

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



NEBEZPEČNÉ JEVY - KROUPY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Jana SOUKUPOVÁ

Vypracoval: Jakub DYKAS

2013

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Dykas Jakub

Krajinářství

Název práce

Nebezpečné jevy - krupy

Anglický název

Dangerous phenomena - hail

Cíle práce

Literární rešerše na dané téma. Vznik a vývoj konvekční a frontální oblačnosti ve které se mohou vyskytovat krupy, mechanismus jejich vzniku, škody způsobené krupobitím.

Metodika

Literární rešerše dle osnovy:

1. Úvod
2. Vývoj konvekční a frontální oblačnosti a jevů s ní spojených
3. Vznik krup a jejich vývoj
4. Tvary a velikosti krup
5. Škody způsobené krupobitím
6. Ochrana proti krupobitím

Harmonogram zpracování

letní semestr 2012 - zadání práce a hledání vhodné literatury a podkladů

11/2012 kontrola práce studenta

01/2013 první verze práce - kontrola

03/2013 kompletování práce a příloh

04/2013 odevzdání práce vedoucímu práce a oponentovi

Rozsah textové části

30 stran textu + přílohy dle potřeby

Klíčová slova

kroupy, konvekce, konvektivní bouře, škody v hospodářství

Doporučené zdroje informací

Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition - 2002, James Holton, John Pyle, Judith Curry
Encyclopedia of Climate and Weather - Stephen H. Schneider, Michael Mastrandrea, Terry L. Root
Encyclopedia of Weather and Climate - Michael Allaby
A Radar-Based Assessment of the Detectability of Giant Hail - Scott F. Blair
Řezáčová Daniela - Fyzika oblaků a srážek
Atlas podnebí Česka - Radim Tolasz
Velká encyklopedie Počasí a změna klimatu
Encyklopedie počasí - William J. Burroughs
Informace a data z portálu Čhmu
Vlastní zdroje (fotky, záznamy)

Vedoucí práce

Soukupová Jana, Ing.

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.
Vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 24.9.2012

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Jany Soukupové, a že všechny prameny a literatura, ze kterých jsem pro tuto práci čerpal, jsou zde uvedeny“.

V Praze 9. 4. 2013

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval paní Ing. Janě Soukupové za vedení, věcné připomínky a užitečnou literaturu, kterou mi k této bakalářské práci poskytla.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se snaží shrnout dosud publikované poznatky z oblasti vzniku a růstu krup, včetně jejich možných struktur, tvarů a velikostí. Popisuje základní principy vývoje v konvekčních bouřích typu supercela a multicela a zabývá se oblastmi, kde se krupobití nejčastěji vyskytuje.

Klíčová slova: kroupy, krupobití, zárodky, konvekční, výstupný proud

Abstract

This Bachelor's thesis summarizes the published findings about the formation and growth of hail. It also focuses on their size, shapes and possible structures. Thesis describes the basic principles of development of the supercell and multicell storms and also the locations, where the hailstorm most often occurs.

Keywords: hailstones, hailstorm, embryos, convective, updraft

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Základní pojmy a charakteristika	11
2.1	Obecné zařazení krup.....	11
2.2	Klasifikace krup	11
2.3	Charakteristika krupobití.....	12
3	Vznik krup	13
3.1	Výstupný proud a jeho důsledky.....	13
3.2	Termodynamika růstu krup.....	14
3.3	Chování padajících krup, tvar a růst	16
3.4	Zploštělý tvar velkých krup	19
3.5	Zárodky krup.....	22
3.5.1	Klasifikace zárodků.....	22
3.5.1.1	Kuželovité zárodky	23
3.5.1.2	Kulovité zárodky.....	24
3.5.2	Rozdíly mezi zárodkem a nárůstem kroupy.....	25
4	Velikost krup	26
4.1	Největší spadlé kroupy na území ČR.....	27
4.1.1	Historické záznamy.....	27
4.1.2	Současné záznamy	28
4.2	Historicky největší spadlé kroupy ve světě.....	29
5	Bouře s krupobitím	33
5.1	Konvektivní bouře typu supercela a multicela.....	34
5.1.1	Vývoj krup v supercelách	36
5.1.2	Vývoj krup v multicelách.....	37
6	Výskyt krupobití.....	38
7	Škody způsobené krupobitím.....	41

8	Potlačení krupobití.....	43
8.1	Co krupobití způsobuje a jak se bránit.....	44
8.1.1	Metoda infikování oblaků	44
8.1.2	Protikroupové dělo.....	46
8.2	Detekce krup pomocí radaru	47
9	Závěr.....	49
10	Slovník pojmů.....	50
11	Seznam grafů, vzorců, tabulek a obrázků.....	51
12	Seznam použité literatury a zdrojů	53
13	Přílohy	56

1 Úvod

Kroupy a krupobití byl odjakživa proces, kterému byla věnována velká pozornost a jak uvádí D. ŘEZÁČOVÁ (2007) ve své publikaci „Fyzika oblaků a srážek“, „*je jejich vývoj velice složitý proces, jehož kvantitativní popis je stále otevřenou otázkou*“ (Řezáčová, 2007).

Podle mého názoru jejich výskyt není natolik častý, aby výzkum probíhal ve výzkumných centrech nepřetržitě. I když nejstarší zmínky o krupobití popisuje už Aristoteles roku 340 př. n. l. v knize Meteorologia, první důvěryhodné a zdokumentované informace o krupobití mohou pocházet až z přelomu 18. a 19. stol. V průběhu dalších 100 let se vyskytují informace o jejich zkoumání, sepsané nárazově po daném krupobití, jen v pár desítkách článků vydaných v odborných časopisech. Existuje však pár odborných encyklopedií, kde je kroupám věnována větší pozornost. Jedná se Michaela Allabyho a jeho publikaci „Encyclopedia of weather and climate“ z roku 2002, kde se ovšem věnuje spíše rozměrům krup a nezachází v popisu do takových detailů jako vědci C. Knight a N. Knight. Ti se podle mého názoru zabývají v dnešní době problematice krup nejvíce, a tudíž nejvíce odborných článků publikací a nových výsledků, při kterých zkoumají do detailů například zárodky krup, teplotu nebo kroupy houbovitého charakteru atd., vychází právě od nich. Ve svém článku o kroupách a krupobití, vydaném roku 2003 v encyklopedii pojmenované „Encyclopedia of atmospheric sciences“, který se mi zdál informačně nejrelevantnější, popisují do hloubky od vzniku krup, až po radarové sledování krouponosných oblaků. Nesmím však zapomenout ani na knihu vydanou v Oxfordu profesorem Masonem, v roce 2010, pojmenovanou „The physics of clouds“. Jde o rozsáhlou publikaci zasahující do všech detailů a shrnující práce vědců, kteří se v 19. stol. podíleli nejen na výzkumu v oblasti krup, ale i dalších problematikách meteorologie a klimatologie.

V České republice se nikdo touto problematikou dlouhodobě nezabývá. Krátkých článků s informacemi o krupobití a vlastnostech krup se nachází v českých encyklopediích mnoho, ovšem majoritní podíl z nich je pouze literatura populárně-naučného charakteru, shrnující jen základní informace. Jedinou autorkou, která kroupám věnovala větší pozornost, je výše zmiňovaná D. Řezáčová a publikace

„Fyzika oblaků a srážek“ z roku 2007. Ta ale většinu základních informací a poznatků o krupobití převzala právě od amerických vědců C. Knight a N. Knight, a věnuje spíše větší pozornost fyzikálním procesům oblaků obecně. Je také první autorkou, která přiblížila české veřejnosti problematiku umělých zásahů do vývoje oblaku, jejíž základní poznatky jsou uvedeny i v bakalářské práci. Jako starší ekvivalent této knihy by se dal pojmut Josef Podzimek a kniha „Fysika oblaků a srážek“ z roku 1959.

Potřebnou literaturu však určují především konkrétní cíle, které si klademe. Pokud bychom se věnovali např. prostorové analýze, mnoho informací by poskytly právě meteorologické stanice, které si vedou dlouhodobé záznamy o všech meteorologických jevech.

Cílem této práce je poukázat na nejnovější poznatky z oblasti vzniku a vývoje krup, od tvorby zárodků až po jejich vypadávání z oblaků. Popsání a vysvětlení oblastí s častým výskytem krupobití v České republice i v celosvětovém měřítku. Práce zahrnuje i výběr nejznámějších a nejvýznamnějších krupobití, které se kdy udály, včetně fotodokumentace a náležitých popisů. V závěru práce bude zmíněno, jaké škody může krupobití napáchat a popsány potenciální možnosti, jak se ubránit a kroupy potlačit.

2 Základní pojmy a charakteristika

2.1 Obecné zařazení krup

Kroupy obecně řadíme mezi hydrometeory, což jsou, jak uvádí P. SKŘEHOT: „*meteory, vzniklé kondenzací vodní páry v kapalinu, popřípadě v pevnou částici. Z tohoto hlediska lze hydrometeory dělit podle skupenství, anebo podle vzniku a to na srážky padající a usazené*“ (Skřehot, 2004). Z tohoto rozdělení je jasně patrné zařazení krup mezi srážky padající. V následující tabulce jsou dle Soukupové (2009) pro přehled uvedeny možné vertikální a horizontální srážky:

Vertikální srážky	Horizontální srážky
děšť	ovlhnutí
mrznoucí děšť	rosa
mrholení	jíní
sníh	jinovatka
sněhové krupky	námraza
sněhová zrna	ledovka
zmrzlý děšť	
ledové jehličky	
kroupy	

Tab. 1 – rozdělení vertikálních a horizontálních srážek (Soukupová, 2009).

2.2 Klasifikace krup

Termín „kroupy“ je aplikován na různých pevných hydrometeorech, které vypadávají z přechlazených oblaků. Mezinárodní komise pro sníh a led (The International Commission on Snow and Ice – IACS) doporučila v roce 1956 definice, které obecně kategorizují různé formy těchto srážek jako následující:

- a) sněhové pelety (měkké kroupy, sněhové krupky) – jedná se o bílé, neprůhledné, kulovité nebo kuželovité pelety o průměru do 6 milimetrů. Jsou tvořeny převážně z malých oblačných kapiček přimrzlých k sobě. Mají nízkou hustotu a snadno se rozdrť. Mohou se rozpadnout nárazem o pevný povrch.

- b) ledové pelety (malé kroupy, zrnka ledu) – jedná se o průhledné nebo průsvitné pelety z ledu. Mají kulovitý, kuželovitý nebo nepravidelný tvar v průměru několika milimetrů. Rozlišujeme dva hlavní druhy:
- I. zmrzlé dešťové kapky nebo převážně roztáté a znovu zmrzlé sněhové vločky, proces zamrznutí probíhá obvykle u země
 - II. pelety sněhu obalené tenkou vrstvou ledu, která se vytvořila mrazivým éterem kapiček zachycených peletami, nebo vody, vzniklé z částečného tání pelet.
- c) kroupy – malé kuličky nebo kousky ledu větší než 5 mm v průměru. Středně silná bouře může produkovat kroupy velké několik centimetrů v průměru, zatímco velmi silná ničivá bouře může produkovat kroupy o velikosti 10 centimetrů v průměru a více. Kroupy jsou složeny téměř výhradně s průhledného ledu, nebo střídavě z průsvitných a neprůsvitných vrstviček ledu.

Tato klasifikace může být upravena nebo rozšířena s ohledem na dalších provedených výzkumech (Mason, 1957).

2.3 Charakteristika krupobití

Kroupy jsou kuličky ledu, které nejčastěji vypadávají z oblaků typu cumulonimbus^[1]. Podle konvence musí měřit více jak 5 milimetrů v průměru, avšak složení, velikost a tvar se mohou lišit. Největší kroupy mohou dosahovat v délce až rozměru 15 centimetrů a více.

Množství krup je vysoce proměnlivé, ale obecně platí, že největší kroupy a nejsilnější krupobití se vyskytuje při největších bouřích, což jsou takové, které mají nejsilnější výstupné proudy, nejvýše položené vrcholy oblaků a jsou nejmohutnější. Krupobití je také spojeno s tornády a blesky, ačkoliv mnoho bouří produkujících blesky nemusí kroupy tvořit. Krupobití dále nesouvisí se záplavami, jež jsou často výsledkem dlouhotrvajících a pomalu se pohybujících srážek. Tyto bouře nemají nijak zvlášť silné výstupné proudy^[2] a kroupy tedy nevytvářejí.

Kroupy obsahují různé množství vzduchových bublinek, často ve vrstvách, jež určují stupeň vývoje. Jestliže kroupy obsahují velké množství vody v kapalném stavu, bývají rozbředlé. Obzvláště u malých krup může být obsah vzduchu tak veliký, že jsou kroupy měkké a od sněhových krupek^[3] se liší pouze velikostí. A tím

jak měkké kroupy padají vzduchem, který má teplotu nad bodem mrazu, tají, a rozbřednou, než dopadnou na zem. Velké množství srážek z cumulonimbů v mírném pásu, jsou vlastně roztáté sněhové krupky a malé kroupy.

3 Vznik krup

Kroupy se vytvářejí přirůstáním vodních kapiček na ledové částičky, jak se pohybují uvnitř přechlazeného^[4] oblaku. Základní informace, které potřebujeme pro porozumění vzniku krup, jsou následující.

3.1 Výstupný proud a jeho důsledky

Vlhký vzduch stoupající v jádrech kumulů se ochlazuje tím, jak stoupá. Ochlazení způsobuje kondenzaci a růst vodních kapiček, které vytvoří oblak. Tyto kapičky se přechladí, jakmile teplota klesne pod bod mrazu. Vodní kapičky jsou velmi malé, a stoupají ve výstupném proudu skoro stejně rychle, jako stoupá vzduch, obvykle až několik desítek metrů za sekundu. Sami ale mimo proud padají rychlostí menší než 10 centimetrů za sekundu. Ledová částička se v takovém výstupném proudu, jež je dostatečně velká na to, aby padala rychleji, sráží s přechlazenými nahromaděnými kapičkami. Ty se k ní přichytí a zamrznou. Toto je základní mechanismus růstu krup. Prvotní částička pro tvorbu může být sněhový krystal, sněhová vločka nebo zmrzlá vodní kapička. Další hlavní rolí výstupného proudu při vzniku je, aby byl dostatečně silný a trval dost dlouho na to, aby udržel kroupy ve vzduchu uvnitř přechlazeného oblaku, než dorostou do svých konečných velikostí. Pokud chtějí dopadnout na zem jako kroupy, musí být dostatečně veliké, aby neroztály při pádu. Kroupy rostoucí uvnitř výstupného proudu mohou klesat nebo stoupat v závislosti na tom, jestli je rychlost pádu větší nebo menší, než rychlost výstupného proudu. Pro výpočet rychlosti pádu krup se používá následující vzorec:

$$\sqrt{\frac{4g\rho_i D}{3C_D\rho_a}} \quad \dots \text{ (vzor. 1)}$$

C_D – součinitel odporu vzduchu

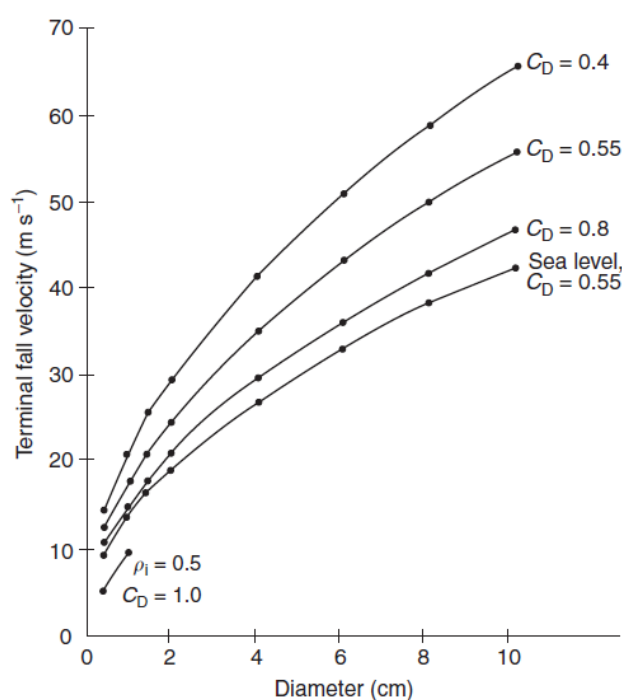
ρ_i – hustota ledu [g.cm^{-3}]

ρ_a – hustota vzduchu [g.cm^{-3}]

g – gravitační zrychlení [m.s^{-2}]

D – průměr kroupy [cm]

Číselné hodnoty pro různé součinitele odporu vzduchu C_D (bezrozměrná jednotka) a pro $C_D = 0.55$, což je hladina moře s tlakem 500 hPa, jsou znázorněny v grafu 1. Tlak 500 hPa zhruba odpovídá teplotě -10°C a výšce 6 km nad hladinou moře, se značnou proměnlivostí v závislosti na místních podmínkách. Velký rozsah součinitele odporu vzduchu se vysvětluje vysokou variabilitou tvarů krup, jež mají značný vliv na rychlost pádu. Průměr kroupy je obvykle definován jako průměr koule, který je ekvivalentem hmoty dané kroupy.



Graf 1 – rychlosti pádu krup vyneseny v závislosti na průměru krup, pro uvedené součinitele odporu vzduchu, tlak 500 hPa a hustotu krup $0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Knight et Knight, 2001).

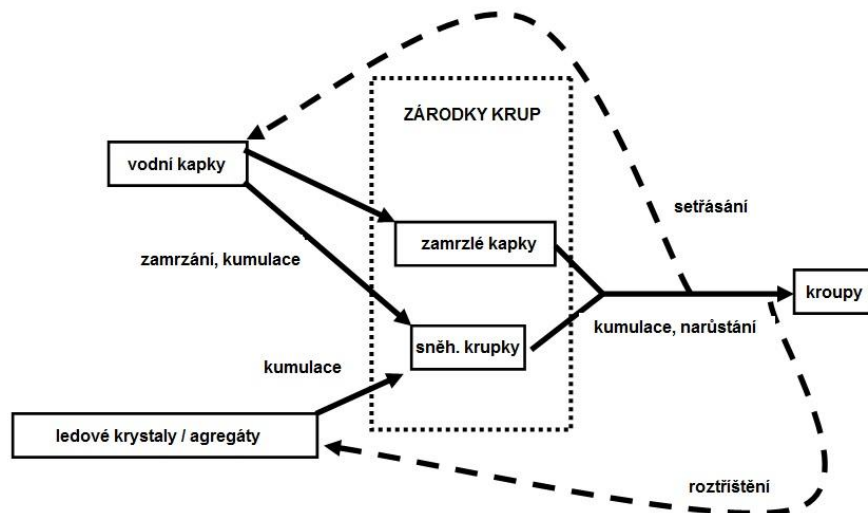
3.2 Termodynamika růstu krup

Voda zůstává v kapalném stavu při ochlazení pod 0°C , pokud obsahuje částičku pevného materiálu, jako je ledové jádro s vlastností prvotní ledové částičky. Obsah těchto částiček je v atmosféře velmi proměnlivý, avšak při teplotě -5°C je jich daleko více, než při teplotě -20°C . Tudíž oblaka, která nejsou o mnoho chladnější než 0°C , jsou téměř zcela složena z přechlazených vodních kapiček. Množství kapiček v takovém oblaku kolísá mezi 100 až 1 000 na kubický centimetr, a právě v takovém prostředí se kroupy vytvářejí.

Kapičky zamrzají, když se srazí s ledem, uvolňující teplo okolo 334 J.g^{-1} . Ale jelikož je specifické teplo vody $4,2 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$, přechlazená kapička se z -10°C ohřeje na teplotu 0°C , pouze když je 1/8 její části zmrzlá. Jestliže je zmrzlých i zbylých 7/8, zbytek latentního tepla^[5] musí být absorbováno prostředím, které je v tomto případě okolní vzduch o teplotě -10°C . Rostoucí kroupy jsou tudíž teplejší než okolní vzduch, a v extrémních případech může být jejich teplota 0°C , což vytvoří tzv. houbovitou kroupu (angl. spongy hail), která je složena směsí ledu a vody. Vrstevnatost kroupy vytváří vrstvy s různým obsahem vzduchu, jenž roste vlivem změn teploty vzduchu (změny v růstu nadmořské výšky) nebo změnou obsahu vody v oblaku, která způsobí změnu teploty kroupy (Knight et Knight, 2001).

Při provedení řezu na kroupě můžeme často pozorovat různou vrstevnatost s různou průzračností. Ledová částice se ve výstupném proudu sráží s nahromaděnými přechlazenými kapičkami, které mohou mít různou teplotu. Ty, u kterých se blíží teplota k bodu mrznutí, vytvoří na povrchu částice vrstvičku vody, která poté zmrzne. Tímto způsobem vzniká poměrně homogenní průsvitná vrstva ledu, která neobsahuje žádné vzduchové bubliny. Tento růst kroupy se nazývá mokrý či vlhký růst. Ostatní kapičky, které mají teplotu pod 0°C , zamrzají ihned po srážce s ledovou částičkou, vytvoří drobné ledové krystalky a zachytí mezi sebe vzduch. Tento proces vytvoří pórovitou, bílou a neprůsvitnou vrstvu ledu a nazývá se suchý růst kroupy (Allaby, 2007c; Řezáčová, 2007).

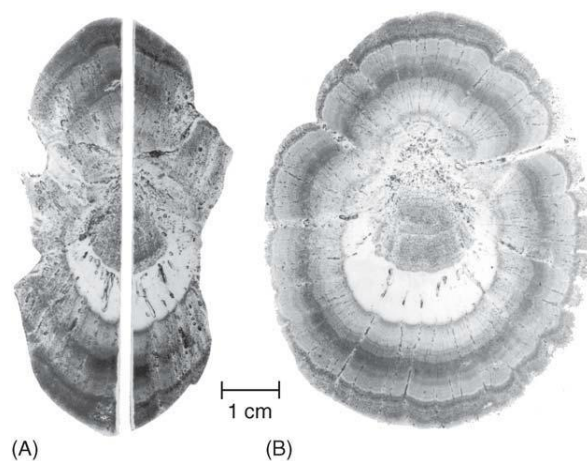
Jak uvádí D. ŘEZÁČOVÁ (2007) „*přetrvávající představa, že vrstevnatá struktura krup je důsledkem pohybu krup v oblaku směrem dolů a vzhůru, při němž se střídá proces mrznutí a tání, není správná. Je pravděpodobné, že vznikla v době, kdy ještě nebyla dostatečně zhodnocena přítomnost přechlazené kapalné vody v oblaku. Vycházelo se tedy z úvahy, že kroupy mohou zachycovat kapalnou vodu pouze pod hladinou mrznutí a musí vystoupat vysoko nad tuto hladinu, aby voda zmrzla. Také úvahy, že vrstvy vznikají jako důsledek střídání depozičního růstu a zachycování přechlazených kapek, nejsou správné. Vrstevnaté struktury získané při laboratorním sledování namrzání vodních kapek na ledovém povrchu v aerodynamickém tunelu prokazují, že vrstvy jsou důsledkem změn obsahu přechlazené vody a teploty oblaku. Jednou z nejsložitějších otázek je tedy odhad trajektorie krup v oblaku od vzniku zárodku kroupy až po její vypadnutí z oblaku“.*



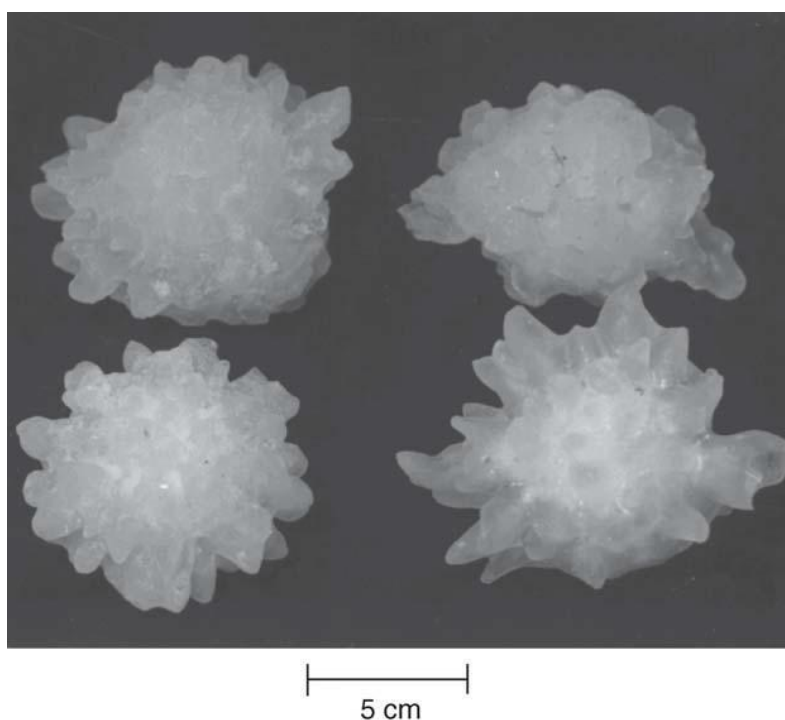
Obr. 1 – schematické znázornění vzniku krup. Obdélníky představují hydrometeory. Šipky znázorňují procesy a přerušované šipky představují procesy, které mohou působit jako zpětná vazba při vzniku krup. Upraveno dle (Evropská agentura pro bezpečnost letectví, 2008).

3.3 Chování padajících krup, tvar a růst

Vzhledem k tomu, že kroupy rostou přichycenými, zamrzajícími kapkami vody, rostou nejčastěji na své spodní straně, kde dochází ke kolizím. Malé kroupy, padající pouze cca $10 - 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ si obvykle udržují svou orientaci pádu (nijak se nepřetáčí). To často vede ke kuželovitému tvaru s centrem růstu v horní části a rozšiřujícími se vrstvami na spodu, kde je převážná část objemu. Když jsou kroupy větší, tak větší rychlost pádu vytvoří více turbulencí, a tím dojde k přetáčení. Často pak je jejich tvar zploštělý. Většina srážek se vyskytuje kolem obvodu, kvůli rychlému, symetrickému, ale komplikovaně otáčivému pohybu. Obrázek 1 znázorňuje dva řezy touto kroupou. Je na něm viditelný kuželovitý střed, který následně vyrostl v poměrně silný, poněkud podlouhlý disk. Přetáčení má významné důsledky pro tvar, rychlost pádu, výměnu tepla a může pomáhat se setřásáním rozmrzlé vody, která by se jinak mohla hromadit.



Obr. 2 – dva řezy velkou, zploštělou kroupou: (A) – kolmo na krátkou osu a (B) rovnoběžně s krátkou i dlouhou osou. Tyto fotografie byly pořízeny na bílém pozadí, takže se průsvitný led zobrazuje bíle. Led se vzduchovými bublinkami se zobrazuje tmavě. Kroupa rostla při konstantním směru pádu a vytvořila kuželovitý střed, dlouhý 2-3 cm. Poté byl růst nejrychlejší kolem obvodu zploštělé kroupy, následkem rychlého a složitého, ale symetrického pohybu pádu. Lze si všimnout růstových vrstev (znázorněné odlišným obsahem bublin), které znamenají změny v růstovém prostředí (Knight et Knight, 2001).



Obr. 3 – Čtyři kroupy větší než 5 cm v průměru, na nichž jsou viditelné výběžky. Ty vznikají při mokřém růstu, když po povrchu kroupy stéká voda, která následně zamrzá (Knight et Knight, 2001).

Kroupy větší než několik centimetrů v průměru jsou často hrudkovité. Když dochází k mokrému růstu, hrudky mohou z vody tekoucí po povrchu vytvořit rampouchovité laloky. Kroupy tohoto typu znázorňuje obr. 2. Výběžky často způsobují agregaci menších krup, ale řezy těmito kroupami nikdy neprokázaly, že by tomu tak skutečně bylo. Hrudkovitost činí pohyb přetáčení mnohem zmatenější, tvary mnohem komplexnější a také ovlivňuje rychlost pádu zvyšujícím se součinitelem odporu vzduchu. Rychlost růstu kroupy je vyjádřen v následujícím vzorci.

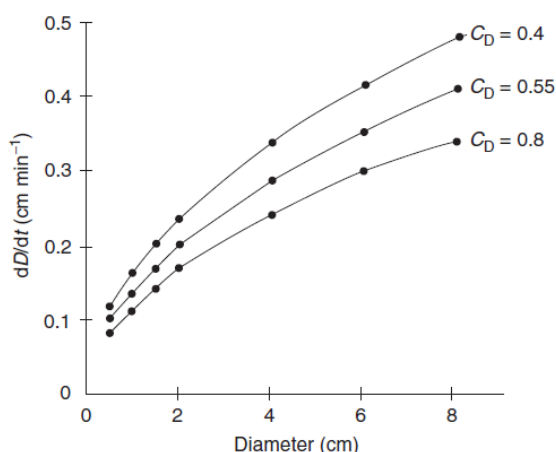
$$\frac{dD}{dt} = \frac{V_T W E}{2\rho_i} \quad \dots \text{ (vzor. 2)}$$

D – průměr kroupy [cm]

W – obsah vody v oblaku [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]

E – účinnost zachycování

Účinnost zachycování E je obvykle mezi 0,3 a 0,8, v závislosti na velikosti kapiček i kroupy, protože některé kapičky v cestě kroupy jsou nesené prouděním vzduchu, který je okolo ní. Graf č. 2 znázorňuje typický rozsah hodnot růstu v závislosti na funkci velikosti kroupy. Pro WE uvažujme $2,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro ρ_i hodnotu $0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.



Graf 2 – rychlosti růstu krup (v $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) v závislosti na průměru vypočteném pro vrchní 3 křivky z grafu 1 (Knight et Knight, 2001).

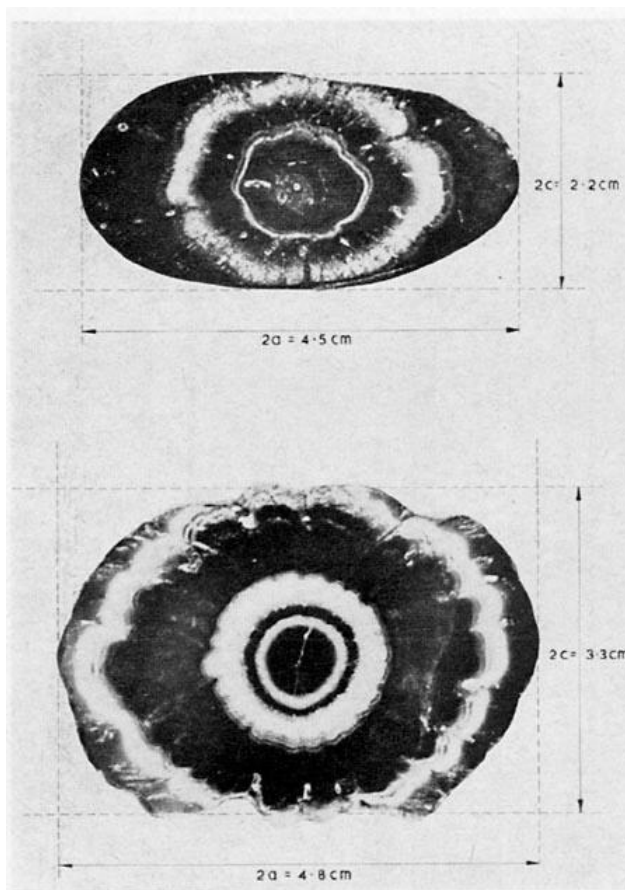
3.4 Zploštělý tvar velkých krup

Přírodní kroupy, které dopadávají na zem, mají širokou škálu tvarů. Weickmann (1953) klasifikoval tvar krup ve své shrnující zprávě o škodách způsobených krupobitím v Evropě a Severní Americe během posledních 100 let do následujících tří základních tříd. Jedná se o kuželovité, kulovité a nepravidelné. Relativní četnosti, v níž se tyto formy vyskytly, jsou následující – kuželovité 21%, kulovité 58% a nepravidelné (včetně krup s rampouchovitými výčnělky) 21%. Z kulovitých krup jich bylo 68% výrazně zploštělých, což odpovídá 40% všech spadlých krup.

Zkoumání krup se věnovali i Carte a Kidder (1966). Ti ve své studii přezkoumali několik tisíc krup, které vypadly v Transvaalu (zaniklá provincie v JAR). Zanedbáním krup, jejichž hlavní osy byly menší než 1 cm, ale zjistili, že asi $\frac{1}{4}$ krup dosahovala od mírného zploštění až po tvar disku. Zploštělé kroupy by se tvarem daly klasifikovat jako zploštělé sféroidy. Je samozřejmé, že velmi málo krup bude málokdy vyhovovat jakémukoliv jednoduchému geometrickému tvaru, ale není pochyb o tom, že zploštělý sféroid, i když je někdy modifikovaný, je nejčastější tvar krup, které dosáhnou zemského povrchu. Otázkou je, do jaké míry je zploštění nedílnou součástí přirozeného růstu a do jaké míry nastává následkem tání, během klesání krup k zemi.

Keith Browning (1967) zkoumal pro svou studii zploštělých krup vzorky nashromážděné po bouři z několika míst. Dvě místa z oblasti Blackwellu, kde došlo ke krupobití dne 15. května 1966 a další z 18 míst v oblastech El Rena a Oklahomy, kde se přehnaly bouře s krupobitím 20. května 1966. Některé vzorky byly získány pomocí speciálních mobilních týmů, ale většina byla získána od obyvatel, kteří je uschovali ve svých mrazácích. Celkem bylo nashromážděno 134 krup, ale hned zpočátku došlo k vyřazení 44 z nich. Buď proto, že se vyvinuly v podstatě do kulovitého tvaru, nebo proto, že bylo prokázáno jejich ovlivnění způsobené táním, jakmile dopadly na zem. Zbývajících 90 krup, které byly analyzovány, měly délku hlavní osy v rozmezí 2 – 6 cm. Většina (asi 85%) mělo v rozmezí 3 – 5 cm. Vnější rozměry byly nejprve měřeny na základě tvaru elipsoidu a jeho tří os – $2a$, $2b$ a $2c$, kde $a > b > c$. Bylo zjištěno, že poměr $\frac{b}{a}$ je roven nebo větší než 0,9 u 61% krup a méně než 0,7 pouze u 5% z nich. Na druhé straně poměr $\frac{c}{a}$ byl větší pouze u 7%

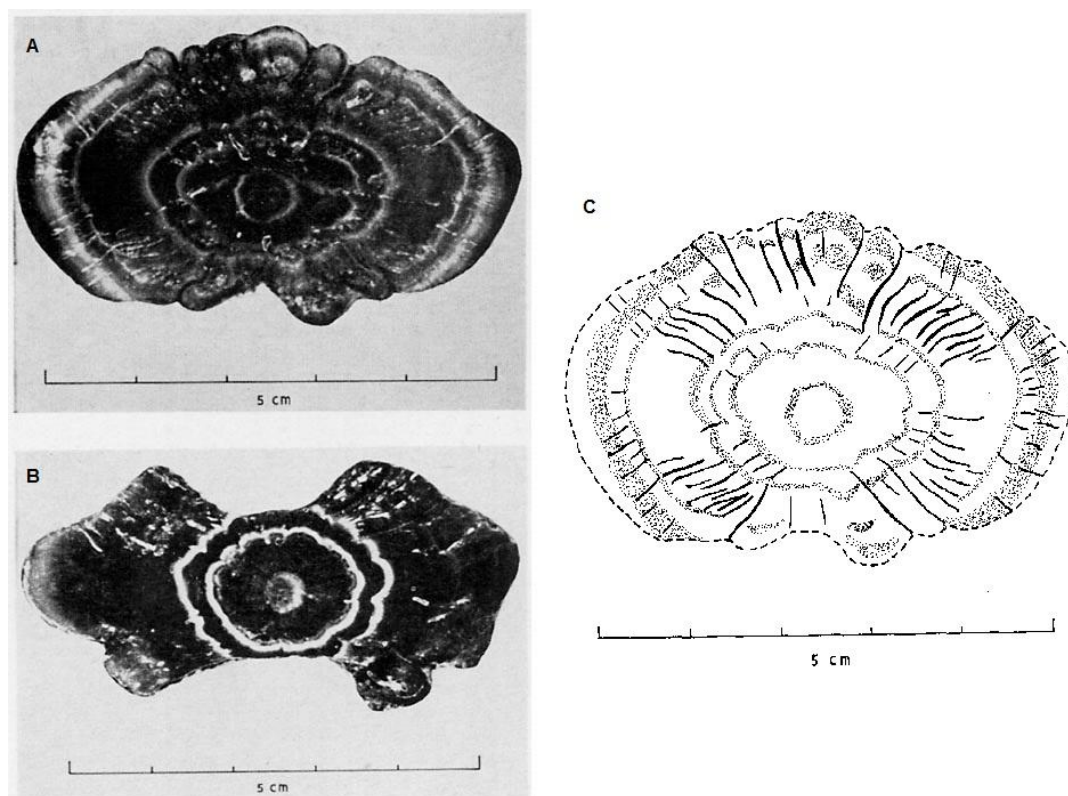
krup, zatímco menší než 0,7 byl u 50%. Ačkoli tvar krup může být více přirovnáván k elipsoidům, dvě delší osy byly vždy spíše stejně dlouhé a obě podstatně delší než rozměr třetí. Z tohoto důvodu je vhodné považovat většinu krup za více či méně zploštělé sféroidy.



Obr. 4A a 4B – fotografie tenkých řezů dvěma velkými kroupami nasvícené tak, že průhledný led je opět zobrazen tmavě a oblast ledu s obsahem bublin bíle. Jednotlivé řezy byly vedeny v blízkosti center růstu, a aby byly zřetelné osy $2a$ - nejdelší) a $2c$ – nejkratší (Browning, 1967).

Kroupy byly nařezány pomocí jednoduché pásové pily na 1 – 2 mm tenké plátky z oblasti center růstu tak, aby byly viditelné jejich hlavní a vedlejší osy. Analýza se zabývá poměrem $\frac{c}{a}$ a zjištěná hodnota byla nazvána jako α . Hodnoty α byly odvozeny z různých fází růstu. Pomocí sady eliptických šablon bylo možné odhadnout nejpřesnější hodnotu α pro danou kroupu. Vnější povrch byl téměř vždy postihnout táním, často prvotně na obou koncích kratší osy, což vytvořilo poněkud zploštělé neeliptické části, viditelné na obrázku 1B. Za těchto okolností je více

reprezentativní hodnotou α pro vnější povrch odvození, použitím rozměrových hodnot a a c .



Obr. 5 – A,B - fotografie tenkých řezů zploštělých krup. 5C – náčrt kroupy z obrázku 4A, znázorňující charakteristické rysy. Vrstvy neprůsvitného ledu jsou zakresleny tečkovaně a proudy velkých vzduchových bublin plnými čarami. Upraveno dle (Browning, 1967).

Pravděpodobnosti pro zploštění během růstu a během tání jsou následující:

- a) pravděpodobnost zploštění během růstu – jak uvádí List (1959), jakmile se jednou kroupa dostane mimo svojí počáteční kónickou fázi, má tendenci padat největším průřezem proti vzdušnému proudu. Kroupa se bude mít díky vzduchu, který působí kolmo na kroupu, tendenci otočit o 90° . Pokud povrch kroupy během růstu nebyl vytvářen aerodynamicky, tento proces se opakuje. Výsledné přetáčení kroupy vede k růstu vrstev poměrně jednotné tloušťky a vytváří prakticky kulovité kroupy. Ačkoliv kroupa roste po většinu času na všech stranách, což je dáno jejím přetáčením, má tendenci růst rychleji v blízkosti stran na hlavní ose, tj. na částech, u kterých se předpokládá, že byly vystaveny nejdéle, kolmo k proudění vzduchu. Z toho vyplývá, že kapičky nezůstávají na povrchu kroupy, kde se přichycují, ale přirostlý materiál byl vytvářen spíše aerodynamicky.

- b) pravděpodobnost zploštění během tání – bylo zjištěno, že roztátá voda vytvoří pás okolo sféroidu, který pod sebou izoluje led tak, že tání probíhá především na jeho vrchní a spodní části.

Charakteristický rys, vyskytující se zhruba v polovině zploštělých krup. Na vrchní a spodní části, kde se nacházejí poměrně velké proudy vzduchových bublin, se nejčastěji vyskytuje houbovitý led. Přítomnost houbovitého ledu poskytuje vysvětlení pro relativně rychlé tání, které je spojeno s těmito oblastmi. To také vysvětluje občasné, extrémně rychlé tání, které vede k vytvoření tvaru krup, připomínající tvar jablka, jak je znázorněno na obr. 5B (Browning, 1967).

3.5 Zárodky krup

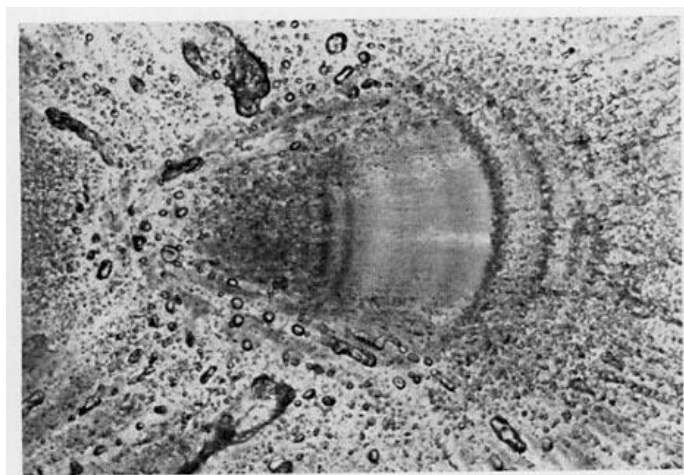
Zárodky přírodních krup již byly studovány mnohokrát, avšak nyní jsou k dispozici nové poznatky, které stojí za zmínku. Přestože jsou kroupy z jakékoliv jednotlivé bouře velmi variabilní, ve strukturách krup mezi různými bouřemi existuje podstatně více rozdílů, než uvnitř jednotlivých bouří. Totéž tvrzení platí i o zárodcích, kde je ovšem menší variabilita z jednotlivých krupobití, soudě podle nashromážděných vzorků, které byly většinou posbírány z jednoho místa. Sbírká krup z jedné lokality obvykle obsahuje více než 80% stejných typů zárodků, ale vzorky, které byly posbírány z bouře, dosahující cca 10 mil, se postupně mění. V počátku byly nashromážděny kuželovité zárodky obsahující vzduchové bublinky, ovšem na konci bouře se jednalo o kulovité a průsvitné zárodky.

3.5.1 Klasifikace zárodků

Stanovení toho, jaká část kroupy je právě zárodek, není na první pohled vůbec jednoduché. Vzhledem k tomu, že velké kroupy mají vrstvy tvořené jednotnou strukturou, silnou až několik centimetrů, lze tudíž nalézt kroupy o průměru několika centimetrů, u kterých žádné zárodky nebyly zaznamenány. Ve skutečnosti však uvnitř krup s průměrem větším než zhruba 2,5 cm, je téměř vždy viditelný raný nárůst hmoty o průměru cca 0,5 – 1 cm v průměru. V takovéto velikosti je často více odlišných růstových vrstev, a tak určit, hranici mezi koncem zárodku a počátkem samotné kroupy je skutečně složité, avšak ne příliš důležité, při použití následující klasifikace. Tato klasifikace má čtyři kategorie. Jedná se o:

- 1) kuželovité zárodky (známé i pod termínem sněhové krupky)
- 2) kulovité průsvitné zárodky
- 3) kulovitý s obsahem bublinek
- 4) ostatní, nezapadá ani do jedné z předchozích kategorií.

Z počtu přibližně 400 krup, nashromážděných ze 40 bouří, bylo přiřazeno k první kategorii asi 60% všech, ke druhé 25%, ke třetí 10% a k poslední 5%.



Obr. 6 – Kuželovitý zárodek kroupy, jehož špička nemá jasně viditelné hranice (Knight et Knight, 1970).

3.5.1.1 Kuželovité zárodky

Obecné charakteristiky těchto zárodků jsou poměrně dobře známé. Do této kategorie spadá velké množství zárodků, které by se daly lépe popsat jako „kulovité vrstvy“ (spherical shells), což jsou kužely s chybějícími částmi v oblastech, kde by se měly nacházet vrcholy. Oblasti špiček kuželů jsou nahodile bublinkovité, se smíšeným obsahem malých a velkých bublinek, který může vytvořit houbovitost. Mohou sestávat z malých nebo velkých krystalů a ojediněle také pouze z jednoho krystalu. Jak je vidět na obr. 6, nejsou jejich hranice přesně definované.

Není možné určit, zda se první vytvořil led v oblasti špičky, nebo zda bylo první vytvořeno tělo s tupým malým koncem, který se později vyplnil. Tvůrci studie Knight a Knight se zastávají druhé možnosti, částečně z důvodu houbovité struktury, z větší části proto, že většina kuželovitých sněhových krupek, které studovali, byly tupě zakončené. Vzduchové bublinky po stranách kužele jsou větší než uvnitř, jsou zřetelněji radiálně uspořádané a současně jsou méně organizované.

Vnitřek kuželů se obvykle skládá z velmi malých vzduchových bublinek, často s jednou nebo více vrstvami čirého ledu. Bublínky mohou být rovnoměrně rozloženy nebo radiálně zarovnané.

3.5.1.2 Kulovité zárodky

V analyzovaných vzorcích byly nalezeny zárodky s obsahem bublinek společně s těmi průsvitnými bez bublinek, které však byly v jasné početní převaze. Mimoto jsou to právě čiré zárodky, které poukazují na další zajímavé struktury. Kulovité zárodky s bublinkami jsou nevýrazné, obvykle neobsahují příliš velké, ani příliš malé krystaly a nelze je rozlišit pomocí žádného poznávacího znaku. Obvykle se jedná o monokrystalický, sférický zárodek s obsahem bublinek, který se ale vyskytuje vzácně. Jak vznikl, není ovšem zcela jasné, ale teorie je taková, že došlo k opakovanému cyklu tání a následného znovuzmrznutí ledového agregátu.

Průsvitné kulovité zárodky však mají několik zajímavých vlastností (do této kategorie spadají také průsvitné elipsoidní zárodky a polokoule, což jsou zřejmě rozbité kusy celých koulí. Oba druhy jsou poměrně vzácné, a je zajímavé poznamenat, že dosud nebyly nalezeny žádné polokoule nebo elipsoidní zárodky, které mají bublinatou strukturu). Velikost krystalu je obvykle značná a celý zárodek, až do velikosti 1 cm, je mnohdy monokrystal. Zárodky jsou většinou houbovitě, o čemž svědčí vnitřní expanzivní trhlinky, které vznikly po zmrznutí vody, jež byla uvnitř. Trhlinky se občas objeví ihned po vzniku zárodku. Potom nejsou polokulovité zárodky v některých bouřích neobvyklé.

Je velmi lákavé spojit si vznik těchto zárodků se zmrzlými přechlazenými kapkami a často také vypadají, že vznikly tímto způsobem. Vzhledem k jejich symetrii, se musejí tvořit přetáčením velké přechlazené kapky v proudu vzduchu. Několik málo elipsoidních zárodků je z jedné strany často výrazně zploštělých, vzácně i konkávních (i když je to v rozporu s tvrzením výše zmíněného pádu kapky, možná k tomu může dojít). V současné době není žádným způsobem prokazatelné, zda je tento původ kulovitých zárodků správný, či nikoliv. V každém případě, tyto zárodky rostou v teplejším prostředí (jsou mokřejší, houbovitější) než kuželovité, a to je pravděpodobně důvodem k přetáčení a následnému vytvoření kulovitosti. Vlhká, poněkud pružná vrstva na vnější straně, by mohla způsobit přetáčení těchto malých

kuliček. Vzhledem k výrazné velikosti krystalu, se teplota, kde se tyto kulovité zárodky tvoří, pohybuje do -20°C .

3.5.2 Rozdíly mezi zárodkem a nárůstem kroupy

Existuje několik nápadných a systematických rozdílů mezi zárodkem a růstem. Z posouzení byly vynechány kroupy, jejichž nárůst ledu byl menší než 2,5 cm. Zárodky musí mít průměr menší než 1 cm. Zahrnutí i těchto rozměrů by výsledky nijak nepozměnily, ale jejich vyloučení eliminuje téměř všechny možné výjimky. Mezi významné rozdíly, které stanovují, že růst zárodků je odlišný od následného růstu, lze zařadit následující body:

- 1) Existence zřetelných zárodků, od několika milimetrů po 1 cm v průměru téměř ve všech kroupách je pozoruhodné vzhledem k tomu, že růstové vrstvy ve velkých kroupách jsou často veliké 1 cm nebo větší.
- 2) Kuželovité zárodky mají často velmi výraznou vrstevnatost v malém měřítku, s kolísajícím obsahem bublinek, někdy i velikostí krystalu v rámci milimetrového růstu. Růst kroupy vykazuje také některé výkyvy, obvykle ale v mnohem větším měřítku, v řádu centimetrových vrstev. Tato skutečnost je zajímavá, jelikož tím, že je kroupa větší, dosahuje vzhledem k okolnímu vzduchu vyšší rychlosti. Tím se očekává, že její doba v určitém prostředí bude menší. K vysvětlení tohoto rozdílu u větších krup může přispět vyšší tepelná setrvačnost, ale není jisté, zda se jedná o kompletní vysvětlení.
- 3) Bublínovitá struktura (malé bublinky, velké krystaly), podobná jako u typických kuželovitých zárodků, se prakticky nikdy v nárůstu kroupy nevyskytla. Je tedy možné připsat absenci této struktury u velkých krup k vysoké rychlosti pádu.
- 4) Korelace, mezi obsahem bublin a velikostí krystalu, je u zárodečného růstu a růstu krup rozdílná. V obou případech značí existence malého krystalu výskyt bublínovitého ledu, ale pouze u růstu krup značí velký krystal poměrně průsvitný led. V zárodcích značí výskyt velkých krystalů opět led s obsahem bublinek.
- 5) V odstavcích 2) a 4) jsou popsány kuželovité zárodky. Kulovité oproti nim neobsahují nijak zvlášť jedinečnou strukturu, ale často vytvářejí mezírku mezi zárodkem a následným růstem. Vnitřní trhlinky, jak již bylo popsáno,

poukazují na houbovitý růst, který je často vázán na růst zárodku. Ve spojení trhlinek s vytvořenou mezírkou lze poté nalézt uvnitř krup rozlámané zárodky.

- 6) Běžná houbovitost průsvitných kulovitých zárodků je sama o sobě rozlišovacím znakem od následného růstu, který už obvykle houbovitý není. Upraveno dle (Knight et Knight, 1970; Knight et Knight, 1981).

4 Velikost krup

Jak se zmiňuje J. MUNZAR (1989), „*je těžké rozhodnout, co považovat za dosud největší krupobití u nás nebo ve světě, protože lze brát v úvahu více kritérií, např. velikost krup, výšku vrstvy krup vytvořenou na zemském povrchu, plochu zasaženého území, výši škod či počet mrtvých a raněných. Protože zatím není k dispozici žádná jednotná statistika, přidržíme se prvního ukazatele*“.

D. ŘEZÁČOVÁ (2007) uvádí, že „*kroupy rostou zachycováním přechlazených vodních kapiček a soupeří tedy o zásobu oblačné vody. Koncentrace krup proto klesá s jejich velikostí a extrémně velké kroupy jsou velmi řídké a zajímavé spíše z odborného hlediska. Ukazují totiž, jak silné výstupné proudy existují v kroupotvorných oblacích*“.

Existuje mnoho klasifikací krup, které slouží k potřebnému zařazení, a které ukazují potenciální škody způsobené daným krupobitím. V České republice v současné době žádný podobný klasifikátor neexistuje. Následující tabulka představuje klasifikaci dle Výzkumné organizace tornád a bouří (TORRO – The tornado and storm research organisation).

Existuje mnoho klasifikací krup, které slouží k potřebnému zařazení, a které ukazují potenciální škody způsobené daným krupobitím. V České republice v současné době žádný podobný klasifikátor neexistuje. Následující tabulka představuje klasifikaci dle Výzkumné organizace tornád a bouří (TORRO – The tornado and storm research organisation).

třída	průměr (mm)	popis
0	5-9	hrách
1	10-15	kulička proti molům, bonbon
2	16-20	skleněné duhové kuličky, kulička hroznu
3	21-30	vlašský ořech
4	31-40	holubí vejce, míček na squash
5	41-50	golfový míček
6	51-60	slepičí vejce
7	61-75	tenisový, kriketový míček
8	76-90	velký pomeranč, softbalový míček
9	91-100	grapefruit
10	> 100	meloun

Tab. 2 – klasifikace krup podle TORRO (The tornado and storm research organisation).

4.1 Největší spadlé kroupy na území ČR

Kroupy na území ČR mívají zpravidla průměr 1-2 cm. Byly však zaznamenány krupobití, kdy vypadávaly kroupy o charakteristickém průměru větším než 4 cm (Řezáčová, 2007).

4.1.1 Historické záznamy

Jak uvádí Z. VAŠKŮ (1999) „*lidé vždy se znepokojením sledovali blížící se mračna podezřelá z krupobití, která se na dálku prozrazovala především zelenavým zabarvením základny bouřkových kup, patrným zbělením vypadávajících srážek a nezdělaným vysílaným charakteristickým, více či méně postřehnutelným „kruponosným“ hlomozem.*

V povědomí zemědělců kroupy vždy náležely k obávanému druhu atmosférických srážek. I u nás jsou poměrně časté případy, kdy hustota a velikost padajících krup a ostatní okolnosti jejich výskytu vyústí v závažné až katastrofální hospodářské škody“.

V dobových kronikách lze nalézt záznamy až z roku 1528, ve kterých se píše: „*v sobotu před Sv. Trojicí okolo Tábora pršely kroupy jako vejce slepičí a jako ráž... že nejprv pršely jako ráže, potom co vejce, a naposledy veliké jako talíř padaly, a obilí popraly...“ (Vašků, 1999).*

Z roku 1574 jsou k dispozici záznamy velikého krupobití u Dolní Cerekve, blízko kostela sv. Markéty: „jedna kroupa neb raději kus ledu tehdaž nalezená několik liber vážila“, „byly kroupy jako holubí vejce a některé co husí, kteréž se táhly více než dvě míle“.

Dále půlhodinové krupobití v roce 1636, při kterém byli zraněni lidé a zabit dobytek. Roku 1672, kdy spadl u Kolína při velkém krupobití kus ledu vážící 3 libry (cca 1,4 kg), roku 1880, kdy uvádí rolník Jan Miller z Podmok, že kroupy jako holubí vejce způsobily škodu na úrodě v části katastru 60% a v jiné části dokonce 90% (Munzar, 1989; Vašků, 1999).

4.1.2 Současné záznamy

Ve 20. století se také vyskytlo mnoho silných bouří s velkými kroupami. Za všechny můžeme zmínit např. krupobití z roku 1939, kde byla v Napajedlech nalezena kroupa o hmotnosti 560 g, v obci Bylnici 650 g a ve Zlíně prý dokonce spadl kus ledu u hmotnosti 750 g. Kroupy prorážely drátem vyztužené, skoro centimetr tlusté sklo a zanechávaly za sebou ostré okraje jako při průstřelu (Munzar, 1989).

6. července roku 1999 postihlo obec Opařany v okrese Tábor desetiminutové krupobití. Jak je uvedeno na stránkách městského úřadu Opařany, „*kroupy přesahující velikosti tenisových míčků zničily a poškodily střešní krytiny, fasády a rozbily okna na obytných staveních, hospodářských a drobných stavbách. Silně poškozeny byly dopravní prostředky, škody byly zaznamenány i na zemědělských plodinách a došlo k úhynu domácích zvířat*“ (obec Opařany, 1999).

V 21. století stojí za zmínku krupobití, jež se přehnalo nad Prahou 15. srpna 2010. Až třicentimetrové kroupy padaly v městských částech Krči, Kačerově a na Vinohradech (iDNES.cz, 2010)



Obr. 7 – krupobití v Opařanech v roce 1999 devastovalo čelní skla automobilů (<http://www.oparany.cz/www/obecoparany/fs/wrs-galerie/kroupy-1999/kr-octav.jpg>)

4.2 Historicky největší spadlé kroupy ve světě

Ačkoli je nepředstavitelné, že kroupy o rozměrech tenisových míčků je možné překonat, můžeme si přiblížit několik opravdu mohutných krupobití, které se vyskytly v různých částech světa. Jak už bylo uvedeno, mnoho krupobití je spojeno s tornády, supercelami a multicelami, o jejichž výskytu nejčastěji slyšíme na území Spojených států amerických. Proto byly rekordní kroupy hlášeny právě odtud.

Jak uvádí J. MUNZAR (1989), „*dosud největší úředně ověřená a fotograficky dokumentovaná kroupa v USA spadla při bouři 3. září 1970 v Coffeyvillu ve státě Kansas*“. Tato kroupa vážila 766 g a její maximální obvod byl 44 cm (Roos, 1972).

Krupobití, na které nesmíme zapomenout, a které dlouho drželo prvenství, se stalo v roce 1928. Vypadla při něm kroupa s maximálním obvodem 43 cm a hmotností 680 g (National Geographic, 2003). Podle výpovědi obyvatel se přiblížil ze západu temný oblak, který vykazoval známky silného větru. Většina lidí byla venku a pozorovala vývoj bouře, když se začal ozývat zvláštní syčivý zvuk a začaly padat kroupy velké jako baseballové míčky, které se brzy zvětšily do velikosti grapefruitu. Mnoho z nich bylo téměř kulatých, měřily v obvodu od 25 do 35 cm a jejich váha se pohybovala v rozmezí od 280 do 680 g. Zvláštní je, že toto rekordní krupobití nezpůsobilo žádné zvláštní škody, s výjimkou několika lehce poškozených střech. Někteří obyvatelé, kteří zdokumentovali toto krupobití, podali prohlášení:

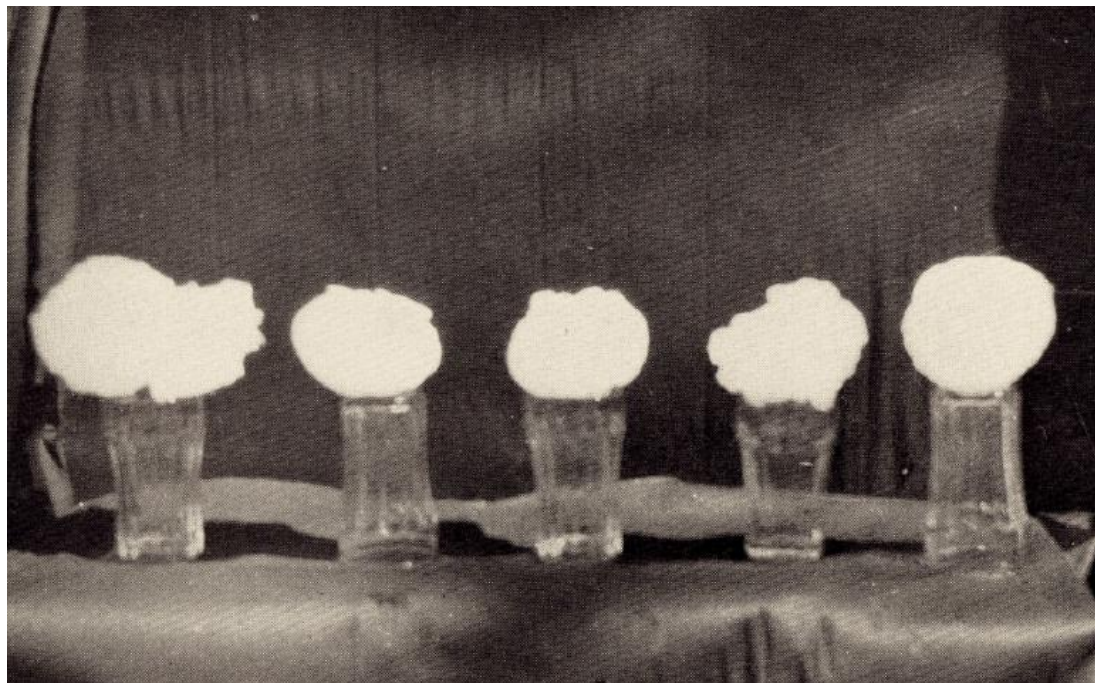
„That on July 6, 1928, following the hailstorm in Potter, Nebr., I gathered several hailstones and measured and weighed them on standard store scales, and that one stone measured 17 inches in circumference and that it weighted 1,5 pounds; and that I found another one almost twice as large but was evidently composed of two mammoth stones frozen together. The 17-inch stone was round and hard, with smooth surface, and upon breaking it open I found it was composed of concentric layers built around one center. Signed, J. J. Norcross“.

6. července 1928, jsem následně po krupobití v Potteru, Nebrasce, nashromáždil několik krup, které jsem změřil a zvážil je na běžné obchodní váze. Jedna kroupa měřila 17 palců (cca 43 cm) v obvodu a vážila 1,5 libry (cca 680 g). Byla kulatá a pevná, s hladkým povrchem a při rozbití jsem zjistil, že se skládá ze soustředěných vrstev poskládaných okolo jednoho středu. Dále jsem našel ještě jednu, která byla dvakrát tak velká, ale byla nejspíš složena ze dvou obrovských kusů. Podepsán J. J. Norcross.

„I, Andrew Anderson, a resident of Potter, Nebr., do affirm that on July 6, 1928, I picked up hailstones in Potter, Nebr., and that one round smooth stone weighed 19 ounces and was 15 inches in circumference. The stone had been outside 10 or 15 minutes before I picked it up, and perhaps had already melted some. Another stone, measured 7 inches from tip to tip, was 4,5 inches in diameter at the largest point and about 3 inches in diameter at the small end. From appearances this stone was only a part of a larger stone, it being broken. I would judge the whole stone, if it were intact, the pieces of which were lying around close by, would have been as large as an average man's head. Signed, Andrew Anderson“.

Já, Andrew Anderson, obyvatel Potteru v Nebrasce potvrzuji, že jsem 6. července 1928 posbíral kroupy v Potteru, a že jedna hladká kulatá kroupa vážila 19 uncí (cca 538 g) a v obvodu měřila 15 palců (38 cm). Kroupa byla venku 10 nebo 15 minut, než jsem jí zvedl a mezitím už možná trochu roztála. Další kroupa, měřící od špičky ke špičce 7 palců (18 cm) měřila v největším obvodu 4,5 palce (11,5 cm) a v nejmenším asi 3 palce (7,5 cm). Zdálo se, že tato kroupa byla pouze část jedné velké, která se rozbila. Usoudil bych z kusů, které se povalovaly v blízkosti, že celá kroupa, pokud byla neporušená, mohla být stejně velká jako hlava průměrného člověka. Podepsán Andrew Anderson (Blair, 1928)

I Když se jedná pouze o výpovědi místních obyvatel, lze brát tyto informace důvěryhodně, protože se je podařilo zdokumentovat. Na následující fotografii jsou zachyceny posbírané kroupy z roku 1928.



Obr. 8 – Kroupy, ležící na 3 decilitrových skleničkách, vyfotografované 6. července 1928 v Potteru J. J. Norcrosssem. Kroupa úplně vpravo, změřená v obvodu délkou 43 cm. Kroupa úplně vlevo, jenž je popsána spojením dvou obřích kusů (Blair, 1928).

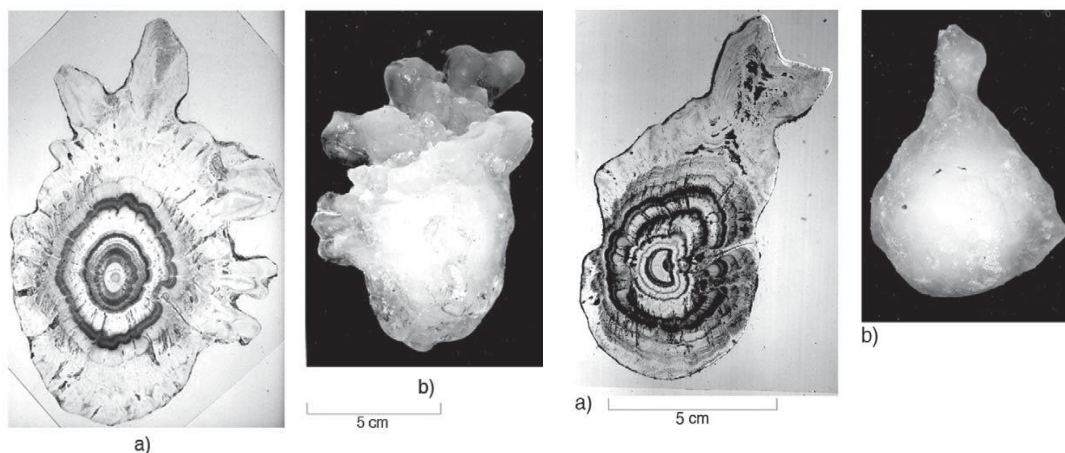
V dějinách lidstva se událo mnoho významných krupobití. Za uvedení stojí například krupobití v Číně z roku 1981, kde se uvádí, že jednotlivé kroupy dosahovaly hmotnosti až 7 kg, a v roce 1983 zde zaznamenali kroupy těžké 3 kg. To se připisuje nízkým zeměpisným šířkám, kde se nacházejí mnohem více vertikálně vyvinutá oblaka a jednotlivé kroupy k sobě přimrzají (Munzar, 1989). Ztrátu na životech a majetku pocítili himálajští obyvatelé v roce 1853, kde zemřelo na následky pádu 10 cm krup 84 lidí a 3 000 kusů dobytka (Vašků, 1999). Nejvíce lidských životů má však na svědomí krupobití z roku 1888 v Indii, tehdy přišlo o život 246 lidí a 1 600 domácích zvířat (Burt, 2011). Zajímavé je také australské krupobití z roku 1999. Bouře produkovala kroupy velké až 11 cm a napáchala škodu v hodnotě 1,7 miliardy australských dolarů (cca 35,7 miliardy Kč v roce 1999), což z ní dělá nejdražší australskou přírodní katastrofu od roku 1975. Během necelých 5 hodin stihla poničit 20 000 nemovitostí, 40 000 vozidel a 25 letadel, stojících na letišti (Australian Government, 1999; Buckley, 1999).



Obr. 9 – bouře nad Sydney, 1999.

(http://www.smh.com.au/ffximage/2008/12/06/nat131_hailstorm_wideweb__470x313,0.jpg).

Mezi jedno z posledních významných krupobití se řadí opět krupobití z Nebrasky, které se událo 22. června roku 2003. Jedná se o rekordní krupobití ve Spojených státech, pokud jde o velikost v obvodu a délku, avšak pokud se jedná o hmotnost nebo objem, byly zaznamenány mnohem významnější případy. Při tomto krupobití byly zjištěny mnohé tvary a struktury krup. Během zkoumání tenkých řezů (asi 1 mm) byla jasně zřetelná vrstevnatá struktura, která se vytváří suchým a mokřým růstem. Větší tmavé skvrny způsobil houbovitý růst ledu. Byly zdokumentovány symetrické kroupy, zploštělé a s rampouchovitými laloky (Knight et Knight, 2005). Toto dokazuje, že jediná bouře může mít velikou variabilitu jednotlivých krup, a že procesy v oblaku při tvorbě krup jsou stále nepředvídatelné. Můžeme se jen domnívat, jak se počasí bude vyvíjet dalších 100, 500 nebo 1 000 let, a jaká krupobití nás ještě čekají.



Obr. 10 – Kroupy, které vypadly při krupobití v Auroře, Nebrasce roku 2003. Kroupa vlevo a její řez znázorňují největší vypadlou z hlediska objemu nebo hmotnosti. Na kroupách vpravo si lze všimnout rozlomeného zárodku a rampouchovitého výběžku na jedné straně. Velké bubliny uvnitř výběžku znázorňují, že vnitřní část rostla jako houbovitý led (Knight et Knight, 2005).

5 Bouře s krupobitím

Nutné a postačující podmínky pro tvorbu krup v bouřích, je jednoduché uvést v základních předpokladech. Bouře musí poskytnout silné výstupné proudy obsahující přechlazené vodní kapičky jako prostředí pro růst krup, do kterého se musí dostat zárodky krup. To jsou částice ledu s rychlostí pádu několik desítek metrů za sekundu, které mohou vyrůst během několika desítek minut do krup. Jejich růst musí být poměrně rychlý, protože vhodné prostředí může zmizet, když výstupný proud zeslábné (výstupné proudy v mnoha bouřích jsou přerušované) nebo obsah přechlazených kapiček v proudu je vyčerpán, a to buď evaporací, když se výstupný proud promíchá s okolním suchým vzduchem nebo změnou na mnoho malých ledových částiček. Pokud je rychlost stoupaní potenciálního zárodka příliš velká, může být vnesen mimo oblast růstu před tím, než naroste do dostatečné velikosti, kdy vypadává jako kroupa z oblaku. Pokud je rychlost stoupaní příliš malá, může vypadnout dříve, než do této velikosti naroste. Oblast růstu se nachází mezi teplotami 0°C až -40°C, v teplotě, kde samovolně zamrzají všechny přechlazené kapičky (ve výšce 5 – 6 km uvnitř oblaku). Tvorba krup poté závisí na kritickém vztahu mezi trojdimenzionálním prouděním vzduchu uvnitř oblaku, zániku přechlazených kapiček vyskytujících se ve výstupném proudu a dráhami potenciálních zárodků krup. Tyto faktory spolu rozhodují, kolik vodní páry, která kondenzuje, se vypaří ve střední a vyšší vrstvě atmosféry a jaký podíl z toho spadne v podobě deště a jaký

v podobě krup. Vyjádřit procentuálně, jaký podíl vypadne v podobě krup, je obtížné změřit, ale obvykle je velmi malé (Knight et Knight, 2001).

5.1 Konvektivní bouře typu supercela a multicela

Termín bouřka je charakteristický pro elektrické, akustické a optické jevy, které doprovázejí atmosférické výboje. Konvektivní (též konveční) bouře je soubor jevů, které se pojí s oblaky typu kumulonimbus. Jde především o nárazový vítr, tornáda, intenzivní srážky nebo krupobití. Není však dán předpoklad, že bouřka musí doprovázet konvektivní bouři a konvektivní bouře nemusí být vázána na běžnou bouři (Setvák, 1999). Tyto bouře se vyskytují především v letních měsících.

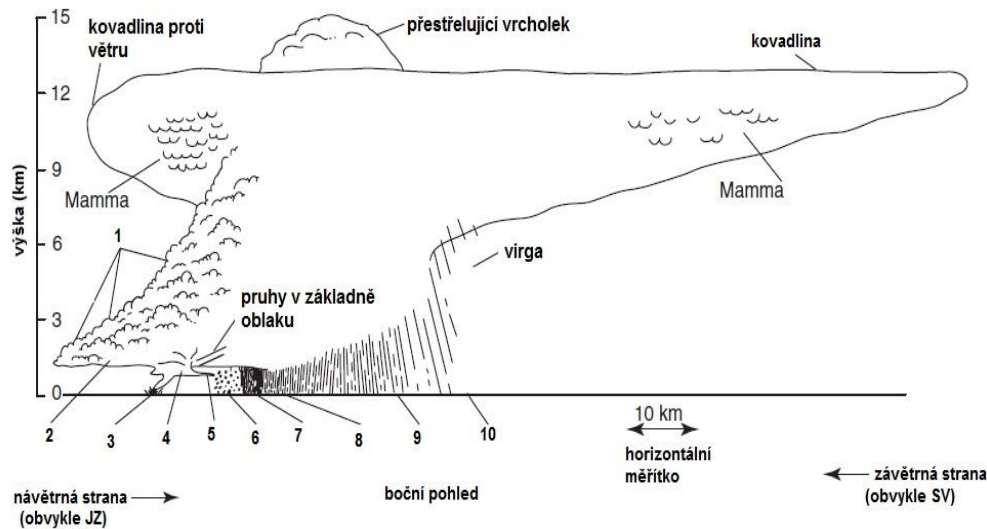
Jak už bylo popsáno, jsou konvektivní bouře spojeny s mnoha jevy a je známo, že vytvářejí jedno z nejdivočejších počasí na zemi. Konkrétněji se jedná např. o záplavové deště produkující až 100 mm srážek za hodinu, těžké povrchové větry, které někdy dosahují síly i větší než 100 kN, kroupy o velikosti grapefruitů, a též jsou často doprovázeny blesky a tornády. Jednotlivé konvektivní buňky (cely) obvykle dosahují velikosti 5 – 30 km, a mohou dosahovat životnosti od 30 – 40 min až po více než 6 hodin. Kromě toho, když se oblast s výstupným proudem oddělí od oblasti, kde dochází ke srážkám, může bouřková buňka dále narůstat a vytvořit některý z mezoměřítkových konvektivních systému, např. čáry húlav (squall lines), oblouková echa (bow echoes) a meziměřítkový konvektivní komplex. Tyto systémy mohou dosahovat rozměrů několika kilometrů, a v některých případech mohou trvat až několik dní. Znalosti konvektivních bouří jsou z velké části založeny na rozsáhlých radarových studiích (užitím konvektivních i Dopplerovských radarů), ale také na matematickém modelování oblaků (Weisman, 2003).

Každá konvektivní bouře je tvořena dvěma vertikálními proudy. V počátečním stádiu buňky je přítomen pouze výstupný proud a při rozpadu pouze proud sestupný. Oba dva proudy obsahuje bouře, která je ve vrcholném stádiu svého vývoje (Setvák, 2003). Konvektivní bouře se svojí strukturou dělí na 3 základní typy. Jde se o:

- 1) Jednoduchá konvektivní cela (unicela, singlecela) – jedná se o nejzákladnější typ konvektivní bouře, která je tvořena jednou celou. Skládá se z jednoho výstupného proudu, který rychle stoupá přes troposféru v nestabilní atmosféře a produkuje velké množství vody a ledu. Když jsou kapky nebo ledové částice pro výstupný proud příliš těžké, začnou padat a vytvoří sestupný

proud, který rychle nahradí proud výstupný. Sestupný proud je zpočátku téměř nasycený, ale jak padá do nižší oblasti troposféry a míchá se se sušším vzduchem, může dojít k evaporativnímu chlazení. Toto chlazení zrychluje sestupný proud (z důvodu záporného vztlaku), který se horizontálně rozprostře jako studené jezero, když dosáhne zemského povrchu. Pokud jsou rozdílné větry vytékající z oblaku skutečně silné, je tento jev označován jako downburst, popř. microburst. Tento životní cyklus většinou trvá 30 - 50 min a nepříznivé počasí, jako silné větry nebo kroupy nemají dlouhého trvání.

- 2) Vícebuněčné bouře (multicely) - si lze představit jako shluk běžných buněk, které spolu vytvoří mnohem silnější bouři, než kdyby buňky existovaly samostatně. Výlevy studeného vzduchu ze starých zaniklých buněk spolu se stříhem větru podporují vývoj nových buněk. Vzhledem k jejich schopnosti neustále se obnovovat, trvají multicely často mnoho hodin a mohou zaujímat rozlohu několika tisíc kilometrů čtverečních. Když se bouře pohybuje velmi pomalu, často se objevují těžké lokální srážky představující riziko záplav. Multicely mohou provázet silné povrchové větry, v podobě downburstů a microburstů, společně s kroupami a tornády v bezprostřední blízkosti centra silného výstupného proudu (Weisman, 2003).
- 3) Supercely – jsou potenciálně nejvíce nebezpečné konvektivní bouře, často produkující silné větry, ničivé krupobití, intenzivní přívalové srážky nebo dlouhotrvající tornáda. Znakem této bouře je silný rotující výstupný proud, který vzniká ve středních hladinách, šíří se vzhůru i k základně bouře a zajišťuje jí dlouhou dobu života. Zajímavostí je, že se v multicele může objevit jádro supercely, která posléze v bouři zvítězí a z bouře se stane supercela. Naopak se může stát ze supercely multicela. Jakmile bouře zeslábne, vzniknou nová jádra multicely (Setvák, 1999).

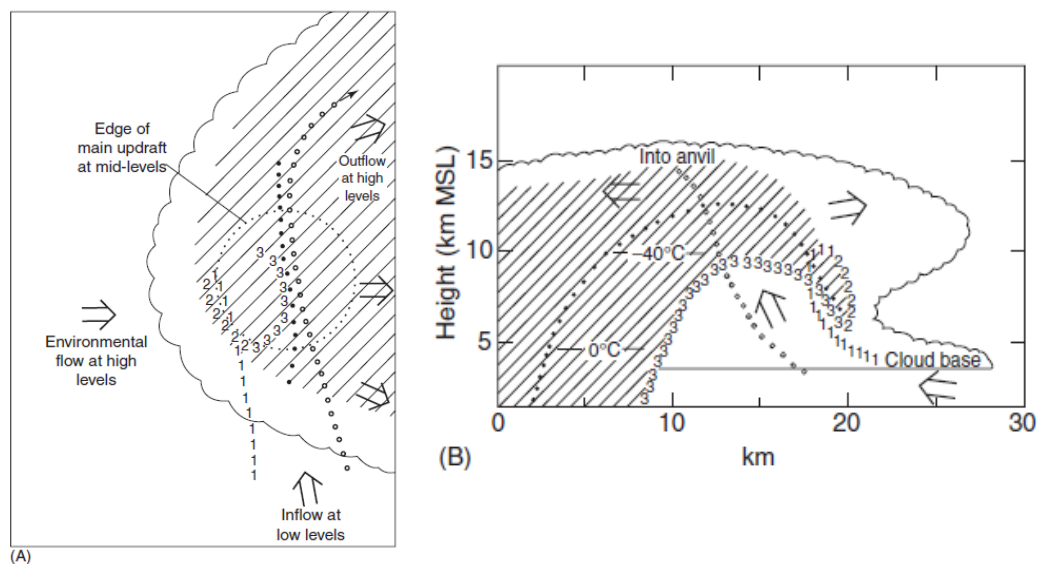


Obr. 10 – Schéma zralé supercely. 1 – pás oblačnosti na boku bouře, 2 – návěťový oblak, 3 – tornádo, 4 – rotující oblak, 5 – výběžek oblačnosti, 6 – velké kroupy, 7 – malé kroupy, 8 – příválový déšť, 9 – mírný déšť, 10 – slabý déšť (upraveno dle Bluestein a Parks, 1983).

5.1.1 Vývoj krup v supercelách

Supercela je typ bouře, trvající dlouhou dobu, jež může urazit značné vzdálenosti. Často vytvářejí tornáda a dlouhé pásy velkých, ničivých krup. Schémata na obr. 11 představují typický příklad ve středu Spojených států. Představují horizontální řez s pohledem dolů, na bouři a vertikální řez. Oba znázorňují možné dráhy růstu. Vlhký vzduch vstupuje do bouře v silném proudu na povrchu od jihu nebo jihovýchodu, stoupá vzhůru středem bouře a opouští jí na východě, protože proudění jde ve vyšších polohách od západu. To způsobuje, že se jižní část „odtékajícího vzduchu“ přenáší ve vyšších polohách přes „přitékající vzduch“, který do oblaku vstupuje na povrchu. Výstupný proud může ve středu bouře dosahovat $30\text{--}50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, takže malé ledové částičky, jež rostou uvnitř tohoto proudu, nemají dostatek času, aby vyrostly do velkých rozměrů a dosáhly rychlosti pádu před tím, než jsou vtaženy do proudu odtékajícího z oblaku na vrcholu bouře. V oblasti, kde se tvoří značné kovadliny, které jsou pro supercely charakteristické. Nicméně v odtékajícím proudu je malý vertikální pohyb vzduchu, jehož cílem je, aby se některé z těchto částiček vrátily zpět do proudu vzduchu přitékajícího v nižších polohách. Mohou se stát zárodky krup a dostanou šanci vyrůst, zatímco stoupají podruhé výstupným proudem. Tím jak padají rychleji vzhledem k okolnímu vzduchu, stoupají pomaleji a mají čas dorůst do plnohodnotných krup.

Je to obzvláště jednoduchá a organizovaná recyklace srážkových částic pro tvorbu zárodků krup v bouři; jednoduše protože většina supercel není v ustáleném, stabilním stavu, ale vyvíjí se mnoha způsoby.



Obr. 11 – schema proudění vzduchu a některé trajektorie hydrometeorů v bouři typu supercela. (A) – půdorys, s pohledem dolů na bouři, znázorňující vtékání vzduchu v nižší poloze od jihu (spodní část obrázku), hlavní výstupný proud uvnitř bouře, zakreslený tečkovanou kružnicí, proudění okolního vzduchu od západu ve vyšší poloze a odtékající vzduch na východě. Oblast uvnitř oblaku, která obsahuje hydrometeory, je vyšrafovaná. (B) – příčný řez od jihu na sever rovnoběžně s přítokem vzduchu, s prouděním vzduchu ve vyšší poloze dále od čtenáře. Trajektorie, zakresleny na obou schématech prázdnými kolečky, znázorňující přímý růst v hlavním výstupném proudu; kondenzaci, zamrzání vedoucí k malým ledovým částicám, které cestují se vzduchem a pryč, do kovadliny ve vyšší poloze. Trajektorie, zakresleny plnými kolečky, označují částice, které vznikají ve slabších stoupajících proudech na jižní straně výstupného proudu, rostou do větších velikostí, dosáhnout větších rychlostí pádu a vypadávají jako malé kroupy nebo déšť, severně od hlavního výstupného proudu. Dráhy označené čísly 1, 2 a 3 představují tvorbu velkých krup: (1) pomalý růst stoupající na západní straně výstupného proudu, (2) sestup zpět do přítoku vzduchu během pohybu v okolním proudu kolem jižní strany výstupného proudu a (3) konečný růst jako kroupa uvnitř silného výstupného proudu a padání na jeho severním okraji.

5.1.2 Vývoj krup v multicelách

Na druhé straně jsou multicely složeny z jednotlivých konvektivních buněk, které rostou a rozpadají se v těsné vzájemné blízkosti, někdy systematickým způsobem. Jednotlivé buňky mohou existovat 45 – 60 min, zatímco jejich výstupné proudy stoupají vzhůru do maxima a poté zaniknou. To může být dostatečná doba pro vytvoření významného krupobití, a pokud není počáteční výstupný proud

dostatečně silný, zárodky mohou mít mnoho času k růstu. Následně mohou dosáhnout rychlosti pádu až několik metrů za sekundu, aniž by byly vyneseny příliš vysoko do oblaku. Když výstupný proud zesílí, zárodky krup se tam již mohou vyskytovat, ve správné oblasti a připravené k tvorbě krup.

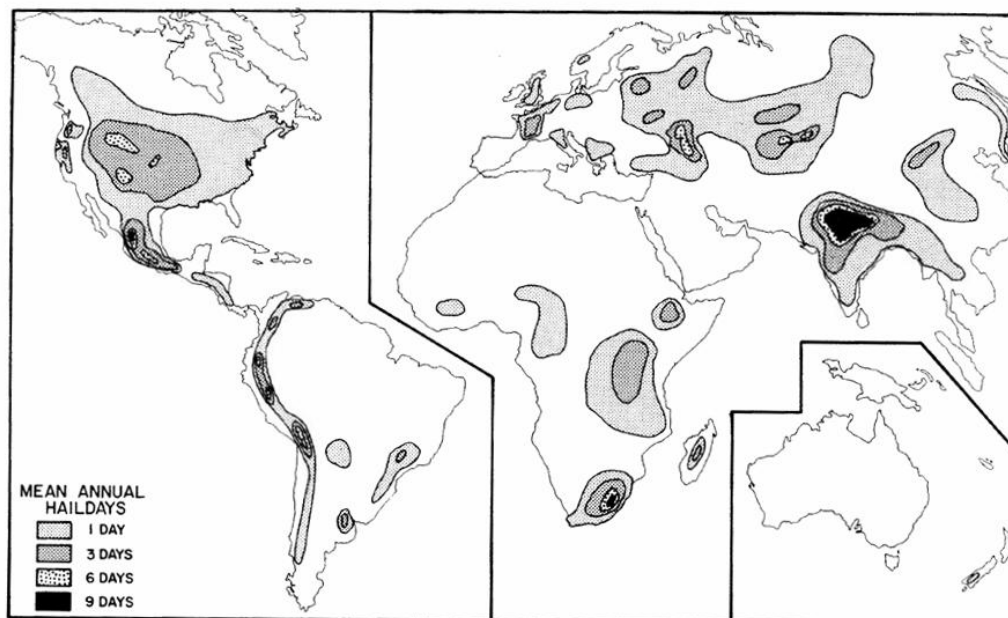
Multicely obvykle produkuje nepravidelná, přerušovaná krupobití, která mohou vytvořit velké pásy krup, pokud je multicela uspořádaná, nebo může být uspořádána nepravidelně.

6 Výskyt krupobití

Krupobití se nejčastěji vyskytuje ve vnitrozemí, středních šířkách a je méně časté směrem k pólům, rovníku a nad mořem. V chladném podnebí nejsou oblaka dostatečně mohutná a neobsahují v sobě ani velkou koncentraci oblačné vody, aby mohla vytvořit velká krupobití (Mason, 1957). Jak uvádějí Knight a Knight, je to jev, probíhající v malém měřítku, který obvykle ovlivňuje oblasti o rozloze jednoho až několik málo desítek kilometrů čtverečních, i když ovšem byly zaznamenány případy mnohem větší. Pozorování krupobití se špatně provádí běžnými systémy na pozorování počasí, a proto se mnoho malých krupobití nepodařilo zaznamenat vůbec. Informace o krupobití jsou proto pouze statistického charakteru, a mnoho informací o nich pochází pouze z pojišťovacích záznamů.

Asi nejobecnější klimatologický vztah pro krupobití je, že se často vyskytuje u závětrných stran pohoří. V Jižní Americe, Spojených státech a Kanadě je častý výskyt krupobití na závětrné straně And a Skalisticých hor – oblasti s významně vysokým počtem bouří. Z hlediska škod od krupobití na úrodě, však oblasti, kde je střední frekvence výskytu krupobití, mohou být mnohem důležitější, pokud obsahují plodiny, které jsou mimořádně citlivé na poškození a mají vysokou hodnotu na jednotku plochy, jako např. vinice, tabák, čaj a některé druhy ovoce a zeleniny (Knight et Knight, 2001). Podrobněji se o místech, s častým výskytem zmiňuje Kessler (1992). Ten uvádí, že na světě existuje několik oblastí, kde je pravidelný výskyt krupobití v každém letním období. Tyto lokality mají bodovou četnost krupobití 3 – 10 dnů ročně. Dvě největší souvislé oblasti se nacházejí na severní polokouli. První z nich leží v Severní Americe a táhne se v délce asi 2 000 mil od kanadských provincií Alberta a Saskatchewan na jih, přes státy Dakota, Nebraska, Colorado, Kansas, Oklahoma až po stát Texas. Druhá velká oblast v Evropě, se

rozkládá od jižní Francie, přes Švýcarsko, jižní Německo, severní Itálii, Rakousko a zasahuje, do východních států Bulharska a Rumunska až po kavkazskou oblast v Rusku. Dalo by se tedy říct, že oblasti s vysokou frekvencí krupobití se rozkládají ve středních zeměpisných šířkách a po větru ve vysokých horských pásmech (Kessler, 1992). Tyto oblasti jsou dobře viditelné na obr. 5.

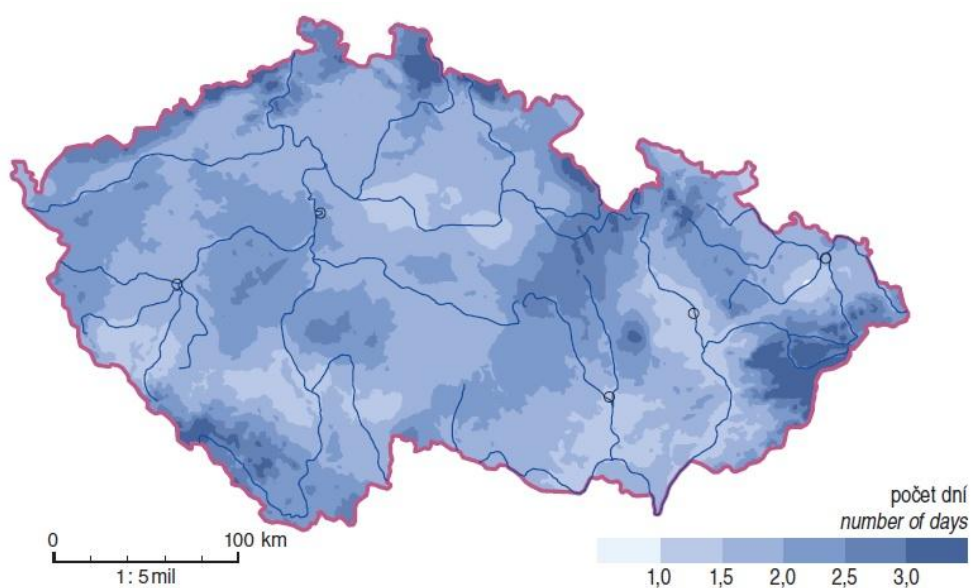


Obr. 12 – bodová četnost na mapě světa, udávající počty dnů s krupobitím (Court et Griffith, 1986).

Jak už bylo výše uvedeno, krupobití je vzácnější směrem k pólům, a to jednoduše proto, že četnost konvekčních bouří klesá s rostoucí zeměpisnou šířkou, Kroupy jsou také vzácně v tropických oblastech a v oblastech nad mořem, ale důvody, proč je tomu tak, nejsou zatím jednoznačné. Jedním z důvodů může být četnost bouří. Déšť se tvoří mnohem snadněji v oblacích v tropech než v podnebí mírného pásu, protože vyšší vlhkost vzduchu a teplejší základna oblaku poskytuje v průměru mnohem více vody v kapalném stavu v oblacích s teplotou pod bodem mrazu. Tudíž déšť vzniká srůstáním kapek bez zapojení ledové oblasti a pád tohoto deště snižuje množství přechlazených kapek ve vyšších hladinách oblaku, kde je vhodná teplota pro růst krup. Déšť se rovněž vytváří mnohem snadněji v přímořských oblastech, protože mořský vzduch obsahuje méně jader pro kondenzaci, což snižuje koncentraci kapek. Snižovaná koncentrace kapek zvýší jejich

velikost, vedoucí opět k rychlejší tvorbě a zahájení dešťových srážek a snižuje pravděpodobnost tvorby krup (Knight et Knight, 2001).

Z radarového měření se podařilo zjistit, že bodová četnost pro Českou republiku se pohybuje okolo jednoho dne ročně, přičemž jsou do této hodnoty zařazeny všechny kroupy splňující požadavek, který je minimálně 5 mm (Řezáčová, 2007). Vyskytují se především v letním půlroce (cca 90% ročního počtu), nejčastěji v květnu a červnu. V zimním období se kroupy vyskytují pouze ojediněle. Ze 33 stanic po celé české republice bylo nejvíce zaznamenaných dnů s krupobitím na stanici Praděd (5,4 dne) a nejméně ve stanici Kralovice (0,6 dne). Výskyt v jednotlivých letech je velice proměnlivý. Např. v roce 1972 a 1974 byla na stanici Lysá hora zaznamenána četnost 10 dnů a o 15 let později, v roce 1999 nebyl zaznamenaný ani jeden den (Atlas podnebí Česka, 2007).



Obr. 13 – průměrný roční počet dní s kroupami v ČR (Atlas podnebí Česka, 2007).

7 Škody způsobené krupobitím

Škody způsobené kroupami byly zaznamenávány od starověku. Kroupy jsou známé tím, že dokážou zabít dobytek, koně a ve vzácných případech i člověka. Jak už bylo popsáno v kapitole o velikosti krup, k jednomu z nejsmrtelnějších krupobití k dnešnímu dni, došlo v Indii v roce 1888, kde kroupy v Moradabadu ubily 230 lidí a 16 dalších asi 50 mil od této oblasti. Z Jižní Karolíny, kde pravděpodobně došlo k prvnímu zaznamenanému úmrtí člověka na území Spojených států, bylo hlášeno že, 8. května 1789 zemřelo 8 lidí na následky pádu kusů ledu o průměru zhruba 23 cm. I když bylo krupobití přisuzováno k úmrtí v roce 1909 v Uvalde, Texasu a v roce 1931 ve Windsoru, v Severní Karolíně, Národní meteorologické služba uznává ve 20. století pouze dva případy, za které krupobití může. První z nich se stal 13. května 1939 v Lubbocku v Texasu, kde přišel o život 39letý zemědělec. Ve druhém, smutnějším případě šlo o tříměsíčního chlapce. Ačkoli jsou takováto neštěstí ve Spojených státech celkem vzácná, je americký kontinent stále v popředí, co se škod od krupobití týče. Oproti suchu nebo záplavám, postihuje krupobití ve světovém měřítku asi jen 1% škod na celkové zemědělské produkci. Nejvíce náchylné k poškození, jsou vypěstované plodiny jako např. pšenice, kukuřice, sójové boby a tabák (Wixon, 2005). V potenciálním nebezpečí jsou však veškeré nadzemní orgány u všech rostlin (Vašků, 1999). Kessler (1992) uvádí, že ve světě existují oblasti, které pokrývají jen malou část zemského povrchu. V těchto oblastech je ale četnost a vážnost krupobití tak vysoká, že se stávají rozhodujícími faktory, které rozhodují o úspěchu nebo selhání mnoha zemědělských činností.

Pokud jde o finanční stránku, odhadnuté škody za poničené plodiny se vyšplhaly v roce 1997 v USA na 1,3 miliardy dolarů (odpovídá zhruba 39,6 mld. Kč, podle kurzu z roku 1997), což představuje asi 2% z roční hodnoty všech plodin ve Spojených státech. Škody na majetku se v ten samý rok vyšplhaly na částku zhruba 1 miliardy dolarů (30,5 miliard). Kvůli těmto ekonomickým důsledkům, je každý šestý zemědělec pojištěný proti kroupám. V oblastech s častým krupobitím, můžou pojistné sazby činit 30% z hodnoty úrody (Wixon, 2005).

Následující tabulka znázorňuje další klasifikaci krup, opět dle TORRO.

	intenzita krupobití	průměr (mm)	způsobené škody
H0	malé	5	žádné
H1	potenciálně škodlivé	5 - 15	mírné poškození rostlin, plodin
H2	významné	10 – 20	významné poškození ovoce, plodin, vegetace
H3	těžké	20 – 30	závažné poškození ovoce a plodin, poškození skla, plastů a maleb
H4	těžké	25 – 40	rozšířené poškození skla, poškození karoserií vozidel
H5	ničivé	30 – 50	hromadná destrukce skla, poškození tašek na střeše, významné riziko zranění osob
H6	ničivé	40 - 60	promáčknuté karoserie stojících letadel, důlky v cihlových zdech
H7	ničivé	50 – 75	těžké poškození střech, riziko vážného zranění osob
H8	ničivé	60 – 90	těžké poškození karoserie letadla
H9	Super krupobití	75 – 100	rozsáhlé poškození stavebních konstrukcí, riziko vážných, nebo dokonce smrtelných zranění osob na otevřeném prostranství
H10	Super krupobití	> 100	rozsáhlé poškození stavebních konstrukcí, riziko vážných, nebo dokonce smrtelných zranění osob na otevřeném prostranství

Tab. 3 – stupnice intenzity krupobití a potenciální škody. Jedná se o orientační údaje (typické maximální údaje jsou tučně), protože až ostatní faktory (např. počet a hustota krup, rychlost pádu, rychlost přízemního větru) určují závažnost (TORRO).

Ačkoliv v České republice nedosahují škody z krupobití tak obrovských sum jako ve Spojených státech, nedá se říci, že by byly zanedbatelné. Následující tabulka znázorňuje výtah dat z České asociace pojišťoven, za posledních 7 let, ve kterém je přehledně znázorněn počet pojistných událostí v živelním pojištění. Jak je zřejmé, četnost vichřic a krupobití jsou skoro ve všech případech vyšší, než jakékoliv jiné škody. Z tabulek je také dobře vidět, v jakém roce ČR postihly různé živelné pohromy. Např. ze záznamů z roku 2010 je jasně patrné, že zemi postihly povodně. V roce 2007 zasáhl Česko orkán Kirril a v roce 2008 vichřice Emma. Úplná data pro rok 2008 se mi bohužel nepodařilo dohledat, zaznamenaná jsou data pouze čtvrtletní.

Počet pojistných událostí (ks)	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006
škody z tíhy sněhu	8 250	12 145	57 494	17 183	207	1 677	68 690
škody z povodní	9 938	10 405	39 123	25 010	258	12 121	31 262
vichřice a krupobití	33 828	22 826	53 226	35 375	37 016	108 024	17 990
celkem	52 016	45 376	149 843	77 568	37 481	121 822	117 942

Tab. 4 – počet pojistných událostí v živelním pojištění za posledních 7 let. Sestaveno dle (ČAP).

Počet pojistných událostí (Kč)	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006
škody z tíhy sněhu	148 399	271 774	1 246 871	309 790	2 403	20 603	2 564 492
škody z povodní	353 794	336 827	3 743 162	1 508 902	5 070	386 892	1 340 848
vichřice a krupobití	1 740 007	1 045 302	2 751 925	1 936 736	1 250 653	3 134 566	685 606
celkem	2 242 200	1 653 903	7 741 958	3 755 428	1 258 126	3 542 061	4 590 946

Tab. 5 – výše škod za pojistné události v živelním pojištění za posledních 7 let. Sestaveno dle (ČAP).

8 Potlačení krupobití

Po mnoho let – a různými způsoby – se zemědělci snažili uchránit své vypěstované plodiny před škodami způsobenými krupobitím.

Nová možnost se objevila krátce po druhé světové válce. S objevem umělého vytváření ledových krystalů a následným vývojem technik infikování oblaků, se začalo s potlačáním krupobití. Bylo odzkoušeno několik operačních projektů a posléze bylo provedeno několik vědeckých experimentů.

Doposud byly výsledky různorodé a nejasné. Někteří věří, že bylo dosaženo snížení krup z krupobití o 20% - 30%. Jiní věří, že infikování oblaků krupobití zvyšuje, způsobuje sucho nebo nemá žádný efekt. Z největší části byly pokusy, o potlačení krupobití ve Spojených státech, doprovázeny kontroverzními a vědeckými nejasnostmi. Odpovědi jsou zatím nejasné, ale výzkum jak potlačit krupobití se stále rozvíjí (Changnon, 1977).

8.1 Co krupobití způsobuje a jak se bránit

Krupobití je rozšířený jev v mírných pásech po celém světě. V některých oblastech představuje obrovskou ztrátu na zemědělské produkci a v posledních letech výrazně vzrostly pojistné škody ve velkých městských oblastech, nejčastěji se jedná o poškozené střechy a poničené automobily (Knight et Knight, 2001). V dnešní době jsou známy dvě metody, pomocí kterých se můžeme krupobití potenciálně ubránit, přestože výsledky nejsou vždy jisté.

8.1.1 Metoda infikování oblaků

Pokusy ovlivnit atmosférické procesy mají dlouhou a pestrou historii. Studie oblaků a srážek pokročila k poznání, že fáze ledu má více převládajících rolí, než pouze formování sněhu a krup. Bylo zřejmé, že mnoho oblaků obsahuje přechlazené kapky vody, a že v těchto oblacích mohou růst ledové krystaly velmi rychle. Tyto krystaly mají vysokou míru kondenzace, neboť led má nižší tlak par než voda a tím mohou sbírat přechlazené kapičky přichycováním na sebe, jakmile vyrostou do velikosti, kdy mají nezanedbatelnou rychlost pádu. Tyto mechanismy mohou vést k rychlejšímu a efektivnějšímu vývoji srážek, než je možné pouhou koalescencí^[6] vodních kapek. Na základě těchto argumentů se předpokládalo, že většina srážek po celém světě, zvláště v mírném podnebném pásu, byl prvotně led, který roztál dříve, než dopadl na zem (Götz et al., 1991).

Podle Řezáčové (2007) můžeme rozdělit zásahy do oblaků podle toho, jaký výsledek od daného zásahu očekáváme na:

- 1) vyvolání srážek z původně nesrážkových oblaků,
- 2) rozpad oblaku nebo mlhy,
- 3) potlačení vývoje a vypadávání krup.

Zamezení krupobití, vysazením umělých ledových jader do oblaku, bylo používáno v mnoha částech světa po několik desetiletí. Tato metoda je stále více rozšířená, ačkoliv také sporná, jelikož zatím nedošlo k definitivnímu potvrzení pozitivních účinků (Knight et Knight, 2001). Jak uvádí J. Podzimek (1959), od konce minulého století do dnešních dob bylo prováděno mnoho metod, které ovlivňovali počasí. Na uvolnění srážek se podle starých publikací používal zvuk, kouř, dým, elektrostatické náboje i chemické prostředky. Například v roce 1923 byl pro pokus o

uvolnění srážek, rozstříkovan tekutý vzduch pod základnou oblaků. Výsledek však nebyl určitý.

Hlavní myšlenkou infikování, je zvýšit počet potenciálních zárodků krup v oblaku, a tím vyčerpát přechlazenou vodu – dojde ke snížení velikosti krup, jelikož se zvýší jejich počet. Pokud je dostatečně snížena velikost, většina nebo všechny kroupy poté roztají ještě před dopadem na zem. V ideálním případě by bylo potlačeno krupobití a zvýšeny dešťové srážky (Knight et Knight, 2001).

Pro potlačení vývoje krup se využívají umělá ledová jádra, obsahující částice jodidu stříbrného – AgI. Toto činidlo se do oblak dopravuje různými způsoby, např. letadly, na kterých jsou připevněny hořáky s infekční látkou, pozemními generátory, raketami, které dopravují infekční látku do vyšších oblačných hladin. První metoda, která by zamezila základnímu mechanismu růstu krup, čímž je přichycování přechlazených kapek vody, je založena na principu, kdy se nechají zamrznout veškeré přechlazené kapky vody v oblasti oblaku, v němž očekáváme růst. Materiálu, kterého je potřeba pro tuto metodu, je ovšem tolik, že převyšuje dosavadní možnosti v oblasti infikování (Řezáčová, 2007). Při teplotě -5°C až -15°C o rozloze oblaku zhruba 5 km^2 , vznikne z 1 g AgI přibližně 10^{13} jader (Mason, 2010). Götz (1991) uvádí, že při 1 g jodidu stříbrného je to při teplotě -15°C a méně, 10^{15} až 10^{16} jader. Pokud by byly výsledky zkoušek přímo převoditelné do atmosféry, 1 g AgI by pokryl při -10°C zhruba 10^4 m^{-3} jader.

Druhou metodou, která je mnohem mírnější na požadavky, je taková, kdy se nechá zamrznout pouze oblast, kde probíhá vývoj kroupových zárodků, popř. oblasti, kam zasahují. Tři základní postupy, jejichž výsledek je cílem potlačení krup je následující:

- 1) Princip soutěže kroupových zárodků (beneficial competition) – jehož hlavní myšlenkou je zvýšení počtu zárodků krup pomocí činidla, než je přirozeným vývojem. Výsledkem bude soupeření o dostupnou přechlazenou vodu, čímž dojde ke zmenšení velikosti krup. Díky tání malých krup poté na zem dopadají malé ledové částice nebo déšť.
- 2) Snížení trajektorií částic (trajectory lowering) – infikováním dojde ke zvětšení částic v nižší části výstupného proudu, v oblasti, kde se tvoří zárodky. Nižší

trajektorie pak prochází oblastmi, které nejsou tak bohaté na obsah vody a pobývají v oblaku kratší dobu. Tím se opět sníží velikost krup.

- 3) Předčasný déšť (early rainout) – jde o vyvolání srážek z oblasti, která obsahuje zárodky krup, dříve, než proběhne přirozený proces vývoje krup (Řezáčová, 2007).

Jak uvádí J. Podzimek (1959), úspěšnost infekce závisí především na množství kapalné vody a vodní páry, jež ovlivňují narůstání umělých jader. V přechlazených oblacích závisí především na poměru koncentrace vodních kapiček a koncentraci ledových jader, která vznikla buď přirozenou cestou, nebo byla dodána infikací. Na tomto poměru a fyzikálním stavu závisí, jestli se oblaka rozpadnou, vyvolají déšť nebo zůstanou v atmosféře.

Proběhly diskuze o optimalizace „vysazovacích“ materiálů, načasování a přesné oblasti pro vysazení, ale znalost přirozeného vývoje obsahu ledu v kroupách je stále v začátcích, takže může trvat ještě mnoho let, než bude dosaženo konsensu o potlačení krupobití (Knight et Knight, 2001).

8.1.2 Protikroupové dělo

Pro některé metody, v otázce potlačení krup, jako např. protikroupové dělo nebo ionizační zařízení, neexistuje, podle Světové meteorologické organizace (WMO), fyzický základ a tudíž nejsou doporučovány (WMO, 2003). I přesto se však lze s nimi na trhu setkat a výrobci slibují něco, co nemohou s jistotou splnit.

Protikroupové dělo je generátor vytvářející rázové vlny, který má narušit vývoj krup v jejich růstové fázi. Explosivní nálož složená z acetylenu a vzduchu je vystřelena z dolní komory stroje. Jak výsledná energie prochází přes krk do kužele, vzniká rázová vlna. Tato vlna, jasně slyšitelná jako pískavý zvuk, cestuje rychlostí zvuku skrz oblak a narušuje růstové fáze krup. Zařízení opakovaně vystřelí každé 4 sekundy po dobu, dokud se bouře blíží. Místo krup poté vypadává rozbředlý sníh nebo déšť. Důležité je, aby stroj běžel v průběhu přibližující se bouře, a tím měl vliv na vyvíjející se kroupy. Tyto stroje nemohou změnit formu již vyvinutých a zpevněných krup.

Zatímco se historie protikroupových děl datuje do 18. století, moderní dělo bylo vyvinuto převážně v průběhu posledních 30 let. Účinná oblast pro jednotlivý stroj je přibližně rádius 500 m. Se zvyšující vzdáleností se samozřejmě efektivita

sníží. Radarově řízené systémy jsou schopny nahradit člověka, který je potřebný pro spuštění a zastavení stroje. To je obzvláště důležité v oblastech, kde dochází ke krupobití v noci (Eggers).

8.2 Detekce krup pomocí radaru

Jak uvádí B. J. Mason (2010), základní principy provozu radaru jsou jednoduché. Přístroj vysílá pravidelné velmi krátké elektromagnetické pulsy o velkém okamžitém výkonu směrovou anténou, kterou je formována do úzkého svazku. Jakmile puls narazí na překážku, část energie se absorbuje, část se rozptýlí a část se vrátí zpět do přijímacího systému, který pracuje s tou samou anténou. Přijatý signál (též echo), který je velmi slabý v porovnání s vyslaným impulsem, je zesílen a zpracován přijímačem radaru. Čas mezi vysláním pulsu a přijetím radarového odrazu určuje, jak je cíl vzdálený. Elevace a azimut udávají směr výskytu cíle. Jak je cíl intenzivní udává množství přijaté energie.

Když elektromagnetická vlna prochází skrz pevný objekt, jehož dielektrické vlastnosti se liší od těch v okolním prostředí, je část její energie absorbovaná objektem a zobrazí se jako tepelná skvrna, zatímco jiná část je rozptýlena do všech směrů bez šance na zjištění vlnové délky. V radarové meteorologii je důležitá hlavně intenzita zpětně přijatého signálu, který obvykle upozorňuje na výskyt nashromážděných dešťových kapek, krup nebo sněhových vloček (Mason, 2010).

Radarové metody dálkového průzkumu krup uvnitř oblaků, jsou v současné době využívány pro výzkum, ale ne pro funkční radarové sítě. Ty se spoléhají na měnící se polarizace vysílaných impulsů zpětně odraženého signálů. Často je používaná horizontální, vertikální, lineární a ve zvláštních případech kruhová polarizace. Silné radarové ozvěny mohou být způsobeny buď silnými dešti nebo kroupami a až do nedávné doby nebyl jejich smysl jednoznačný. Nicméně, velké kapky jsou trvale zploštělé, s větším horizontálním než vertikálním rozměrem, což produkuje podstatně silnější echo s horizontálně, než vertikálně polarizovaným radarem. U krup se zaznamenává více méně stejné echo u obou polarizací, neboť malé kroupy nejsou zploštělé a větší kroupy se při pádu otáčejí tak, že jsou jejich výchylky zhruba stejnou měrou rozloženy do prostoru. Tudíž rozdíl, označovaný jako „diferenciální odrazivost“ se používá jako signál pro krupobití, když je radarové echo silné.

Rozšířené použití a další pokročilé radarové techniky výrazně zvýší znalosti tvoření krup ve vztahu ke struktuře bouře a jejího chování, zejména pokud je technika vyvinuta k poskytnutí informací o velikosti a množství krup uvnitř bouře. Radarové snímání krupobití, jestliže je vyvinuto tak, aby bylo dostatečně kvantitativní a běžně používané, by mělo také významně přispívat k výzkumu krup a znalosti jejich klimatologie (Knight et Knight, 2001).

9 Závěr

I když se zdá, že již všechny informace z hlediska vzniku a vývoje krup byly popsány a jsou zřejmé, není tomu tak. V oblasti krupobití jsou stále nezodpovězené otázky, týkající se procesů v oblacích, které vývoj ovlivňují. Jelikož je krupobití jev pouze občasný a špatně předpověditelný, není možné mu věnovat veškerou pozornost. I když vědci vyvinuli v laboratorních podmínkách prostředí, simulující růst kroupy, aby jej mohli podrobněji zkoumat, výsledky nejsou stále zcela jednoznačné. Jednoznačné nejsou ani odpovědi v problematice umělých zásahů do oblaků, které už se několik desítek let věnují různé týmy vědců.

Ačkoliv každoročně krupobití způsobuje ohromné škody na majetku, úrodě a ojediněle i na životech lidí a zvířat, stále není v lidských silách včas krupobití předpovědět a následně se mu ubránit. Finanční a materialistické škody tak dosahují neuvěřitelných finančních částek, které způsobují újmy jak zemědělským a leteckým společností, tak i nám, běžným obyvatelům této planety.

Je zřejmé, že činnost člověka má za uplynulá desetiletí dopad na klimatické změny na Zemi. Tím dochází ke stále větším výkyvům počasí a výskyt extrémně silných bouří s nebezpečnými jevy je tak stále častější. Věřím však, že během následujících několika desítek let dosáhneme velkého pokroku v předpovědi těchto nebezpečných přírodních jevů a budeme schopni zamezit jeho vývoji.

10 Slovník pojmů

1. **cumulonimbus** – hustý kupovitý, vertikálně nejmohutnější ze všech oblaků, který zasahuje všechna patra oblačnosti; tvoří silné srážky dešťové, v zimě sněhové a v létě s kroupami
2. **výstupný proud** – proud s typickou šířkou 1km a menší, jenž dopravuje vzhůru velké množství kondenzátu. Tento proud proniká až do nejvyšších hladin konvekční bouře, překonává tropopauzu a proniká do spodní stratosféry.
3. **sněhové krupky** – nakumulovaná jinozatka na sněhových částech nebo zmrzlých kapičkách vody
4. **přechlazená voda** – voda, které zůstává v kapalném stavu i při teplotě pod 0°C
5. **latentní teplo** – energie, kterou je nutno dodat pro změnu fáze látky (teplo, které nemění teplotu látky, ale jen její skupenství)
6. **koalescence** - Spojování dvou nebo více kapek kapaliny v jednu o větším objemu a menším povrchu

11 Seznam grafů, vzorců, tabulek a obrázků

- **Seznam grafů:**

Graf 1 – rychlosti pádu krup vyneseny v závislosti na průměru krup.

Graf 2 – rychlosti růstu krup v závislosti na průměru vypočteném pro křivky z grafu 1.

- **Seznam vzorců:**

Vzor. 1 – výpočet rychlosti pádu krup.

Vzor. 2 – rychlost růstu kroupy.

- **Seznam tabulek:**

Tab. 1 – rozdělení vertikálních a horizontálních srážek.

Tab. 2 – klasifikace krup podle TORRO.

Tab. 3 – stupnice intenzity krupobití a potenciální škody.

Tab. 4 – počet pojistných událostí v živelním pojištění za posledních 7 let.

Tab. 5 – výše škod za pojistné události v živelním pojištění za posledních 7 let.

- **Seznam obrázků:**

Obr. 1 – schematické znázornění vzniku krup.

Obr. 2 – dva řezy velkou, zploštělou kroupou.

Obr. 3 – čtyři kroupy větší než 5 cm, na nichž jsou viditelné výběžky.

Obr. 4AB – fotografie tenkých řezů dvěma velkými kroupami.

Obr. 5ABC – fotografie a schéma tenkých řezů zploštělých krup.

Obr. 6 – kuželovitý zárodek kroupy.

Obr. 7 – krupobití v Opařenech v roce 1999 devastovalo čelní skla automobilů.

Obr. 8 – kroupy, ležící na 3 decilitrových skleničkách, vyfotografované 6. července 1928.

Obr. 9 – bouře nad Sydney, 1999.

Obr. 10 – schema zralé supercely.

Obr. 11 – schema proudění vzduchu a některé trajektorie v bouřích typu supercela.

12 Seznam použité literatury a zdrojů

ALLABY, M., 2007c: Encyclopedia of weather and climate. Rev. ed. NY : Facts on File, New York, 2 v., 832 s.

ATLAS PODNEBÍ ČESKA: CLIMATE ATLAS OF CZECHIA, 2007: 1. vyd., Český hydrometeorologický ústav, Olomouc, 256 s.

AUSTRALIAN GOVERNMENT, 1999: The Sydney Hailstorm – 14 April 1999. Bureau of Meteorology, online: <http://www.bom.gov.au/nsw/sevwx/14april1999.shtml>, cit. 20.3.2013.

BLAIR, T. A., 1928: Hailstones of Great Size at Potter, Nebr. Monthly Weather Review 56: 313.

BROWNING, K. A. et BEIMERS, J. G. D., 1967: The Oblateness of Large Hailstones. J. Appl. Meteor., 6, s. 1075–1081.

BROWNING, K. A., 1966: The lobe structure of giant hailstones. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 92, s. 1-14.

BUCKLEY, B. W., LESLIE, L. M. et WANG Y., 1999: The Sydney Hailstorm of April 14, 1999: Synoptic description and numerical simulation. Meteorology and Atmospheric Physics, 2001-2-28, roč. 76, 1-4, s. 167-182.

Burt, C. C., 2011: World's Largest Hailstones. Wunderground.com, online: <http://www.wunderground.com/blog/weatherhistorian/comment.html?entrynum=24>, cit. 20. 3. 2013.

CARTE, A. E. et KIDDER, R. E., 1966: Transvaal hailstones. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 92, č. 393, s. 382-391.

CHANGNON, S. A., DAVIS, J. D., FARHAR, B. C., HAAS, J. E., IVENS, J. L., JONES, M. V., KLEIN, D. A., MANN, D., MORGAN, G. M., SONKA, S. T., SWANSON, E. R., TAYLOR, C. R. et BLOKLAND, J. V., 1977: Hail suppression: impacts and issues. Illinois State Water Survey, 427 s.

EGGERS: How hail cannons work. New Zealand, online: <http://www.hailcannon.com/how.html>, cit. 26. 3. 2013.

- FIELD, P. R., HAND, W., CAPPELLUTI, G., MCMILLAN, A., FOREMAN, A., STUBBS, D. et WILLIWS, M., 2010:** Hail Threat Standardisation. Research Project EASA.2008/5, European Aviation Safety, Agency, online: https://www.easa.europa.eu/safety-and-research/research-projects/docs/large-aeroplanes/EASA.2008_5.pdf, cit. 1. 4. 2013.
- GÖTZ, G., MÉSZÁROS, E. et VALI, G., 1991:** Atmospheric particles and nuclei. Akadémiai Kiadó, Budapest, 273 s.
- IDNES.CZ, 2010:** Prahou se prohnala bouře, padaly několikacentimetrové kroupy, online: http://zpravy.idnes.cz/prahou-se-prohnala-boure-padaly-nekolikacentimetrove-kroupy-ptx-/domaci.aspx?c=A100815_215744_domaci_mad, cit. 23. 3. 2013.
- KESSLER, E. [ed.], 1992:** Thunderstorm morphology and dynamics. Vol. 2 of thunderstorms: A social, scientific, and technological Documentary, University Oklahoma Press, 411 s.
- KNIGHT C. et KNIGHT N., 2005:** Very large hailstones from Aurora, Nebraska. Bull. Amer. Meteor. Soc. 86, s. 1773-1781.
- KNIGHT C. et KNIGHT N., 2003:** Hail and hailstorms. In: Holton, J. R., Curry J. A. et Pyle J. A. [eds]: Encyclopedia of atmospheric science. Academic Press, Amsterdam, Boston, s. 924-929.
- KNIGHT, C. A. et KNIGHT, N. C., 1981:** The Climatology of Hailstone Embryos. J. Appl. Meteor., 20, s. 750–755.
- KNIGHT, C. A. et KNIGHT, N. C., 1970:** Hailstone Embryos. J. Atmos. Sci., 27, s. 659–666.
- LIST, R., 1959:** Zur Aerodynamik von Hagelkörnern. Z. Angew. Math. Phys., 10, s. 143-159.
- MASON, B., SHEPPARD, P. A. [ed.], 2010:** The physics of clouds. 2nd ed. Clarendon Press, Oxford, 671 s.
- MUNZAR, J., 1989:** Malý průvodce meteorologií. Mladá fronta, Praha, 248 s.
- NATIONAL GEOGRAPHIC, 2003:** Largest Hailstone in U.S. History Found, online:

http://news.nationalgeographic.com/news/2003/08/0804_030804_largesthailstone.html, cit. 20. 3. 2013.

OBEC OPAŘANY: Krupobití v Opařanech, online: <http://www.oparany.cz/historie/krupobiti-1999/>, cit. 20. 3. 2013.

OLIVER, J. E., 2005c: Encyclopedia of world climatology. Encyclopedia of earth sciences series (Springer (Firm)), Dordrecht, The Netherlands: Springer, 854 s.

ROOS, D. V. D. A., 1972: A Giant Hailstone from Kansas in Free Fall. *J. Appl. Meteor.* 11: s. 1008-1011.

ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK, P., KAŠPAR, M. et SETVÁK, M., 2007: Fyzika oblaků a srážek. Vyd. 1. Academia, Praha, 574 s. + CD.

SETVÁK, M., 1999: Konvektivní bouře – pohled z vesmíru na jeden z nejkrásnějších živelních projevů. *Vesmír*, Praha, 1999/5. s. 262-264.

SKŘEHOT, P., 2004: Úvod do studia meteorologie. Meteorologická operativní rada, sekce odborných studií, Praha, online: <http://www.astronomie.cz/download/uvod-do-studia-meteorologie.pdf>, cit. 15. 2. 2013.

SOUKUPOVÁ, J., 2009: Atmosférické procesy: (základy meteorologie a klimatologie). Vyd. 4. Česká zemědělská univerzita, Praha, 191 s.

VAŠKŮ, Z., 1999: Kroupy neboli škodnice. Historická krupobití v Čechách. *Vesmír*, Praha, 1999/9. s. 496-497.

WEICKMANN, H., 1953: Observational data on the formation of precipitation in cumulonimbus clouds Thunderstorms Electricity, University of Chicago Press, s. 166-138.

WEISMAN, M. L., 2003: Convective storms. In: Holton, J. R., Curry J. A. et Pyle J. A. [eds]: Encyclopedia of atmospheric science. Academic Press, Amsterdam, Boston, s. 548-559.

WMO, 2007: WMO documents on weather modification approved by the commission for atmospheric sciences management group, second session, Oslo, Norway, 24-26 september 2007. WMO, Oslo, 11 s.

13 Přílohy

- **Seznam příloh:**

Příloha 1 – fotografie krupobití, které se přehnalo nad Prahou 15. 8. 2010. Bouře vypadala zpočátku velmi nenápadně. (Fotografie převzaty od Ing. Jany Soukupové).

Příloha 2 – fotografie zralé bouře, která se přehnala nad Prahou 15. 8. 2010.

Příloha 3 – sesbírané kroupy z krupobití ze dne 15. 8. 2010.

Příloha 4 – radarový snímek krupobití, které se přehnalo nad Prahou 15. 8. 2010.

Příloha 5 – fotografie sesbíraných krup z Opařanského krupobití ze dne 6. 7. 1999 (fotografie převzaty z webu Střeleckého klubu Opařany).

Příloha 6 – fotografie sesbíraných krup z Opařanského krupobití ze dne 6. 7. 1999.

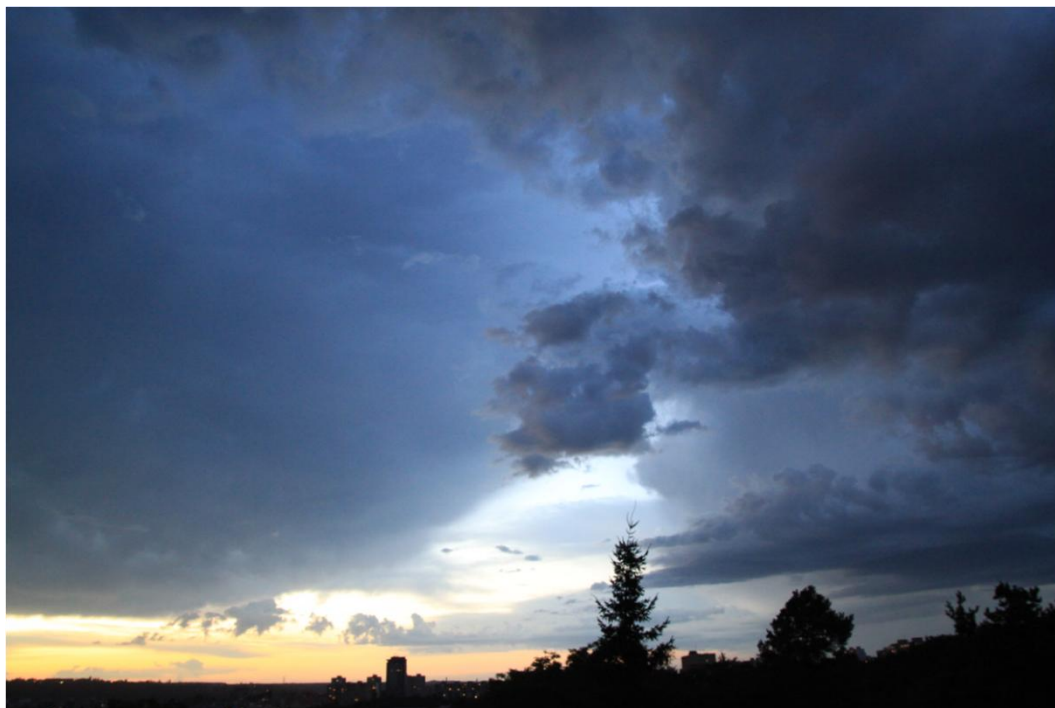
Příloha 7 – radarový snímek krupobití, které se přehnalo nad obcí Opařany dne 6. 7. 1999 (Český hydrometeorologický ústav).

Příloha 8 – březnové krupobití ve státě Mississippi z roku 2013, které vážně poškodilo fasádu rodinného domu (<http://www.disastersafety.org/blog/hailstorm-rips-through-mississippi/>).

Příloha 9 – naprosto poničená úroda kukuřice, kterou zasáhlo krupobití ve státě Indiana v roce 2010 (<http://cropinsurancesolutions.com/blog>).

Příloha 10 – letadlo zasažené kroupami poté, co vletlo do nebezpečné bouře (<http://www.jetphotos.net>).

Příloha 1 – fotografie krupobití, které se přehnalo nad Prahou 15. 8. 2010. Bouře vypadala zpočátku velmi nenápadně.



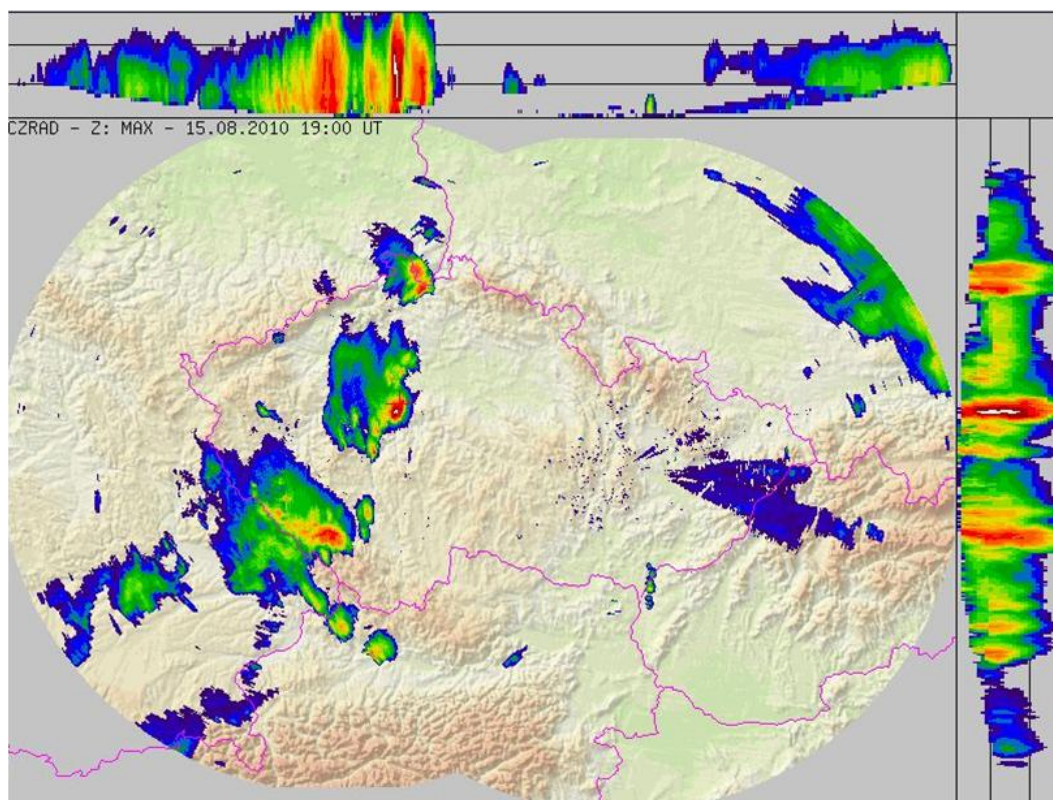
Příloha 2 – fotografie zralé bouře, která se přehnala nad Prahou 15. 8. 2010.



Příloha 3 – sesbírané kroupy z krupobití ze dne 15. 8. 2010.



Příloha 4 – radarový snímek krupobití, které se přehnalo nad Prahou 15. 8. 2010.



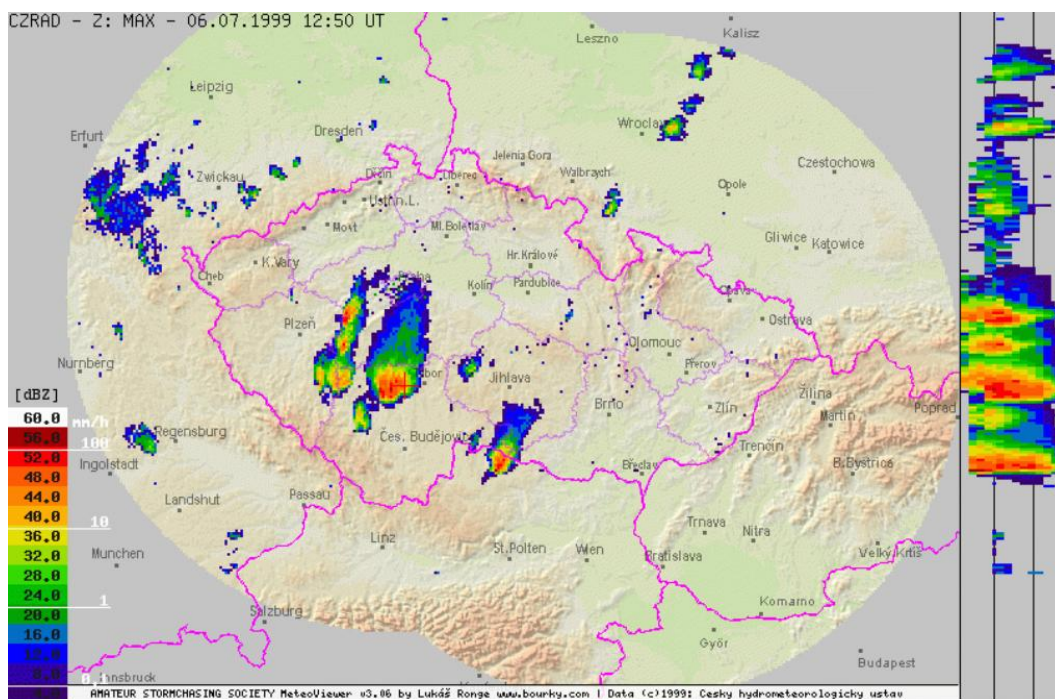
Příloha 5 – fotografie sesbíraných krup z Opařanského krupobití ze dne 6. 7. 1999.



Příloha 6 – fotografie sesbíraných krup z Opařanského krupobití ze dne 6. 7. 1999.



Příloha 7 – radarový snímek krupobití, které se přehnal nad obcí Opařany dne 6. 7. 1999.



Příloha 8 – březnové krupobití ve státě Mississippi z roku 2013, které vážně poškodilo fasádu rodinného domu.



Příloha 9 – naprosto poničená úroda kukuřice, kterou zasáhlo krupobití ve státě Indiana v roce 2010.



Příloha 10 – letadlo zasažené kroupami poté, co vletlo do nebezpečné bouře.

