



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VÝSKYT BOUŘEK NA ÚZEMÍ ČR

THUNDERSTORMS OCCURRENCE IN THE CZECH REPUBLIC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Kovář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Jan Kovář**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Profesionální pilot
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výskyt bouřek na území ČR

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza výskytu bouřkových situací na území České republiky.

Cíle bakalářské práce:

- Popis bouřkových situací na území ČR a původ jejich vzniku.
- Vývoj a případné změny výskytu bouřek z pohledu krátkodobého i dlouhodobého.
- Analýza meteorologických podmínek pro vznik bouřky na území ČR.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, P.: Letecká meteorologie, Cheb, 2004.

Kolektiv autorů: Atlas podnebí Česka, ČHMÚ Praha v koedici s UP v Olomouci, 2008. 256 s.

KRŠKA, K. a kol.: Meteorologie. CERM, Brno, 2006. 306 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na bouřkové situace na území České republiky a popis jejich vzniku v období 1961-2020. Analyzuje podmínky vzniku a výskytu bouřek, popisuje bouřkovou činnost na letištích Karlovy Vary, Praha-Ruzyně, Brno-Tuřany a Ostrava-Mošnov v období 2001-2020. Marginálně se zmiňuje o jevech doprovázejících bouřku, podmínkách jejím průletem a způsobech detekce.

Abstract

This bachelor thesis focuses on storm situations in the Czech Republic and their occurrence in the period 1961-2020. It analyses the conditions of occurrence and appearance of thunderstorms and describes the storm activity at Karlovy Vary, Prague-Ruzyně, Brno-Tuřany and Ostrava-Mošnov airports in the period between 2001-2020. Marginal mention is made of the phenomena accompanying the storm, conditions of its passage and methods of detection.

Klíčová slova

Bouřka, blesk, konvekce, kumulonimbus, letecká meteorologie, letiště, propad studeného vzduchu, předpověď bouřek, supercela

Keywords

Storm, lightning, convection, cumulonimbus, aeronautical meteorology, airport, downburst, storm forecast, supercell

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce doc. Ing. Ivo Jebáčka, Ph.D., a s použitím odborné literatury uvedené v části Seznam použitých zdrojů.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Jan Kovář

Bibliografická citace

KOVÁŘ, J.: *Bouřky na území ČR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2022. 68 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivo Jebáček, Ph.D.

Poděkování

Chci poděkovat panu doc. Ing. Ivu Jebáčkovi, PhD. za ochotný přístup, věcné připomínky a především vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji panu RNDr. Karlu Krškovi CSc. za čas, který mi věnoval a za poznatky, s jimiž se se mnou profesionálním, ale hlavně osobním a přátelským přístupem podělil. V neposlední řadě děkuji panu Ing. Mgr. Pavlu Imřišovi, PhD. za pomoc při stylistické úpravě bakalářské práce a Českému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutí dat potřebných k vypracování práce.

Obsah

Úvod.....	11
1 Bouřka.....	13
1.1 Vznik bouřky	13
1.1.1 Konvekce.....	13
1.1.2 Bouře a bouřka	14
1.2 Kumulonimbus	15
1.3 Stadia oblaku Cumulus.....	15
1.3.1 Cumulus humilis	15
1.3.2 Cumulus mediocris.....	16
1.3.3 Cumulus congestus.....	17
1.4 Buněčná struktura bouřek.....	17
1.4.1 Kumulové stadium	18
1.4.2 Bouřkové stadium	18
1.4.3 Stadium rozpadu.....	19
1.5 Typická uskupení konvektivních bouří	20
1.5.1 Singlcela	20
1.5.2 Multicela.....	21
1.5.3 Supercela	21
1.6 Rozdělení bouřek.....	23
1.6.1 Frontální bouřky	23
1.6.2 Bouřky na čáře húlav (angl. squall line)	26
1.6.3 Bouřky uvnitř vzduchové hmoty.....	26
2 Podmínky letů za bouřkových situací, jevy provázející bouřku	27
2.1 Námraza.....	28
2.1.1 Druhy námrazy	30
2.1.2 Typy námrazy.....	31
2.1.3 Ochrana letounu před námrazou	32
2.2 Blesk.....	32
2.3 Vítr jako nebezpečný jev	33
2.3.1 Střih větru	33
2.3.2 Húlava	34
2.3.3 Tornádo	34
2.3.4 Tromba	35
2.3.5 Propad studeného vzduchu (angl. downburst)	36

2.4	Srážky	37
2.5	Kroupy	37
3	Bouřky a jejich předpovědi	38
3.1	Čtyřvrstvá metoda.....	38
3.2	Družicová meteorologie	38
3.3	Radiolokační meteorologie.....	39
4	Bouřky na území České republiky	41
4.1	Pozorování bouřek na meteorologických stanicích	41
4.1.1	Vzdálenost bouřky od stanice	41
4.1.2	Doba trvání bouřky.....	41
4.1.3	Tah bouřky	42
4.1.4	Intenzita bouřky.....	42
4.1.5	Hlavní náraz větru	42
4.2	Bouřky v letech 1961-2020	42
5	Bouřky na letištích LKKV, LKPR, LKTB a LKMT	45
5.1	Počet bouřek a bouřkových dní na letištích v období 2001-2020	45
5.2	Denní chod bouřek.....	47
5.3	Vzdálenost, intenzita a maximální nárazy větru v bouřkách na letištích	48
	Závěr.....	49
	Seznam použitých zdrojů	50
	Seznam použitých zkratk a symbolů	53
	Seznam obrázků, tabulek a grafů	55
	Seznam příloh.....	56

Úvod

Bouřka, obrovský zdroj energie či temný plášť nebe, se kterým se lidstvo setkává již od nepaměti, od Římanů, vidících v bouřkách Jupitera vrhajícího blesky, až po původní obyvatelé Ameriky, kteří v bouřce pozorovali hromového ptáka. Již v tehdejších dobách bouřka a její doprovodné jevy komplikovaly životy lidí. A od počátku 20. století, kdy bratři Wrightové poprvé ochutnali krásu nebes, se bouřka stala nebezpečným jevem především pro letectví.

V dnešní době zažívá letectví obrovský rozkvět a cestování letadlem je stále více dostupnější. Leteckou dopravu ovlivňuje spousta meteorologických jevů, jak z hlediska plynulosti provozu, tak i z bezpečnostního hlediska. Je proto nutné, aby piloti byli včas a dostatečně informováni o výskytu bouřkové aktivity.

Tato práce se zabývá problematikou výskytu bouřek a jejich životním cyklem, původem a podmínkami jejich vzniku. Pojednává o metodách detekce a předpovědi bouřek na území České republiky a porovnává bouřková data z meteorologických stanic na letištích LKKV, LKPR, LKTB a LKMT z krátkodobého i dlouhodobého pohledu.

1 Bouřka

Bouřka (symbol \mathbb{K}) je proces kondenzace vodní páry v atmosféře provázený elektrickými výboji, zvukovými jevy a přeháňkami. Jedná se o nejnebezpečnější jev počasí a řadí se mezi elektrometeory. Z leteckého hlediska je bouřka nebezpečná kvůli intenzivní turbulenci, námraze, elektrickým výbojům a kroupám o velkých rozměrech, které vznikají v oblaku Cumulonimbus (Cb), případně v oblaku Cumulus congestus (Cu con) či Nimbostratus¹ (Ns) a jsou součástí konvektivní bouře viz níže. Elektrické výboje vznikají mezi oblakem navzájem nebo mezi oblakem a zemí.²

1.1 Vznik bouřky

K tomu, aby nastala kondenzace, která způsobuje vznik oblaku, přeháněk a elektrického napětí uvnitř oblaku, je třeba, aby se vzduch ochladil na teplotu rosného bodu nebo níže. Ochlazení probíhá při výstupném pohybu vzduchu.

1.1.1 Konvekce

Konvekcí v meteorologii nazýváme výstupné a kompenzační sestupné pohyby vzduchu při zemském povrchu nebo výše v atmosféře.³ Atmosférická konvekce představuje důležitý mechanismus vertikální výměny tepla a vlhkosti v troposféře a spodní stratosféře. Výstupné konvektivní proudy, které jsou vyvolané instabilitou okolního prostředí, podporují pohyb vzduchových částic ze spodních výškových hladin směrem vzhůru. Naopak sestupné pohyby kompenzují tento výstup vzduchu. Konvektivní proudy tedy dopravují vlhký a teplý vzduch vzhůru do vyšších hladin a vyvolávají sestupné proudy, které se projevují jako nárazovitý vítr. Okolní vzduch je od povrchu ohříván a vystupuje vzhůru, rychlost takových výstupných proudů může dosahovat až desítek metrů za sekundu.

Rozlišujeme několik druhů konvekce, v níž výstupné proudy nedosáhnou do výšky kondenzační hladiny⁴, vzduch tedy nebude nasycen vodní parou; jedná se o suchou neboli bezoblačnou konvekci, při níž nedochází k vývoji konvektivních oblaků. Tato konvekce se vyskytuje na spodní troposféře do 3 km nad povrchem. Nutno také zmínit konvekci

¹ Oblak s velmi tmavou a hustou vrstvou, která zcela zakryje Slunce a je spojený s trvalými srážkami.

² Srov. KRÁČMAR, Jan. Meteorologie (050 00). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-447-8. Str. 180-183.

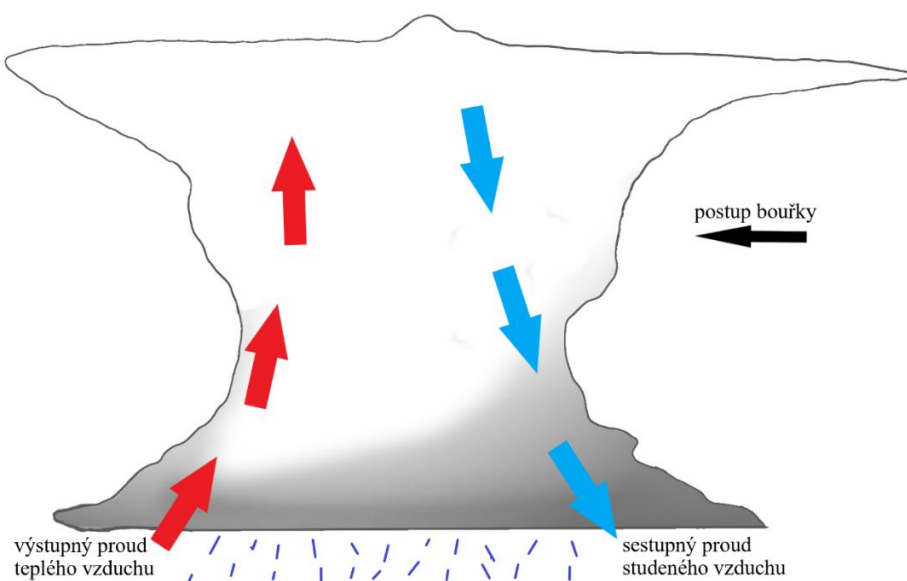
³ Srov. Elektronický meteorologický slovník. Meteorologický slovník [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/hesla>

⁴ Hladina, v níž se vzduch stává nasyceným vodní parou při adiabatickém ději, ve stoupajícím vzduchu se začne kondenzovat vodní pára a vzniká oblak. Tato hladina je určená výškou, popřípadě tlakem vzduchu. Adiabatický děj je termodynamický vratný proces, probíhající bez výměny tepla mezi soustavou a okolím.

termickou, při které je vzduch ohříván zemským povrchem a následně stoupá v podobě vzduchových mas vzhůru.⁵

Zajímavější a meteorologicky významnější je konvekce vlhká neboli oblačná, při které jsou výstupné pohyby vzduchu nasyceny vodní parou a dochází k vývoji konvektivních oblaků. Mezi typické konvektivní oblaky patří kumululus a kumulonimbus. Oblačná konvekce se rozlišuje podle jejího vertikální rozsahu, a to mělká a vertikálně mohutná. Při vertikálně mohutné konvekci dochází k vývoji kumulonimbů, často zasahuje přes celou troposféru a může pronikat 2 až 3 km do stratosféry.³ Aby došlo k vývoji konvektivní oblačnosti, musí být splněny tři podmínky:

- 1) Instabilní zvrstvení vzduchu musí zasahovat až do vysokých hladin.
- 2) Zvrstvení v dostatečně silné atmosférické vrstvě musí podporovat zrychlování výstupného proudu.
- 3) Teplota a vlhkost vzduchu proudícího vzhůru musí být dostatečná pro vývoj oblaku.



Obr. 1 Vznik konvektivní oblačnosti [autor]

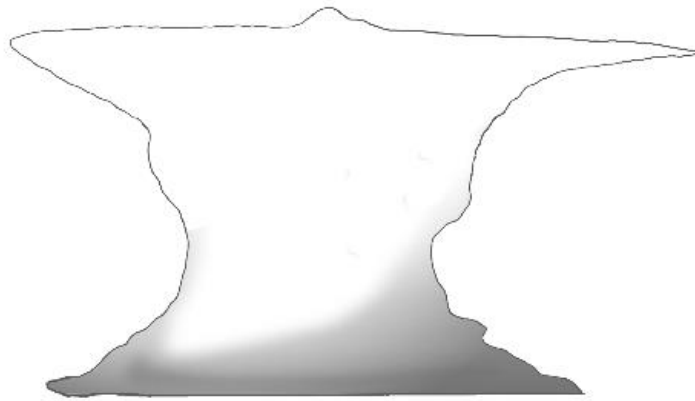
1.1.2 Bouře a bouřka

Je nutné zmínit, že pojem bouře má jiný význam než bouřka. Pojem bouře se využívá pro jakékoliv zesílení přírodních jevů z normálu, jako jsou větrné, prachové, písečné bouře nebo bouře konvektivní. Konvektivní bouře zahrnuje výskyt bouřek, tornád, silného nárazovitého větru a přivalového deště spojených s kumulonimbem. Pojem bouřka viz kap. 1.

⁵ Srov. ŘEZÁČOVÁ, Daniela. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007. Gerstner. ISBN 978-80-200-1505-1. Str. 234.

1.2 Kumulonimbus

Kumulonimbus je mohutný hustý oblak velkého vertikálního rozsahu, velikostí se podobá horám či věžím. Vrcholky mají vláknitou strukturu a mohou připomínat Cirrostratus⁶, výsledný tvar oblaku mívá podobu kovadliny (incus, inc). Základna oblaku je hustá a velmi tmavá, pod ní se vyskytují roztrhané oblaky. Může být ve výšce několik stovek metrů až 2 km nad zemí, vrchol oblaku se nachází v troposféře, avšak může prorůst až do stratosféry. Kumulonimbus zpravidla nezakrývá celou oblohu. Oblak je složen z vodních kapiček a v horní části se vyskytují ledové krystalky a přechlazené vodní kapky. V Evropě se kumulonimbus vyskytuje především v létě, kdy jsou srážky kapalné, v zimě můžeme očekávat srážky sněhové s velmi malou viditelností, například sněhovou vánici. Troposféra se v zimě nachází níže než v létě, a proto má kumulonimbus v tomto období výrazně nižší vertikální rozsah.⁷



Obr. 2 Kumulonimbus [autor]

1.3 Stadia oblaku Cumulus

Oblaky Cumulus mohou mít mnoho podob, od roztrhaných cárů (Cu fractus) až po velké a mohutné věže (Cu congestus). Pokud vývoj oblaku postupuje dál, může z něj vzniknout Kumulonimbus. Rozlišujeme tři tvary kumulu: humilis, mediocris a congestus.⁸

1.3.1 Cumulus humilis

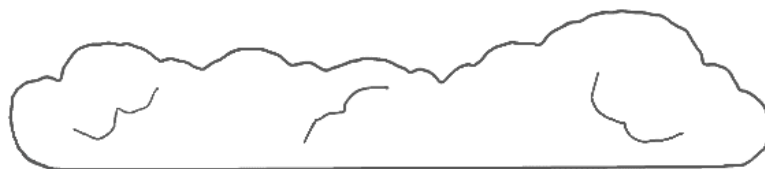
Termín humilis vychází z latinského slova – nízký, mělký. Někdy tento oblak bývá pozorovateli popsán jako beránek, to právě díky jeho tvaru. Je předzvěstí nadcházejícího pěkného, teplého letního počasí, proto se mu také říká „kumulov pěkného počasí.“ Jedná se o první stadium oblaku, kdy má podobu kup malého vertikálního rozsahu, které se jeví jako zploštělé.

⁶ Oblak vysokého patra, vyskytující se ve středních zeměpisných šířkách od 5 do 13 km. Mezi oblaky vysokého patra patří dále Cirrus (Cs), Cirrocumulus (Cc).

⁷ Srov. DVOŘÁK, Petr. Letecká meteorologie. Cheb: Svět křidel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5. Str. 167 násl.

⁸ Srov. Meteorologická stanice Holešov. Meteorologická stanice Holešov [online]. Holešov [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: http://www.meteo-holesov.cz/mrak_cu.html

Při pohledu zespodu má oblak vodorovnou základnu, pod níž se vyskytuje velice mírná turbulence. V oblaku se dají očekávat vzestupné proudy s rychlostí 2 až 5 m·s⁻¹, při růstu a vývoji oblaku dochází k silnější turbulenci, ta ovšem upadá při zralosti oblaku. Oblak se vyskytuje ve výšce s nízkým obsahem kapalně vody, a proto s ním není spojeno vypadávání srážek. Životnost oblaku zpravidla nepřesahuje 30 minut.⁸



Obr. 3 Cumulus humilis [autor]

1.3.2 Cumulus mediocris

Oblak má podobu kupy středně velkého vertikálního rozsahu, který má přibližně stejně velký horizontální i vertikální rozsah. Může prorůst do hladin nad nulovou izotermu⁹, kde jsou teploty vzduchu záporné, což může vést k výskytu ledových částic. Základna je mírně tmavší než základna Cu hum. Uvnitř oblaku se může vyskytovat lehká až střední námraza a stoupající proudy zde překračují rychlost 5 m·s⁻¹. Přestože obsah kapalně vody v oblaku je vyšší než v Cu hum, z tohoto oblaku vypadávají srážky jen zřídka. Obvykle se udává hodnota hustoty okolo 1 g·m⁻³. Za vhodných podmínek dochází k vertikálnímu vývoji a Cu med přerůstá v Cu con.⁸

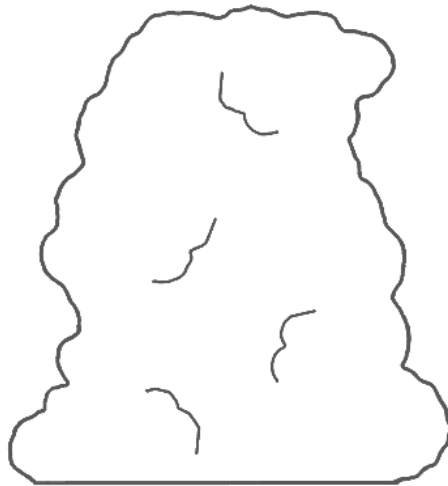


Obr. 4 Cumulus mediocris [autor]

⁹ Linie spojující místa se stejnou teplotou, v meteorologii se většinou jedná o teplotu vzduchu.

1.3.3 Cumulus congestus

Termín congestus vychází z latinského slova nakupený. Jedná se o oblak značného vertikálního rozsahu se silně vyvinutými výběžky, a proto bývá v letecké meteorologii též nazýván towering cumulus (TCU) neboli věžovitý. Vyskytují se v něm velmi silné výstupné proudy, které přesahují rychlost $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Již v tomto stadiu se mohou vyskytovat elektrické výboje, jež jsou předzvěstí kumulonimbu, do kterého oblak zpravidla přerůstá.¹⁰



Obr. 5 Cumulus congestus [autor]

1.4 Buněčná struktura bouřek

Základní strukturou bouřky je konvektivní buňka neboli cela, která bývá definována jako oblast silného vzestupného proudu a příslušného sestupného proudu; takových cirkulačních systémů je v kumulonimbu několik. Pokud konvektivní oblak je tvořen jednou buňkou, nemá nikdy tak velký vertikální rozsah, jako oblak tvořený systémem buněk. V kumulonimbech stále vznikají nové buňky a staré se rozpadají a z toho důvodu může bouřka trvat i několik hodin. Buňka je nositelem bouřkové aktivity a její životní cyklus má tři základní stadia.² Každé ze stadií vyjadřuje vlastnost proudění v konvektivní cirkulaci:

- 1) Kumulové stadium (stadium zrodu)
- 2) Bouřkové stadium (stadium zralosti)
- 3) Stadium rozpadu (stadium zániku)

¹⁰ Srov. Cumulus congestus. WMO [online]. [cit. 2022-04-29].
Dostupné z: <https://cloudatlas.wmo.int/en/cumulus-congestus.html>

1.4.1 Kumulové stadium

Předchůdcem každého Cb je Cumulus congestus, který je prvním stadiem všech bouřkových buněk. Kumulus se za příznivých podmínek začíná rozrůstat ve vertikálním i horizontálním směru a tvoří komplex mohutných věží, které horizontálně mohou dosahovat průměru několika km. Oblak se pohybuje ve směru proudění, přičemž ve vyšších hladinách v důsledku změny rychlosti větru nastává deformace oblaku. Sílicí vítr s výškou způsobuje, že vrcholky oblaku předbíhají základnu, naopak při slábnoucím větru s výškou předbíhá základna vrcholky ve směru proudění.²

Pod oblakem a uvnitř oblaku probíhají výstupné proudy, které vtahují do výstupu vzduch nacházející se pod oblakem a vzduch z okolí oblaku. Intenzita a rozmístění jednotlivých proudů se neustále mění, avšak převládá vzestupná složka, kde se velké množství vodní páry kondenzuje a je vynášeno vzhůru. Rychlost proudění uvnitř zárodečného oblaku není větší než $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, v dobře vyvinutých oblacích může rychlost přesahovat $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.¹¹ Horní hranice kumulu přerůstá do hladiny s teplotou $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ (hladina ledových jader), v níž se začínají tvořit ledové krystalky. Od tohoto okamžiku začne horní část oblaku ledovatět. To se projeví změnou struktury v nejvyšší části oblaku, postupně se tvoří typická vějířová kovadlina. V hladinách, které jsou zasaženy bouřkovou buňkou, se projevuje konvergence proudění: okolní vzduch ze všech stran vtéká do prostoru vzestupného proudu, kde se směšuje se vzduchem, který přichází z přízemní vrstvy.¹ Na přední straně oblaku trvají neustálé výstupné pohyby, na zadní straně se oblast studeného vzduchu stále zvětšuje, takové oblaky mají tloušťku 3 až 5 km. Naopak pokud má vzduch malou relativní vlhkost, kondenzační hladina leží příliš vysoko a oblaka mají malý vertikální rozsah, avšak i v takových případech vznikají konvektivní pohyby.¹¹

1.4.2 Bouřkové stadium

Při bouřkovém stadiu dochází k zastavení vertikálního růstu kumulonimbu. Je charakterizováno vytvořením kovadliny a provázeno srážkami přeháňkového charakteru. Zásadně se také mění poměry proudění, oblast studeného vzduchu se nachází v zadní polovině oblaku, kde se ledové částice a přechlazené vodní kapky již neudrží ve výstupných proudech a začínají klesat dolů.

Tyto vypadávající srážky mohou mít různé podoby, pokud ledové částice propadávají vrstvami s kladnou hodnotou a stačí při pádu roztát jedná se o dešťové přeháňky, v opačném případě se jedná o sněhové nebo kroupové přeháňky, zároveň vznikají elektrické výboje. Jelikož oblak leží v širokém rozmezí teplot – u základny $20 \text{ }^\circ\text{C}$ až $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a v horních částech

¹¹ Srov. ZELENÝ, K., Z. PROCHÁZKA, J. ŠTEKL, P. KNÁPEK, S. DUCHÁČ, L. KUTÝ, J. HUTZ a J. MAZOCH. *Let za ztížených povětrnostních podmínek*. Praha: Naše vojsko, 1963. Str. 86-88.

-30 °C až -40 °C, má v různých výškách rozlišné složení. Do výšky nulové izotermy je složen z vodních kapek, od izotermy 0 °C do -20 °C z přechlazených vodních kapek¹² a sněhových vloček a nad izotermou -20 °C z krystalků ledu, malých sněhových vloček a z malého množství přechlazených vodních kapek. Studený vzduch z oblasti vypadávajících srážek se pohybuje ve směru přední strany oblaku, kde vytlačuje teplejší vzduch nahoru a zesiluje výstupné proudy a vytváří se vír s horizontální osou neboli hůlava¹³. Nárazovitý vítr může dosahovat rychlosti 30 až 40 m·s⁻¹. Silné přeháňky se vyskytují ve vzdálenosti 1 až 2 km od přední strany kumulonimbu a jeho základna, která bývá ve výšce 500 až 1 000 m nad zemí se někdy snižuje až do výšky 50 m. V těchto oblastech vzniká miniaturní studená fronta, která podmiňuje na přední straně oblaku intenzivní výstupné proudy.¹¹

V zadní části bouřkového oblaku se vyskytují sestupné proudy. Velikost těchto proudů se pohybuje okolo 10 až 15 m·s⁻¹.

Oproti tomu výstupné proudy na přední straně oblaku dosahují rychlostí 20 až 30 m·s⁻¹. Vlivem jejich pohybů se vytváří na zadní straně oblaku nová oblast studeného vzduchu. Jakmile první oblast studeného vzduchu přejde pod druhou oblast, zanikne pod ní labilita a zároveň výstupné pohyby a klesá i oblast druhá. Tento proces se opakuje do té doby, než se spotřebuje energie, která umožňuje výstupný pohyb vzduchu na přední straně. Toto stadium trvá 15 až 30 minut.¹¹

1.4.3 Stadium rozpadu

V tomto stadiu probíhá postupný rozpad a zánik oblaku. Přeháňky zasahují velkou část oblaku, následkem toho slábnou výstupné pohyby a klesá elektrická aktivita. Nevytvářejí se nové oblasti studeného vzduchu na zadní straně oblaku, a proto slábnou i sestupné pohyby, které dosahují rychlosti 5 až 10 m·s⁻¹. Oblak se v jednotlivých vrstvách rozplývá a vytváří se jednotlivé oblačné vrstvy. Z kovadliny většinou vzniká oblak Cirrus (Ci)¹⁴.

Typická doba života jedné bouřkové buňky je 30 až 50 minut, avšak bouřka je většinou tvořena více buňkami v různém stadiu, takže celý cyklus vývoje a rozpadu kumulonimbu může trvat od 1 do 5 hodin. Pokud je atmosféra značně labilní, může bouřkový oblak dosahovat největšího rozvoje během 30 až 60 minut. V takových případech dosahují vrcholky kumulonimbu v našich zeměpisných šířkách výšky 10 až 12 km. Existuje však typ bouří, které

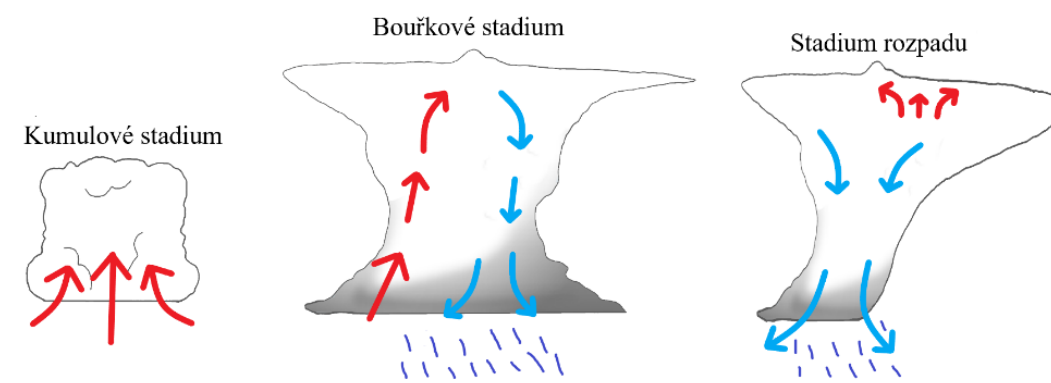
¹² Kapalná fáze vody, která se v atmosféře vyskytuje při teplotě vzduchu nižší než 0 °C, a to až do -42 °C. Při kontaktu s tělesem tyto kapky rychle zmrznou.

¹³ Náhlé a prudké zvýšení větru, značně nárazovitý a často mění směr.

¹⁴ Jeden z 10 druhů oblaků definován jako vzájemně oddělené oblaky v podobě bílých jemných vláken nebo úzkých pruhů. Patří mezi oblaky vysokého patra, nevypadávají z něho srážky.

jsou tvořeny jedinou buňkou a mohou mít životnost několik hodin. Takové konvektivní bouře se nazývají supercely viz kap. 1.5.3.

V bouřkových oblacích se mohou vyskytovat tromby¹⁵. Jejichž průměr může dosahovat od 100 m do 2 000 m a výšky 800 m až 1 500 m s vertikální osou. Ve víru dochází k rotaci zvednutého prachu nebo vody. Tlak ve středu víru je o 50 až 200 hPa nižší než v okolní atmosféře. Silné zředění vzduchu uvnitř víru způsobuje značné ochlazení, které vede ke kondenzaci vodní páry. Rychlost větru za tromby může dosahovat rychlosti $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i více, při kterém může dojít k vývratu stromů nebo ničení střech domů.¹¹



Obr. 6 Vývojová stadia bouřkové buňky [autor]

1.5 Typická uskupení konvektivních bouří

Podle množství a organizace buněk na základě především pozorování meteorologických radarů¹⁶ rozeznáváme 3 druhy konvektivních bouří:

- 1) Singlcela (angl. single-cell)
- 2) Multicela (ang. multi-cell)
- 3) Supercela (angl. super-cell)

1.5.1 Singlcela

Neboli jednoduchá konvektivní cela je nejjednodušší typ konvektivní bouře a zároveň základní jednotkou multicelární konvektivní bouře. Jde o osamocenou buňku krátkého trvání většinou

¹⁵ Atmosférické víry s vertikální osou rotace. Mezi tromby, které vznikají pod základnou konvektivního oblaku patří např. vodní smršť a tornádo.

¹⁶ Radar (RADio Detention And Ranging) neboli radiolokátor je elektronické zařízení pro detekci a lokalizace vzdálených objektů, které rozptylují nebo odrážejí rádiové elektromagnetické záření.

od 0,5 do 1 hod. Při vypadávání srážek se vyvíjí sestupný pohyb vzduchu, který se roztéká u zemského povrchu a ukončuje přívod teplého vzduchu, takže buňka postupně zaniká.¹⁷

1.5.2 Multicela

Většina konvektivních bouří sestává z více jednoduchých buněk, které se vzájemně ovlivňují. Sestupný proud pomáhá iniciovat výstup teplého a vlhkého vzduchu před chladným vzduchem vytékajícím z bouře. Nové buňky se vytvářejí odděleně od hlavního systému typicky v intervalu 10 až 15 minut. Poté každá z nich postupně splývá a stává se jeho hlavní buňkou. Srážky se tvoří v novém výstupném proudu, nakonec srážky vypadávají a vytvářejí proud sestupný, který dosahuje k zemskému povrchu. Multicelární bouře se většinou vyvíjejí v prostředí s mírným až středním vertikálním stříhem větru, kde je silná energie instability. Stříhy větru mohou v oblačné vrstvě dosahovat $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na jeden kilometr výšky.

Multicelární systém může mít několik uspořádání. Multicela může být tvořena shluky jednotlivých buněk, které vznikají v brázdách nízkého tlaku vzduchu, jedná se o shlukové multicely (angl. multicell cluster storms). Pokud je systém uspořádán linií z jednotlivých buněk, hovoříme o čáře instability¹⁸, která se často vyskytuje před studenou frontou a doprovodné projevy počasí mohou být daleko intenzivnější, jako jsou tornáda, krupobití a vichřice. Na rozdíl od studených front má čára instability krátké trvání a výraznější denní chod.¹⁹

1.5.3 Supercela

Je konvektivní bouře velmi silné intenzity s kvazistacionární konfigurací vzestupného a sestupného proudu, která sestává z jediné velmi dominantní a výrazné konvektivní buňky. Životnost buňky může dosahovat až několik hodin. Charakteristická je i svým pohybem, při pohybu se stáčí doprava od směru středního větru (tedy po směru hodinových ručiček při pohledu shora). Supercely se vyvíjejí při velkých hodnotách CAPE²⁰ a silném vertikálním stříhu větru. Zajímavostí je možnost štěpení buňky na dvě sekundární, které se od sebe vzdalují s opačně rotujícími výstupnými proudy. Nově vytvořené buňky se nevyvíjejí stejně intenzivně, zpravidla jedna zaniká a druhá získává vlastnosti supercely. Horizontální rozměr supercelárních bouří jsou srovnatelné s ostatními typy silných bouří. Vertikální rozsah je velký a zpravidla zasahuje nad tropopauzu.¹⁹

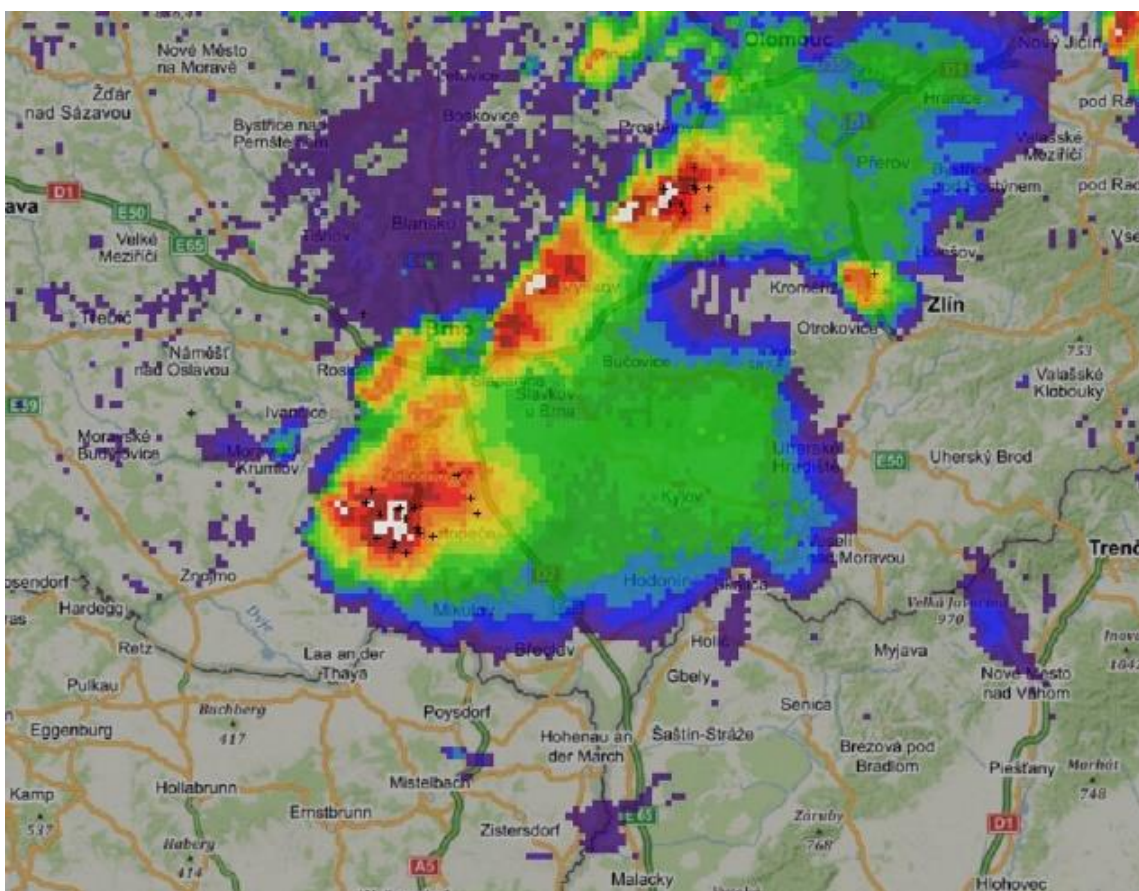
¹⁷Srov. KRÁČMAR, Jan. Meteorologie (050 00). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-447-8. Str. 183.

¹⁸Lineárně nebo do oblouku uspořádaný nefrontální pás zesílené tvorby konvektivní oblačnosti.

¹⁹Srov. ŘEZÁČOVÁ, Daniela. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007. Gerstner. ISBN 978-80-200-1505-1. Str. 421-432.

²⁰Convective Available Potential Energy – energie, kterou má adiabaticky izolovaná vzduchová částice v případě dosažení hladiny konvekce k dispozici při výstupu do hladiny nulového vztlaku. Jednotka $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$.

V současné době je pro vývoj supercely rozhodující existence mezocyklony²¹, která se vyvíjí uvnitř oblaku. Další charakteristikou jsou vizuální charakteristiky supercely, mezi které patří přestřelující vrcholek²² oblaku a rozsáhlou kovadlinu ve směru stříhu větru. V zahraniční literatuře se můžeme setkat s dalšími kategoriemi supercel. Jedná se o slabě srážkové supercely s označením CS (angl. Classic Supercell) a mohutně srážkové HP (angl. High Precipitating). Ve slabě srážkové supercele převládá výstupný proud nad proudy sestupnými a část srážek se vypaří předtím, než dopadnou na zem. V mohutně srážkové supercele produkuje velké množství srážek v oblasti hákovitého echo²³ a na zadní straně.³



Obr. 7 Radarový snímek supercely nad Židlochovicemi [29]

²¹ Rotující vír spojený s výstupným proudem v supercele, který může mít cyklonální i anticyklonální směr rotace.

²² Angl. overshooting top – část horní hranice oblačnosti konvektivní bouře, která se vyskytuje nad aktivní částí kumulonimbu, kde je projevem vrcholících výstupných konvektivních proudů bouře.

²³ Radarový odraz ve tvaru háku, jenž je charakteristický pro supercelu a je důkazem existence mezocyklony.

1.6 Rozdělení bouřek

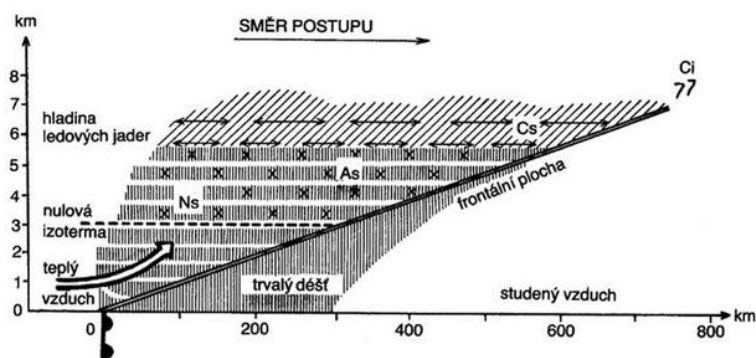
Bouřky obecně klasifikujeme na bouřky frontální (bouřky tažné) a bouřky uvnitř vzduchové hmoty (bouřky nefrontální).

1.6.1 Frontální bouřky

Frontální bouřka se vyvíjí především v oblasti atmosférické fronty, respektive na čelních stranách postupujících studených front. K jejímu výskytu dochází v každé roční i denní době, čímž se liší od bouřek uvnitř vzduchové hmoty. Frontální bouřka vzniká nuceným výstupem, tím že lehčí teplejší vzduch je nucen stoupat nad vzduch studenější, čímž vznikají výkluzné proudy. Frontální bouřky se dělí na bouřky na teplé frontě, studené frontě a okluzní frontě.²⁴

Bouřky na teplé frontě

Bouřka teplé fronty je u nás vzácným jevem, protože úhel výkluzných proudů bývá velmi malý, základny kumulonimbu leží výše než na studených frontách a často jsou zakryty jinou oblačností. Vyskytuje se především v letním období obvykle v nočních hodinách.



Obr. 8 Vertikální řez teplou frontou [31]

Bouřky na studené frontě

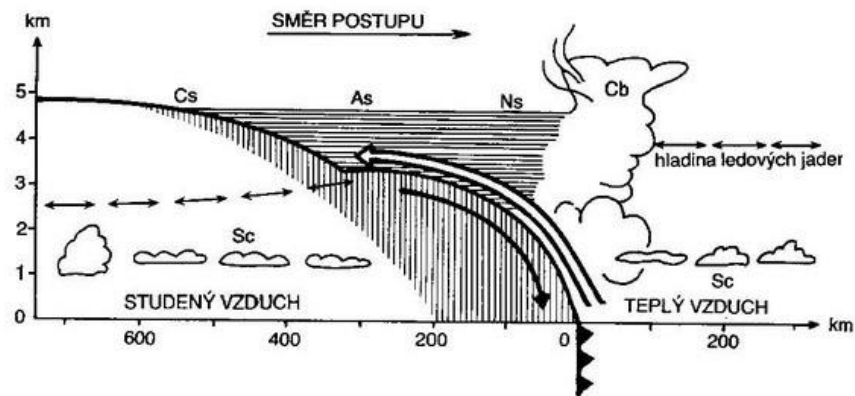
Nejčastěji se vyskytují frontální bouřky na studené frontě. Při stabilním zvrstvení ovzduší je vznik oblačnosti s možným vertikálním vývojem potlačen, takže se bouřky netvoří, pokud však dojde k instabilnímu zvrstvení na čelní straně klínu studeného vzduchu²⁵, vytváří se mohutná bouřková oblačnost. Druh a vývoj oblačnosti závisí na vzájemném charakteru proudění teplého vzduchu a pohybu klínu studeného vzduchu, proto rozeznáváme dva druhy studené fronty.²⁴

²⁴ Srov. SEHNALOVÁ. Roční chod výskytu bouřek a bouřkových jevů v ČR. Praha, 2007. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Fakulta přírodovědecká, Katedra fyzické geografie a geoekologie. Str. 12-15.

²⁵ Typický útvar studené vzduchové hmoty, která postupuje za studenou frontou na místo teplého vzduchu.

Studená fronta prvního typu

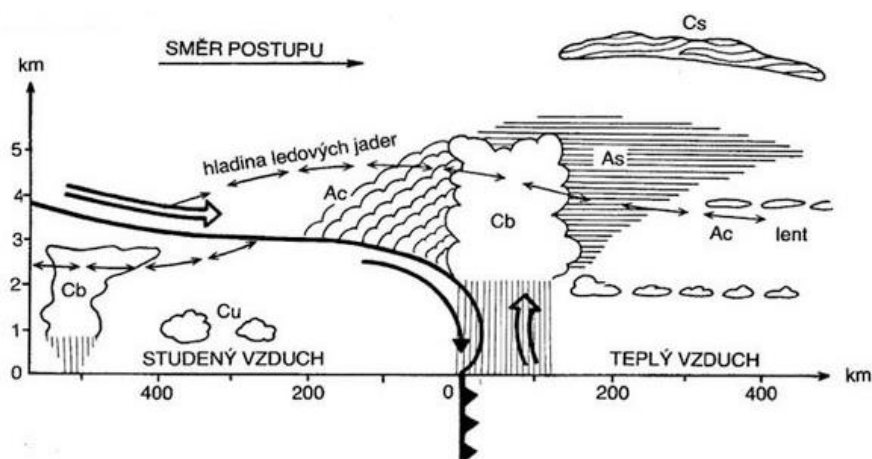
Označována také jako pomalu postupující studená fronta. Pomalý teplý vzduch je vynášen klínem studeného vzduchu nejenom na čelo fronty, ale po celé frontální ploše. Nejsilnější výstupný pohyb se nachází na čele studené fronty, kde často vznikají kumulonimby a s nimi spojené bouřky. Srážkové pásmo nabývá šířky 300 až 400 km a vyskytuje se vždy za frontální čarou²⁶.



Obr. 9 Vertikální řez studenou frontou 1. typu [31]

Studená fronta druhého typu

Studené fronty druhého typu se obvykle pohybují rychleji než druh první, a proto je označována jako rychle postupující studená fronta. Jejich hlavním znakem je existence sestupných pohybů ve vyšších hladinách v teplém vzduchu podél frontální plochy, jež iniciují rychlé protrhávání oblačnosti, čímž se oblačnost redukuje pouze na pás konvektivních oblačností. Šířka oblačného pásma kumulonimbu je poměrně úzká, zpravidla několik desítek kilometrů.²⁴



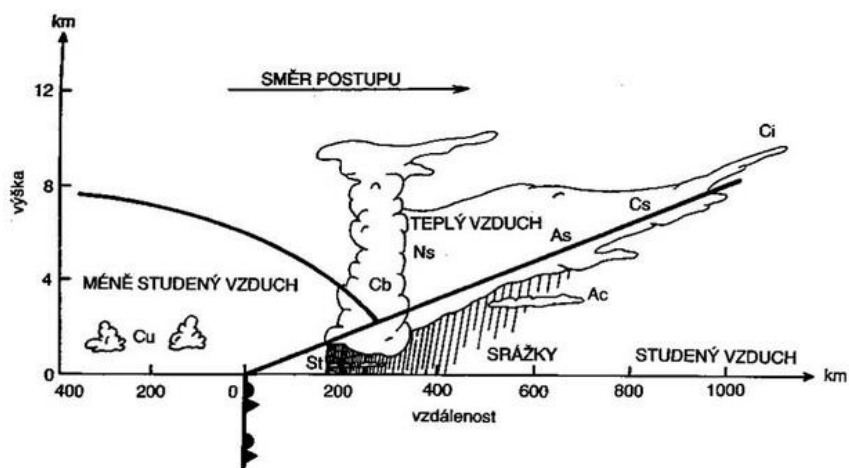
Obr. 10 Vertikální řez studenou frontou 2. typu [31]

²⁶ Průsečnice frontální plochy se zemským povrchem nebo libovolnou výškovou hladinou.

Bouřky na okluzní frontě

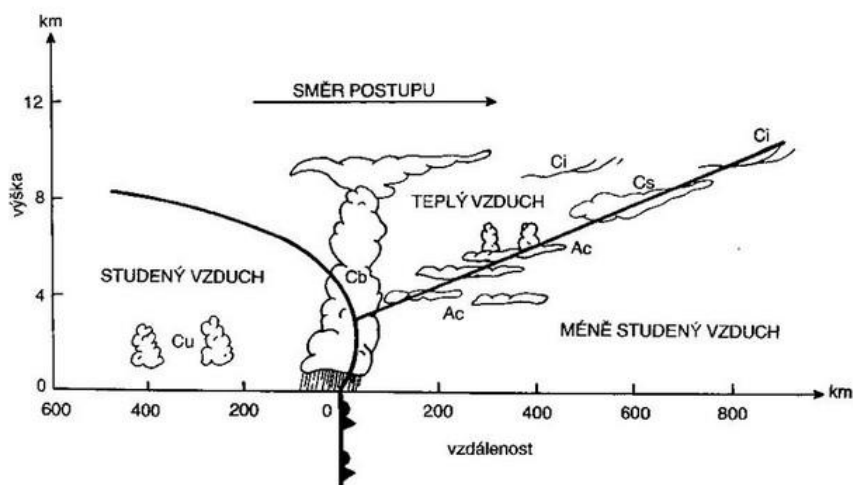
Okluzní fronta vzniká spojením studené a teplé fronty. Rozlišujeme okluzní frontu teplou a studenou.

Teplá okluzní fronta vzniká, je-li studený vzduch za původní studenou frontou teplejší než studená vzduchová hmota před původní teplou frontou. Teplá okluzní fronta se při zemi těžko odlišuje od teplé fronty, avšak za letu se letadlo může setkat s intenzivní turbulencí a námrazou.²⁷



Obr. 11 Vertikální řez teplé okluzní fronty [31]

Studená okluzní fronta vzniká, pokud studená vzduchová hmota za postupující studenou frontou je chladnější než studená vzduchová hmota před teplou frontou. Pro studenou okluzní frontu je charakteristický přechod trvalých srážek v přeháňky nebo bouřky.²⁷



Obr. 12 Vertikální řez studené okluzní fronta [31]

²⁷ Srov. KRÁČMAR, Jan. Meteorologie (050 00). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-447-8. Str. 128-139.

1.6.2 Bouřky na čáře húlav (angl. squall line)

Squall line je silná forma čáry instability, na které se vyskytují lineárně uspořádané konvektivní bouře. Často se vyskytuje před studenou frontou, avšak sama není frontální povahy.²⁷

1.6.3 Bouřky uvnitř vzduchové hmoty

Již z názvu je zřejmé, že tyto bouřky nevznikají za přítomnosti atmosférické fronty a vyskytují se v instabilní vzduchové hmotě. Vznikají zejména následkem termické konvekce v místech rychlého oteplování velkých objemů vzduchu. Tyto podmínky se vyskytují především v kopcovitých terénech a horských oblastech. Bouřky uvnitř vzduchové hmoty dělíme do několika kategorií:

- 1) Bouřky orografické
- 2) Bouřky advekční
- 3) Bouřky insolační (bouřky z tepla)
- 4) Bouřka kvazifrontální

Bouřky orografické

Orografické bouřky jsou spojené se zesílením konvekce, především termické konvekce nad svahy nakloněnými ke Slunci. Jejich vývoj a vznik má podobný průběh jako bouřky konvektivní. Vznikají, pokud instabilní vlhký vzduch proudí k horskému pásmu, kde se podél návětrné strany pohoří vytváří řada bouřek.²⁷

Bouřky advekční

Vyskytují se v oblasti studené advekce za studenou frontou, pokud studený vlhký vzduch proudí nad teplý zemský nebo vodní povrch.

Bouřky insolační

Tyto bouřky vznikají ohříváním vlhkého vzduchu, tedy při termické konvekci, proto bývají označovány jako bouřky z tepla.²⁷

Bouřky kvazifrontální

Nacházejí se ve studené instabilní vzduchové hmotě a souvisejí s upořádanou konvekci²⁸. Postup kvazifrontální bouřky je velmi rychlý, zpravidla $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, avšak mají krátké trvání a mohou se vyskytovat několikrát během dne.²⁴

²⁸ Konvekce, jejíž rozmístění vykazuje určitou pravidelnost. Vyskytuje se například na již zmiňované čáře instability nebo v blízkosti pohoří.

2 Podmínky letů za bouřkových situací, jevy provázející bouřku

Let v bouřkových oblastech je spojen s několika druhy nebezpečí, a proto je nejlépe se bouřkovému oblaku vyhnout.

Jedním z nejvýznamnějších je turbulence. Mimo vertikální a horizontální proudy se v kupovité oblačnosti může letoun setkat s intenzivními turbulentními pohyby, které mají průměr od milimetrů do desítek metrů. Takto silné poryvy vertikálního směru mají 10 až 12krát větší vliv na letoun než poryvy v horizontálním směru o stejné rychlosti. Poryvy mají za následek přetížení, které může vést k mechanickému poškození letounu.

Nejsilnější turbulence se vyskytuje při přechodu ze stadia Cumulus congestus v kumulonimbus, ve kterém se letoun může setkat se silnými výstupnými i sestupnými proudy dosahující rychlosti až $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato turbulence je pozorována ve výšce 3 000 až 6 000 m.

Na pozoru je nutné být nejen v oblaku, ale i v jeho okolí, neboť turbulentní prostředí se vyskytuje 100 až 200 m od bouřkového oblaku, kde jsou objemy vzduchu vtahovány vírovými pohyby do oblaku.²⁹

Zajímavé jsou zprávy pilotů, kteří se v bouřce ocitli. Ve 20 % případů nastává úplná ztráta řízení, v 30 % je řízení velmi ztíženo a ve 25 % případů je pozorována silná vibrace nosných ploch a směrovky, která v hodně případech vedla k mechanickému poškození letounu.

Dalším nebezpečím, které je spojeno s průletem bouřkového oblaku je námraza. Vývoj oblaku nad izotermou $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a značná turbulence jsou příznivé podmínky pro koexistenci velkého množství již dříve zmiňovaných přechlazených vodních kapek a krystalků ledu. Námraza se většinou vyskytuje v oblasti se zápornými teplotami mezi $0 \text{ }^\circ\text{C}$ až $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, v horních částech oblaku, kde se teplota pohybuje od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $-50 \text{ }^\circ\text{C}$, se námraza zpravidla nevyskytuje. Přestože v bouřkovém oblaku dochází k velmi intenzivnímu usazování ledu, většinou netrvá dlouho. Ve výši 1 až 3,5 km bylo zjištěno, že růst námrazy je $2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ až $5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Let pod bouřkovým oblakem zpravidla nebývá provázen tvořením námrazy, avšak je snížena dohlednost a dochází ke značnému kymáčení.

Vývoj blesku do letounu je dalším nebezpečným jevem spojeným s bouřkovou oblastí. Nejnebezpečnější oblast pro let z hlediska zásahu blesku je střední část oblaku, nacházející se od 2 do 7 km nad základnou oblaku. Letoun svou přítomností v oblaku ovlivňuje elektrické pole a napomáhá vyrovnávání potenciálů. Zkoušky zjistily, že pravděpodobnost přímého zásahu je úměrná čtverci největšího rozměru a rychlosti letu. S přímým zásahem se ovšem piloti

²⁹ Srov. ZELENÝ, K., Z. PROCHÁZKA, J. ŠTEKL, P. KNÁPEK, S. DUCHÁČ, L. KUTÝ, J. HUTZ a J. MAZOCH. Let za ztížených povětrnostních podmínek. Praha: Naše vojsko, 1963. Str. 91-97.

setkají zřídka. Elektrické výboje nejčastěji zasahují antény a pohyblivé části letounu. Na rozdíl od antén, které při zásahu bleskem bývají zničeny, čímž dochází ke ztrátě spojení, při zásahu do pohyblivých částí blesk sice způsobuje značné škody, ale ve většině případů je letoun stále ovladatelný. Pokud se jedná o letoun s pístovými motory, může blesk způsobit opačný zápal, který vede k vyřazení některých z válců motoru. Zejména v noci je pro posádku nebezpečné oslnění bleskem, které může vyvolat nepříjemný psychologický stav. Nejúčinnějším způsobem boje s elektrostatickými poruchami je zmenšení rychlosti letu.²⁹

V některých situacích pilot nemá na vybranou a musí letět bouřkovou oblastí. To, jak si pilot se situací poradí, závisí na jeho zkušenostech a na umění orientovat se ve ztížených povětrnostních podmínkách. Pro takový průlet musí pilot znát základní pokyny.

1. Před letem pilot detailně prostuduje povětrnostní situaci a musí se informovat o oblastech s možným výskytem bouřky.
2. Za letu je třeba pozorovat oblačnost. Kumulonimbus kvůli svému vertikálnímu rozsahu je vidět na velkou vzdálenost (100 až 200 km). Na jeho existenci upozorňuje pilota zesílení radiových vln.
3. Pro lety ve výškách, kde se teplota pohybuje kolem 0 °C a níže, musí pilot pamatovat na nebezpečí výskytu námrazy a použít protinámrazových zařízení.
4. Aby se letoun vyhnul nebezpečí zasažení bleskem, musí letět ve větší vzdálenosti od bouřkových oblaků (více než 5 km).
5. Je třeba upravit rychlost, aby byl letoun nejstabilnější. Pilot musí zachovávat horizontální polohu letounu a nereagovat příliš rychle na každý poryv, obzvláště ne výškovkou.²⁹

2.1 Námraza

Za hlavní nebezpečí vzniku námrazy je nejen zvětšení hmotnosti letounu, ale především zhoršení aerodynamických vlastností tím, že se led nerovnoměrně usazuje na plochách letounu a tím roste součinitel odporu a klesá součinitel vztlaku. Zároveň se s dalším usazováním ledu mění těžiště letounu a výrazně se zmenšuje jeho stabilita.

Led usazený na křídlech nebo ocasních plochách výrazně mění profil křídla. Silnější vrstva námrazy má za následek vibrace, které ztěžují řízení letounu a mohou vést k mechanickému poškození letadla.³⁰

³⁰ Srov. ZELENÝ, K., Z. PROCHÁZKA, J. ŠTEKL, P. KNÁPEK, S. DUCHÁČ, L. KUTÝ, J. HUTZ a J. MAZOCH. Let za ztížených povětrnostních podmínek. Praha: Naše vojsko, 1963. Str. 122-126.

U vrtulových letounů dochází k námraze na vrtuli, která nabývá nerovnoměrně, a proto se narušuje její stabilita a dochází ke chvění motoru. U letounů s pístovými motory vzniká námraza na karburátoru, která je velmi nebezpečná nejen proto, že dochází k poklesu výkonnosti motoru, ale hlavně k námraze dochází při relativní vysoké teplotě vzduchu (15 °C) a může k ní nastávat v malých výškách i za teplých dní. Tento druh námrazy bývá nejsilnější při vysoké relativní vlhkosti vzduchu.

U proudových letounů podléhají námraze lopatky prvního stupně osového kompresoru a gondola motoru. Při větších vrstvách námrazy může dojít k jejímu odtržení a případnému mechanickému poškození motoru nebo jiných částí na trupu letounu.³⁰

Námraza neovlivňuje jen nosné a řídicí plochy, ale také se usazuje v měřicích čidlech jako jsou například sondy statického a dynamického tlaku nebo pitotova trubice a na anténách. Pokud dojde k zamrznutí pitotovy sondy, indikovaný tlak se jeví jako klesající, což vede k nesprávnému údaji na rychloměru. Led na anténě vede u některých typů letounů k chybám radiokompasu, což je nebezpečné především při letech za ztížených povětrnostních podmínek. Námraza vzniká i na sklech kabiny a výrazně zhoršuje dohlednost, takže je nutné okna odmrazit.³¹

Vývin námrazy bude tím větší, čím větší budou kapky, ze kterých se oblak skládá a čím vyšší bude rychlost letounu, také záleží na aerodynamických vlastnostech letounu. Řada pozorování ukázala, že se oblaky skládají z kapek různých rozměrů od 2 do 70 μm . Vznik námrazy se neřídí pouze počtem a velikostí přechlazených vodních kapek, které dopadnou na povrch letounu, ale i teplotními poměry ve vrstvě vzduchu přiléhající k obtékanému povrchu tělesa. Při zvyšování rychlosti dochází k rychlému zvýšení teploty letounu následkem adiabatického oteplování vzduchu. Pokud letoun dosáhne rychlosti nad $700 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, je nemožná tvorba námrazy při teplotě vzduchu do $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a rychlost nad $900\text{-}1000 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ znemožní vznik námrazy při teplotě vzduchu do $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ kvůli ohřátí povrchu letounu (kinetický ohřev letadla).³¹ Podle tloušťky ledu, který se vytvoří za jednotku času, stanovil I. G. Pčelko stupnici intenzity námrazy³⁰:

- do $0,6 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ - slabá
- $0,6\text{-}1,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ - mírná
- $1,1\text{-}2,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ - silná
- nad $2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ - velmi silná

³¹ Srov. DVOŘÁK, Petr. Letecká meteorologie 2017. Cheb: Svět křidel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5. Str. 211 násl.

2.1.1 Druhy námrazy

V praxi jdou všechny druhy námrazy shrnout do několika základních typů: ledovka, krystalická námraza (jinovatka), zrnitá námraza a jíní.

Ledovka

Ledovka se vyskytuje v podobě průzračného nebo matného ledu.

Průzračný led se tvoří v prostředí s výskytem velkých přechlazených vodních kapek, jenž se při dopadu na povrch letounu rozlévají a tvoří celistvou vrstvu. Při zmrznutí se uvolňuje velké množství latentního tepla, které zvyšuje teplotu ledu a brání rychlému zamrznutí vody. Tím se tvoří sklovitý ledový povlak. Nejčastěji se tato námraza tvoří při teplotě pod 0 °C a setkáváme se s ní v oblacích Cumulus congestus a kumulonimbus. Škodlivý účinek průzračného ledu není tak výrazný jako u ledu matného, jelikož příliš nedeformuje tvar jednotlivých částí letounu a nemění jejich obtékání.

Matný led se tvoří za letu v oblacích ze směsi vodních kapek a krystalků ledu. Má velice drsný povrch a nepravidelně se usazuje na náběžných částech letounu. Jeho nepravidelná struktura výrazně deformuje povrch letounu, a tím narušuje aerodynamické vlastnosti letounu.³²

Zrnitá námraza

Zrnitá námraza se tvoří v oblacích, které jsou složeny z malých vodních kapek o rozměru do 10 µm. Charakterizuje se drsným povrchem a mléčnou barvou. Malé kapky při nárazu na letoun zachovávají svůj kulový tvar a neroztékají se po povrchu. Tento druh námrazy se na náběžných hranách nejčastěji vyskytuje při teplotě od -10 °C do -20 °C a velmi snad při vibracích odpadá.³²

Krystalická námraza

Neboli jinovatka je bílý hrubozrnný krystalický led, který se obvykle tvoří na povrchu parkujících letounů, avšak může se tvořit i za letu v místech, kde teplota dosahuje nižší teploty než u předcházejících typů námraz. Jedná se zpravidla o oblaka vysokého patra – Ci, Cs, Cc. Tento druh námraza je relativně neškodný.³²

³² Srov. KRÁČMAR, Jan. Meteorologie (050 00). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-447-8. Str. 169-174.

Jíní

Drobný krystalický nános, který se lehce střásá větrem a vibracemi letounu. Příčin jeho tvoření je sublimace³³ vodní páry na povrchu letounu. Nevyznačuje se žádnými nebezpečnými vlastnostmi.³⁴

2.1.2 Typy námrazy

Námraza tvořící se zejména na náběžných hranách může mít několik tvarů, které rozlišujeme na tři základny typy: profilová, žlábkovitá a beztvará námraza.

Profilová námraza

Vzniká při teplotě pod -20 °C a při malém vodním obsahu oblaku. Tvoří se především na náběžné hraně křídla a kopíruje jeho povrch, avšak nijak zvlášť nemění aerodynamické vlastnosti letounu, a proto se nepovažuje za vážně nebezpečnou.

Žlábkovitá námraza

Tato námraza se vytváří mimo náběžné hrany letadla, protože při dotyku s povrchem kapky nestačí namrznout v důsledku kinetického ohřevu. Kapky jsou odnášeny proudem vzduchu od náběžné hrany na chladnější část profilu křídla, kde zamrzají a velmi výrazně mění aerodynamické vlastnosti a zvyšují odpor. Proto je považována za nejnebezpečnější formu námrazy v letectví. Žlábkovitá námraza vzniká při teplotě vyšší než -20 °C , nejčastěji však při teplotách -5 °C až -7 °C .³⁵

Beztvará námraza

Námraza vytvářející se za letu v oblacích při teplotě málo pod bodem mrazu a při teplotě náběžných hran nad nulou. Kapky při dotyku s povrchem nemrzou a proud vzduchu je unáší do oblasti s menším aerodynamickým ohřevem, kde vzniká námraza. Námraza se může rozšířit i na náběžné hrany křídel, pokud jejich teplota klesne pod bod mrazu. Nejčastěji vzniká při stoupání letadla smíšenými oblaky; tento typ námrazy také výrazně zhoršuje aerodynamické vlastnosti letounu.³¹

³³ Fázový přechod z pevného skupenství do skupenství plynného. V meteorologii se tento význam užívá při přechodu ledu do plynné fáze vody.

³⁴ Srov. ZELENÝ, K., Z. PROCHÁZKA, J. ŠTEKL, P. KNÁPEK, S. DUCHÁČ, L. KUTÝ, J. HUTZ a J. MAZUCH. Let za ztížených povětrnostních podmínek. Praha: Naše vojsko, 1963. Str. 128-130.

³⁵ Srov. DVOŘÁK, Petr. Letecká meteorologie. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5. Str. 212.



Obr. 13 Typy námrazy na náběžné hraně křídla [autor]

2.1.3 Ochrana letounu před námrazou

Moderní letouny bývají většinou vybaveny protinámrazovými systémy, navzdory tomu starší typy letounů, které nedisponují těmito systémy, se musí letům v oblacích s přechlazenými vodními kapkami vyhýbat. Zařízení, jež slouží k zamezení vzniku námrazy na letounech dělíme na několik typů:

- 1) Mechanická – náběžné hrany jsou vybaveny nafukovacími gumovými polštáři nebo hadicemi, takže námrazu lze hned pomocí nafukováním odlamovat.
- 2) Termická – nosné a řídicí plochy jsou vytápěny výfukovými plyny z motorů nebo elektricky.
- 3) Chemická – povrch letounu je nastříkán kapalinou, která zamezuje vzniku námrazy, tento nástřík musí být obnovován.³⁶

2.2 Blesk

Bleskem rozumíme elektrický náboj vznikající v oblacích druhu kumulonimbus a zřídka kdy též Cumulus congestus, pouze v těchto oblacích dochází k tvorbě silných center elektrického pole, potřebných k výboji blesku.

K výboji dochází buď mezi centry elektrického náboje opačné polarity v kumulonimbu (vnitřní blesk), nebo mezi jedním centrem a zemským povrchem (blesk do země). Blesky mohou vznikat i mezi elektrickými centry různých sobě blízkých bouřkových oblaků.³⁷

³⁶ Srov. ZELENÝ, K., Z. PROCHÁZKA, J. ŠTEKL, P. KNÁPEK, S. DUCHÁČ, L. KUTÝ, J. HUTZ a J. MAZOUCH. Let za ztížených povětrnostních podmínek. Praha: Naše vojsko, 1963. Str. 132-133.

³⁷ Srov. BEDNÁŘ, Jan. Meteorologie: [úvod do studia dějů v zemské atmosféře]. Praha: Portál, 2003. ISBN 80-7178-653-5. Str. 189-191.

Hlavní část blesku tvoří vůdčí výboj (angl. leader) tvořící viditelný kanál vysoce ionizovaného a ohřátého vzduchu (až 25 000 K). Podle několikačetných pozorování dosahují průměry kanálů řádově několik milimetrů až centimetrů. Tento výboj se pohybuje krokově (angl. stepped leader), krokový cyklus je zapříčiněn poklesem gradientu potenciálu pod kritickou hodnotu, pohyb výboje se poté na několik mikrosekund až nanosekund zcela zastaví, zatímco intenzita elektrického pole opět vzroste. Výboj má v každém kroku rychlost okolo $200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Podle vzhledu se rozlišuje několik druhů blesků: čárový, perlový, rozvětvený, plošný, stuhový a kulový. Kulový blesk je velmi výjimečným jevem vyskytujícím se při bouřkách. Obvykle má blesk tvar podobný kouli o průměru několika centimetrům, ve vzácných případech až několik metrů. Charakterizuje se světélkováním různé barvy, obvykle červené, oranžové nebo žluté a volně se nese vzduchem nebo klesá shora dolů.³ Často vniká do budov komínem nebo oknem. Doposud nebyl původ kulového blesku zcela obeznámen, vědci se domnívají, že jde o jakousi formu plazmy v atmosféře.³⁷

Výboj blesku má za následek vznik elektromagnetických rozruchů krátkých impulzů, které se nazývají sféricky (atmosféricky). Jejich intenzita závisí na intenzitě výboje a na vzdálenosti mezi úderem blesků a pozorováním sférik. Největší množství energie je vyzářeno v oblasti dlouhých a velmi dlouhých vln při zpětném výboji u blesku do země.³⁸

2.3 Vítr jako nebezpečný jev

Vítr je pro letectví jedním z nejdůležitějších prvků majících vliv na vzlet, přistání i samotnou fázi letu. Vítr jako pohybující se vzduchové prostředí mění směr pohybu letounu vzhledem k zemskému povrchu a způsobuje porušení rovnováhy aerodynamických sil.

2.3.1 Střih větru

Střih větru je jeden z nejvýznamnějších a pro letecký provoz i jeden z nejnebezpečnějších atmosférických jevů, především při fázi vzletu a přiblížení. Rozlišujeme vertikální a horizontální střih větru. Střih větru je definován jako lokální změna směru, rychlosti nebo obou charakteristik větru. V letectví je střih větru charakterizován změnou vektoru větru podél trajektorie letounu, která vede k náhlé změně směru či rychlosti letounu, čímž vystavuje letoun a celou posádku nebezpečí.³⁹

³⁸ Srov. ŘEZÁČOVÁ, Daniela. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007. Gerstner. ISBN 978-80-200-1505-1. Str. 358-360.

³⁹ Srov. KRÁČMAR, Jan. Meteorologie (050 00). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-447-8. Str. 177-180.

Vertikální stříh větru

Stříh větru ve vertikálním směru je změna vektoru rychlosti větru ve vertikálním směru vztažená na jednotkovou výšku. Vertikální stříh větru je důležitý pro vznik konvekce, jako jsou například multicely a supercely. Podmínky pro vznik tohoto jevu jsou nejčastěji změny tlaku vzduchu, divergence⁴⁰ a konvergence⁴¹ proudění, bouřkové činnosti a především, při existenci microburstu. Vertikální stříh větru bývá indukován orograficky, především zrychlením proudění mezi budovami nebo horskými hřebeny.

Horizontální stříh větru

Stříh větru v horizontálním směru je definován jako změna horizontálního vektoru větru v rovině. Zpravidla je spojený s výstupnými a sestupnými pohyby vzduchu konvektivního oblaku. Povětšinou je stříh větru spojován s bouřkovými oblaky a s přechody atmosférických front. Stříh větru také bývá spojen s gust fronty⁴², které se vyskytují až 20 km od kumulonimbu. Typickým jevem je také vylití studeného vzduchu (microburst) v sestupném proudu, rychlost větru u země může dosahovat až $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ve výšce 100 m až $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.³⁹

2.3.2 Húlava

Húlava (angl. squall) je podle WMO⁴³ náhlé zvýšení rychlosti větru, alespoň o $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na hodnotu $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo větší, který často mění směr. Jev trvá jen několik minut a náhle ustává. Húlava se často vyskytuje na čele studené fronty, kde se vyznačuje prudkými konvektivními jevy a pro letectví nebezpečným tryskovým prouděním (angl. jet stream)⁴⁴.

2.3.3 Tornádo

Jedna z mnoha definic podle Ch. Doswella popisuje tornádo jako silně rotující vír s přibližně vertikální osou, který se vyskytuje pod spodní základnou konvektivních bouří. Během své existence se musí alespoň jednou dotknout zemského povrchu a je dostatečně silné na to, aby způsobilo na povrchu hmotné škody. Pokud se vír nedotkne zemského povrchu, nemůže být označován jako tornádo.³ Jedná se o speciální druh velké tromby, vyskytující se všude na Zemi s výjimkou polárních oblastí, od východu až po středozápad USA, kde se vyskytují tornáda silnějšího charakteru. Tornáda vznikají v rychle se rozvíjejících mezocyklonách, ve kterých se vyskytuje vírnatý vtok teplého vzduchu z okolí a silný vzestupný proud z konvektivní

⁴⁰ Rozbíhavost vzdušných proudů, při které dochází ke zmenšení rychlosti proudění.

⁴¹ Sbíhavost vzdušných proudů, při níž se zrychluje rychlost proudění nebo se vytvářejí výstupné proudy.

⁴² Přední okraj studeného vzduchu vytékajícího z konvektivní bouře.

⁴³ Světová meteorologická organizace (World Meteorological Organization).

⁴⁴ Jet stream neboli tryskové proudění je silné proudění vzduchu ve tvaru zploštělé trubice. Je charakterizováno velkými rychlostmi a výraznými stříhy větru.

oblačnosti. Právě v oblasti vtoku teplého vzduchu vzniká vír, jehož rychlost horizontálního proudění může nabývat různých hodnot a intenzity.⁴⁵

Ted Fujita podle ničivých účinků, které odpovídají velikosti intenzity jevu, rozlišil 6 kategorií tornád, které označil F0 až F5. V Evropě se můžeme setkat se stupnicí TORRO (Tornado and Storm Research Organization), která používá označení T0 až T10, jež nerozděluje tornáda podle ničivosti, nýbrž podle rychlosti větru.

Největší doposud naměřená rychlost tornáda byla $142 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tornáda mohou dosahovat průměru od jednotek do stovek metrů a jeho životnost není delší než několik desítek minut.

Jeho součástí je kondenzační chobot visící ze spodní základny oblačnosti a vířící oblak prachu či jiných trosek vystupujících od země směrem vzhůru. Rotace bývá nejčastěji cyklonální (na severní polokouli zleva doprava), zaznamenány byly i případy s opačnou rotací, teda anticyklonální. V chobotu je oblast nízkého tlaku, která má za následek kondenzaci vody, díky které je chobot dobře viditelný. Tornádo vzniklé nad vodní hladinou nazýváme vodní smršť nebo vodní sloup.

Tornádo je extrémně nebezpečný jev, jehož výskyt zatím meteorologové neumí identifikovat, dá se však počítat s častým výskytem tornád při vývojích silných bouří, především supercel.⁴⁵

2.3.4 Tromba

Tromba je termín označující atmosférické víry s jinou než horizontální osou a s průměrem řádově od desítek centimetrů až do stovek metrů. Na rozdíl od tornáda se tromby nemusí dotýkat zemského povrchu. Tromba může vznikat pod základnou konvektivního oblaku nebo nad zemským povrchem. Rozlišujeme malé a velké tromby.

Malé tromby

Malé tromby se tvoří od země vzhůru v teplém vzduchu nad pevninou a mohou dosahovat do výšky až stovek metrů. Zpravidla se vyskytují na pouštích, pozorovat je však můžeme i ve středních zeměpisných šířkách během teplých letních dní. Takové tromby označujeme jako prachový či písečný vír, jedná-li se o malý vír, můžeme se setkat s označením rarášek nebo čertík.⁴⁵

⁴⁵ Srov. DVOŘÁK, Petr. Letecká meteorologie 2017. Cheb: Svět křídel. ISBN 978-80-7573-014-5. Str. 204-210.

Velké tromby

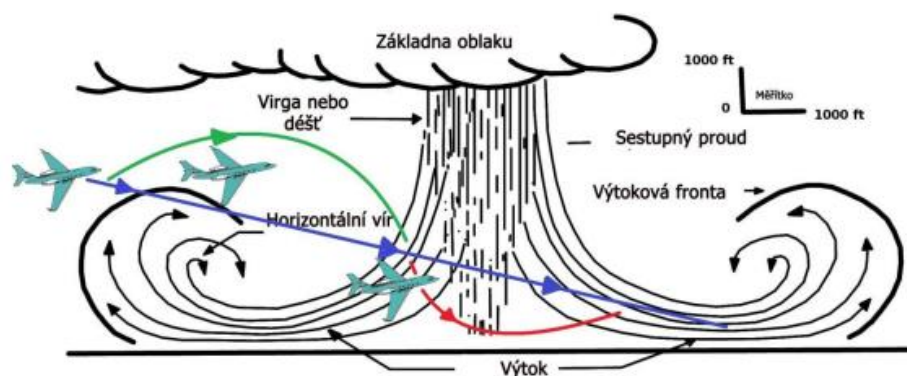
Tvoří se ve vyšších vrstvách ovzduší v instabilním vzduchu a jsou podníceny kumulonimby, z nichž se spouštějí dolů, někdy až k zemskému povrchu. Největší výskyt velkých a mohutných tromb je v jižních státech USA.⁴⁶

2.3.5 Propad studeného vzduchu (angl. downburst)

V kapitole o konvektivních buňkách bylo pojednáváno o studených sestupných proudech vzduchu na zadní části kumulonimbu, jež jsou doprovázeny vypadáváním srážek. V některých případech může studený vzduch krátkodobě zesílit, po dopadu na zem se začne roztékat do všech stran a vyvolá silný nárazovitý vítr s ničivými účinky. Sestupný proud bývá často neviditelný, což představuje výrazně větší nebezpečí pro letouny a jejich posádku. Podle horizontálního rozsahu větru se downburst dělí na macroburst a microburst.

Macroburst se vyznačuje větším horizontálním rozměrem než microburst, a to průměrem přesahujícím 4 km. Rychlost větrů dosahuje rychlosti až $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a trvají povětšinou 5 až 30 minut.

Naproti tomu microburst se vyznačuje horizontálním průměrem nepřesahujícím 4 km s výrazně kratší dobou trvání, a to 2 až 5 minut. Rychlost větru u středu roztékání přesahuje $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Průvodními jevy microburstu jsou silná turbulence vyvolaná silným stříhem větru. Kvůli svým malým rozměrům a krátké době trvání je velice obtížné, někdy i nemožné jej detekovat, a proto je často spojován s četnými leteckými nehodami.⁴⁷



Obr. 14 Propad studeného vzduchu – microburst [32]

Pilot prolétávajícím microburstem ze začátku pocítuje zvýšení vzlaku a mírnou stoupavost letounu, na kterou zcela přirozeně reaguje potlačením. Letoun se dostává do fáze, kdy na něj

⁴⁶ Srov. KRÁČMAR, Jan. Meteorologie (050 00). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-447-8. Str. 188-190.

⁴⁷ Srov. Ničivé větry v bouřkách způsobuje downburst. [online]. 2017 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/downburst-28.8.2017/>

začíná působit proud studeného vzduchu vystupující ze základny kumulonimbu a klesá ještě rychleji, malý vztlak a nízká rychlost letounu má za následek ztrátu kontroly řízení a může dojít ke katastrofě (viz obr. 14).

K leteckým nehodám kvůli microburstu dochází zejména při vzletnutí nebo přistávání letounů v blízkosti konvektivní bouře. Microburst se rozlišuje na vlhký, při kterém spadne více než 25 mm srážek nebo radarová odrazivost je větší než 35 dBZ a suchý, při kterém nedochází k vypadávání srážek.⁴⁸

2.4 Srážky

Padající srážky významně omezují letecký provoz, zejména snižují dohlednost, mohou být příčinou námrazy a dochází při nich k chybné indikaci letových přístrojů.

Přítomnost vodních kapek v oblaku nastává tehdy, dosáhne-li oblak takového vertikálního rozsahu, aby se v něm teplota vzduchu pohybovala od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aby mohly vznikat srážky, musí dojít k nasycení vzduchu vodní párou, proto je nutné, aby byl vzduch ochlazen na teplotu rosného bodu. Nezbytným předpokladem je přítomnost kondenzačních jader⁴⁹ v ovzduší. Při teplotě rosného bodu se molekuly plynu H_2O začínají shlukovat do velkých kapek. Ty se postupně zvětšují až do okamžiku, kdy je výstupné proudy nedokážou udržet v atmosféře a začínají vypadávat z oblaku v podobě srážek.⁵⁰

2.5 Kroupy

Kroupy jsou kulové, kuželovité i nepravidelné ledové částice, jejichž průměr dosahuje od 5 mm do 50 mm. Kroupy se vyvíjejí ve vertikálně mohutných oblacích druhu kumulonimbus. Jejich vývoj je podmíněn vznikem tzv. zárodku kroupy, kterým je velká kapka nebo ledový krystal. Kroupy rostou zachycováním přechlazených vodních kapek a namrzáním na povrchu kroupy, proto jsou v jejich řezu patrné vrstvy, jak během pádu k zemi nabíraly na objemu. Největší oficiální kroupa dosahovala maximálního obvodu 44 cm a vážila 766 g. Kroupy o větších rozměrech mohou představovat vážné nebezpečí pro letouny, které se vyskytují v oblasti vzniku krup. Střet letounů s kroupami může mít za následek zničení krytu povětrnostního radaru (radome) nebo čelního skla kabiny.⁵¹

⁴⁸ Srov. ŘEZÁČOVÁ, Daniela. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007. Gerstner. ISBN 978-80-200-1505-1. Str. 454-458.

⁴⁹ Aerosolové částice, které mají vhodné vlastnosti k tomu, aby se staly centry kondenzace vodní páry. Bez jejich přítomnosti by bylo potřeba tak velké přesycení, které se v přírodních atmosférických podmínkách prakticky nevyskytuje.

⁵⁰ Srov. KRÁČMAR, Jan. Meteorologie (050 00). Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-447-8. Str. 108 násl.

⁵¹ Srov. DVOŘÁK, Petr. Letecká meteorologie. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5. Str. 188.

3 Bouřky a jejich předpovědi

Metody předpovědi bouřky se liší podle délky předpovědního intervalu. Předpověď na 1 až 2 dny vychází z předpovědi termobarického pole, na kratší předpovědi se využívá například metoda částice nebo vrstvy vtahování. Pro předpověď na velmi krátkou dobu, okolo 2 až 6 hodin, lze využít radiolokační pozorování.

3.1 Čtyřvrstvá metoda

Za zmínku stojí ryze česká čtyřvrstvá metoda vyvinutá leteckým meteorologem Jiřím Förchtgotten v průběhu šedesátých let 20. století, která vychází z hodnot teploty vzduchu a teploty rosného bodu ve standardních izobarických hladinách. Pomocí indexů instability pro čtyři hladiny 850-700 hPa, 850-500 hPa, 850-400 hPa a 850-300 hPa lze předvídat jak druh, tak i výraznost konvektivních jevů.³ Indexy v sobě zahrnují stabilitu troposféry, vliv vlhkosti středních hladin i deficit konvektivní teploty při povrchu. Z teploty v hladině 850 hPa a teploty rosného bodu u povrchu země se vypočte tzv. opravená teplota, z níž je následně počítán nasyceně adiabatický výstup do hladin 700, 500, 400 a 300 hPa. Rozdílem takhle vypočtených čtyř teplot se dostanou čtyři hodnoty indexů, ke kterým je přiřazen index N v rozmezí 0 až 9, který indikuje intenzitu konvekce a sílu bouřek. Na grafu aerologického měření jsou uváděny hodnoty instability, čili předpoklady bouřek podle různých autorů.⁵²

Již déle než půl století se ke sledování a prognóze bouřek ve velké míře využívá metod družicové a radiolokační meteorologie.

3.2 Družicová meteorologie

Meteorologické družice patří do speciální kategorie umělých družic Země, které získávají, zpracovávají a vyhodnocují údaje o stavu atmosféry, popřípadě zemského povrchu a mořské hladiny. Družicová měření poskytují informace o rozložení oblačnosti a jejích základních vlastnostech, jako je mikrofyzikální složení, jasová teplota horní hranice oblačnosti, optická mohutnost, typ oblačnosti, proudění v atmosféře či teplota hladiny moří a oceánů.³

Všechny meteorologické družice pracují v režimu pasivního snímání záření, které pochází ze zemského povrchu a horních vrstev oblačnosti. Záření je odražené nebo rozptýlené sluneční záření ve viditelném infračerveném spektru, nebo tepelné záření.⁵³

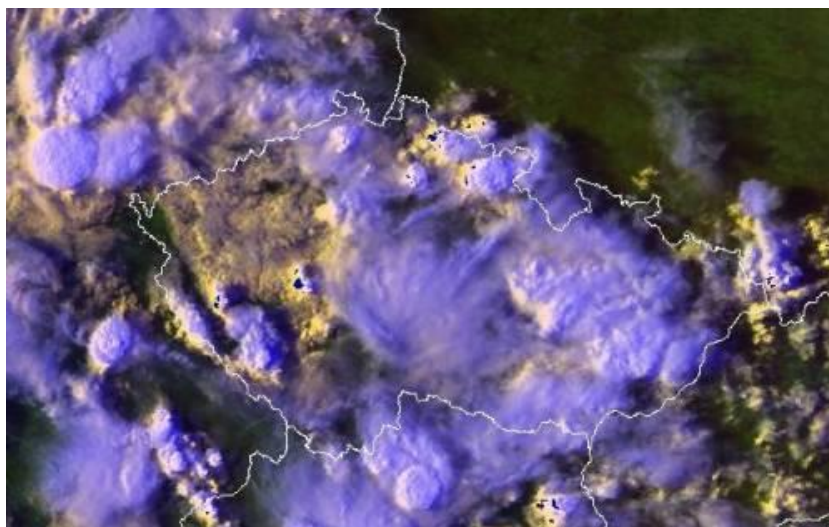
⁵² Srov. Meteorologické zprávy: Meteorological Bulletin. 73-2020. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2020. ISSN 0026-1173.

⁵³ Srov. ŘEZÁČOVÁ, Daniela. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007. Gerstner. ISBN 978-80-200-1505-1. Str. 314.

První družice vyslaná na oběžnou dráhu byla družice TIROS-1 v roce 1960, která byla na oběžné dráze 2 měsíce a 18 dní a sloužila pro experimentální účely. Pro její velikou úspěšnost se v následujících desetiletích vysílalo na oběžnou dráhu stále více meteorologických družic. První evropská družice nesla název Meteosat-1 a jednalo se geostacionární družici (viz níže). Na oběžné dráze rozeznáváme dvě základní skupiny operativních družic.

Družice operující na nízkých drahách (angl. Low Earth Orbit – LEO) s výškou 600 až 1 500 km, někdy také nazývány polární družice, neboť při každém obletu přelétávají přes polární oblasti.⁵⁴

Do druhé skupiny patří družice geostacionární, na geostacionární dráze, jejíž kruhová dráha o poloměru 42 168 km se shoduje s rovinou zemského rovníku.³ To má za následek, že družice zdánlivě „visí“ nad pevným místem na zemském povrchu ve výšce 35 790 km. Tyto družice jsou rovnoměrně rozmístěny kolem Země, aby jim byl pokryt celý zemský povrch přibližně do 70. stupně severní a jižní zeměpisné šířky. Ve vyšších zeměpisných šířkách mají družice příliš šikmý úhel snímání a jsou nepoužitelné. Evropu pokrývají družice Meteosat druhé generace (angl. Meteosat second generation - MSG).⁵⁵



Obr. 15 Družicový snímek bouřkového oblaku ve stadiu vývoje [28]

3.3 Radiolokační meteorologie

Meteorologické radiolokátory neboli radary se dnes hojně využívají k pozorování velkých ploch, řádově stovek kilometrů, oblačnosti, srážek, mlh a jiných aerosolů, někdy i oblastí turbulence a inverze. Největší význam mají radiolokátory při určování poloh bouřkových

⁵⁴ Srov. Radary a družice. Meteo aktuality [online]. [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.pocasimeteoaktuality.cz/meteorologie/radary-a-druzice/>

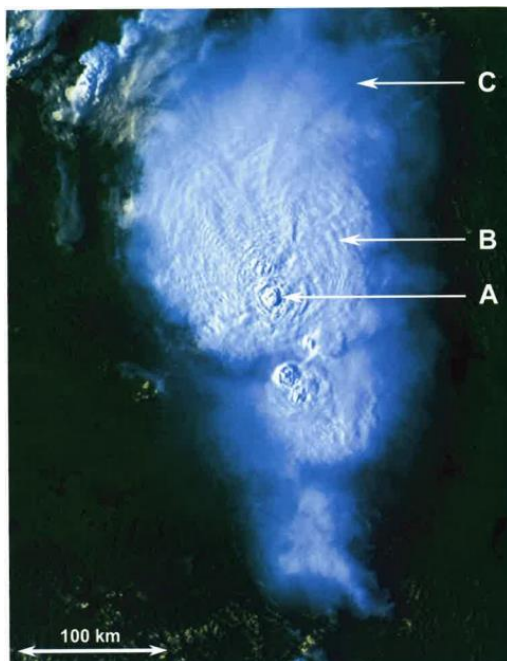
⁵⁵ Srov. ŘEZÁČOVÁ, Daniela. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia, 2007. Gerstner. ISBN 978-80-200-1505-1. Str. 299 a 315.

oblastí, jejich intenzitu a postup. Dopplerovský radar navíc měří radiální složky rychlosti cíle vůči radaru na základě změny frekvence vráceného signálu prostřednictvím měření jeho fáze, a proto se využívá k určování síly turbulence v konvektivní oblačnosti.⁵⁴

V České republice se meteorologické radiolokátory začaly využívat koncem šedesátých let 20. století. První radiolokátor TESLA RM-2 byl nainstalován v Praze-Libuši v roce 1969 a byl používán od roku 1971.⁵⁴

K vyhodnocování se využívá zobrazení odrazů v horizontální rovině na kruhovou obrazovku. Vertikální rozsah konvektivní oblačnosti se určuje pomocí metody vertikálních řezů, kdy je anténa radiolokátoru zajištěna v konstantním azimutu⁵⁶ při rovnoměrných změnách vertikálního úhlu.

Odrazové oblasti bouřek uvnitř vzduchových hmot jsou většinou rozmístěny po celé obrazovce a jejich rozměr je zpravidla menší než rozměr frontálních bouřkových oblaků. Horizontální průřez těchto odrazů má povětšinou kruhový tvar, jehož průměr nepřesahuje 5 km. Na obrazovce lze sledovat jednotlivá vývojová stadia bouřkového oblaku. Cyklus trvání jednoho odrazového centra bývá kolem 10 až 30 minut, cyklus skupiny center se pohybuje v mezích 1 až 2 hodiny.⁵⁷



Obr. 16 Konvektivní bouře zachycená meteorologickou družicí [9]
A – přestřelující vrchol
B – vertikálně silná část kovádliny bouře (s gravitačními vlnami)
C – opticky řídká část kovádliny

⁵⁶ Azimut je vodorovný úhel mezi vertikální rovinou obsahující daný směr a rovinou místního poledníku.

⁵⁷ Srov. ZELENÝ, K., Z. PROCHÁZKA, J. ŠTEKL, P. KNÁPEK, S. DUCHÁČ, L. KUTÝ, J. HUTZ a J. MAZOCH. Let za ztížených povětrnostních podmínek. Praha: Naše vojsko, 1963. Str. 100 násl.

4 Bouřky na území České republiky

Všeobecně se dá říct, že směrem od západu k východu nabývá počet dní s bouřkou. Nejméně často jsou bouřky pozorovány v oblasti Plzeňské pánve, na západní straně Brd, v Českobudějovické a Třeboňské pánvi, na Doksanské plošině a v okolí Olomouce. Naopak největší počet dnů s bouřkou je pozorován v okolí Jizerských hor, Krkonoš, Orlických hor, ve východních svazích Bílých Karpat a na Moravě.⁵⁷

4.1 Pozorování bouřek na meteorologických stanicích

Každá bouřka má pořadové číslo počítané od začátku kalendářního roku, s výjimkou bleskavice⁵⁸, jenž se nečísluje. V případě, že při přechodu přes stanici se vzdálená bouřka mění v blízkou a poté opět na vzdálenou, značí se pouze jedním číslem a je považována za jednu bouřku. Pokud bouřka probíhá přes půlnoc, pokračuje záznam o bouřce v následujícím dni se stejným pořadovým číslem.

U bouřek sledujeme několik charakteristik: vzdálenost od místa pozorování, časové údaje (začátek a konec bouřky), tah, intenzitu, hlavní náraz větru a škody, které byly bouřkou způsobené.⁵⁹

4.1.1 Vzdálenost bouřky od stanice

Vzdálenost bouřky od stanice se určuje podle počtu sekund, které uplynou mezi bleskem a hřměním. Bouřky tedy dělíme na:

- 1) blízké bouřky (na stanici) (BB) – do 10 sekund
- 2) vzdálené bouřky (BV) – od 10 do 15 sekund
- 3) velmi vzdálené bouřky (BVV) – nad 15 sekund

Blízká bouřka je taková, při které se vyskytne alespoň jeden blesk blíže než 3 km od místa pozorování. Vzdálené bouřky dělíme na bouřky vzdálené do 5 km od místa pozorování a na bouřky vzdálené více, než 5 km. Největší vzdálenost bouřky závisí na hladině akustického šumu a na síle a směru větru.⁵⁹

4.1.2 Doba trvání bouřky

Bouřka začíná v čase prvního zahřmění s přesností na 5 minut a končí s posledním zahřměním s přesností na 15 minut.

⁵⁸ Blesky, při kterých není slyšet hřmění, zpravidla při velmi vzdálených nočních bouřkách.

⁵⁹ Srov. ŽIDEK, D. a P. LIPINA. Návod pro pozorovatele srážkoměrných stanic. Ostrava: Český hydrometeorologický ústav, 2003. Str. 5-12.

4.1.3 Tah bouřky

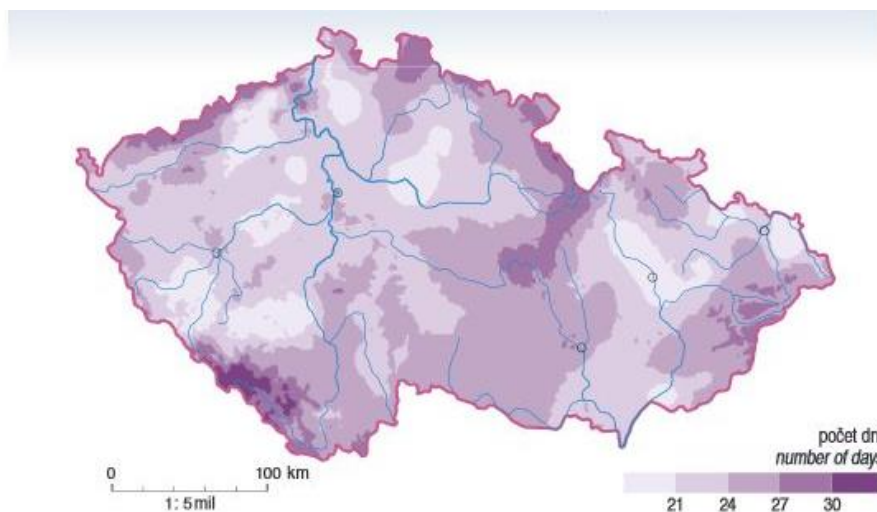
Jedná se o směr, kterým se pohybuje bouřkový oblak (např. 260-80). V praxi je možné se setkat s bouřkou, která vznikne a bez pohybu zanikne na stejném místě, v takovém případě tah bouřky neexistuje. Na území České republiky převládá tah bouřky od západu na východ.⁵⁹

4.1.4 Intenzita bouřky

Intenzita bouřky se určuje podle síly a počtu elektrických výbojů blízké či vzdálené bouřky. Rozlišujeme tři stupně intenzity: slabou (0), mírnou (1) a silnou (2).

4.1.5 Hlavní náraz větru

U hlavního nárazu větru se zaznamenává směr větru v desítkách stupních, rychlost větru a čas jeho výskytu. Bouřky jsou často doprovázeny silným větrem, některé i húlavou s ničivými účinky. Do poznámek se uvádí, zda bouřku doprovázela húlava, popřípadě jaké škody způsobila.⁵⁹



Obr. 17 Průměrný roční počet dní s bouřkou v České republice v období 1981-2000 [10]

4.2 Bouřky v letech 1961-2020

Jedním z cílů této práce je zhodnotit výskyt bouřek na území České republiky z dlouhodobého pohledu v letech 1961 až 2020. Pro tento účel byla nutná data, která poskytl Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ).

Průměrný roční počet dní s bouřkou v uvedeném šedesátiletí se pohybuje od 19 na stanici v Košetících až do 31 na stanicích v Holešově a Churáňově. Nejvyšší počet dní s bouřkou (51 dní) byl na stanicích Lysá Hora a České Budějovice zaznamenán v 2002. Minimum bylo na stanicích Hradec Králové (4 dny) v roce 2016 a Pardubice (6 dní) v roce 1969.

Příloha 1 obsahuje grafy znázorňující počet dní s bouřkou v jednotlivých krajích. Hodnoty v grafech se velice podobají a ze statistického ani věcného hlediska nemají příliš velkou váhu, protože v každém kraji je jiný počet meteorologických stanic a pozorování není dostatečně přesné. Přesnější a pro letectví přínosnější je srovnání bouřkových situací na letištích v kap. 5, které díky profesionálním meteorologickým stanicím přímo na letištích vykazují směřodatnější výsledky.

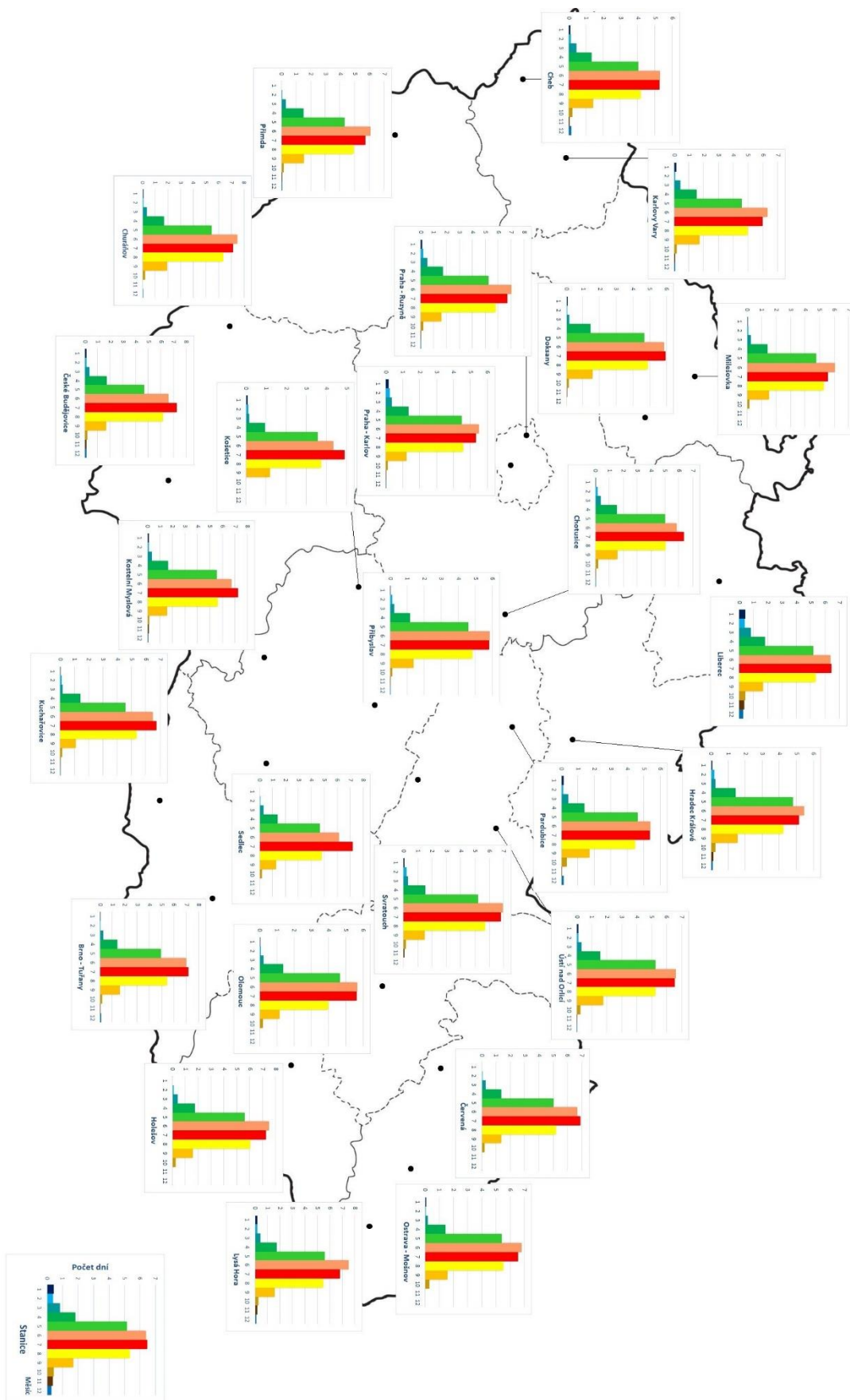
Na obr. 18 je znázorněn průměrný měsíční počet dní s bouřkami, z něhož je patrné, že k většině bouřek (až 96 %) dochází v letním půlroce od dubna do září. Bouřková aktivita začíná narůstat v dubnu a v červnu vrcholí. Bouřky jsou celoroční jev, ačkoliv zimní bouřky nejsou časté. V našich zeměpisných šířkách nejsou neobvyklým jevem, jak můžeme vidět především na stanici v Liberci, kde se zimní bouřky vyskytují nejčastěji. Tyto případy jsou řídké a velmi obtížně se předpovídají. V tomto období jsou bouřky spojeny se studenými frontami, a proto se nejčastěji pozorují v noci. Vznikají většinou v rychlém severním až severozápadním proudění v mořském arktickém vzduchu a mají velmi krátké trvání.

Denní chod bouřkové činnosti vrcholí v odpoledních hodinách kolem 15 hodin, kdy jsou zvláště v letním období při konvekci nejvhodnější podmínky pro jejich vznik a vývoj. Minimum připadá na dobu od 7 do 8 hodin. Většina bouřek (až 60 %) probíhá mezi 12 a 18 hodinou. Výjimkou jsou horské oblasti, kde maximum výskytu bouřek nastává dříve než v rovinatých oblastech.⁶⁰

Bouřky vyskytující se ve dne trvají kratší dobu než bouřky vyskytující se v noci. Přes 55 % všech bouřek trvá méně než jednu hodinu a 4 % bouřek trvá déle než 3,5 hodiny. Na době trvání bouřky má vliv vzrůstající nadmořská výška, se kterou se prodlužuje průměrná doba trvání bouřek.

Průměrné rychlosti postupu bouřek se pohybují okolo $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a mohou být ovlivněny většími řekami, rybníky či jezery až takovým způsobem, že dochází ke slábnutí bouřkové činnosti nebo k úplnému úpadu, po přechodu vodní hladiny se bouřka naopak může obnovit. Maximální nárazy větru v bouřkách se pohybují v širokém intervalu, dosahují hodnoty až $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Průměrné maximální nárazy větru dosahují hodnoty $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, k nejsilnějším nárazům větru dochází na meteorologické stanici Milešovka, kde průměrná rychlost větru přesahuje $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a kde nejsilnější náraz větru měl hodnotu $46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($165 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) dne 6. 8. 2013. Naopak stanice s nejnižšími průměrnými nárazy větru se nacházejí v Sedlci, kde nárazy větru průměrně nepřesáhnou ani $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

⁶⁰ Srov. TOLASZ, Radim. Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. ISBN 978-80-86690-26-1. Str. 186.



Obr. 18 Průměrný měsíční počet dní s bouřkou v České republice za období 1961-2020 [autor]

5 Bouřky na letištích LKKV, LKPR, LKTB a LKMT

Pro porovnání výskytu bouřek na našem území v letech 2001 až 2020 byla vybrána čtyři mezinárodní veřejná letiště: Karlovy Vary, Václava Havla Praha, Brno-Tuřany a letiště Leoše Janáčka Ostrava.

5.1 Počet bouřek a bouřkových dní na letištích v období 2001-2020

Z tab. 1 lze vidět rozdíly v počtu bouřkových dní na jednotlivých letištích. Na letištích LKPR a LKTB je téměř stejný počet dní s bouřkou za uvedené období. Výraznější změny jsou evidentní v tab. 2, která obsahuje celkový počet bouřek, a ze které je patrné, že letiště v Praze a Brně jsou bouřkou postižena nejčastěji a jejich provoz je tudíž častěji omezován. Tab. 3 ukazuje počet bouřek v jednotlivých měsících. Jak již bylo zmíněno v kap. 4.2, bouřky se nejčastěji v letním půlroce, především v měsících červen, červenci a srpnu, jinak tomu není ani v případě našich letišť.

Tab. 1 Počet dní s bouřkou na letištích LKKV, LKPR, LKTB a LKMT za období 2001-2020 [autor]

	LKKV	LKPR	LKTB	LKMT
Rok	Počet dní s bouřkou			
2001	18	23	24	26
2002	34	34	35	39
2003	22	23	29	23
2004	25	26	23	23
2005	22	27	27	25
2006	32	30	33	20
2007	30	34	32	26
2008	29	33	33	30
2009	29	27	29	32
2010	20	19	35	22
2011	30	34	29	31
2012	23	35	32	28
2013	19	26	24	19
2014	35	45	29	38
2015	26	21	22	28
2016	30	31	28	32
2017	38	36	26	26
2018	39	37	39	35
2019	22	30	33	41
2020	27	22	30	34
Celkem	581	628	627	608

Tab. 2 Počet bouřek na letištích LKKV, LKPR, LKTB a LKMT za období 2001-2020 [autor]

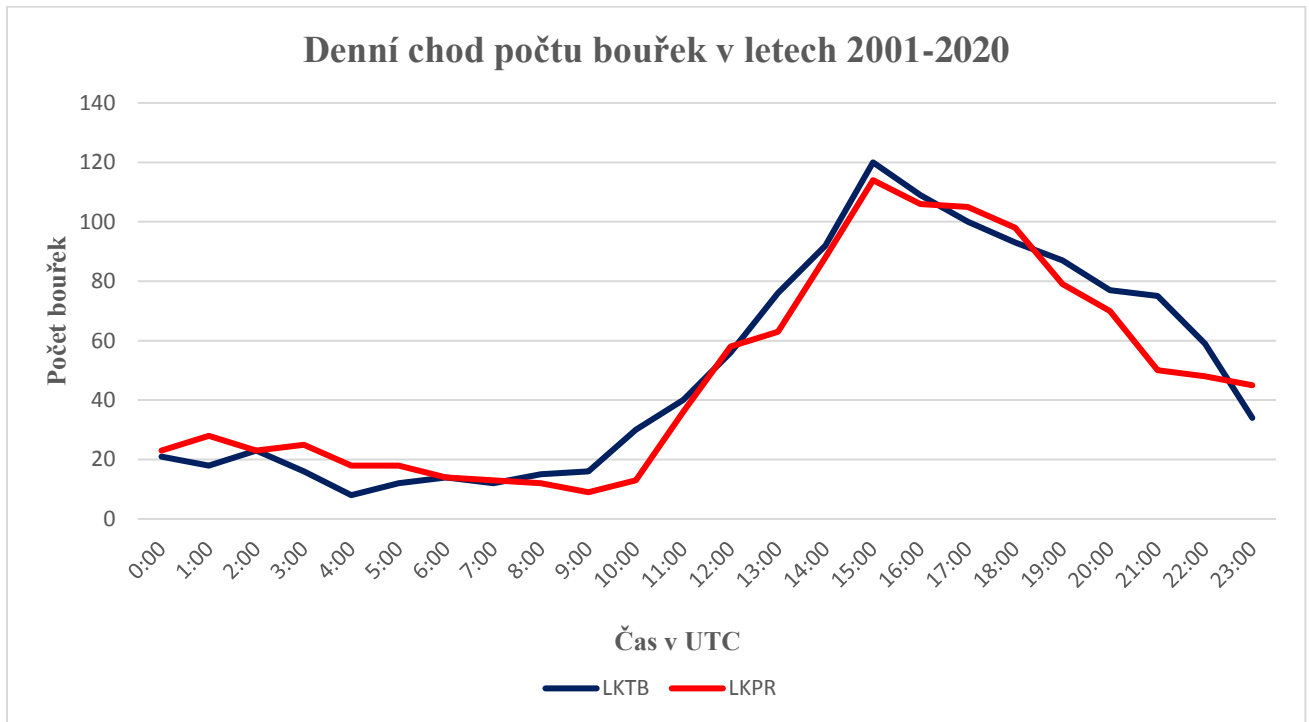
	LKKV	LKPR	LKTB	LKMT
Rok	Počet bouřek			
2001	48	74	81	46
2002	47	118	119	77
2003	53	86	120	39
2004	54	62	72	47
2005	39	67	89	41
2006	77	85	91	35
2007	83	102	101	43
2008	52	75	97	64
2009	58	73	77	51
2010	29	60	100	47
2011	50	108	78	65
2012	37	75	78	48
2013	41	80	65	32
2014	64	117	89	77
2015	58	58	53	45
2016	54	102	109	68
2017	68	139	107	53
2018	92	99	98	61
2019	38	99	99	82
2020	44	85	85	72
Celkem	1086	1764	1808	1093

Tab. 3 Počet bouřek v měsících na letištích LKKV, LKPR, LKTB a LKMT za období 2001-2020 [autor]

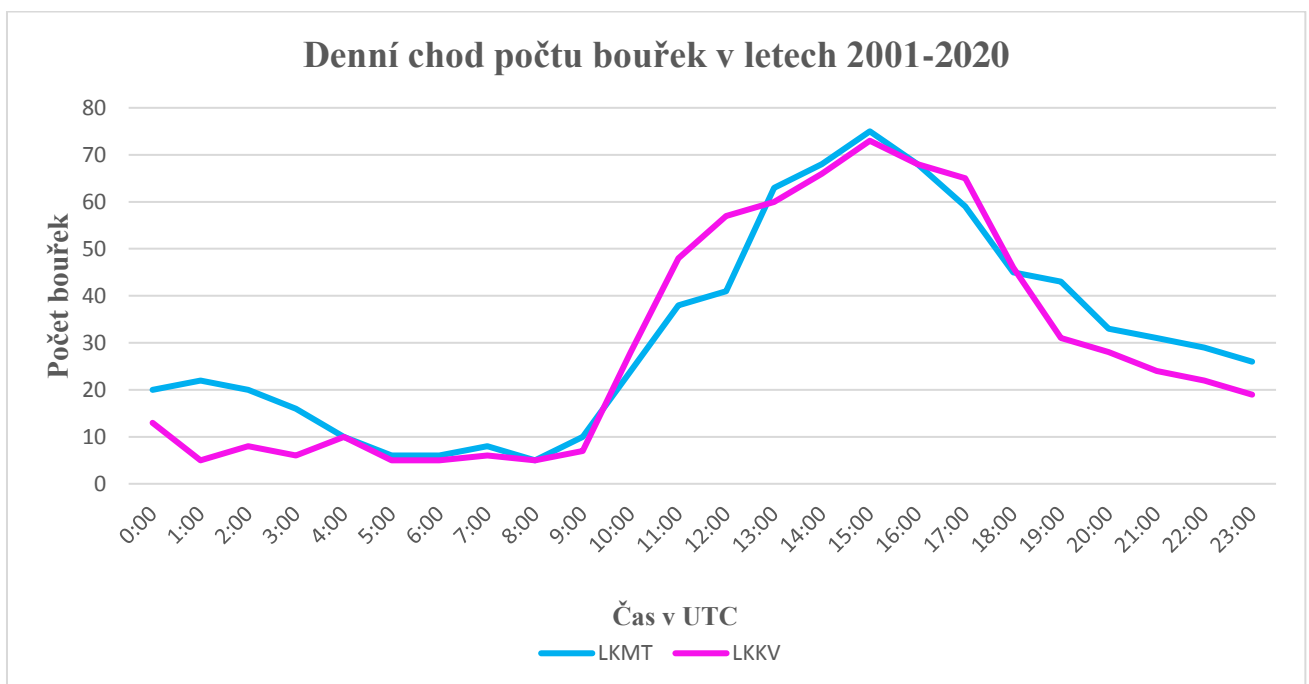
	LKKV	LKPR	LKTB	LKMT
Měsíc	Počet bouřek			
Leden	3	3	1	3
Únor	3	2	0	1
Březen	8	20	9	6
Duben	69	81	71	46
Květen	187	314	345	182
Červen	260	440	387	239
Červenec	295	481	577	310
Srpen	198	326	319	240
Září	54	80	84	55
Říjen	5	14	11	8
Listopad	2	0	0	3
Prosinec	2	3	4	0

5.2 Denní chod bouřek

Jak již bylo uvedeno, většina bouřek vrcholí v odpoledních hodinách, což lze vidět i v grafech, které představují denní chod bouřek na letištích v letních měsících (červen, červenec a srpen). Pro větší přehlednost autor uvádí grafy pro dvojice letišť, na kterých byl naměřen podobný počet bouřek.



Graf 1 Denní chod počtu bouřek na letištích LKTB a LKPR v letech 2001-2020 (červen-srpen) [autor]



Graf 2 Denní chod počtu bouřek na letištích LKMT a LKKV v letech 2001-2020 (červen-srpen) [autor]

5.3 Vzdálenost, intenzita a maximální nárazy větru v bouřkách na letištích

Tab. 4 Počet bouřek podle vzdálenosti od vybraných letišť v období 2001-2020 [autor]

	LKKV	LKPR	LKTB	LKMT
Vzdálenost	Počet bouřek			
BB	322	437	381	535
BV	235	451	448	176
BVV	529	876	979	382

BB – blízká bouřka
 BV – vzdálená bouřka
 BVV – velmi vzdálená bouřka

Bouřky se slabou intenzitou jsou nejčastější a vyskytují se v 85 %, mírné bouřky, které se vyskytovaly především na letišti LKTB a LKMT jsou méně časté a nebývá jich více než 15 % z celkového počtu bouřek (tab. 5). Ojedinělým úkazem jsou bouřky se silnou intenzitou, které jsou doprovázeny velmi silným nárazovitým větrem a ničivými účinky. Maximální nárazy větru dosahují mnohdy rychlostí přes $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($110 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). V uvedeném období měl maximální náraz větru hodnotu $38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($137 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) na letišti v Ostravě.

Tab. 5 Počet bouřek podle stupně intenzity [autor]

	LKKV	LKPR	LKTB	LKMT
Intenzita	Počet bouřek			
0	955	1623	1524	821
1	56	113	253	163
2	17	21	29	27

Tab. 6 Maximální nárazy větru naměřené na meteorologické stanici [autor]

Maximální nárazy větru	
LKKV	$28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
LKPR	$27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
LKTB	$33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
LKMT	$38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Závěr

Bouřky byly a stále jsou jedním z nejnebezpečnějších jevů v letectví, při pohledu na mohutný kumulonimbus pilotovi často jde mráz po zádech. Ačkoliv se detekce bouřek v poslední dekádě stále zkvalitňuje a pilot je na nebezpečné meteorologické situace trénován, dosud se vyskytují případy, kdy pilot podcenil letovou přípravu. Další kritické situace jsou způsobeny tím, že pilot ve snaze uspořit palivo riskuje průlet nebezpečnou konvektivní oblačností.

Tato práce se snaží výše zmíněným situacím předejít a poukázat na aspekt vzniku a následný vývoj bouřky. Teoretická část odkrývá zákulisí bouřky, za kterým se skrývají doprovázející jevy, jako je námraza, stříh větru, či tornádo, které jsou pro let nebezpečnější než bouřková elektřina.

Druhá část práce je zaměřena na předpověď a analýzu výsledků pozorování bouřek na meteorologických stanicích rozmístěných po celé České republice. Bouřková data, jako materiál ke zpracování, ochotně poskytl ČHMÚ. Rozbor těchto dat potvrdil původní domněnku: sledování bouřek podle administrativních jednotek – krajů není účelné vzhledem k rozdílnému počtu stanic v krajích a jejich orografickým poměrům. Četnosti bouřkových dní v jednotlivých krajích se od sebe příliš neliší.

Pro detailnější analýzu výskytu bouřek autor vybral čtyři mezinárodní letiště, na kterých se vyskytují profesionální meteorologické stanice. Výsledky bakalářské práce bylo možno porovnat s hodnotami uváděnými v Atlase podnebí Česka, v němž je bouřková aktivita zpracována za léta 1961-2000. Například počty dní s bouřkou se liší až o několik dnů za rok. V autorově analýze je patrná podobnost počtu bouřek (i bouřkových dní) v denním chodu na letištích Praha-Ruzyně a Brno-Tuřany, podobně je tomu u letišť Karlovy Vary a Ostrava-Mošnov. Statistika počtu dní s bouřkou na všech letištích vykazuje vysokou kolísavost z roku na rok, ve výsledku se však stále jedná o přibližně stejný počet bouřkových dní od roku 1961 až do současnosti. Roční chod bouřek po měsících potvrdil, že bouřky jsou především záležitostí letního půlroku, přesněji měsíců červen, červenec a srpen. Zatímco Atlas podnebí Česka jako měsíc s největším počtem bouřkových dní udává červen, autor zjistil, že se fakticky jedná o měsíce červen i červenec, podle toho, na které meteorologické stanici bylo pozorování prováděno.

Výsledky ukazují, že bouřková činnost z hlediska leteckého provozu není největším omezujícím faktorem letišť, regionální rozdíly jsou velmi malé, až zanedbatelné, a není proto nutná zastupitelnost letišť.

Seznam použitých zdrojů

Knížní zdroje:

- [1] I. celostátní meteorologická konference v Bratislavě 21. X. - 25. X. 1952. Praha: Státní meteorologický ústav, 1953.
- [2] BEDNÁŘ, Jan. *Meteorologie: [Úvod do studia dějů v zemské atmosféře]*. Praha: Portál, 2003. ISBN isbn80-7178-653-5.
- [3] *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2005. December 2005. ISSN 1520-0477.
- [4] ČERVENÝ, J. *Podnebí a vodní režim v ČSSR*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1984.
- [5] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie 2017*. Cheb: Svět křídel, 2017. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [6] KRÁČMAR, Jan. *Meteorologie (050 00)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. ISBN 80-7204-447-8.
- [7] *Meteorologické zprávy: Meteorological Bulletin*. 73-2020. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2020. ISSN 0026-1173.
- [8] *Meteorologický slovník výkladový terminologický: s cizojazyčnými názvy hesel ve slovenštině, angličtině, němčině, francouzštině a ruštině*. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-85368-45-5.
- [9] ŘEZÁČOVÁ, Daniela. *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia, 2007. Gerstner. ISBN 978-80-200-1505-1.
- [10] TOLASZ, Radim. *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. ISBN 978-80-86690-26-1.
- [11] VOLNER, Rudolf. *Flight planning management*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-496-2.
- [12] ZELENÝ, K., Z. PROCHÁZKA, J. ŠTEKL, P. KNÁPEK, S. DUCHÁČ, L. KUTÝ, J. HUTZ a J. MAZOCH. *Let za ztížených povětrnostních podmínek*. Praha: Naše vojsko, 1963.
- [13] ŽIDEK, D. a P. LIPINA. *Návod pro pozorovatele srážkoměrných stanic*. Ostrava: Český hydrometeorologický ústav, 2003.

Internetové zdroje:

- [14] *Atmosférické fronty* [online]. [cit. 2022-05-10].
Dostupné z: <https://elspeedo.cz/pl/e-learning/atmosfericke-fronty/>
- [15] *Bouřkové jevy* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z:
<https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/vystrahy/napoveda/bourky.html>
- [16] *Bouřkové oblaky* [online]. [cit. 2022-05-10].
Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/atmosfericke-jevy/bourkove-oblaky>
- [17] *Cumulus Clouds: Low, Puffy, Fair-weather* [online]. [cit. 2022-05-10].
Dostupné z: <https://whatsthiscloud.com/cloud-types/cumulus/>
- [18] *Cumulus congestus* [online]. [cit. 2022-04-29].
Dostupné z: <https://cloudatlas.wmo.int/en/cumulus-congestus.html>
- [19] *Cumulus mediocris* [online]. [cit. 2022-05-10].
Dostupné z: <https://cloudatlas.wmo.int/en/cumulus-mediocris.html>
- [20] *Downdrafts and lift* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z:
<http://profhorn.meteor.wisc.edu/wxwise/weather/lesson9/downburst.html>
- [21] *Družicová meteorologie* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/druzicova-meteorologie-31.10.2013/>
- [22] *Meteogalerie Amateur Stormchasing Society* [online]. [cit. 2022-05-10].
Dostupné z: <https://galerie.bourky.com/>
- [23] *Meteorologická stanice Holešov* [online]. [cit. 2022-04-29].
Dostupné z: http://www.meteo-holesov.cz/mrak_cu.html
- [24] *Meteorologický slovník* [online]. [cit. 2022-05-05].
Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/hesla>
- [25] *MSG – Meteosat druhé generace* [online]. [cit. 2022-05-10].
Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/sat/info/MSG.html>
- [26] *Ničivé větry v bouřkách způsobuje downburst* [online]. 2017 [cit. 2022-05-04].
Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/downburst-28.8.2017/>
- [27] *Radary a družice* [online]. [cit. 2022-04-29].
Dostupné z: <https://www.pocasimeteoaktuality.cz/meteorologie/radary-a-druzice/>
- [28] *Satelitní snímky* [online]. [cit. 2022-05-04].
Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/satelitni-snimky/napoveda/>
- [29] *Supercela nad Židlochovicemi* [online]. [cit. 2022-05-10].
Dostupné z: <https://violet-planet.webnode.cz/1/a26-6-2020/>
- [30] *Teorie bouřek* [online]. [cit. 2022-05-10].
Dostupné z: <https://www.bourky.cz/teorie-bourek/>
- [31] *Všeobecná cirkulace atmosféry* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z:
https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/pages/04-cirkulace.html

Nepublikované práce:

- [32] NOVOZÁMSKÝ, A. *Bouřky na letištích a za letu – pozorování a předpověď*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 65 s. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Karel Krška, CSc.
- [33] RYBA, P.: *Bouřky na letištích LKTB a LKMT a jejich předpověď*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 47 s. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Karel Krška, CSc.
- [34] SEHNALOVÁ, P. *Roční chod výskytu bouřek a bouřkových jevů v ČR*. Praha: Univerzita Karlova, Fakulta přírodovědecká, Katedra fyzické geografie a geoekologie, 2007. 46 s. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Ivan Sládek, CSc.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Význam (angl.)	Význam (česky)
°C	Degrees Celsius	stupeň Celsia
µm	micrometre	mikrometr
angl.	English	anglicky
CAPE	Convective Available Potential Energy	konvektivní dostupná potenciální energie
Cb	Cumulonimbus	Cumulonimbus
Cc	Cirrocumulus	Cirrocumulus
Ci	Cirrus	Cirrus
con	congestus	congestus
Cs	Cirrostratus	Cirrostratus
CS	Classic Supercell	slabě srážkové supercely
Cu	Cumulus	Cumulus
dBZ	Decibel relative to Z	jednotka udávající hodnotu radarové odrazivosti
g	gram - Mass unit	gram – jednotka hmotnosti
g·m ⁻³	density unit	jednotka hustoty
H ₂ O	water molecule	molekula vody
hod	hour	hodina
hPa	hectopascal - Pressure unit	hektopascal – jednotka tlaku
HP	High Precipitating	mohutně srážkové supercely
hum	humilis	humilis
inc	incus	incus
K	kelvin – unit of temperature	Kelvin – jednotka termodynamické teploty
kA	kiloampere – unit of electric current	kiloampér – jednotka elektrického proudu
kap.	chapter	kapitola
km	kilometre – unit of length	kilometr – jednotka délky
km·h ⁻¹	kilometre per hour – unit of speed	kilometr za hodinu – jednotky rychlosti

Zkratka	Význam (angl.)	Význam (česky)
$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	kilometre per second – unit of speed	kilometr za sekundu – jednotka rychlosti
LKKV	Karlovy Vary Airport	Letiště Karlovy Vary
LKMT	Leoš Janáček Airport Ostrava	Letiště Leoše Janáčka Ostrava
LKPR	Vaclav Havel Airport Prague	Letiště Václava Havla Praha
LKTB	Brno – Tuřany Airport	Letiště Brno – Tuřany
m	metre – unit of length	metr – jednotka délky
$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	metre – unit of length	metr za sekundu – jednotka rychlosti
$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$	unit indicating CAPE	jednotka udávající hodnotu CAPE
med	mediocris	mediocris
mm	millimetre – unit of length	milimetr – jednotka délky
$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	millimetre per minute – icing development unit	milimetr za minutu – jednotka vývinu námrazy
násl.	following	následující
Ns	Nimbostratus	Nimbostratus
Obr.	picture	obrázek
Tab.	table	tabulka
s	second – unit of time	sekunda – jednotka času
Srov.	comparison	srovnání
str.	page	strana
TCU	Towering Cumulus	věžovitý cumulus
TORRO	Tornado and Storm Research Organization	Organizace pro výzkum tornád
USA	United States of America	Spojené státy americké
WMO	World Meteorological Organization	Světová meteorologická organizace
⚡	storm symbol	symbol bouřky

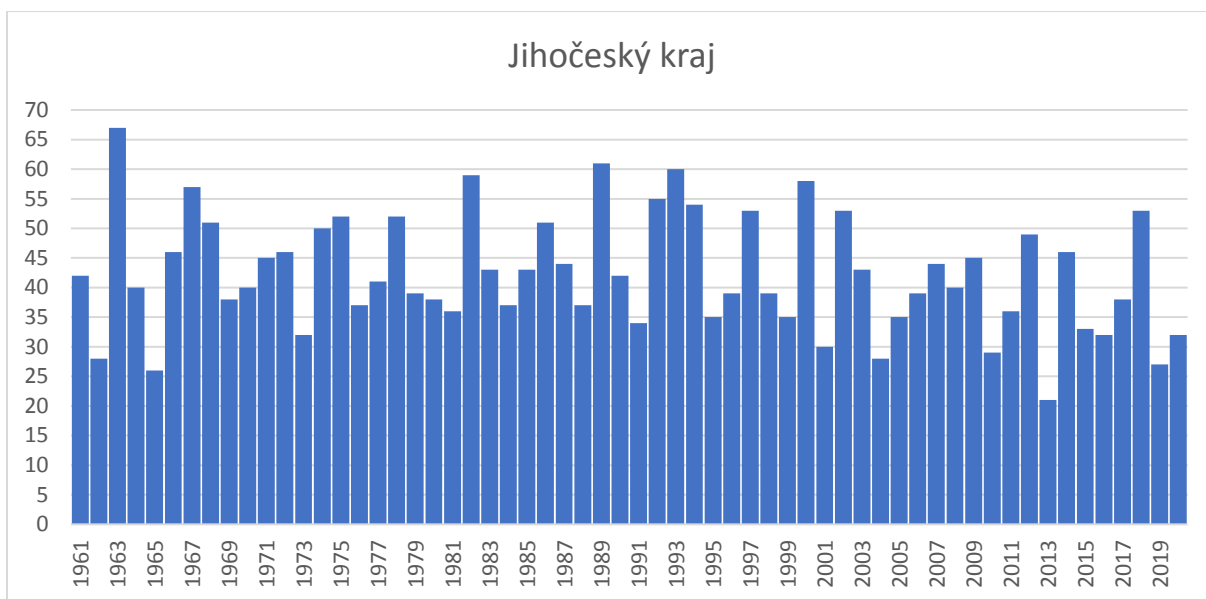
Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obr. 1 Vznik konvektivní oblačnosti	14
Obr. 2 Kumulonimbus	15
Obr. 3 Cumulus humilis	16
Obr. 4 Cumulus mediocris	16
Obr. 5 Cumulus congestus	17
Obr. 6 Vývojová stadia bouřkové buňky	20
Obr. 7 Radarový snímek supercely nad Židlochovicemi	22
Obr. 8 Vertikální řez teplou frontou	23
Obr. 9 Vertikální řez studenou frontou 1. typu	24
Obr. 10 Vertikální řez studenou frontou 2. typu	24
Obr. 11 Vertikální řez teplé okluzní fronty	25
Obr. 12 Vertikální řez studené okluzní fronta	25
Obr. 13 Typy námrazy na náběžné hraně křídla	32
Obr. 14 Propad studeného vzduchu – microburst	36
Obr. 15 Družicový snímek bouřkového oblaku ve stadiu vývoje	39
Obr. 16 Konvektivní bouře zachycená meteorologickou družicí	40
Obr. 17 Průměrný roční počet dní s bouřkou v České republice v období 1981-2000	42
Obr. 18 Průměrný měsíční počet dní s bouřkou v České republice za období 1961-2020	44
Tab. 1 Počet dní s bouřkou na letištích LKKV, LKPR, LKTB a LKMT za období 2001-2020	45
Tab. 2 Počet bouřek na letištích LKKV, LKPR, LKTB a LKMT za období 2001-2020	46
Tab. 3 Počet bouřek v měsících na letištích LKKV, LKPR, LKTB a LKMT za období 2001-2020	46
Tab. 4 Počet bouřek podle vzdálenosti od vybraných letišť v období 2001-2020	48
Tab. 5 Počet bouřek podle stupně intenzity	48
Tab. 6 Maximální nárazy větru naměřené na meteorologické stanici	48
Graf 1 Denní chod počtu bouřek na letištích LKTB a LKPR v letech 2001-2020	47
Graf 2 Denní chod počtu bouřek na letištích LKMT a LKKV v letech 2001-2020	47
Graf 3 Počet bouřkových dní v Jihočeském kraji v letech 1961-2020	57
Graf 4 Počet bouřkových dní v Jihomoravském kraji v letech 1961-2020	57
Graf 5 Počet bouřkových dní v Karlovarském kraji v letech 1961-2020	58
Graf 6 Počet bouřkových dní v kraji Vysočina v letech 1961-2020	58
Graf 7 Počet bouřkových dní v Kralovehradeckém kraji v letech 1961-2020	59
Graf 8 Počet bouřkových dní v Libereckém kraji v letech 1961-2020	59
Graf 9 Počet bouřkových dní v Moravskoslezském kraji v letech 1961-2020	60
Graf 10 Počet bouřkových dní v Olomouckém kraji v letech 1961-2020	60
Graf 11 Počet bouřkových dní v Pardubickém kraji v letech 1961-2020	61
Graf 12 Počet bouřkových dní v Plzeňském kraji v letech 1961-2020	61
Graf 13 Počet bouřkových dní v Praze a Středočeském kraji v letech 1961-2020	62
Graf 14 Počet bouřkových dní v Ústeckém kraji v letech 1961-2020	62
Graf 15 Počet bouřkových dní ve Zlínském kraji v letech 1961-2020	63

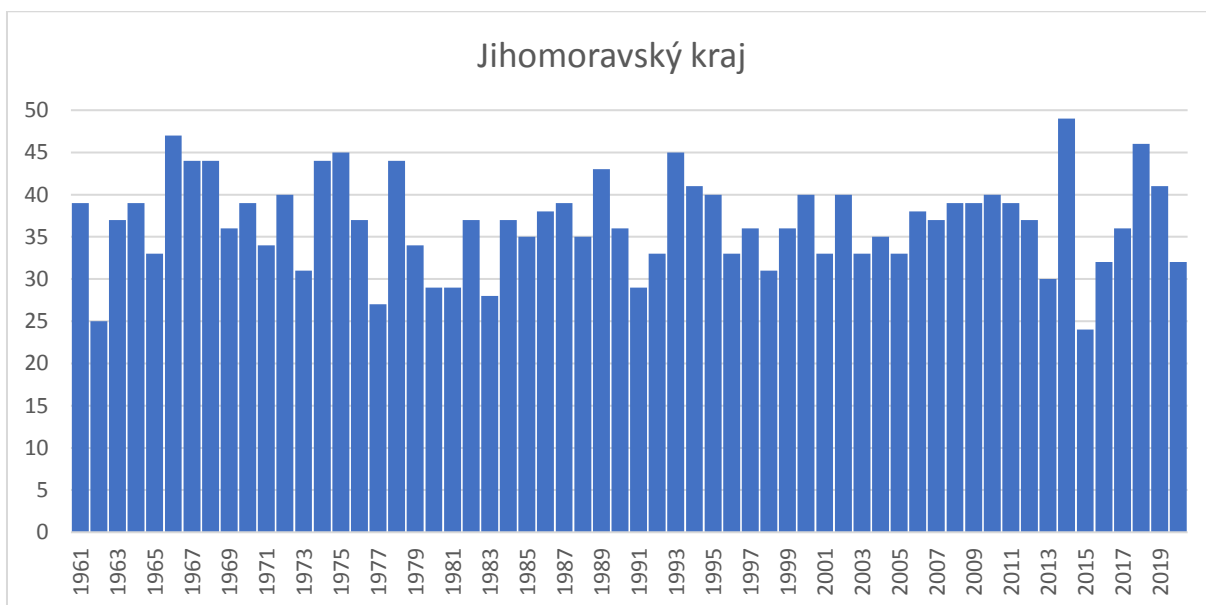
Seznam příloh

Příloha 1 Počet bouřkových dní v krajích v letech 1961-2020	57
Příloha 2 Maxima, minima a průměrné počty dní s bouřkou na jednotlivých meteorologických stanicích v letech 1961-2020	64

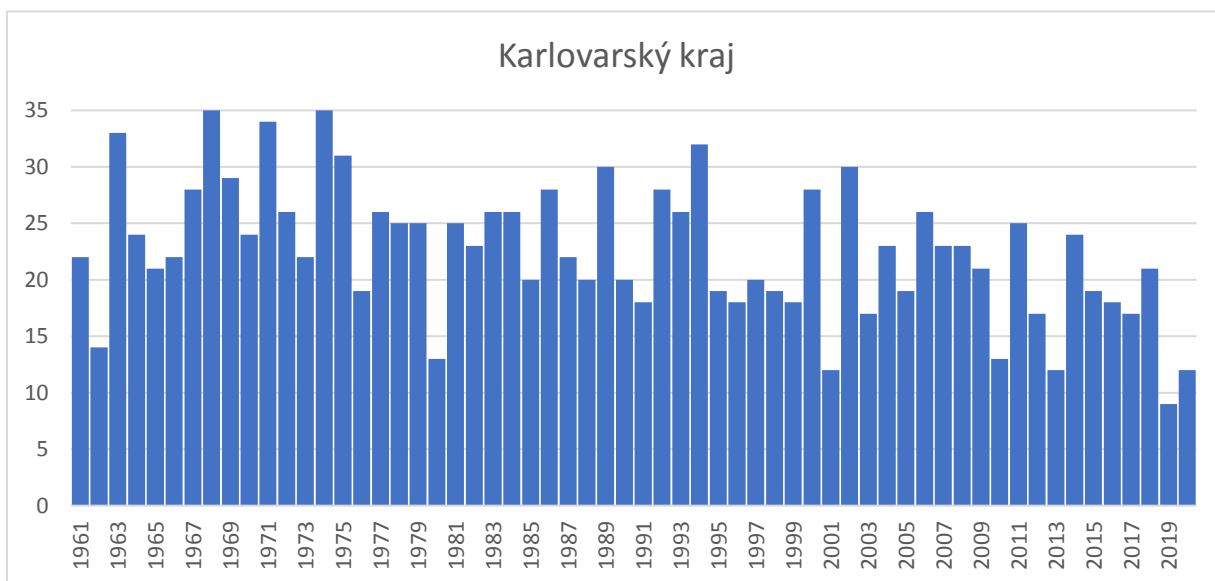
Příloha 1 - Počet bouřkových dní v krajích v letech 1961-2020



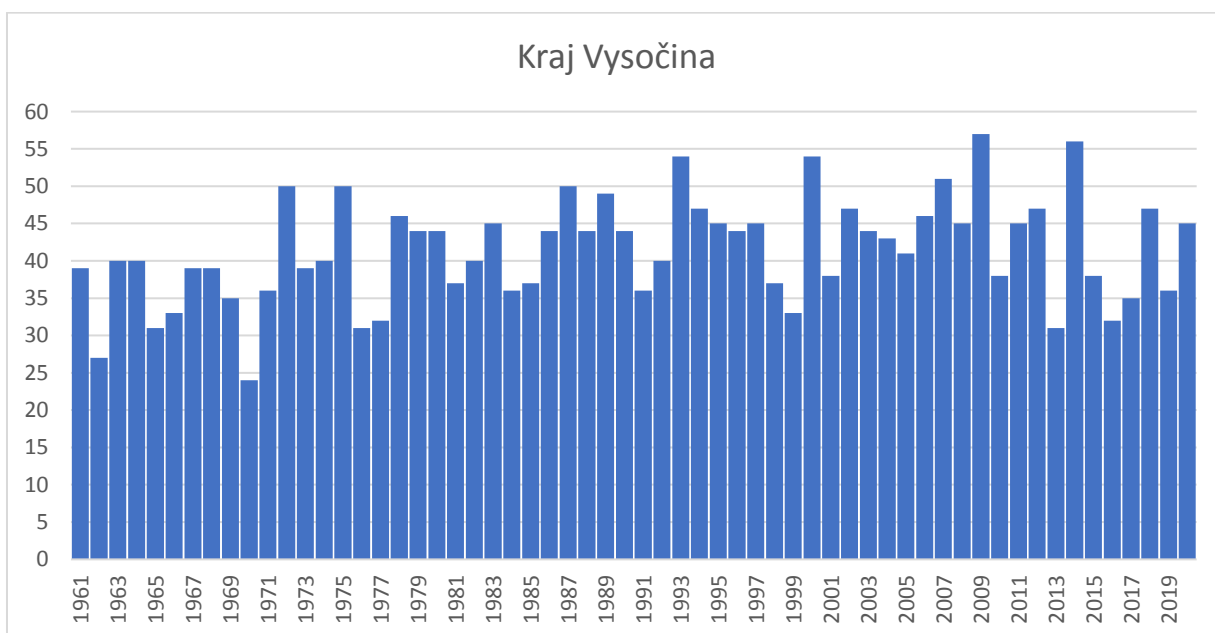
Graf 3 Počet bouřkových dní v Jihočeském kraji v letech 1961-2020 [autor]



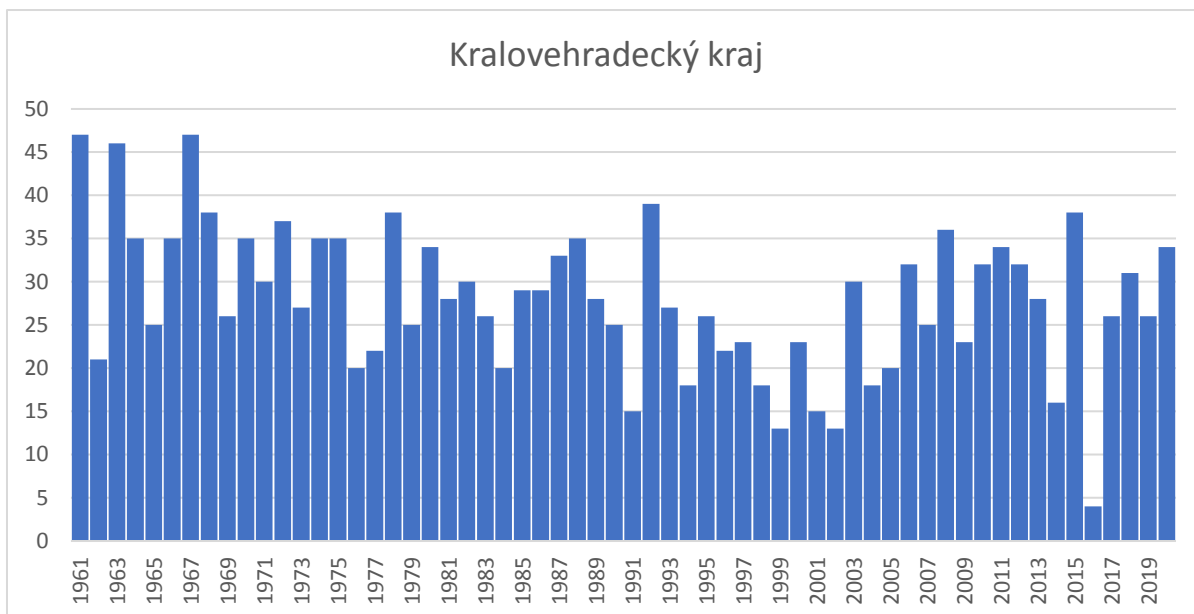
Graf 4 Počet bouřkových dní v Jihomoravském kraji v letech 1961-2020 [autor]



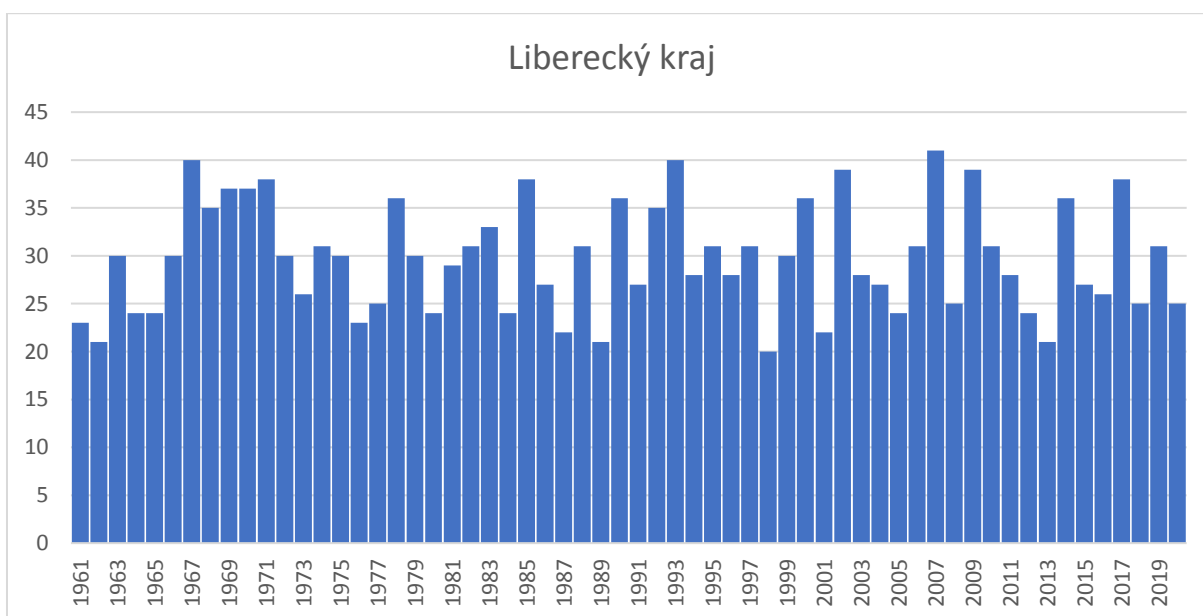
Graf 5 Počet bouřkových dní v Karlovarském kraji v letech 1961-2020 [autor]



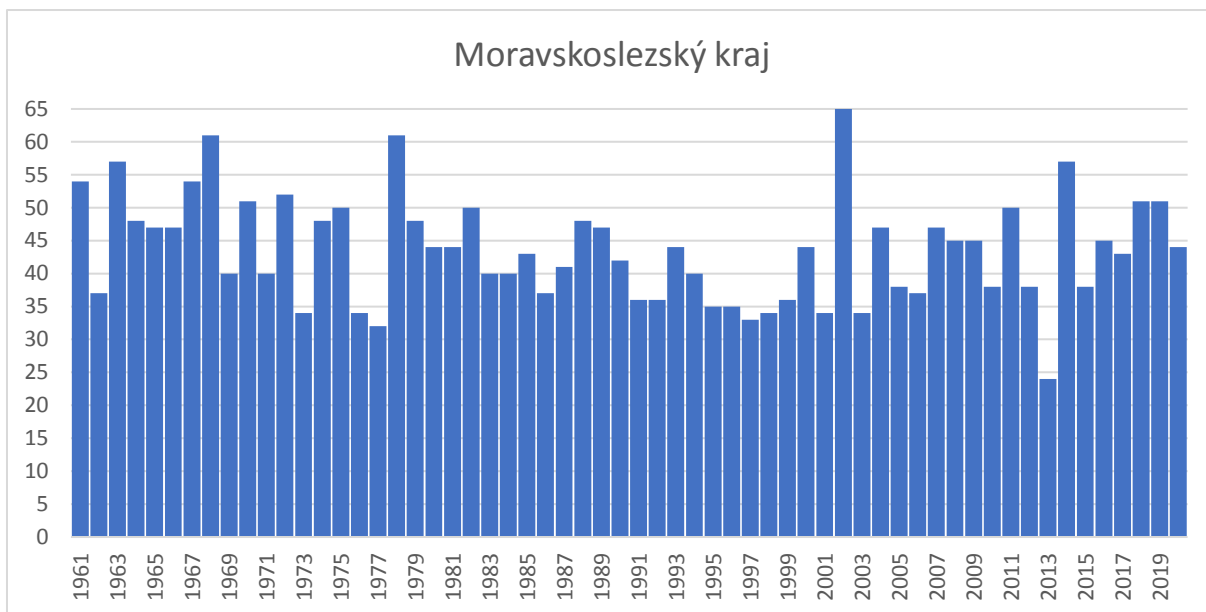
Graf 6 Počet bouřkových dní v kraji Vysočina v letech 1961-2020 [autor]



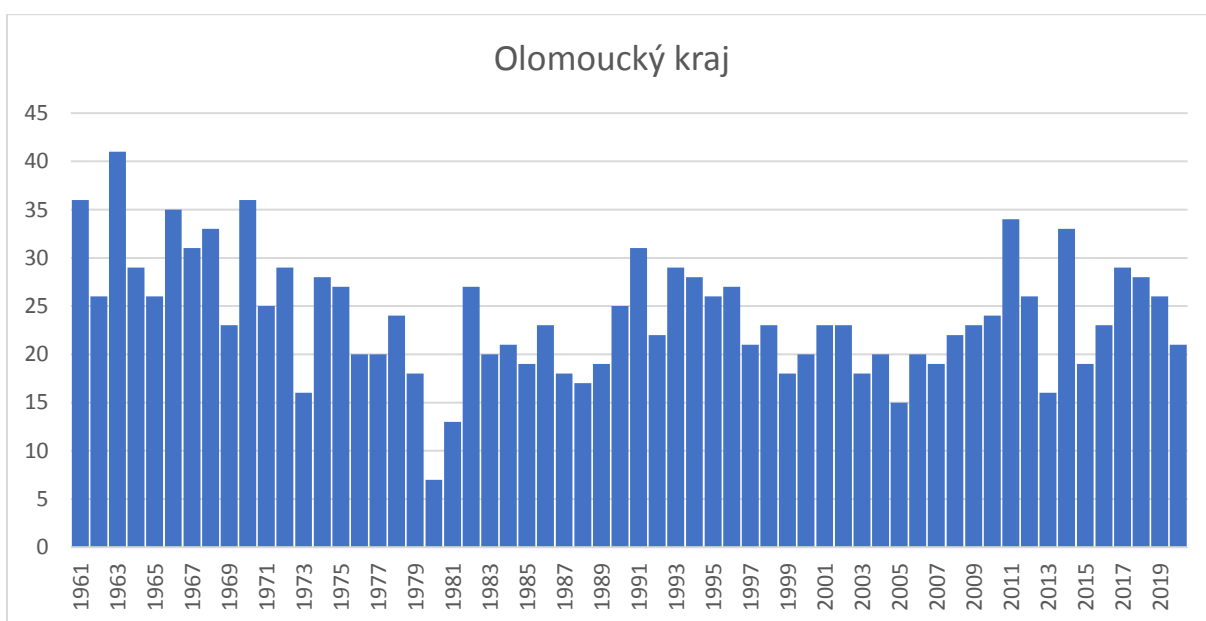
Graf 7 Počet bouřkových dní v Kralovehradeckém kraji v letech 1961-2020 [autor]



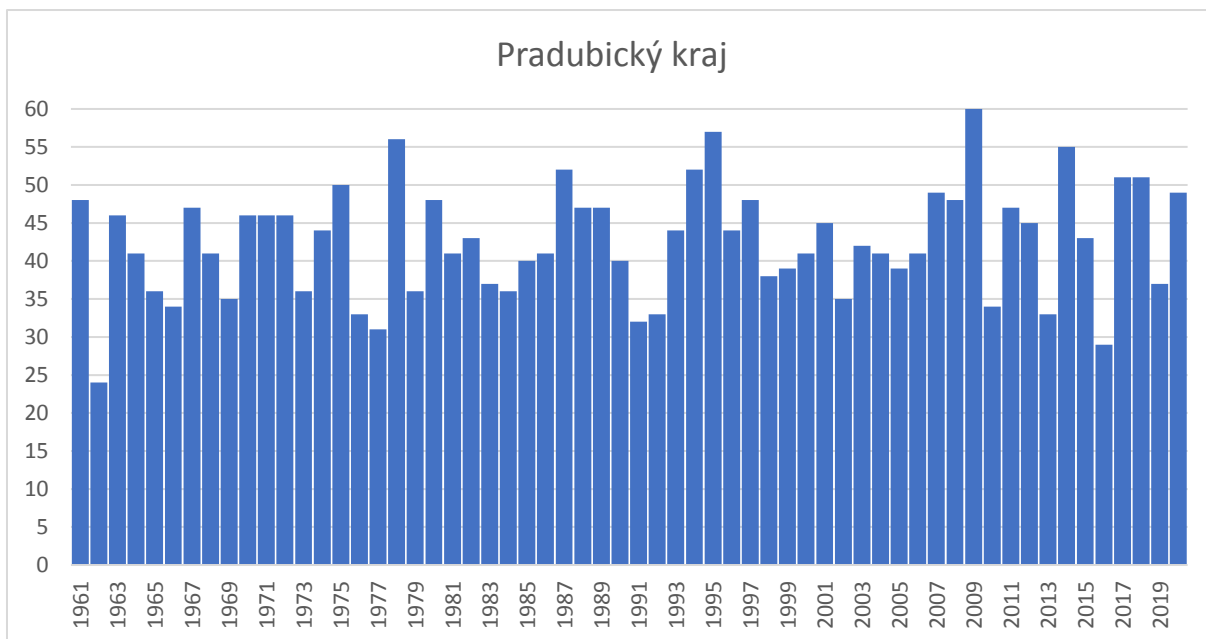
Graf 8 Počet bouřkových dní v Libereckém kraji v letech 1961-2020 [autor]



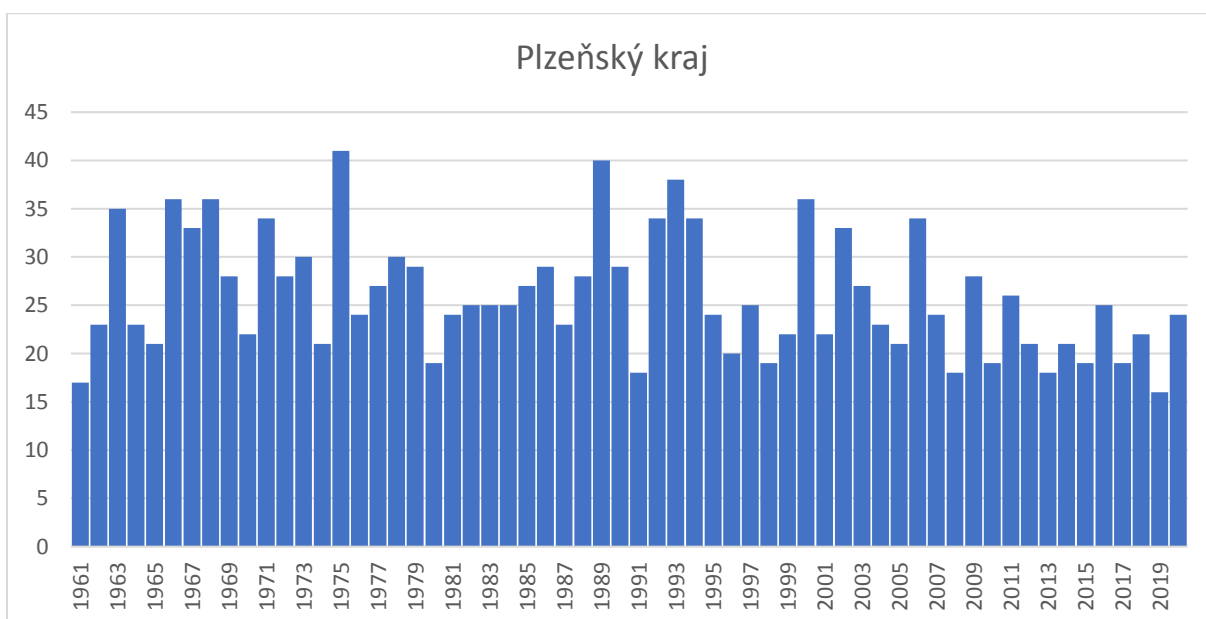
Graf 9 Počet bouřkových dní v Moravskoslezském kraji v letech 1961-2020 [autor]



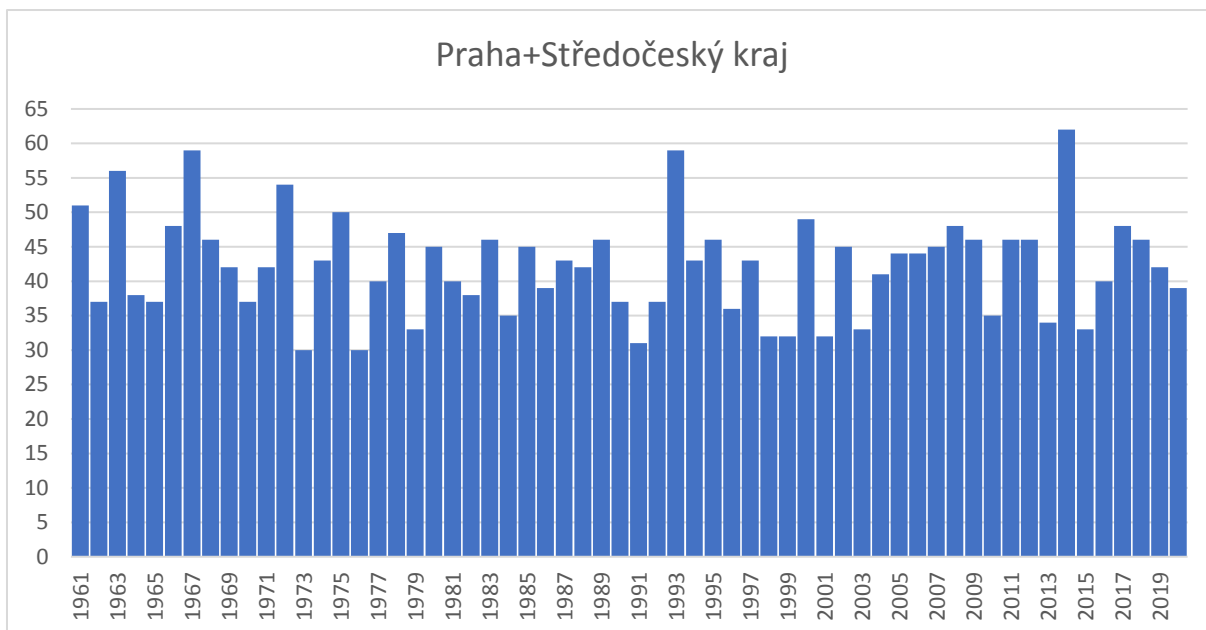
Graf 10 Počet bouřkových dní v Jihomoravském kraji v letech 1961-2020 [autor]



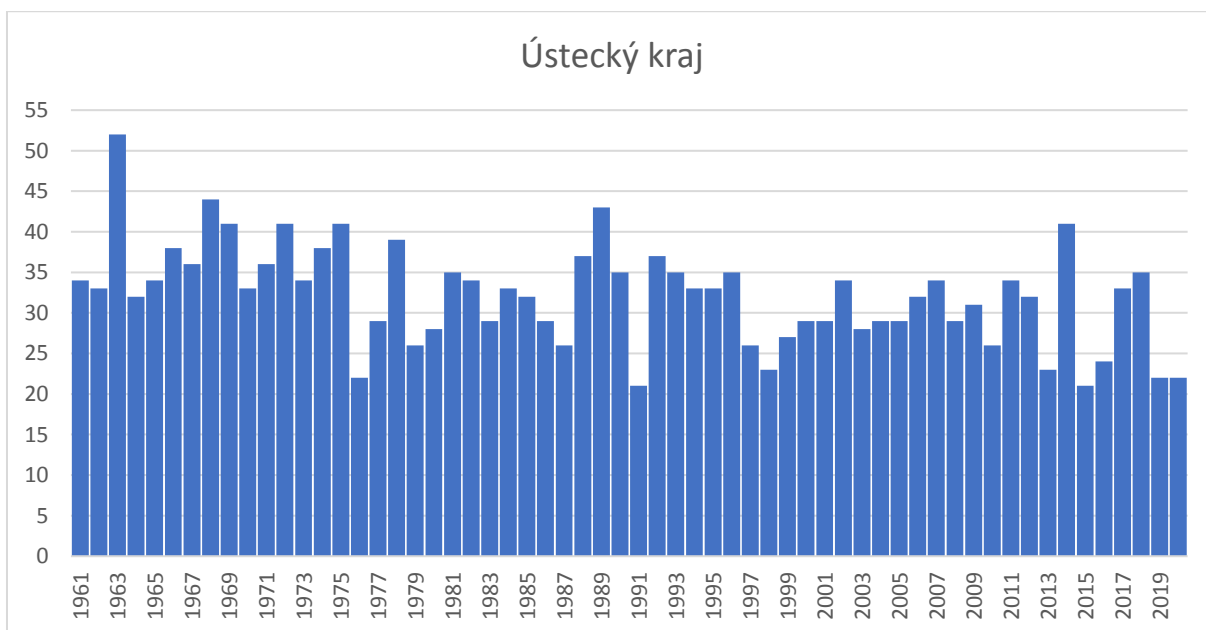
Graf 11 Počet bouřkových dní v Pardubickém kraji v letech 1961-2020 [autor]



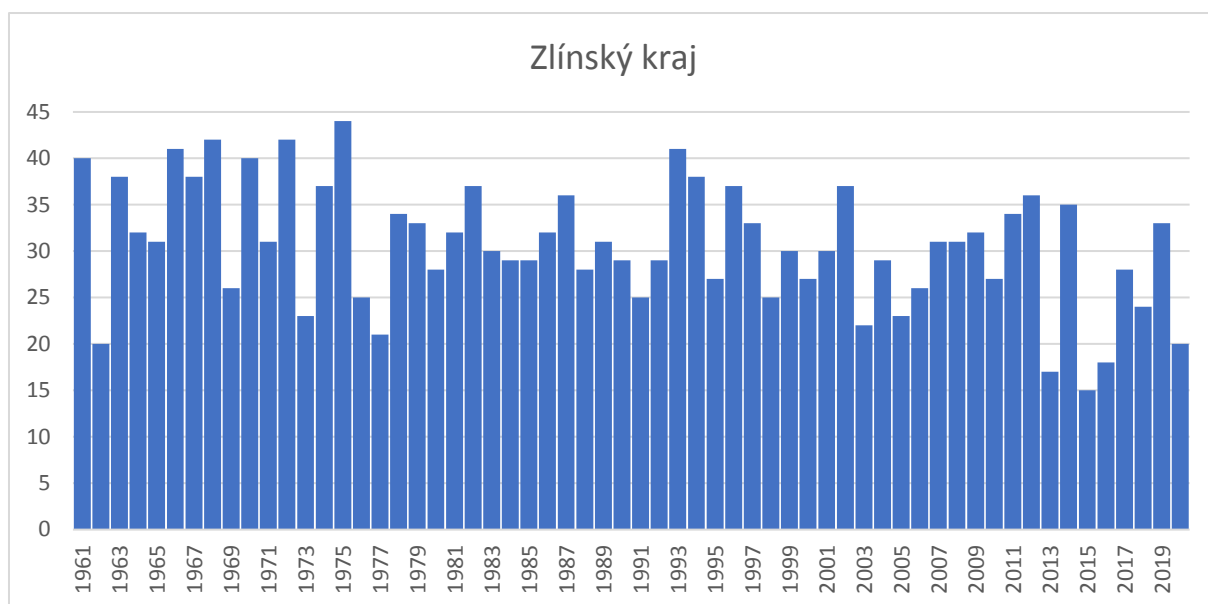
Graf 12 Počet bouřkových dní v Plzeňském kraji v letech 1961-2020 [autor]



Graf 13 Počet bouřkových dní v Praze a Středočeském kraji v letech 1961-2020 [autor]



Graf 14 Počet bouřkových dní v Ústeckém kraji v letech 1961-2020 [autor]



Graf 15 Počet bouřkových dní ve Zlínském kraji v letech 1961-2020 [autor]

Příloha 2 - Minima, maxima a průměrné počty dní s bouřkou na jednotlivých meteorologických stanicích v letech 1961-2020

