakřivení zemského povrchu a zákonů šíření elektromagnetických vln není radar schopen proměřit nejnižší hladiny atmosféry. V závislosti na vzdálenosti od radaru, radar nevidí nejspodnější stovky metrů až jednotky kilometrů atmosféry. Dalším limitujícím faktorem je rozlišení radarových dat, které se pohybuje opět v závislosti na vzdálenosti od radaru, též ve stovkách metrů až jednotkách kilometrů. Z těchto důvodů meteorologické radary nejsou schopny přímo detekovat tornádo (ani další jevy na zemském povrchu nebo v jeho blízkosti). V případě operativních meteorologických radarů optimalizovaných pro detekci silných bouří (např. radary ze sítě NEXRAD využívané národní meteorologickou službou USA) je možné výskyt tornáda odhadovat na základě zesílené a zúžené rotace identifikované v datech radiálních rychlostí na nízkých elevacích. Tento odhad je však zatížen značnou chybou a výskyt tornáda je i tak potvrzován lokálními pozorovateli. Nejdetailnější radarová pozorování tornadických supercel jsou prováděna pomocí specializovaných meteorologických radarů umístěných

na automobilech (někdy označovaných jako Doppler on Wheel, DoW), které umožňují přiblížit se do blízkosti bouře a provádět tak velmi detailní měření. Tyto radary jsou nejčastěji používány v USA avšak pouze v rámci výzkumných projektů pro analýzu vybraných bouří. Není možné je využívat k plošnému monitorování všech bouří.

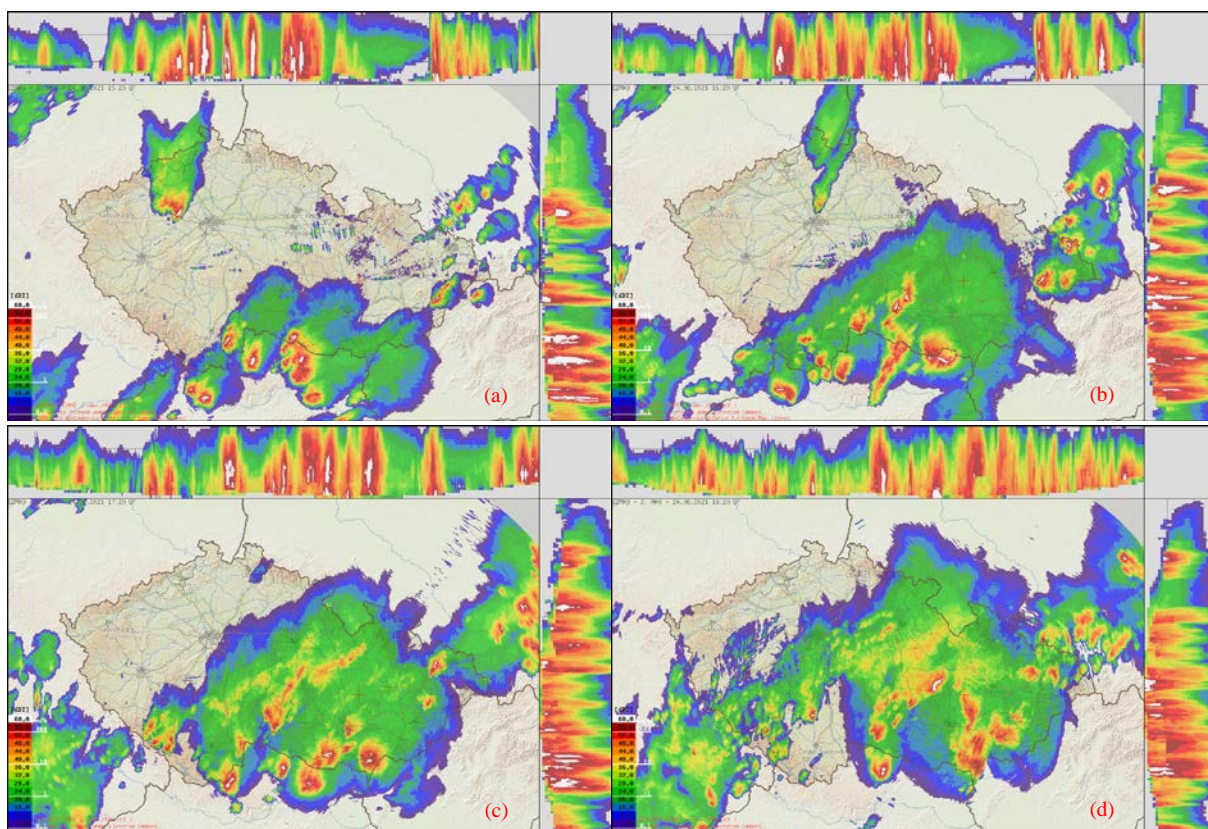
Aktuálně ČHMÚ provozuje dva polarimetrické dopplerovské meteorologické radary Vaisala WRM-200 pracující v pásmu C (vlnová délka cca 5 cm) zaměřené na sledování srážkové oblačnosti a souvisejících srážek i na identifikaci a sledování konvektivních bouří. Měření těchto dvou radarů pokrývá celé území Česka i jeho nejbližší okolí. Parametry radarů ČHMÚ jsou zcela srovnatelné s radary ostatních evropských meteorologických služeb. Pracovní pásmo C je u radarů evropských meteorologických služeb zcela dominantní. Použité pracovní pásmo je jedním z klíčových rozdílů mezi evropskými radary (pásmo C, vlnová délka cca 5 cm) a radary sítě NEXRAD v USA (pásmo S, vlnová délka cca 10 cm), který ovlivňuje schopnost detekce supercel a příznaků možného vzniku tornáda. Nejdůležitějšími rozdíly u evropských radarů je poloviční maximální vyhodnotitelná radiální rychlost cílů při jinak stejném nastavení parametrů měření a zvýšený útlum radarového signálu v silných bouřích (ten je možné do určité míry korigovat pomocí moderních polarimetrických měření). Významným problémem evropských radarů pracujících v pásmu C je jejich rušení zařízeními pracujícími na stejné frekvenci (zařízení RLAN/WIFI využívané poskytovateli bezdrátového internetu). Toto rušení je z radarových dat filtrováno, ovšem za cenu částečného znehodnocení dat, které sice není příliš viditelné při běžném prohlížení dat, ale projeví se při detailní analýze konkrétní bouře, popř. při aplikování specializovaných detekčních algoritmů.

Radarová měření jsou tzv. objemová, kdy je prováděno měření na několika kuželových řezech atmosférou pro různé elevační úhly (tzv. PPI hladiny), a jsou tak v různých vzdálenostech od radaru získány radarové odrazy v různých výškových hladinách. Z těchto třírozměrných dat se v rámci zpracování dat vytvářejí různé dvourozměrné produkty, vhodné pro různé účely. Měření meteorologických radarů ČHMÚ se skládá z hlavního skenu prováděného v kroku 5 minut optimalizovaného pro měření co nejkvalitnějších dat radarové odrazivosti využívané pro monitoring srážkové oblačnosti, kvantitativní odhady srážek nebo aplikace civilního letectví. Tento sken provádí měření na 12 elevacích do vzdálenosti 260 km od radaru. Nevýhodou tohoto skenu je nízká hodnota maximální jednoznačně určitelné radiální rychlosti, což velmi komplikuje interpretaci rychlosti proudění zejména v nízkých hladinách. Z tohoto důvodu se v kroku 10 minut provádí doplňkové měření na nízké elevaci 0,3° optimalizované pro získání dat radiálních rychlostí s vysokou hodnotou maximálně jednoznačně určitelné rychlosti (tzv. dopplerovský sken). Více informací o radarové síti CZRAD je možné nalézt například v Novák a Kyznarová (2016).

Data detekce blesků jsou dalším užitečným nástrojem pro monitoring konvektivních bouří. ČHMÚ neprovozuje vlastní síť detekce blesků, ale kupuje a využívá blesková data od externích provozovatelů větších detekčních sítí. V minulosti byla využívána data ze sítě CELDN, v současnosti jsou využívána data ze sítě LINET. Blesková data jsou většinou využívána společně s radarovými daty. Jednak jsou překreslována přes snímky radarové odrazivosti a jednak jsou bleskové parametry bouří (celkové počty

blesků za určitý čas, počty blesků za určitý čas v určité oblasti) zobrazovány v rámci nowcastingového systému CELLTRACK, viz dále. Více o datech detekce blesků i radarových produktech je možné nalézt například v Novák a Kyznarová (2020).

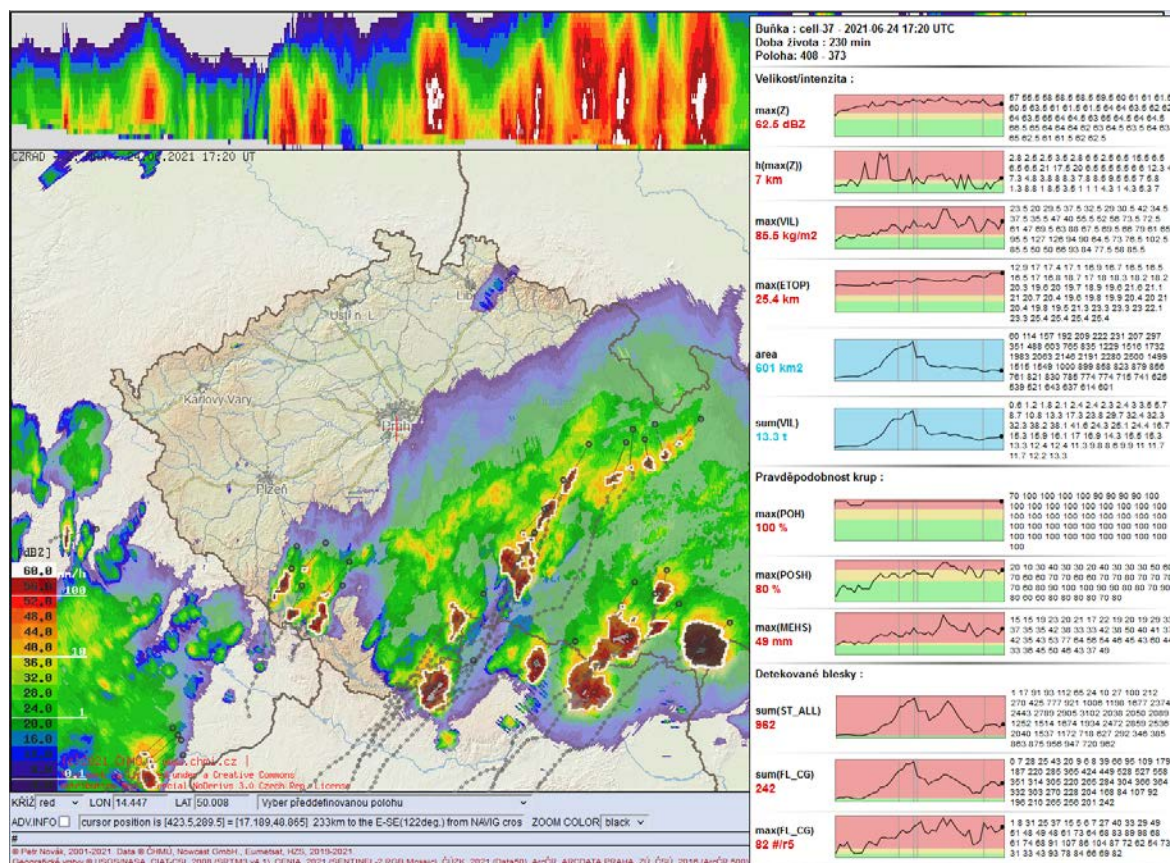
Pro sledování vývoje konvektivních bouří je v ČHMÚ nejčastěji využíván produkt tzv. maximální radarové odrazivosti, kdy v jednotlivých obrazových bodech je vždy uvedena nejvyšší hodnota odrazivosti změřená ve vertikálním sloupci nad daným bodem (MAX\_Z). Produkt je doplněn o boční průměty s maximálními odrazy v jednotlivých výškových hladinách. Vývoj bouří z pohledu produktu maximální radarové odrazivosti je zobrazen na obrázku 12.



Obr. 12 Vývoj konvektivních bouří 24. 6. 2021 z pohledu sloučené informace maximální radarové odrazivosti z radarů Brdy-Praha a Skalky, (a) 17:20 SELČ (15:20 UTC) vývoj bouří nad Rakouskem, (b) 18:20 SELČ (16:20 UTC) zesílení supercely po spojení dvou bouří, (c) 19:20 SELČ (17:20 UTC) supercela v době výskytu tornáda, (d) 20:20 SELČ (18:20 UTC) krátce po zániku tornáda přechází zasaženou oblast další bouře. Červený kříž zobrazuje polohu radaru Skalky. Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.

Z analýzy radarových dat je zřejmé, že první konvektivní bouře se 24. 6. 2021 začaly vytvářet od 14:00 SELČ nad Východními Alpami v Rakousku, asi 150 km jihozápadně od Břeclavi. Zhruba v čase 15:00 SELČ lze vystopovat počátek nově oddělené konvektivní buňky, která nakonec jako supercela vytvořila tornádo. Vývoj bouří byl velmi dynamický, jednotlivé bouře se navzájem ovlivňovaly, bylo možné sledovat řadu štěpení a spojování bouří, popřípadě vznik nových buněk ovlivněný okolními již

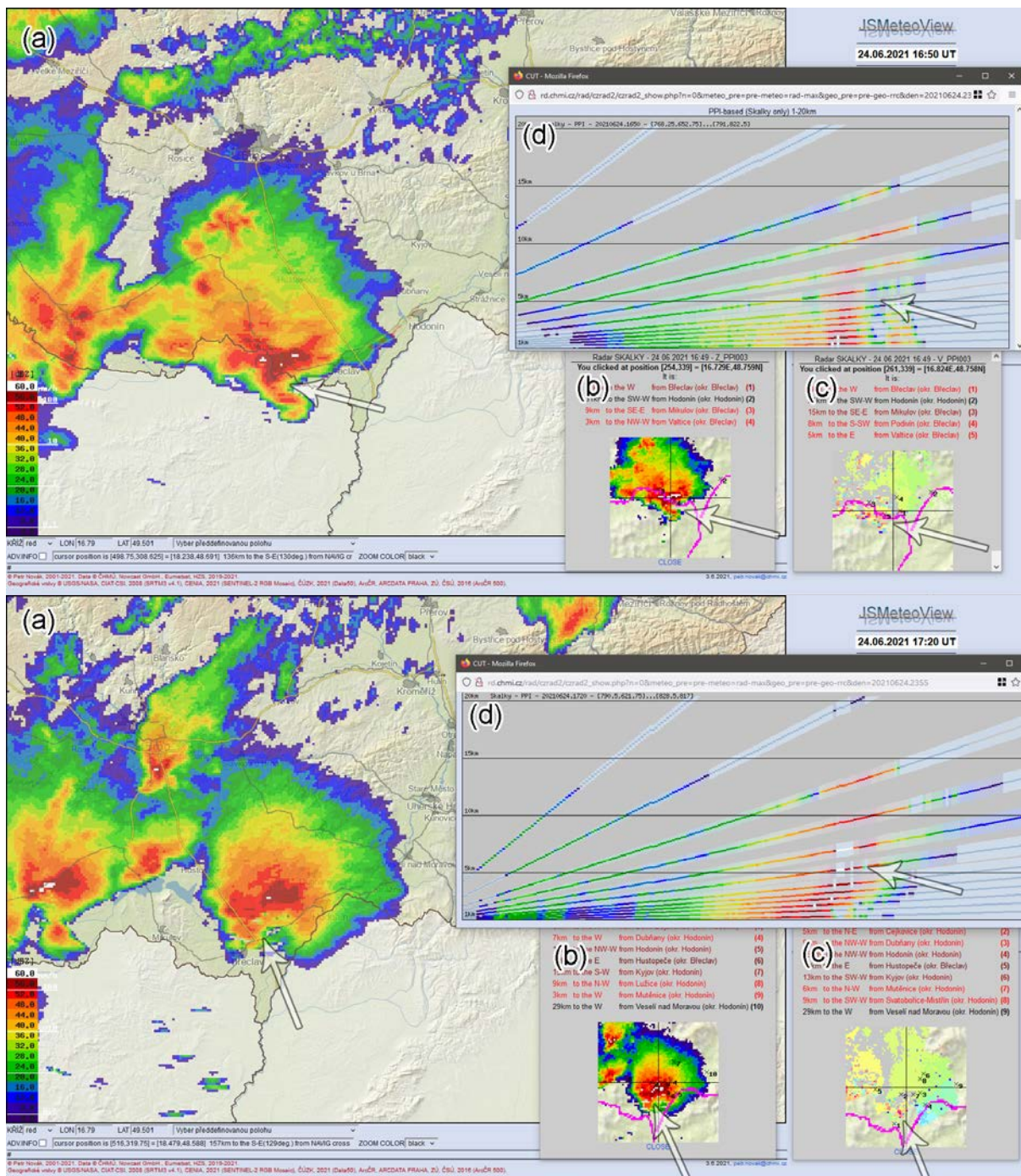
existujícími bouřemi. Tato bouře byla zpočátku slabší a postupovala Dunajskou nížinou směrem na Mikulov. Kolem 16:30 SELČ se v okolí Kremže, asi 30 km severněji od sledované bouře, vytvořila jiná silná konvektivní bouře, která svým pomalejším postupem na severovýchod přiblížila svou dráhu „břeclavské bouři“. V čase mezi 18:00–18:20 SELČ došlo ke vzájemné interakci do té doby výraznější západní supercely a východní bouře, jejíž trajektorie pohybu se kolem 18:30 SELČ, už ve formě silné supercely, výrazněji odchýlila na východ. Do Česka se postupně přesunula mezi cca 18:35–18:45 SELČ v oblasti mezi Mikulovem a Břeclaví a postupovala na Břeclav a dále na Hodonín. Podle dostupné dokumentace se v období mezi 19:14–19:53 SELČ na jižním okraji této supercely vyskytlo tornádo (detailní popis trasy tornáda a vyhodnocení jeho škod je uvedeno v kap. 5). Po zániku tornáda bouře pokračovala severovýchodním směrem na Zlín. Bouře postupně slábla, poté však interagovala s dalšími bouřemi. Přes oblast zasaženou tornádem přecházely v následujících hodinách v rámci frontálního rozhraní další bouře, jedna přešla v cca 20:05–20:50 SELČ přes celou oblast, další v cca 22:05–22:20 SELČ svým okrajem přešla přes SV část tornádem zasažené oblasti, poslední bouře přešla přes celou oblast mezi 00:40–01:20 SELČ 25. 6. 2021.



Obr. 13 Výstup nowcastingového systému CELLTRACK operativně dostupný v rámci nové verze webové aplikace JSMeteoview2. V levé části je zobrazeno hlavní okno aplikace se zobrazenými daty maximální radarové odrazivosti a jednotlivými identifikovanými buňkami metodou CELLTRACK. Jednotlivé identifikované buňky jsou zobrazeny bílými polygony překreslenými přes data maximálních odrazivosti. Po najetí myši nad buňku v aplikaci se buňka zvětší a jsou zobrazeny její parametry včetně jejich vývoje v čase (v pravé části obrázku). Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.

Dalším velmi užitečným nástrojem pro sledování konvektivních bouří je nowcastingový systém CELLTRACK, který byl vyvinutý v ČHMÚ (Kyznarová a Novák, 2009) a je zde průběžně rozvíjen. CELLTRACK identifikuje v poli sloučené maximální odrazivosti souvislé oblasti (buňky) vysokých hodnot ( $\geq 44$  dBZ). Tyto identifikované buňky představují aproximaci jednotlivých konvektivních bouří. CELLTRACK identifikuje buňky každých 5 minut v jednotlivých termínech měření. Buňky z jednotlivých termínů umí k sobě přiřadit, včetně jejich slučování a štěpení, a umožňuje tak sledovat vývoj jednotlivých buněk i předpovídat směr dalšího postupu. CELLTRACK navíc k buňkám v jednotlivých termínech umožňuje přiřadit řadu parametrů odvozených z radarových a bleskových produktů (např. velikost buněk, maximální odrazivost v ploše buňky, pravděpodobnost výskytu krup a odhad jejich největších velikostí, počet blesků a počty blesků a maximální intenzita bleskové aktivity). V roce 2020 byl systém výrazně modernizován a zpřístupněn pro předpovědní (i jiná) pracoviště ČHMÚ v rámci nové verze webové aplikace JSMeteoview2 pro vizualizaci radarových a dalších meteorologických informací. Systém je na předpovědních pracovištích ČHMÚ využíván v provozním testovacím režimu. Ukázka výstupu systému CELLTRACK v rámci nové verze webové aplikace JSMeteoview2 je zobrazena na obrázku 13. Zobrazeny jsou jednotlivé identifikované buňky v době výskytu tornáda v 19:20 SELČ. V obrázku jsou dále zobrazeny souhrnné informace o parametrech buňky odpovídající tornadické supercely, z nich můžeme např. vyčíst, že v tornadické supercele se vyskytovaly odrazivosti až 62,5 dBZ, odhadovaná maximální možná velikost krup dosahovala v jednu chvíli i přes 7 cm, nebo že maximální intenzita bleskové aktivity přesahovala 80 blesků do země za 5 minut v 5kilometrovém okolí (blesková aktivita je v každém obrazovém bodě počítána jako počet blesků do země, které se vyskytly za posledních 5 minut ve vzdálenosti do 5 km od centra obrazového bodu. Maximální blesková aktivita u CELLTRACK buňky je následně vypočtena jako maximální hodnota bleskové aktivity ze všech obrazových bodů spadajících do oblasti dané buňky.

Systém CELLTRACK poskytuje velké množství informací, neobsahuje však informaci o tom, zda je daná bouře supercela. To, že bouře, na které se vyskytlo tornádo, je supercelou, naznačilo její stáčení a bylo potvrzeno charakteristickými rysy radarového echa v měřených kuželových hladinách PPI, hladinách konstantní výšky CAPPI i vertikálních řezech (viz obr. 14). V nižších hladinách PPI i CAPPI bylo zřetelně viditelné hákovité echo. V době před výskytem tornáda byla ve vertikálních ezech viditelná i oblast snížené odrazivosti BWER, v pozdějších termínech, v době výskytu tornáda, byla oblast BWER stále méně zřetelná. Na supercelu ukazovala i rotace mezocyklony zaznamenaná v datech radiálních rychlostí, tato data však byla v provozu poměrně složitě interpretovatelná z důvodu menšího rozlišení zobrazovaných dat a snížené kvality samotných dat způsobenou artefakty signálového zpracování a vymazáním části dat vlivem filtrace nemeteorologických cílů a rušení.

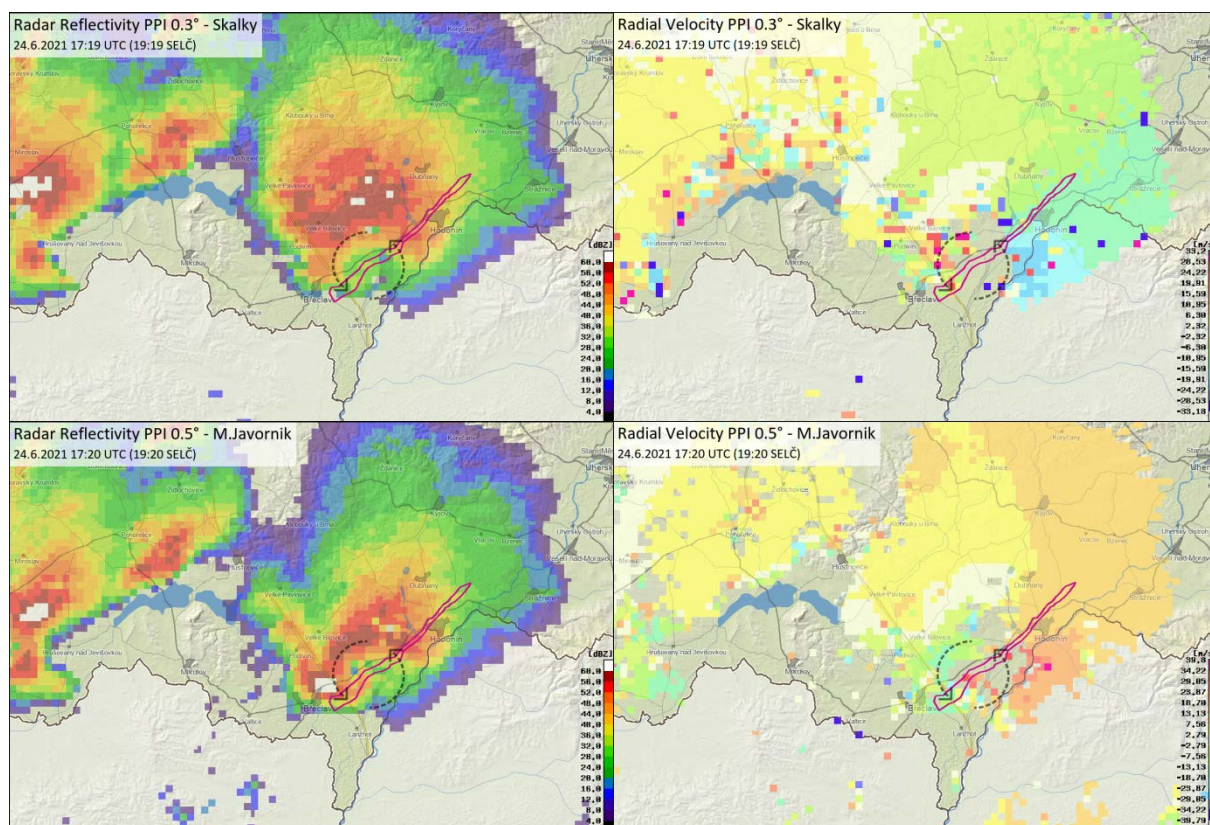


Obr. 14 Radarová data z 18:50 SELČ (16:50 UTC) (nahore) a 19:20 SELČ (17:20 UTC) (dole) 24. 6. 2021 provozně dostupná v aplikaci JSMetroView2. V hlavním okně (a) jsou zobrazeny snímky sloučené radarové odrazivosti v hladině PseudoCAPPI 2 km (sloučená informace z radarů ČHMÚ Brdy-Praha a Skalky). V překryvných oknech jsou zobrazena data korigovaná odrazivosti (b) a radiální rychlosti (c) v hladině PPI 0,3° (specializovaný dopplerovský sken) a vertikální řez (d) tornadickou bouří zrekonstruovaný z jednotlivých PPI hladin hlavního skenu (vše z radaru ČHMÚ Skalky). Šipkami jsou u jednotlivých oken vyznačeny charakteristické znaky mezocyklony (rotace v supercele), hákovité echo u oken (a) a (b), příznaky rotace v datech radiálních rychlostí u oken (c) a oblast snížené odrazivosti BWER u oken (d). Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.



Z pohledu dat maximálních radarových odrazivostí i systému CELLTRACK šlo v případě tornadické bouře sice o silnou bouři, na které lze očekávat nebezpečné projevy počasí (intenzivní srážky, velké kroupy, nárazy větru), nejednalo se však o výrazně nejsilnější bouři, která se v dané době v oblasti Česka a severního Rakouska vyskytla. V této oblasti se vyskytovaly minimálně čtyři další podobně silné bouře. I po potvrzení, že se jedná o supercelu, nebylo z dat zřejmé, že by zrovna tato bouře měla být nejnebezpečnější a mělo se na ní vyvinout tak ničivé tornádo.

V rámci následného hodnocení byla radarová data studována detailněji v rozsahu, který v operativním provozu není dostupný. Některá data byla připravena ve vyšším rozlišení, některé produkty byly připraveny speciálně pro toto vyhodnocení. Jedny z takto nově připravených dat jsou zobrazeny na obrázku 15. Jedná se o data radarové odrazivosti a radiálních rychlostí ze specializovaného dopplerovského skenu radaru Skalky a obdobná data z měření radaru SHMÚ Malý Javorník. Tato data umožnila lépe potvrdit přítomnost rotující mezocyklony pomocí dat radiálních rychlostí a zároveň porovnat kvalitu radarových pozorování z jednotlivých radarů.

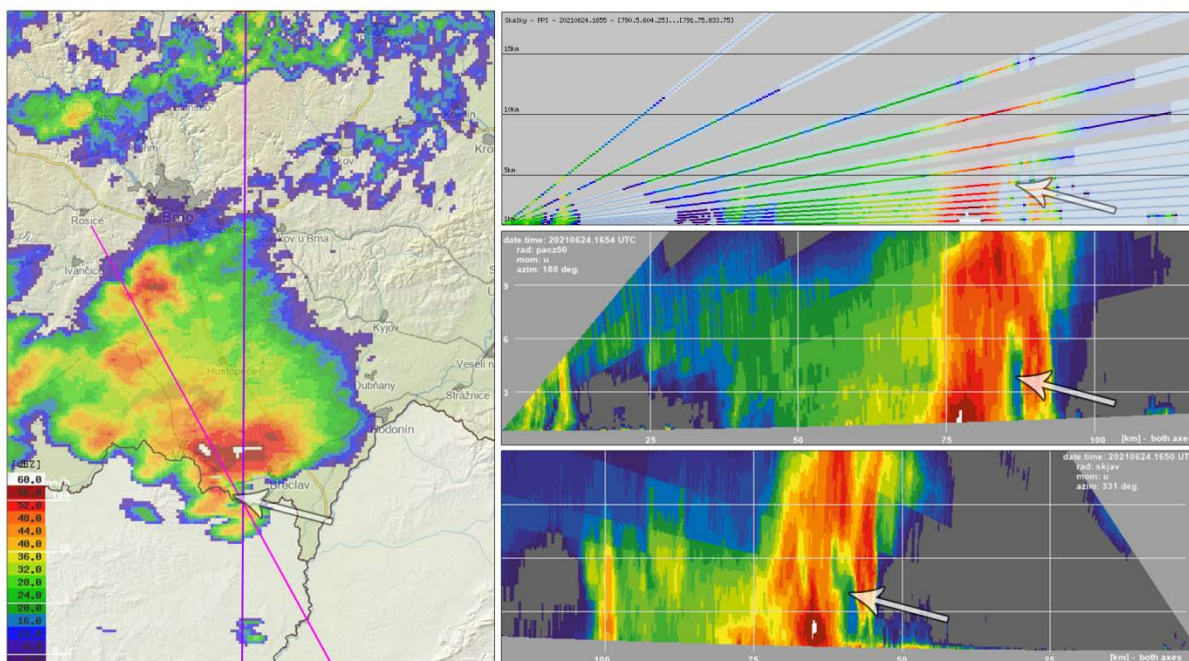


Obr. 15 Snímek radarové odrazivosti (vlevo) a radiální rychlosti (vpravo) na jihu Moravy 19:20 SELČ (17:20 UTC) 24. 6. 2021 v porovnání s dráhou tornáda. Data z hladiny PPI 0,3° z radaru ČHMÚ Skalky (nahore) a z hladiny PPI 0,5° z radaru SHMÚ Malý Javorník (dole). Výška osy radarového paprsku v oblasti tornadické bouře je u obou radarů cca 1500 m n. m. Černými šipkami je v polích radiálních rychlostí naznačen směr rotace v oblasti mezocyklony. Zdroj dat: ČHMÚ a SHMÚ, zpracování: ČHMÚ.

Meteorologické radary neumožňují měřit přímo směr a rychlost radarových cílů, místo toho měří pouze radiální rychlost (tedy složku rychlosti ve směru radarového paprsku). Kladné radiální rychlosti představují pohyb směrem od radaru, záporné radiální rychlosti pohyb směrem k radaru, nulové radiální rychlosti mohou znamenat buď skutečně nepohybující se cíl, nebo pohyb kolmo na radarový paprsek. Rotující mezocyklona se tak v datech radiálních rychlostí projeví jako dvě sousedící oblasti kladných a záporných radiálních rychlostí ve zhruba stejné vzdálenosti od radaru. Důležité je umístění těchto oblastí. Pokud bychom si vyznačili přímkou mezi radarem a středem rotace, pak oblasti kladných a záporných rychlostí musí ležet každá v jedné polorovině. Zda se jedná o rotaci cyklonální nebo anticyklonální záleží na tom, v které polorovině leží která oblast. Pokud by naopak oblasti kladných a záporných radiálních rychlostí ležely na jedné přímce procházející polohou radaru (tedy jedna oblast by byla blíže k radaru a druhá dále), nejednalo by se o detekci rotace, ale konvergence nebo divergence (např. detekce divergence studeného vzduchu pod silným sestupným proudem v bouři nebo divergence v bouřkové kovářině).

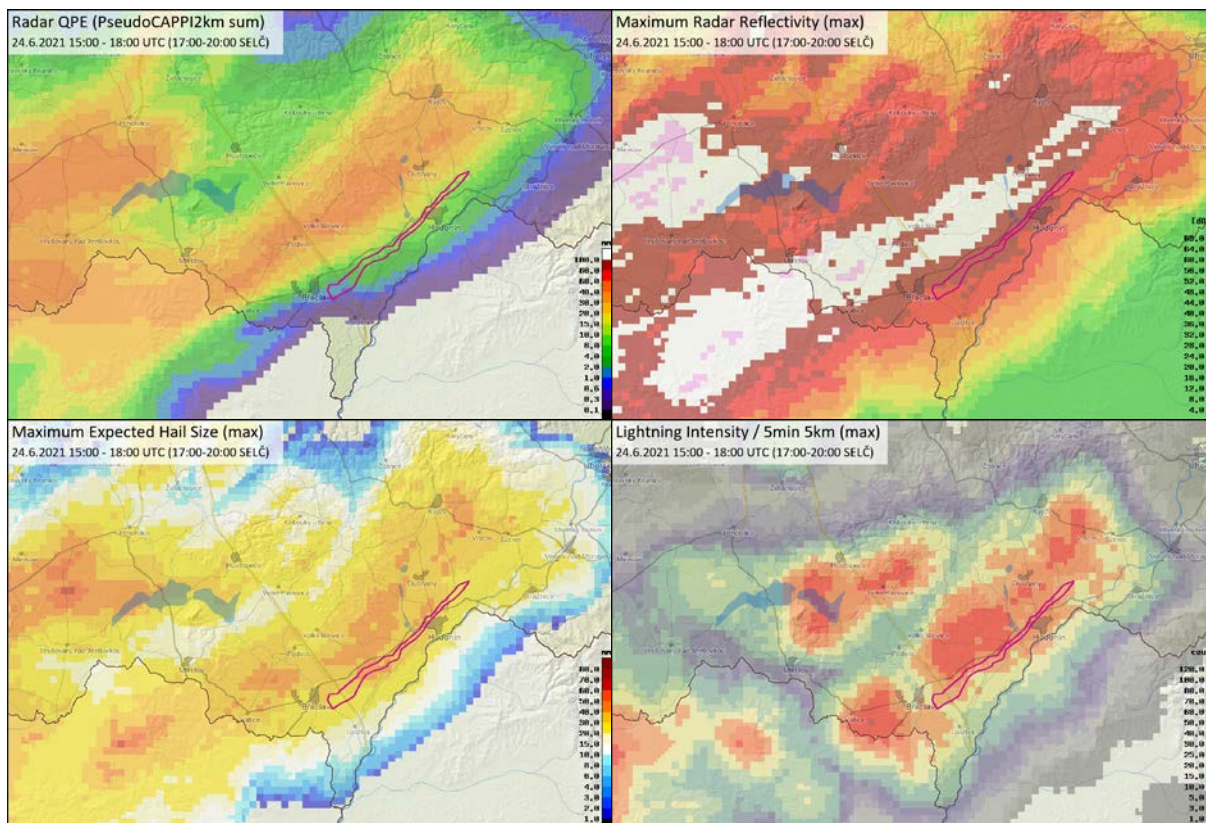
Na obrázku 15 je v datech z obou radarů dobře vidět jak hákovité echo v datech radarové odrazivosti, tak i mezocyklona vyjádřená oblastmi kladných a záporných rychlostí. Tím, že radary Skalky a Malý Javorník sledovaly oblast mezocyklony z téměř opačného směru a vybrané PPI hladiny zobrazují v oblasti mezocyklony data z přibližně stejné výšky (1500 m n. m.), jsou zde data radiálních rychlostí zrcadlově prohozeny (oblast se zápornými rychlostmi měřená radarem Skalky odpovídá kladným rychlostem z radaru Malý Javorník). V oblastech mimo tornadickou bouři již toto platit nemusí (např. v levé horní části snímků), protože radary dané místo již nemusí sledovat z opačného směru nebo mohou zobrazovat radiální rychlosti z různých výškových hladin.

Viditelnost hákovitého echa v datech radarové odrazivosti i rotace mezocyklony v datech radiálních rychlostí je z radaru Skalky o něco horší než z radaru Malý Javorník. Důvodem horší viditelnosti je útlum radarového signálu v oblasti intenzivních odrazů mezi radarem Skalky a oblastí mezocyklony v jižní části supercely. Právě jižní část supercely viděl bez útlumu radar Malý Javorník, který byl navíc k oblasti mezocyklony o cca 10 km blíže než radar Skalky. Data radaru Malý Javorník jsou naopak zatlumena v severní části supercely. Útlum v dešti je v rámci signálového zpracování radarů ČHMÚ korigován pomocí polarimetrických měření, nicméně ve srážkách se vyskytovaly i kroupy, pro které korekce dostupné nejsou. V daném směru byl signál navíc rušen vysíláním zařízení RLAN/WIFI. Nedostupnost dat v jádru bouře, zejména u dat radiálních rychlostí, je dáno vlivem algoritmů filtrace nemeteorologických dat, pozorovatelné je u obou radarů.



Obr. 16 Řez tornadickou supercelou z 18:55 SELČ (16:55 UTC) 24. 6. 2021 – (vpravo nahoře) operativně dostupný řez generovaný z dat korigované odrazivosti radaru ČHMÚ Skalky, (vpravo uprostřed) následně vygenerovaný řez z dat nekorigované odrazivosti radaru ČHMÚ Skalky, (vpravo dole) následně vygenerovaný řez z dat nekorigované odrazivosti radaru SHMÚ Malý Javorník, (vlevo) pole PseudoCAPPI 2km z dat korigované odrazivosti radaru ČHMÚ Skalky s vyznačenými směry řezů, fialově vyznačen směr řezů z radaru Skalky a růžově vyznačen směr řezu z radaru Malý Javorník. Šipkami jsou vyznačeny charakteristické znaky mezocyklony: hákovité echo v poli PseudoCAPPI 2 km (vlevo) a oblast snížené odrazivosti BWER u vertikálních řezů (vpravo). Zdroj dat: ČHMÚ a SHMÚ, zpracování: ČHMÚ.

Dalšími následně analyzovanými daty byly vertikální řezy tornadickou bouří. Studována byla vertikální struktura bouře a zejména přítomnost oblasti zeslabeného echa BWER. Ukázka těchto vertikálních řezů je uvedena na obrázku 16, kde můžeme vidět operativně dostupný řez sestavený z dat korigované odrazivosti radaru Skalky a dále později vygenerované řezy z dat nekorigované odrazivosti radarů Skalky a Malý Javorník. Oblast BWER je viditelná na všech řezech. U operativního řezu je však interpretace komplikována nedostupností části dat v jádru bouře vlivem eliminace nemeteorologických dat v rámci signálového zpracování (viz výše). V případě řezů vygenerovaných z dat nekorigované odrazivosti není problém s vymazanými daty, na druhou stranu zde není provedena korekce na útlum signálu v silných srážkách a na nejnižší elevaci se vyskytují nevyfiltrované odrazy od zemského povrchu.



Obr. 17 Sumace/kumulace maximálních hodnot radarových a bleskových produktů za období (3 h) 17:00–20:00 SELČ (15:00–18:00 UTC) – zobrazuje významnou část vývoje nad Rakouskem a celé období výskytu tornáda, ukončeno krátce po konci výskytu tornáda. Období vybráno tak, aby v oblasti výskytu tornáda procházela pouze tornadická bouře a zobrazované parametry tak odpovídaly pouze této bouři. (a) nekorigovaný radarový odhad srážek založený na produktu PseudoCAPPI 2 km, (b) maximální radarová odrazivost ve vertikálním sloupci, (c) maximální očekávaná velikost krup, (d) intenzita bleskové aktivity – počet blesků do země za 5 minut v 5 km okolí (radarová síť ČHMÚ a blesková data ze sítě LINET). Fialovo-růžovou linií je zobrazena oblast škod tornáda. Zdroj dat: ČHMÚ a nowcast GmbH (LINET), zpracování: ČHMÚ.

Zpracovány byly též sumace a kumulace maximálních hodnot vybraných radarových a bleskových produktů v době 17:00–20:00 SELČ, které znázorňují vývoj odhadovaných parametrů supercely. Tříhodinové časové okno zachycuje bouři od jejího vývoje nad severním Rakouskem ještě před interakcí s druhou supercelou až po zánik tornáda. Radarové produkty byly přepočteny v 5minutovém kroku z primárně měřených dat, následně interpolovány do 1minutového kroku pomocí pohybového pole COTREC (Novák, 2007) a poté byla provedena sumace, popř. akumulace maximálních hodnot. Bleskové produkty byly generovány přímo v 1minutovém kroku a následně byla provedena obdobná akumulace maximálních hodnot jako u radarových produktů. Na obrázku 17 jsou zobrazeny postupně nekorigované sumy radarových odhadů srážek z odrazivosti v hladině 2 km n. m., dále nejvyšší hodnoty maximální radarové odrazivosti v celém vertikálním sloupci poukazující na přítomnost silných srážek, případně krup. Zobrazena je i odhadovaná velikost krup (podle intenzity odrazů mezi hladinou s nulovou teplotou a teplotou  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), u které si je však třeba uvědomit, že nezobrazuje odhad velikosti krup

v daném místě, ale potenciál bouře vygenerovat takovéto kroupy v průběhu dalších cca 5 až 20 minut (tedy o něco dále po trase bouře). Jako poslední je zobrazena maximální intenzita bleskové činnosti vyjádřena jako nejvyšší počet blesků do země za období 5 minut v 5 km okolí jednotlivých obrazových bodů vypočtená z produktů vygenerovaných v 1minutovém kroku. Z obrázku 17 je zřejmé, že všechny sledované parametry nebyly nejvyšší v trase tornáda, ale severněji, což je v souladu s tím, že tornáda často vznikají (při pohledu na radarová data) v okrajových částech bouře.

Další užitečné informace lze získat z dat polarimetrických měření, např. rozdílové odrazivosti ZDR nebo korelačního koeficientu RHOHV. Analýza těchto dat je však nad rámec této zprávy a je připravována v rámci připravované monografie.

## 4. Předpovědi počasí a výstrahy

### 4.1. Předpovědi počasí a výstrahy na den 24. 6. 2021

#### 4.1.1. Předpovědi počasí a výstrahy ČHMÚ

Základním zdrojem dat pro textové předpovědi počasí jsou informace z předpovědních modelů (dále jen „NWP modely“). Kvůli časové a prostorové variabilitě jejich výstupů však nelze spoléhat na jejich jednoznačnost.

Meteorologická situace při pohledu na předpovědní data pro den 24. 6. 2021 však naznačovala již s velkým předstihem složitý a dynamický průběh počasí s pravděpodobnými nebezpečnými jevy. Proto se první náznaky o silných bouřkách v předpovědi počasí na území České republiky objevily už 19. 6. v týdenní předpovědi a postupně i v jednotlivých regionálních předpovědích.

Na základě nejnovějších běhů modelů ze dne 24. 6. byla pro Jihomoravský kraj vydána během dopoledne tato textová předpověď počasí:

*„24. 06. 2021 Čas vydání: 11.30*

*PŘEDPOVĚĎ POČASÍ PRO JIHOMORAVSKÝ KRAJ na čtvrtek 24. 06. odpoledne a večer*

*Situace:*

*Frontální rozhraní se nad střední Evropou i nadále vlní.*

*Počasí (12–22):*

*Většinou polojasno, odpoledne místy i skoro jasno. Večer a v noci od jihozápadu přibývání oblačnosti a srážek, místy bouřky, ojediněle i velmi silné. Nejvyšší odpolední teploty 28 až 31 °C. Slabý proměnlivý vítr 1 až 4 m/s, v noci v bouřkách přechodně zesílí.*

*Komentář meteorologa: Večer a v noci se v bouřkách mohou vyskytnout vydatné srážky, nárazy větru kolem 90 km/h a kroupy i větších rozměrů.“*

V obecné formě byly bouřky v okolí zvláště studené fronty očekávány a v předpovědích uváděny již během předcházejících dnů, i když se slabší intenzitou. Regionální textové předpovědi na 24. 6. se proto v průběhu týdne lišily jen minimálně. Pouze na základě právě platné výstrahy, nebo výhledu nebezpečných jevů se zmiňovaly možnosti silnějších bouřek.

Výstražné informace slouží k prostorovému a časovému zacílení upozornění na potenciální výskyt nebezpečných jevů. To je ovšem u nebezpečných projevů konvektivních bouří velmi složité, protože bouře ne vždy produkují po celou dobu své existence nebo v celém svém plošném rozsahu stejně intenzivní nebezpečné jevy. Lze tedy vycházet z toho, že plocha území s výskytem bouřek bude vždy větší, než plocha zasažená nebezpečnými jevy v kategorii jednoho ze tří stupňů intenzity bouřkových jevů výstražného systému. Oblasti výstrahy na očekávaný výskyt silných konvektivních bouří korespondují s oblastmi, kde je na základě NWP modelů největší pravděpodobnost jejich výskytu. Intenzita bouří je stanovena na základě kritérií<sup>1</sup> pro jednotlivé nebezpečné jevy (velikost krup, výrazné nárazy větru a celkový úhrn srážek, případně intenzita srážek). Systém integrované výstražné služby (SIVS) je nastaven tak, že potenciální nebezpečné jevy, jejichž parametry dle předpokladů překračují daná kritéria, se v obecnější formě popisují rovněž ve výhledu nebezpečných jevů, pokud se očekávají až od třetího dne v budoucnosti. Je to z toho důvodu, že časové a prostorové změny modelových predikcí konvektivních jevů mohou být příliš velké a konkrétní území s varováním by mohlo být zbytečně často měněno. Na základě domluvy s Generálním ředitelstvím Hasičského záchranného sboru České republiky (GŘ HZS ČR) a na základě požadavků Evropského výstražného systému (Meteoalarm) se v tomto duchu na vzdálenější dny označují nebezpečné jevy předběžným varováním o možném výskytu (tzv. výhled nebezpečných jevů). V předstihu jsou informace také paralelně poskytovány i v textových předpovědích. Na první (dnešní) a druhý den jsou vydávány detailnější prostorově cílené výstrahy, v tomto případě ze skupiny „V. Bouřkové jevy“ (prostorovou jednotkou jsou obce s rozšířenou působností – ORP) a pro časový interval, kdy se jevy očekávají s největší pravděpodobností.

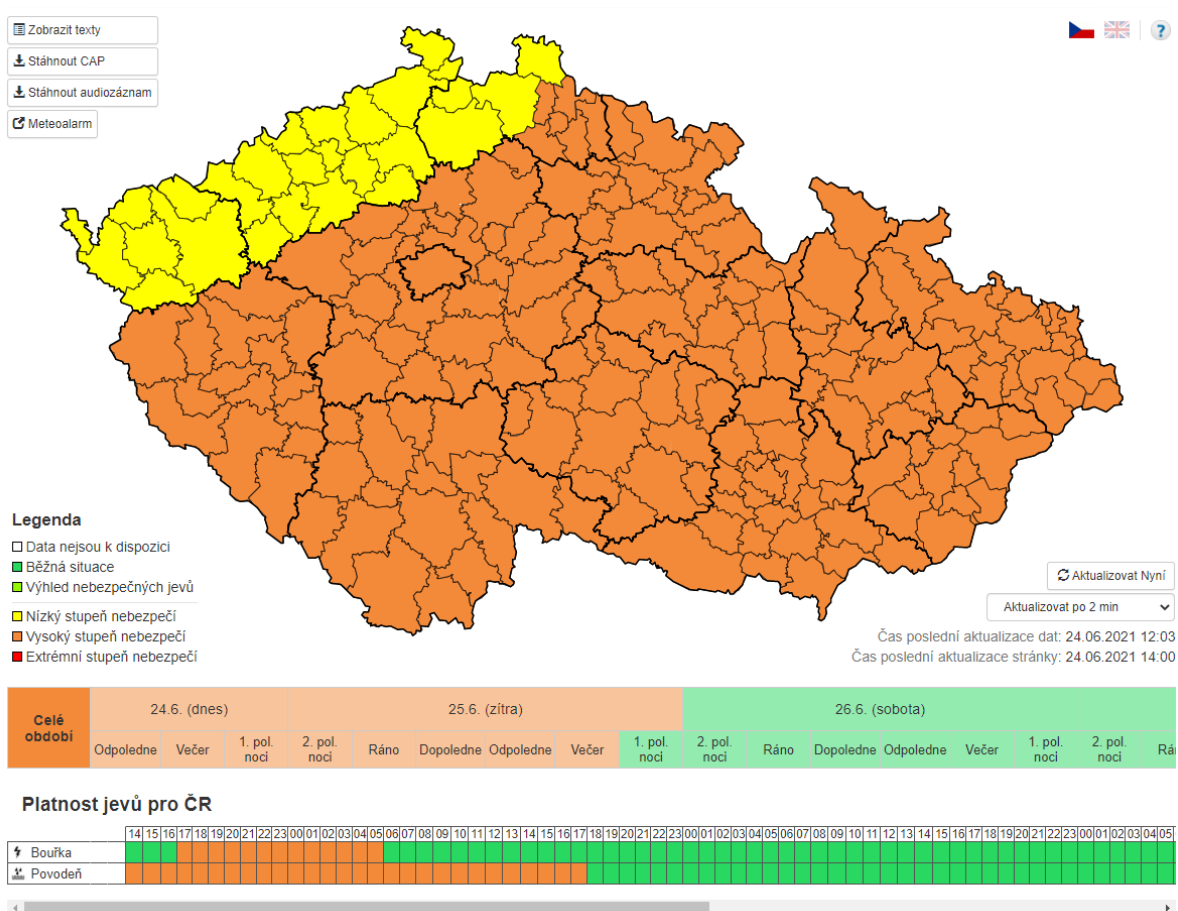
V období od 20. 6. do 24. 6. 2021 byla posloupnost produktů SIVS zahrnující ORP zasažená tornádem následující:

- Od neděle 20. 6. do středy 23. 6. bylo na čtvrtek 24. 6. v platnosti předběžné varování před „silnými, popř. velmi silnými bouřkami“.

---

<sup>1</sup>Aktuálně platná kritéria bouřkových jevů jsou dostupná na internetových stránkách ČHMÚ: <https://www.chmi.cz/informace-pro-vas/prezentace-a-vyuka/SIVS>.

- Ve středu 23. 6. v 10:45 SELČ vydána výstraha na „silné bouřky (nízký stupeň nebezpečí)“ pro většinu České republiky (ČR) s platností na čtvrteční večer a noc na pátek.
- Ve čtvrtek 24. 6. v 12:03 SELČ byl zvýšen stupeň nebezpečí výstrahy na „velmi silné bouřky (vysoký stupeň nebezpečí)“ pro většinu ČR a prodloužena platnost od 17:00 do pátku 06:00 s textem: „Očekává se možný výskyt velmi silných bouřek s přívalovými srážkami s lokálními úhrny kolem 50 mm, nárazy větru kolem 25 m/s (kolem 90 km/h) a kroupami i větších rozměrů.“ Tato výstraha je v mapové podobě zobrazena na obrázku 18.
- Ve čtvrtek 24. 6. v 18:33 SELČ, tj. s téměř hodinovým předstihem před výskytem tornáda, byla vydána výstraha před pozorovaným jevem „velmi silné bouřky s přívalovými srážkami“ s okamžitou platností pro ORP Břeclav a Hodonín a další části Jihomoravského kraje, Kraje Vysočina a Pardubického kraje s textem „Velmi silné bouřky postupují z Rakouska přes jižní Moravu a Vysočinu dále k severovýchodu. Jsou doprovázeny přívalovým deštěm a lokálně i krupobitím, příp. nárazy větru.“



Obr. 18 Mapa předpovědních výstrah pro bouřkové jevy vydaných v poledne 24. 6. pro celou ČR na 24. a 25. 6. 2021. Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.

## 4.1.2. Předpovědi SHMÚ, ZAMG, IMGW a ESTOFEX

**Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ)** ve svých textových předpovědích počasí rovněž reagoval na situaci s možnostmi nebezpečných jevů v silných bouřkách. Níže je uvedena předpověď na základě nejaktuálnějších zdrojových dat 24. 6. Vzhledem k očekávanému vlivu zvlněné studené fronty až ve večerních a nočních hodinách je uvedena předpověď na večer a noc na 25. 6.

„**PREDPOVEĎ POČASIA NA PIATOK 25. 6. 2021 (24. 6. 2021 18:00 UTC – 25. 6. 2021 06:00 UTC)**

**SITUÁCIA:**

*Od západu až severozápadu postúpi do našej oblasti nevýrazný zvlnený studený front. Pred ním bude od juhozápadu nad Karpaty prúdiť veľmi teplý vzduch.*

**SLOVENSKO:**

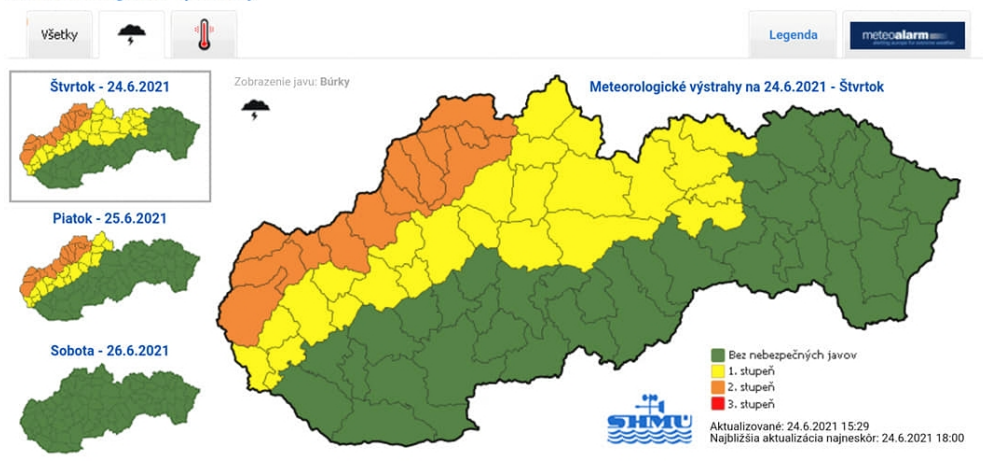
*Jasno až polooblačno, pri prechodne aj zväčšenej oblačnosti ojedinele, najmä na krajnom západe, prehánky alebo búrky, aj intenzívne. Najnižšia teplota 22 až 17, v Žilinskom kraji na Spiši a Horehroní lokálne do 15 st. Slabý, na západe postupne severozápadný vietor 3 až 9 m/s (10 až 30 km/h), pri búrkach prechodne zosilnie. Predpokladané množstvo zrážok: do 5, pri búrkach ojedinele okolo 30 mm, výnimočne aj viac.*

**ZÁPADNÉ SLOVENSKO:**

*Jasno až polooblačno, pri prechodne aj zväčšenej oblačnosti lokálne prehánky alebo búrky, aj intenzívne. Najnižšia teplota 21 až 16 st. Slabý, postupne severozápadný vietor 3 až 9, v nárazoch prechodne okolo 14 m/s (10 až 30, 50 km/h), pri búrkach prechodne zosilnie.*

**VYDAL: SHMÚ, OMPaV, 24. 6. 2021 11:30 LSEČ“**

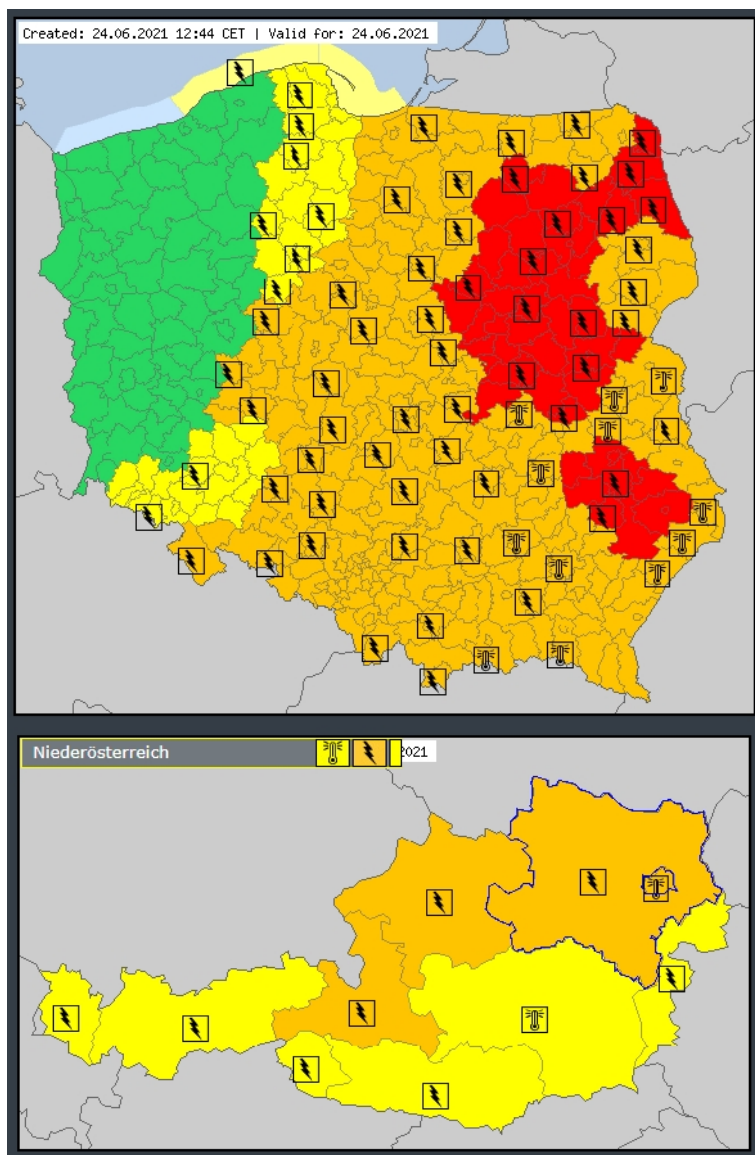
### Meteorologické výstrahy



Obr. 19 Meteorologická výstraha vydaná SHMÚ pro území Slovenska dne 24. 6. 2021. Zdroj dat a zpracování: SHMÚ.



**Polská národní meteorologická služba (IMGW) a rakouská národní meteorologická služba (ZAMG)** vydaly pro den 24. 6. také předpovědní výstrahy na nebezpečné jevy, zejména na možnost výskytu silných bouří. Tyto výstrahy byly zveřejněny např. na stránkách evropského výstražného systému Meteoalarm (obr. 20), který je provozován v rámci sdružení evropských národních meteorologických služeb EUMETNET, jehož členem je i ČHMÚ.



*Obr. 20 Meteorologická výstraha vydaná na den 24. 6. 2021 pro Polsko službou IMGW (nahore) a pro Rakousko službou ZAMG (dole). Zdroj: Meteoalarm.*

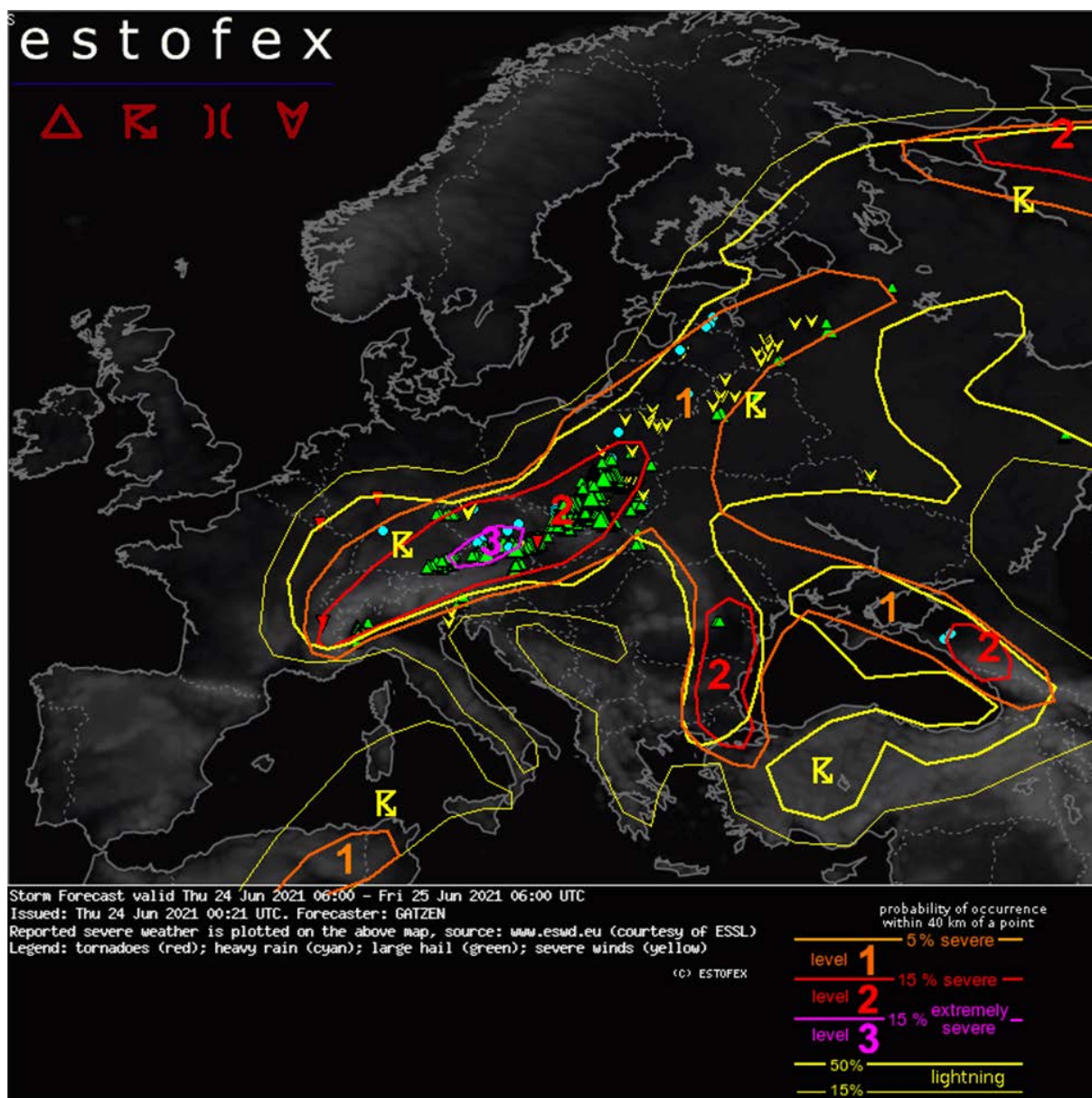
**ESTOFEX (European STOrM Forecast EXperiment)** vydává 24hodinové pravděpodobnostní předpovědi (intenzivních) bouřek pro celou Evropu. Pravděpodobnosti stupňů rizika jsou definovány pro území o velikosti kruhu s poloměrem 40 km a mají relativně nižší prahy (5 a 15 %), než jsou používány běžně národními meteorologickými službami. Předpovědní mapa s vyznačenými oblastmi s různou mírou pravděpodobnosti výskytu bouří je doplněna rozbohem meteorologické situace a podkladů, ze kterých je usuzováno na možnost výskytu nebezpečných jevů. Předpovědi jsou určeny zejména profesionálním meteorologům a informované veřejnosti. ESTOFEX užívá dvě úrovně intenzity bouřek: intenzivní (z angl. *severe*: kroupy  $\geq 2$  cm, přivalové srážky, maximální rychlost větru  $\geq 25$  m/s, nebo tornádo) a extrémně intenzivní (z angl. *extremely severe*: kroupy  $\geq 5$  cm, maximální rychlost větru  $\geq 32$  m/s, nebo tornádo  $\geq F2$ ).

Předpověď ESTOFEX na 24. 6. byla vydána v noci z 23. na 24. 6. s použitím modelových dat během 14:00 a 20:00 SELČ (12:00 a 18:00 UTC) dne 23. 6., s platností předpovědi 24. 6. 08:00 SELČ (06:00 UTC) až 25. 6. 08:00 SELČ (06:00 UTC). Pro Českou republiku ESTOFEX předpověděl vysokou pravděpodobnost bouřek ( $\geq 50$  %) a rovněž vysoké riziko intenzivních projevů ( $\geq 15$  %, stupeň 2). Pro území severního Rakouska, části jižních Čech a Vysočiny a západní poloviny Jihomoravského kraje byl rovněž předpovězen stupeň 3 ( $\geq 15$  % pravděpodobnost extrémně intenzivních projevů). Z pohledu jednotlivých projevů byly očekávány zejména velmi velké kroupy a intenzivní nárazy větru v důsledku silného vertikálního stříhu větru („Strong deep layer shear of 20 to 30 m·s<sup>-1</sup> will support supercells capable of giant hail and severe wind gusts”<sup>2</sup>). Předpověď uváděla rovněž riziko tornád, nicméně zejména ve večerních hodinách nad Slovenskem („A tornado is not ruled out, with increasing potential across Slovakia due to strong low-level vertical wind shear that develops in the evening”<sup>3</sup>). Tato předpověď je zobrazena na obrázku 21 s již zaznamenanými hlášenými intenzivními bouřkovými projevy uvedených v databázi ESWD (European Severe Weather Database).

---

<sup>2</sup> Překlad: „Silný vertikální stříh větru 0–6 km s hodnotami 20 až 30 m·s<sup>-1</sup> bude podporovat vznik supercel schopných vyprodukovat obrovské kroupy a silné nárazy větru.“

<sup>3</sup> Překlad: „Tornádo není vyloučeno, potenciál jeho výskytu se zvětšuje nad Slovenskem ve večerních hodinách kvůli silnému vertikálnímu stříhu větru v nízkých hladinách.“



Obr. 21 Předpověď ESTOFEX kombinovaná s hlášeními intenzivních bouřkových projevů z European Severe Weather Database (zelené trojúhelníky reprezentují kroupy  $\geq 2$  cm, červené trojúhelníky tornáda, modré kruhy přiválové srážky a žluté šipky maximální rychlost větru  $\geq 25$  m/s). Zdroj dat a zpracování: ESTOFEX.

Předpověď ESTOFEX rovněž slouží jako jeden z důležitých podkladů pro rozhodovací procesy výstražné služby v rámci návrhu, sestavování a vydávání výstražných zpráv v ČHMÚ.

## 4.2. Možnosti předpovídání extrémních jevů

### 4.2.1. Předpovědi numerických modelů

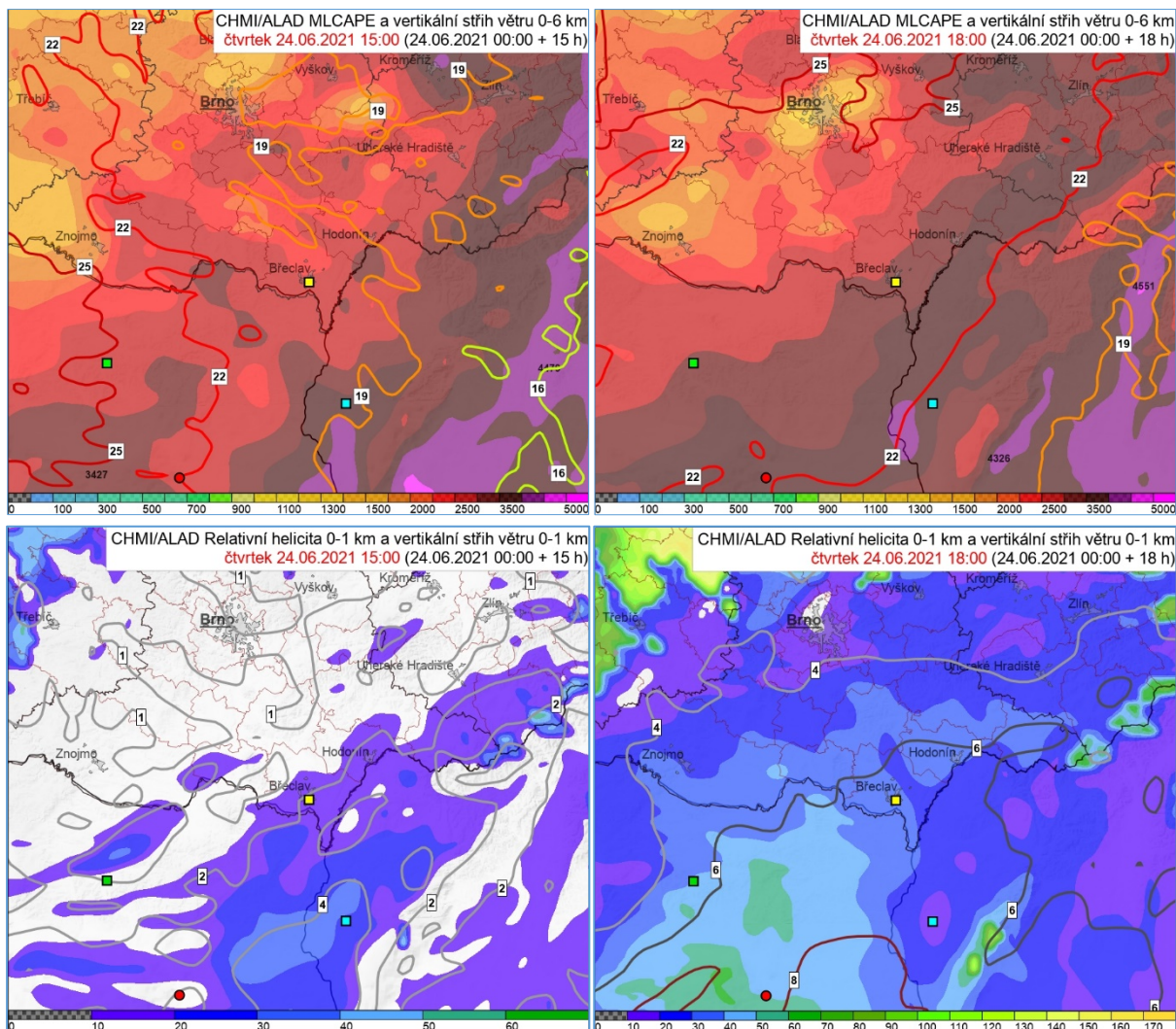
Možnosti předpovědi konvektivních bouří s větším předstihem jsou odkázány pouze na výstupy z NWP modelů. Speciálně u bouří se předpověď konkrétních nebezpečných jevů přesouvá do roviny **využití potenciálu jednotlivých předpovídaných parametrů atmosféry**, které popisují podmínky nutné pro vznik konvektivní bouře (viz kapitola 2.1.). Předpovědi jednotlivých podmínek z NWP modelů mají svá omezení zejména v prostorovém rozlišení vůči reálné atmosféře a s každým novým výpočtem se více, či méně mění, a to i pro stejný termín v budoucnosti. To řadí předpověď konvektivních bouří s velmi lokálními nebezpečnými projevy mezi nejhůře předpověditelné projevy počasí.

Oproti provedeným analýzám jednotlivých parametrů z pseudosondáží, při kterých bylo zpětně využito dat z modelových běhů 24. 6. 2021 14:00 SELČ (12:00 UTC), jsou v této a v následující kapitole popisovány výstupy z modelových běhů, které byly dostupné pro předpovědi počasí ještě před výskytem tornáda. Použity byly půlnoční běhy 02:00 SELČ (00:00 UTC), které bývají podkladem pro vytváření předpovědních výstrah, a to z modelů ALADIN, ICON-EU, ECMWF, GFS a částečně i WRF. V této části jsme se zaměřili na data z půlnočního běhu 24. 6. 2021 a je zde popsán vývoj hodnot sledovaných parametrů z NWP modelů v době formování konvektivních bouří. Výhodou zobrazování parametrů v mapě je okamžitý přehled o jejich prostorové variabilitě. Veličiny se nevztahují pouze k popisu jedné hladiny, ale charakterizují danou vlastnost v rámci zvolené vrstvy profilu atmosféry, pro kterou jsou spočítány (energie v celém profilu, stříh větru mezi hladinami apod.). Nicméně výpočty probíhají často pouze ze standardně používaných tlakových hladin, proto se mohou objevovat rozdíly v hodnotách. Například používaná tlaková hladina 925 hPa ve skutečnosti není ve výšce 1 km, a proto zejména u modelu ALADIN vyniklo podhodnocení vertikálního stříhu větru 0–1 km oproti hodnotám spočítaným u pseudosondáží.

Na příkladu NWP modelu ALADIN je na obrázku 22 nahoře prostorové znázornění předpovídaných veličin podstatných pro vznik silné konvekce: MLCAPE a vertikální stříh větru 0–6 km z modelu ALADIN. Parametr MLCAPE (Mixed Layer CAPE) udává nižší hodnoty než dříve popisované hodnoty MUCAPE a byl zvolen kvůli dostupnosti prostorového srovnání více numerických modelů. V kombinaci s uvedeným vertikálním stříhem větru vhodně ukazuje místa s největším potenciálem pro výskyt silné až extrémní konvekce na velké ploše. Jak bylo zmíněno v kapitole 2., potenciál konvekce může vést ke vzniku konvektivní bouře pouze při splnění podmínky přítomnosti spouštěcího mechanismu. Ten se dne 24. 6. 2021 objevil nejprve v Rakousku a postupně i na Moravě, přitom ale na značné ploše s potenciálem k extrémním konvektivním bouřím na Slovensku k iniciaci konvekce až na výjimky nedošlo. V oblasti dráhy tornadické supercely se v době před vznikem supercely v modelovém termínu 17:00 SELČ (15:00 UTC) až po konec tornáda v termínu 20:00 SELČ (18:00 UTC) zvyšovala hodnota MLCAPE zhruba z  $2500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  až na  $3400 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  a po přechodu supercely výrazně poklesla. Hodnoty

MLCAPE z modelu ALADIN byly proti ostatním modelům téměř ve všech sledovaných lokalitách vyšší, v některých případech skoro až dvojnásobně. Vertikální stříh větru 0–6 km byl po celou dobu výrazný a konstantní i v numerických předpovědích – mezi 20 a 25  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a později večer a v noci se zvyšoval na hodnoty i 30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (ALADIN).

Pro vznik tornáda v rámci supercel, jak již bylo popsáno, jsou podstatné pohyby vzduchu ve spodních hladinách atmosféry. Vhodnými parametry, které mohou tento stav popisovat, jsou relativní helicity a vertikální stříh větru 0–1 km. Obrázek 22 vlevo dole zobrazuje tyto modelované veličiny v době před vznikem supercely v 17:00 SELČ (15:00 UTC). Sondážní měření v časech 02:00 a 14:00 SELČ 24. 6. naznačovala, že u relativní helicity 0–1 km a vertikálního stříhu větru 0–1 km došlo během rána a dopoledne k výraznému poklesu hodnot těchto parametrů, takže v odpoledních hodinách mohly tyto hodnoty vykazovat nižší pravděpodobnost možnosti vzniku tornáda. Relativní helicity 0–1 km v okolí Břeclavi se podle NWP modelů pohybovala průměrně okolo 40  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$  v odpoledních hodinách a zvyšovala se večer a v noci podle některých modelů přibližně na hodnoty okolo 200  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ . Vertikální stříh větru 0–1 km se také zvyšoval z hodnot cca 3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  až na hodnoty kolem 8  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Večer byly tedy podmínky pro možný výskyt tornáda vhodnější, na obrázku 22 vpravo dole jsou zobrazeny předpovídané hodnoty ve 20:00 SELČ (18:00 UTC).



Obr. 22 Předpovědní mapa parametrů MLCAPE (barevné plochy v  $J \cdot kg^{-1}$ ) a vertikálního stříhu větru 0–6 km (barevné linie v  $m \cdot s^{-1}$ ) nahoře a parametrů relativní helicity 0–1 km (barevné plochy v  $m^2 \cdot s^{-2}$ ) a vertikálního stříhu větru 0–1 km (barevné linie v  $m \cdot s^{-1}$ ) dole z půlnočního běhu modelu ALADIN pro termíny 17:00 SELČ (15:00 UTC) vlevo a 20:00 SELČ (18:00 UTC) vpravo. Čtvercové značky na mapách ukazují polohu pseudosondáží (Hollabrun – zelený, Břeclav – žlutý, Malacky – tyrkysový), červený kruh ukazuje na polohu Vídně. Zdroj dat a zpracování ČHMÚ.

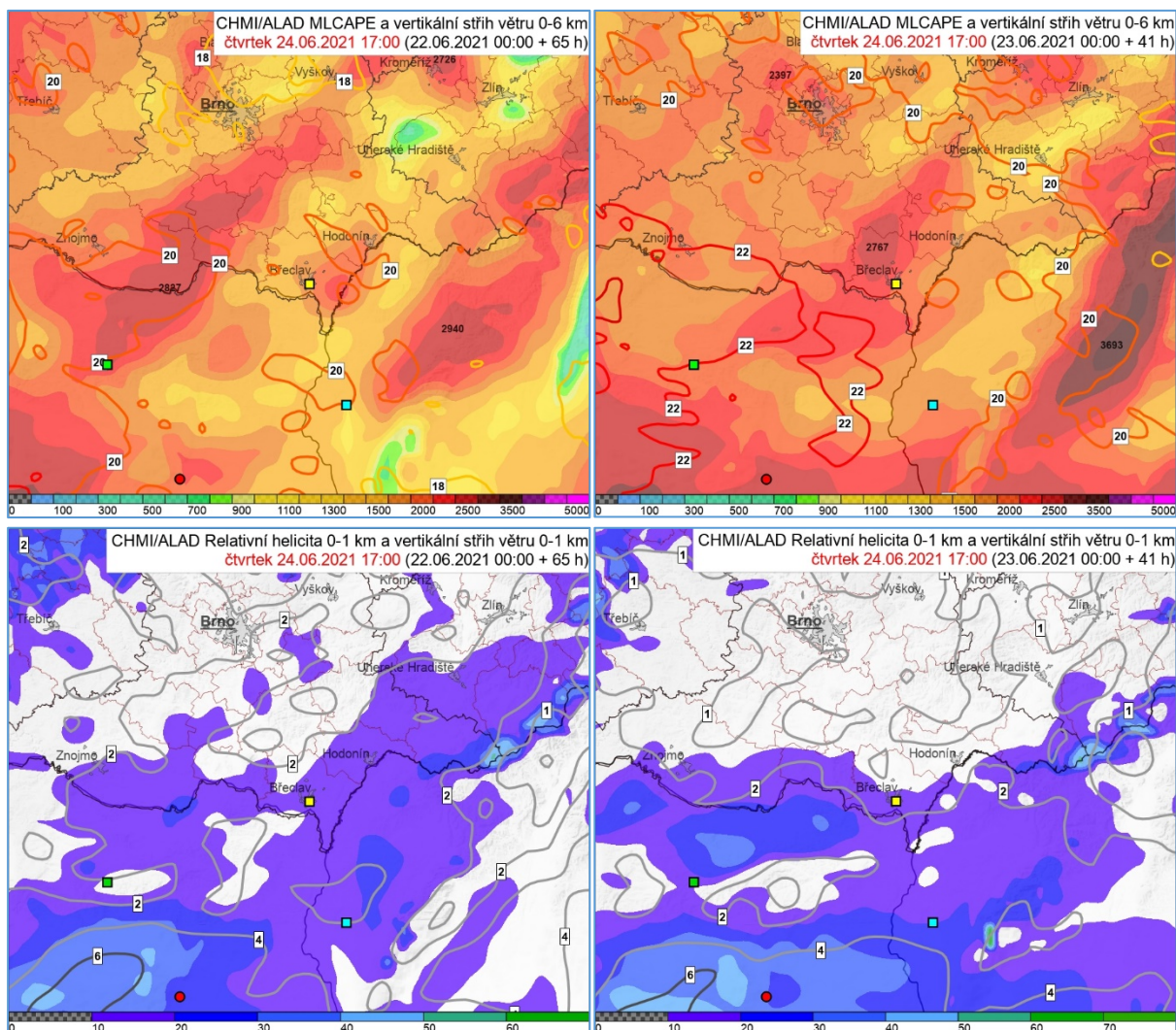
#### 4.2.2. Předpovědní parametry s větším předstihem

Výše zmiňované 4 parametry, podle kterých můžeme predikovat potenciál vzniku silných konvektivních bouří, popřípadě tornád, lze ve skutečnosti porovnat pouze se sondážními měřeními v kombinaci s měřením pozemních stanic. Nicméně při porovnávání s hodnotami z pseudosondáží pro vybrané lokality, které nejsou měřené, ale modelované, je třeba počítat s určitou chybovostí. Rozdíly mezi hodnotami parametrů vypočtených různými NWP modely byly o to větší, čím větší byla prostorová variabilita daného parametru (především MLCAPE a relativní helicity). Vývoj předpovědí vybraných

parametrů v čase je dokumentován výsledky NWP modelů z půlnočních běhů (02:00 SELČ) ze dnů 22. 6., 23. 6. a 24. 6., jelikož výsledky těchto hlavních modelových běhů byly základním zdrojem dat nových předpovědí počasí a vydávaných výstrah v den výskytu tornáda a ve dnech předcházejících. Do srovnání byl přidán i modelový běh 24. 6. 14 SELČ (12:00 UTC), do nějž byla zahrnuta již nejnovější radiosondážní měření, ovšem výpočty tohoto běhu modelů byly dostupné až ve večerních hodinách dne 24. 6. 2021, tj. s minimálním časovým předstihem před výskytem tornáda, nebo i později. Dále popisované srovnání parametrů bylo provedeno pro body pseudosondáží Hollabrun (místo iniciace velmi silné konvekce v Rakousku), Břeclav (výskyt tornáda) a Malacky (nejvyšší hodnoty energie instability v hodnocené přeshraniční oblasti). Vybraný termín předpovědi pro srovnání výstupů NWP modelů byl zvolen shodně s časem měření polední sondáže (14:00 SELČ). Nicméně mnohé z parametrů dosahovaly svých nejvyšších modelem předpovídaných hodnot až později odpoledne a večer, proto bylo srovnání zaměřeno hlavně na pseudosondáže v termínu 17:00 SELČ, tedy bezprostředně před vznikem tornáda.

Analýza prostorového rozložení jednotlivých parametrů vypočtených všemi NWP modely potvrdila, že se ve zkoumané oblasti hodnoty MLCAPE zvyšovaly od západu (Rakousko) na východ (Slovensko), jak ukazuje obrázek 22. Výjimečně se v profilu Břeclav vyskytly relativně nižší hodnoty. Zároveň se (až na výjimky) mezi termíny 14:00 a 17:00 SELČ hodnoty výrazně zvýšily. Stejně prostorové i časové rozložení měly u všech modelů hodnoty relativní helicity 0–1 km. Prostorové rozložení hodnot vertikálního stříhu větru 0–6 km naopak ukázalo, že vyšší hodnoty byly v Rakousku a nižší na Slovensku. U vertikálního stříhu větru 0–1 km byly hodnoty v prostoru vyrovnanější. I zde se hodnoty během odpoledne a večera 24. 6. 2021 zvyšovaly.

V modelových bězích 22. 6. 02:00 SELČ a 23. 6. 02:00 SELČ, tedy v předstihu 65 hodin, resp. 41 hodin před výskytem tornáda, byly hodnoty MLCAPE relativně nižší a nenaznačovaly tak výrazný potenciál ke konvekci, ke které nakonec došlo (viz obr. 23). V následujících modelových výpočtech, které byly blíže k tornádové události, se hodnoty MLCAPE až zdvojnásobily. Vysoké hodnoty už značily předpoklad výrazné konvekce, proto na tuto situaci reagovaly také předpovědi počasí a současně SIVS zvýšením stupně nebezpečí. Ostatní parametry byly v předchozích modelových předpovědích více vyrovnané, i když vertikální stříh větru byl ve všech případech celkově slabě podhodnocený oproti hodnotám z pseudosondáží. Na obrázku 23 jsou opět zobrazeny parametry pro tvorbu konvektivních bouří (nahore) a potenciál tvorby tornád (dole) v době těsně před tornádem ze dvou různých běhů modelu ALADIN.



Obr. 23 Předpovědní mapa parametrů MLCAPE (barevné plochy v  $J \cdot kg^{-1}$ ) a vertikálního stříhu větru 0–6 km (barevné linie v  $m \cdot s^{-1}$ ) nahoře a parametrů relativní helicity 0–1 km (barevné plochy v  $m^2 \cdot s^{-2}$ ) a vertikálního stříhu větru 0–1 km (barevné linie v  $m \cdot s^{-1}$ ) dole z půlnočního běhu modelu ALADIN pro termíny 19:00 SELČ (17:00 UTC) z půlnočních běhů ze dne 22. 6. (vlevo) a ze dne 23. 6. 2021 (vpravo). Čtvercové značky na mapách ukazují polohu pseudosondáží (Hollabrun – zelený, Břeclav – žlutý, Malacky – tyrkysový), červený kruh ukazuje na polohu Vídně. Zdroj dat a zpracování ČHMÚ.

#### 4.2.3. Krátkodobá předpověď z aktuálních měření

Nejdůležitější roli při sledování konvektivních bouří hrají meteorologické radary, díky nimž lze extrémní projevy konvektivních bouří alespoň odhadovat v téměř reálném čase. V produktech radarových měření lze hledat indicie vedoucí k jednotlivým známým nebezpečným projevům počasí (viz kap. 3.5), ovšem důležitá jsou měření a pozorování na zemském povrchu, která skutečný výskyt jevů potvrzují, tj. měření automatických meteorologických stanic (úhrny srážek a maximální rychlosti větru) a hlášená pozorování (výskyt a velikost krup, nebo i tornádo). U pozorovaných jevů jsou velkou výhodou a čím dál více



dominantním zdrojem informací fotografie a videa na sociálních sítích, která bývají dostupná bezprostředně po výskytu jevů.

V radarových produktech jsou při sledování aktuální situace vyhledávány vysoké hodnoty radarové odrazivosti indikující intenzivní srážky, které – pokud jsou ve velkých výškách – mohou indikovat kroupy. Rovněž seskupování odrazivostí vizualizovaných v radarových produktech do specifických obrazců indikuje určitý typ konvektivní bouře, při kterém lze očekávat například silné nárazy větru. Nicméně tyto informace ukazují na potenciál vzniku nebezpečných jevů, které však při velké časové a prostorové dynamice atmosféry vzniknout nemusí, nebo vzniknout mohou, ale v odlišný čas nebo v odlišném místě.

Výše popsané znaky, pozorované na radarových produktech, se týkají již existujících konvektivních buněk v atmosféře pozorovaných nad naším územím nebo v blízkém okolí. V této oblasti je jejich vývoj, směr pohybu, vznik a rozpad předpovídán na základě extrapolace dosavadní dráhy a trendu dosavadního časového vývoje, oboje se ale dynamicky mění a znesnadňuje predikci. V aplikaci JSMeteorView radarového oddělení ČHMÚ je v tomto ohledu např. i nadále rozvíjen již delší dobu existující nástroj CELLTRACK, který pro oblasti výrazných odrazivostí popisuje různé bouřkové parametry a na základě minulého pohybu sledované bouře odhaduje její další pravděpodobný pohyb (viz kap. 3.5). Součástí zdokonalování tohoto nástroje není jen zavádění nových možností detekce potenciální nebezpečnosti dané konvektivní bouře, ale i následná verifikace oproti skutečně pozorovaným nebezpečným projevům v této bouři.

## 4.3. Úspěšnost meteorologických předpovědí

### 4.3.1. Úspěšnost výstražných zpráv

Vyhodnocení meteorologických výstrah se provádí vzhledem ke skutečně naměřeným nebo pozorovaným jevům v jednotlivých kalendářních dnech. Nehodnotí se výstraha jako celek, ale dílčí jevy v rámci nově vydaných nebo aktualizovaných výstrah. Hodnocení probíhá na úrovni celé ČR a samostatně pro jednotlivé kraje. Výstrahy jsou na základě porovnání očekávané intenzity jevu ve výstraze a intenzity skutečně pozorovaného jevu zařazeny do 4 hlavních kategorií úspěšnosti: úspěšná, částečně úspěšná, neúspěšná, velmi neúspěšná (Tabulka 2 a 3). Intenzita jevu je stanovena na základě kritérií pro vydávání výstražných informací Systému integrované výstražné služby (SIVS). Pro účely hodnocení je vyjádřena hodnotou od 0 do 3: 0 = jev není nebezpečný, 1 = nízká, 2 = vysoká, 3 = extrémní. V případě hodnocení na úrovni krajů je úspěšnost výstrahy hodnocena jako lepší o jednu kategorii pokud (i) na pozorovaný jev nebyla vydána výstraha v daném kraji, ale v některém z okolních krajů ano (výstraha v okolí), nebo (ii) v daném kraji byla vydána výstraha, ale jev se vyskytl pouze v některém z okolních krajů (jev v okolí).

Výstrahy vydané pro Jihomoravský kraj 23. 6. a 24. 6. 2021 byly vyhodnoceny jako částečně úspěšné. Podařilo se předpovědět výskyt bouřek doprovázených nebezpečnými jevy, které budou splňovat kritéria SIVS. Vzhledem k výskytu a rozsahu škod velmi silného tornáda a na řadě míst i krup o průměru 4–8 cm byl ve zpětném vyhodnocení nebezpečných jevů přiřazen Jihomoravskému kraji pro 24. 6. nejvyšší, tj. extrémní stupeň nebezpečí. Stupeň nebezpečí vydaných výstrah byl podhodnocený, u výstrahy z 23. 6., tj. s předstihem dne a půl, o 2 kategorie stupně nebezpečí, u aktualizovaných výstrah z 24. 6. o 1 kategorii. Ostatní posuzované nebezpečné jevy (úhrn srážek a nárazy větru mimo tornádo) v rámci kritérií SIVS dosahovaly nízkého až vysokého stupně nebezpečí. Podhodnocení stupně nebezpečí vydaných výstrah souvisí s výše popsáním velmi lokálním charakterem výskytu bouřek. Výstrahy SIVS jsou vydávány na jevy očekávané s vysokou pravděpodobností (> 50 %), ale u bouřek se nebezpečné jevy objeví většinou jen na zlomku území ČR, popř. kraje. Výstrahy vydávané pro velkou oblast najednou proto varují před stupněm nebezpečí, který bude na daném území vysoce pravděpodobný, nikoli na stupeň nejvyšší možný.

Tabulka 2 Hlavní a dílčí kategorie úspěšnosti výstrah.

KATEGORIE ÚSPĚŠNOSTI VÝSTRAH	
úspěšná	-
částečně úspěšná	podhodnocená
	nadhodnocená
	výstraha v okolí*
	jev v okolí*
neúspěšná	chybějící výstraha
	falešný poplach
	výstraha v okolí*
	jev v okolí*
velmi neúspěšná	chybějící výstraha
	falešný poplach

Tabulka 3 Hodnocení výstrah podle vztahu mezi vydanou výstrahou a pozorovaným jevem v rámci ČR a jednotlivých krajů.

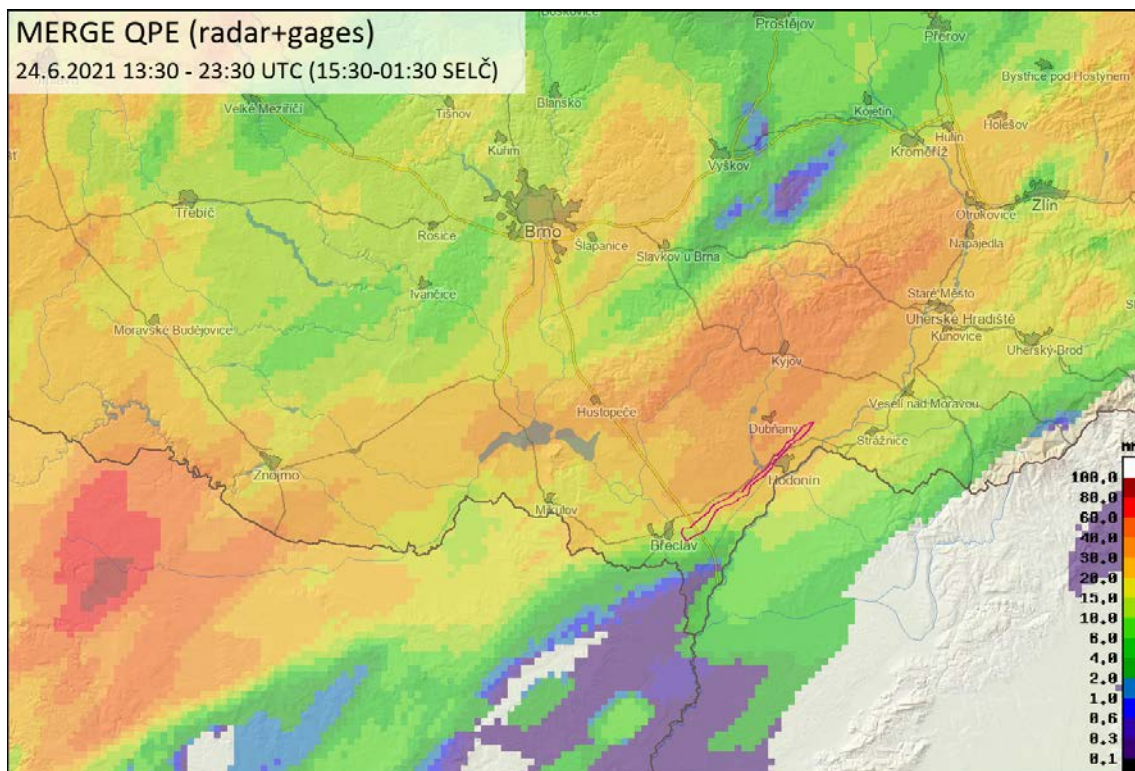
intenzita			POZOROVANÝ JEV				
			0		1	2	3
			okolí 0	okolí 1-3*			
VÝSTRAHA	0	okolí 0			chybějící výstraha	chybějící výstraha	chybějící výstraha
		okolí 1-3*			výstraha v okolí*	výstraha v okolí*	výstraha v okolí*
	1	falešný poplach	jev v okolí*	úspěšná	podhodnocená	podhodnocená	
	2	falešný poplach	jev v okolí*	nadhodnocená	úspěšná	podhodnocená	
	3	falešný poplach	jev v okolí*	nadhodnocená	nadhodnocení	úspěšná	

\* kategorie používaná pouze pro hodnocení krajů – úspěšnost výstrahy lepší o jednu kategorii s ohledem na výskyt jevu/výstrahy v okolních krajích

### 4.3.2. Výskyt nebezpečných jevů podle kritérií SIVS

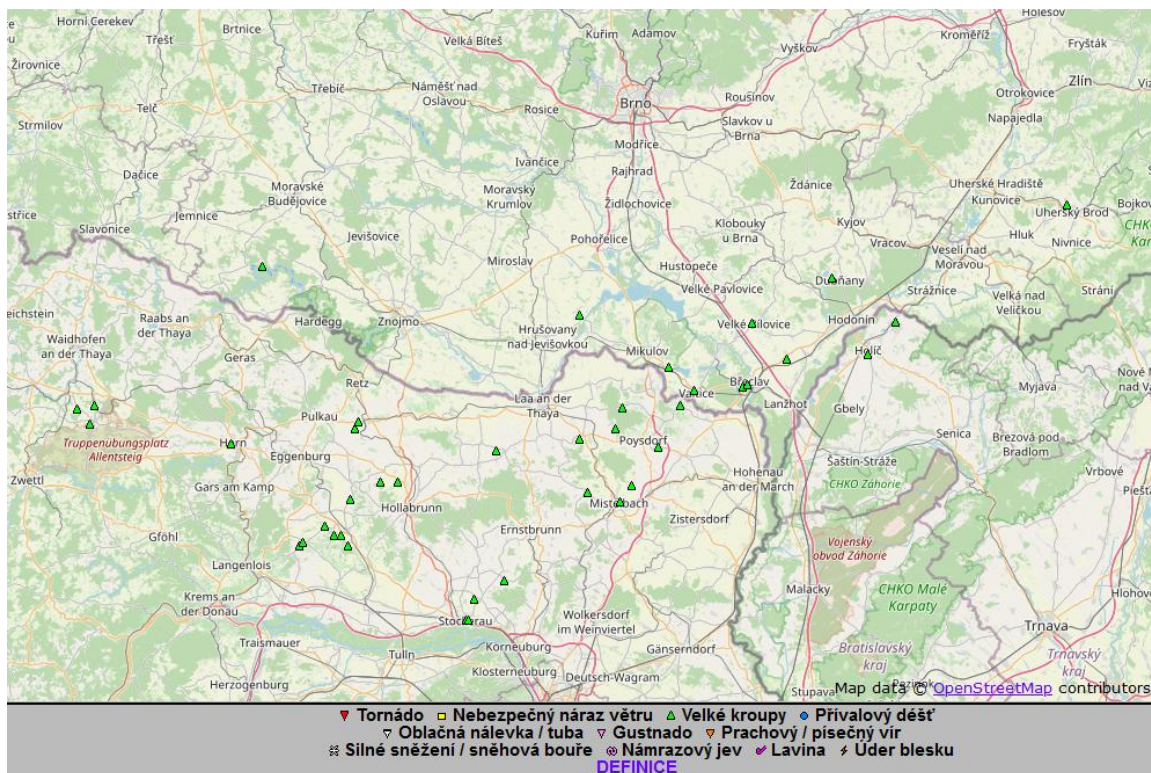
**Kombinovaný/sdružený odhad srážkových úhrnů** z meteorologických radarů a srážkoměrů (MERGE) za vybranou dobu 10 hodin na území jižní Moravy a okolí poukazuje na kumulaci množství spadlých srážek v průběhu všech srážkových událostí mezi 15:30 SELČ 24. 6. a 01:30 SELČ 25. 6. V současnosti se podle nastavených kritérií SIVS na základě srážkového úhrnu „silné bouřky“ očekávají, pokud v nich srážkový úhrn (RR) dosáhne 30 mm a více, u „velmi silných bouřek“ by měl srážkový úhrn dosáhnout 50 mm a více, u „extrémně silných bouřek“ 90 mm a více. Z hlediska intenzity (příválů) srážek jsou zvláště vydávány výstrahy na „velmi silné bouřky s příválovými srážkami“ při překročení očekávaných limitů srážkového úhrnu za určitou krátkou dobu:  $RR \geq 40$  mm za 30 min nebo  $RR \geq 50$  mm za 1 h nebo  $RR \geq 70$  mm za 3 h. U „extrémních bouřek s příválovými srážkami“ jsou kritéria intenzity srážek přísnější:  $RR \geq 40$  mm za 15 min nebo  $RR \geq 50$  mm za 30 min nebo  $RR \geq 70$  mm za 1 h nebo  $RR \geq 90$  mm za 3 h.

V trase tornáda se kombinované odhady srážkového úhrnu pohybují zhruba mezi 15 mm u Břeclavi a 30 mm v okolí Hodonína. Tyto odhady zahrnují srážky způsobené několika bouřkami v intervalu 10 hodin, včetně té s výskytem tornáda. Změřené údaje ze srážkoměrných stanic (viz kap. 2.2.), a tím i odhadované úhrny srážek, mohou být ovlivněny výskytem padajících krup, které se mohou od srážkoměru odrážet a rozpouštět mimo něj, čímž se naměřený celkový úhrn snižuje. Podle těchto odhadovaných ani měřených úhrnů či intenzit srážek nebyla žádná z výše uvedených kritérií SIVS dosažena (obr. 24).



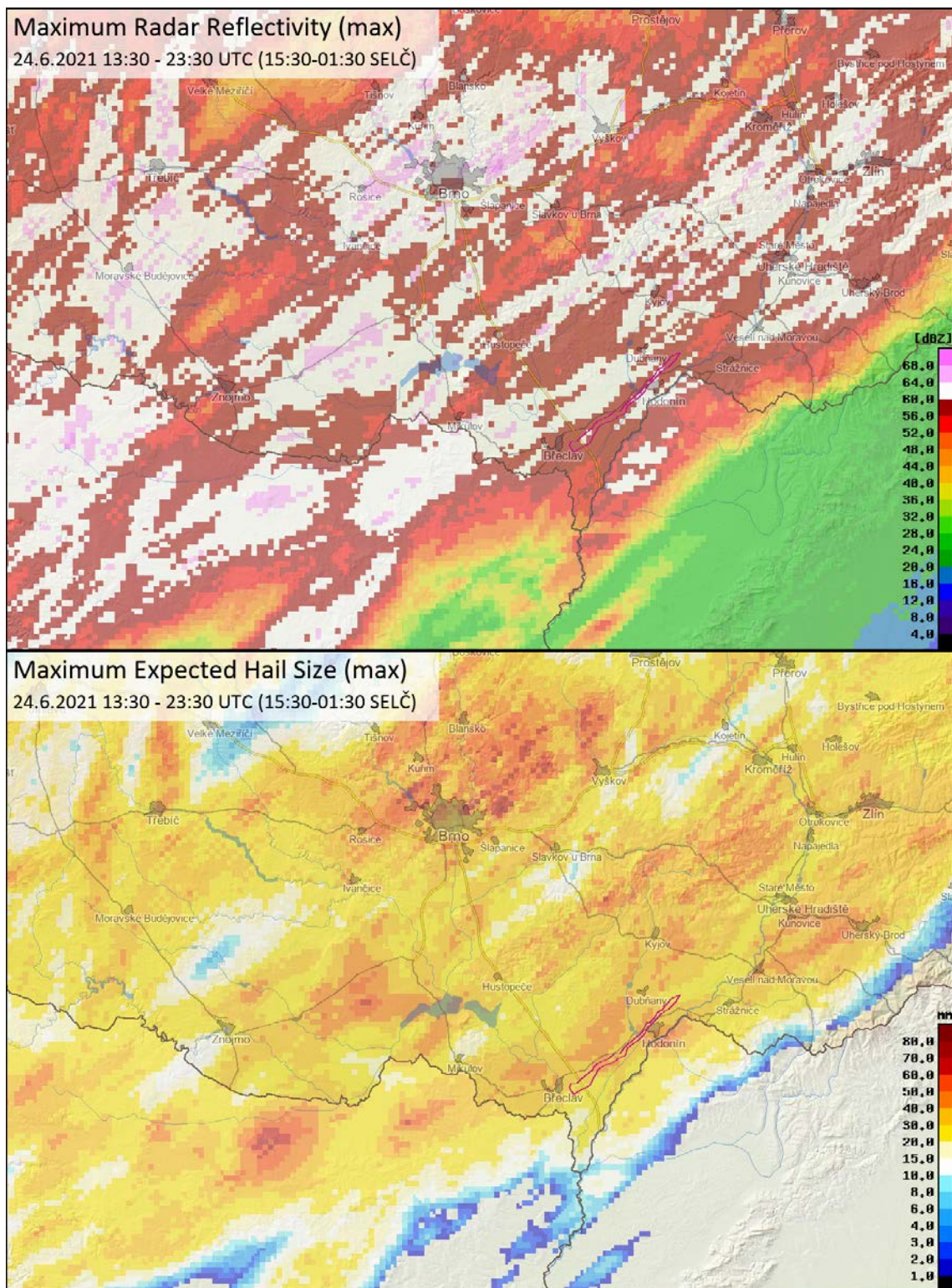
Obr. 24 Kombinovaný odhad srážek MERGE za období 15:30–01:30 SELČ (13:30–23:30 UTC). Odhad MERGE je počítaný z radarových odhadů srážek a údajů ze srážkoměrů, viz Novák a Kyznarová, 2016b. Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.

Stanovit celkový **plošný rozsah výskytu krup** a jejich velikost je obtížné, protože potvrzená pozorování výskytu krup v krajině nemají spojitý charakter. Navíc je obtížné informace mimo lokality standardních pozorování získat – mohou být zjištěny pozorovateli přímo v terénu, nebo převzaty z internetu po zveřejnění na sociálních sítích. Obrázek 25 zobrazuje mapu výskytu významných krup doposud zaznamenaných v Evropské databázi nebezpečných povětrnostních jevů (ESWD – European Severe Weather Database). Zkompletovat podrobnější data z území České republiky je časově náročnější, proto budou součástí připravované monografie. Prozatím je k dispozici z jižní Moravy a okolí více jak 60 pozorování, doplněných o detailní fotografie krup, případně o další informace (škody apod.). Na základě snímků krup je odhadována přibližná velikost podle metodiky ESSL. Zaznamenáno bylo několik míst s výskytem krup nad 5 cm, například Valtice (5–7 cm), Břeclav (6–7 cm), Hrušky (7 cm) a Dolní Bojanovice (6 cm). Mimo vlastní průzkum lze doplnit hlášení o velikosti krup od dobrovolných pozorovatelů na stanicích ČHMÚ – např. v Lednici (4 cm) nebo v Luhačovicích (6 cm).



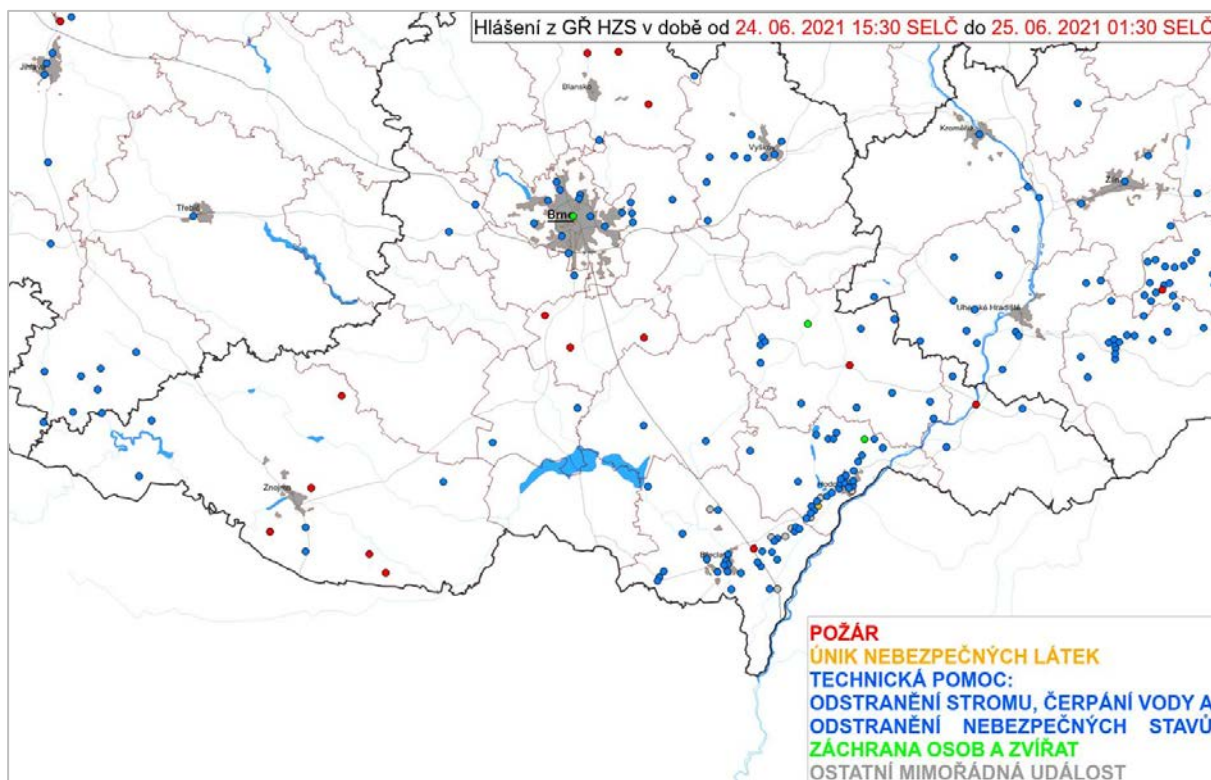
Obr. 25 Přehled výskytu velkých krup 24. 6. 2021 v databázi ESWD (data aktualizována ke dni 8. 9.).  
Zdroj dat: ESWD.

Bodové zdroje informací o výskytu a velikosti krup přímo od pozorovatelů mohou sloužit k ověření (verifikaci) dat plošného charakteru získaných distančním radarovým měřením. Na obrázku 26 (nahore) jsou uvedeny kumulace maximálních hodnot MAX\_Z ve vertikálním sloupci a (dole) maximální očekávané velikosti krup (MEHS – Maximum Expected Hail Size). Produkt MAX\_Z je pouze hrubě orientační produkt pro identifikaci krup, vhodnějším produktem je MEHS, u něhož si je však třeba uvědomit, že neodhaduje velikost krup v daném místě, ale potenciál bouře vygenerovat takovéto kroupy v průběhu následujících minut (viz kapitola 3.5.). Podle dostupných informací o velikosti krup byla kritéria SIVS splněna pro nejvyšší stupeň intenzity jevu.



Obr. 26 Kumulace maximálních hodnot maximální radarové odrazivosti MAX\_Z ve vertikálním sloupci, (nahore) a maximální očekávané velikost krup MEHS (dole) za období 15:30–01:30 SELČ (13:30–23:30 UTC). Vybrané období zachycuje tornadickou bouři po celou dobu života a i celé období, kdy ostatní bouře přecházely přes oblast výskytu tornáda. Fialovo-růžovou barvou zobrazena oblast škod tornáda. Zdroj dat a zpracování: ČHMÚ.

**Maximální rychlosti větru (nárazy větru)** jsou posledním měřitelným, a tím i hodnotitelným kritériem intenzity konvektivních bouří v SIVS. Silné nárazy větru se soustřeďují zejména do částí se sestupným prouděním konvektivních systémů. Jen málokdy jsme schopni reprezentativní hodnotu maximální rychlosti větru v bouřkách zaznamenat měřením ve staniční síti. Určitým vodítkem pro potenciálně velmi silné nárazy větru jsou jádra konvektivních bouří s výrazným vzestupným prouděním, vyjádřená na radarových snímcích vysokou odrazivostí ( $\geq 44$  dBz). Kumulace maximálních hodnot maximální radarové odrazivosti, které se vyskytly v jednotlivých obrazových bodech v období 15:30–01:30 SELČ dne 24. 6. 2021 jsou zobrazeny na obrázku 26 (nahore). Zobrazovaný 10hodinový interval zahrnuje celé období trvání tornadické supercely i období, kdy přes tornádem zasaženou oblast přecházely další bouře. Protože výrazné vzestupné proudění může být doprovázeno i výrazným sestupným prouděním, ukazuje plocha nejvyšších hodnot odrazivosti MAX\_Z místa, v jejichž okolí se mohly vyskytovat silné nárazy větru. Ve skutečnosti je zasažená plocha menší, neboť maximální odrazivost může zachycovat bouři ve fázi při vzestupu vzduchu plného dešťových kapek nebo krup. Lokalizaci nebezpečných poryvů větru lze určit až po jejich výskytu podle škod hlášených v jednotlivých zásazích Hasičského záchranného sboru (HZS). Poryvy větru se většinou shlukují v okolí dráhy výrazných konvektivních bouří. Mapa (obr. 27) ukazuje souhrn zahájených zásahů HZS ve vybraném časovém intervalu mezi 15:30 SELČ 24. 6. a 01:30 SELČ 25. 6. 2021 na jižní Moravě a okolí. V případě konvektivních bouří jsou silné nárazy větru často spojeny s intenzivními srážkami. Na obrázku ovšem nelze rozlišit typ zásahu „Technická pomoc“, který je ještě dále členěn mimo jiné na „Odstranění nebezpečných stavů“, „Čerpání vody“ a „Odstranění stromu“. Celkový počet zásahů kvůli odstranění stromů za celý den 24. 6. pro celý Jihomoravský kraj činil 115, dne 25. 6. bylo zásahů 145, pro Zlínský kraj 82, resp. 43. Podle změřených maximálních rychlostí větru na stanicích byl dosažen pouze nízký stupeň nebezpečí jevu, ovšem hlášení HZS a výrazná bouřková jádra naznačují možný výskyt hodnot maximálních rychlostí větru odpovídající vysokému stupni nebezpečí. Samotné tornádo se pak vymyká veškerým standardně používaným kritériím SIVS.



Obr. 27 Lokalizace sledovaných zásahů HZS za vybraných 10 hodin 24. 6. a 25. 6. 2021. Zdroj dat: GŘ HZS, zpracování: ČHMÚ.

Důsledky ničivého tornáda mohou být v mapě zásahů HZS částečně zobrazeny jako „Ostatní mimořádná událost“. Samotnému monitoringu škod způsobených tornádem je věnována následující kapitola.

## 5. Průzkum tornádem poškozené oblasti

### 5.1. Dokumentace a hodnocení škod

Od 25. 6. 2021 byly po dobu zhruba 1 týdne prováděny průzkumy oblasti poškozené tornádem za účelem zajištění materiálů dokumentujících rozsah a míru škod na objektech i v krajině. Vzhledem k omezenému přístupu do oblasti bylo nutné pro průzkumné týmy vyžádat povolení Krizového štábu Jihomoravského kraje, resp. Krajského operačního střediska Jihomoravského kraje pro pohyb v jednotlivých obcích. Pozemních i leteckých průzkumů se zúčastnilo několik týmů. Ve vzájemné koordinaci odborníci z ČHMÚ, SHMÚ, AMS, ESSL a Amper Meteo dále pak provedli vlastní průzkum týmy PřF UK a Meteopressu, přičemž vzájemná dohoda o spolupráci a poskytnutí získaných informací



pro účely této zprávy zkrátila čas potřebný k průzkumu celé zasažené oblasti. V rámci jednotnosti určení škod a jejich objektivnějšího vyhodnocení byl použit provizorní manuál ESSL, který stanovuje hodnocení škod způsobených tornády a větrem dle Mezinárodní Fujitovy stupnice (International Fujita Scale, dále jen IFS. Zdroj: [https://www.essl.org/media/publications/IF-scale\\_v0.10.pdf](https://www.essl.org/media/publications/IF-scale_v0.10.pdf)). Manuál je sice v současné době v poměrně rané verzi, přesto neexistuje vhodnější materiál, který by detailněji popisoval způsob hodnocení škod přizpůsobený území Evropy.

### **5.1.1. K historii dokumentace škod**

Detailní hodnocení škod způsobených tornádem formou pozemního nebo leteckého průzkumu má své kořeny v 70. letech 20. století v USA, tj. v době, kdy se předpovědi a varování před tornády staly běžnou součástí produktů Národní meteorologické služby (National Weather Service), a v době velkého pokroku v radarové detekci konvektivních bouří. Průzkum škod vycházel jednak z potřeby hodnotit závažnost tornáda pro prognózní potřeby meteorologické služby, ale i z hlediska studia prostorové proměnlivosti větru v tornádu. Vzhledem k mimořádnému horizontálnímu gradientu rychlosti větru v relativně úzkém pásu je uspokojivé zachycení tornáda standardní sítí meteorologických stanic vyloučeno. Náhodný zásah stanice tornádem je výjimečnou událostí, při které navíc většinou dojde k poškození nebo destrukci měřících přístrojů. Průzkum škod tak zůstává jedinou možností studovat rozsah a intenzitu tornáda. V USA je průzkum škod standardní náplní místní meteorologické služby již několik desetiletí. V Evropě se situace různí a mnoho meteorologických institucí průzkumy vůbec neprovádí a ty tedy zůstávají doménou vědecké nebo i amatérské meteorologické obce. V Česku se s organizovanějšími průzkumy začalo v 90. letech minulého století.

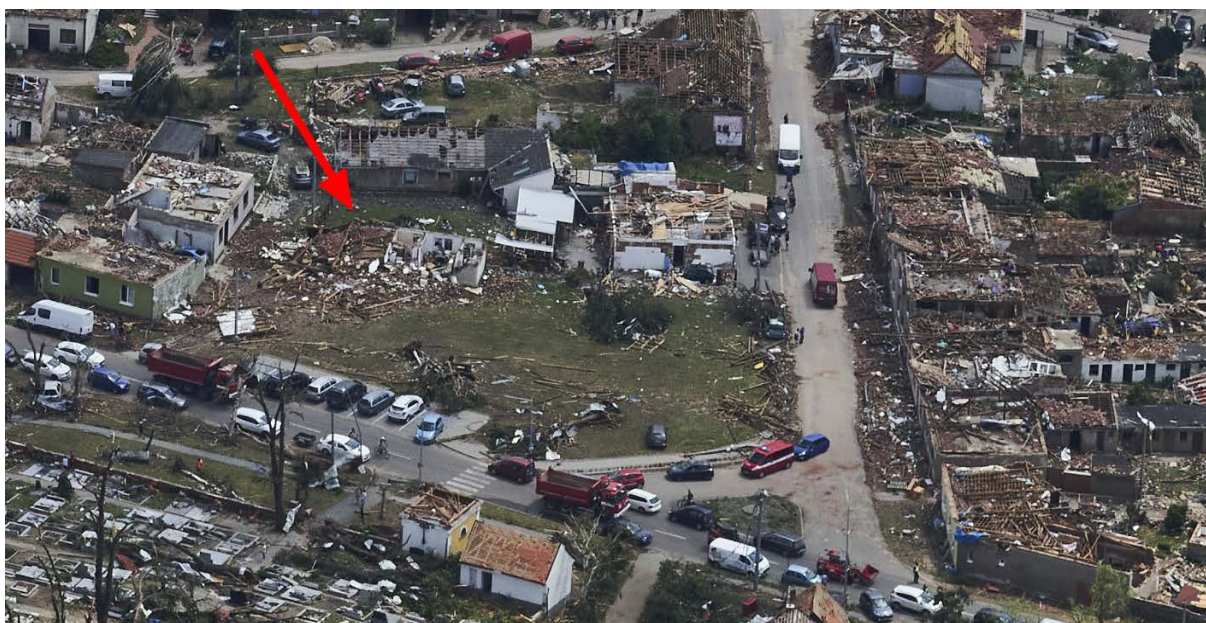
Vedoucí osobou prvních průzkumů škod v USA byl Theodore Fujita, který následně sestavil stupnici, jež je pro hodnocení tornád dodnes pod jeho jménem využívána, i když s jistými modifikacemi. Fujitova stupnice byla zformulována v první řadě jako stupnice rychlosti větru, k jednotlivým stupňům byl následně přiřazen charakter škod (viz Tabulka 4). V USA je dnes využívána modifikovaná verze stupnice (tzv. Enhanced Fujita scale), která stanovuje jednotlivé indikátory poškození pro různé druhy konstrukcí a jejich přiřazení k intenzitě tornáda. Fujitova stupnice je momentálně podobně modifikována i pro typické stavby a konstrukce v Evropě – viz výše zmíněná IFS. Je nutné podotknout, že slabá stránka každé z těchto stupnic je jejich návaznost na hodnoty rychlosti větru. Náhlé změny rychlosti větru, výrazná vertikální složka v proudění nebo jeho extrémní horizontální gradient zůstávají značnou překážkou při měření a laboratorním studiu dopadu tornáda na jednotlivé struktury. Výsledné odhady rychlosti větru na základě zjištěných škod tak mohou být určeny jen s velkou mírou nejistoty.

Tabulka 4 Stručný popis škod dle původní Fujitovy stupnice. Zdroj: [www.tornada-cz.cz](http://www.tornada-cz.cz).

Stupeň (intenzita tornáda)	Obvyklé škody	Odhad rychlosti větru (km·h <sup>-1</sup> )
F0	Nahodile zbořené komíny a dřevěné ploty; drobné škody na střešní krytině; poškozené reklamy a dopravní značky vedle silnic; ulámané větve stromů, sporadicky vyvráceny stromy s mělkými kořeny; na polích může být patrná stopa tornáda	64–116
F1	Částečně poničená krytina střech; jedoucí automobily vytlačeny ze silnice; různé stavební buňky posunuty ze základů, převráceny či silně poškozeny, chatrnější stavby (kůlny, plechové garáže, plechové haly) těžce poničeny až zcela zničeny; sporadicky vyvráceny či přelomeny větší stromy s pevnějšími kořeny	117–180
F2	Zcela utrhány střechy z hůře postavených budov; mobilní buňky a chatrnější stavení zcela zničeny; u bytelnějších staveb boční a čelní stěny ještě vážněji nepoškozeny; lehčí auta nadnášena; vznik "projektilů" z lehčích, malých trosek; většina izolovaně rostoucích velkých stromů vyvrácena nebo přelámána	181–253
F3	Střechy a některé stěny zcela utrženy od konstrukce dobře postavených budov; těžší auta nadnášena; převrácené vlaky či lokomotivy; většina stromů v souvislém lese vyvrácena nebo ulámána, stojící stromy či pahýly stromů částečně zbaveny kůry létajícími troskami	254–332
F4	Železobetonové budovy významně poškozeny, zděné (cihlové) a kamenné budovy těžce (většinou neopravitelně) poškozeny, méně pevné budovy zcela srovnány se zemí, trosky nejchatrnějších budov rozptýleny do značné vzdálenosti od svých základů; auta unášena vzduchem (těsně nad zemí) nebo rolována na velké vzdálenosti; vznik velkých a těžkých "projektilů" z létajících trosek; pahýly stromů zcela zbaveny kůry	333–418
F5	Železobetonové budovy těžce poškozeny, ostatní budovy zcela zničeny; zpevněné nezděné budovy přeneseny před totálním zničením do značné vzdálenosti; automobily přenášeny vzduchem jako "projektily" na značné vzdálenosti; pole zcela zbavena vegetace (úrody) – ta převážně vytrhána i s kořeny	419–512

## 5.1.2. Průběh a poznatky z dokumentace škod

Již první letecký průzkum provedený AMS v dopoledních hodinách 25. 6. jasně naznačil, že rozsah škod způsobených tornádem je na naše poměry opravdu mimořádný. První snímky poskytnuté pozemnímu průzkumnému týmu navíc ukázaly, že zřejmě ve všech obcích se bude jednat o velké množství poškození odpovídajících silnému tornádu (F2+). S ohledem na rozsah škod a probíhající intenzivní odklízecí práce nebylo možné projít celou oblast kompletně dům od domu, a tak bylo rozhodnuto o jiném postupu. Na základě srovnání škod z leteckých snímků (obr. 28 a 31) s mapovými podklady byly vytipovány lokality, kde by případně charakter škod mohl odpovídat síle tornáda F3 nebo dokonce i F4. Na tyto lokality byl primárně zaměřen pozemní průzkum a dokumentace (obr. 29, 30, 32, 33 a 34), a to nejen vzniklých škod, ale i charakteru poničení staveb. To je velmi důležité pro možnost posouzení pevnosti a následně odolnosti stavby vůči poškození větrem.



*Obr. 28 Ukázka extrémních škod zjištěných z prvotního leteckého snímkování. Obytný dům v Mikulčicích byl tornádem rozmetán až na jednu z obvodových zdí a u mnoha okolních staveb jsou zcela zničeny krovy, někde i stropy místností v budovách. Foto: Lukáš Ronge.*

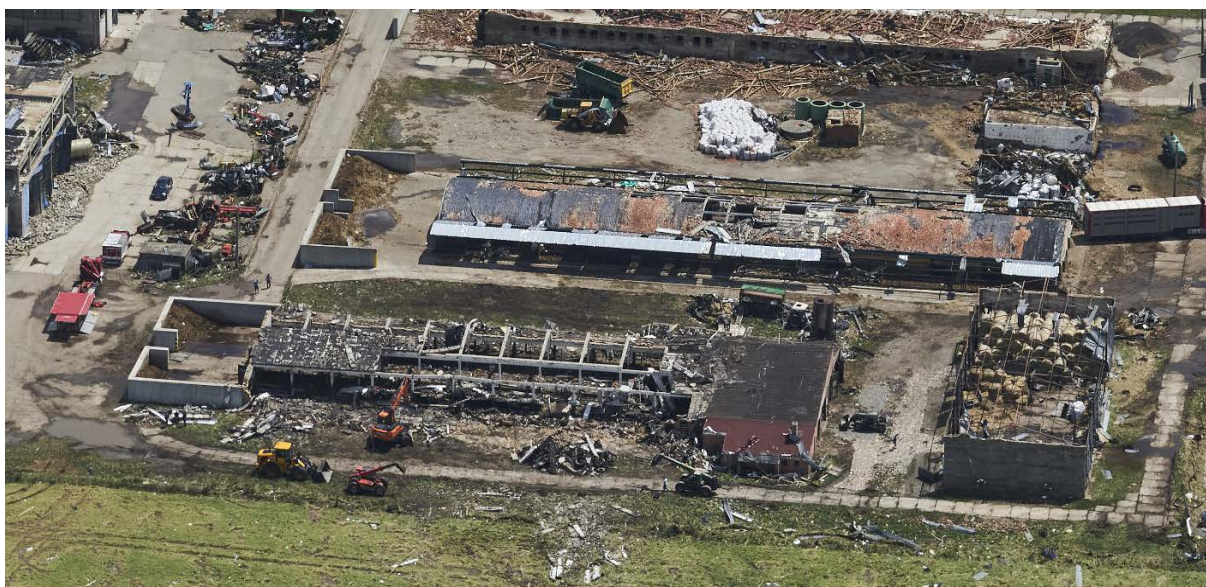


*Obr. 29 Detail zdevastovaného domu označeného na předchozím obrázku zachycený při následném pozemním průzkumu. Zatímco části domu byly z většiny rozházeny po okolí, v policích zůstalo netknuté nádobí. Foto: Tomáš Púčik.*

Během prvního dne průzkumu (25. 6.) se činnost společného týmu ČHMÚ a ESSL soustředila na obce Hrušky a následně Moravskou Novou Ves. Zároveň proběhlo pozemní mapování společnosti Meteopress v části Hodonína, v obci Lužice a části obce Mikulčice. Velká část obcí Hrušky a Moravská Nová Ves byla tornádem značně poničena a již v Hruškách byly nalezeny velmi výrazně zdemolované budovy. Za obcí samotnou bylo pole viditelně zbaveno vegetace a zbytky poničeného stromořadí za obcí byly nejen plné trosk přinesených z Hrušek, ale mnohé pahýly stromů byly částečně zbaveny kůry, jak došlo k jejímu osekání letícím prachem a troskami. I to jsou projevy typické zejména pro případy ničivých (F4+) tornád. Na velkém množství budov byly navíc dobře patrné škody způsobené velkým množstvím letících projektilů tvořených částmi střešních krytin, kusy dřeva z krovů, ale i unášenými a odhazovanými automobily nebo nákladními kontejnery.



*Obr. 30 Patrový obytný dvojdům na okraji obce Lužice. Horní patro jedné části dvojdómku bylo tornádem téměř kompletně zdemolováno. Foto: Tomáš Púčik.*



*Obr. 31 Velmi lokalizované, ale devastující poškození budov zemědělského podniku na okraji Moravské Nové Vsi svědčí o pravděpodobném působení svého víru. Jedna část objektu dole uprostřed na snímku byla tornádem na první pohled téměř netknuta, zatímco zbytek budovy je kompletně zbaven veškeré cihlové vyzdívký, ale vytrhána byla i většina stropních železobetonových desek. Mnohé z nich byly odházeny desítky metrů daleko do pole, nebo poházeny v prostoru podniku. Poškozena byla i nosná železobetonová konstrukce. Foto: Lukáš Ronge.*



*Obr. 32 Ukázka působení rychle letících projektilů zaražených do stěn poničené budovy. Právě tyto letící předměty i při menších rozměrech představují jedno z největších rizik při tornádu. Při velké rychlosti mohou prolétat okny nebo i tenčími stěnami a ohrožovat osoby uvnitř zasažených domů. Foto: David Rýva.*



*Obr. 33 Zřejmě část nákladního kontejneru pohozená tornádem na sloupy vjezdové brány. Foto: Tomáš Púčik.*

U objektů průmyslových a zemědělských areálů docházelo k výrazné devastaci budov, a to na některých místech nejen formou téměř kompletního rozboření cihlových částí staveb, ale i odtrhání železobetonových panelů od nosné konstrukce nebo pokroucení a zborcení celých ocelových nosných konstrukcí staveb. Na některých místech byly rovněž dobře patrné velké rozdíly poškození na malých vzdálenostech, které mohly naznačovat působení savých vírů, jež obíhají po obvodu tornáda a jsou často zodpovědné za lokálně nejvýraznější škody.

Druhý den (26. 6.) průzkum týmu ve složení ČHMÚ, ESSL a SHMÚ pokračoval v obcích Mikulčice, Lužice a Hodonín. V této oblasti již bylo patrné výrazné zúžení pásu škod způsobených tornádem, což ale neznamena, že by došlo k zeslabení jeho destruktivního potenciálu. V některých místech byly naopak zaznamenány ještě výraznější škody na obytných budovách v podobě téměř kompletní devastace i poměrně solidně konstruovaných budov. Opět byly zaznamenány i značné škody na mnoha různých typech staveb od obytných domů přes malé i velké průmyslové areály až po zasažení tělesa hlavní železniční tratě Břeclav – Přerov v délce mnoha set metrů, kde došlo ke zdemolování sloupů trakčního vedení, protihlukových stěn, ze kterých byly odneseny panely, i k vyvracení a rozházení sloupů světelné signalizace (semaforů). Zároveň s tímto průzkumem proběhl druhý letecký průzkum společnosti Meteopress a využito bylo i mapování pomocí dronů Meteopressu a AMS. Snímky umožňující porovnání stavu před a po tornádu s využitím Google Maps pořídil ve vybraných lokalitách tým PŘF UK (ukázky v kap. 1.). Cennými informacemi pro pozemní týmy byly i výpovědi obyvatel poškozených obcí.



*Obr. 34 Osobní automobil pohozený v pásu křovin oddělujícím pole. Části motoru automobilu byly nalezeny o několik set metrů dále v poli. Foto: Tomáš Púčik.*

Během následujících dnů se pozemní tým ČHMÚ, SHMÚ, ESSL a Amper Meteo zaměřil na další oblasti výrazných škod dodatečně zjištěných během podrobnějšího procházení snímků leteckého průzkumu. Pro zhodnocení škod v oblasti okolí dálnice D2 pak byly využity dokumentační materiály firmy E.ON Česká republika, s.r.o., která pro účely zpracování zprávy poskytla fotografie poškozených sloupů vysokého napětí.

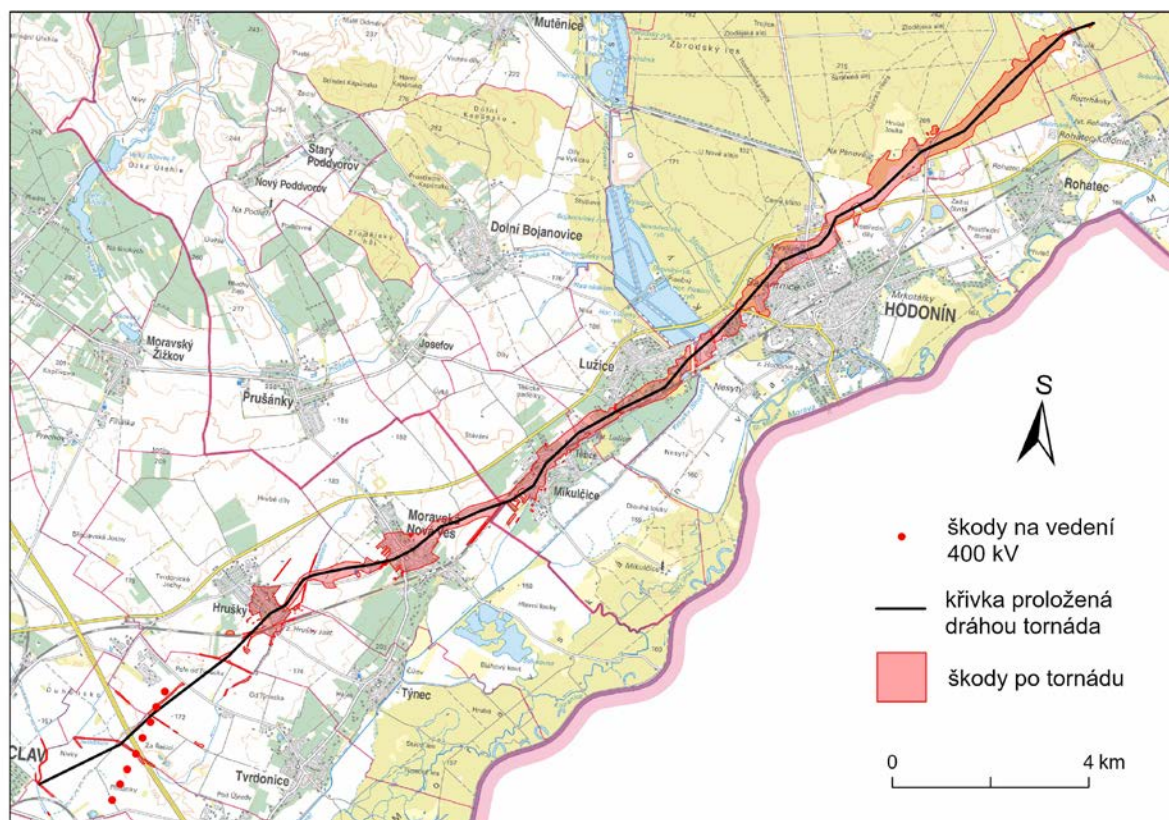
Zajištěná dokumentace byla následně konzultována mezinárodním expertním týmem odborníků, který se shodl na tom, že na základě IFS nejméně zjištěné škody skutečně odpovídají stupni IF4, resp. F4 a že tedy šlo nejen o silné, ale dokonce ničivé tornádo. To znamená, že odhadovaná maximální rychlost větru dosáhla hodnoty cca  $105 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (cca  $380 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Je důležité zdůraznit, že údaj o této rychlosti je přibližný a může se lišit od této střední hodnoty o  $\pm 31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (cca  $110 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Jde o první takový potvrzený případ na našem území v moderní historii. Detailní vyhodnocení škod pro všechna dotčená místa bude trvat delší dobu, protože zajištěná dokumentace škod je mimořádně rozsáhlá a vyžaduje pečlivé zpracování tak, aby hodnocení bylo co nejobektivnější. Podrobná dokumentace pomohla i při přesnějším časovém vymezení výskytu tornáda. První odhady na základě různých informací a dat naznačovaly výskyt tornáda přibližně v čase od 19:10 do 20:00 SELČ. Z informací o času pořízení dostupných fotografií a videí, na kterých bylo tornádo viditelné, bylo možné zúžit **časový interval na 19:14 až 19:53 SELČ.**



## 5.2. Mapování tornádem poškozené oblasti

### 5.2.1. Mapování škod

Základním mapovým výstupem po vyhodnocení dat z průzkumů je mapa oblasti poškozené tornádem se zvýrazněním ploch, které byly dle detailnější analýzy zasaženy přímo rotujícím sloupcem vzduchu, případně silnými poryvy větru v blízkém okolí (viz obr. 35).



Obr. 35 Rozsah škod po tornádu na území jižní Moravy 24. 6. 2021. Zdroj dat: ČHMÚ, SHMÚ, ESSL, AMS, PřF UK, Meteopress, VUT, Amper Meteo, E.ON, mapový podklad: ZM 100, ČUZK, zpracování: Miloslav Staněk.

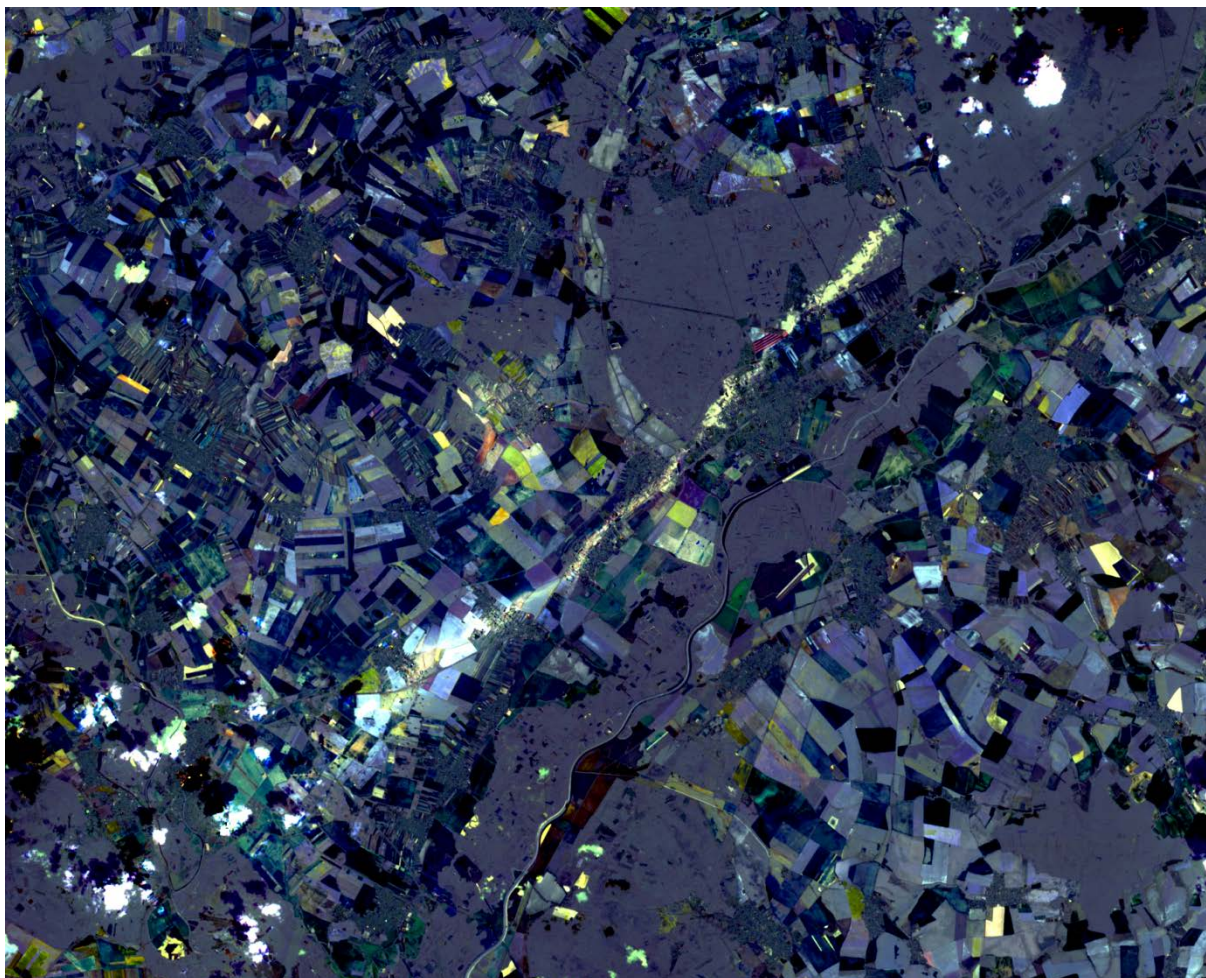
Pro mapování dráhy tornáda byla použita vrstva leteckých dat pořízených VUT, jimž byl na některých místech zvýšen kontrast tak, aby byly zřetelné všechny detaily. Pro další polohové upřesnění zmapovaných škod bylo využito letecké mapování a mapování pomocí dronu společnosti Meteopress a Amatérské meteorologické společnosti. Pro bližší upřesnění byly 2D snímky z dronu, pořízené společností Meteopress, georeferencovány. Tyto snímky zachycují tornádem poničené části obcí Hrušky, Moravská Nová Ves a Mikulčice. Kromě pořízení snímků v rovině byly pořizovány i fotografické a video materiály v prostoru pro odhad míry poškození budov. Z letadla byla pořízena fotografická dokumentace se zaměřením převážně na škody na stavbách. Z dat leteckých průzkumů vznikla vektorizovaná vrstva polygonů. Ještě podrobnější informace pak byly do mapování zahrnuty pozemním průzkumem ČHMÚ, ESSL, Amper Meteo, Amatérské meteorologické společnosti, Meteopressu a PřF UK. Výstupem je prozatím neklasifikovaná mapa polygonů zachycující dráhu škod. Z mapování je patrné, že přímá spojnice mezi prvními škodami severovýchodně od Břeclavi a koncem dráhy tornáda u Ratíškovic činí 26,5 km. **Celková dráha tornáda proložením křivky drahou škod činí 27,1 km. Šířka dráhy škod se pohybuje mezi 2,1 km** jihozápadně od obce Hrušky **a 250 metry** v Hodoníně v průmyslové zóně Kapřiska. Právě oblast mezi obcemi Břeclav a Hrušky, kde se objevily méně četné škody, ale v rozpětí dráhy až 2,1 km, je považována za místo, kde se tornádo formovalo pravděpodobně v kombinaci se silnými výtoky studeného vzduchu.

### 5.2.2. Snímky z družice Sentinel-2

Snímky z družic s polární drahou mají v dnešní době kvalitní prostorové rozlišení a kromě přesnějšího mapování je lze využít k přímému zobrazení škod v oblasti zasažené tornádem (obr. 36). Využitím různých spektrálních kanálů a jejich kombinacemi lze určité prvky v krajině zvýraznit (obr. 37).



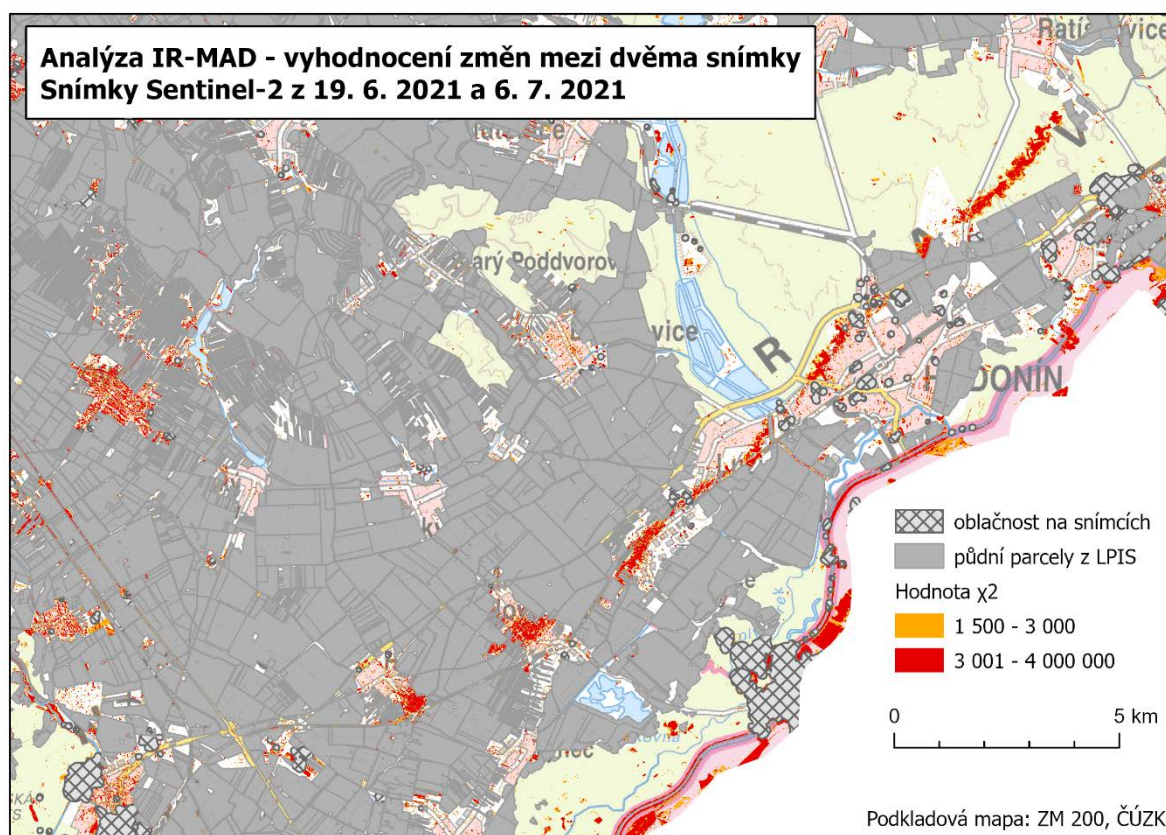
Obr. 36 Snímek z přístroje MSI družice Sentinel-2 ze dne 29. 6. 2021 (tři dny po tornádu) ve zvýrazněných pravých barvách (úroveň dat L2A), kanály 4 ( $0,66 \mu\text{m}$ ), 3 ( $0,56 \mu\text{m}$ ) a 2 ( $0,49 \mu\text{m}$ ), rozlišení těchto kanálů 10 m, s vyznačením stopy tornáda. Zdroj dat: Copernicus Open Access Hub, zpracování: ČHMÚ.



*Obr. 37 Snímek, který vznikl jako rozdíl dat v jednotlivých kanálech (úroveň L1C) přístroje MSI před výskytem tornáda (19. 6.) a po výskytu tornáda (29. 6.). Rozdíly byly nejvýraznější v kanálech 12 (2,2  $\mu\text{m}$ ), 11 (1,6  $\mu\text{m}$ ) a 5 (0,7  $\mu\text{m}$ ), všechny v rozlišení 20 m, které byly následně zkombinovány do tohoto výsledného RGB snímku. Zdroj dat: Copernicus Open Access Hub, zpracování: ČHMÚ.*

Dalším využitím družicových snímků s vysokým rozlišením je jejich detailní analýza v hledání změn mezi dvěma družicovými snímky. Na katedře aplikované geoinformatiky a kartografie PŘF UK byla testována, a ve spolupráci s katedrou fyzické geografie a geoekologie byla aplikována analýza metodou IR-MAD. Analýza IR-MAD, blíže popsána v Nielsen (2007), se používá ke hledání změn, ke kterým došlo mezi dvěma družicovými snímky dálkového průzkumu Země (pořízené např. družicí Sentinel 2), nebo k hledání neměnných pixelů za účelem provedení radiometrické korekce mezi dvěma snímky. Po transformaci snímků a srovnáváním odpovídajících si pixelů na snímcích je vypočtena hodnota  $\chi^2$  (chí kvadrát), která jejich rozdíly zvýrazňuje. Čím je tato hodnota vyšší, tím je méně pravděpodobné, že daný pixel je neměnný (invariantní), a tudíž došlo ke změně.

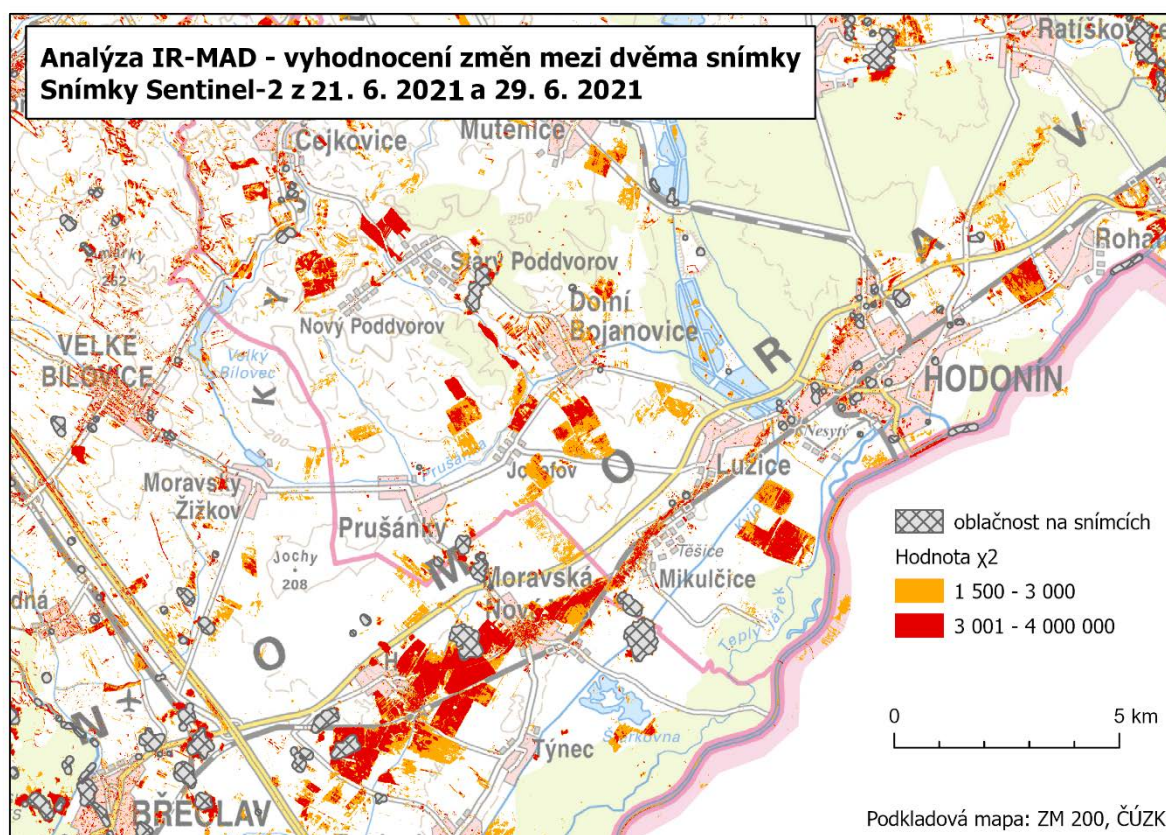
Analýzy vizualizované v následujících obrázcích byly vytvořeny skrze platformu Google Earth Engine ze všech 4 pásem Sentinel-2 s rozlišením 10 m (B2, B3, B4 a B8).



Obr. 38 Analýza změn u snímků družice Sentinel-2 z 19. 6. a 6. 7. 2021. Zdroje dat: Copernicus Open Access Hub, mapový podklad: ZM 200, ČÚZK, LPIS, zpracování: Jan Svoboda (PřF UK).

Pokud tornádo či jiné doprovodné nebezpečné meteorologické jevy související se silnou konvekcí v atmosféře (např. krupobití, downburst, přívalové povodně apod.) způsobily změnu v odrazivosti povrchu, měly by se takto změněné povrchy projevovat vysokou hodnotou  $\chi^2$ . Jako výrazná změna mezi dvěma snímky (vysoké hodnoty chí kvadrát) je obvykle také vyhodnocena oblačnost, protože málokdy jsou oblaka na dvojici překrývajících se snímků na stejném místě. Z toho důvodu byla vytvořena maska oblačnosti z produktu SCL (Scene Classification Layer), který je vytvořen při aplikování atmosférických korekcí Sen2Cor na snímek tak, aby lépe vynikly změny způsobené tornádem. Další změna, která se často projevila vysokými hodnotami  $\chi^2$ , je zrání, kvetení, nebo změny fenofází zemědělských plodin (ke konci června kvete vinná réva). Čím je delší časové období mezi analyzovanou dvojicí snímků, tím je komplikovanější od sebe rozlišit změny způsobené tornádem a fenofázemi rostlin. Z toho důvodu byl vytvořen produkt s hodnotami  $\chi^2$  s odmaskovanými půdními parcelami z Veřejného registru půdy (LPIS), aby vynikly změny způsobené tornádem v zástavbě a lesních porostech (obr. 38). Je vidět, že k poměrně velkým změnám v odrazivosti došlo i ve Velkých Bílovicích. Ty jsou patrně způsobeny rozlehlými zahradami, které jsou často tvořeny vinohrady, ale nejsou evidovány ve Veřejném registru půdy. Jako nejvhodnější se jeví pro analýzu dráhy a škod po tornádu mapový výstup analyzující

metodou IR-MAD snímky mezi 21. 6. 2021 a 29. 6. 2021, který zároveň z časového hlediska nejlépe pokrývá období těsně před tornádem a po tornádu (obr. 39).



Obr. 39 Analýza změn u snímků družice Sentinel-2 z 21. 6. a 29. 6. 2021. Zdroj dat: Copernicus Open Access Hub, mapový podklad: ZM 200, ČÚZK, zpracování: Jan Svoboda (PřF UK).

Metoda IR-MAD má potenciál jako doplňková metoda při posuzování škod nejen po tornádu, ale i po jiných nebezpečných hydrometeorologických jevech (např. povodně, větrné bouře, silná krupobití, laviny apod.). Její využití však naráží na celkové pokrytí oblohy oblačností v době pořízení družicového snímku, která je značně limitujícím faktorem při jejím použití.

## 6. Shrnutí

Dne 24. června 2021 se v čase 19:14 až 19:53 SELČ vyskytlo na Břeclavsku a Hodonínsku v rámci výrazné supercely **velmi silné tornádo kategorie F4**. Svou intenzitou a dobou trvání se tornádo na jihu Moravy zařadilo mezi nebezpečné meteorologické jevy, které se v rámci Evropy vyskytují jen velmi vzácně. Tornádo si vyžádalo šest lidských životů, stovky zraněných a způsobilo značné škody v katastru deseti obcí, z čehož nejčetnější a nejrozsáhlejší škody v zastavěném území byly v obcích Hrušky,

Moravská Nová Ves, Mikulčice, Lužice a Hodonín, kde bylo následně v důsledku poškození statiky určeno kolem 200 domů k demolici. Předběžný odhad celkových škod byl vyčíslen na 15 miliard korun.

Na základě dat z leteckých a pozemních průzkumů byla zmapována dráha tornáda o délce 27,1 km a šířce od 250 m do 2,1 km. Přesnější časové vymezení existence tornáda bylo určeno z časů pořízení dostupných fotografií a videí. Podle nové metodiky Mezinárodní Fujitovy stupnice (IFS) pro hodnocení škod po tornádu byla stanovena na několika místech intenzita tornáda stupně F4, což odpovídá rychlosti větru cca  $380 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  s odchylkou cca  $\pm 110 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Vzhledem k obrovskému množství shromážděných dat, která je třeba objektivně posoudit, bude pokračovat podrobné hodnocení škod i v následujících měsících s cílem zmapování změn intenzity tornáda v prostoru. Týmy pozemních průzkumů se při hodnocení škod soustředily zejména na poničené domy v nejvíce poškozených částech obcí, protože metodika hodnocení síly tornáda poškozením budov je popsána velmi detailně. Zjištěna byla významná poškození železobetonových budov a těžká poškození zděných budov, což jsou znaky odpovídající kategorii tornáda F4, jak je uvedeno v popisu podle Fujitovy stupnice (u IFS se navíc určuje např. mocnost zdí budov). V prostoru mezi obcemi byly např. poházeny automobily a některé stromy výrazně zbaveny kůry. K mapování byly využity, kromě leteckých průzkumů, i snímky z družice Sentinel-2, jejichž zpracováním lze nejen identifikovat stopu tornáda z vesmíru, ale díky změnám následně pořízených snímků bylo možné využít potenciál metody IR-MAD k odhalování škod v krajině.

Výjimečné parametry tornáda si vyžádaly velmi podrobnou analýzu pro lepší poznání tohoto nebezpečného jevu, který je neodlučitelně spjat s výraznými konvektivními bouřemi. Analýza operativně dostupných i zpětně získaných dat, již je věnována většina kapitol souhrnné zprávy, umožňuje co nejpodrobnější popis atmosféry a poznání procesů, které se odehrály na území severního Rakouska, jižní a jihovýchodní Moravy a západního Slovenska. Rovněž byla rozvinuta debata, zda a jak lépe cílit předpovědní výstražné zprávy na extrémní bouřkové jevy, případně zda je možné varovat před výskytem tornáda. Kromě schopnosti efektivně předpovídat počasí s nebezpečnými jevy, je třeba zabývat se i opatřeními, která mohou dopady extrémních projevů počasí zmírnit a zabránit potenciálním obětem na životech, a to i vzhledem k tomu, že tornáda slabší intenzity se na našem území občas vyskytují (průměrně jde o jednotky tornád ročně). Mnohem častěji se však nad Českou republikou vyskytují výrazné supercely, které sice silná tornáda mohou, ale nemusí vytvořit, ale často je doprovázejí jiné nebezpečné jevy. Konvektivní bouře u nás i jinde ve střední Evropě 24. a 25. 6. 2021 byly provázeny nejen tornády, ale také dalšími výraznými nebezpečnými jevy, například extrémně velkými kroupami (na Moravě až 7 cm).

Jednotlivé kapitoly v této zprávě se problematikou výskytu tornáda zabývají zvlášť. V odstavcích níže jsou informace propojeny v časové posloupnosti a tematické návaznosti.

Pro vznik konvektivních bouří musí být splněny tři základní podmínky. Dostatečné množství **vlhkosti** při zemi a ve spodních několika stech metrech atmosféry, výrazný vertikální **teplotní gradient** ve střední troposféře (2–6 km) a **spouštěcí mechanismus**, který umožní výstup částic vzduchu do střední troposféry. Všechny tyto podmínky byly ve zkoumaném území dne 24. 6. 2021 splněny, navíc

v kombinaci s dostatečně silným **vertikálním stříhem větru**, který obecně umocňuje potenciál výskytu doprovodných nebezpečných jevů a zde napomohl i ke vzniku tornáda na jihu Moravy.

Výrazné konvektivní bouře se 24. 6. 2021 vytvářely v místech sbíhavého proudění vzduchu (čáry konvergence figurující jako základní iniciace konvekce) v souvislosti se zvlněnou studenou frontou nad střední Evropou. Díky přítomnosti velmi teplé a vlhké vzduchové hmoty byly splněny podmínky vzniku silných bouřek. Mimořádně vysoká byla teplota rosného bodu, změřená meteorologickými stanicemi (až 23 °C).

Zásadní pro lepší poznání stavu atmosféry jsou informace z vertikálních profilů teploty a vlhkosti atmosféry a směru a rychlosti proudění. Kvůli velké vzdálenosti mezi oblastí zasaženou tornádem a měřeními z balonových sondáží z Prostějova a Vídně ale nelze při tak složité a dynamické situaci, jaká byla v průběhu 24. 6. 2021, přisuzovat sondážím dobrou reprezentativní hodnotu, a to důvodu možné velké časové a prostorové změny jednotlivých parametrů atmosféry. Přesto již sondážním měřením v 14:00 SELČ byly potvrzeny velmi vysoké hodnoty energie instability (CAPE) a vhodné podmínky proudění s výrazným vertikálním stříhem větru pro silnou konvektivní činnost. Vytvořením dodatečných vertikálních profilů atmosféry pro posuzované území (reanalýzy z modelových dat) bylo možné při analýze **upřesnit představu** časového vývoje a prostorového rozložení veličin určujících možnost vzniku silných bouřek a potenciál vzniku tornáda. Detailně sledovanými parametry byly CAPE (v různých srovnávaných variantách), vertikální stříh větru 0–6 km a podmínky ve vrstvě spodního 1 km atmosféry, vyjádřené vertikálním stříhem větru a relativní helicitou bouře. Modelová data ukázala, že všechny parametry se během odpoledne až do večera 24. 6. 2021 zvyšovaly, a to ve všech sledovaných numerických předpovědních modelech počasí (NWP modely – ALAD, ICON-EU, GFS, ECMWF, WRF). Prostorově se hodnoty zvyšovaly obecně od západu k východu, maximálních hodnot dosahovaly většinou na Slovensku (např. MUCAPE často nad 5000 J·kg<sup>-1</sup> – nejvyšší hodnota energie zjištěná v profilu), případně na východě Moravy. Vertikální stříh větru 0–6 km se od západu k východu naopak snižoval, hodnoty nad 25 m·s<sup>-1</sup> se objevovaly spíše v Rakousku, na jižní Moravě se hodnoty zvyšovaly i na 30 m·s<sup>-1</sup> v pozdějších večerních a nočních hodinách v souvislosti s další konvektivní činností. Oblast kolem Břeclavi vykazovala také vysoké hodnoty parametrů vhodné pro silnou konvekci, ovšem podle některých NWP modelů byly oproti širšímu okolí nižší. Parametry vhodné pro tornadogenezi byly obecně příhodnější až ve večerních hodinách, jejich hodnoty však byly velmi prostorově proměnlivé a předpověď **potenciálu silného tornáda** tak byla nejednoznačná. Pravděpodobnost vzniku silného tornáda sice byla nízká, ale nebyla nulová. Současný stav vědeckého poznání nám doposud neumožňuje předpovědět jeho jednoznačnou lokalizaci a čas výskytu tornáda (v nejlepším případě pouze jejich pravděpodobnosti). Ve Spojených státech amerických je výskyt tornád velmi častý, a proto je pravděpodobnost jejich výskytu součástí předpovědí. Platí to ale pro výskyt sérií tornád, kdy se na území několika států během pár dní může vyskytnout několik desítek až stovek tornád. Takové situace jsou dobře předpověditelné. Jednotlivé bouře se pak sledují na husté síti radarů NEXRAD, lokální pracoviště k potenciálně nebezpečným bouřím vysílá dobrovolné pozorovatele a v případě možnosti i detailní mobilní radary, které mohou odhalit rotaci uvnitř bouře.



Předpovědi význačného počasí obsažené v dlouhodobých celostátních i regionálních předpovědích (na základě předpovědních dat z NWP modelů) proto nejprve s předstihem několika dnů obecně informovaly o možném nebezpečí při „intenzivních bouřkách“. Postupně předpovědi a zejména výstražné informace dostávaly konkrétnější podobu při aktualizacích. Při zpětném pohledu na předpovědní hodnoty sledovaných parametrů lze zjistit, že v předstihu více dnů před 24. 6. 2021 se potenciální energie pro konvekci v mnoha výstupech jevila jako nedostatečná pro tak extrémní projevy, jaké se ve skutečnosti vyskytly. Až při aktualizaci NWP modelů dne 24. 6. byl potvrzen vysoký potenciál pro silné konvektivní bouře. Na tato zjištění reagovaly i produkty Systému integrované výstražné služby zvyšováním stupně nebezpečí ve výstražných zprávách vydaných na bouřkové jevy. Nejaktuálnější předpovědní výstraha na „Velmi silné bouřky“ z poledne 24. 6. zdůrazňovala pro většinu území České republiky **kroupy větších rozměrů, vedle přívalových srážek a maximálních rychlostí větru kolem 90 km·h<sup>-1</sup>**. Úspěšnost vydaných výstrah, posuzovaná podle naplnění daných kritérií pro jednotlivé jevy, byla vyhodnocena pro ORP Břeclav a Hodonín jako částečně úspěšná – s celkovým podhodnocením intenzity jevů o 1 kategorii (zejména z pohledu velikosti krup, **samostatné tornádo v kritériích SIVS nefiguruje a použitému hodnocení maximální rychlosti větru se vymyká**). Mimo Českou republiku byly vydány výstrahy před nebezpečnými bouřkami také národními meteorologickými službami sousedních států (Slovensko – SHMÚ, Rakousko – ZAMG, Polsko – IMGW). Také výstrahy sousedních států navazujících na oblast jižní Moravy byly vydány na stejný stupeň (vysoký stupeň nebezpečí) jako výstraha v ČR. Předpověď speciálně zaměřená na pravděpodobnost výskytu intenzivních bouřek nad Evropou, kterou vydává tým ESTOFEX, má ve svých podmínkách zakomponován i potenciál výskytu tornáda. Na základě výpočtů byl největší předpoklad jeho vzniku pro 24. 6. 2021 uveden v textovém upřesnění nad Slovenskem.

Zpracováním a kombinacemi jednotlivých spektrálních kanálů z meteorologických družic lze sledovat různé vlastnosti oblačnosti, které mohou vypovídat o charakteru doprovodných jevů bouře skrytých pod oblačností. Existuje celá řada jevů vyskytujících se nad konvektivními bouřkami, které mohou indikovat možnou nebezpečnost dané bouře. Pro supercely jsou typická především tzv. studená-U v tepelných kanálech, nebo tzv. přestřelující vrcholy, vznikající nad silnými vzestupnými proudy. U tornadické supercely se vyskytl dle odhadů 2,5 až 3 km vysoký přestřelující vrchol. Vzhledem k absenci ostatních družicových příznaků nemohla být tato konvektivní bouře označena jako nejnebezpečnější. Nejvýraznější bouře z pohledu družicových snímků se během odpoledne až večera 24. 6. 2021 objevovaly na západě Moravy a v Polsku.

Pro sledování vývoje konvektivních bouří jsou velmi důležitá data z meteorologických radarů. Meteorologické radary jsou schopny identifikovat jednotlivé konvektivní bouře, sledovat jejich pohyb a v určité omezené míře umožňují i předpovídat jejich budoucí pohyb. Z radarových dat je též možné usuzovat na některé charakteristiky bouří, jako je intenzita srážek, nebo pravděpodobnost výskytu krup a odhad jejich maximálních velikostí. Hákovité echo a oblast snížené radarové odrazivosti BWER naznačují přítomnost supercely. Ta může být potvrzena na základě detekce rotace mezocyklony v datech radiálních rychlostí. **S ohledem na fyzikální omezení daná principem radarových měření**

**však není možné radarem přímo detekovat tornádo** ani další jevy na zemském povrchu nebo v jeho blízkosti. Na základě zesílené a zúžené rotace identifikované v datech radiálních rychlostí na nízkých elevacích operativních meteorologických radarů optimalizovaných pro detekci silných bouří je odhadován možný výskyt tornáda v radarové síti v USA. I tento odhad je však zatížen značnou chybou.

Dalším významným problémem je rušení radarových měření zařízeními pracujícími na stejné frekvenci (zařízení RLAN/WIFI využívané poskytovateli bezdrátového internetu). Toto rušení je z radarových dat filtrováno, ovšem za cenu částečného znehodnocení dat, které sice není příliš viditelné při běžném prohlížení dat, ale projeví se při detailní analýze konkrétní bouře, popř. při aplikování specializovaných detekčních algoritmů.

Společně s radarovými daty jsou pro dokreslení nebezpečnosti konvektivních bouří většinou využívána i data detekce blesků. Pro sledování konvektivních bouří a vyhodnocení jejich nebezpečnosti je užitečný nowcastingový systém CELLTRACK, který umožňuje automatizovaně sledovat vývoj jednotlivých konvektivních bouří a přehledně zobrazovat vývoj vybraných radarových a bleskových parametrů v oblasti bouře. Systém CELLTRACK je provozně testován na předpovědních pracovištích ČHMÚ.

Z pohledu radarových dat i dat detekce blesků šlo v případě tornadické bouře sice o silnou bouři, na které bylo možné očekávat nebezpečné projevy počasí (intenzivní srážky, velké kroupy, nárazy větru), nejednalo se však o výrazně nejsilnější bouři, která se v dané době v oblasti Česka a severního Rakouska vyskytla. I po potvrzení, že se jedná o supercelu nebylo z dat zřejmé, že by se na ní mělo vyvinout tak ničivé tornádo.

Výstupy z měření a pozorování distančními metodami ovšem nejspolehlivěji potvrzují či upřesňují přízemní měření a pozorování ze sítě meteorologických stanic. V rámci několika konvektivních bouří přecházejících přes jižní Moravu a okolí dne 24. 6. 2021 byl naměřen srážkový úhrn v celkové sumě do 50 mm (nejvyšší úhrn na stanici Hýsly 46,6 mm), v blízkosti dráhy tornáda byl změřen nejvyšší denní úhrn srážek v Prušánkách 39,2 mm, v Hodoníně „jen“ 21,5 mm. Při zkoumání intenzity srážek v prostoru jižní Moravy a okolí bylo zjištěno maximum v souvislosti s jinou konvektivní bouří, než byla bouře tornadická – stanice Hluk změřila  $3,7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , Luhačovice, Kladná-Žilín změřila 19,0 mm za 10 minut. Z pohledu extremity srážkových projevů zůstaly tyto bouře daleko za nejvyššími dosud zaznamenanými hodnotami v databázi ČHMÚ. Automatická měření srážek mohla být částečně ovlivněna přítomností krup. Těch bylo v jednotlivých bouřích mnoho a zejména v první vlně přecházejících bouří se objevily kroupy obřích rozměrů. Podle hlášení pozorovatelů na stanicích a hlavně z informací získaných od veřejnosti jsou k dispozici četná pozorování i s podrobnou dokumentací. Kroupy o velikosti 7 cm byly pozorovány například v Hruškách, Břeclavi a Valticích, o velikosti 6 cm v Dolních Bojanovicích a Luhačovicích. Četnější a také větší kroupy byly zaznamenány v Rakousku, v Polsku hlášení uvádějí dokonce kroupy větší než 10 cm.

Větrné projevy jsou běžnou součástí každé konvektivní bouře. Intenzivní bouře mohou vytvořit intenzivní výtok studeného vzduchu, způsobující silné nárazy větru. Nárazy větru bývají často natolik lokální, že

nejvyšší hodnoty maximální rychlosti větru nejsou staniční sítí ČHMÚ zaznamenány. Maximální rychlost větru byla dne 24. 6. 2021 změřena na stanici Luhačovice, Kladná-Žilín  $24,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $88,2 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) v nočních hodinách v souvislosti s jinou než tornadickou bouří. Tornádo samotné je specifickým jevem, kdy je rychlost proudění umocněna rotací v poměrně úzkém trychtýři/válci a udržována podtlakem díky mezocyklóně mateřské supercely. Rychlost větru v tornádu lze určovat pouze nepřímo podle intenzity napáchaných škod.

## 6.1. Klimatologické souvislosti

V souvislosti s výskytem extrémních meteorologických jevů, zejména těch, které působí velké materiální škody i ztráty na životech, si klademe řadu otázek: Bude se extrémní počasí vyskytovat častěji? Souvisí tyto extrémy s probíhající klimatickou změnou? Můžeme se před projevy extrémního počasí chránit, dají se omezit jejich dopady? Tyto a další otázky se objevily ve sdělovacích prostředcích také po výskytu tornáda na jižní Moravě.

Odpovědi na tyto otázky v souvislosti s výskytem tornáda jsou spíše neurčité. Klimatologie při hodnocení klimatických jevů posuzuje hlavně to, zda dochází ke změně intenzity jevu nebo frekvence jeho výskytu. K takovému posouzení je potřeba mít k dispozici homogenní časovou řadu pozorování, což u tornád, vzhledem k jejich lokálnímu charakteru a spíše nahodilému výskytu a pozorování, nelze zajistit.

Řada pozorování pro Českou republiku, která je dostupná na webovém portálu [www.tornada-cz.cz](http://www.tornada-cz.cz), je sice velmi cenná, ale nelze ji zpracovat s využitím standardních klimatologických postupů. V záznamech jsou evidována tornáda, která byla pozorována zejména v osídlených oblastech, chybí však záznamy o případném výskytu tornád v neobydlených lokalitách. Vyšší počet zaznamenaných tromb nebo i tornád v posledním období cca od poloviny 90. let minulého století pravděpodobně souvisí také s větší informovaností veřejnosti a výrazně lepšími možnostmi jev zaznamenat a zdokumentovat.

V posledním období vznikají studie zabývající se zkoumáním vlivu měnícího se klimatu na vznik, výskyt, průběh nebo intenzitu jednotlivých extrémních jevů, jako jsou přívalové srážky, horké vlny, tropické cyklóny i mimotropické bouře a další. Nejspolehlivější výsledky uvádějí tyto tzv. atribuční studie pro tropické cyklóny. Pokud jde o tornáda, tak nejnovější hodnotící zpráva IPCC (Ranasinge 2021) uvádí nejednoznačné, regionálně i časově různé výsledky o vyšších nebo nižších počtech zaznamenaných tornád v posledních desetiletích. Pro Evropu uvádí, že nejsou pozorovány žádné změny četnosti výskytu tornád s odkazem na práci z roku 2014 (Groenemeijer a Kühne 2014).

Na otázku, zda se bude takto extrémní jev na našem území vyskytovat častěji, je tedy velmi obtížné odpovědět. Z výskytu jednoho, byť velmi extrémního jevu, nelze odvodit, zda a s jakou frekvencí může k jeho výskytu v budoucnosti opakovaně docházet. Přestože s probíhající klimatickou změnou lze

očekávat vyšší výskyt extrémních klimatických jevů, je velmi obtížné kvantifikovat vliv klimatické změny na vzácné, krátkodobé jevy lokálního charakteru (Seneviratne, S. I. et al. 2012).

Existují cenné studie, které se nezaměřují přímo na výskyty tornád, ale na jednotlivé „přísady“ nutné pro tvorbu konvektivních bouří. Studie Púčika et al. (2017) na základě klimatických modelů EUROCORDEX předpokládá do budoucna nárůst množství vodní páry ve spodní troposféře, což se projeví rostoucím počtem situací s labilním zvrstvením atmosféry. Ve střední Evropě se tak v oteplující se atmosféře zřejmě zvýší frekvence situací se silným vertikálním stříhem větru a výraznou labilitou, tedy možnost tvorby organizovaných, intenzivních bouřek. Navazující studie Rädler et al. (2019) za použití statistických modelů poukázala na vyšší frekvenci silných krupobití a intenzivních nárazů větru spojených se silnou konvekcí v Evropě, zejména u emisního scénáře RCP8,5. Na statisticky významný rostoucí trend množství vodní páry ve spodní troposféře a s tím i nárůst CAPE za poslední desetiletí, poukázali na základě reanalýzy ERA-5 Taszarek et al. (2021), i když při statisticky nevýznamném poklesu vertikálního stříhu větru. Z těchto studií vyplývá, že počet příležitostí k nebezpečným jevům silných konvektivních bouří se bude pravděpodobně zvyšovat i v prostoru Evropy, ovšem specifitější podmínky vzniku tornád v těchto souvislostech zatím studovány nebyly.

## 7. Návrhy opatření

### 7.1. Zlepšování předpovědní a výstražné služby

Možnosti předpovídání konkrétních nebezpečných konvektivních jevů pro menší oblasti v předstihu desítek minut až hodin se přesouvají od výsledků numerických předpovědních modelů ke sledování aktuálních projevů počasí, tj. sledování aktuálních dat a informací. Efektivnější využití radarových produktů má potenciál ke zlepšení informovanosti veřejnosti a rychlejšímu vydávání výstražných zpráv před výraznými bouřemi. Velmi nápomocné až nezbytné jsou doplňující informace z terénu v kombinaci s dobrými znalostmi problematiky konvektivních jevů.

Další potenciál na zlepšení předpovědní služby je v toku informací (zejména výstrah) směrem k integrovanému záchrannému systému (IZS) a k veřejnosti, jejich srozumitelnosti a využitelnosti. ČHMÚ vydává výstražné informace ve strojově čitelném formátu CAP (Common Alerting Protocol), což je ve světě standardizovaný formát předávání dat. Ne všechen potenciál tohoto nového systému je však plně využit.

Ke zlepšení může přispět i intenzivnější výměna dat, zkušeností a analýz případových studií nebezpečných jevů v příhraničních oblastech mezi meteorologickými službami sousedních států. Příhraniční výměna podrobných dat z automatických meteorologických stanic se pro tento účel odlaďuje

pod záštitou WMO. Aktuálně výměna dat z příhraničních oblastí funguje s německou (DWD) a polskou (IMGW) národní meteorologickou službou, zatím ale pouze v hodinovém kroku. Oboustranná výměna podrobných meteorologických dat se Slovenskem a Rakouskem bude předmětem následujících jednání.

ČHMÚ připravuje konkrétní úpravy systému předpovědní služby, které budou připraveny před příští letní bouřkovou sezónou, a to včetně využívání informací z terénu.

## 7.2. Vzdělávání a osvěta

Počasí ve střední Evropě je velmi proměnlivé. Nebezpečné povětrnostní situace, které se opakují častěji, formují naše běžné chování. Například při výskytu ledovky počítáme s kluzkým povrchem. Naopak malá četnost nebo výjimečný výskyt některých extrémních projevů počasí, jako jsou například tornáda, způsobuje nepřipravenost na jejich projevy a důsledky. Chybí znalost správného chování a jednání při výskytu těchto povětrnostních jevů, se kterými se můžeme setkat třeba jen jednou za život. Meteorologickým jevům nelze zabránit, lze ale částečně zmírnit jejich dopady tím, že o nich budeme vědět co nejvíce. Vzdělávání a poučení veřejnosti, jak se chovat při výskytu nebezpečných povětrnostních jevů, je jednou z klíčových oblastí, neboť např. nebezpečné projevy bouří mají velmi rychlý dynamický vývoj, a proto je třeba jednat v zájmu ochrany zdraví přímo v místě výskytu nebezpečného jevu.

Z tornádem zasažených oblastí dne 24. 6. 2021 je k dispozici velké množství fotografií a videí, které jsou dokumentačně velmi cenné. Jejich autoři se však patrně nevědomky vystavovali nebezpečí vážných zranění a byl ohrožen i jejich život. Níže proto uvádíme doporučení, jak se chovat a chránit při výskytu tornáda.

### 7.2.1. Jak se chovat při tornádu

Tornádo je málo častým a prostorově a časově velmi omezeným meteorologickým jevem. Může se vyskytnout pouze v souvislosti se silnými konvektivními bouřemi. Proto ve chvíli, kdy jsou očekávány vhodné podmínky pro výskyt velmi silných nebo extrémně silných bouřek, je třeba být ostražitější než obvykle.

Při výstraze vydané rámci bouřkových jevů je vhodné sledovat aktuální situaci, nejlépe na radarech zobrazujících vývoj a pohyb srážkového pole. Intenzita bouří je totiž přímo úměrná síle radarových odrazů, i když jednotlivé nebezpečné jevy mohou být časově i prostorově vůči odrazům posunuty. Na meteorologických radarech, které v současné době využívají evropské národní meteorologické služby, tornádo přímo sledovat nelze. Bývá identifikováno, jakmile se jeho horní část zviditelní pod základnou oblaku, případně pozorováním poletujících trosek. Samotné tornádo bývá doprovázeno velkým hlukem.

**V případě, že se blíží tornádo** a je vám na dohled, situaci nepodceňujte, nesnažte se za každou cenu zachránit váš majetek, chraňte svůj život. Vyhledejte pro úkryt pevnou zděnou stavbu, uzavřete okna a schovejte se ve sklepě či místnosti bez oken, v přízemí budovy nebo pod schody. Není doporučeno schovávat se v nejvyšších patrech budov nebo v podkroví rodinných domů, střechy jsou konstrukčně nejslabším místem staveb.

V žádném případě neriskujte pozorováním, natáčením či jakýmkoli dokumentováním průběhu tornáda. Nikam nevycházejte, nevyjíždějte autem s cílem ujet tornádu, zůstaňte po celou dobu trvání bouře ukryti. K větší ochraně před letícími troskami nebo střepy pomohou různé příkrývky. Pokud je to možné, dejte vědět blízkým prostřednictvím SMS či hovoru, kde se nacházíte a co se děje i v případě, že jste v místě svého trvalého bydliště.

Může se stát, že **tornádo spatříte až na poslední chvíli**, jelikož bude skryto ve srážkách. V tomto případě se urychleně schovejte v místnosti bez oken, pokud je to možné. Ať už jste v jakékoli situaci (na ulici, daleko od Vašeho bydliště, řídíte automobil apod.), vyhledejte pro úkryt zděnou stavbu (hostinec, hotel apod.). Při tornádu nejste venku v bezpečí.

Jestliže **zrovna řídíte automobil** a je-li tornádo vzdáleno několik kilometrů, pokuste se vybočit z dráhy bouře a bouři s tornádem se vyhnout. Je-li tornádo blíže, neriskujte, jedte do nejbližší obce, kde se můžete ukryt v pevné zděné budově. Rozhodně nezůstávejte pod mostem nebo podjezdem, kde dochází k lokálnímu zvýšení rychlosti větru v důsledku tunelového efektu.

Není-li jiná možnost, **na ulici** se schovejte za jakoukoli pevnou zděnou konstrukci, do výklenku, případně příkopu, kde se schulte do klubička a rukama si chraňte obličej před letícími troskami a střepy. Tohle je však krajní nouze, kdy již nelze nic jiného udělat.

**Ve volné přírodě**, pokud nelze rychle najít pevný úkryt, lehněte si v níže položeném místě břichem na zem a rukama si chraňte hlavu. A to co nejdále od stromů nebo aut, které mohou být vzneseny do vzduchu. Venku hrozí od letících předmětů těžká až smrtelná zranění.

**Po odeznění nebezpečí**, pokud je to možné, zajistěte pomoc zraněným, informujte záchranné složky a vyčkejte jejich příjezdu. Jste-li ve výrazně poškozené budově, pokuste se ji opatrně opustit, sklo nebo ostré předměty v troskách vás mohou zranit. Nepoužívejte otevřený oheň, pokud se v budově nachází plyn, může hrozit nebezpečí výbuchu. Venkovní prostory budou rovněž zaplněny rozházenými troskami, mezi kterými se mohou nacházet spadlé dráty elektrického vedení pod proudem. Pokuste se zůstat v klidu až do příjezdu záchranných složek a poté dbejte jejich pokynů a instrukcí.

## 8. Závěr

Ničivé tornádo, které zasáhlo jižní Moravu 24. 6. 2021, komplikovaný vývoj konvektivních bouří, přecházejících přes rozsáhlé území ČR i okolních států, a také intenzita dalších nebezpečných jevů, spojených s těmito bouřemi, vyvolaly řadu otázek i spekulací. Mezi hlavní cíle skupiny odborníků, kteří se zapojili do přípravy této souhrnné zprávy, patřilo zejména vyhodnocení toho, co tornádu předcházelo, zda a jak bylo možné lépe reagovat a co bude nutné učinit, aby nás podobné situace příště nezaskočily nepřipravené. Dle některých studií lze očekávat, že probíhající změny klimatu povedou k nárůstu výskytu silných konvektivních bouří a s nimi spojených nebezpečných jevů, jako jsou extrémní srážky, velké kroupy a silné nárazy větru, což nemusí nutně znamenat četnější výskyt tornád.

Tornáda jsou extrémně nebezpečnými ale nahodilými projevy výrazných konvektivních bouří, které jsou každé léto součástí počasí i na území České republiky. Výskyt tornád v ČR je v řádu jednotek za rok, výskyt supercel, na něž jsou silná tornáda vázána, je na území ČR v řádu desítek za rok. Na základě dostupných informací o meteorologických podmínkách během 24. 6. 2021 nebylo možné s jistotou očekávat tornádo nejen na jižní Moravě, ani v zasažených obcích, a tak před ním varovat. **Tornáda samotná nelze předpovídat s jednoznačným určením místa a času, proto jsou výstrahy ČHMÚ zacílené na silné konvektivní bouře, které nebezpečné jevy produkují.** Vysoké hodnoty parametrů vhodných pro tvorbu konvektivních bouří očekávaných s velkým předstihem vedly k předpovědím „intenzivních bouřek“ a postupné zvyšování předpovídaných hodnot těchto klíčových parametrů vyústilo ke zvýšení stupně nebezpečí **očekávaných projevů** bouří. Předpovědní výstraha vydaná kolem poledne dne 24. 6. 2021 varovala před velmi silnými bouřkami (stupeň nebezpečí 2), zejména proto, že se nepředpokládaly extrémní projevy bouří, konkrétně obřích krup, navíc na tak velké ploše území ČR. I když na kroupy větších rozměrů bylo upozorňováno, objevily se v pásu od Rakouska přes Moravu až do Polska kroupy neočekávaně velkých rozměrů (4 až 8 cm, v Polsku přes 10 cm). Přesto nebyly podmínky pro vydání výstrahy stupně 3 předem jednoznačné a její podhodnocení na části jižní Moravy bylo zjištěno až po potvrzení pozorovaných extrémních jevů v terénu. Osamocené tornádo se vymyká kritériím SIVS, a proto je jeho zařazení do systému výstrah obtížné, a to kdekoliv na světě.

V předchozích kapitolách této zprávy jsme se pokusili nastínit možnosti zlepšení předpovědi nebezpečných jevů spojených s konvektivními bouřemi. Především se jedná o efektivnější rozpoznání a monitoring supercel a následně předpovídání jejich dráhy a vývoje díky maximálnímu využití radarových produktů. V rámci SIVS mohou být tornáda zahrnuta jako doprovodný jev některých velmi silných a extrémně silných konvektivních bouří. Z pohledu současných možností předpovědi počasí lze na základě definovaných podmínek vhodných pro tornadogenezi vyjadřovat možnost, či pravděpodobnost jejich výskytu.

Protože je tornádo velmi lokálním (desítky až stovky metrů) a velmi krátkodobým jevem (minuty až desítky minut), je obtížné a někdy nerealizovatelné na něj adekvátně reagovat. Obzvláště proto, že jeho

výskyt bývá potvrzen až prvními očitými svědky. Proto je v první řadě důležité, aby veřejnost byla seznámena s možnými důsledky střetu s tornádem a poučena o možnostech zmírnění dopadů na životy a zdraví obyvatel (zabránit škodám na majetku je velmi obtížné, ne-li nemožné). **Součástí této zprávy je také přehledný návod a doporučení, jak se chovat při tornádu.**

Tato souhrnná zpráva by měla pomoci lépe se vypořádat s obdobnými situacemi v budoucnu. K tomu byla navržena řada kroků, mezi které patří například zlepšení monitoringu a předpovídání nebezpečných jevů, vzdělávání a osvěta a také pružnější sdílení informací o aktuálním stavu počasí a výskytu nebezpečných jevů mezi ČHMÚ, záchrannými složkami a veřejností. Návrhy ke zlepšení ČHMÚ rozpracuje v následujících měsících a konkrétní změny pomohou lépe čelit extrémním projevům počasí v příštích letech.

## 9. Týmy podílející se na vyhodnocení

Na přípravě této zprávy se podíleli autoři z následujících subjektů, které jsou uvedeny v abecedním pořadí:

- Amatérská meteorologická společnost, z. s.(AMS): Lukáš Ronge, Lukáš Větršíšek.
- Amper Meteo, s.r.o.: Milan Šálek.
- Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ): Radmila Brožková, Pavel Hampl, Filip Chuchma, Barbora Kněžínková, Gražyna Knozová, Hana Kyznarová, Martin Motl, Petr Münster, Petr Novák, David Rýva, Martin Setvák, Pavla Skřivánková, Jan Sulan, Jan Šrámek, Radim Tolasz, Alena Trojáková, Radek Tomšů, Anna Valeriánová.
- European Severe Storms Laboratory (ESSL): Alois Holzer, Tomáš Púčik.
- Katedra fyzické geografie a geoekologie, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy (PřF UK): Šimon Kolář, Miloslav Staněk, Jan Svoboda.
- Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně: Petr Dvořák.
- METEOPRESS, spol. s r.o.: Erik Janeček, Miloslav Staněk.
- Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ): Miroslav Šinger.
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG): Rainer Kaltenberger.

Za odbornou recenzi této zprávy děkuje kolektiv autorů Petru Zacharovovi z Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd ČR a Liborovi Černikovskému z ČHMÚ.

Za úvodní snímek tornáda děkujeme panu Dominiku Herkovi. Snímek byl pořízen ze západního okraje Hodonína směrem na Lužice dne 24. 6. 2021 v 19:36 SELČ.



## 10. Seznam použité literatury a zdrojů

BLUMBERG, W., HALBERT, K., SUPINIE, T., MARSH, P., THOMPSON, R., HART, J., 2017. SHARPPy: An Open Source Sounding Analysis Toolkit for the Atmospheric Sciences. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. **98**, s.1625–1636. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00309.1>.

COFFER, B. E., PARKER, M. D., 2018. Is there a “tipping point” between simulated nontornadic and tornadic supercells in VORTEX2 environments? *Mon. Weather Rev.*, Vol. **146**, s. 2667–2693.

CRAVEN, J. P., BROOKS, H. E., 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Natl. Weather Dig.*, Vol. **28**, s. 13–24.

DAVIES-JONES, R., 1984. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. *J. Atmos. Sci.*, Vol. **41**, s. 2991–3006.

GROENEMEIJER, P., KÜHNE, T. 2014. A Climatology of Tornadoes in Europe: Results from the European Severe Weather Database. *Monthly Weather Review*, Vol. **142**(12), s. 4775–4790, doi:10.1175/mwr-d-14-00107.1.

JOHNS, R. H., DOSWELL, C. A., 1992. III. Severe local storms forecasting. *Weather Forecast.*, Vol. **7**, s. 588–612.

KYZNAROVÁ, H., NOVÁK, P., 2009. CELLTRACK – Convective cell cracking algorithm and its use for deriving life cycle characteristics. *Atmospheric Research*, Vol. **93**, s. 317–327. ISSN 0169-8095.

MARKOWSKI, P. M., RICHARDSON, Y. P., 2011. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes (Vol. 2). New Jersey: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-74213-6.

MARKOWSKI, P. M., RICHARDSON, Y. P., 2014. The influence of environmental low-level shear and cold pools on tornadogenesis: Insights from idealized simulations. *J. Atmos. Sci.*, Vol. **71**, s. 243–275.

NIELSEN, A. A., 2007. The Regularized Iteratively Reweighted MAD Method for Change Detection in Multi- and Hyperspectral Data. *Ieee Transactions on Image Processing*, Vol. **16**, s. 463–478.

NOVÁK, P., 2007. The Czech Hydrometeorological Institute’s Severe Storm Nowcasting System. *Atmospheric Research*, Vol. **83**, s. 450–457. ISSN 0169-8095.

NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H. 2016a. Obnova meteorologické radarové sítě CZRAD v roce 2015. *Meteorologické zprávy*, Vol. **69**, s. 17–24. ISSN 0026-1173.

NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H. 2016b. MERGE2 – modernizovaný systém kvantitativních odhadů srážek provozovaný v Českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, Vol. **69**, s. 137–144. ISSN 0026-1173.

NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H. 2020. Dlouhodobé charakteristiky konvektivních bouří z pohledu radarových dat a dat detekce blesků. *Meteorologické zprávy*, Vol. **73**, s. 65–77. ISSN 0026-1173.

PÚČÍK, T., GROENEMEIJER, P., RÄDLER, A. T., TIJSSSEN, L., NIKULIN, G., PREIN, A. F., VAN MEIJGAARD, E., FEALY, R., JACOB, D., TEICHMANN, C., 2017. Future changes in European severe convection environments in a regional climate model ensemble. *Journal of Climate*, Vol. **30**(17), s. 6771–6794. DOI: doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0777.1

PÚČÍK, T., GROENEMEIJER, P., RÝVA, D., KOLÁŘ, M., 2015. Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in central Europe. *Mon. Weather Rev.*, Vol. **143**, s. 4805–4821.

RÄDLER, A. T., GROENEMEIJER, P. H., FAUST, E., SAUSEN, R., PÚČÍK, T., 2019. Frequency of severe thunderstorms across Europe expected to increase in the 21<sup>st</sup> century due to rising instability. *npj Climate and Atmospheric Science*, Vol. **2**(1), s.1–5. DOI: doi.org/10.1038/s41612-019-0083-7.

RANASINGHE, R., et al., 2021. Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., et al, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]*. Cambridge: Cambridge University Press. In Press.

SENEVIRATNE, S. I. et al., 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C. B., V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. - K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, and P. M. Midgley (eds.)]*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, s. 109–230.

SETVÁK, M., NOVÁK, P., ŠÁLEK, M., 2004. Tornáda 31. května 2001 na území České republiky. *Meteorologické zprávy*, roč. **57**, č. 4, s. 101–112. ISSN 0026-1173.

TASZAREK, M., ALLEN, J. T., BROOKS, H. E., PILGUJ, N., CZERNECKI, B., 2021. Differing trends in United States and European severe thunderstorm environments in a warming climate. *Bulletin of the American Meteorological society*, Vol. **102**(2), s. E296–E322. DOI: doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0004.1.

TASZAREK, M., ALLEN, J. T., PÚČÍK, T., HOOGEWIND, K. A., BROOKS, H. E., 2020. Severe Convective Storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 Environments Associated with

Lightning, Large Hail, Severe Wind, and Tornadoes. *Journal of Climate*, Vol. **33**, Issue 23, s. 10263–10286. DOI: doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0346.1.

THOMPSON, R. L., EDWARDS, R., HART, J. A., ELMORE, K. L., MARKOWSKI, P., 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle. *Weather Forecast.*, Vol. **18**, s. 1243–1261.

United Nations Office for Disaster Reduction, 2009. UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction. Geneva, May 2009. Dostupné z WWW: <http://www.unisdr.org/we/inform/terminology>. „Disaster risk management is the application of disaster risk reduction policies and strategies to prevent new disaster risk, reduce existing disaster risk and manage residual risk, contributing to the strengthening of resilience and reduction of disaster losses.“

WEISMAN, M. L., KLEMP, J. B., 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Weather Rev.*, Vol. **110**, s. 504–520.

#### **ONLINE zdroje informací:**

Jak se chovat při tornádu: [www.spc.noaa.gov/faq/tornado/safety.html](http://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/safety.html)

Odpovědi ČHMÚ na nejčastější dotazy k tornádu: [youtu.be/m7rv7W5IWRs](https://youtu.be/m7rv7W5IWRs)

Záznam prezentace o vzniku tornáda: [www.facebook.com/greenpeace.cz/videos/1230305957411386](https://www.facebook.com/greenpeace.cz/videos/1230305957411386)

Shrnutí o tornadogenezi v AJ: <https://sites.psu.edu/pmarkowski/how-tornadoes-form/>.

Hodnocení škod způsobených tornády a větrem: [https://www.essl.org/media/publications/IF-scale\\_v0.10.pdf](https://www.essl.org/media/publications/IF-scale_v0.10.pdf)

Elektronický meteorologický slovník: <http://slovník.cmes.cz>

ESTOFEX (European Storm Forecast Experiment): <https://www.estofex.org>

EUMETNET Meteoalarm: [www.meteoalarm.org/en/](http://www.meteoalarm.org/en/)