

HLAVNÍ ČLÁNKY

Podmínky vzniku a vývoje větrných bouří typu derecho ve střední Evropě

MILOSLAV STANĚK^{1,2}

¹ Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Praha, Česko (Charles University, Faculty of Science, Department of Physical Geography and Geoecology, Praha, Czechia); e-mail: miloslav.stanek@natur.cuni.cz

² Akademie věd ČR, v.v.i., Ústav fyziky atmosféry, oddělení meteorologie, Praha, Česko (The Czech Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Department of Meteorology, Praha, Czechia)

ABSTRACT **Conditions for the formation and development of Derecho windstorms in Central Europe** – This article focuses on the convective conditions that lead to the formation of weak-forcing derechos in Central Europe. The study analyzes 1,453 proximity soundings or model soundings derived from the ERA5 reanalysis, corresponding to 48 weak-forcing derechos between 2000 and 2023. Key characteristics of the convective environment along the derecho paths were calculated, and their relationships were examined, with a focus on the intensity and life cycle stages of derechos. Using the Mann-Whitney U test, the study evaluated how various environmental factors vary between the intensities of derechos and across stages in their life cycle. Key findings include that derechos in Central Europe form in environments with lower CAPE than in the USA, but higher deep-layer vertical wind shear compensates for this. Derechos typically move from wetter, near-frontal-boundary environments to drier areas and dissipate due to weak vertical temperature gradients at low levels. It was found that precipitable water is crucial for predicting the intensity of derechos and remains largely unchanged during their life cycle. Other findings highlight the role of elevated convection in derecho dissipation and show that vertical wind shear and helicity do not significantly affect the intensity of derechos. Spatially, derechos often develop at the northern base of the Alps and dissipate over the Czech Highlands or Slovakia.

KEY WORDS derecho – squall line – convective storm – CAPE – vertical wind shear

STANĚK, M. (2025): Podmínky vzniku a vývoje větrných bouří typu derecho ve střední Evropě. Informace ČGS, 44, 1, 1-19.

1. Úvod

Konvektivní bouře se mohou projevovat silným nárazovitým větrem, který se může vyskytnout jak na relativně malém území a zasáhnout území o rozloze několika jednotek až desítek km², tak se může silný vítr projevit i na větším území čítající desítky až stovky tisíc km². Takto rozsáhlé větrné bouře se označují jako derecha a patří z hlediska škod a velikosti zasaženého území k meteorologickým událostem, které mají velký dopad nejen na některé složky fyzickogeografické sféry, ale také kvůli svým ničivým účinkům na socioekonomickou sféru. Derecho je rozsáhlá větrná bouře, která se projevuje silným větrem s nárazy o rychlosti nad 25 m·s⁻¹ na dráze delší než 400 km s výskytem několika nárazů větru alespoň 33 m·s⁻¹ nebo škodami odpovídajícími tornádu o síle alespoň F1 (Rýva 2016).

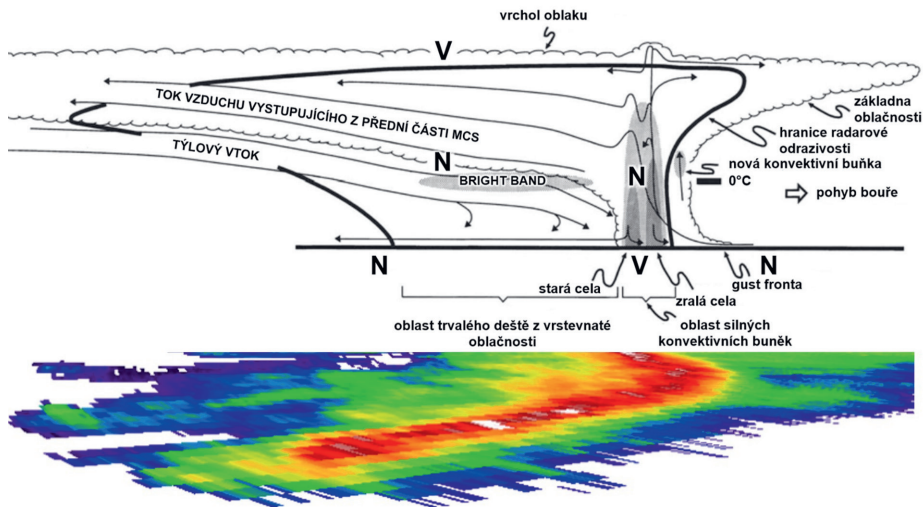
Ačkoliv ve Spojených státech amerických je tomuto tématu věnována značná pozornost, v Evropě jsou derecha zkoumána spíše okrajově. V minulých letech však i v Evropě vzniklo několik publikací – např. článek Feryho a Farandy (2024), kteří se věnují derechům ve Francii, nebo lze zmínit práci Gatzena a kol. (2020) zabývající se obecněji i podmínkami vzniku derech v Německu prostřednictvím několika desítek radiosondážních měření. Další práce, které se zabývají podmínkami při vývoji konvektivních bouří, zkoumají silný vítr pouze obecně bez ohledu na rozsah zasaženého území. Nejen kvůli tomu, že výzkumu podmínek vzniku a vývoje větrných bouří typu derecho na území střední Evropy není věnována dostatečná pozornost, ale i kvůli ničivému potenciálu těchto bouří, je naprosto relevantní zkoumat jejich příčinné podmínky. Právě výzkum těchto příčinných podmínek jakožto prekurzorů konvekce, které meteorologové operativně používají při předpovědích, může pomoci zlepšit a zpřesnit vydávání výstražných informací důležitých nejen obecně pro obyvatelstvo, ale také pro záchranné složky.

Derecha se vyskytují jak přímo vázaná na pohyb studené fronty (tzv. *strong-forcing derecha*), tak nevázaná bezprostředně na její pohyb (tzv. *weak-forcing derecha*). V případě, že je vliv studené fronty na jejich vývoj prokazatelný, ale derecho není přímo vázáno na čáru fronty, jedná se o hybridní derecho. V článku se budeme zabývat pouze derechy, která nejsou přímo vázaná na pohyb studené fronty a ve střední Evropě se vyskytují zejména v letních měsících. Derecha je možné také rozdělit podle intenzity na slabá, která nesplňují podmínku několika nárazů větru o rychlosti nad 33 m·s⁻¹, avšak doprovází je rychlosti větru v nárazu nad 25 m·s⁻¹ na dráze delší než 400 km, středně silná, kdy musí být v rámci dráhy škod přítomna minimálně 3 místa vzdálená od sebe alespoň 64 km, kde byla naměřena rychlost větru v nárazu nad 33 m·s⁻¹ nebo byly zjištěny ekvivalentní škody těmto nárazům větru. Poslední kategorií jsou velmi silná derecha, kde musí být přítomna minimálně 3 místa vzdálená od sebe alespoň 64 km, kde byla naměřena rychlost větru v nárazu nad 38 m·s⁻¹ nebo byly zjištěny ekvivalentní škody těmto nárazům větru (Coniglio, Stensrud, Richman 2004).

Termín *derecho*, který pochází ze španělštiny a v překladu znamená „přímý“ nebo „rovný“, již poprvé použil v roce 1888 meteorolog Gustavus Hinrichs ve Spojených státech amerických (Hinrichs 1888) jako protiklad vůči slovu *tornado*, vycházející ze španělského slova „*tornar*“, tedy „otočit se“. Za vznikem tohoto označení pro rozsáhlé větrné bouře stojí i historický spor profesora Hinrichse s prvním důstojníkem americké armády a meteorologem Johnem P. Finleym. Finley totiž klasifikoval škody při bouři, která zasáhla Iowu dne 31. července 1877, jako škody po tornádech, s čímž nesouhlasil Hinrichs. Hinrichs tak danou bouři popsal velmi detailně v případové studii (Hinrichs 1888), kde publikoval i mapu zasaženého území s chronologickým průběhem škod. Hinrichs zjistil, že řada z Finleyových klasifikovaných tornád ve skutečnosti tornády nejsou a že se jedná o škody způsobené silnými sestupnými proudy (dnes označovanými jako *downbursty*) a jejich šířením (Galway 1985, Johns 2007). V roce 1889 Hinrichs ztratil pozici meteorologa v Iowě a Finleyho tou dobou nahradil jiný úředník. Ačkoliv se tou dobou věnuje větrným bouřím v Evropě i Wladimir Köppen (1879, 1882, 1886, 1896) a termín *derecho* se objevuje ještě v disertační práci Johannese Letzmana v roce 1923 (Letzmann 1923), termín do konce 80. let 20. století upadl v zapomnění. Až v roce 1987 zpracovali první rozsáhlejší studii výskytu *derech* meteorologové Johns a Hirt (1987) v návaznosti na předchozí publikaci o různých škálách silného větru od Fujity a Wakimota (1981). Po roce 2000 začaly být postupně mapovány tyto větrné bouře i v Evropě. První novodobé práce, zabírající se *derechy* v Evropě, byly publikovány Gatzemem (2004) a Punkkou, Teittinenem, Johnsem (2006).

2. Silný vítr v konvektivních bouřích

Atmosférická konvekce je základním mechanismem vertikální výměny tepla a vlhkosti v troposféře a spodní stratosféře. Tento proces je charakteristický vznikem výstupných pohybů. Po určité době však dochází také k tvorbě kompenzačních sestupných pohybů doprovázených většinou srážkami. K tvorbě konvektivních bouří je zapotřebí splnění několika podmínek: instabilní teplotní zvrstvení (neboli rychlý pokles teploty vzduchu s výškou), dostatečná vlhkost vzduchu zejména při zemském povrchu a iniciační faktor, který vyzdvihne vzduchovou částici do hladiny volné konvekce (Doswell, Brooks, Maddox 1996; Trapp 2013). Na strukturu konvektivních bouří má zásadní vliv vertikální stříh větru, tj. změna směru a rychlosti větru s výškou. Zatímco jednoduchá konvektivní cela vzniká za šestikilometrového stříhu, tedy vertikálního stříhu větru ve vrstvě od zemského povrchu do 6 km výšky, do $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, multicela, sestávající z více konvektivních buněk, se vyvíjí nejčastěji za šestikilometrového stříhu větru o hodnotách mezi 10 a $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ za předpokladu, že se výrazněji nemění směr proudění s výškou.



Obr. 1 – Schematický řez *squall line* s připojenou stratiformní částí se zobrazením procesů, které v rámci *squall line* probíhají. Písmena N a V značí oblast relativně nižšího nebo vyššího tlaku vzduchu. Radarová odrazivost je zobrazena pod úhlem 10° vůči horizontu. Převzato Houze (2004). V dolní části schématu je přiložena radarová odrazivost v elevaci $0,8^\circ$ z radaru Hochficht ze dne 26. 8. 2023. Zdroj: Meteopress / Geosphere.

Pokud stříh větru přesahuje $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, mohou vznikat supercely (Markowski, Richardson 2010).

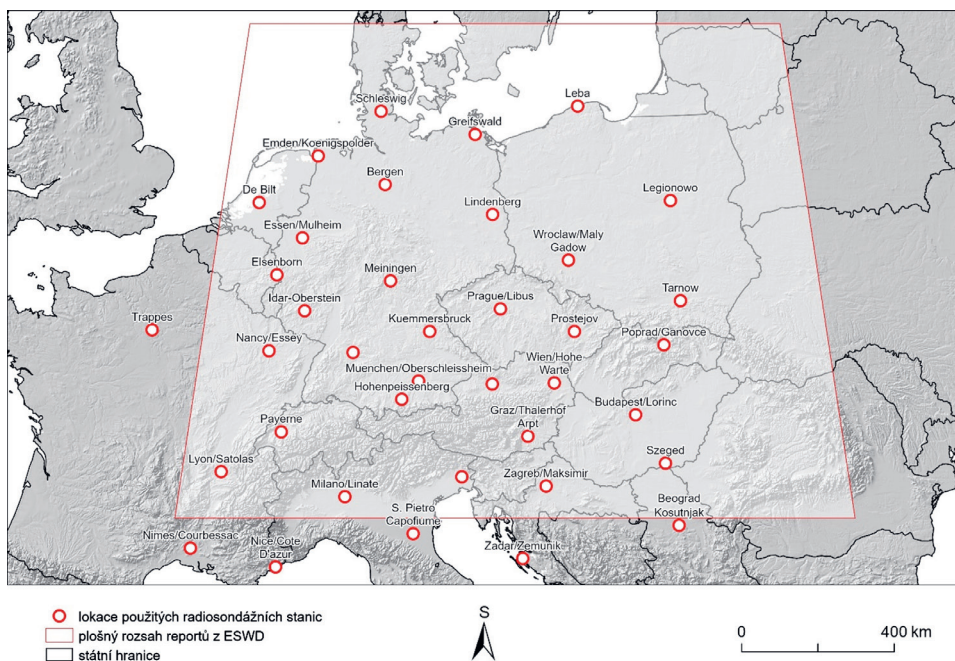
Silný vítr v konvektivních bouřích vzniká nejčastěji jako důsledek sestupného proudu rozlévajícího se při zemském povrchu okolo konvektivní bouře. Po dosednutí sestupného proudu na zemský povrch se vytváří okolo konvektivní bouře bazén studeného vzduchu (Houze 1993), který se rozlévá ve směru od bouře podél zemského povrchu. Rozhraní mezi vytékajícím studeným vzduchem z bouře a okolím se označuje jako gust fronta. Nejen v oblasti gust fronty, ale také v místě dosednutí sestupného proudu na zemský povrch dochází ke vzniku silného větru. Pokud se jedná o silný sestupný proud, označovaný jako *downburst*, mohou být nárazy větru výjimečně i ekvivalentní škodám klasifikovaných na Fujitově stupnici jako F3, tedy ekvivalentní rychlosti větru 70 až $92 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Fujita 1971).

Sílu sestupného proudu ovlivňuje několik základních procesů, jejichž příčinou jsou podmínky konvektivního prostředí v okolí bouře (Řezáčová a kol. 2007). Základními prekurzory, které vedou ke vzniku silného větru v konvektivních bouřích, jsou relativně suché prostředí při zemském povrchu, a naopak relativně vlhké prostředí ve střední troposféře a také výrazný pokles teploty v nižší troposféře (Srivastava 1985). To vede k výraznější akceleraci silného větru v rámci sestupného proudu vlivem spotřebovávání latentního tepla výparu a tání v oblasti pod základnou oblaků (Srivastava 1987; Proctor 1989; Orf, Anderson 1999).

Pokud se bazény studeného vzduchu z více bouří se spojí do jednoho, vytvoří dlouhou gust frontu. Na této gust frontě mohou vznikat bouře vedle sebe a vytvořit tak linii bouří označovanou jako *squall line*. *Squall line* svojí velikostí přesahuje velikost jednoho bouřkového oblaku a jedná se tak o celý systém bouří, označovaných jako mezoměřítkový konvektivní systém (MCS). V rámci složité vnitřní struktury *squall line* vzniká silný vítr nejen kvůli specifickému rozložení tlaku vzduchu při zemském povrchu (obr. 1; Markowski, Richardson 2010), ale také kvůli dalším procesům, jako jsou například advekce teplého vzduchu (Johnson 2001) nebo míra konvergence proudění před *squall line*, s čímž souvisí rychlost jejího pohybu (Rotunno, Klemp, Weisman 1988). V případě, že se dlouhotrvající *squall line* projevuje velmi silným větrem na velkém území, vytvoří derecho.

3. Data a metody

Zkoumané území bylo definováno prostorovou doménou, přesahující přibližně každým směrem o 200 km hranice střední Evropy, vyznačenou na obrázku 2, pro kterou byla využita data z databáze ESWD (*European Severe Weather Database*; Dotzek a kol. 2009). Okolo reportů o silném větru byla vytvořena obalová vrstva,



Obr. 2 – Použitá prostorová doména dat z ESWD s lokacemi radiosondážních stanic

kteřá přibližně definovala územní rozsah derecha. Reporty, u nichž byla časová nejistota větší než tři hodiny, byly ze vzorku reportů definující dráhu derecha vyřazeny podobně jako při studiu příčinných podmínek nebezpečných jevů v práci Taszarka a kol. (2020). Rovněž byly vyřazeny reporty, které nebyly ověřeny.

Ve druhém kroku proběhlo upřesnění dráhy derecha o studie zabírající se derechy (Púčik a kol. 2011; Celinski-Myslaw, Matuszko 2014; Rýva 2016; Rýva 2018; Gatzen a kol. 2020; Surowiecki, Taszarek 2020; Sipos a kol. 2021). Některé případy z období let 2000 až 2015, ke kterým se nepodařilo přesně dohledat dráhu derecha, byly rekonstruovány jen dle reportů o silném větru a tornádech z databáze ESWD. Dráhy novějších případů derech (od roku 2015 do roku 2023) byly rekonstruovány kromě reportů z databáze ESWD i pomocí radarových dat dostupných prostřednictvím webu Kachelmannwetter.de a dat sloučené radarové informace z radaru Skalky a Brdy Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Kromě radarových dat byla použita i data detekce blesků ze sítě Blitzortung.org, a to zejména v oblastech, kde nebylo možné radarová data dohledat – zejména Polsko, Slovensko, Maďarsko a Chorvatsko.

Posledním krokem byl výběr situací *weak-forcing* a hybridních derech, tedy derech, která nebyla přímo vázána na čáru studené fronty. *Strong-forcing* derecha vázaná na studenou frontu tak byla vyřazena. Vazba derecha na studenou frontu byla zkoumána prostřednictvím synoptických map německé povětrnostní služby Deutscher Wetterdienst (DWD) dostupných na webu Wetter3.de. Synoptické mapy byly dostupné od roku 2003, pro roky 2000–2003 pak byly využity modelové výstupy z reanalýzy ERA5 (Hersbach a kol. 2020) a analýzy modelu GFS. Výsledkem bylo 48 vybraných případů derech nevázaných bezprostředně na pohyb studené fronty na území střední Evropy.

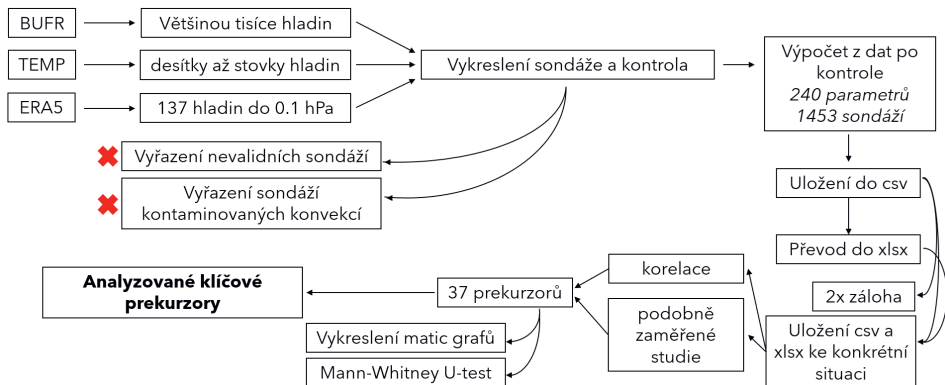
K poloze derech bylo následně třeba přiřadit lokace radiosondážních stanic (obr. 2), které byly převzaty z webu University of Wyoming. Tyto lokace rovněž byly zvalidovány a některé byly vyřazeny (Innsbruck kvůli nadmořské výšce v gridovém bodu reanalýzy ERA5 a Brno-Rebešovice kvůli tomu, že stanice měřila pouze krátce).

Pro přiřazení derecha k sondážní stanici byl zvolen rádius okolo stanice 167 km podle metodiky Evanse a Doswella (2001) a časové kritérium –2 hodiny, aby se předešlo kontaminaci počítaných veličin samotnou bouří. Ke kontaminaci veličin může dojít v případě, když je sondáž vpuštěna přímo do konvektivní bouře, kde jsou podmínky výrazně ovlivněny samotnou bouří, popřípadě v její bezprostřední blízkosti. Použita byla data ze sondážních měření a mimo tyto termíny sondážních měření byla využita modelová data z reanalýzy ERA5. Zasažené území derechem bylo rozděleno na bodovou vrstvu o rozlišení 1° s tím, že pro každý bod byl stanoven časový termín s odečtem dvou hodin a následně byla vybrána sondáž nebo pseudosondáž v místě aerologické stanice. V posledním kroku tak byly spočítány charakteristiky konvektivního prostředí (tab. 1) pomocí knihovny ThundeR v programovacím jazyce R.

Tab. 1 – Vybrané důležité počítané charakteristiky konvektivního prostředí zmiňované dále v rámci článku. V levém sloupci je uvedena zkratka, která bude dále používána v rámci článku, v prostředním sloupci je uvedeno vysvětlení v češtině a v pravém sloupci reference, ve které je uveden daný výpočet a vysvětlení veličiny.

Zkratka	Vyjádření zkratky	Reference
MU CAPE	Maximální hodnota konvektivní dostupné potenciální energie	Moncrieff, Miller (1976); Markowski, Richardson (2010)
ML CAPE	Konvektivní dostupná potenciální energie počítaná ze směšovací vrstvy 1 km	Markowski, Richardson (2010); Johns a kol. (1993)
MU LI	Maximální hodnoty Lifted indexu	Galway (1956)
ML LI	Lifted Index počítaný na základě směšovací vrstvy 1 km	Galway (1956), Johns a kol. (1993)
MU CAPE 0-3 km	MU CAPE integrovaná do výšky 3 km	Davies (2002)
MU CAPE 0-2 km	MU CAPE integrovaná do výšky 2 km	Davies (2002)
MU CIN	MU inhibice konvekce	Markowski, Richardson (2010)
$\Delta\theta_e$ 3-5 a povrch	Rozdíl adiabatické ekvivalentní potenciální teploty průměrované mezi 3 a 5 km výšky a povrchem	Bolton (1980), Romanic a kol. (2022)
min θ_e 0-4 km	Minimální hodnota adiabatické ekvivalentní potenciální teploty do výšky 4 km	Bolton (1980), Romanic a kol. (2022)
srážková voda	Potenciální srážková voda	Taszarek a kol. (2023)
tepl. gradient 0-1 km	Teplotní gradient mezi 0-1 km výšky	Srivastava (1985), Evans a kol. (2012)
DCAPE	CAPE downdraftu	Gilmore, Wicker (1998)
vert. stříh větru 0-6 km	Šestikilometrový vert. stříh větru	Evans, Doswell (2001)
SRH RM 0-3 km	Relativní helicita integrovaná do výšky 3 km vztažená k Bunkersovu vektoru pro pravostáčivé supercelly	Bunkers a kol. (2000)
SCP	Supercell Composite Parameter	Gropp, Davensport (2018)
STP	Significant Tornado Parameter	Coffer a kol. (2019)
DCP	Derecho Composite Parameter	Coniglio a kol. (2005)
DEI	Downburst Environment Index	Romanic a kol. (2022)
WINDEX	Wind Index	McCann (1994)
MU WMAXSHEAR	Násobek odmocniny z MU CAPE a šestikilometrového vert. stříhu větru	Taszarek a kol. (2020)
ML WMAXSHEAR	Násobek odmocniny z ML CAPE a šestikilometrového vert. stříhu větru	Taszarek a kol. (2020)

Výběr prekurzorů byl proveden na základě regresní analýzy, kterou byly zjišťovány souvislosti mezi veličinami, v kombinaci s prekurzory použitými v jiných publikacích (např. Romanic, Taszarek, Brooks 2022). Vybrány následně byly veličiny, jejichž souvislost byla významnější a byly zaměřeny zejména na popis nižších vrstev troposféry v souladu s publikacemi. Významnost vybraných veličin



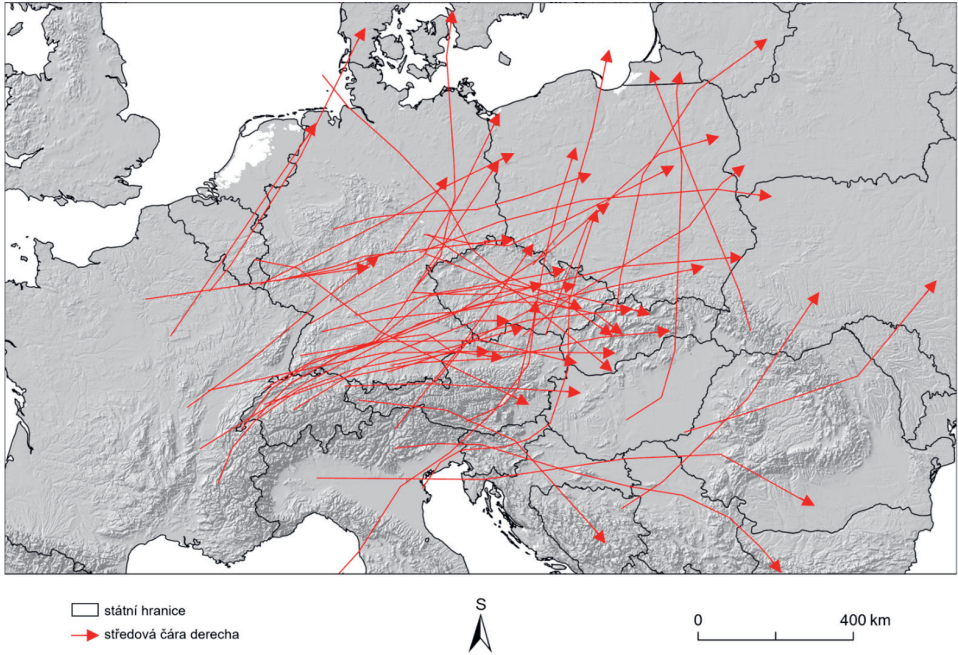
Obr. 3 – Celé metodické schéma, podle kterého byly počítány podmínky konvektivního prostředí.

pak byla posuzována pomocí Mannova-Whitneyho U testu. Celé metodické schéma je vyjádřeno na obrázku 3. Kromě zprůměrování prekurzorů po celý životní cyklus derech, byly také zkoumány změny hodnot prekurzorů v rámci životního cyklu derech, kdy první 2 hodiny z životního cyklu reprezentovaly podmínky vzniku, následovaly podmínky vývoje a poslední 2 hodiny životního cyklu tvořily podmínky při rozpadu derecha.

4. Výsledky

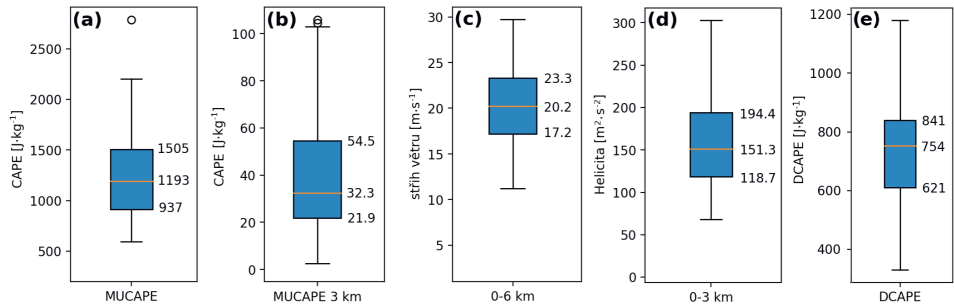
Na území střední Evropy bylo studováno celkem 48 derech pomocí 1 453 sondáží nebo pseudosondáží odvozených z reanalýzy ERA5. Pseudosondáž je výstup, který z modelových hladin numerického modelu předpovědi počasí zástupně používá vybraná data místo sondáže. Bylo zjištěno, že derecha se nejčastěji tvoří v oblasti severozápadního úpatí Alp a postupují podél severního podhůří Alp dále k severovýchodu (obr. 4). Mezi hlavní oblasti rozpadu derech patří oblast kopírující hranici Čech a Moravy směřující dále do Rakouska. Druhou oblastí, kde se derecha rozpadají, je severozápadní část oblouku Karpat. Poslední oblastí, kde často dochází k zániku derech, je linie, která kopíruje v západovýchodním směru střední Polsko. Některé případy jsou rovněž typické tím, že derecho zeslábne, jakmile se dostane k blízkosti Baltského nebo Severního moře, což může být do značné míry způsobeno nižší teplotou moře než pevniny.

Ze zprůměrovaných podmínek pro celou dráhu derech bylo zjištěno, že se ve střední Evropě derecha vyskytují za podmíněně instabilního teplotního zvrstvení s hodnotami MU CAPE přibližně 1 000 až 1 500 J·kg⁻¹ (obr. 5a) což jsou v porovnání s USA 2,5× nižší hodnoty. Jelikož se derecha vyskytují často v prostředí

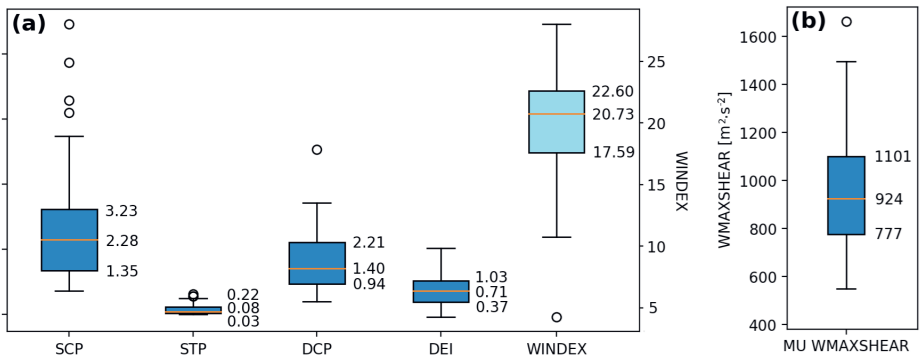


Obr. 4 – Dráhy studovaných derech ve střední Evropě

se sušší vrstvou blízko zemského povrchu, CAPE integrovaná do výšky 3 km nad zemským povrchem je v řadě situací nízká (obr. 5b). V porovnání s podmínkami USA zjištěnými Evansem a Doswellem (2001) je i ve střední Evropě ve většině případů DCAPE nižší (obr. 5e). Z hlediska vlhkostních charakteristik ve vertikálním profilu troposféry bylo zjištěno, že relativní vlhkost vzduchu v přízemních hladinách se významněji neliší od relativní vlhkosti ve střední troposféře. Z pohledu dynamiky lze vyzdvihnout, že derecha se vyvíjí v prostředí se šestikilometrovým stříhem větru přibližně okolo $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 5c), což znamená, že vývoj derech probíhá v prostředí, které je typické i pro supercely. Výraznější šestikilometrový vertikální stříh větru, než je tomu v USA (Evans, Doswell 2001), tak může kompenzovat nižší hodnoty CAPE, ale také DCAPE. V případě hodnot SRH do 3 km výšky se většina derech vyskytuje za hodnot 120 až $200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (obr. 5d), což potvrzuje možnost supercel, ale spíše vyvrací možnost tornád jako doprovodného jevu k derechům (Godfrey, Trapp, Brooks 2004), ačkoliv existují i případy, kdy se tornáda vyskytla (Púčik a kol. 2011). Spodní limit podmínek výskytu derech lze popsat tak, že žádné z analyzovaných derech se nevyskytlo při MU CAPE nižší než $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a zároveň při šestikilometrovém stříhu větru pod $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Nižší hodnoty vertikálního stříhu větru pak musí být dostatečně kompenzovány vysokými hodnotami CAPE a DCAPE.



Obr. 5 – Krabicové diagramy průměrných charakteristik instability (a, b); vertikálního střihu větru (c) a helicity v různých výškách (d) a DCAPE (e)



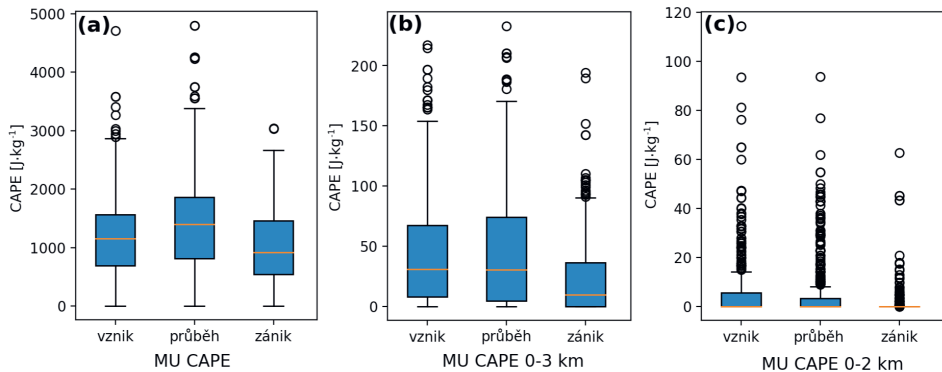
Obr. 6 – Krabicové grafy se složenými parametry (a) – SCP, STP, DCP, DEI a WINDEX; (b) MU a ML WMAXSHEAR

Z analyzovaných složených parametrů potvrzuje svými hodnotami SCP možnost výskytu supercel v rámci samotných derech, naopak hodnoty STP blízké 0 naznačují, že podmínky, které předurčují výskyt derecha, nejsou vhodné pro vznik tornád jakožto doprovodného jevu derech, i když je třeba tento index brát s určitou rezervou. Kladnými hodnotami DEI bylo zjištěno, že prostředí většiny derech je vhodné pro výskyt downburstů. Hodnoty parametru WINDEX pak rovněž korespondují s výskytem *downburstů*. Naopak hodnoty DCP jsou relativně nízké v porovnání s hodnotami DCP v blízkosti derech v USA (Coniglio a kol. 2005) (obr. 6a). To však může být dáno zejména výrazně nižšími hodnotami MU CAPE, než je tomu v USA (Evans a Doswell 2001). Hodnoty MU WMAXSHEAR jsou pak mírně vyšší ve srovnání s větrnými událostmi s rychlostí větru v nárazu $32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ porovnávaných Tazarkem a kol. (2020; obr. 6b).

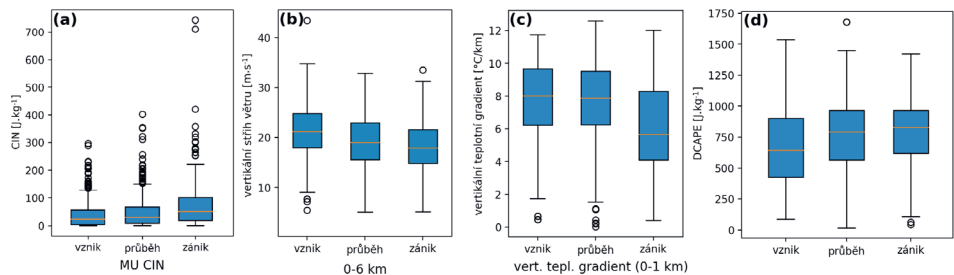
5. Změny prekurzorů během vývoje derecha

Průměrné hodnoty parametrů konvektivního prostředí sice zahrnují základní souvislosti mezi jednotlivými parametry, přesto však neodpovídají na to, za jakých okolností dojde ke vzniku derecha, jaké jsou charakteristiky během životního cyklu derecha a proč dochází k zániku derecha. Je třeba poznamenat, že charakteristiky jsou zkoumány ve vztahu, kdy systém začal nebo přestal produkovat silný vítr v nárazech nad $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, nikoliv kdy se bouře vytvořily nebo kdy definitivně zanikly. V následující pasáži budou popisovány nejen zjištěné hodnoty, ale také významnost určená dle Mannova-Whitneyho U testu mezi vznikem, vývojem a zánikem derecha. Je třeba poznamenat, že rozdíly v hodnotách obecně u všech studovaných indexů nejsou velké.

Žádné charakteristiky instability se v porovnání mezi počátkem a průběhem derecha významně neliší. Významnější odlišnosti byly naopak zjištěny mezi



Obr. 7 – Krabicové grafy charakteristik konvektivního prostředí v průběhu životního cyklu derech – (a) MU CAPE, (b) MU CAPE mezi 0–3 a (c) 0–2 km výšky



Obr. 8 – Krabicové diagramy zobrazující statistické rozložení hodnot (a) CIN, (b) vertikálního střihu větru, (c) vertikálního teplotního gradientu a DCAPE (d)

podmínkami při vzniku a průběhu derecha v porovnání s podmínkami, kdy se derecho začalo rozpadat. Zatímco na začátku jsou hodnoty nižší a na konci životního cyklu derech je medián hodnot MU CAPE pod $1\,000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, průběh derech doprovází vyšší hodnoty MU CAPE (obr. 7a). Jelikož se ve většině případů derecha šíří z relativně vlhčího prostředí blízko frontálního rozhraní do prostředí suššího, lze pozorovat v této souvislosti, že se hodnoty CAPE integrované do dvou až tří km výšky významněji liší v porovnání mezi oblastí vzniku derecha a jeho rozpadu (obr. 7b, c). Významně se také v porovnání s ostatními veličinami liší hodnoty CIN, které jsou při formování derecha nízké s mediánem hodnot okolo $40\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, zatímco při rozpadu derech je hodnota mediánu hodnot téměř dvojnásobná (obr. 8a).

Kromě vyšších hodnot CIN (obr. 8a) se výrazněji snižuje vertikální teplotní gradient do jednoho kilometru výšky při rozpadu derech v porovnání s jejich vznikem nebo průběhem (obr. 8c). Ze všech studovaných veličin byla největší významnost nalezena mezi porovnávanými hodnotami na počátku a na konci drah derech. Z hlediska charakteristik dynamiky působí proti vývoji derech snižující se šestikilometrový stříh „větru“ v průběhu vývoje derech a při jejich zániku (obr. 8b). Ačkoliv v průběhu derecha je schopna vyšší míra CAPE i zvyšující DCAPE (obr. 8d) kompenzovat snižující se hodnoty šestikilometrového stříhu větru, který dosahuje v mediánu hodnot na počátku dráhy derecha $21,2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a na konci $17,9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (obr. 8b), na konci životního cyklu derech s ohledem na hodnoty CIN, méně vlhkosti i snižující se teplotní gradient v přízemní vrstvě do 1 km výšky již tato kompenzace není možná, a proto se derecho přestane projevovat silným větrem a zaniká. V přízemních hladinách také při rozpadu derech dochází ke zvýšení hodnot kilometrového stříhu větru a helicity, takže okolnost může být dána nehomogenitami tlaku vzduchu při zemském povrchu, které se vyvíjí v průběhu derecha a mohou dále přetrvávat i v rámci jeho konečné životní fáze.

Poslední porovnávanou kategorií byly složeny parametry, jejichž největší významnost byla zjištěna mezi prekurzory reprezentujícími vývojovou pasáž derecha a rozpad derecha. Zde všechny testované prekurzory kromě STP dosáhly vyšší významnosti než v porovnání mezi počátkem a průběhem dráhy derecha. Nejvyšší významnosti dosáhl DEI, následovaný parametry WINDEX a WMAXSHEAR (tab. 2).

6. Rozdílnost podmínek pro různě silná derecha

Kromě studia životního cyklu derech byla studována také derecha z hlediska jejich intenzity. Se zvyšující se intenzitou se u středoevropských derech mírně zvyšovaly hodnoty CAPE, které v obou studovaných modifikacích měly vyšší významnost v porovnání mezi oblastmi vzniku a rozpadu derecha než ostatní parametry.

Tab. 2 – Významnosti mezi kategoriemi dle Mannova-Whitneyho U-testu pro složené parametry během životního cyklu derech

Veličina	Začátek – průběh		Průběh – konec		Začátek – konec	
	p	Z	p	Z	p	Z
SCP	0,493	0,685	0	7,232	0	6,014
STP	0,269	1,106	0	5,043	0,0005	3,794
DCP	0,051	1,953	0	6,309	0,0005	3,745
DEI	0,015	2,426	0	8,11	0	4,245
WINDEX	0	4,831	0	7,453	0,005	2,796
MU WMAXSHEAR	0,949	0,064	0	7,583	0	6,89
ML WMAXSHEAR	0,096	1,663	0	7,356	0	5,199

Tab. 3 – Významnosti mezi kategoriemi dle Mannova-Whitneyho U-testu pro vybrané prekurzory dle různé intezity derech

Veličina	Slabé – středně silné		Středně silné – silné		Slabé – silné	
	p	Z	p	Z	p	Z
ML CAPE	0,01	2,578	0,003	2,982	0	4,459
MU LI	0	4,555	0,002	3,126	0	5,99
ML LI	0,001	3,365	0,0005	3,753	0	5,653
DCP	0	4,153	0,07	1,809	0	4,809
DEI	0,041	2,041	0,047	1,983	0,001	3,369
WINDEX	0,636	0,474	0,568	0,572	0,848	0,191
MU WMAXSHEAR	0,01	2,58	0,007	2,677	0	4,311
ML WMAXSHEAR	0,009	2,615	0,002	3,157	0	4,719
srážková voda	0	5,803	0	3,874	0	8,075

Největší významnosti však dosáhla MU CIN, která však byla s vyšší intenzitou derech výraznější.

Se zvyšující se intenzitou derech však souvisí s největší významností potenciální srážková voda, jejíž hodnoty jsou nejvyšší právě u silných derech. Nelze zanedbat ani hodnoty $\Delta\theta_e$ (rozdílu adiabatické ekvivalentní potenciální teploty) mezi průměrem ve výškách mezi 3 a 5 a povrchem a také minimální hodnotu θ_e do výšky 4 km, které statistickým rozložením hodnot i významností kopírovaly rozložení hodnot CAPE. Rovněž mírný nárůst hodnot vykazuje se zvyšující se intenzitou derecha DCAPE. Naopak bylo zjištěno, že na intenzitu derecha nemají vliv dynamické charakteristiky, jako vertikální stříh větru a helicity, jejíž hodnoty se dokonce se zvyšující intenzitou derecha snižují. Ze složených parametrů se liší statisticky významně pouze DCP, DEI a ML i MU WMAXSHEAR v porovnání mezi slabými a silnými derychy, přičemž největší významnosti dosahuje DCP mezi slabými a silnými derychy (tab. 3).

7. Diskuse

Derecha se v Evropě vyskytují za hodnot CAPE přibližně $2,5\times$ menších, než je tomu v USA (Evans, Doswell 2001), což je pravděpodobně kompenzováno šestikilometrovým vertikálním stříhem větru. Oproti derechům studovaných v Německu Gatzenem a kol. (2020) však byly v této studii zjištěny hodnoty CAPE $2\times$ vyšší, a to patrně kvůli většímu počtu sondáží, jichž Gatzen a kol. (2020) využili pouze několik desítek. Na území Evropy analyzovali větrné bouře také Pacey a kol. (2021) a došli k závěru, že se tyto bouře ve střední Evropě vyskytují při ML CAPE v devátém decilu hodnot $1\,500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ a mediánu okolo $600\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Je však třeba poznamenat, že Pacey, Schultz, Carreras (2021) pracovali v rámci jiné geografické domény, vycházeli jen ze sondážních měření a také analyzovali všechny bouře projevující se silným větrem. Na stranu druhou hodnoty zjištěné Paceyem, Schultzem a Carrerasem (2021) ukazují, že studovaná derecha můžeme zařadit mezi větrné události, které vyžadují výraznou instabilitu (tzn. vysoký CAPE). V porovnání s dalšími studii zabývajícími se obecně silným větrem v konvektivních bouřích v Evropě byly také zjištěné hodnoty CAPE, uvedené v tomto článku, přibližně $2\times$ až $3\times$ vyšší (Púčik a kol. 2015; Taszarek, Brooks, Czernecki 2017; Taszarek a kol. 2020).

Bylo zjištěno, že derecha v Evropě vznikají za podobných nebo vyšších $\Delta\theta_e$ (3–5 km) než *downbursty* v USA (Romanic, Taszarek, Brooks 2022). Množství vody v atmosféře ovlivňuje také sílu sestupných proudů (Markowski, Richardson 2010; James, Markowski 2010), což bylo v této práci potvrzeno při porovnání rostoucích hodnot potenciální srážkové vody v závislosti na intenzitě derech. Tahle skutečnost však poukazuje na to, že intenzita derech ve střední Evropě je řízena i teplotou v mezní vrstvě atmosféry, kde je i nejvíce dostupné vlhkosti pro konvekci.

Ačkoliv statistické rozložení hodnot dvoukilometrového a tříkilometrového stříhu větru odpovídá podmínkám v USA dle Evanse a Doswella (2001), zjištěný medián šestikilometrového stříhu větru okolo $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ve střední Evropě je přibližně o téměř $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vyšší než v USA (Evans, Doswell 2001). Na druhou stranu hodnota $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je téměř totožná se závěry Gatzena a kol. (2020). V porovnání s prací od Paceyho a kol. (2021) jsou hodnoty vyšší, nicméně Pacey, Schultz, Carreras (2021) studovali větrné bouře ve všech měřících. Při srovnání studií obecně se zabývajících silným větrem (Púčik a kol. 2015; Taszarek a kol. 2020) lze říct, že se derecha vyskytují za vyšších hodnot šestikilometrového vertikálního stříhu větru.

V kategorii složených parametrů lze vyzdvihnout DCP a DEI. Jelikož derecha doprovázejí většinou kladné hodnoty DEI, prostředí je většinou vhodné pro tvorbu *downburstů*. Velmi podobné jsou si s podmínkami pro vznik derech ve střední Evropě i podmínky vzniku *downburstů* v USA z hlediska parametru WINDEX s tím, že medián zjištěných hodnot pro střeoevropská derecha je trochu nižší než v analýze Romanice, Tazarky, Brookse (2022) pro oblast USA. Na stranu druhou

DCP vykazuje pro středoevropská derecha přibližně poloviční hodnoty oproti USA (Coniglio a kol. 2005). Tohle může poukazovat na dvě zásadní skutečnosti. Prvním faktem je, že se derecha ve střední Evropě vyskytují na spodní limitě hodnot CAPE a DCAPE oproti USA, což vede k otázce, jestli nehrají roli na zformování derech ve střední Evropě další příčiny (např. synoptická situace). Druhou skutečností je, že výraznější šestikilometrový vertikální stříh větru může úspěšně kompenzovat nižší CAPE a DCAPE tím, že může stát za vznikem supercel, které mohou podpořit samotný vývoj derech.

8. Závěr

Tato studie se zabývala větrnými bouřemi typu derecho ve střední Evropě. Z analyzovaných 48 derech a k nim přiřazeným 1 453 sondážím nebo pseudosondážím byly spočítány charakteristiky konvektivního prostředí z 38 radiosondážních stanic nebo jim blízkým gridovým bodům získaných z reanalýzy ERA5. Studií bylo zjištěno několik zásadních výsledků, k nimž patří například fakt, že se derecha vyskytují za hodnot CAPE přibližně 2× až 2,5× vyšších než obecně všechny silné bouře doprovázené silným větrem ve střední Evropě (Púčik a kol. 2015; Taszarek, Brooks, Czernecki 2017; Taszarek a kol. 2020; Pacey, Schultz, Carreras 2021). Bylo také potvrzeno, že klíčovou roli ve vztahu k intenzitě derech hraje množství srážkové vody ve vertikálním profilu troposféry. Zásadním prediktorem, který stojí za tím, že se derecho přestane projevovat silným větrem, byl naopak pokles vertikálního teplotního gradientu v mezní vrstvě atmosféry. V porovnání s derechy v USA lze říct, že středoevropská derecha se vyskytují za vyšších hodnot šestikilometrového stříhu větru, což vede k otázce, jak dalece v Evropě ovlivňují derecha supercely, které mohou doprovázet jejich vývoj. To může být podnětem pro další výzkum. Další zajímavou možností, jak na tento výzkum navázat, může být detailní prostorová analýza z hlediska variability podmínek s cílem zjistit, jak dalece nevhodné prostředí jsou schopna derecha překonat během svého vývoje. Mimo to může být tato práce základem pro další práce zabývající se detailněji konkrétními případy větrných bouří.

Literatura

- BOLTON, D. (1980): The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, 108, 7, 1046–1053. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
- BUNKERS, M. J., BARBER, D. A., THOMPSON, R. L., EDWARDS, R., GARNER, J. (2000): Choosing a universal mean wind for supercell motion prediction. *NWA Journal of Operational Meteorology*, 2, 11, 115–129. <https://doi.org/10.15191/nwajom.2014.0211>

- CELIŃSKI-MYSŁAW, D., MATUSZKO, D. (2014): An analysis of selected cases of derecho in Poland. *Atmospheric Research*, 149, 263–281. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.016>
- COFFER, B. E., PARKER, M. D., THOMPSON, R. L., SMITH, B. T., JEWELL, R. E. (2019): Using near-ground storm relative helicity in supercell tornado forecasting. *Weather and Forecasting*, 34, 5, 1417–1435. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0115.1>
- CONIGLIO, M. C., STENSRUD, D. J., RICHMAN, M. B. (2004): An observational study of derecho-producing convective systems. *Weather and Forecasting*, 19, 2, 320–337. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2004\)019<0320:AOSODC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019<0320:AOSODC>2.0.CO;2)
- CONIGLIO, M., WEISS, S., EVANS, J., BRIGHT, D., HART, J., BOTHWELL, P., CORFIDI, S., JOHNS, B. (2005): NOAA Hazardous Weather Testbed, Summer Experiment 2005: Testing forecast tools for MCS maintenance, speed and severity, https://www.nssl.noaa.gov/users/mcon/public_html/2005_summer_exp_plan.pdf (20. 2. 2025).
- DAVIES, J. M. (2002): On low-level Thermodynamic parameters associated with tornadic and nontornadic supercells, 21st Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, San Antonio, TX, https://ams.confex.com/ams/SLS_WAF_NWP/techprogram/paper_46974.htm (20. 2. 2025).
- DOSWELL, C. A., BROOKS, H. E., MADDOX, R. A. (1996): Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting*, 11, 4, 560–581. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1996\)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2)
- DOTZEK, N., GROENEMEIJER, P., FEUERSTEIN, B., HOLZER, A. M. (2009): Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. *Atmospheric Research*, 93, 1–3, 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.020>
- EVANS, J. S., DOSWELL, C. A. (2001): Examination of derecho environments using proximity soundings. *Weather and Forecasting*, 16, 3, 329–342.
- EVANS, M., CONSTANTINO, J., LAMBERT, B., GRUMM, R. (2012): A preliminary study of inverted-V soundings and downstream severe weather in New York and Pennsylvania. *National Weather Digest*, 36, 1, 1–20.
- FERY, L., FARANDA, D. (2024): Analysing 23 years of warm-season derechos in France: a climatology and investigation of synoptic and environmental changes. *Weather and Climate Dynamics*, 5, 1, 439–461. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-439-2024>
- FUJITA, T. T. (1971): Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area an intensity, Satellite & Mesometeorology Research Project, https://swco-ir.tdl.org/bitstream/handle/10605/261875/ttu_fujita_000292.pdf?sequence=3&isAllowed=y (20. 2. 2025).
- FUJITA, T. T., WAKIMOTO, R. M. (1981): Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. *Monthly Weather Review*, 109,7, 1438–1456. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<1438:FSSOAAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<1438:FSSOAAW>2.0.CO;2)
- GALWAY, J. G. (1956): The Lifted Index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37, 10, 528–529. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-37.10.528>
- GATZEN, CH. (2004): A derecho in Europe: Berlin, 10 July 2002. *Weather and Forecasting*, 19, 3, 639–645. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2004\)019<0639:ADIEBJ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019<0639:ADIEBJ>2.0.CO;2)
- GATZEN, CH., FINK, A. H., SCHULZ, D. M., PINTO, J. G. (2020): An 18-year climatology of derechos in Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 5, 1335–1351. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1335-2020>
- GILMORE, M. S., WICKER L. J. (1998): The influence of midtropospheric dryness on supercell morphology and evolution. *Monthly Weather Review*, 126, 4, 943–958. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<0943:TIOMDO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<0943:TIOMDO>2.0.CO;2)

- GODFREY, E. S., TRAPP, J. S., BROOKS, H. E. (2004): A Study of the pre-storm environment of tornadic quasi-linear convective systems, <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/81388.pdf> (20. 2. 2025).
- GROPP, M. E., DAVENPORT, C. E. (2018): The impact of the nocturnal transition on the lifetime and evolution of supercell thunderstorms in the Great Plains. *Weather and Forecasting*, 33, 4, 1045–1061. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0150.1>
- HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S. et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 730, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- HINRICHS, G. (1888): Tornadoes and derechos. https://www.spc.noaa.gov/misc/AbtDerechos/hinrichs/amj_hinrichs.pdf (20. 2. 2025).
- HINRICHS, G. (1888): Tornadoes and derechos. https://www.spc.noaa.gov/misc/AbtDerechos/hinrichs/amj_hinrichs.pdf (20. 2. 2025).
- HOUZE, R. A. (1993): *Cloud dynamics*. Elsevier, Amsterdam.
- JAMES, R. P., MARKOWSKI, P. M. (2010): A numerical investigation of the effects of dry air aloft on deep convection. *Monthly Weather Review*, 138, 1, 140–161. <https://doi.org/10.1175/2009MWR3018.1>
- JOHNS, R. H. (2007): Origin and evolution of the term „derecho“ as a severe weather event. <https://doi.org/10.1029/GM079p0583>
- JOHNS, R. H., DAVIES, J. M., LEFTWICH, P. W. (1993): Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. 2. Variations in the combinations of wind and instability parameters, <https://www.spc.noaa.gov/publications/johns/torparms.pdf> (20. 2. 2025).
- JOHNS, R. H., HIRT, W. D. (1987): Derechos: Widespread convectively induced windstorms. *Weather and Forecasting*, 2, 1, 32–49. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1987\)002<0032:DWCIW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1987)002<0032:DWCIW>2.0.CO;2)
- JOHNSON, R. H. (2001): Surface mesohighs and mesolows. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 1, 13–32. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0013:SMAM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0013:SMAM>2.3.CO;2)
- KÖPPEN, W. (1879): Beiträge zur Kenntniss der Böen und Gewitterstürme. *Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie*, 7, 324–335.
- KÖPPEN, W. (1882): Der Gewittersturm vom 9. August 1881. *Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie*, 10, 595–619, 714–737.
- KÖPPEN, W. (1886): Bericht über den Orkan vom 14. Mai in Crossen und Umgebung. *Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie*, 14, 259–276.
- KÖPPEN, W. (1896): Die Windhose vom 5. Juli 1890 bei Oldenburg und die Gewitterböe vom 10. Juli 1896 in Ostholstein. *Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie*, 24, 445–458.
- LETZMANN, J. (1923): Das Bewegungsfeld im Fuss einer fortschreitenden Wind oder Wasserhose. <https://www.essl.org/cms/wp-content/uploads/Letzmann1923.pdf> (20. 2. 2025).
- MARKOWSKI, P., RICHARDSON, Y. (2010): *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Wiley-Blackwell, Chichester. <https://doi.org/10.1002/9780470682104>
- McCANN, D. W. (1994): WINDEX – A new index for forecasting microburst potential. *Weather and Forecasting*, 9, 4, 532–541. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0532:WNIFM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0532:WNIFM>2.0.CO;2)
- MONCRIEFF, M. W., MILLER, M. J. (1976): The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102, 432, 373–394. <https://doi.org/10.1002/qj.49710243208>

- ORF, L. G., ANDERSON, J. R. (1999): A numerical study of traveling microbursts. *Monthly Weather Review*, 127, 6, 1244–1258. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<1244:ANSOTM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<1244:ANSOTM>2.0.CO;2)
- PACEY, G. P., SCHULTZ, D. M., CARRERAS, L. G. (2021): Severe convective windstorms in Europe: Climatology, preconvective environments, and convective mode. *Weather and Forecasting*, 36, 1, 237–252. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0075.1>
- PROCTOR, F. H. (1989): Numerical simulations of an isolated microburst. Part II: Sensitivity Experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 14, 2143–2165. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<2143:NSOAIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<2143:NSOAIM>2.0.CO;2)
- PŮČIK, T., FRANCOVÁ, M., RÝVA, D., KOLÁŘ, M., RONGE, L. (2011): Forecasting challenges during the severe weather outbreak in Central Europe on 25 June 2008. *Atmospheric Research*, 100, 4, 680–704. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.11.014>
- PŮČIK, T., GROENEMEIJER, P., RÝVA, D., KOLÁŘ, M. (2015): Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in Central Europe. *Monthly Weather Review*, 143, 12, 4805–4821. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0104.1>
- PUNKKA, A., TEITTINEN, J., JOHNS, R. H. (2006): Synoptic and mesoscale analysis of a high-latitude derecho-severe thunderstorm outbreak in Finland on 5 July 2002. *Weather and Forecasting*, 21, 5, 752–763. <https://doi.org/10.1175/WAF953.1>
- ROMANIC, D., TASZAREK, M., BROOKS, H. (2022): Convective environments leading to microburst, macroburst and downburst events across the United States. *Weather and Climate Extremes*, 37, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100474>
- ROTUNNO, R., KLEMP, J. S., WEISMAN, M. L. (1988): A theory for strong long-lived squall lines. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45, 3, 463–485. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<0463:ATFSSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<0463:ATFSSL>2.0.CO;2)
- RÝVA, D. (2016): Výskyt jevu derecho na území ČR. *Meteorologické zprávy*, 69, 3, 83–89.
- RÝVA, D. (2018): Mimořádná četnost supercelárních bouří a derech v Česku v roce 2017. *Meteorologické zprávy*, 71, 6, 170–178.
- ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK, P., KAŠPAR, M., SETVÁK, M. (2007): *Fyzika oblaků a srážek*. Academia, Praha.
- SIPOS, Z., SIMON, A., CSIRMAZ, K., LEMLER, T., MANTA, R. D., KOCSIS, Z. (2021): A case study of a derecho storm in dry, high-shear environment. *Időjárás*, 125, 1, 1–37. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.1.1>
- SRIVASTAVA, R. C. (1985): A simple model of evaporatively driven downdraft: Application to microburst downdraft. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 42, 10, 1004–1023. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<1004:ASMOED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<1004:ASMOED>2.0.CO;2)
- SRIVASTAVA, R. C. (1987): A model of intense downdrafts driven by the melting and evaporation of precipitation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44, 13, 1752–1774. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<1752:AMOIDD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<1752:AMOIDD>2.0.CO;2)
- SUROWIECKI A., TASZAREK, M. (2020): A 10-year radar-based climatology of mesoscale convective system archetypes and derechos in Poland. *Monthly Weather Review*, 148, 8, 3471–3488. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0412.1>
- TASZAREK, M., BROOKS, H. E., CZERNECKI, B. (2017): Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 145, 4, 1511–1528. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0384.1>
- TASZAREK, M., ALLEN, J. T., PŮČIK, 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*, 33, 23, 10263–10286. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0346.1>

TRAPP, R. J. (2013): *Mesoscale convective processes in the atmosphere*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139047241>