

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování**



Diplomová práce

**Porovnání vlivu vybraných vulkanických erupcí na
klimatické změny**

Bc. Kristýna Fousková

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Kristýna Fousková

Aplikovaná ekologie

Název práce

Porovnání vlivu vybraných vulkanických erupcí na klimatické změny

Název anglicky

Comparison of the influence of selected volcanic eruptions on climate change

Cíle práce

Diplomová práce má za cíl analyzovat dopady významných vulkanických erupcí na klima. Zároveň práce zacílí na porovnání vlivů jednotlivě vybraných erupcí. Konkrétně se práce bude věnovat identifikaci a porovnání vlivů více významných vulkanických událostí na klimatické faktory, jako jsou teplota, srážky a složení atmosféry. Dále bude práce zkoumat dlouhodobé a krátkodobé dopady těchto erupcí na globální klimatický systém, včetně možných souvislostí s klimatickými anomáliemi.

Metodika

Teoretická část bude důležitá pro vysvětlení souvisejících pojmů jako jsou vulkanismus, erupce a další. Pojmy objasní problematiku a pomohou při následném zpracování praktické části. V praktické části budou představena nasbíraná data a dojde k jejich komplexní klimatické analýze. Přičemž proběhne analýza změn teplot, srážek a dalších klimatických faktorů. Analýza bude provedena za pomoci grafického

a statistického zpracování dat. Výsledky budou porovnány s teoretickými modely. Následně budou interpretovány výsledky, na základě, kterých proběhne závěrečná diskuse. Závěrečné výsledky budou podrobně porovnávány a vyhodnoceny s ohledem na teoretickou část a očekávaný cíl diplomové práce. Závěrem budou shrnuté hlavní poznatky z obou částí diplomové práce, to znamená teoretické a praktické.

Doporučený rozsah práce

50

Klíčová slova

Erupce, geologie, hornina, klima, klimatické změny, magma, sopečná činnost, srážky, teplota, vulkanismus.

Doporučené zdroje informací

AIELLO Gemma. Volcanoes: Geological and Geophysical Setting, Theoretical Aspects and Numerical Modeling, Applications to Industry and Their Impact on the Human Health. Velká Británie: IntechOpen, 2018. ISBN 978-1-78923-348-3.

BŘEZINA, Jiří, Eva BŘÍZOVÁ, Jan CHLÁB, Jan LOUN, Jan PETRÁNEK a Přemysl ZELENKA. Encyklopedie Geologie. Praha: Česká geologická služba, 2016. ISBN 978-80-7075-901-1.

GULLO Arthur, Volcanoes: The Power of Nature, New York: Cavendish Square, 2015. ISBN 978-1-50260-221-3

HEIKEN Grant. Dangerous Neighbors Volcanoes and Cities. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-1-107-03923-0

LOCKWOOD John. P., HAZLETT Richard W., DE LA CRUZ-REYNA Servando. Volcanoes: Global Perspectives. Velká Británie: Wiley, 2022. ISBN 978-1-1194-7885-0.

MARTÍ Joan, ERNST Gerald. Volcanoes and the Environment. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. ISBN 978-0-511-12639-0

SIGURDSSON Haraldur. Encyclopedia of Volcanoes. Amsterdam: Elsevier Books, 2015. ISBN 0123859387.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jana Soukupová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 15. 11. 2023

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 11. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 27. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Porovnání vlivu vybraných vulkanických erupcí na klimatické změny“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 27.03.2024

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Janě Soukupové Ph.D. za její cenné rady, milý přístup a obrovské množství vědomostí, které se mnou sdílela během svých výukových hodin. Její vášeň a odhodlání k vědě mi byly neustálým zdrojem inspirace, a proto se pro mě téma diplomové práce stávalo každým dnem vypracování bližším a poutavějším. Chtěla bych rovněž vyjádřit vděk svým nejbližším, kteří mi poskytovali podporu a povzbuzení během celého studia.

Porovnání vlivu vybraných vulkanických erupcí na klimatické změny

Abstrakt

Tato diplomová práce systematicky zkoumá dopady významných vulkanických erupcí na klima a zaměřuje se na srovnání těchto událostí, čímž přispívá k hlubšímu pochopení jejich vlivů. Teoretická část nabízí nezbytné informace o vulkanismu a erupcích, které slouží jako klíčový rámec pro detailní klimatickou analýzu v praktické části. Zároveň se teoretická část zaměřuje na historické erupce, které jsou považovány za jedny z nejpozoruhodnějších erupcí. Součástí praktické části je statistická a grafická analýza z nasbíraných dat s důrazem na změny teploty, srážek a složení atmosféry. Statistické metody a grafické zpracování dat poskytují podrobný pohled na výsledky, které jsou následně konfrontovány a porovnávány mezi jednotlivými případy erupcí. Diskuse a interpretace výsledků klíčovým způsobem přispívají k pochopení dopadů erupcí na celosvětový klimatický systém. Závěrečná část kriticky hodnotí výzkum, shrnuje klíčové poznatky a otevírá perspektivy pro další studie v této oblasti. Cílem této práce je systematicky zkoumat dopady významných vulkanických erupcí na klima a zaměřit se na srovnání těchto událostí s cílem přispět k hlubšímu pochopení jejich vlivů. Práce analyzuje historické erupce a poskytuje detailní klimatickou analýzu prostřednictvím statistických a grafických metod. Diskuse a interpretace výsledků mají klíčový význam pro pochopení dopadů erupcí na celosvětový klimatický systém. Celkovým cílem je porovnat jednotlivé erupce z hlediska jejich vlivu na globální a lokální klima.

Klíčová slova: erupce, geologie, hornina, klima, klimatické změny, magma, sopečná činnost, sopka, srážky, teplota, vulkán, vulkanismus

Comparison of the influence of selected volcanic eruptions on climate change

Abstract

This master's thesis systematically examines the impacts of significant volcanic eruptions on the climate, focusing on comparing these events to contribute to a deeper understanding of their effects. The theoretical part provides essential information about volcanism and eruptions, serving as a crucial framework for a detailed climatic analysis in the practical section. Simultaneously, the theoretical part concentrates on historical eruptions considered some of the most remarkable. The practical part includes statistical and graphical analysis of collected data, emphasizing changes in temperature, precipitation, and atmospheric composition. Statistical methods and graphical data processing offer a detailed view of the results, which are subsequently confronted and compared among different eruption cases. Discussions and interpretation of results significantly contribute to understanding the impacts of eruptions on the global climatic system. The concluding section critically evaluates the research, summarizes key findings, and opens perspectives for further studies in this field. The aim of this thesis is to systematically examine the impacts of significant volcanic eruptions on climate and to focus on comparing these events to contribute to a deeper understanding of their effects. The thesis analyzes historical eruptions and provides a detailed climatic analysis through statistical and graphical methods. The discussion and interpretation of the results are crucial for understanding the impacts of eruptions on the global climate system. The overall goal is to compare individual eruptions in terms of their influence on global and local climates.

Keywords: eruption, geology, rock, climate, climate change, magma, volcanic activity, volcano, precipitation, temperature, volcanism

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce a metodika	2
2.1 Cíl práce	2
2.2 Metodika	2
3 Teoretická východiska	3
3.1 Vulkanismus.....	3
3.1.1 Procesy a mechanismy vulkanických erupcí	4
3.1.1.1 Ohnivý kruh.....	8
3.1.2 Typy sopek a jejich charakteristika	10
3.2 Dopad vulkanických erupcí na klima.....	12
3.2.1 Lokální vliv vulkanických erupcí	13
3.2.2 Globální vliv vulkanických erupcí.....	15
3.2.3 Vulkanické monitorovací a výzkumné instituce.....	17
3.2.4 Významné historické erupce a jejich vliv na klima.....	20
3.3 Historické erupce a jejich dopad na klima	22
3.3.1 Tambora	22
3.3.2 Krakatoa.....	26
3.3.3 Pinatubo	30
3.4 Současný vulkanický stav ve světě	34
4 Vlastní práce	37
4.1 Analýza vybraných vulkanických erupcí	37
4.2 Klimatická analýza.....	38
4.2.1 Porovnání teplotních změn	38
4.2.1.1 Historická data o teplotních změnách.....	39
4.2.1.2 Porovnání teplotních rozdílů v České republice.....	41
4.2.1.3 Pozorování globálních teplot.....	43
4.2.2 Dopad vybraných vulkanických erupcí na srážky	46
4.2.2.1 Globální srážky.....	47
4.2.2.2 Záznam srážek na území České republiky	49
4.2.3 Sledování vybraných erupcí podle jader ledovců	51
4.2.3.1 Zkoumání jednotlivých erupcí podle aerosolů	52
4.2.3.2 Zkoumání období jednotlivých erupcí podle CO ₂	55
4.2.4 Sledování vybraných erupcí podle slunečního cyklu	57
5 Výsledky a diskuse	61

5.1	Porovnání jednotlivých erupcí.....	61
5.1.1	Grafické porovnání teplot	61
5.1.2	Grafické porovnání vývoje ročních srážek na území České republiky.....	64
5.1.3	Porovnání složení atmosféry podle ledovcových jader.....	67
5.1.4	Porovnání slunečního cyklu jednotlivých období.....	71
5.2	Ničivá erupce v roce 2024.....	73
5.3	Shrnutí výsledků a jejich vztah k teoretické části	74
6	Závěr.....	77
	Seznam použitých zdrojů	80
	Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk.....	87
	Seznam obrázků	87
	Seznam tabulek.....	87
	Seznam grafů.....	88
	Seznam fotografií	88
	Seznam použitých zkratk.....	89

1 Úvod

Sopky neustále poutají pozornost mnoha lidí. Jejich fascinace však vzrůstá, když se sopka projevuje ve své plné síle. Sopky představují úchvatnou sílu přírody, která se zároveň stává nevyzpytatelnou zbraní, proti níž je člověk bezbranný. V ten moment teprve dochází k uvědomění, že příroda je mocnější než samotné lidstvo.

Téma pro diplomovou práci bylo vybráno díky tomu, že vulkány jsou stále aktuálním tématem vědeckého výzkumu a veřejného zájmu, protože jejich studium nám pomáhá lépe porozumět dynamice Země a jejímu vývoji. Naproti tomu vulkanické erupce představují v přírodě impozantní a dynamické události, které nejenže ovlivňují geologickou krajinu, ale také mají významný dopad na klima planety Země. Tato diplomová práce se zabývá především systematickým zkoumáním a porovnáváním dopadů významných historických vulkanických erupcí na klimatické podmínky. Cílem diplomové práce je přispět k hlubšímu pochopení těchto významných historických událostí a analyzovat, jakým způsobem mohou ovlivnit globální a lokální klima.

Vulkány jsou a budou neustále aktuálním tématem, jelikož vulkanická činnost má vliv na geodynamiku planety a může mít dramatické důsledky pro okolní oblasti. Svými dopady jsou sopky schopny ovlivnit enviromentální, ekonomickou a sociální situaci po celé planetě. Erupce mohou způsobit ničivé následky, ale zároveň jsou neodmyslitelnou součástí planety Země, díky níž jsme schopni jako lidstvo na této planetě existovat.

I přesto, že vulkanický proces představuje přirozený jev, kterému nelze předejít, existuje možnost lépe porozumět těmto procesům a vytvořit efektivnější opatření pro přípravu se na případné katastrofy. Jednou z možností je rozsáhlý výzkum vulkanických aktivit, edukace obyvatelstva nebo například identifikace vysoce rizikových oblastí. K tomu je však zapotřebí znát veškeré informace o sopečné činnosti a nastávajících dopadech.

Navíc je vulkanická činnost spojena s otázkami týkajícími se klimatu a životního prostředí. Sopečné erupce mohou ovlivnit atmosférické podmínky a mají dopad na klimatické změny. Studium těchto dopadů je proto klíčové pro lepší porozumění globálním klimatickým procesům ve spojení s vulkanickou činností.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem této práce není pouze retrospektivní analýza minulých událostí, ale i vytvoření podkladů pro lepší předvídání a porozumění budoucím klimatickým výkyvům způsobeným vulkanickou aktivitou. Z tohoto důvodu bude práce také zaměřena na aktuální stavu vulkanické činnosti ve světě, přinášející čtenáři současný obraz vulkanických událostí na globální úrovni. Nejdůležitější je však provedení klimatické analýzy vybraných historických erupcí, aby bylo možné pochopit sopečné následky.

2.2 Metodika

Teoretická část práce poskytuje nezbytný teoretický rámec pro lepší pochopení vulkanismu, procesů erupcí a historie klíčových událostí, které se projeví v klimatických změnách. Práce se zabývá nejen samotným vulkanismem, ale také mechanismy, které mohou být spouštěči a zesilovači klimatických efektů. Všechny tyto informace jsou součástí literární rešerše, ve které jsou uvedeny poznatky mnoha významných vulkanologů a geologů.

Pro diplomovou práci jsou vybrány tři historické erupce, které podstatně ovlivnily celosvětové klima. Dopady těchto událostí se projeví na druhém konci světa, a to vypovídá o řetězové reakci, kterou mohou přírodní katastrofy tohoto druhu způsobit. Proto se práce zaměřuje na lokální i globální posouzení.

Praktická část práce se zaměřuje na sběr a analýzu dat z různých historických vulkanických erupcí, s důrazem na jejich specifické vlivy na teplotu, srážky a složení atmosféry. Statistické metody a grafická zpracování umožní detailní rozklad těchto vlivů a jejich porovnání mezi jednotlivými případy erupcí. Diskuse a interpretace výsledků následně přinesou komplexní poznatky o dopadech erupcí na globální klimatický systém.

Závěrem této práce je shrnutí všech poznatků a porovnání vybraných historických erupcí na klima. Historické erupce budou porovnány na základě klimatické analýzy, která odkryje data o změnách teplot, srážek a složení atmosféry. Podle těchto vyústění bude možné lépe pochopit ostatní vulkanické erupce a předvídat následující katastrofy tohoto charakteru.

3 Teoretická východiska

3.1 Vulkanismus

Vulkanismem se rozumí souhrn projevů sopečné činnosti. Mezi tyto projevy spadá vyvěrání magmatu na povrch pevnin nebo na mořské dno. Někdy bývají k vulkanismu řazeny i projevy subvulkanické činnosti. Podle fáze v orogenním cyklu lze kategorizovat vulkanismus jako počáteční, synchronní, následný a konečný (Březina, 2016, s. 328).

Sopečné erupce jsou nejvíce vzrušující a úžas vzbuzující jevy ze všech dynamických procesů Země. Vždy vzbuzovaly lidskou zvědavost, ale také obrovský strach z přírodní katastrofy, které může sopka nepochybně představovat. Sopky, vulkanické horniny a sopečné erupce se však vyskytují v mnoha variantách, a aby jim člověk porozuměl, musí absorbovat velké množství terminologie a informací (Lockwood, 2022, s. 4).

Vulkanismem se zabývá obor zvaný vulkanologie. Vulkanologie je vědní obor, který se specializuje na studium vulkanismu, tedy sopečné činnosti, včetně procesů spojených s erupcemi, formováním sopek, a vlivem sopečných jevů na okolní prostředí (Březina, 2016, s. 328).

Sopky nejsou pouze objekty, které vybuchují, ale také poskytují fascinující oblast výzkumu pro vulkanology. Jsou výrazným důkazem živé a dynamické povahy naší planety. Toto tvrzení může působit banálně, avšak je klíčové pro pochopení, že Země je vnitřně velmi aktivní. Zájem veřejnosti o sopky a sopečné erupce hraje důležitou roli v uvědomění si, že Země stále produkuje materiál z hlubin do atmosféry (Schminke, 2004, s. 7).

Moderní pohledy na sopečné procesy se vyvíjí s postupujícím chápáním vnitřních mechanismů sopek. Tři klíčové aspekty vulkanismu hrají rozhodující roli. Sopka je jedním z prvků složitého systému, který řídí tok materiálu a energie z nitra Země na povrch. To zahrnuje celý magmatický systém s hlubokým kořenovým systémem pod sopkou a vzájemnými interakcemi s atmosférou. Dále vulkanologie využívá modely globální geodynamiky, které umožňují studovat sopečné procesy v širším planetárním kontextu (Schminke, 2004, s. 7).

Rostoucí uznání zmiňuje, že mnoho sopečně ovlivněných procesů není jen důsledkem vstupu z větší hloubky, ale také interakce s povrchem a okolním životním prostředím. Celkové pochopení příčin a následků sopečných erupcí vyžaduje komplexní pohled na celý systém a jeho propojení s okolím.

Hluboká časová perspektiva navíc vrhá světlo na škálu společenských reakcí na sopečné katastrofy a opět poskytuje zásadní vodítka pro pomoc při přípravě na budoucí vulkanické katastrofy. Odhaluje také kreativní reakce na zdroje a hrozby spojené s vulkanismem, které podpořily pozitivní vývoj v lidské společnosti a kultuře (Oppenheimer, 2011, s. 9).

3.1.1 Procesy a mechanismy vulkanických erupcí

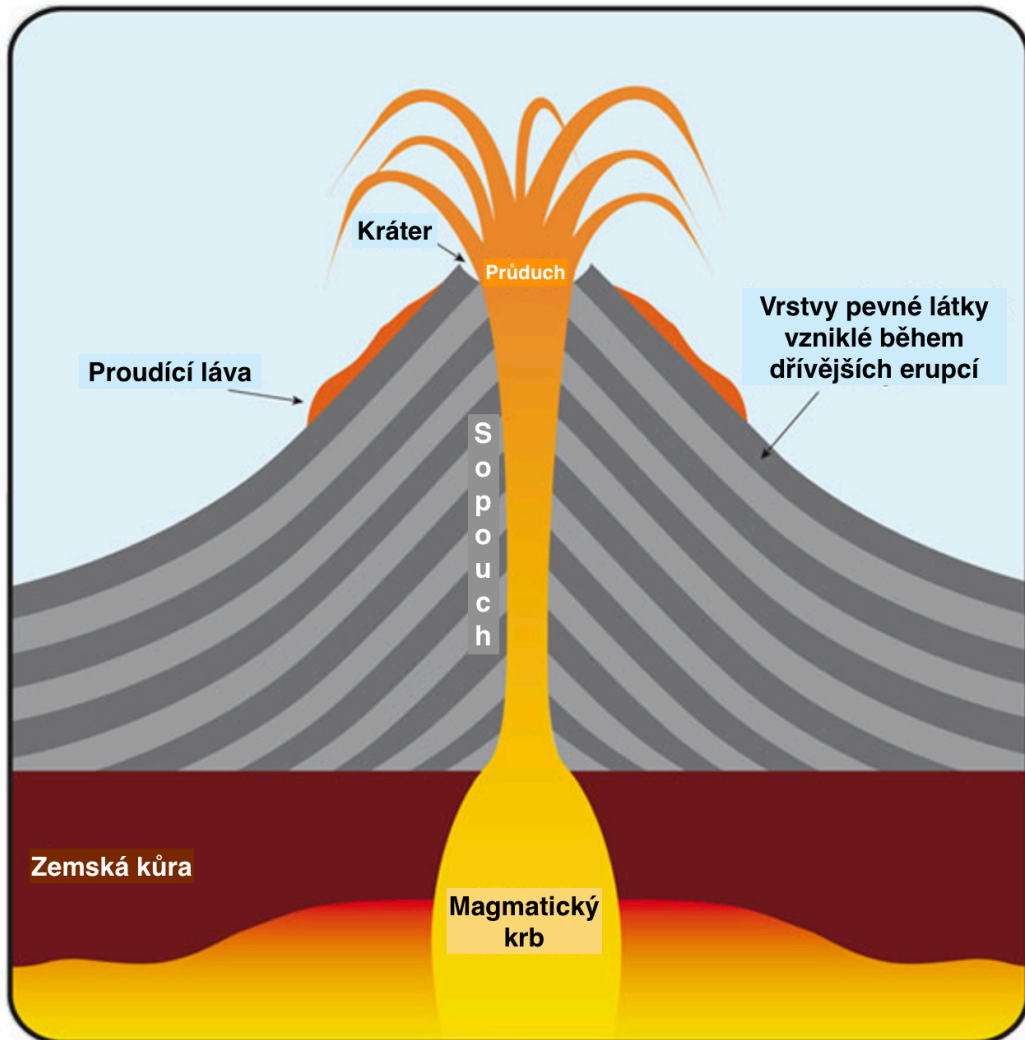
Sopka je útvar, který se rozvine, když roztavená hornina dosáhne nebo se těsně přibližuje k zemskému povrchu a vybuchne. Tato definice má však svá omezení. Například dna světových oceánů jsou převážně podložena lávovými proudy, ale tyto vulkanické horniny pocházejí většinou z podlouhlých puklinových průduchů v hlubokých mořských příkopových údolích způsobu, které běžně neumožňovaly stavbu nápadných budov blízko průduchů. Obrovské oblasti kontinentů jsou také pokryty neuvěřitelně objemnými výlevy lávy nebo ztvrdlého sopečného popela, které pohřbily již existující topografii, ale nevedly k žádným nápadným sopkám, které by rostly nad zemí. V případě, jako je tento, postavené sopky nejsou hory nebo kopce s krátery na vrcholu, ale spíše rozlehlé mírně se svažující vulkanické pláně, které mohou souviset s běžným zdrojovým průduchem nebo shlukem průduchů (Lockwood, 2022, s. 35).

Vyvřelé horniny vznikají ochlazováním roztaveného materiálu pocházejícího ze země. Dělí se na dva příbuzné skupiny: vulkanické (neboli extruzivní) a plutonické (neboli intruzivní) horniny. Vulkanické horniny jsou produkty vyvřelého magmatu, zatímco plutonické horniny jsou tvořeny z magmatu, který krystalizuje přímo pod zemí. Obecně platí, že vulkanické horniny mají řídké minerální krystaly díky rychlému ochlazení magmatu po erupci, zatímco plutonické horniny jsou obvykle díky pomalému ochlazení hrubě krystalické. Z hlediska složení se většina vyvřelých hornin pohybuje od těch, jako je čedič, který obvykle obsahuje nízké relativní podíly molekul oxidu křemičitého, až po takové, jako je ryolit a žula, které jsou také bohaté na oxid křemičitý. O horninách jako andezit a dacit, které mají střední množství oxidu křemičitého, se říká, že mají střední složení. Obsah oxidu křemičitého hraje důležitou roli v erupčních procesech (Lockwood, 2022, s. 35).

Bachman a Bergantz (2008) zmiňují dva pojmy popisující tělesa na základě erupce magmatu. Jedná se tedy o definování magmatických „*komor*“ jako jednotlivých samostatných těles tekuté taveniny a „*nádrže magmatu*“ jako celkového magmatického systému ležícího pod sopkou nebo vulkanickým centrem. Vulkanickým centrem se rozumí

system, který se může skládat z několika samostatných magmat, komor, a přírodních průchodů (Lockwood, 2022, s. 35).

Obrázek 1 - Schéma sopečné činnosti



Zdroj: *Types of volcano*, 2024. BGS – British Geological Survey

Na obrázku je zachyceno jednoduché schéma sopečné činnosti. Mnoho sopek má vnější tvar kuželovité hory, postavené navrstvením pevné látky vzniklé během dřívějších erupcí. Vnitřní částí kužele prochází jedním nebo více sopečných kanálů, které představují úsek pro magmatické vyvěrání. Tyto kanály ústí ven skrz krátery. Pokud se vyvěrání magmatu děje po dlouhou dobu podél stejného kanálu, produkty různých sopečných erupcí se hromadí kolem stejného a tím vznikne centrální sopka. Po ukončení vulkanické erupce sopečný kanál zůstane prázdný. Sopečný kráter se následně vyskytuje jako hluboká dutina okolo průduchu. Podél centrálního potrubí může být vzestup nového magmatu velmi obtížný ve vysoké sopce nebo při zaplnění potrubí ztuhlým magmatem. Magma má tendenci se hromadit a prostupuje podél stěn sopky až k jejich rozbití (Aiello, 2018, s. 4).

Petrologové klasifikují a zařazují magmatické horniny a samotné magmaty mnoha způsoby, ale na základní úrovni jsou horniny, které jsou relativně bohaté na křemík označovány jako felsické. Ty, které jsou relativně chudé na křemík se nazývají mafické. Horniny nacházející se na rozmezí, jsou považovány za horniny středně zředěné. Vzácné horniny s nejnižším obsahem křemíku se nazývají ultramafické (Perkins a kol., 2019, s.143).

Žhavé lávy mají široký rozsah teplot, který závisí na složení. Většina láv na zemském povrchu má teplotu mezi 700 °C a 1300 °C. Felsické mají díky svému složení nejnižší teploty z tohoto intervalu. Mafické lávy se svojí teplotou pohybují ve vyšších číslech. Vzácné lávy bohaté na uhličitany, které neobsahují značné množství oxidu křemičitého, mohou mít teplotu okolo 600 °C. Na druhou stranu teploty ultramafické lávy mohou přesahovat dokonce i 1500 °C (Perkins a kol., 2019, s.143).

V situaci, kdy je magma v komoře izolováno bez dostatečného spojení s povrchem nebo je toto spojení nedostatečně propustné, může docházet k postupnému hromadění tlaku. Tato tlaková akumulace nakonec vyústí v násilnou erupci, při které tlak v komoře najde cestu k povrchu a uvolní se (Perkins a kol., 2019, s.144).

Samotná erupce může představovat mnoho podob. Nejvýbušnější erupce je možné rozlišovat podle následujících typů (Banfi a Čalkovská, 2023, s. 3):

- **Strombolská** – Je možné ji považovat za středně výbušnou. Při této erupci vznikají ohnivé sopečné strusky.
- **Vulkánská** – Pro tyto erupce je charakteristické husté viskózní magma, plyny smíšené s popelem vycházející z průduchu a sopečné pumy (bomby).
- **Peléjská** – Jedná se o extrémně ničivý typ erupce. Vytvářejí vysoký sopečný oblak (pyroklastický oblak), který může být smrtící a působit rozsáhlé škody.
- **Pliniovská** – Jsou charakterizovány výbušným uvolněním sopečného materiálu a plynu do atmosféry. Vytvářejí vysoký sopečný sloup pojmenovaný jako pliniovský oblak, který se může rozšířit na velké vzdálenosti.

Pohyb magmatu začíná stoupáním směrem k povrchu Země. Během tohoto procesu může magma vytvářet trhliny v okolních horninách. Tento jev, nazývaný šíření trhlín, je klíčový zejména na středoocéánských hřbetech, kde dochází k zemětřesení. Seismologové tuto aktivitu využívají k mapování oblastí, kde trhliny vznikají a jak magma proudí (Perkins a kol., 2019, s.146).

Ovšem pohyb magmatu je usnadněn, když využívá již existující trhliny. Někdy se tyto trhliny mohou dostat až na povrch. Jak magma stoupá, dochází k ochlazení a krystalizaci, což zvyšuje hustotu magmatu. Dochází ke zpomalení pohybu a v některých případech k úplnému zastavení, a to v případech, kdy okolní pevný materiál má stejnou hustotu jako magma. V důsledku toho magma nemusí vždy dosáhnout povrchu Země. Pohyb magmatu tedy ovlivňují složení magmatu, obsah plynu, teplota, viskozita magmatu a množství krystalického materiálu (Perkins a kol., 2019, s.151).

Rychlost pohybu má také klíčový význam, protože magma musí proudit dostatečně rychle, aby udrželo svůj pohyb. Teplota zemské kůry rovněž ovlivňuje pohyb magmatu. Čím teplejší zemská kůra je, tím rychlejší je pohyb magmatu (Perkins a kol., 2019, s.152).

Energie obsažená v magmatu se zařazuje mezi pozemské neboli planetární zdroje energie. V současné době se stále zkoumá potenciál využití tepla uvolňovaného přímo během sopečných erupcí, a to zejména při experimentálním využívání tepelné energie magmatických krbů. Geotermální energie přináší podporu udržitelného vytápění, snížení emisí skleníkových plynů a stabilní dodávku energie. V USA byly prováděny pokusy, které se zabývaly teoretickou možností využití tepla z kaldery Long Valley nacházející se v Sierra Nevada. Tyto experimenty však narazily na technické problémy spojené se schopností vrtat rovnou do magmatické taveniny. Nakonec byly tyto pokusy ukončeny. Klíčovým faktorem bylo umístění krbu, který nebyl situován v centrální části kaldery. Tento vývoj má potenciál poskytnout důležité poznatky o možnostech využívání geotermální energie spojené se sopečnou aktivitou a zároveň zdůrazňuje výzvy spojené s technickými a geologickými aspekty takových projektů. Využívání tepelné energie ze sopečné činnosti je stále součástí. I když teoreticky existuje obrovský potenciál geotermální energie spojené se sopečnou činností, zatím jsou většina geotermálních projektů orientována na využívání méně rizikových zdrojů tepla v hlubších vrstvách zemské kůry. Přesto může budoucí technologický vývoj a výzkum přinést nové metody a přístupy k využívání geotermální energie z magmatických oblastí, pokud budou řešeny technické a bezpečnostní výzvy (Ďurica a kol., 2008, s. 47).

3.1.1.1 Ohnivý kruh

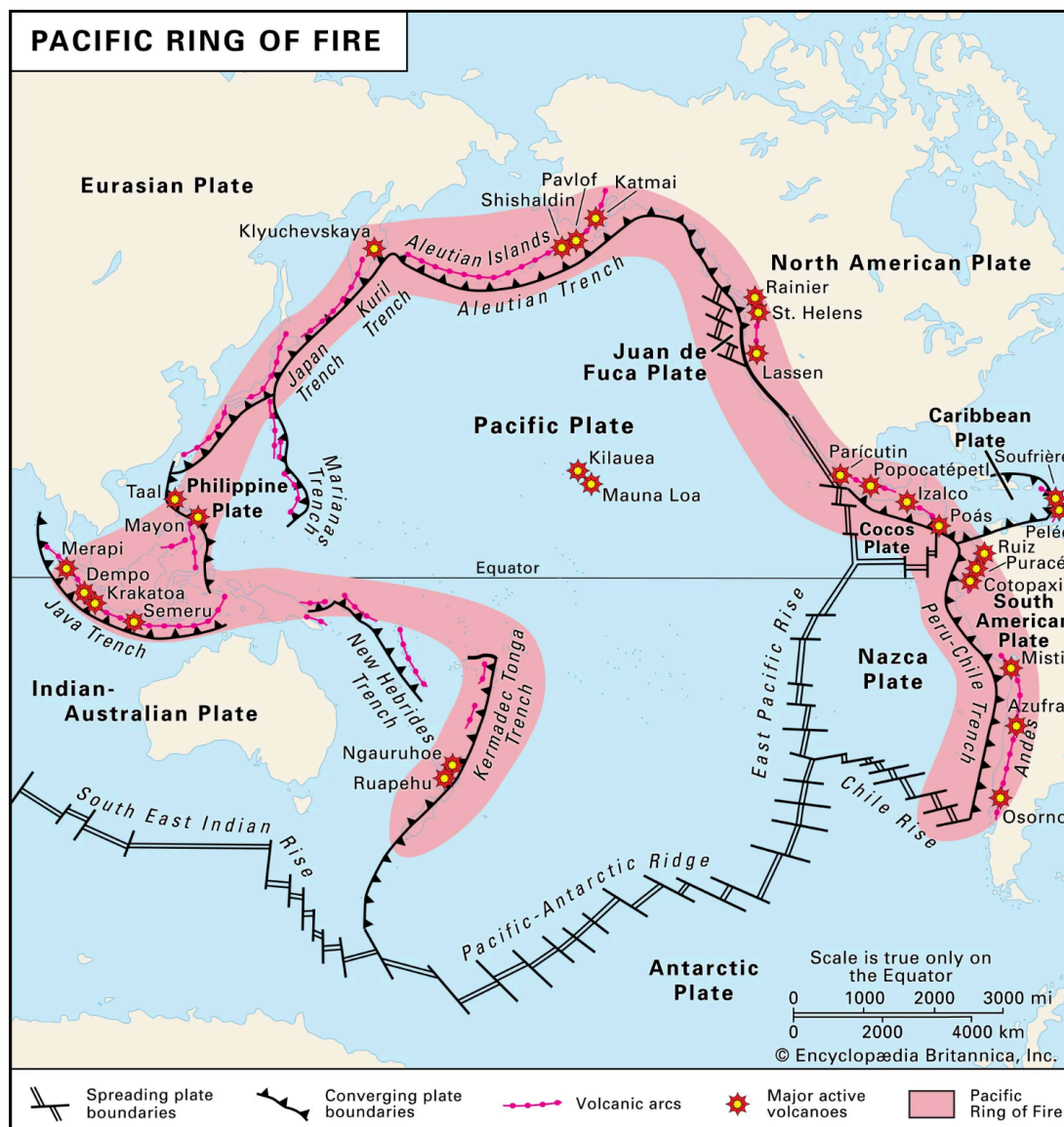
Převážná většina aktivních sopek se nachází v takzvaném Ohnivém kruhu (anglicky *The Pacific Ring of Fire*). Z anglického názvu můžeme odvodit i pojmenování Tichomořský lem. Jedná se o půlkruhovou oblast, která se vyznačuje nejvyšší vulkanickou a seismickou aktivitou na Zemi. Oblast podle druhotného názvu obléhá Tichý oceán, jejíž tektonická deska kooperuje s okolními menšími deskami. Tímto neustálým pohybem dochází ke vzájemnému tření či překrývání desek. To má za následek erupce, zemětřesení nebo také vlny tsunami. Pás se táhne přes 40 000 km a sleduje řadu ostrovních oblouků, jako jsou Tonga a Nové Hebridy, souostroví Indonésie, Filipíny, Japonsko, Kurilské ostrovy, Aleuty a další (Britannica, 2024).

Mezi hlavní sopečné události, ke kterým došlo v rámci Ohnivého kruhu od roku 1800, patřily erupce sopek Tambora (1815), Krakatoa (1883), Novarupta (1912), Svatá Helena (1980) a erupce Pinatubo v roce 1991 (Britannica, 2024).

Uprostřed Ohnivého kruhu, v rozlehlých vodách Pacifiku, jsou dva ostrovní řetězce, které připisují svou existenci tektonickým silám. Tektonické síly by neměly mít nic společného s hranicemi desek, ale spíše s horkou oblastí, ve které se nacházejí. Teplo zde stoupá z hlubin spodního pláště až po horní plášť Země. Přebytečné teplo v horním plášti způsobuje tavení hornin. Nad horkým bodem se vytvářejí sopky, které poté mají potenciál k vybuchnutí. Horká místa zůstávají fixovaná na místě, zakořeněná hluboko v zemi, odkud pocházejí. Na povrchu se proto nad horkou oblastí vyskytuje řetězec sopek (Hinga, 2015).

Sopky, které vznikají v subdukčních zónách Ohnivého kruhu, jsou známé svou imponující velikostí a strmými svahy. Tyto mohutné sopky generují rozsáhlé množství lávy, sopečného popela a dalšího materiálu během svých erupcí. Erupce mohou být mimořádně silné, vystřelující mraky sopečného popela do výšek dosahujících desítek tisíc stop. Takové mraky jsou schopny způsobit zatmění denního světla, v některých případech až na několik dní. Během těchto erupcí mohou vzniknout pyroklastické proudy, které se rychle neustále rozšiřují a mohou dosáhnout rychlostí až 100 mil za hodinu, což způsobuje obrovské škody na své cestě. Pokud se dostatečné množství sopečného popela a mikroskopických částic kyseliny sírové vydá do vyšších vrstev atmosféry, může to mít za následek ochlazení klimatu a změnu počasí po dobu více než jednoho roku (Hinga, 2015).

Obrázek 2 - Mapové znázornění Ohnivého kruhu



Zdroj: Britannica, 2024

Na obrázku je zakreslené schéma Ohnivého kruhu. Z prvního pohledu je zřejmé, že se jedná spíše o tvar podkovy nepravidelného tvaru na rozdíl od kruhu. Schéma obsahuje pouze hlavní aktivní sopky, avšak v celkovém měřítku se podle NOAA vyskytuje na Ohnivém kruhu více než 450 sopek. Lze si také všimnout, že trasa kruhu vede z jižního cípu Jižní Ameriky podél západního pobřeží Severní Ameriky, poté přes Beringovu úžinu, až dolů přes Japonsko a dále na Nový Zéland.

3.1.2 Typy sopek a jejich charakteristika

Každá sopečná formace a každý útvar sopečné horniny mají svůj původ v ohni a všechny sopečné horniny jsou nakonec odvozeny z podzemních těles roztavené horniny nazývané magma. Francouzští vulkanologové rozdělují světové sopky podle lokality a jejich činnosti na dva obecné typy: červené sopky a šedé sopky. „*Červené sopky*“ jsou ty sopky, které se většinou nacházejí na středoocéánských ostrovech a vyznačují se výlevnou činností (tekoucí červená láva). „*Šedé sopky*“, které se obvykle nacházejí poblíž kontinentálních okrajů nebo v ostrovních řetězcích blízko okrajů kontinentů, se vyznačují explozivními erupcemi, které pokrývají rozsáhlé okolní oblasti šedým popelem. Toto je hrubá klasifikace pro většinu vulkánů, ačkoli existuje mnoho takových, které během své historie nebo během jednotlivých erupcí měly jak výlevné, tak výbušné erupce (Lockwood, 2022, s. 4).

Některé nevulkanické tvary terénu, jako jsou „*bahenní sopky*“ sedimentárních pánví a geotermálních oblastí a „*asfaltové sopky*“, které se nacházejí na mořském dně nad solnými kupolemi, se také někdy označují jako sopky. Pozemské sopečné erupce většinou zahrnují únik křemičitého magmatu a plynu, ale na vnějších planetách sluneční soustavy se mohou vyskytovat i jiné druhy velmi odlišné sopečné aktivity, kde je složení zcela odlišné od toho, co najdeme na planetě Zemi (Lockwood, 2022, s. 35).

Sopka se zrodí, když trhlinou v zemské kůře unikne magma. Magma je žhnoucí roztavená hornina, která se nachází hluboko uvnitř země. Mezi sopečnými erupcemi může uplynout mnoho let. Sopky se na základě jejich rozmanité aktivity rozdělují na (Banfi a Čalkovská, 2023, s. 3):

- **Aktivní sopka** – Sopka, která vybuchla během posledních 10 000 let a aktuálně projevuje známky sopečné aktivity. Tyto projevy mohou zahrnovat lávové proudy, sopečné erupce a sopečná zemětřesení. Jedná se o nejnebezpečnější typ sopečné aktivity, která může přinášet vážné důsledky pro okolní oblasti a obyvatelstvo.
- **Spící sopka** – Jedná se o sopku, která nevybuchla po dobu delší než 10 000 let. Má za sebou však historii aktivního sopečného chování. I když momentálně není v procesu erupce, může být stále považována za potenciálně aktivní a existuje možnost, že v budoucnu může být znovu aktivována. Tím může přinášet určitá rizika a výzvy pro okolní oblasti.

- **Vyhaslá sopka** – Je sopka, která nevybuchla po dobu delší než 10 000 let a pravděpodobně již nikdy nevybuchne. Proto se ji lze považovat za stabilní. Dlouhý časový úsek bez projevů sopečné aktivity naznačuje, že sopka prošla procesem vychladnutí a ztráty schopnosti vybuchnout. S ohledem na dlouhou časovou prodlevu je pravděpodobné, že tato vyhaslá sopka představuje minimální riziko pro okolní oblasti a není očekáváno, že by v budoucnu představovala hrozbu sopečných erupcí.

Sopky mohou mít také různé tvary a rozměry, přesně související s typem erupční aktivity. Efuzivní neboli výlevné erupce mají tendenci vyrůst sopku prostřednictvím akumulace navrstvených lávových proudů. Explosivní neboli také výbušné erupce mohou naopak odstranit celé části sopek. Stratovulkán je typicky tvořen zvláštní pozicí sopečných produktů vybuchnutých jak explosivními, tak efuzivními erupcemi. Boky těchto sopek mají strmé svahy a rozměry stratovulkánů jsou často relevantní, ale menší než rozměry štítových sopek (Aiello, 2018, s.4).

Sopky mohou mít různé tvary, které závisí na složení magma, charakteru sopečné činnosti a geologických podmínkách v dané oblasti. Zde jsou některé z hlavních tvarů, podle kterých můžeme rozlišovat různé sopky (Banfi a Čalkovská, 2023, s. 6-7):

- **Kuželovitá** – Mají tvar vysokého kužele. Jejich tvar je také tvořen vrstvami sopečného materiálu (lávy, sopečného popela). Do kuželovitého tvaru spadá stratovulkán, který představuje nejvýbušnější typ sopky. Charakterizuje ho pomalu tekoucí viskózní magma. strmou horu
- **Štítová** – Jsou zpravidla také kuželovitého tvaru, ale na rozdíl od strmé hory mají podstatně širší a nižší tvar. Tyto sopky jsou tvořeny převážně tekutou lávou a jsou charakteristické menšími výbuchy.
- **Trhlinová** – Úzké trhliny s rozlohou pouze několika metrů, které často představují zlomy sahající hluboko ke středu Země. Často se vyskytují v oblastech, které zahrnují mnoho podmořských sopek.

Tvary sopek jsou velmi rozmanité, a kromě klasických tvarů existují i netypické formace, včetně sopečného dómu, supervulkánu, kalder, tufových prstenců a mnoha dalších. Toto rozlišování sopek představuje nekonečnou různorodost a ovlivňuje různým způsobem každou sopku a její případnou aktivitu. Proto je vždy klíčové popisovat sopky do takové míry, aby byly lépe pozorovány i její složité procesy. Detailnější pozorování umožňuje bližší

poznání sopek a může z něho vyplývat i řada opatření, které jsou významné při zmírnění negativních dopadů vycházející z budoucí přírodní katastrofy tohoto charakteru.

3.2 Dopad vulkanických erupcí na klima

Vliv vulkanismu na klimatický systém může být rozdělen do dvou kategorií: globální změny a lokální vliv. Délka trvání tohoto vlivu závisí na složení a obsahu tekutin uvolňovaných z pláště Země. Mezi nejčastěji uvolňované plyny se řadí vodní pára, oxid uhličitý, siřičitý oxid, dusík a metan, přičemž role metanu je zatím studována pouze okrajově. Důležitým faktorem je také výška, do které se plyny dostávají. Většina z nich se nachází v troposféře, kde mají kratší trvání než ve stratosféře (Self a kol. 2005).

Vliv jednotlivých plynů na atmosféru je různý. Vodní pára a oxid uhličitý vytvářejí skleníkový efekt, což způsobuje oteplování atmosféry. Naopak oxidy síry reagují s vodní parou za vzniku molekul kyseliny sírové. Tyto molekuly představují kondenzační jádra pro molekuly vody, což může vést k ochlazení atmosféry, protože voda má vysokou tepelnou kapacitu a může absorbovat teplo z okolí. V globálním měřítku mají značný význam zejména plyny SO_2 a CO_2 . Sloučeniny dusíku ovlivňují spíše regionální ekosystémy. Tato skutečnost je důležitá při zkoumání vlivu vulkanických emisí na životní prostředí (Self a kol. 2005).

Vliv vulkanismu představuje výrazné změny v geomorfologii krajiny a to vede k vzniku mnoha menších jezer a bažin. Tyto oblasti poskytují prostor pro sedimentaci různých rostlinných společenstev. Maarová jezera, sopečné svahy, vrchoviny, kaldery a menší deprese jsou typickými místy, ve kterých dochází k tvorbě těchto sedimentů. V těchto oblastech se udržuje především zonální vegetace, což přispívá k přesnější rekonstrukci prostředí a podnebí (Akhmetiev a kol. 2009).

Media často zaměřují svoji pozornost pouze na oxid uhličitý. Ostatní důležité skleníkové plyny, jako oxid dusný, methan, ozón, a především vodní pára, bývají v mediální oblasti často opomíjeny. Vodní pára, s mnoha přirozenými zdroji, je skutečně nejúčinnějším skleníkovým plynem. Během erupcí uvolňují do atmosféry různé látky, včetně sopečného popílku, prachu a plynů. Tyto látky mohou mít ochlazovací (saze, popílek) nebo oteplovací efekt (metan, CO_2). Výzkumy potvrzují, že sopečný popílek a aerosoly ovlivňují tvorbu oblačnosti, která zpětně odráží sluneční záření. Zjištěn byl také doposud neznámý vliv látek z erupcí na mokřadní ekosystémy, ve kterých poté převažují bakterie produkující metan (Science Week, 2008).

3.2.1 Lokální vliv vulkanických erupcí

Sopky mohou uvolnit velké množství popele a oblaka toxických plynů, lávové proudy a výjimečně ničivé spalující laviny známé jako pyroklastické proudy¹. I po desetiletích nečinnosti mohou sopky emitovat škodlivé plyny a částice. Vzhledem ke své konstrukci z hornin a sklonu ke strmým svahům mohou sopky nadále představovat hrozbu v podobě obrovských bahenních proudů, sesuvů půdy a tsunami. Intenzita a velikost erupcí koreluje s lidskými dopady, avšak zranitelnost společností se mezi jednotlivými místy velmi odlišují (Oppenheimer, 2011, s. 22).

Sopečný popel může někdy vypadat lehce a načechraně, když padá vzduchem, ale je složen ze sopečného skla a krystalů, a tak, jak se hromadí, značně zatěžuje vše, co se nachází pod ním. Při větších událostech se v blízkosti sopky může nahromadit několik metrů tloušťky popela, a dokonce i několik centimetrů se může nahromadit stovky až tisíce kilometrů po větru. Padlý popel může v mnoha ohledech nepříznivě ovlivnit zastavěné i přírodní prostředí. Drcení plodin a kontaminace pastvin se směsí popele může dokonce vést k velkým ztrátám na životech v důsledku hladovění a moru. Zatížení tefrou na střechách budov může vést až ke strukturálnímu selhání. V tomto případě se klade silný důraz také na období dešťů, jelikož pokud erupce vychrlí značné množství popela v období dešťů, znamená to větší zatížení. Hmotnost směsi popela a vody představuje příliš silné zatížení. Pod takovou zátěží se poté často hroubí obydlí místních obyvatel zasažené lokality (Oppenheimer, 2011, s. 30).

Například během erupce Pinatubo (Filipíny) v roce 1991 kombinace silného spadu popela a deště z tajfunu vedla k husté směsi podobné betonu, která způsobila těžké ztráty na životech, když se budovy zřítily na jejich obyvatele. Dokonce i mírné spadnutí popela může vážně narušit záchranné práce během sopečných erupcí tím, že vyřadí z provozu silnice, letiště, elektrické vedení a telekomunikační systémy (Oppenheimer, 2011, s. 30).

Obzvlášť nebezpečné dopady popele se přisuzují fluoru. Ten může být během erupce snadno zachycen tefrou, a je tak dopraven na zemský povrch. Když kontaminovaný popel a listí leží na zemi, pasoucí se dobytek ho zkonzumuje velké množství a může se rychle otrávit, pokud se fluor uvolní do jejich zažívacího traktu. Je to nesnesitelný proces vedoucí k abnormálnímu růstu zubů a kostí, krvácení a selhání orgánů. Během erupcí v Chile a na Novém Zélandu zemřely na takovou fluorózu tisíce ovcí a dobytka. Usazeniny popela

¹ Pyroklastické proudy jsou rychle pohybující se proudy horkého popela a smrtících sopečných plynů. Takové proudy dosahují vysokých teplot a ohromné rychlosti. Jsou typické právě pro oblast Ohnivého kruhu, která je význačná výskytem extrémně prudkých erupcí. (Hinga, 2015)

mohou kontaminovat pitnou vodu a je možné, že by to mohlo dokonce vést k otravě fluorem v lidské populaci (Oppenheimer, 2011, s. 31).

Usazeniny popela mohou představovat dlouhodobé zdravotní riziko v oblastech představujíc zdroj potenciálně toxického prachu. To je zvláště důležité u ložisek, která obsahují různé druhy křemene známého jako cristobalit, který má karcinogenní vlastnosti a je spojován s onemocněním plic (Oppenheimer, 2011, s. 31).

Kvůli strmým svahům a charakteristické stavby jsou sopky náchylné ke gravitačnímu selhání. Tyto události mohou být spuštěny několika způsoby včetně průniku magmatu do kužele, lokálním nebo silným zemětřesením, a dokonce i vydatnými srážkami (Oppenheimer, 2011, s. 39).

Největší, avšak vzácné události tohoto druhu jsou známy jako suťové laviny. Tyto laviny zahrnují zhroucení celého sektoru sopky. To vede k vytvoření obrovských gravitačních kamenných lavin, které se mohou táhnout desítky kilometrů. Jelikož tyto jevy nejsou časté, je obtížné vypočítat pravděpodobnost jejich opakování. Pokud je pohybující se úlomek sutě nasycený vodou a vstupuje do drenážních kanálů, nazývá se tok úlomků, a pokud sestává z významné frakce částic o velikosti jílu, nazývá se tok bahna nebo lahar (indonéský původ slova). Takové toky mohou po cestě nabírat další vodu a úlomky a zároveň shazovat jejich hrubší a hustší materiál (Oppenheimer, 2011, s. 39).

Na ostrovech s aktivními sopkami a při pobřežních vulkánech mohou sesuvy a lavinové události způsobit tsunami. Další způsoby, jak sopečné erupce mohou generovat tsunami, zahrnují fyzický dopad pyroklastických proudů na vodu, kolaps kůry nad magmatickou komorou při formování kalder podmořských sopek a exploze způsobené pronikáním mořské vody do erupčního průduchu (Oppenheimer, 2011, s. 48).

Velká výbušná erupce může během několika hodin proměnit bujný ekosystém ve sterilní poušť. Silnější tefra déle eroduje a může znemožnit jakoukoli vyhlídku na opětovné odhalení bývalých půd s jejich zásobami semen a zárodků. Zároveň může dojít k narušení hydrologického systému na celá desetiletí (Oppenheimer, 2011, s. 49).

Dalším zásadním faktorem určujícím obnovu je klima. Zatímco velmi jemný popel v lehkém kroupení může dodávat živiny a přinášet do půdy příznivý mulčovací efekt, lávové proudy a silná usazenina hrubé pemzy a strupovitosti jsou obecně velmi chudé na živiny, náchylné k suchu a nestabilní. Navíc mívají velmi nízkou schopnost zadržovat vodu (Oppenheimer, 2011, s. 49).

3.2.2 Globální vliv vulkanických erupcí

Některé erupce mohou mít krátkodobý vliv na globální klima tím, že uvolní velké množství prachu a popela do atmosféry. To může mít chladicí efekt na Zemi a ovlivnit počasí v krátkodobém horizontu. Mohutnost škodlivých dopadů po velkých sirných erupcích je dostatečná k tomu, aby ovlivnila ekosystémy a zemědělství v mnoha částech světa. Erupce může mít na jedné straně planety za následek velké sociální a ekonomické dopady na straně druhé (Oppenheimer, 2011, s. 24).

Jakmile se oxid siřičitý dostane do stratosféry, reaguje s vodní párou a umožňuje tak vznik síranové aerosoly, drobné částice, které odrazí sluneční světlo zpět do vesmíru. To má dočasný chladicí efekt na povrchu Země. Navíc sopečné aerosoly mohou pohlcovat a rozptylovat sluneční světlo, což vede ke změnám v atmosférických obězích.

Zatímco sopečné erupce mohou způsobit krátkodobé ochlazování, mají také další složité účinky na klimatický systém. Sopečné plyny, jako je oxid uhličitý (CO_2), přispívají ke skleníkovému efektu, který zadržuje teplo v nižší atmosféře. Nicméně chladicí efekt síranových aerosolů má tendenci převažovat nad ohřevem způsobeným sopečnými plyny krátkodobě (Oppenheimer, 2011, s. 24).

Pochopení složitých interakcí mezi sopečnou aktivitou a klimatem je klíčové pro klimatologu. Studium historických záznamů sopečných erupcí a jejich dopadů pomáhá zdokonalovat klimatické modely a poskytuje nám vhled do komplexního a dynamického klimatického systému Země. Navíc pokroky v technologii družic a nástrojích pro monitorování umožňují vědcům pozorovat a analyzovat atmosférické důsledky sopečných erupcí komplexněji, což zlepšuje naše pochopení těchto přírodních jevů a jejich dopadů na globální klimatické vzory (Oppenheimer, 2011, s. 26).

V dubnu 2010 sopka Eyjafjallajökull na Islandu vychrlila mrak popela, který na téměř týden uzavřel velkou část evropského vzdušného prostoru. Přestože se jednalo pouze o relativně malou erupci, způsobilo to nejvyšší úroveň narušení letecké dopravy od druhé světové války a odhaduje se, že letecký průmysl po celém světě stála více než miliardu amerických dolarů (Oppenheimer, 2011, s. 26).

Ventilátorové a proudové motory letadel jsou zvláště náchylné k selhání, když pracují v oblacích zředěného popela. Ačkoli by to mohlo být považováno za technologické riziko, hrozba oblaků sopečného popela pro letectví je významná při úvahách o mnohorozměrných nebezpečích velkých erupcí v budoucnosti. Potenciální problém může představovat vzdušný

popel pro pátrací a záchranné operace po vulkanické katastrofě. Mraky popela nejen brání letectví, ale také narušují rádiovou komunikaci (Oppenheimer, 2011, s. 27).

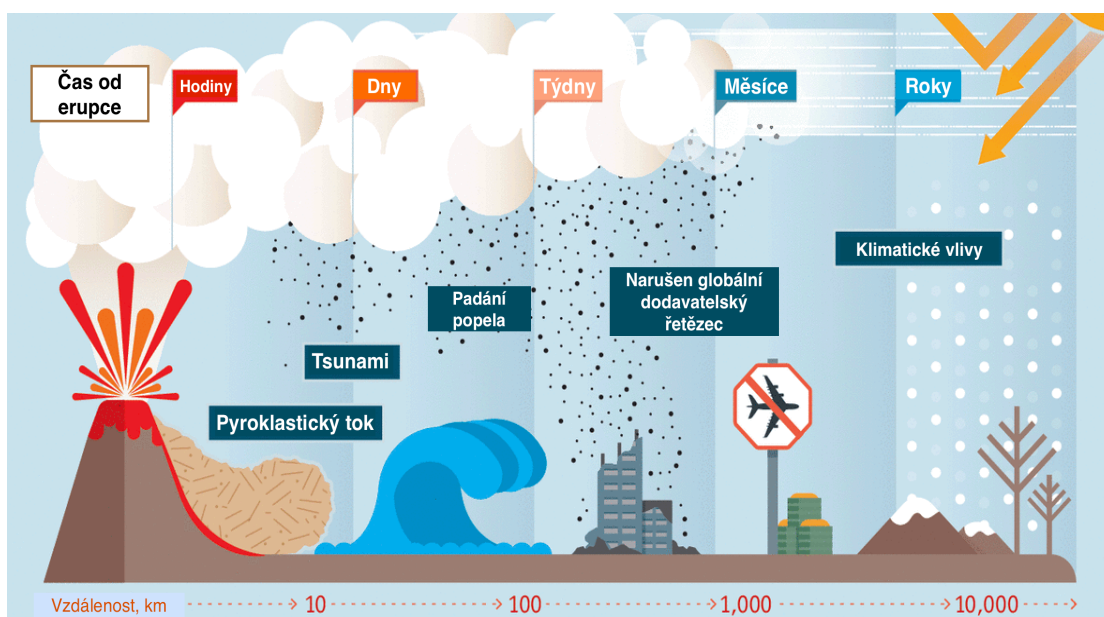
Jedna ze sopečných erupcí, která nám poskytla klíčové poznatky o vlivu vulkanismu na klimatický systém Země, byla událost spojená s horou Pinatubo na Filipínách v roce 1991. Tato erupce vytvořila největší zátěž částic do stratosféry za více než sto let.

Přírodní klimatické změny je možné pozorovat díky důkazům spojujících vulkanismus se změnami globální teploty, větru a srážek. Do stratosféry je díky erupcím vyprodukováno velké množství síry, což následně produkuje částice kyseliny sírové, které vedou k vytvoření závoje kolem celé planety. Globální a roční průměrná odezva na povrchovou teplotu způsobuje ochlazení, způsobené převážně radiačními účinky vulkanického aerosolu, konkrétně jeho rozptylem přicházejícího slunečního světla (Oppenheimer, 2011, s. 76).

Zobecněná zjištění jsou taková, že klimatický tlak po takových erupcích trvá přibližně tři roky, což odráží čas potřebný k rozptýlení většiny stratosférického aerosolu. To má za následek povrchové anomálie teploty a teplotní anomálie v nižší atmosféře, které vrcholí v prvním roce po erupci, ale které lze stále rozeznat v citlivých záznamech po dobu až sedmi let, kdy veškerý zbývající signál klesne pod úroveň klimatického šumu. Účinky na rozsah mořského ledu a globální ledovou hmotu mají o něco delší odezvu, která trvá zhruba deset let. Nejdéle odezvu je možné pozorovat v oceánech, ve kterém mohou být teploty v hlubinách, hladina moře, slanost a rozsáhlá cirkulace narušeny až na jedno století (Oppenheimer, 2011, s. 76).

Vulkanolog Clive Oppenheimer (2011) také zmiňuje několik dopadů, které způsobují po erupci klimatické změny. Mezi ně je možné zařadit tefrové vodopády, pyroklastické proudy a tvorba kaldery a dómy, skalní laviny a bahenní proudy, tsunami, zemětřesení a emise sopečných plynů.

Obrázek 3 - Schéma posloupnosti klimatických změn v čase



Zdroj: *The Economist*, 2015

Na obrázku je nakreslené schéma, které znázorňuje posloupnost vulkanických dopadů v závislosti na čase a vzdálenosti od propuknutí erupce. Sopka po započnutí chrlení pyroklastického toku, produkuje zároveň i značné množství popela, které se může šířit do obrovské vzdálenosti po dobu více než jednoho roku. Když se pyroklastický tok dostává do kontaktu s mořem, vzniká následkem kontaktu vlna tsunami. Díky velkému množství popela je narušen globální dodavatelský řetězec, čímž je výrazně negativně zasažena globální ekonomika. Po uplynutí několika let se mohou projevit klimatické vlivy, kterým může být například globální ochlazení, které s sebou následně přináší neúrodu způsobující ekonomické a sociální problém.

3.2.3 Vulkanické monitorovací a výzkumné instituce

Pro dosažení kvalitních informací o dopadech sopečných erupcí na klima je potřebná aktivita mnoha organizací, které sledují aktivitu sopek a varují obyvatelstvo postižených oblastí. Pomocí jejich činnosti je možné předcházet rizikům a mnoha úmrtím. Tyto organizace pomocí monitoringu sbírají data, které mohou predikovat erupce a rozvíjet strategie při dopadech této přírodní katastrofy. Zároveň studují globální dopady na klima a životní prostředí, které mají dalekosáhlé důsledky pro celou planetu.

Projekt, který poskytuje komplexní informace o sopečné činnosti po celém světě se nazývá Global Volcanism Program (dále jen GVP). Program je vedený pod Smithsonian Institution. Zřizují databázi sopek, sledují erupce a udržují informace o vulkanologickém

výzkumu. Poskytují týdenní reporty a informují o aktuální stavu jednotlivých sopek (Smithsonian Institution, 2024).

National Aeronautics and Space Administration (dále jen NASA). Kromě přímého fyzického nebezpečí mohou sopky vést také k výpadkům elektřiny, špatné kvalitě ovzduší, požárům a narušení letectví. Proto je mapování a předvídání takových nebezpečí zásadní. NASA poskytuje jedinečné datové produkty a poznatky, které pomáhají s mapováním škod a sledováním dopadů sopek na kvalitu ovzduší. NASA se zapojuje do výzkumu sopečných erupcí pomocí satelitního monitorování a poskytuje prostředky pro sledování atmosférických změn způsobených sopečnou činností. NASA poskytuje monitorování dopadů sopek na podporu reakce na katastrofy a obnovy (NASA, 2024).

Mnoho informací týkajících se klimatu, které jdou ruku v ruce s vulkanickou činností zaznamenává National Oceanic and Atmospheric Administration (dále jen NOAA). NOAA je americká agentura zaměřena na zkoumání oceánů a atmosféry, meteorologii, klimatologii a oceánologii. Jejím cílem je poskytovat informace veřejnosti, které chrání životy a majetek, podporují hospodářství a trvale udržitelný rozvoj (NOAA, 2024).

Za zmínku také stojí program pro sledování sopečných nebezpečí provádí výzkum, monitoruje sopečnou aktivitu a poskytuje informace o možných nebezpečích spojených se sopečnými erupcemi v USA, který spadá pod United States Geological Survey a nese název Volcano Hazards Program (dále jen USGS-VHP). Technologie vzdušného a satelitního dálkového průzkumu poskytují vylepšené možnosti pro detekci a sledování známek nepokojů a erupcí, včetně emisí plynů, topografických změn, oblaků popela a lávových proudů (USGS, 2024).

International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (dále jen IAVCEI). IAVCEI je mezinárodní organizace, která sdružuje vědce zabývající se vulkanologií a chemií zemského nitra. Usiluje o podporu výzkumu, vzdělávání a spolupráci v oblasti sopečné činnosti. Asociace představuje primární mezinárodní zaměření pro výzkum vulkanologie, úsilí o zmírnění sopečných katastrof a výzkum úzce souvisejících oborů, jako je magmatická geochemie a petrologie, geologie a fyzika o vzestupu magmat ve svrchním plášti a kůře. IAVCEI řídí výkonný výbor, jehož členové se mění každé čtyři roky. Klade za cíl být mezinárodně aktivní, a proto hledá vztahy s jinými mezinárodními vědeckými organizacemi a účastní se mezinárodních vědeckých projektů. (IAEVCE, 2024).

Volcano Discovery je soukromá organizace, která se specializuje na sledování sopečné aktivity po celém světě a poskytuje informace a zpravodajství o aktuálních erupcích.

Zajímavostí je, že tato organizace je zároveň i cestovní kanceláří díky, které je možné poznávat sopky zblízka. Poskytují takzvaný „*geoturismus*“ (Volcano Discovery, 2024).

European-Mediterranean Seismological Centre (dále jen EMSC) poskytuje informace o zemětřeseních, ale také v této spojitosti sleduje sopečnou aktivitu a zpravodajství o erupcích v Evropě a okolních oblastech. EMSC je mezinárodní, nevládní, nezisková asociace, která se věnuje rychlému shromažďování a šíření informací o zemětřesení a podpoře seismologického výzkumu (EMSC, 2024).

Volcanic Ash Advisory Centers (dále jen VAACs) je síť center, která sleduje a vydává zprávy o sopečném popelu a jeho pohybu, což je klíčové pro leteckou bezpečnost. Snahu informovat leteckou komunitu o vulkanických nebezpečích má celkem devět center. Ty mají za úkol monitorovat pohyb sopečného popela v jim přiděleném vzdušném prostoru. (OSPO, 2024)

World Organization of Volcano Observatories (dále jen WOVO) je organizace pro sopečné observatoře světa. Členy WOVO jsou instituce, které se zabývají dohledem nad vulkány a ve většině případů jsou odpovědné za varování úřadů a veřejnosti před nebezpečnými sopečnými nepokoji. Cílem je stimulovat komunikaci a spolupráci mezi observatořemi a institucemi přímo zapojenými do monitorování sopek (WOVO, 2024).

Global Volcano Model (dále jen GVM) je mezinárodní organizace, která má snahu zlepšit pochopení sopečných nebezpečí a rizik prostřednictvím globální spolupráce vědců, inženýrů a manažerů rizik. Cílem je vytvořit udržitelnou a dostupnou informační platformu o vulkanických nebezpečích a rizicích. GVM bude poskytovat systematické důkazy, data a analýzy sopečných nebezpečí a rizik v globálním, regionálním a místním měřítku a bude rozvíjet schopnosti předvídat budoucí vulkanismus a jeho důsledky (WOVO, 2024).

Veškeré instituce zabývající se bližším zkoumáním klimatu a vulkanismu zajišťují pro lidstvo patrné bezpečí při nevyhnutelných katastrofách. Jejich působení se prokazuje být stále důležitější. Díky tomu je možné předpokládat mnoho negativních scénářů při přírodních katastrofách. S tím souvisí příprava opatření, které tyto scénáře mohou alespoň částečně vyvrátit a zachránit nejenom lidské životy.

3.2.4 Významné historické erupce a jejich vliv na klima

Zkoumání změn životního prostředí v minulosti bylo vždy primárním cílem geologie, ale geologové dnes stále více spolupracují s klimatologi, paleoceanografy, specialisty na ledová jádra, dendrochronology, antropology a archeology, aby pochopili, jak se utvářely klimatické změny a přírodní katastrofy.

Někteří vědci, jako Paul Hoffman a Sturgis Hooper, prezentují teorii, že sopečná činnost mohla být pro globální klima v historii Země ve výsledku prospěšná. Zmiňují možnost, že sopečné erupce mohly pomoci při obnově rovnováhy atmosférických plynů po epizodách globálního zalednění (Science Week, 2008).

Největší historický vliv na klima, ve kterém měla vulkanická aktivita svůj hlavní podíl, přineslo „*velké permské vymírání*“. Mezinárodní vědecký tým z Číny a Spojených států identifikoval vysoké koncentrace rtuti v mořských sedimentech na konci geologické periody permu na několika místech po celém světě. Tato zjištění poskytují přesvědčivý důkaz o tom, že za masovým vymíráním na konci tohoto období, které se odehrálo před více než 252 miliony lety, mohou stát právě sopečné erupce (Jun Shen et al. 2019).

Velké permské vymírání bylo největším masovým vymíráním v historii planety Země, při kterém zahynulo téměř 96 % všech mořských druhů. Předpokládá se, že hlavní příčinou této katastrofy byly erupce v sopečném systému. Erupce zapálily obrovská ložiska uhlí a uvolnily rtuťové páry vysoko do atmosféry, které se následně formou rtuti usadily v mořských sedimentech po celém světě (Jun Shen et al. 2019).

Vulkanická aktivita velkého permského vymírání vedla k závažným environmentálním poruchám, včetně oteplení planety přibližně o 10 stupňů Celsia. Erupce, které probíhaly opakovaně po delší dobu, bránily v obnově potravinového řetězce na Zemi. (Jun Shen et al. 2019). Z této zkušenosti je patrné, jak mohou být sopky nepředvídatelně silné.

Lidstvo zaznamenává výbuchy, které datujeme jako nejničivější a zároveň nejohrovnější. Avšak mnoho výbuchů se odehrálo v tak daleké historii, že nejsme schopni tyto erupce nijak porovnat. Nejstarší sopku není snadné přesně identifikovat, protože staré sopečné struktury mohou být překryty novějšími vrstvami hornin a jejich původní tvary mohou být změněny erozí. V oligocénu před 28 miliony lety se odehrála erupce kaldery La Garita. Unikátní kaldera měla významné dopady na životní prostředí. I když přesný vliv této erupce na klima není zcela znám, masivní objem vyvržených láv a popela měl pravděpodobně regionální dopady na podnebí (Oppenheimer, 2011, s. 9).

V následujícím období pleistocénu supervulkán v Yellowstone uvolnil 1000 kubických kilometrů popela a hornin, zanechávajíc trvalejší stopu v krajině. Podrobnosti o přímém vlivu této erupce na klima nejsou zcela jasné, ale podobně jako u Toba mohla mít dalekosáhlé důsledky na globální teploty (Oppenheimer, 2011, s. 9).

Vulkanické kataklyzma, táhnoucí se před 75 tisíci lety, zanechalo na severní Sumatře díru o průměru až 80 kilometrů. Jednalo se o erupci sopky Toba, která následně ochladila Zemi o 3 až 5°C. Některá tvrzení naznačují, že tato událost téměř vyhubila naše předky (Oppenheimer, 2011, s. 9).

V 19. století ohromily svět dvě erupce, které svým ničivým vlivem způsobily dramatické klimatické změny. V roce 1815 vybuchla sopka Tambora. Erupce způsobila "rok bez léta" v roce 1816 s abnormálně nízkými teplotami a následnými hladomory. Po 68 letech zasahuje další hrozivá erupce sopky Krakatoa. Erupce sopky Krakatoa vytvořila atmosférické jevy, jako byly nádherné západy slunce a pozoruhodný vliv na globální klima (Oppenheimer, 2011, s. 24).

V roce 1980 poznala planetu Země ničivou sílu erupce hory svaté Heleny. Přestože to nebyla super erupce, měla regionální dopady na klima a prostředí. O pouhé dva roky později propukla erupce El Chichón. Tato erupce měla krátkodobý, ale významný vliv na klima. V roce 1991 způsobila erupce Pinatubo dočasné ochlazení planety díky uvolnění částic do stratosféry (Oppenheimer, 2011, s. 23).

Účinky velkých tropických vulkanických erupcí na radiační rovnováhu se projevují nejen rozsáhlým ochlazením, ale přispívají také k rozsáhlým změnám atmosférické cirkulace, což vede k jedné nebo dvěma mírným povulkanickým zimám na severní polokouli (Robock, 2000).

Novodobé sopky svatá Helena (1980), El Chichón (1982) a Pinatubo (1991) poskytují další přesvědčivé důkazy, že erupce tohoto rozsahu mají potenciál změnit globální klima na několik let tím, že produkují stratosférické závoje jemných sirných částic, které zachycují sluneční světlo (Oppenheimer, 2011, s. 24).

Historické sopky představují v dnešní době důležitý obraz o minulém chování jednotlivých sopek. Proto je na místě se dozvídat o historickém vulkanickém dění toho co nejvíce, aby bylo možné se vyvarovat dopadům, kterým jsme schopni díky uplynulé minulosti předejít.

3.3 Historické erupce a jejich dopad na klima

V následující kapitole budou detailně vykresleny ty nejzávažnější erupce sopek, které měly bezpochyby nejhroživější dopady na klima. Pro tuto práci byly vybrány historické erupce sopek Tambora (1815), Krakatoa (1883) a Pinatubo (1991). Tyto sopky představují pozoruhodné chování, které ovlivnilo celý svět svojí ohromnou silou.

Skidmore a Toya (2002) odkazují na pojem „kreativní destrukce“ a tvrdí, že přírodní katastrofy mohou sloužit k omlazení společnosti a urychlení hospodářského růstu. To se jistě potvrdilo i v důsledku erupce Pinatubo v roce 1991 a vulkanologové si ji mohou pamatovat pro určitou útěchu, když se vypořádávají se smrtí a ničením spojeným se sopečnými katastrofami. Lidské společnosti jsou skutečně odolné a časem se uzdravují. Avšak obrovskou roli zde hraje faktor času.

Z toho důvody je nutné vnímat následující katastrofy s určitým odstupem a nehledět na celou situaci ryze negativně, jelikož tyto procesy nasvědčují o zdravém vývoji naší planety a jsou důležitou součástí lidského života na Zemi.

3.3.1 Tambora

Největší sopečná erupce v nedávné historii se odehrávala ve dnech od 10. do 15. dubna roku 1815, kdy sopka Tambora na ostrově Sumbawa v Indonésii explodovala a vypustila do vzduchu 160 kubických kilometrů materiálu, což následně vytvořilo mohutný kráter. Deprese vytvořené tímto způsobem se nazývají kaldera. Kaldera Tambora má průměr 6 kilometrů a hloubku 1100 metrů. Vytvořila se, když se odhodil odhadovaný 4000 metrů vysoký vrchol Tambory. Země se propadla vyprázdněním magmatické komory pod ní. Tambora je stále aktivní sopkou a od velké erupce v roce 1815 došlo k několika menším erupcím, při kterých byla vyvržena láva na dno kalderového kráteru. Zvuk erupce Tambory z roku 1815 byl slyšet více než 1400 kilometrů. Husté vrstvy sopečného popela byly registrovány v rozsáhlém regionu, putujíc tisíce kilometrů od místa erupce. Popel nakonec ztuhl a stal se tufem. Tuf je druh sopečné horniny vytvořeným z konsolidace sopečných usazenin usazených ze vzduchu (Perkins a kol., 2019, s. 532).

Obrázek 4 - Poloha sopky Tambora



Zdroj: Britannica, 2024

Celá událost měla zničující dopady nejen na místní oblast, ale také na globální klima. Při této obrovské explozi vyexplodovalo asi 100 km^3 pyroklastického materiálu. Nadmořská výška sopky se snížila o 1300 m. Přímé ztráty zahrnovaly úmrtí 10 000 lidí a zničení několika sousedních ostrovů. Nepřímé následky, jako hladomor a nemoci, vedly poté k úmrtí dalších zhruba 82 000 obyvatel v celé oblasti. Další oběti byly zaznamenány po celém světě v důsledku globálních dopadů na klima (Sopečné katastrofy, 2011).

Pyroklastický materiál vnesený do stratosféry ovlivnil klima po celém světě v následujícím roce 1816. I když byla úmrtnost na Sumbawě a poblíž ležícím ostrově Lombok obrovská, následky Tambory zasáhly celý svět. V měsících po erupci putoval sopečný popel a kyselina sírová, nesené atmosférickým oběhem kolem světa, vstupující sluneční světlo a způsobily tak „rok bez léta“ (Perkins a kol., 2019, s. 532).

Lidé ve střední Evropě trpěli chladným, deštivým létem, špatnou úrodou, rostoucími cenami a hladomorem. Společnosti, které již byly zranitelné kvůli politické nestabilitě a předchozím napoleonským válkám, se musely s krizí vypořádat. Na některých místech propukly nepokoje. Stručně řečeno, erupce Tambory z roku 1815 a takzvaný „rok bez léta“ z roku 1816 měly od té doby trvalé dopady na ekonomické, sociální, politické, technické, kulturní a v neposlední řadě i vědecké prostředí. Neexistuje však žádné jednotné vysvětlení

účinků vedoucí přímo od erupce k hladomorům. Na každém kroku přispělo mnoho dalších faktorů, jako jsou jiné klimatické faktory, náhodná proměnlivost počasí, politická a ekonomická situace evropských zemí a stresovaná populace (Brönninmann, 2016).

Výbuch Tambory podle VEI² (Volcanic Explosivity index) odpovídá hodnotě číslo 7. Sopku Tambora lze považovat za stratovulkán kuželovitého tvaru. Výbuch byl předpokládán několik let před samotným výbuchem. Po výbuchu čekalo obyvatelé ostrova několik dní trvající zemětřesení, hustý černý dým, záplavy a vzdušné víry. Vrstva popela a bahna způsobila udušení veškeré vegetace. To znamenalo pro místní obyvatelé znečištění vody, neúrodu a s tím spojený nedostatek potravy (Vaccaro a kol., 2006, s. 22).

Průměrné globální teploty klesly o 0,5-1 °C. To vedlo k selhání úrody a zásadnímu nedostatku potravin na severní polokouli. Nedostatek potravin vyvolal potravinové nepokoje na severu Evropy a způsobil epidemii skvrnité horečky v Irsku. Následky nebyly tak ničivé v Severní Americe, ale přesto zničily většinu úrod. Zničení úrody samozřejmě představovalo značnou míru hladu po určitou dobu. Dokonce v Nové Anglii a částech Pensylvánie zažily některé oblasti sněžení v červnu a červenci (Perkins a kol., 2019, s. 532).

Sopka Tambora, která v roce 1816 vyvolala přírodní katastrofu, zůstala neklidná i v následujících letech, což vedlo k první vědecké expedici na její vrchol v roce 1847. Vědci pod vedením Heinricha Zollingera provedli pozorování, která přispěla k našim současným znalostem o výbuchu Tambory (Perkins a kol., 2019, s. 532).

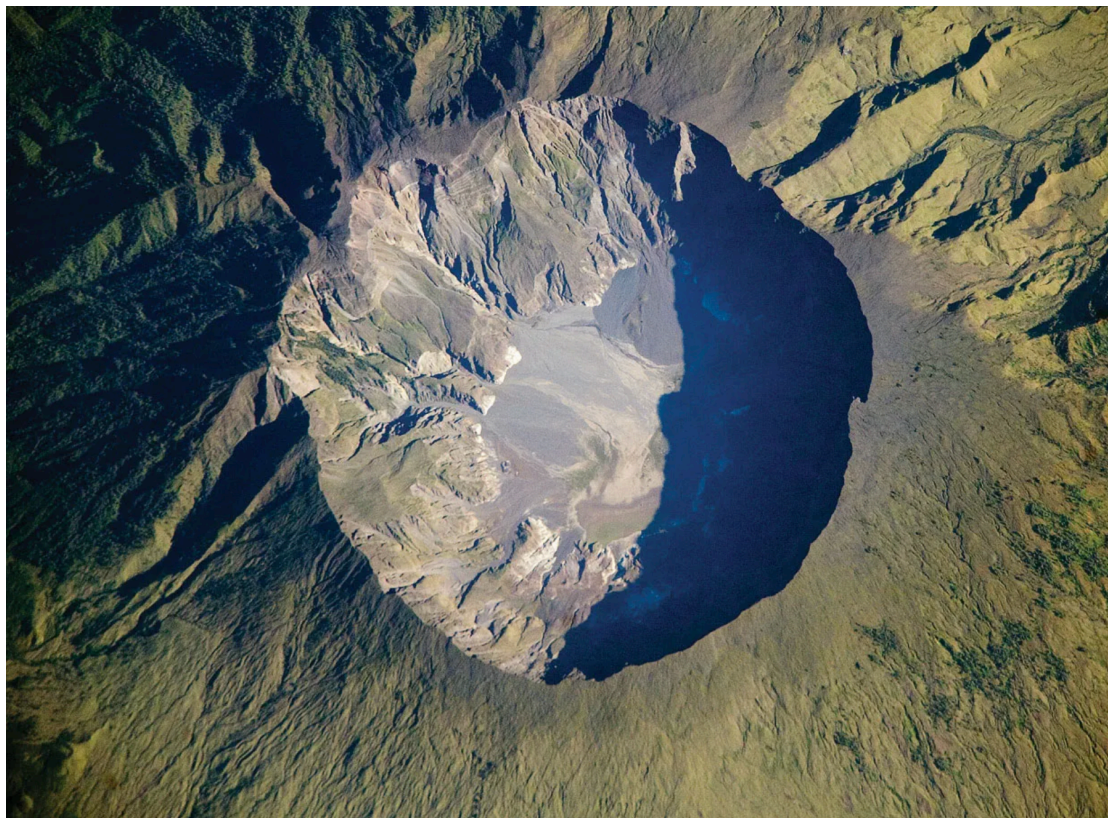
Globální klimatické poruchy způsobené aerosolovým závojem Tambora vedly v letech 1816 a 1817 ke špatné úrodě. Podle historika Johna Posta (1977) následná potravinová nejistota spojená s vážnými politickými a sociálními dislokacemi na konci napoleonských válek, přispěl k propuknutí tyfu, úplavice a dalších onemocnění v mnoha částech Evropy.

V Německu došlo k povodním podél řeky Rýn a způsobily nedostatek potravin v mnoha městech na březích řeky. V Británii a Irsku bylo počasí tak chladné, že napadl sníh. Hladomor se rozšířil přes Jižní Irsko. V roce 1816 vypukla v Irsku epidemie tyfu. Americké nebe bylo narušeno erupcí popela z Tambory. Značné množství popele mělo za následek výrazné změny klimatu v roce 1816. Mnoho sklizně se nezdařilo a mnoho chovaných zvířat uhynulo. Část přicházejících imigrantů se musela vrátit zpět do Evropy, protože v USA nastal nedostatek potravin (Wirakusumah, Rachmat, 2017).

² VEI – (Volcanic Explosivity index) Index vulkanické výbušnosti, míra velikosti a energie sopečných erupcí na základě několika základních parametrů jako jsou trvání a styl erupce, objem erupčních produktů a erupční sloupec výška. Stupnice má otevřený konec s největšími sopkami v historii s magnitudou 8. Každý interval na měřítku představuje desetinásobný nárůst pozorované erupce. (Sigurdsson, 2015)

Moderní výzkumy Tambory pokračují, a výprava v roce 2004 odhalila pozůstatky starověké vesnice pod vrstvou popela. Nález obsahoval také artefakty a kosterní pozůstatky, které přispěly k porozumění životu obyvatel této oblasti (Vaccaro a kol., 2006, s. 23).

Fotografie 1 - Kosmický snímek kaldery sopky Tambora



Zdroj: NASA Earth Observatory, 2009

Tato detailní fotografie astronautů zachycuje vrchol kaldery sopky. Obrovská kaldera 6 kilometrů v průměru a 1100 metrů hluboká vznikla, když byl odstraněn odhadovaný 4000 metrů vysoký vrchol Tambory a magmatická komora pod ní se vyprázdnila během erupce. Dnes je dno kráteru obsazeno efemérním sladkovodním jezerem, nedávnými sedimentárními usazeninami a menšími lávovými proudy a dómy z devatenáctého a dvacátého století. Podél severozápadního okraje kráteru jsou patrné vrstvené usazeniny tefra. V kaldeře stále existují aktivní fumaroly neboli parní průduchy (NASA Earth Observatory, 2009).

3.3.2 Krakatoa

Erupce sopky Krakatau, která proběhla na konci srpna 1883, představuje jednu z nejmocnějších vulkanických explozí v historii s dalekosáhlými důsledky. Tato událost měla opět vliv nejen z lokálního hlediska, ale také svými dopady přesahovala do globálního prostředí. Před samotným výbuchem Krakatoa v roce 1883 došlo k sérii předcházejících událostí, včetně zemětřesení v roce 1878 a erupcí na nedalekém ostrově Perbuwatan v letech 1880 a 1883. Samotná erupce Krakatoa odstartovala 20. května, při níž do vzduchu vzlétl popel a pára. Dne 26. srpna dosáhla kritického bodu, kdy sloup vulkanického popela byl vyvržen do výšky 36 km. Následovaly další exploze, při kterých bylo vyhozeno masivní množství materiálu na povrch země, což mělo ničivé důsledky. Pyroklastická hmota, láva a popel postihly oblast v okruhu 80 km, přičemž tisíce lidí zahynuly. Následovalo ničivé tsunami. Výbuch Krakatoa se stal jednou z nejhlučnějších sopek (Vaccaro a kol., 2006, s. 26).

Obrázek 5 - Poloha sopky Krakatoa



Zdroj: Britannica, 2024

Erupce Krakatau měla několik fází, během kterých byl vytvořen pyroklastický oblak dosahující výšky 27 km a vyvrhnut objem tefry přibližně 25 km³. Neobvykle masivní exploze byla slyšitelná až do vzdálenosti 4800 km od ostrova Mauritius, který se nachází jihovýchodně od afrického kontinentu. Součástí erupce byly také způsobené vlny tsunami,

které dosáhly až na Britské ostrovy. Celkový počet obětí spojených s katastrofou přesáhl 36 000 (Sopečné katastrofy, 2011).

Nejznámější vulkanicky vyvolané tsunami jsou ty, které byly spojeny právě s erupcí Krakatau v roce 1883. Ty způsobily zkázu na přilehlých pobřežích Sumatry a Jávy a představovaly většinu z odhadovaných 36 600 úmrtí spojených s vulkanickou erupcí (Oppenheimer, 2011, s. 42).

Obrázek 6 - Historické zobrazení události vulkanické erupce Krakatoa



Zdroj: 71-1250, Houghton Library, Harvard University, 1888

Exploze Krakatoa nejen přinesla rozsáhlou destrukci, ale také změnila krajinu a klima po dlouhou dobu. Plavbu po moři dlouhou dobu komplikovaly obrovské hromady pemzy a vulkanického materiálu. Dokonce několik měsíců po erupci byly zaznamenány plovoucí

zbytky vulkanického materiálu s mrtvými těly, která se dostaly až k Indickému oceánu (Vaccaro a kol., 2006, s. 26).

Sopečný popel a prach ve stratosféře mají schopnost rozptylovat sluneční světlo. To může způsobit, že sluneční záření se lomí a odrazí od částic, což způsobuje barevné odlesky a intenzivní západy slunce. Tyto atmosférické jevy mohou trvat několik měsíců po erupci, protože částice zůstávají ve vyšších vrstvách atmosféry (Judd a kol., 1888, s. 134).

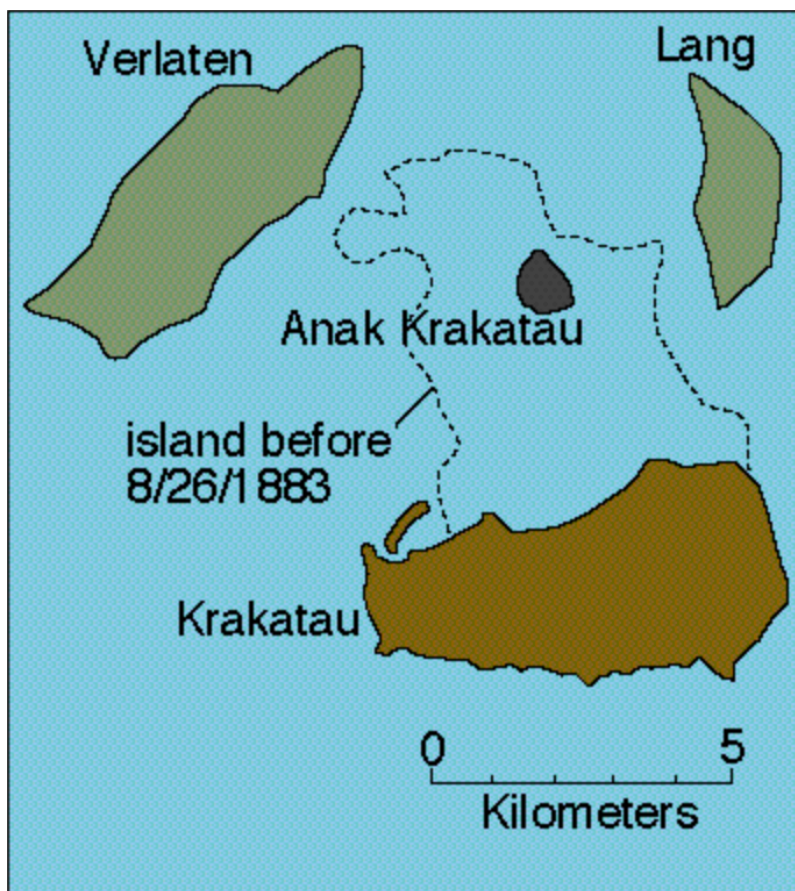
Erupcí sopky Krakatoa byly ovlivněny i západy slunce. Vyvržené velké množství sopečných částic popela a prachu ovlivnily rozptyl slunečního záření. Velké množství popela vedlo k výrazným atmosférickým jevům, včetně dechberoucích západů slunce (Judd a kol., 1888, s. 155).

Účinky vulkanických částic na západy slunce byly poprvé podrobně studovány po explozivní erupci Krakatoa (také známé jako Krakatau) v roce 1883 v Indonésii ve dnech 26. a 27. srpna. První a dosud nejkompexnější sbírka optických efektů vulkanického aerosolu byla zveřejněna v roce 1888 na objednávku Královské společnosti v Londýně. Tato sbírka poskytuje bohatý zdroj informací o povaze a interpretaci atmosférických jevů způsobených sopečným mrakem. Zahrnuje pozorování očitých svědků vědců a laických pozorovatelů z celého světa. Jedním z výrazných jevů bylo červenohnědé obrazce kolem Slunce známé jako Bishopovy prstny, pozorované reverendem S. E. Bishopem z Honolulu. Tyto optické efekty byly vysvětleny jako důsledek rozptylu světla jemnými částicemi popela suspendovanými v atmosféře (Oppenheimer, 2011, s. 129)

Slunce zůstávalo modré nebo zelené od 9. do 12. září po výbuchu, přičemž obloha po západu slunce získala zvláštní zelený nádech. Když slunce znovu začalo nabývat své obvyklé barvy, vynikl červený dosvit. Ve dnech 13. a 14. září byla západní část obzoru osvětlena neobvyklým zářivým červeným světlem, které trvalo asi čtvrt hodiny a postupně zmizelo. Další pozorování ukázala, že několikrát bylo slunce směrem k západu modré nebo zelené před zářivě červeným soumrakovým zbarvením (Judd a kol., 1888, s. 156).

V případě Krakatau probíhala rekolonizace rychle díky mořským ptákům a mořským proudům v Sundském průlivu a blízkosti sopky k biologicky bohatým ostrovům Jáva a Sumatra. První kolonista byl zjevně osamělý pavouk nalezený devět měsíců po erupci, ale v roce 1896 se usadilo 53 druhů rostlin a průzkum v roce 1908 objevil mezi průkopnickými travinami 200 živočišných druhů (většinou hmyzu). Nakonec zakořenily různé stromy a vzkřísily lesní porost (Oppenheimer, 2011, s. 48).

Obrázek 7 - Mapové znázornění ostrova Krakatoa po erupci v roce 1883



Zdroj: Simkin a Fiske – Oregon State University, 1983

Obrázek představuje rozpadnutí se původního ostrova Krakatoa, který se vlivem silné erupci rozdělil. Je vidět obrys, dle kterého je možné si představit původní ostrov. Rozpadem původního ostrova zbyly dvě části a velká část ostrova zůstala potopená pod vodou.

Po erupci došlo k propadu do magmatického krbu, což vytvořilo kalderu. V současné době v této kaldeře vyrostl nový aktivní sopečný kužel pojmenovaný Anak Krakatau, což po přeložení znamená dítě Krakatau. Její vliv dodnes působí na místní ekosystémy, ale i na globální klima (Sopečné katastrofy, 2011).

3.3.3 Pinatubo

Přírodní katastrofa erupce sopky Pinatubo, která postihla hustě obydlenou oblast, se odehrála v Mount Pinatubo na Filipínách konkrétně na ostrově Luzon 15. června 1991 a představuje jednu z významných historických sopečných událostí 20. století. Erupce vytvořila vysokorychlostní laviny horkého popela a plynu, obří bahenní proudy a oblak sopečných popel stovky mil napříč (Newhall, 1997).

Obrázek 8 - Poloha sopky Pinatubo



Zdroj: Britannica, 2024

Silné, údolí vyplňující usazeniny pyroklastického toku z trhliny se izolovaly a udržely si velkou část tepla. Tyto usazeniny měly v roce 1996 teploty až 500 °C a mohou si udržet teplo po celá desetiletí. Když se voda z potoků nebo podzemních průsaků dostane do kontaktu s těmito horkými usazeninami, explodují a roznáší po větru jemný popel (Newhall, 1997).

Až do seismických rojů nebyl Pinatubo vědci identifikován jako potenciálně aktivní sopka, byla zcela mimo obrazovku vulkanologického radaru. To představuje důležitou připomínku toho, jak nevědomí pravděpodobně zůstaneme ohledně sopek, které v budoucnu způsobí největší a nejničivější erupce (Oppenheimer, 2011, s. 54)

Je zajímavé, že k největším erupcím dochází u sopek, o kterých toho vulkanologická komunita dopředu příliš neví. Jsou latentní po staletí nebo tisíciletí, čekají na čas a hromadí magma. Erupce sopek jako je právě Pinatubo poskytují další přesvědčivé důkazy pro přetrvávající vědeckou omezenost. Erupce tohoto rozsahu mají potenciál změnit globální klima na několik let tím, že způsobují stratosférické závoje jemných sirných částic, které zachycují sluneční světlo. Následky erupce Pinatubo to velmi jasně demonstrují (Newhall, 1997).

Předcházející aktivita sopky Pinatubo v roce 1991 byla zaznamenána sérií zemětřesení, z nichž nejvýraznější bylo o síle 7,8 stupně, které zasáhlo oblast 100 kilometrů severovýchodně od hory. To bylo následováno erupcí 15. června 1991, kdy se sopečný dóm zhroutil pod tíhou popela, vyvolaného deštěm, a vyústil v masivní erupci. Tisíce obydlí se zhroutily pod tíhou popela, a oblast byla následně ovlivněna tvorbou bahna (lahary), která způsobila větší škody než samotná erupce (Newhall, 1997).

Erupce byla doprovázena obrovským mrakem popela a plynu, který vystoupil do výšky 35 kilometrů. Jemný popel dopadl až do Indického oceánu a satelity několikrát sledovaly oblak popela po celém světě. Následky erupce byly citelné na širokém území, a lidé žijící v blízkosti sopky byli evakuováni. Zemětřesení, pára a emise oxidu siřičitého byly dalšími důsledky. Erupce sopky Pinatubo se stala druhou největší sopečnou událostí v tomto století (Newhall, 1997).

Tato erupce, probíhající po 500 letech klidu, měla značný dopad na okolní prostředí a společnost. Předchozí aktivita v oblasti v březnu a dubnu 1991 ukázala, že sopka nebyla úplně nečinná, ačkoli byla v mírnějším stavu. Roztavená hornina směřující k povrchu z více než 32 kilometrů pod Pinatubo vyvolala malá zemětřesení a párové exploze, což byly předzvěsti následující katastrofální erupce (Newhall, 1997).

V průběhu erupce bylo vyvrženo zhruba 25 km³ tefry, která pokryla území o rozloze 120 000 km². Pyroklastický oblak dosáhl výšky 7 km, snižující sluneční záření o 5 %. Exploze vytvořila kalderu o průměru 2,5 km. Přesná předpověď katastrofy umožnila rozsáhlou evakuaci obyvatelstva, což snížilo počet obětí na 300. Nicméně erupce měla vážné následky, včetně poškození vegetace, lidských sídel a infrastruktury v širokém okolí.

Sopečné látky se dostaly do stratosféry a poškodily ozonovou vrstvu. V roce 1992 dosáhly hodnoty ozonu na jižní polokouli historického minima. Nízká hodnota ozonu měla dalekosáhlé důsledky pro globální životní prostředí (Sopečné katastrofy, 2011).

Klíčové klimatické dopady vulkanických injekcí do stratosféry spočívají v transformaci oxidu siřičitého na kyselinu sírovou, která kondenzuje ve stratosféře, vytvářejíc jemné síranové aerosoly. Tyto aerosoly zvyšují odraz záření ze Slunce zpět do vesmíru, což vede k ochlazení spodní zemské atmosféry nebo troposféry (USGS, 2024).

Několik erupcí v průběhu minulého století způsobilo pokles průměrné teploty na zemském povrchu až o půl stupně Fahrenheitů po dobu jednoho až tří let. Erupce hory Pinatubo v roce 1991 byla jednou z největších ve dvacátém století, vytvořila rozsáhlý oblak oxidu siřičitého ve stratosféře. Tento oblak, přestože největší od začátku satelitních pozorování v roce 1978, byl však menší než oblaky po erupcích Krakatau v roce 1883 a Tambory v roce 1815 (USGS, 2024).

Naštěstí vědci z Filipínského institutu vulkanologie a seismologie a US Geological Survey předpověděli vulkanickou erupci Pinatubo v roce 1991, což vedlo k záchraně nejméně 5 000 životů. I přesto, že se podařilo ochránit mnoho zařízení, byly dvě největší americké vojenské základny na Filipínách, letecká základna Clark a námořní stanice, vážně poškozeny popelem z vrcholné erupce sopky. Téměř 20 milionů tun oxidu siřičitého bylo vypuštěno do stratosféry během erupcí sopky Pinatubo v roce 1991, a rozptýlení tohoto oblaku plynu po celém světě způsobilo dočasné globální ochlazení o přibližně 0,5 °C v letech 1991 až 1993. Tyto dramatické události dramaticky změnily krajinu středního Luzonu, kde žije kolem 3 milionů lidí. Asi 20 000 domorodých obyvatel horského kmene Aeta, kteří obývali svahy sopky, bylo kompletně vysídleno, a většina z nich stále čeká v přesídlovacích táborech na den, kdy se budou moci vrátit domů. Asi 200 000 lidí, kteří byli evakuováni z nížin okolo Pinatubo před a během erupce, se vrátilo domů, ale čelí neustálým hrozbám ze strany laharů, které již pohřbily mnoho měst a vesnic (Newhall, 1997).

Družice NASA nazvaná Upper Atmospheric Research Satellite (dále jen UARS) hrála klíčovou roli při poskytování informací o vlivu erupce na klimatický systém. Tato družice umožnila detailní studie, které charakterizovaly složení sopečných materiálů unášených do stratosféry. Tyto informace byly klíčové pro porozumění dopadů sopečné erupce na chemii atmosféry, tepelný rozpočet a klima Země (Upper Atmosphere Research Satellite (UARS), 2019).

Studie provedené pomocí UARS umožnily vytvoření modelů radiačních a chemických účinků sopečných emisí, což poskytlo cenné poznatky pro klimatické modely a lepší porozumění fungování atmosféry a klimatu. Umožnila také odstranění vulkanického signálu, což přispělo k lepšímu odhalení vlivu lidské aktivity na klima. UARS se tak stal klíčovým nástrojem pro kvantifikaci účinků sopečných erupcí na globální úrovni, poskytující měřítko pro porozumění minulým i budoucím událostem tohoto typu (Upper Atmosphere Research Satellite (UARS), 2019).

Výbuch sopky Pinatubo 15. června 1991 přinesl rozsáhlé materiální a ekologické škody, a mrak popela a plynu ovlivnil klima na širokém území. Tato událost poskytuje unikátní příležitost k výzkumu sopečných procesů a jejich vlivů na biosféru. Studium této události nám umožňuje lépe porozumět komplexní interakci mezi sopečnou činností, životním prostředím a lidským osídlením (Newhall, 1997).

Fotografie 2 - Zachycení erupce sopky Pinatubo



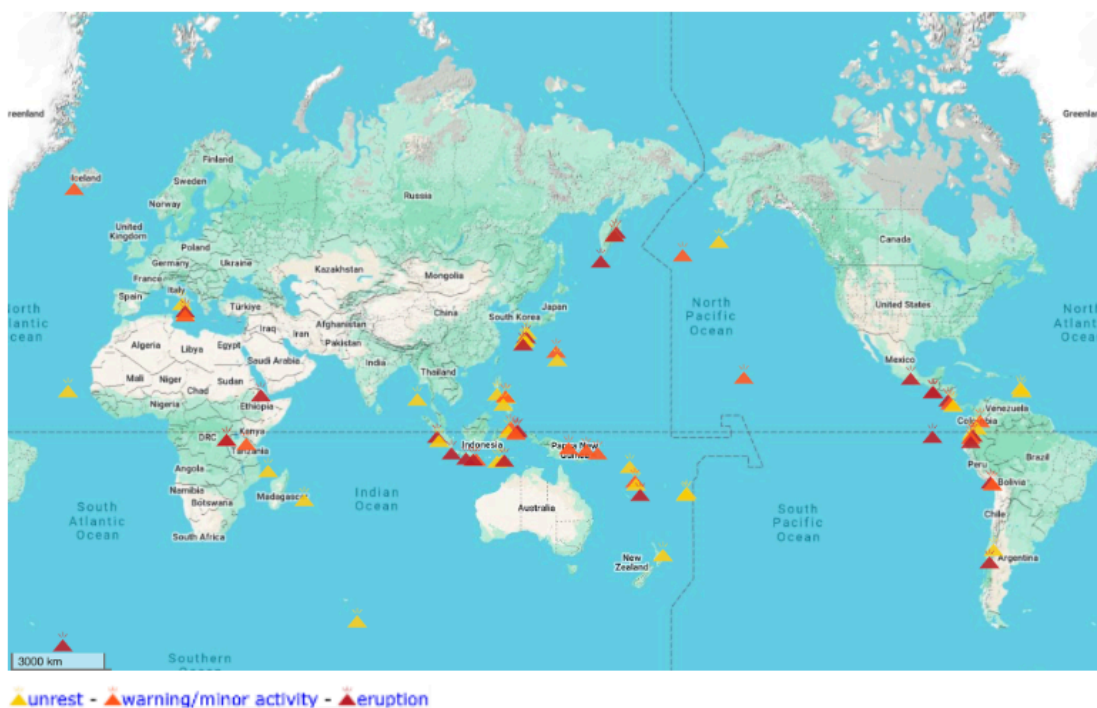
Zdroj: Rick Hobblitt, 1991

Na fotografii je zachycen menší oblak na sopce Tambora z 12. června 1991, který se zde vytvořil tři dny před vrcholnou erupcí. Zde se nad sopkou vznáší 18 kilometrů vysoký oblak, vyfotografovaný z Clark Air Base (20 kilometrů východně od sopky).

3.4 Současný vulkanický stav ve světě

V současné době se svět nachází v proměnlivém vulkanickém stavu, přičemž mnohé oblasti vykazují různé úrovně sopečné aktivity. Globální sledování vulkánů poskytuje nejen vhled do geologických procesů, ale také nám umožňuje lepší připravenost na možné vlivy na životní prostředí a obyvatelstvo. Některé země, zejména ty ležící v Ohnivém kruhu jsou vystaveny častým sopečným erupcím, zatímco jiné regiony mohou zažívat klidnější období. Podívejme se na aktuální vulkanickou situaci a sledujme, jak se jednotlivé sopky chovají v dnešní době.

Obrázek 9 - Mapové znázornění aktuální vulkanické globální aktivity



Zdroj: Interactive Map of Active Volcanoes and recent Earthquakes worldwide, 2024

Předchozí obrázek zachycuje mapové znázornění aktuální vulkanické globální aktivity ke dni 8.3. 2024. I v tomto případě si lze všimnout dominance Ohnivého kruhu. Výraznou aktivitu je možné zaznamenat v jihovýchodní Asii, konkrétně tedy v Indonésii.

Na obrázku se nacházejí momentálně aktivní indonéské sopky Dukono, Ibu, Semeru, Karangetang, Lewotolok, Merapi, Marapi, Lewotobi. Nejvyšší index vulkanické výbušnosti přísluší v této oblasti sopce Semeru s hodnotou 4. S hodnotou 3 je pak klíčová erupce sopky

Dukono. VEI v roce 2024 zatím nepřekročil hodnotu 4. Této hodnoty letos dosáhly pouze sopky Semeru (Indonésie), Sheveluch (Rusko) a Manam (Papua Nová Guinea) (Smithsonian Institution, 2024).

Významnou vulkanickou aktivitu lze zaznamenat od Mexika podél Andského pohoří až po Chile. Zde stojí za zmínku erupce mexické sopky Popocatepetl (VEI=2), sopka Villarrica (VEI=3), nedávná erupce ekvádorské sopky Fernandina (VEI=1), Sabancaya v Peru (VEI=3) a další (Smithsonian Institution, 2024).

Vulkanická aktivita v Evropě je zastoupená hlavně vulkanickou činností na Islandu. Momentálně největší aktivitu vykazuje oblast Reykjanes poblíž mezinárodního letiště Keflavík, jejíž erupce začala 18. prosince 2023. Tato událost zasáhla turistickou oblast již třemi erupcemi a přinesla s sebou rozsáhlé propady zemského povrchu. Její aktivita stále pokračuje. Nedaleko této oblasti se v minulém roce 2023 odehrála erupce sopky Fagradalsfjall. Sopka se nachází ve vulkanickém údolí Geldingadalur, které následně zaplnila magmatická láva. Naštěstí nedošlo k masivní erupci a oblast bylo možné z určité vzdálenosti pozorovat, což přilákalo mnoho turistů (Global Volcanism Program, 2024).

Podle českého geologa Petra Brože (2023) nedošlo k masivní erupci díky minimálnímu zastoupení sopečných plynů v magmatické hmotě. V případě vyššího zastoupení plynů dochází k vyšší erupci vylučující sopečný popel a jiné částice. Sopka nacházející se pod ledovcem dokáže přeměnit led na vodní páru, a to může magmatickou hmotu potřhat na sopečné částice, prach a popel. Taková kombinace může mít rozsáhlé dopady, které by se mohly rozšířit po celé Evropě a omezit tak v první řadě leteckou dopravu.

V polovině března 2024 se projevila opět islandská sopka Reykjanes, která ochromila celý poloostrov Reykjanes. Došlo již ke čtvrté erupci od prosince předchozího roku. Nyní byla erupce nejsilnější. V okolí sopky došlo k evakuaci. Sopka zároveň přinesla s sebou úchvatné polární záře, avšak nebezpečí erupce stále panuje. V tomto období dochází také k erupci sopka Masaya (Nicaragua), Ioto (Japonsko) a již zmiňované sopky Fernandina v Ekvádoru (Global Volcanism Program, 2024).

Ještě bližší vulkanickou aktivitu představuje pro Českou republiku Itálie. V Itálii je aktuálně aktivní sopka Stromboli, která je zároveň sobě sama ostrovem. Hodnota indexu vulkanické výbušnosti zde dosahuje 2. Další aktivní italskou sopkou je Etna, jejíž index výbušnosti činí pouze 1 (Smithsonian Institution, 2024).

V poslední době se evropští obyvatelé začínají stále více obávat vulkanické situace na Islandu. Aktivita sopek na tomto ostrově představuje závažné riziko pro regionální i globální dopravu, ekonomiku a životní prostředí. Vulkanické erupce mohou mít negativní dopad na leteckou dopravu. Island je oblíbenou turistickou destinací a strach ze sopek může ovlivnit ekonomickou situaci země. Vzdělání a informovanost o vulkanických procesech jsou proto klíčové, aby mohli obyvatelé a vlády rychle a efektivně reagovat na jakékoli nečekané události spojené se sopečnou aktivitou.

4 Vlastní práce

4.1 Analýza vybraných vulkanických erupcí

Součástí teoretické části bude detailní rozpracování jednotlivých vybraných erupcí. Pro tuto práci byly vybrány tři erupce, které měly nejvýznamnější vliv na klima. Klima může být ovlivněno mnoha faktory a erupce jsou právě jednou z nich. Práce proto bude uvažovat hlavně vulkanické dopady. Zároveň vyvstane otázka, zda mají sopečné události společné prvky nebo čím se naopak odlišují. Výsledná srovnání ukazují, proč je potřeba zkoumat záznamy a pracovat s dostupnými daty mnohem větších historických erupcí, chce-li lidstvo předvídat celé spektrum možné budoucí sopečné činnosti.

Tabulka 1 - Shrnutí charakteristik vybraných sopek

Název sopky	Tambora	Krakatoa	Pinatubo
Zeměpisná délka	117°59'34"	105°25'22.8"	120°21'0"
Zeměpisná šířka	8°14'43"	6°6'7.2"	15°7'48"
Země	Indonésie	Indonésie	Filipíny
Ostrov	Sumbawa	Krakatoa	Luzon
Rok erupce	1815	1883	1991
VEI	7	6	6
Průměr kaldery	6 km	7 km	2,5 km
Typ sopky	aktivní stratovulkán	aktivní stratovulkán	aktivní stratovulkán
Počet obětí	zhruba 92 000	více než 36 000	více než 500
Poměr oxidu síry	60–80 Mt	20 Mt	17-20 Mt
Lokální dopad na klima	Destrukce ekosystémů, obyvatelstva v blízkém okolí.	Vlna tsunami způsobila rozsáhlé škody v okolních oblastech, včetně Indonésie.	Lokální zničení vegetace, domů, infrastruktury, ztráta životů, destrukce obytných oblastí.
Globální dopad na klima	Způsobila klimatický efekt „rok bez léta“ v roce 1816 díky velkému množství aerosolů v atmosféře.	Erupce vytvořila obrovské množství popela, což mělo vliv na sluneční záření a barvu západů slunce po celém světě.	Emitovala obrovské množství síry do stratosféry, což vedlo ke globálnímu ochlazení v následujících letech.

Zdroj: vlastní zpracování

Tabulka obsahuje charakteristiku jednotlivých vybraných sopečných událostí. Mezi ně spadá sopka Tambora, Krakatoa a Pinatubo. Sopečné události Tambora a Krakatoa dělí od sebe 68 let. Erupce sopky Pinatubo se odehrála dokonce 108 let od předchozí sledované erupce Pinatubo. Tabulka obsahuje shrnutí základní charakteristiky každé sopky. Informace

jsou čerpány z předchozí teoretické části, ve které je detailně popsána celá událost a její dopady. V následující kapitole proběhne klimatická analýza, která rozebere teplotní odchylky a srážky ve vybraných obdobích.

Nejvíce úmrtí přináší se značnou převahou erupce sopky Tambora. Poté vzala mnoho životů erupce sopky Krakatoa. Nepříliš vysoké množství obětí je spojeno se sopkou Pinatubo. Ve všech případech jsou sopky aktivním stratovulkánem.

Z hodnoty VEI lze usoudit, že erupce sopky Tambora má nejvyšší sílu a intenzitu z vybraných vulkanických erupcí. Nejvyšší hodnota VEI činí 8, proto je intenzita 7 opravdu nesmírně znamenitá a odhaluje obrovské nebezpečí této sopky. Sopky Krakatoa jsou na stejné úrovni, avšak to neznamená, že jejich dopady a procesy jsou totožné.

4.2 Klimatická analýza

Při následující klimatické analýze se zaměříme na historická data, přičemž bude brána v úvahu jejich dostupnost. Získání informací o některých historických událostech může být náročné, protože v minulosti nebyla technologie dostatečně pokročilá na shromažďování detailních dat, v tomto případě o vulkanických katastrofách. Sopky jsou součástí planety Země od pradávna, a o některých erupcích nemáme dostatek informací, přičemž některé z nich probíhaly v období, kdy lidská společnost neexistovala. Proto se vybrané sopky odlišují v historickém kontextu a některé jsou nám méně známy. Je důležité brát v úvahu různorodý historický charakter těchto vulkanických událostí.

4.2.1 Porovnání teplotních změn

Teplota je jedním z klíčových klimatických ukazatelů. Nejen že ovlivňuje způsob života a zemědělství, ale také ovlivňuje šíření škůdců a chorob, které mohou mít dopad na lidské zdraví. Extrémní teplota může mít negativní dopady na dopravní infrastrukturu nebo také energetiku. Teplota oceánů má podobně významný vliv na souši i na mořský život. Měření teploty na zemi a v oceánech poskytuje důležité informace o klimatických změnách.

V následujícím šetření bude uvažováno období před erupcí vybrané sopky a následně budou uvedena i data po vypuknutí erupce dané sopky. Období pro erupci sopky Tambora je sledováno od roku 1805 až do roku 1825, období sopky Krakatoa je sledováno od roku 1873 až do roku 1893 a nakonec sledované období sopky Pinatubo je analyzováno od roku 1981 až do roku 2001.

4.2.1.1 Historická data o teplotních změnách

Vulkanická činnost sahá hluboko do historie planety země. Klimatologové odhadují teploty pro různá období, avšak první systematická měření globální průměrné teploty začala v druhé polovině 19. století. Jedním z prvních snah o sestavení globální teplotní databáze je databáze na Hadley Centre, která má svůj začátek v roce 1850. Tato data poskytují vhled do historických změn teplot na celosvětové úrovni.

Datová sada HadCET (Hadley Centre Central England Temperature dataset) je nejdelší databází zaznamenávající teploty na světě. Průměrná, minimální a maximální data jsou aktualizována každý měsíc. Průměrná denní datová řada začíná v roce 1772 a průměrná měsíční data v roce 1659. Průměrná maximální a minimální denní a měsíční data jsou také k dispozici až od roku 1878.

Tyto nejstarší denní a měsíční teploty jsou odpovídající pro přibližně trojúhelníkovou oblast Spojeného království ohraničenou Lancashirem, Londýnem a Bristolem. Měsíční řada, která začíná v roce 1659, je nejdelším dostupným záznamem teplot na světě. Denní řada průměrné teploty je dostupná od roku 1772.

Britský klimatolog Gordon Manley (1953–1974) sestavil většinu měsíční řady, pokrývající období od roku 1659 do roku 1973. Tato data byla posléze aktualizována do roku 1991 Parkerem a kol. (1992), kteří také vypočítali denní řadu. Oba soubory jsou nyní udržovány aktuální v oddělení Climate Data Monitoring Hadley Centre, Met Office. Od roku 1974 byla data upravena s ohledem na městské oteplování. Momentálně je na průměrné teploty aplikována korekce $-0,2\text{ °C}$.

Tabulka 2 - Průměrné roční teploty v období vybraných erupcí naměřené z centrální Anglie

Období Tambora		Období Krakatoa		Období Pinatubo	
Rok	Průměrná roční teplota [°C]	Rok	Průměrná roční teplota [°C]	Rok	Průměrná roční teplota [°C]
1805	8,85	1873	9	1981	9,7
1806	9,53	1874	9,75	1982	9,53
1807	9,08	1875	9,05	1983	9,95
1808	8,8	1876	9,35	1984	9,75
1809	8,78	1877	9,28	1985	8,78
1810	8,8	1878	9,68	1986	8,75
1811	9,7	1879	7,33	1987	9,1
1812	8,3	1880	8,74	1988	9,63
1813	8,63	1881	8,65	1989	10,73
1814	7,6	1882	9,45	1990	10,68
Průměrná roční teplota před erupcí [°C]	8,80	Průměrná roční teplota před erupcí [°C]	9,03	Průměrná roční teplota před erupcí [°C]	9,66
1815	9,2	1883	8,98	1991	9,5
1816	7,25	1884	9,85	1992	9,925
1817	8,98	1885	8,63	1993	9,325
1818	9,75	1886	8,85	1994	10,18
1819	9,43	1887	8,23	1995	10,88
1820	8,28	1888	8,05	1996	9,15
1821	9,38	1889	9,1	1997	10,28
1822	10,45	1890	9,05	1998	10,38
1823	8,1	1891	8,08	1999	10,65
1824	9,28	1892	8,35	2000	10,25
1825	9,8	1893	9,73	2001	10,13
Průměrná roční teplota po erupci [°C]	9,07	Průměrná roční teplota po erupci [°C]	8,79	Průměrná roční teplota po erupci [°C]	10,12
Průměrná teplota za celé období [°C]	8,95	Průměrná teplota za celé období [°C]	8,91	Průměrná teplota za celé období [°C]	9,87

Zdroj: vlastní zpracování HadCET, 2024

Zpracovaná tabulka poskytuje informace o průměrných ročních teplotách v období, ve kterých se odehrály erupce vybraných sopek. Bylo vybráno období deseti let před erupcí sopky a deset let pozorování po roce, kdy se erupce odehrála.

Erupce sopky Tambora se odehrála v roce 1815. V tomto roce byla v Anglii naměřena teplota 9,2 °C. Předchozí roky dosáhla průměrná teplota hodnoty 8,8 °C. Hodnota se v předcházejících letech pohybovala okolo 8-9 °C. Avšak v roce 1814, po kterém navazoval rok erupce sopky Tambora, se teploty snížila na 7,6 °C. V roce 1816 byl

zaznamenán klimatický jev „rok bez léta“ na základě, kterého se snížila teplota i v Anglii na pouhých 7,25°C. Tato hodnota činí nejnižší hodnotu v pozorovaném období. Rozdíl mezi teplotou v předchozím roce je 1,95 °C. V následujících letech se teploty pohybovaly opět okolo 9 °C a výše. Průměrná roční teplota po roce, ve kterém probíhala erupce sopky Tambora, dosáhla 9,068 °C. Nejvyšší roční průměrná teplota v celém sledovaném období dosáhla v roce 1822 hodnoty 10,45 °C.

Erupce sopky Krakatoa se odehrála 68 let od události erupce sopky Tambora. Pro sledování průměrných ročních teplot bylo vybráno opět deset let před a po roce vybuchnutí dané sopky. Tentokrát mají teploty oproti předchozí události obrácený charakter. Teploty před rokem vypuknutí erupce odpovídají průměrné roční teplotě 9,026 °C. Z průměrné roční teploty po erupci sopky Krakatoa je možné vysledovat mírné ochlazení o 0,47 °C. V roce 1884 je však průměrná roční teplota nejvyšší za celé sledované období 1873-1893. Ochlazení přichází až v následující letech, kdy se teplota pohybuje mezi 8-9 °C.

Narozdíl od předchozích erupcí bylo období před erupcí chladnější. Průměrná roční teplota před rokem samotné erupce činila 9,66 °C. Naopak průměrná roční teplota v následujících letech vzrostla o 0,46 °C. Nejvyšší teplota v tomto období dosáhla hodnoty 10,88 °C konkrétně v roce 1995.

4.2.1.2 Porovnání teplotních rozdílů v České republice

V českých dokumentárních záznamech není přímo zmíněna erupce sopky Tambora, ani neexistují konkrétní zmínky o povětrnostních jevech v souvislosti s touto erupcí v roce 1815. Avšak záznamy z té doby zaznamenávají mimořádně vlhké léto v roce 1815 a výrazně chladné léto v roce 1816, známé jako "rok bez léta". Tato meteorologická situace vedla k nepříznivým úrodám obilí a výraznému zvýšení cen obilí v roce 1817.

V dobovém tisku se spekulovalo o možných příčinách chladných let v prvním desetiletí 19. století, včetně zmínek o kometách, aktivitě slunečních skvrn a dlouhodobém ochlazení. Až v roce 1817 byla přidána také zmínka o zemětřesení spojeném se sopečnými erupcemi jako jedné z možných příčin. Průměrování teplotních dat pro střední Evropu ukazuje, že léto 1816 po erupci sopky Tambora bylo nejchladnější v období 1775–2007.

Tabulka 3 - Průměrné roční teploty pro území České republiky

Období Tambora		Období Krakatoa		Období Pinatubo	
Rok	Průměrná roční teplota [°C]	Rok	Průměrná roční teplota [°C]	Rok	Průměrná roční teplota [°C]
1805	8,14	1873	9,86	1981	10,16
1806	12,15	1874	9,27	1982	10,62
1807	10,9	1875	8,52	1983	11,01
1808	9,22	1876	9,14	1984	9,8
1809	9,98	1877	9,39	1985	9,4
1810	9,75	1878	9,7	1986	10,11
1811	11,23	1879	7,94	1987	9,34
1812	8,64	1880	9,43	1988	10,91
1813	9,55	1881	8,27	1989	11,26
1814	8,52	1882	9,62	1990	11,4
Průměrná roční teplota před erupcí [°C]	9,81	Průměrná roční teplota před erupcí [°C]	8,11	Průměrná roční teplota před erupcí [°C]	10,4
1815	9,55	1883	8,99	1991	10,08
1816	9,01	1884	9,56	1992	11,43
1817	9,93	1885	9,43	1993	10,51
1818	10,17	1886	9,53	1994	11,72
1819	10,41	1887	8,41	1995	10,71
1820	9,17	1888	8,41	1996	8,99
1821	9,97	1889	8,84	1997	10,45
1822	11,04	1890	8,91	1998	11,17
1823	9,72	1891	8,68	1999	11,39
1824	10,54	1892	8,92	2000	11,96
1825	10,45	1893	8,97	2001	10,68
Průměrná roční teplota po erupci [°C]	10,04	Průměrná roční teplota po erupci [°C]	8,79	Průměrná roční teplota po erupci [°C]	10,9
Průměrná teplota za celé období [°C]	9,91	Průměrná teplota za celé období [°C]	9,04	Průměrná teplota za celé období [°C]	10,62

Zdroj: vlastní zpracování Klementinum, 2024

V první polovině sledovaného období pro sopku Tambora je možné sledovat na území České republiky viditelné teplotní výkyvy. Nejvyšší teplota ve sledovaném období náleží roku 1806, kdy dosáhla teplota 12,15 °C, což představuje i nejvyšší teplotu so ohledem na zbývající dvě období následujících sopek. Období před vybuchnutím sopky v Indonésii představuje chladnější období než období po erupci. Průměrná teplota za celé období dosahuje 9,91 °C.

Naopak nejnižší teplota je zaznamenána v období Krakatoa, ve kterém roku 1879 dosáhla teplota hodnoty 7,94 °C. Období před erupcí představuje i zde chladnější éru. Průměrná teplota za celé období zde činí 9,04 °C. Celé sledované období Krakatoa je chladnější než předchozí období sopky Tambora.

Období Pinatubo je oproti předchozím obdobím nejteplejší. Ani zde není první polovina období chladnější. Průměrná teplota za celé období činí 10,62 °C. Nejchladnějším rokem v tomto období je rok 1996, což doba tří let od erupce sopky Pinatubo. Teplota klesla na 8,99 °C. Tento rok byl výjimečně chladný i v předchozím pozorování z centrální Anglie.

Jediný případ, kdy teplota klesla prvním rokem po roce erupce bylo období Tambora. Rok před erupcí dosáhla teplota 8,52 °C. V roce, kdy se erupce odehrála byla teplota vyšší o 1,03 °C. Hodnota tudíž činila 9,55 °C. V roce 1816 klesla hodnota na 9,01 °C. V případě období Krakatoa a Pinatubo byly hodnoty před a po erupci vyšší než v rok samotné erupce.

4.2.1.3 Pozorování globálních teplot

Globální teplota je celosvětovým souhrnem lokálních teplotních změn naměřených na meteorologických stanicích, poskytujícím dlouhodobý vhled na klimatické změny. Při zkoumání globálních teplot je omezený přístup k datům o erupci sopky Tambora kvůli její daleké historii, ale také části období sopky Krakatoa. Získání absolutních hodnot globálních teplot do roku 1880, které by nám poskytly podrobnější přehled o stavu teplot na Zemi, je pouze možno odhadnout podle jiných historických záznamů, avšak přesná globální měření neprobíhala. Pro spolehlivější analýzy globální teploty se často využívají teplotní anomálie, které umožňují sledovat odchylky od průměrných hodnot a poskytují lepší vhled do klimatických změn. Data teplotních anomálií jsou sahají až do roku 1850.

Sestavit absolutní odhady globální průměrné povrchové teploty představuje mnoho nesrovnalostí z několika důvodů. Mnohá území jsou nedostatečně pokryta meteorologickými stanicemi, což vyžaduje omezení v rozsáhlých oblastech, ve kterých jsou data značně omezená. Může se jednat například o horské oblasti či pouště. Letní měsíc

v určité oblasti může být chladnější než průměr, a to jak na vrcholu hory, tak v údolí, ale absolutní teploty budou na obou místech zcela odlišné. Použitím anomálií se v tomto případě ukáže, že teploty pro obě lokality byly podprůměrné.

Výpočet referenčních hodnot na menších lokálních měřících během stejného časového období stanovuje základní linii, z níž lze vypočítat anomálie. Tato metoda efektivně normalizuje data a lépe reprezentuje teplotní vzorce s ohledem na místní normy v regionu. Z tohoto důvodu se ve velkoplošných analýzách využívají anomálie namísto absolutních teplot, neboť přesněji popisují variabilitu klimatu ve větších oblastech. Poskytují také referenční rámec pro smysluplnější srovnání mezi různými místy a umožňují přesnější výpočty teplotních trendů (NOAA, 2024).

NOAA (2024) uvádí, že v roce 2023 dosáhla globální průměrná teplota hodnoty 15,08 °C s odchylkou 1,18 °C od průměru 20. století. Tento rok se stal nejteplejším v zaznamenané historii od roku 1850, kdy byla začala systematická měření teplot na celosvětové úrovni. Od začátku 20. století se průměrné teploty zvýšily, což se odráží také v dlouhodobém nárůstu globální teploty. Trendy v oteplování však nejsou konzistentní. Země se obecně oteplují rychleji než oceány. Existují období stabilních nebo mírných teplotních fluktuací. Od konce 20. století do současnosti se však globální teploty zvyšují vyšší rychlostí, s přerušováními způsobenými sopečnými erupcemi nebo změnami v tichomořské dekádní oscilaci.

V některých oblastech, například ve střední Evropě, lze pozorovat další ochlazování v důsledku změn v typech počasí. Klimatické modely potvrzují toto dodatečné ochlazování, přičemž se obvykle pohybuje kolem 0,5–1 °C. Část tohoto poklesu teploty je připisována erupci sopky Tambora. Silné sopečné erupce nevedou vždy k extrémnímu ochlazování, jak bylo patrné v „roku bez léta“ v roce 1816. Ovšem platí, že všechny případy chladnějších roků nemusí být způsobeny sopečnou aktivitou.

Tabulka 4 - Globální průměrné teploty pro období sopek Krakatoa a Pinatubo

Období Krakatoa			Období Pinatubo		
Rok	Teplotní anomálie [°C]	Globální průměrná roční teplota [°C]	Rok	Teplotní anomálie [°C]	Globální průměrná roční teplota [°C]
1873	0,06	/	1981	0,6	12,39
1874	0,04	/	1982	0,44	10,56
1875	0,05	11,38	1983	0,59	11,94
1876	0,03	10,83	1984	0,44	10,56
1877	0,29	11,11	1985	0,41	11,06
1878	0,3	11,38	1986	0,46	11,5
1879	0,13	11,5	1987	0,58	11,89
1880	0,07	9,2	1988	0,66	11,83
1881	0,12	11,28	1989	0,54	11,22
1882	0,12	9,78	1990	0,69	11,89
Průměrná teplotní anomálie před erupcí [°C]		0,121	Průměrná teplotní anomálie před erupcí [°C]		0,541
Globální průměrná roční teplota před erupcí [°C]		10,81	Globální průměrná roční teplota před erupcí [°C]		11,48
1883	0,02	10,44	1991	0,66	11
1884	-0,07	10,56	1992	0,48	12
1885	-0,08	11,56	1993	0,51	10,17
1886	-0,01	11,11	1994	0,57	12,61
1887	-0,07	11,44	1995	0,73	12,17
1888	0,07	11,67	1996	0,6	12,39
1889	0,17	11,61	1997	0,75	11,89
1890	-0,03	10,78	1998	0,88	11,61
1891	0,06	10,44	1999	0,67	11,83
1892	-0,01	10,67	2000	0,68	12,06
1893	-0,07	10,17	2001	0,8	12,11
Průměrná teplotní anomálie po erupci [°C]		-0,004	Průměrná teplotní anomálie před erupcí [°C]		0,667
Globální průměrná roční teplota po erupci [°C]		10,95	Globální průměrná roční teplota po erupci [°C]		11,88
Globální průměrná teplota za celé období [°C]		10,89	Globální průměrná teplota za celé období [°C]		11,65

Zdroj: vlastní zpracování NOAA, 2024

Tabulka nám poskytuje přehled globálních průměrných teplot a teplotních anomálií. Tentokrát není zahrnuto období určené pro erupci sopky Tambora, jejíž přesná data nejsou dostupná. Absolutní hodnoty nejsou úplné ani pro celé zvolené období 1873-1893.

Globální roční průměrné teploty jsou porovnávány v různých datových sadách, které poskytují HadCET, NOAA, NASA a Berkeley Earth. V tabulce jsou data poskytnuta databází NOAA. Existuje konzistentní shoda v celkovém trendu globálních teplot a jejich meziroční variability. Anomálie v těchto datech jsou vypočítány vzhledem k referenčnímu

období 1981 až 2010, a jsou vykompenzovány o 0,69 °C. Tato korekce představuje nejlepší odhad rozdílu pro dané období od průměru 1850-1900.

NOAA poskytuje absolutní hodnoty od roku 1875. Tudíž v období 1873-1893 chybí data k prvním dvěma pozorovaným rokům. Tedy průměrnou globální teplotu před výbuchem lze analyzovat pouze z osmi let. To představuje hodnotu 10,81 °C. Globální průměrná teplotní hodnota, se pak příliš neodlišuje. Zajímavé jsou však teplotní anomálie, které jsou úplné pro období před erupcí a také po erupci sopky Krakatoa. Z teplotních anomálií je patrné ochlazení po vybuchnutí sopky v pozorovaném období deseti let od roku samotné erupce sopky Krakatoa v roce 1883.

Teplotní anomálie vyjadřují odchylku aktuální teploty od dlouhodobého průměru v daném místě a čase. Záporná teplotní anomálie znamená, že aktuální teplota v daném období byla nižší než dlouhodobý průměr. Období po roce vypuknutí erupce sopky Krakatoa může naznačovat chladnější podmínky, než je obvyklé.

Naopak kladná teplotní anomálie představuje aktuální teplotu v daném období nebo místě byla vyšší než dlouhodobý průměr. Tato situace naznačuje teplejší podmínky, než je obvyklé, což je možné sledovat v desetiletém období před rokem vybuchnutí sopky Krakatoa.

Teplotní anomálie jsou klíčovým prvkem při sledování a analýze klimatických změn. Když dochází k dlouhodobým trendům teplotních anomálií, může to být indikátorem klimatických změn na globální nebo lokální úrovni. Kladné teplotní anomálie v průběhu několika let mohou signalizovat oteplování klimatu v dané oblasti, což je případem sledovaného období 1981-2001 pro erupci sopky Pinatubo.

4.2.2 Dopad vybraných vulkanických erupcí na srážky

Sopečné erupce jakožto výbušné projevy přírody, mají dramatický dopad na své okolí, ale mohou také ovlivnit širší klimatické jevy. Předchozí kapitola se zabývala změnou teplot v určitých částech planety Země vybraných období. Byly však změněné i globální teplotní dopady. Jedním z aspektů, na který se soustředí následující podkapitola, jsou změny ve srážkových vzorech způsobené vybranými sopečnými událostmi Tambora, Krakatoa a Pinatubo. Je nutné se podívat na to, jak měly vybrané erupce vliv na srážky a také, jaký dopad to mělo na počasí na území České republiky.

4.2.2.1 Globální srážky

Globální srážková anomálie jsou klíčovým indikátorem sledujícím odchylky ve srážkovém vzoru na celé planetě. Vyměřuje se v porovnání s průměrnými srážkami z rozsahu let 1901 až 2000. To lze vnímat jako referenční období pro dlouhodobé trendy. Tato historická perspektiva nám umožňuje zhodnotit, jak se srážky mění v porovnání s průměrem z předchozího století.

Kladné hodnoty srážkových anomálií naznačují, že množství srážek v daném roce překračuje průměrné hodnoty referenčního období. To může signalizovat zvýšenou vlhkost nebo častější srážky. Naopak, záporné hodnoty srážkových anomálií ukazují na snížené množství srážek ve srovnání s dlouhodobým průměrem. Tato situace může indikovat sušší podmínky, nedostatek srážek nebo patrnější klimatické změny.

Měření srážkových anomálií jsou klíčová pro sledování změn v hydrologickém cyklu a porozumění dopadů klimatických jevů. Analyzování těchto hodnot umožňuje identifikovat regiony se změnami srážkových vzorů a přispívat k lepšímu chápání globálních klimatických trendů.

Sledování globálních srážek pomocí srážkových anomálií je možné od konce 19. století, kdy byly zaznamenány první systematické meteorologické údaje. Začátek 20. století přinesl vývoj meteorologických sítí a pozemních stanic, které poskytovaly pravidelná měření srážek. S postupem času a rozvojem technologie se monitoring srážek rozšířil o moderní meteorologické technologie, včetně satelitních měření a globálních modelů srážkových vzorů. Díky těmto pokrokům je dnes možné sledovat a analyzovat globální srážkové anomálie s vysokou přesností a v reálném čase. Moderní technologie a rozsáhlá databáze umožňují sledovat změny v srážkových vzorech a porozumět vlivům klimatických změn na hydrologický cyklus.

Z toho důvodu sledujeme na globální úrovni pouze období erupce sopky Pinatubo, která vybuchla roku 1991. Bohužel historická data neposkytují přesnou databázi o globálních srážkách, která by zahrnovala srážková data k období sopek Tambora (1805-1825) a Krakatoa (1873-1893).

Tabulka 5 - Průměrné roční srážkové anomálie v období Pinatubo (1981-2001)

Období Pinatubo			
Rok	Globální srážková anomálie [mm]	Rok	Globální srážková anomálie [mm]
1981	-1,09	1992	-30,43
1982	-34,47	1993	-25,49
1983	29,79	1994	-45,08
1984	33,66	1995	-16,34
1985	20,87	1996	1,37
1986	-28,56	1997	-26,32
1987	-11,97	1998	36,33
1988	36,88	1999	-6,68
1989	13,34	2000	3,62
1990	55,27	2001	16,98
Rok erupce 1991		-32,7	
Průměrná globální srážková anomálie před erupcí [mm]	11,372	Průměrná globální srážková anomálie po erupci [mm]	-9,204
Průměrná globální srážková anomálie pro celé období [mm]		-0,52	

Zdroj: vlastní zpracování NOAA, 2024

Tabulka zobrazuje průměrné roční srážkové anomálie na globální úrovni pro období Pinatubo, které začíná v roce 1981 a ukončuje se v roce 2001. Před erupcí sopky Pinatubo, je zřetelné, že převažují hodnoty kladné. Tudíž je naznačeno, že množství srážek v daném období překračuje průměrné hodnoty referenčního období 1901-2000. Nejvyšší kladnou anomálii lze vyzorovat v roce 1990, po kterém navazuje rok erupce sopky Pinatubo.

Rokem 1991, tedy rokem erupce sopky Pinatubo, přichází záporná hodnota -32,7 °C. Následují další čtyři roky jejichž anomálie se nachází v záporných číslech. V roce 1994 se anomálie dostane na nejzápornější hodnotu z celého období a tou je -45,08 °C. Tyto záporné hodnoty srážkových anomálií vyjadřují snížené množství srážek ve srovnání s referenčním

dlouhodobým obdobím. Záporná čísla mohou v tomto případě indikovat sušší podmínky, nedostatek srážek nebo výraznější klimatické změny.

Během samotné erupce sopky Pinatubo může docházelo k uvolňování velkého množství sopečného popela, prachu a plynů, včetně oxidu siřičitého. Tato částicová hmota mohla odrážet sluneční záření a způsobit tím krátkodobý ochlazující efekt známý jako „sopečný stín“. To může vést k dočasnému ochlazení klimatu a méně intenzivnímu slunečnímu záření na Zemi.

Naopak oxid siřičitý může reagovat v atmosféře s vodními kapkami a vytvářet sírovou kyselinu, která se stává součástí atmosférických aerosolů. Tyto aerosoly mohou působit jako jaderná kondenzační jádra pro vodní kapky ve vzduchu, což by zvýšilo vznik oblaků a potenciálně by vedlo k dešti nebo sněhu. V případě sopky Pinatubo by spíš odpovídal situaci první příklad.

Celkově je možné, že vliv vulkanických erupcí na globální srážky a počasí závisí na konkrétních podmínkách dané erupce a geografické oblasti. Ovlivňuje to, jakým způsobem jsou chemické látky z erupce distribuovány ve vyšších vrstvách atmosféry a jak dlouho zůstanou aktivní.

4.2.2.2 Záznam srážek na území České republiky

Studium vlivu vulkanických erupcí na klima a srážkové vzory představuje stále klíčové odvětví klimatického výzkumu. Vybrané vulkanické erupce významně ovlivňovaly atmosférické podmínky. To zahrnuje i změny ve srážkových vzorech v různých částech světa. V kontextu České republiky, země s pestrou geografíí a klimatem, je sledování srážek během období vulkanických erupcí klíčové pro pochopení interakce mezi sopečnými jevy a místním počasím.

Tato období sledují a analyzují srážková data na území České republiky v dobách vybraných vulkanických erupcí s důrazem na změny množství srážek. Pozorování zhodnocení těchto údajů mohou přispět k lepšímu porozumění dynamiky atmosféry během sopečných aktivit a potenciálně odhalit regionální variabilitu vlivu těchto erupcí na srážkové podmínky v České republice.

Tabulka 6 - Průměrné roční srážky na území České republiky ve vybraných období

Období Tambora		Období Krakatoa		Období Pinatubo	
Rok	Roční srážky [mm]	Rok	Roční srážky [mm]	Rok	Roční srážky [mm]
1805	431,7	1873	400,1	1981	604,7
1806	468,9	1874	348	1982	334,5
1807	534,1	1875	534,6	1983	437,8
1808	439,6	1876	415,5	1984	430,4
1809	402,9	1877	445,5	1985	460,8
1810	461,9	1878	382,8	1986	457,7
1811	486,9	1879	485,9	1987	591,2
1812	606,4	1880	583,5	1988	518,6
1813	456,9	1881	499,6	1989	383,8
1814	498,4	1882	584,7	1990	342,5
Průměrné roční srážky před erupcí [mm]	478,8	Průměrné roční srážky před erupcí [mm]	468	Průměrné roční srážky před erupcí [mm]	456,2
1815	569,1	1883	478,7	1991	376,1
1816	496,6	1884	460,4	1992	438,1
1817	547,9	1885	360,6	1993	521,4
1818	438,4	1886	524,1	1994	464,7
1819	521,8	1887	492,5	1995	499,2
1820	399,5	1888	548,4	1996	530,1
1821	498,4	1889	531,2	1997	462,1
1822	403,2	1890	637,3	1998	433,4
1823	443,8	1891	508,7	1999	361,8
1824	514,9	1892	392	2000	385,9
1825	353,3	1893	366,6	2001	552
Průměrné roční srážky po erupci [mm]	461,8	Průměrné roční srážky po erupci [mm]	482,2	Průměrné roční srážky po erupci [mm]	464,9
Průměrné roční srážky za celé období [mm]	475	Průměrné roční srážky za celé období [mm]	475,3	Průměrné roční srážky za celé období [mm]	456,5

Zdroj: vlastní zpracování Klementinum, 2024

Pražské Klementinum poskytuje nejstarší záznamy o počasí v Evropě. V období Tambora bylo tedy možné získat data pro celé období. Hodnoty byly získány sečtením měsíčních srážek v daném roce. Průměrné roční srážky za celé období se mezi jednotlivými obdobími mezi sebou příliš neodlišují. V období Pinatubo sledujeme nejméně průměrných ročních srážek. Nejvíce průměrných ročních srážek se vyskytuje v období Krakatoa.

Extrémní srážky je možné za registrovat v roce 1890, která nastala šest let po roce erupce sopky Krakatoa a její hodnota dosáhla 637,3 mm. Naopak nejnižší roční srážky jsou vypočítatelné v roce 1982 před vybuchnutím sopky Pinatubo v roce 1991.

O počasí je možné hledat zmínky i v pamětních záznamech obyvatel. Jeden z nejlépe uchopených meteorologických záznamů o počasí v české krajině ve sledovaném období Tambora poskytl kněz Šimon Hausner z Buchlovic. V letech 1803–1831 vedl pečlivý deník o pozorováních počasí na denní bázi. Jeho záznamy poskytují důležité informace o meteorologických podmínkách, úrodě plodin a dalších událostech, které jsou analyzovány v Moravském zemském archivu v Brně. V rámci souhrnného ročního hodnocení popisoval charakter povětrnostních podmínek, stav úrody, a vinné révy, často je dokonce porovnával s předchozími léty (Brázdil a kol., 2019, s. 26).

Kněz Hausner zaznamenal chladnější počasí v květnu roku 1815 s častějšími dešti a mrazy koncem měsíce. Červen poté popsal jako větrný a deštivý měsíc, přičemž červencové počasí bylo proměnlivé s častým deštěm, silným větrem a chladnými rány a večery. Celý měsíc byl poněkud chladnější, než bylo obvyklé. Srpen byl až na pár dní deštivý s častými přívaly vody. Průběh sena a sklizně obilí byl negativně poznamenán deštivým počasím. V případě dvou sušších dnů následovalo několik dní s deštěm. Ročník vína 1815 byl špatný.

Dále zaznamenával i vliv počasí na místní obyvatele, například když silný vítr zavál sních, který následně znemožnil lidem dostavit se na mši 8. prosince roku 1815. Jeho záznamy obsahují také informace o vinobraní, které bylo přerušeno v roce 1816 kvůli třídenním deštům. Tento rok představoval „rok bez léta“ po erupci sopky Tambora v předchozím roce.

Popisoval také povětrnostní extrémy, například úder blesku do kostelní věže v roce 1806, který zapálil střechu. Při bouři téhož roku však kostel uchránil silný déšť. V roce 1820 zaznamenal mrazivý leden, kdy někteří lidé zmrzli na cestách. Větrný vír v roce 1823 při bouři a lijáku v Buchlovicích, způsobil velké škody na střeších, staveních a stodolách. Nejničivější událostí byla pro Buchlovice povodeň ze dne 12. června 1825. Tyto záznamy poskytují cenné informace o vlivu povětrnostních jevů na denní život v Buchlovicích (Brázdil a kol., 2019, s. 27).

4.2.3 Sledování vybraných erupcí podle jader ledovců

Historické sledování se může zdát poněkud komplikované, jelikož data k časově vzdálenějším událostem může působit komplikace v dohledání uspokojivých hodnot pro

další výzkum. Avšak je podstatné tyto informace zpětně dohledávat a snažit se vytvářet celkový obraz o minulých událostech, aby bylo snáze pochopitelné fungování planety Země i pro následující vývoj.

Narůstá schopnost shromažďovat data o přírodních katastrofách, konkrétně pokud se jedná o sledování vulkanických erupcí, díky technologickým pokrokům a výzkumným metodám. Jedním z klíčových nástrojů pro získávání podrobných informací o historii sopečné aktivity jsou ledovcová jádra. Tyto jádra, získaná z hlubokých vrstev ledovců v Antarktidě, Grónsku a dalších regionech, fungují jako archivy, které uchovávají stopy starověkých vulkanických událostí.

Vědci využívají ledová jádra k identifikaci a datování sopečných erupcí, přičemž sledují vrstvy obsahující sulfáty, CO₂ nebo další chemické charakteristiky. Díky tomuto zkoumání představují ledová jádra kroniky vulkanických událostí. Technologické inovace umožňují vědcům přesné datování a interpretaci záznamů. Získaná data nám poskytují nejen pohled do minulosti vulkanických činností, ale také napomáhají lépe porozumět možným dopadům budoucích erupcí na klima, lidstvo a životní prostředí.

4.2.3.1 Zkoumání jednotlivých erupcí podle aerosolů

Sopečné erupce jsou důležitou přirozenou příčinou změny klimatu. Velké sopečné erupce vstříkují do stratosféry sirné plyny, které se přeměňují na sulfátové aerosoly. Radiační a chemické účinky tohoto aerosolového oblaku mají za následek ochlazování povrchu a spodní troposféry rozptylem slunečního záření (Robock, 2000).

Vulkanické erupce představují významné ukazatele času při datování ledových jader. Tyto události nejenže zaznamenávají minulé klimatické vlivy, ale také poskytují informace pro určení stáří záznamů z ledových jader. Při silných explozivních erupcích se do stratosféry dostává velké množství síry, a v závislosti na zdroji erupce se sulfátové aerosoly ukládají lokálně nebo dokonce globálně. Tyto sulfátové vrstvy, detekované v ledových jádrech, jsou pak využívány jako časové značky. Absolutní stáří těchto časových značek je známo, pokud je známo kalendářní stáří příslušné erupce. Příklady takových erupcí zahrnují také vybrané erupce Krakatoa (Indonésie, 1883), Tambora (Indonésie, 1815), které se nacházejí v tropech a jsou často využívány jako spolehlivé časové značky pro vytváření chronologií ledových jader (Gao a kol., 2008).

V rámci projektu WAIS byly bipolární signály převážně způsobeny silnými sopečnými erupcemi v blízkosti tropů, které vstříkovaly velké množství oxidu sirného do

stratosféry, čímž vyvolaly následný globální rozmnožení sulfátových aerosolů. Dráhu sulfátových aerosolů ve stratosféře lze odvodit z izotopů síry. V tomto kontextu byla identifikována stratosférická dráha a tropický zdroj erupcí s vysokou přesností datování základních časových měřítek ledových jader Grónska a Antarktidy (Robock, 2000).

Celkově bylo v novém kombinovaném záznamu zaznamenáno 50 bipolárních událostí převážně z výrazných tropických sopečných erupcí, což je více ve srovnání s existujícími záznamy o vulkánech (Gao et al., 2008). Tento rozdíl lze vysvětlit kombinací vysoké přesnosti datování a poměru signálu k šumu v podkladových záznamech síry.

V kontextu výzkumu ledovcových jader, bipolární signály odkazují na záznamy vulkanických erupcí, které generují aerosoly a chemické látky v atmosféře. Označení „bipolární signál“ se používá z toho důvodu, že tyto události mají stopy v záznamech ledových jader na obou polokoulích Země.

Když dochází k silné vulkanické erupci, dostává se do atmosféry velké množství různých částic, včetně sulfátových aerosolů. Tyto aerosoly se mohou rozptýlit a následně ukládat v ledovcových jádrech na různých místech na planetě Země. Bipolární signály jsou pozorovány v záznamech z ledových jader z obou polokoulí, což ukazuje na globální dopady těchto sopečných erupcí.

Tabulka 7 - Porovnání měření bipolárních signálů v ledovcích

Metoda WDC06A - Antarktida				
Vulkán	Start	Konec	Celková doba trvání	Depozice sulfátů [kg/m ²]
Pinatubo	1991,5	1993,5	2	25,4 ± 2,8
Krakatoa	1884	1886,4	2,4	11,2 ± 2,6
Tambora	1815,4	1818,4	3	88,6 ± 2,2
Metoda NEEM S1 - Grónsko				
Vulkán	Start	Konec	Celková doba trvání	Depozice sulfátů [kg/m ²]
Pinatubo	1991,7	1992,2	0,5	37,2 ± 9,2
Krakatoa	1883,6	1886,3	2,7	18,5 ± 3,6
Tambora	1815,6	1817,6	2	39,0 ± 2,4

Zdroj: vlastní zpracování, Sigl a kol., 2012

V tabulce se vyskytují záznamy o bipolárních signálech pomocí metod WDC06A, která rámci projektu WAIS provádí hluboké vrtnutí ledového jádra na Antarktidě, a metody

NEEM S1, která rámci projektu vrtání NEEM bylo v roce 2011 provedeno vrtnutí 411 m hlubokého ledového jádra na souřadnicích na severozápadě Grónska.

Tyto hodnoty označují časové období, během kterého proběhla erupce daného vulkánu. „*Start*“ udává začátek erupce, zatímco „*Konec*“ označuje naopak její zakončení. Časový rámec erupce je klíčový pro určení, jak dlouho byly vulkanické emise aktivní.

Depozice sulfátů vyjadřuje množství sulfátů roznášejících se v atmosféře v důsledku erupce vulkánu. Jedná se o měření množství sulfátů uložených v okolí v důsledku sopečné erupce. Jednotky jsou obvykle v kg/m² nebo ekvivalentní jednotky.

Podle měření metodou WDC06A měla erupce vulkánu Pinatubo déle trvající období emisí, které trvalo více než 2 roky. To představuje vyšší hodnoty než u erupcí Krakatoa a Tambora. Depozice sulfátů byla nejvyšší u erupce Tambora, což naznačuje významný vliv na atmosféru a klima. Erupce Tambora v roce 1815 je známá jako jedna z největších erupcí v historii. Erupce Krakatoa měla nižší depozici sulfátů než erupce Pinatubo a Tambora, avšak i přesto stále představuje významný vliv na atmosféru.

Podle měření metodou NEEM S1 měla sopka Pinatubo relativně krátkou erupci trvající přibližně půl roku. Erupce Krakatoa byla delší a trvala přibližně tři roky. Erupce Tambora byla také relativně kratší a její trvání dosahovalo přibližně dvou let. Vulkan Pinatubo měl vysokou depozici sulfátů, což znamená významný vliv na atmosféru a klima v důsledku erupce. Erupce Krakatoa vedla k nižší depozici sulfátů než Pinatubo, ale stále měla významný vliv. Vulkanická erupce sopky Tambora měla opět vysokou depozici sulfátů, která představují silný vliv této erupce na atmosféru.

Je důležité zmínit, že depozice sulfátů u erupce sopky Tambora v měření na Antarktidě svojí hodnotou přesahuje depozici sulfátů sopky Pinatubo více jak třikrát a erupci sopky Krakatoa dokonce téměř osmkrát. Jelikož se ve všech případech jedná o enormní erupce, je tato hodnota opravdu strhující.

Analýza bipolárních signálů umožňuje vědcům studovat historii sopečné aktivity a sledovat šíření vulkanických aerosolů ve světové atmosféře. Tímto způsobem mohou získat informace o minulých klimatických podmínkách a zkoumat vlivy sopečné aktivity na globální klima. Synchronizace depozice na obou hemisférách nasvědčuje pouze o stratosférické události a tropickém zdroji sopek, ale není to jednoznačným důkazem. Náhodnost dvou nezávislých událostí na obou polokoulích může být vysvětlena možností bipolárního signálu, ačkoliv tato situace může být vzácná.

Některé události detekované pouze na jedné polokouli však mohou také pocházet z tropické erupce, a absence signálu na druhé polokouli může být dána individuálním geografickým vzorem depozice. Další studie izotopů síry a mohou být použity k dalšímu zkoumání, a velké množství vulkanických záznamů z obou polokoulí v ledových jádrech nebo alternativních záznamech sopek (např. historické záznamy) může pomoci v rekonstrukci velkých tropických erupcí v minulosti.

4.2.3.2 Zkoumání období jednotlivých erupcí podle CO₂

Z teoretické části bylo zjištěno, že sopečná činnost může uvolnit velké množství vodní páry, CO₂ a dalších skleníkových plynů. Oxid uhličitý (CO₂) lze zařadit přímo mezi skleníkové plyny. Zároveň je klíčovým faktorem, který bývá spojován se změnou klimatu. Přestože výpary ze sopek mohou razantně ovlivnit místní klima, dlouhodobý dopad na globální klima je obvykle o něco méně patrný.

Zatímco oxid siřičitý uvolňovaný při současných sopečných erupcích občas způsobil detekovatelné globální ochlazení spodní atmosféry, oxid uhličitý uvolněný při současných sopečných erupcích nikdy nezpůsobil zjizvitelné globální oteplování atmosféry (USGS, 2024).

V následující analýze jsou uvedena data z programu Scripps CO₂. Scripps CO₂ program je prováděn na Scripps Institution of Oceanography, který je součástí Univerzity v Kalifornii v San Diegu. Scripps Institution of Oceanography je renomovaný výzkumný ústav zaměřený na oceánografii, atmosférické vědy a další oblasti související s životním prostředím. Program tedy nespadá pod konkrétní mezinárodní nebo vládní organizaci, ale je prováděn pod výzkumnou institucí v rámci akademické sféry. Umožňuje shromažďovat a analyzovat data o koncentracích oxidu uhličitého a izotopových stopách z různých měřicích stanic, převážně v oblasti Tichého oceánu. Klíčovou měřicí stanicí je Mauna Loa na Havaji, kde se provádí měření od roku 1958. Data z této stanice jsou doplněna informacemi z ledovcových vrtů na jižním pólu, což umožňuje vytvoření souvislé časové řady, sahající až do roku 13 našeho letopočtu. Tímto způsobem je program schopen sledovat dlouhodobé změny v koncentracích CO₂ a poskytovat cenné poznatky o atmosférických podmínkách (Scripps CO₂, 2024).

Tabulka 8 - Průměrné roční koncentrace CO₂ sledované ve vybraných období

Období Tambora		Období Krakatoa		Období Pinatubo	
Rok	Roční koncentrace CO ₂ [ppm]	Rok	Roční koncentrace CO ₂ [ppm]	Rok	Roční koncentrace CO ₂ [ppm]
1805	282,59	1873	288,67	1981	338,19
1806	282,52	1874	288,93	1982	339,65
1807	282,45	1875	289,09	1983	341,13
1808	282,39	1876	289,15	1984	342,61
1809	282,36	1877	289,14	1985	344,11
1810	282,37	1878	289,11	1986	345,60
1811	282,43	1879	289,1	1987	347,09
1812	282,51	1880	289,14	1988	348,58
1813	282,55	1881	289,29	1989	350,07
1814	282,49	1882	289,5	1990	351,54
Průměrná roční koncentrace CO ₂ před erupcí [ppm]	282,47	Průměrná roční koncentrace CO ₂ před erupcí [ppm]	289,11	Průměrná roční koncentrace CO ₂ před erupcí [ppm]	344,86
1815	282,32	1883	289,76	1991	353,01
1816	282,09	1884	290,01	1992	354,48
1817	281,87	1885	290,28	1993	355,96
1818	281,7	1886	290,64	1994	357,48
1819	281,6	1887	291,13	1995	359,02
1820	281,57	1888	291,64	1996	360,62
1821	281,62	1889	292,11	1997	362,25
1822	281,75	1890	292,53	1998	363,94
1823	281,97	1891	292,93	1999	365,66
1824	282,28	1892	293,25	2000	367,43
1825	282,69	1893	293,45	2001	369,24
Průměrná roční koncentrace CO ₂ po erupci [ppm]	281,91	Průměrná roční koncentrace CO ₂ po erupci [ppm]	291,80	Průměrná roční koncentrace CO ₂ po erupci [ppm]	361,61
Průměrná roční koncentrace CO ₂ za celé období [ppm]	282,23	Průměrná roční koncentrace CO ₂ za celé období [ppm]	290,22	Průměrná roční koncentrace CO ₂ za celé období [ppm]	353,16

Zdroj: Vlastní zpracování Scripps CO₂, 2024

Z tabulky zpracovaných dat poskytnutých programem Scripps CO₂ není v období Tambora zaznamenán markantní rozdíl na začátku a konci celého období. Veličina "parts per million" neboli představuje v překladu část sledované látky na milion. Je to

jednotka, která se používá k vyjádření koncentrace jedné látky v jiné. V případě atmosférických plynů, jako je oxid uhličitý, se koncentrace udává v ppm. Jedna část na milion znamená, že v daném objemu vzduchu je jedna část látky na milion částí vzduchu.

V případě období sopky Tambora je hodnota průměrné roční koncentrace CO₂ před samotnou erupcí vyšší než po roce vybuchnutí sopky. Následující období Krakatoa a Pinatubo mají hodnoty průměrné roční koncentrace CO₂ před rokem samotné erupce nižší než po uplynutí vulkanické činnosti. U všech třech období bylo dosaženo nejvyšších hodnot koncentrace CO₂ v posledním roce sledování.

Období Tambora má hodnoty koncentrace ve výsledku nejnižší. Naopak období Pinatubo dosahuje nejvyšších hodnoty. Stoupající hodnoty způsobuje v tomto případě především průmyslová revoluce, která začala v 18. století. Toto období je charakterizováno přechodem od ruční výroby k průmyslové výrobě a mechanizaci. To představovalo technologické inovace, které zahrnovaly vynálezy parního stroje, rozvoj železnice, textilních strojů a dalších průmyslových technologií. Pro emise oxidu uhličitého byla průmyslová revoluce klíčovým faktorem. S rozvojem průmyslových odvětví se zvýšila spotřeba energie. Hlavním zdrojem energie bylo fosilní palivo, zejména uhlí. Spalováním uhlí docházelo k masivním emisím CO₂ do atmosféry. Právě tato přeměna energetických zdrojů a způsobu výroby byla hlavní příčinou neutuchajícího nárůstu koncentrace CO₂ v atmosféře. Data mohou zastupovat i vliv samotné vulkanické činnosti, avšak v měřítku s masivními zdroji člověkem způsobených emisí CO₂, je těžké pozorovat přesné souvislosti.

Průměrná roční koncentrace CO₂ za období Tambora (1805-1825) je nižší od období Krakatoa o 7,99 ppm. Rozdíl mezi průměrnou roční koncentrací CO₂ období Krakatoa (1873-1893) a období Pinatubo (1981-2001) činí 62,94 ppm. Rozdíl nejnižší průměrné roční koncentrace CO₂ období Tambora, a naopak nejvyšší průměrné roční hodnoty sopky Pinatubo je celých 70,93 ppm. To znamená, že hodnoty stále rychleji narůstají.

4.2.4 Sledování vybraných erupcí podle slunečního cyklu

Pro zkoumání vlivu erupcí na sluneční záření je možné hledat data o slunečních skvrnách a sluneční aktivitě. Klíčovým prvkem je tzv. číslo slunečních skvrn neboli relativní číslo slunečních skvrn (anglicky *Solar Cycle Sunspot Number*), které vyjadřuje počet slunečních skvrn na povrchu Slunce. Ty jsou spojeny s magnetickou aktivitou Slunce, a proto jejich množství poskytuje informace o aktuální fázi slunečního cyklu (ISES, 2024).

Počet slunečních skvrn je spojen s úrovní sluneční aktivity. Sluneční skvrny jsou oblasti na povrchu Slunce, kde je magnetické pole silnější než okolní oblasti, to způsobuje sníženou teplotu, a tedy i nižší jasnost v porovnání s okolním povrchem. Čím více slunečních skvrn je pozorováno, tím vyšší je sluneční aktivita. Tento vztah byl poprvé pozorován a zkoumán již v 19. století a jedním z klíčových vědců, který se tímto fenoménem zabýval, byl německý astronom Samuel Heinrich Schwabe (Wilson, 1998).

Fyzickou souvislost mezi sopečnými erupcemi a sluneční aktivitou lze v současnosti pouze odhadovat a probíhá kolem ní mnoho studií. Je možné, že sluneční aktivita dlouhodobě řídí sopečnou činnost na Zemi. Vulkanická aktivita je obvykle vyšší v obdobích déle trvajících minim sluneční aktivity a naopak. Přímý sluneční vliv na klimatické změny samozřejmě není vyloučen. Je ovšem velmi složité rozlišit, jakou část těchto změn zprostředkovává sopečná činnost a jakou část přímý sluneční vliv (Střeščík, 2003).

Sluneční aktivity vyvrhují vysokoenergetické částice namísto elektromagnetického záření. Dobře známým hlavním ukazatelem sluneční aktivity je existence sluneční skvrny, která má průměrnou změnu za 11 let, pojmenovanou podle slunečního cyklu. Sluneční aktivity souvisejí s vesmírným počasím ovlivňujícím proměnlivost atmosféry všech planet, navíc s proměnlivostí klimatu Země. Velká otázka vyvstává ohledně vztahu mezi solární energií a globálními vulkanickými aktivitami Země. Herdiwijaya, D., Arif, J., Nurzaman, M., (2014) tvrdí, že ačkoli fyzikální důvod je daleko pro vysvětlení, sluneční aktivity mají jasný vztah s globálními vulkanickými aktivitami.

Data o slunečních skvrnách je možné sbírat v různých slunečních cyklech. Například organizace International Space Environment Service (dále jen ISES) vedena pod NOAA poskytuje aktuální a historická data o sluneční aktivitě, včetně slunečních skvrn. Získaná data mohou poskytnout informace o změnách ve sluneční aktivitě v souvislosti s erupcemi a pomoci zkoumat, jaký vliv měly erupce na sluneční záření a jeho dopad na Zemi (ISES, 2024).

Tabulka 9 - Průměrné relativní číslo slunečních skvrn ve vybraných období

Období Tambora		Období Krakatoa		Období Pinatubo	
Rok	Relativní číslo slunečních skvrn	Rok	Relativní číslo slunečních skvrn	Rok	Relativní číslo slunečních skvrn
1805	70,4	1873	113,2	1981	198,8
1806	46,9	1874	68,0	1982	162,9
1807	17,9	1875	28,4	1983	90,8
1808	20	1876	18,9	1984	60,7
1809	13,6	1877	20,7	1985	20,5
1810	0	1878	6,3	1986	14,8
1811	5,7	1879	10	1987	33,7
1812	8,3	1880	53,8	1988	122,7
1813	20,3	1881	90,5	1989	211,2
1814	23,2	1882	99,4	1990	191,4
Průměrná hodnota před erupcí	22,6	Průměrná hodnota před erupcí	50,9	Průměrná hodnota před erupcí	110,5
1815	59	1883	106,1	1991	203,4
1816	76,4	1884	97,5	1992	133,3
1817	68,4	1885	86,6	1993	76,4
1818	50,1	1886	42,4	1994	44,9
1819	40	1887	21,8	1995	25,2
1820	26	1888	11,2	1996	11,6
1821	11	1889	10,4	1997	28,9
1822	8,8	1890	11,7	1998	88,1
1823	3,3	1891	59,4	1999	136,2
1824	14,2	1892	121,6	2000	173,8
1825	27,6	1893	141,8	2001	170,3
Průměrná hodnota po erupci	32,6	Průměrná hodnota po erupci	60,4	Průměrná hodnota po erupci	88,9
Průměrná hodnota za celé období	29,1	Průměrná hodnota za celé období	58,1	Průměrná hodnota za celé období	104,7

Zdroj: vlastní zpracování ISES, 2024

Průměrná hodnota před erupcí sopky Tambora činí 22,6. Tato hodnota představuje stabilitu sluneční aktivity během tohoto dvacetiletého období před erupcí. V roce 1810 došlo k výraznému poklesu na hodnotu 0. Tato nízká hodnota může signalizovat období minimální sluneční aktivity, ale mohla být ovlivněna i jinými faktory. Rok 1815 zaznamenal výrazný

nárůst relativního čísla slunečních skvrn na 59, což může být interpretováno jako dočasný nárůst sluneční aktivity v následujícím období po erupci. Po erupci v roce 1815 vzrostla průměrná hodnota na 32,6. Tento nárůst může ukazovat na určité změny v sluneční aktivitě během období obnovy po erupci.

Před erupcí byla průměrná hodnota relativního čísla slunečních skvrn 50,9. Tato hodnota může poskytnout referenční bod pro srovnání s obdobím po erupci. Po erupci došlo k nárůstu průměrné hodnoty na 60,4. Rok po erupci sopky Krakatoa následuje výrazný pokles hodnot, který se kompenzuje vysokými hodnotami až v posledních dvou letech. To může naznačovat vliv erupce Krakatoa na sluneční aktivity.

Před erupcí Pinatubo byla průměrná hodnota relativního čísla slunečních skvrn 110,5. Průměrná hodnota slunečních skvrn po erupci v roce 1991 je 88,9, což naznačuje, že došlo k výraznému snížení sluneční aktivity v následujících letech. Sluneční skvrny jsou indikátory sluneční aktivity, a pokles jejich čísla může signalizovat dočasné zpomalení slunečního cyklu. Po erupci jsou viditelné některé výkyvy v relativním čísle slunečních skvrn. Například v roce 1993 a 1994 jsou hodnoty nižší, což může ukazovat na další období snížené sluneční aktivity. Tato variabilita může být důsledkem komplexních interakcí v sluneční atmosféře. I když se sluneční aktivita v průměru snížila, v některých letech po erupci došlo k obnově sluneční aktivity, jak naznačuje zvýšení relativních čísel slunečních skvrn v letech 1996 a 2000. To může být způsobeno postupným návratem sluneční aktivity k normálu.

5 Výsledky a diskuse

5.1 Porovnání jednotlivých erupcí

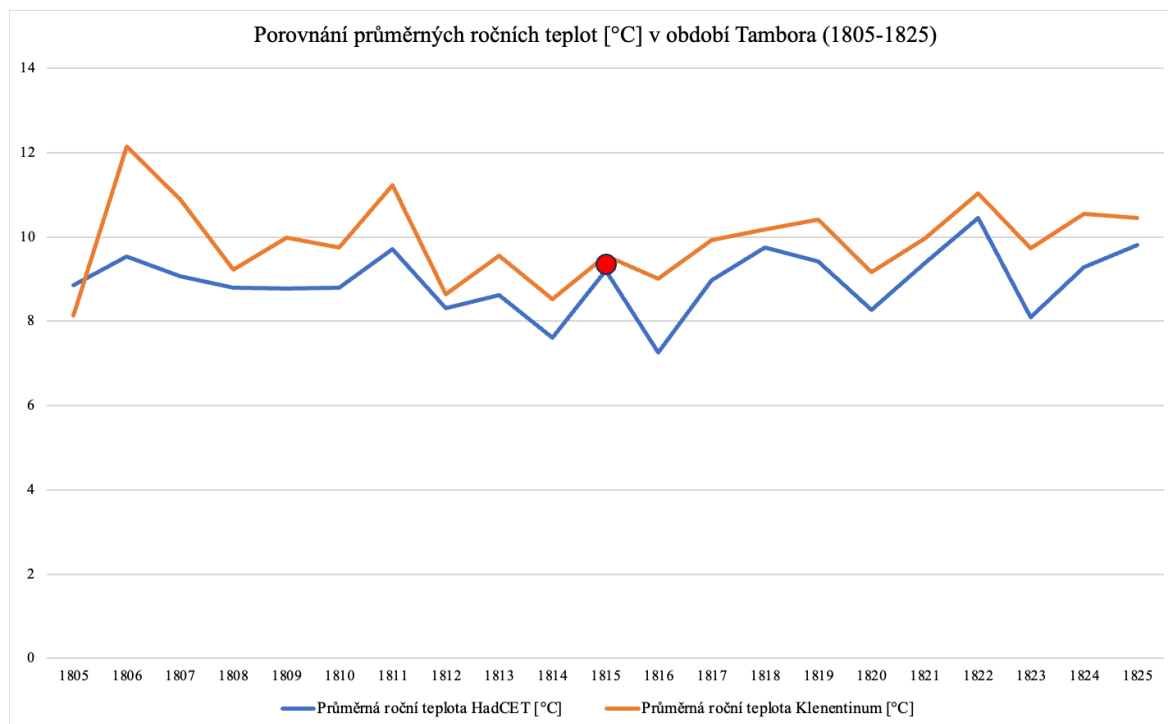
Erupce sopek Tambora, Krakatoa a Pinatubo jsou bezpochyby nejvýraznější vulkanické události, které zásadně ovlivnily klima a život na Zemi. Tyto mohutné sopečné erupce se vyznačují enormním vypuštěním sopečných plynů a částic do atmosféry, což vedlo k rozsáhlým dopadům na klimatické podmínky po celém světě. Tato kapitola se zaměřuje na porovnání erupcí Tambora, Krakatoa a Pinatubo s cílem lépe porozumět specifickým charakteristikám každé erupce a vyhodnotit, jaký vliv měly na klima planety. Prostřednictvím předchozí analýzy různých aspektů těchto historických erupcí je možné poskytnout komplexní pohled na jejich důsledky pro Zemi.

Na základě analýzy uvedených dat v předchozí části této studie provedeme srovnání identifikovaných aspektů a vyhodnotíme jejich dopady. V závěru této kapitoly bude prezentována případová studie, která bude zaměřena na odpověď na otázku: „Jaké by byly současné dopady, kdyby sopka podobná jedné z vybraných vybuchla v dnešní době?“.

5.1.1 Grafické porovnání teplot

Porovnání vlivu sopečných erupcí na průměrné roční teploty poskytuje klíčový pohled na krátkodobé změny klimatu způsobené těmito mohutnými přírodními jevy. Sopečné erupce mohou výrazně ovlivnit atmosférické podmínky tím, že do stratosféry vypustí obrovské množství popela a plynů. Tato studie se zaměřuje na tři významné sopečné erupce, kterými jsou Tambora, Krakatoa a Pinatubo. Prostřednictvím grafického porovnání analyzuje jejich dopady na průměrné roční teploty. Tento přístup umožňuje názorně vizualizovat a srovnat změny teplotních trendů v obdobích těchto erupcí, přispívající tak k našemu pochopení krátkodobých klimatických výkyvů spojených se sopečnou aktivitou.

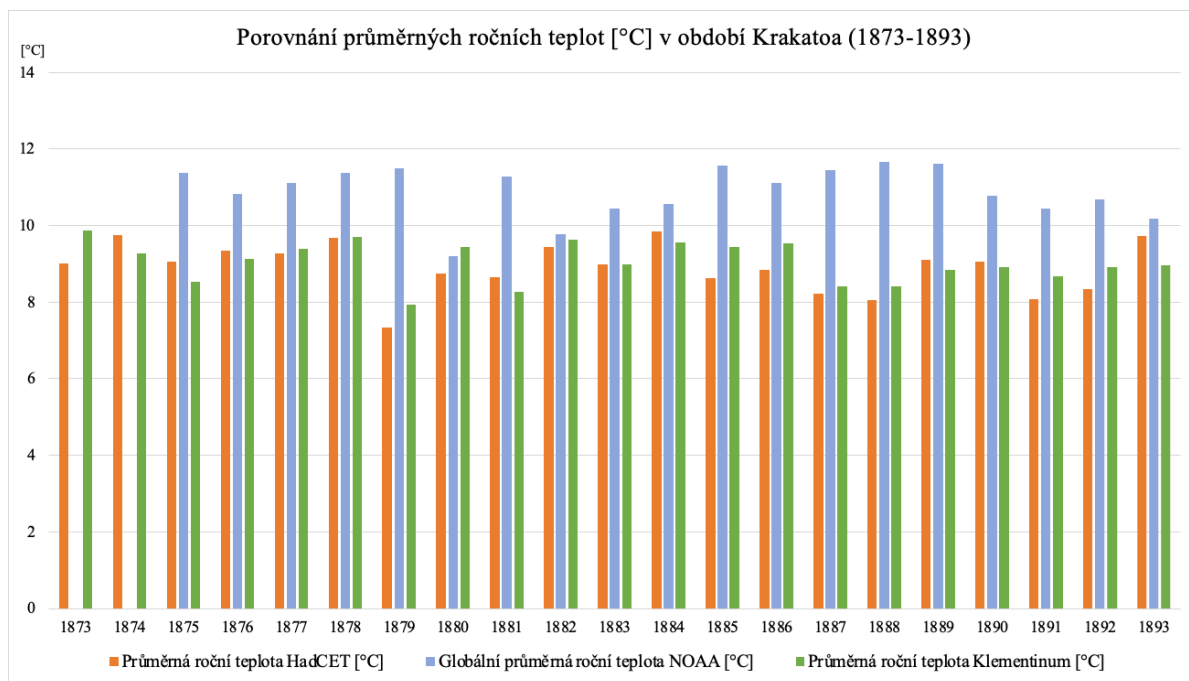
Graf 1 - Porovnání průměrných ročních teplot v období Tambora (1805-1825)



Zdroj: vlastní zpracování HadCET a NOAA, 2024

Z grafu je patrný propad průměrné roční teploty rok po vypuknutí erupce sopky Tambora. Je patrný lehký růst hodnot s občasnými kolísáními. Naopak před erupcí má křivka klesající tendence a nejvyšší hodnota v tomto období si připisuje rok 1811. Křivka měření teploty dat HadCET je začátkem sledovaného období poměrně stabilní, naopak české měření počátkem vybraného období dosáhlo nejvyšší naměřené hodnoty za celé období. Po těchto výkyvech se od roku 1810 mají křivky tendenci svým tvarem kopírovat, avšak hodnoty České republiky jsou zhruba o 0,5–1 °C ve vyšších hodnotách.

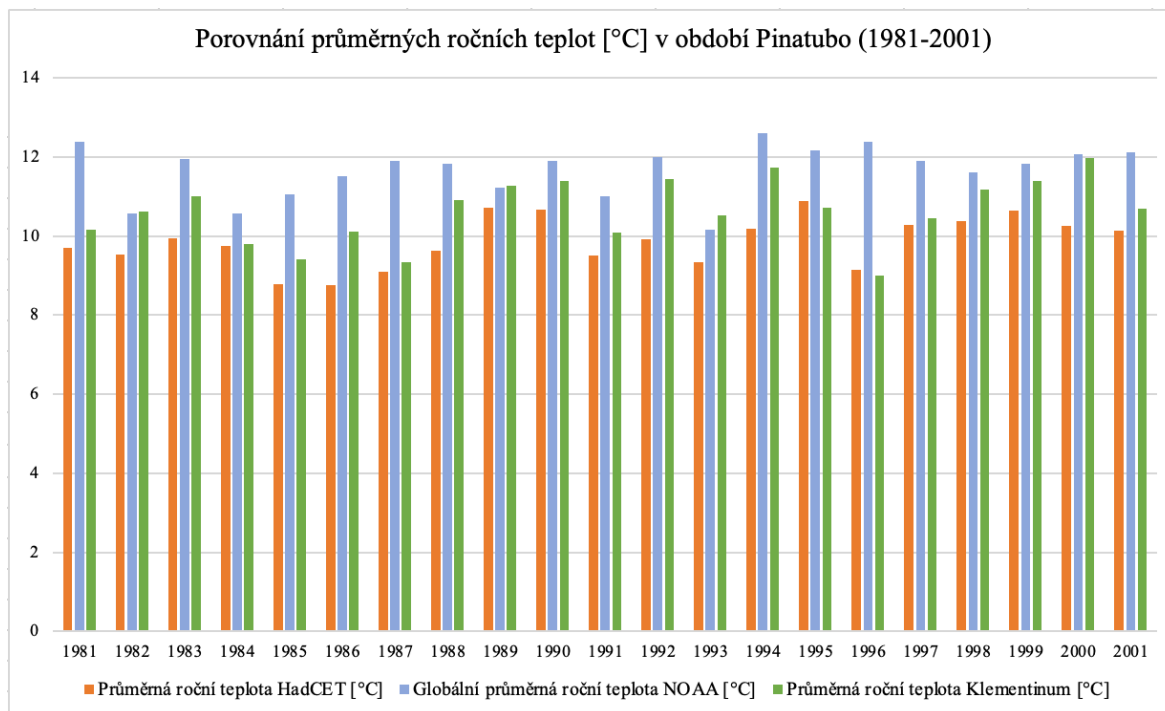
Graf 2 - Porovnání průměrných ročních teplot v období Krakatoa (1873-1893)



Zdroj: vlastní zpracování HadCET, NOAA, Klementinum, 2024

Graf popisuje teplotní vývoj v období Krakatoa a jeho součástí jsou data pro centrální Anglii, území České republiky a globální průměrná teplotní data. První dva roky je možné vypořovovat, jak se prohodily hodnoty centrální Anglie a území České republiky. Data globálních ročních teplot se pro první dva roky nevyskytují. První rok měření mají globální hodnoty tendenci růst, avšak podobné evropské hodnoty v tento moment klesají. V následujících letech je možné sledovat rostoucí tendenci u všech průměrných ročních teplot. Rok 1879 poté představuje pro evropské teploty náhlý propad, avšak globální hodnoty jsou stále růstové. To se mění následujícím rokem, kdy klesají i globální průměrná roční teplota a evropské teploty jí dorovnávají. V tento moment si mají mezi sebou hodnoty nejmenší rozdíl. Rok erupce představuje pokles evropských teplot, a naopak růst globálních hodnot. Následují roky teplotních výkyvů. Od roku 1886 se evropské a globální teploty rozcházejí opačným směrem.

Graf 3 - Porovnání teplot v období Pinatubo (1981-2001)



Zdroj: vlastní zpracování HadCET, NOAA, Klementinum, 2024

Pro hodnocení grafu popisující období Pinatubo jsou data již úplná, a proto lze porovnat celé období pro globální i evropské hodnoty. V počátku období je možné sledovat značné množství mírných teplotních výkyvů. Hned v prvním roce jsou globální hodnoty viditelně rostoucí. Poté je vnímám pokles hodnot a od roku 1986 je možné zaznamenat nárůst teploty. Rokem erupce 1991 teplota klesá, ale nejedná se o nijak rapidní pokles. Následuje pár let teplotních výkyvů evropský i globálních hodnot. V roce 1994 je globální teplota nejvyšší. Průměrné teploty ve většině oblastí světa se od počátku 20. století zvýšily, což je patrné v celkovém dlouhodobém růstu globální teploty. Nicméně tempo tohoto oteplování není konzistentní v různých částech světa.

5.1.2 Grafické porovnání vývoje ročních srážek na území České republiky

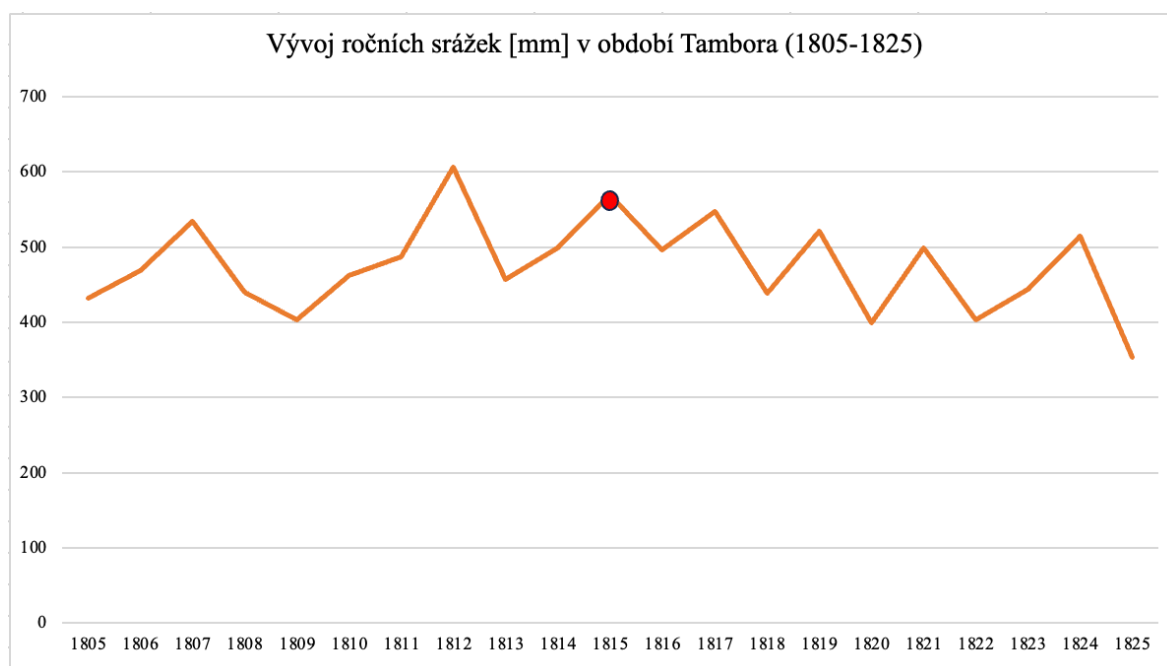
Tato podkapitola se zaměřuje na grafické porovnání vývoje ročních srážek na území České republiky v průběhu dvacetileté éry, které zahrnuje období pozorování erupcí několika významných sopek. Srážky jsou klíčovým prvkem vodního cyklu a zásadním faktorem ovlivňujícím hydrologické podmínky na daném území.

Vliv sopečných erupcí na klima a srážky je známý, a to díky emisím látek do atmosféry, které mohou ovlivnit vlastnosti srážkových systémů. Cílem této analýzy je

zkoumat případné souvislosti mezi erupcemi sopek a změnami ve srážkových vzorech v České republice.

Data o ročních srážkách jsou získána z meteorologických měření v Klementinu a jsou analyzována v rámci dvacetiletého období, ve kterých hrají důležitou roli relevantní erupce. Grafické znázornění těchto údajů umožní vizuální porovnání trendů a případné identifikace vzájemných vztahů mezi sopečnými událostmi a srážkovým režimem na území České republiky.

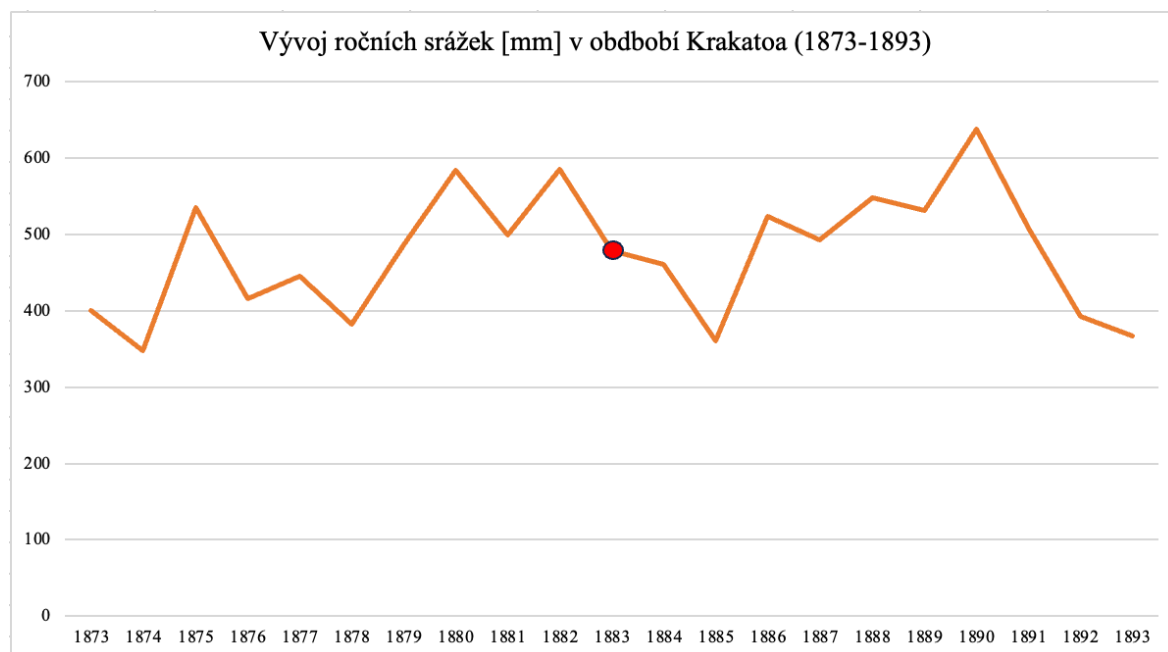
Graf 4 - Vývoj ročních srážek v ČR ve sledovaném období Tambora



Zdroj: vlastní zpracování Klementinum, 2024

Vývoj ročních srážek v letech 1805–1825 v České republice ukazuje na značnou variabilitu s obdobími zvýšených a snížených hodnot. Několik let vykazuje výrazný nárůst, což může být spojeno s atmosférickými podmínkami a mimořádnými jevy. Srážky v této době procházely cyklickými změnami, což může být ovlivněno různými klimatickými faktory. V první polovině sledovaného období je nejvyšší nárůst hodnot zaznamenán v roce 1812. Hodnota v tomto roce je nevyšší i za celkové sledované období. V následujícím roce je možné zaznamenat prudký propad hodnot, který vzápětí narůstá do roku erupce 1805. Po roce erupce následuje kolísání hodnot, které je znatelné do konce sledovaného období. Z toho lze vyvodit výrazné globální změny, které zanechala erupce sopky Tambora.

Graf 5 - Vývoj ročních srážek v ČR ve sledovaném období Krakatoa

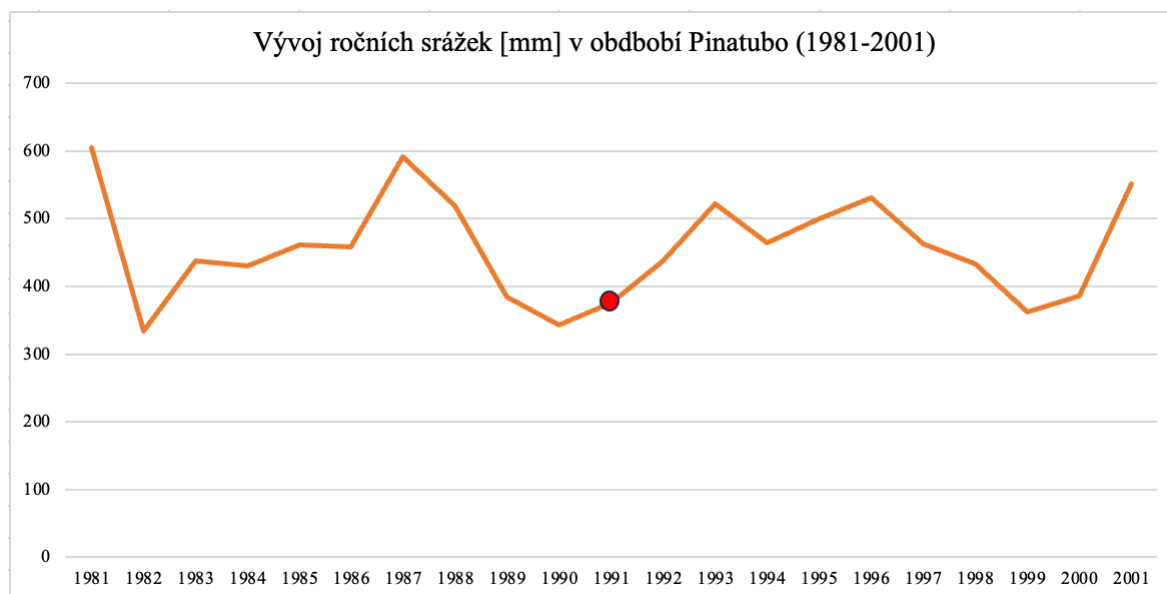


Zdroj: vlastní zpracování Klementinum, 2024

Začátek sledovaného období s ročními srážkami dosahují hodnoty nižších úhrnů srážek. Následující rok srážka značně narůstají. Dále je možné sledovat před erupcí stabilní hodnoty. Následuje opětovný pokles a vzápětí výrazný nárůst. Rokem 1881 začíná kolísání srážek kolem hodnoty 500 mm. Od roku erupce hodnoty srážek klesají až do roku 1885. Následně hodnoty kolísavě rostou až do roku 1890, kdy je možné zaznamenat náhlý pokles.

V období kolem erupce sopky Krakatoa (1883) bylo v pražském Klementinu pozorováno kolísání ročních srážek. Snížení srážek v letech 1883–1885 může být spojeno s atmosférickými změnami způsobenými sopečnou erupcí. Následný nárůst srážek v roce 1890 může ukazovat na období obnovené aktivity. V celkovém kontextu však lze vidět, že srážky procházely cyklickými změnami během sledovaného období.

Graf 6 - Vývoj ročních srážek v ČR ve sledovaném období Pinatubo



Zdroj: vlastní zpracování Klementinum, 2024

V počátcích sledovaného období dochází k výraznému nárůstu srážek v roce 1981, který byl následován poklesem v roce 1982. V následujících letech došlo k postupnému nárůstu srážek. V období 1985–1986 jsou srážky stabilní. Rok 1987 přinesl výrazný nárůst srážek, následovaný stabilními hodnotami v příštích letech. V roce 1990 došlo k poklesu srážek. V letech 1991–1993 následoval postupný nárůst. Období 1994–1995 bylo charakterizováno stabilními hodnotami, po kterých následoval další nárůst v roce 1996. Následující roky lze pozorovat stabilnější srážky s poklesem v roce 1999. Rok 2000 přinesl opětovný nárůst srážek, a v roce 2001 došlo k výraznému nárůstu.

V období kolem erupce sopky Pinatubo (1991) bylo v pražském Klementinu pozorováno kolísání ročních srážek. Tentokrát je možné pozorovat nárůst srážek v roce 1991 a zejména v roce 1993, což může být také spojováno s atmosférickými změnami způsobenými sopečnou erupcí, která ovlivnila klimatické podmínky. Celkově lze pozorovat proměnlivý charakter srážek s obdobími nárůstu a poklesu během sledovaného období. V porovnání s předchozími případy je křivka hladší a poskytuje tak časté výkyvy teplot v krátkém období.

5.1.3 Porovnání složení atmosféry podle ledovcových jader

Sopka Tambora, jejíž výbuch v roce 1815 je bezpochyby jedna z největších erupcí v historii. Vystříkla do atmosféry enormní množství sopečných plynů a částic. Tyto emise zahrnovaly především oxid síry, který se oxiduje na síranové aerosoly ve stratosféře. Tyto

aerosoly měly výrazný vliv na klima, způsobující následný rok 1816, známý jako "*rok bez léta*". Erupce Krakatoa v roce 1883 byla také významnou událostí, způsobující velké množství emisí, včetně oxidu siřičitého. I když ne tak intenzivní jako Tambora nebo Pinatubo, erupce Krakatoa měla vliv na klima. Docházelo k tvorbě síranových aerosolů, které ovlivňovaly atmosférické podmínky a měly dopady na sluneční záření dosahující Země. Sopka Pinatubo v roce 1991 způsobila další významnou sopečnou erupci s podobně vysokým výtryskem sulfátů. Tyto emise vedly ke vzniku rozsáhlých síranových aerosolů, které odrážely sluneční záření zpět do vesmíru, což mělo ochlazující účinek na planetu. I když ne tak dramaticky jako Tambora, erupce Pinatubo ovlivnila globální klima a způsobila dočasné ochlazení.

Celkově lze konstatovat, že všechny tři sopečné erupce měly významné dopady na klimatické podmínky Země. Jejich emise oxidu síry způsobily tvorbu síranových aerosolů ve stratosféře, což vedlo k dočasným změnám v globálním klimatu. I když se jednotlivé erupce lišily intenzitou a dopady, jejich vliv na atmosféru poskytl vědcům důležité informace o interakcích mezi sopečnou aktivitou a klimatickými změnami.

Na základě analýzy ledovcových jader bylo zjištěno, že erupce sopka Krakatoa měla delší trvání, a to přibližně tři roky. Tamborská erupce byla naopak relativně kratší, trvající přibližně dva roky. Avšak o to více byla Tamborská sopka agresivnější. Pinatubo, naopak, vykazoval vysokou depozici sulfátů, což naznačuje významný vliv na atmosféru a klima v důsledku této erupce. I když erupce Krakatoa vedla k nižší depozici sulfátů než Pinatubo, stále měla významný vliv na atmosféru. Tamborská erupce opět vykazovala vysokou depozici sulfátů, což potvrzuje silný dopad této erupce na atmosféru. Tato zjištění z ledovcových jader poskytují důležité informace o charakteristikách a dopadech jednotlivých sopečných erupcí v historii.

Tabulka 10 - Hodnocení celkové doby trvání a depozice sulfátů jednotlivých erupcí

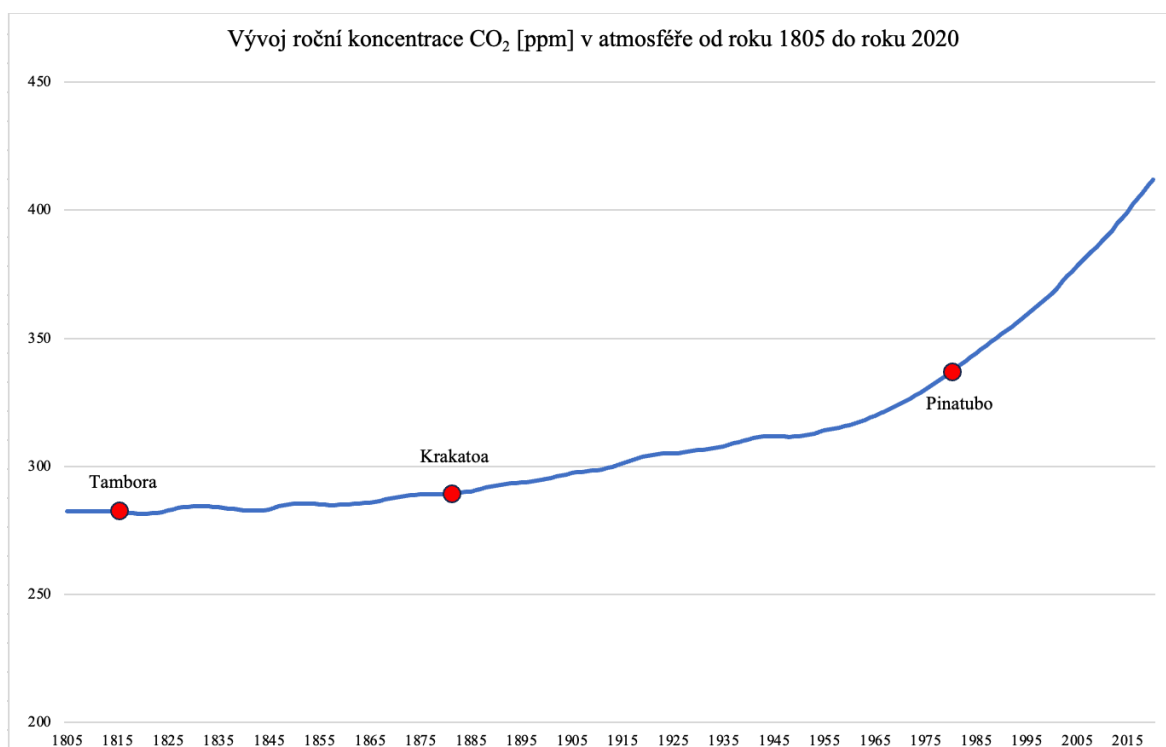
Metoda WDC06A - Antarktida		
Vulkán	Pořadí podle celkové doby trvání	Pořadí podle depozice sulfátů [kg/m ²]
Tambora	1	1
Krakatoa	2	3
Pinatubo	3	2
Metoda NEEM S1 - Grónsko		
Vulkán	Pořadí podle celkové doby trvání	Pořadí podle depozice sulfátů [kg/m ²]
Tambora	2	1
Krakatoa	1	3
Pinatubo	3	2
1 = nejdelší doba trvání, nejvyšší depozice sulfátů		
3 = nejkratší doba trvání, nejnižší depozice sulfátů		

Zdroj: vlastní zpracování, Sigl a kol., 2024

V tabulce je ohodnocena depozice sulfátů a celková doba trvání podle sledování z ledovcových jader. Z měření na Antarktidě je zřejmé, že Tambora dominuje nejdelší dobou trvání a zároveň nejvyšší depozicí sulfátů. Druhou nejdelší dobu trvání podle měření z Antarktidy obsadila sopka Krakatoa. Podle měření ledovcového jádra v Grónsku se sopka Krakatoa celkovou dobou trvání erupce umístila na prvním místě. Erupce filipínské sopky Pinatubo byla oproti předchozím sopkám v obou případech měření nejkratší. Pořadí podle depozice sulfátů je v obou oblastech měření totožné. Na prvním místě s nejvyšší hodnotou depozice sulfátů se umístila erupce sopky Tambora, jak již bylo zmíněno. Druhé místo náleží erupci sopky Pinatubo. Nejnižší depozici sulfátů vypustila do atmosféry erupce sopky Krakatoa.

Zkoumání aerosolů více vypovídající o samotné vulkanické činnosti a jejích dopadech na klima než pozorování koncentrace CO₂. I přesto je známo, že vulkanické erupce produkují obrovské množství CO₂. Z tohoto důvodu je důležité pozorovat, zda je vliv CO₂ z vulkanických erupcí globálně škodlivý.

Graf 7 - Vývoj roční koncentrace CO₂



Zdroj: vlastní zpracování, 2024

Z následujícího grafu je patrný nárůst křivky, který jenom zřídka kolísá. Od druhé poloviny 20. století je křivka strmě rostoucí. Z grafu je zřejmé že vulkanické erupce nijak patrně v celkovém důsledku nezvyšují koncentraci CO₂ na planetě Zemi. Je patrné, že za postupným nárůstem hodnot stojí převážně lidská činnost, která vede ke globálnímu oteplování. V tomto porovnání představují sopky pouze minimální hrozbu.

Globální odhady současné roční produkce CO₂ zemských odplyňovacích subvzdušných a podmořských sopek se pohybují od 0,13 do 0,44 miliard gigatun ročně (Gerlach, 1991; Allard, 1992; Varekamp a kol., 1992; Sano a Williams, 1996; Marty a Tolstikhin, 1998). Naopak antropogenní emise CO₂, tudíž vyprodukované člověkem, jsou zodpovědné za projektovaných 35 gigatun CO₂. Antropogenní emise CO₂ tedy jasně převyšují všechny odhady současné roční míry globálních vulkanických emisí CO₂ (Friedlingstein et al., 2010).

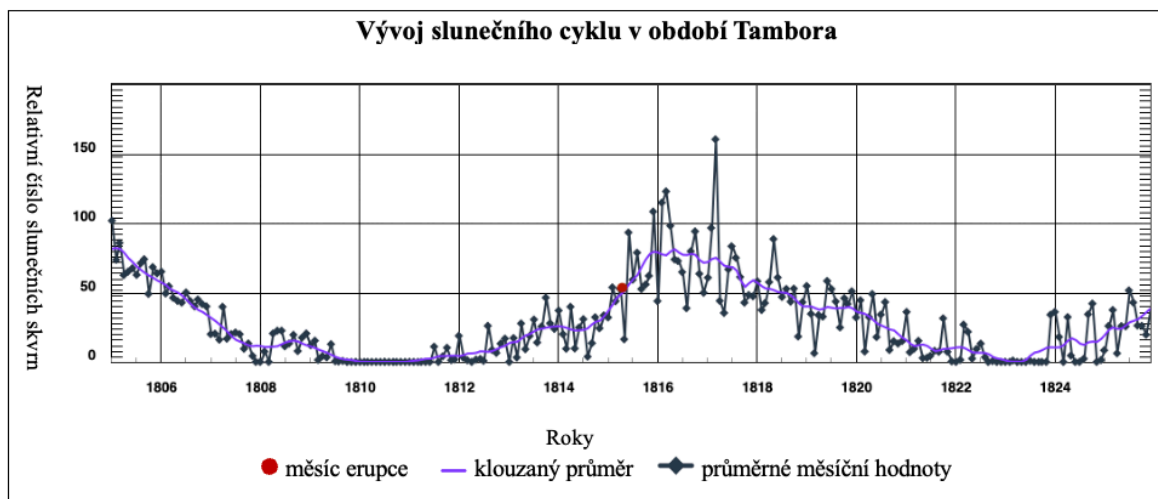
Sopky skutečně vypouštějí podstatně méně CO₂ než změny ve využívání půdy (3,4 gigatun za rok), lehká užitková vozidla (3,0 gigatun za rok) nebo výroba cementu (1,4 gigatun za rok). Narozdíl od toho jsou vulkanické emise CO₂ v lidské sféře srovnatelné s globálními emisemi CO₂ ze spalování odpadních plynů (0,20 gigatun za rok).

5.1.4 Porovnání slunečního cyklu jednotlivých období

Sluneční cykly jsou období, během kterých se množství slunečních skvrn na povrchu Slunce mění. Tyto cykly mají průměrnou délku asi 11 let. Hlavním důvodem pro cyklický charakter sluneční aktivity a vznik slunečních skvrn jsou změny v magnetickém poli Slunce. Sluneční cyklus začíná, když magnetické pole Slunce dosáhne svého minima, a poté dochází k opakovaným změnám a opětovnému dosažení minima (Marková, 2002).

Během slunečního cyklu dochází k intenzivnějšímu vytváření slunečních skvrn, a to je spojeno s aktivitou slunečních magnetických polí. Tato aktivita může mít různé dopady na sluneční záření, sluneční vítr a další sluneční procesy. Přestože jsou tyto cykly periodické, jejich přesná délka a intenzita mohou variabilně kolísat (Marková 2002).

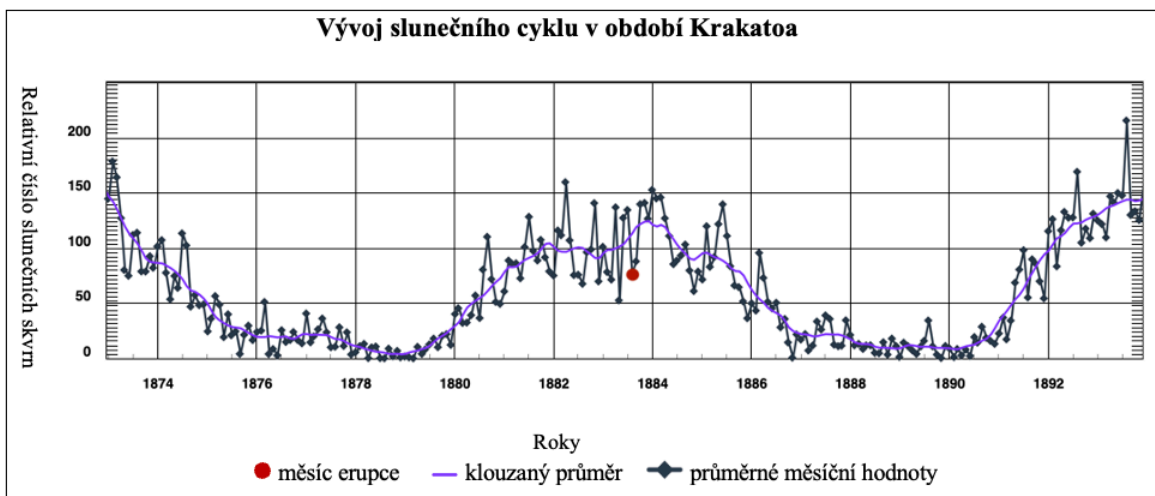
Graf 8 - Vývoj slunečního cyklu v období Tambora



Zdroj: ISES, 2024

Zmíněný graf zaznamenává křivky popisující sluneční cyklus. Černá spojitá křivka udává měsíční vývoj slunečních skvrn, zatímco fialová linie udává jejich klouzavý průměr. V případě období erupce sopky Tambora je možné zachytit období okolo roku 1811 a 1812, ve kterém jsou hodnoty nulové. Nulové hodnoty nemusí nutně znamenat úplný výpadek sluneční aktivity, ale spíše dočasné snížení aktivity. Sluneční cykly mají přirozené fluktuace, a období s nízkým počtem slunečních skvrn jsou součástí normální variability. Sluneční cykly jsou ovlivněny přirozenou variabilitou. Nulové hodnoty mohou být součástí běžného chování slunce v rámci jeho cyklu. Následující roky však mají rostoucí charakter. Zde je červeně zvýrazněný měsíc erupce. Erupce sopky Tambora nastala v měsíci duben. Hodnoty slunečních skvrn mají v tomto bodě rostoucí tendence. V pozdějších letech křivka začíná opět klesat.

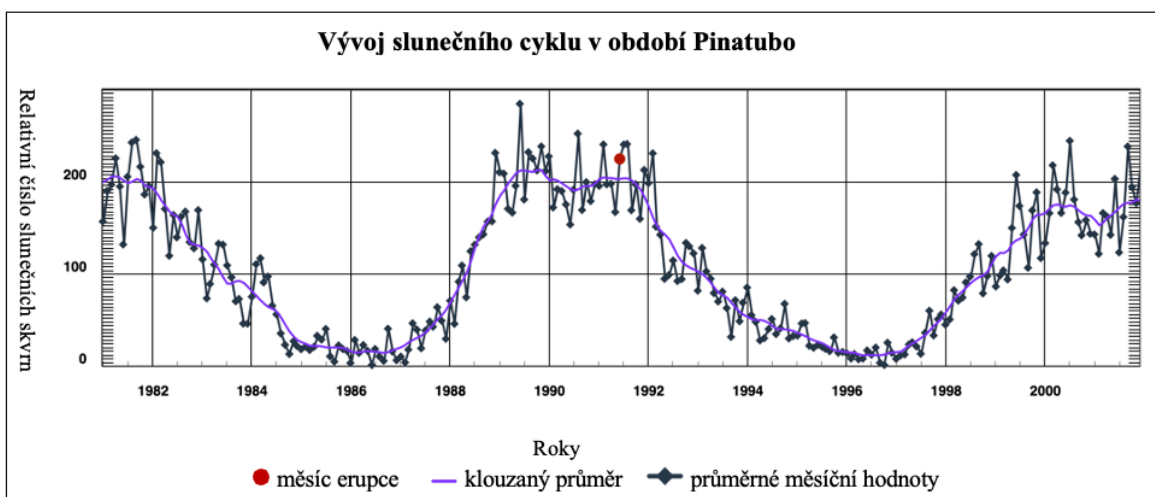
Graf 9 - Vývoj slunečního cyklu v období Krakatoa



Zdroj: ISES, 2024

Vývoj slunečního cyklu v období Krakatoa začíná rokem 1873 a je možné si všimnout, že křivka klouzavého průměru měsíčních hodnot klesá až do nulových hodnot mezi roky 1878 až 1880. Následně má křivka rostoucí tendence. Mezi roky 1882 a 1884 je možné zaznamenat velké výkyvy měsíčních hodnot. V roce 1883 dochází k erupci sopky Krakatoa, a to konkrétně v měsíci srpen. V tomto bodě se měsíční hodnota propadla, přestože klouzavý průměr má ještě pár měsíců rostoucí tendence. Poté se cyklus opakuje tak, že křivka klesá do nulových hodnot a zhruba v roce 1881 opět narůstá.

Graf 10 - Vývoj slunečního cyklu v období Pinatubo



Zdroj: ISES, 2024

Erupce sopky Pinatubo se odehrála v měsíci červen roku 1991. Opět se setkáváme s podobným tvarem křivky jako u předchozích období. Začátkem sledovaného období křivka klesá až do nulových hodnot. Odsud se chystá k rostoucím tendencím, což představuje

polovinu sledovaného období, ve kterém vypukla erupce sopky. Měsíční hodnoty zde kolísají. Předchozí měsíc erupce se hodnoty měsíční hodnota propadla, v měsíc erupce však stoupla. Klouzavý průměr však naznačuje pokles oproti roku 1999. Poté křivka klesá do nízkých hodnot, aby koncem sledovaného období mohla opět narůstat.

Je tedy zřejmé, že se všechny sledované erupce nacházely v nárůstu sluneční aktivity. Erupce sopky Krakatoa se nacházela v poklesu hodnot. Jak je známo, tak tato erupce měla vliv na sluneční záření. Bylo možné pozorovat mnoho odlišných jevů v souvislosti se slunečním zářením. V teoretické části je pro tyto jevy uveden měsíc září. Z grafu je možné vyčíst pokles hodnot právě v těchto měsících.

5.2 Ničivá erupce v roce 2024

V případě, že by sopka o rozměrech podobných vybraným sopkám vybuchla v Asii dnes, byly by dopady na globální klima negativní, až do té míry, že by zkomplikovaly globální dění po všech stránkách tří pilířů udržitelného rozvoje. V uvážení je sopka nacházející se v Asii, jelikož všechny sledované sopky se nacházejí v jihovýchodní části Asie. Emise velkého množství sopečných plynů a částic by pravděpodobně způsobily vytvoření síranových aerosolů ve stratosféře. Tyto aerosoly by odrážely sluneční záření, a to by vedlo k dočasným globálním ochlazením.

V důsledku změn v teplotách by mohlo dojít ke změnám v srážkových vzorech po celém světě. Některé oblasti by mohly zažívat extrémnější počasí, včetně střídání dešťů a sucha. Ochlazení by mohlo ovlivnit vegetační sezóny a mít dopady na úrodu v některých částech světa. Krátkodobé zvýšení síranových aerosolů by mohlo ovlivnit fotosyntézu a růst rostlin. To by také znamenalo extrémní meteorologické výkyvy, které by se negativně podepsaly na zemědělství. Globální dopad by pro některé oblasti přinesl hlad a nemoci. Krátkodobé změny v klimatu a srážkových vzorcích by mohly negativně ovlivnit úrodu plodin, které by vedly ke ztrátám v zemědělství. Extrémní počasí a nepředvídatelné změny v podmínkách pro pěstování plodin mohou ovlivnit globální dodávky potravin a zvýšit ceny.

Lokalita zasažená erupcí může čelit poklesem turismu z důvodu obav o bezpečnost, uzavření letišť a omezení pohybu lidí v regionu. Turistický průmysl může čelit výrazným ekonomickým ztrátám. To by ovlivňovalo celkový stav lokální ekonomiky. Mnoho lokalit jsou na turismu existenčně závislých a vulkanická erupce by bezpochyby představovala snížení kvality života mnohých obyvatel v rozsáhlém okolí.

Výbuch by mohl vést ke vzniku sopečných oblaků, které by měly nežádoucí vliv na letecký provoz v postižené oblasti a vedlo by k uzavření vzdušného prostoru. Sopka může vytvořit sopečné oblaky, které mohou do budoucna způsobit mnoho problémů. Zrušení letů a uzavření vzdušného prostoru vedou k nevyčíslitelným ekonomickým ztrátám pro letecké společnosti, letiště a související odvětví. Materiál vypuštěný sopkou může způsobit poškození infrastruktury, včetně budov, mostů a dalších staveb. Popel by měl také ničující dopady na dnešní automobily. Odstranění popela a dalších sopečných materiálů může vyžadovat enormní potřebu finančních investic.

Erupce by mohla mít negativní dopady na životní prostředí v regionu, například zvýšením rizika sopečných proudů, lávových proudů, zemětřesení nebo tsunami. S tím se pojí mnoho zničených obydlí a ztrát na lidských životech.

Asijské erupce se zdají být Evropě vzdálené, avšak z předchozích analýz je zřejmé, že globální dopady nejsou zanedbatelné. Ovšem silná erupce bližší vzdálenosti by vyvolala v České republice mnoho pozornosti a obav o bezpečnost obyvatel. Popel z erupce sopky na Islandu by v teoretické rovině mohl doputovat do České republiky. Sopečný popel z Islandu byl nesčetněkrát unášen větry směrem na východ a dosahoval i střední Evropy. Nicméně, rozsah a směr šíření popela jsou silně závislé na aktuálních meteorologických podmínkách, včetně směru větru, výšky výbuchu sopky a mnoha dalších faktorů. To stejné by platilo v případě silného výbuchu jedné z italských sopek.

Je důležité zdůraznit, že konkrétní dopady by závisely na konkrétních podmínkách erupce, včetně množství emisí, geografického umístění, síly erupce a aktuálních klimatických podmínek. S takovou událostí by současně pracovali vědci, vlády a mezinárodní organizace, aby sledovali a minimalizovali možné negativní dopady.

5.3 Shrnutí výsledků a jejich vztah k teoretické části

Sopky Tambora, Krakatoa a Pinatubo jsou mocné sopky, které mají v historii planety důležitou roli. Mocné výbuchy představovaly pohromu nejen pro obyvatele zasažených lokalit ale také pro celý svět. Všechny tři sopky jsou stratovulkány nacházející se v jihovýchodní Asii. I přesto, jak se zdají tyto tragédie být vzdálené, dokázaly ovlivnit mnoho globálních faktorů.

Teplota je hlavním faktorem, který sopka svojí erupcí dokáže ovlivnit v globálním měřítku. Podle Perkins a kol. klesly kvůli erupci sopky Tambora průměrné globální teploty o 0,5-1 °C. Podle klimatické analýzy bylo zjištěno, že na území Anglie klesly teploty

dokonce o 2,05 °C. Na území České republiky byl zaznamenán pokles o 0,54 °C. To představuje opravdu nevídaný teplotní skok. Teplotní hodnoty v období erupce Krakatoa mají také klesající charakter. V centrální Anglii klesla po erupci v roce 1883 průměrná roční teplota ve sledovaném období o 0,24 °C. Globálně došlo k ochlazení z kladné anomálie 0,121 °C na zápornou -0,004 °C. Sopka Pinatubo přinesla v roce samotné erupce (1991) ochlazení oproti průměrné roční teplotě před samotnou erupcí (1981-1990) ve všech případech sledování (Anglie, ČR, Globální hodnoty). Avšak ve výsledku došlo ve sledovaném období (1981-2001) k oteplení. Nejvyšší oteplení tedy přinesla erupce sopky Tambora roku 1815.

Co se týče srážek jsou globální data pro období Tambora a Krakatoa nedohledatelné. Globální srážková anomálie se však v období Pinatubo z kladné hodnoty 11,37 mm překlenula do záporné hodnoty -9,2 mm. Pro území České republiky zobrazuje svá data Klementinum. Bylo zjištěno, že v období Tambora se průměrné roční srážky po erupci snížily. Rok po samotné erupci sopky (1816) se srážky snížily od předchozího roku o 72,5 mm. Naopak období Krakatoa uvádí nižší hodnoty před erupcí než v období po roce erupce 1883 o 14,2 mm. Rok po erupci se srážky od předchozího roku však také snížily a to o 18,3 mm. Nakonec naměřené hodnoty srážek na území České republiky pro období Pinatubo představovaly zvýšení srážek po erupci. Rok po erupci byly zaznamenány vyšší srážky o 62 mm. Vysoké srážky mohou být způsobené vlivem kondenzování aerosolů, naopak nízké srážky mohou být způsobené zastíněním slunečních paprsků částicemi uniklými ze sopky.

Zkoumáním aerosolů bylo zjištěno, že nejvyšší depozice sulfátů náleží erupci sopky Tambora. V případě pozorování na Antarktidě byly naměřeny velmi vysoké hodnoty. U této erupce byla vyhodnocena i nejdelší doba trvání erupce ze zkoumání depozice sulfátů uvnitř ledovcových jader. Dlouhou dobou trvání je významná také erupce sopky Krakatoa, která má však nejnižší hodnoty depozice sulfátů.

Další zkoumaným faktorem bylo sledování hodnot CO₂ v průběhu sledovaných období. Tato část odhalila minimální vliv vulkanické činnosti v porovnání s vlivem činnosti způsobené člověkem. V tomto ohledu je tedy sledování CO₂ způsobené vulkanickou činností v globálním měřítku zanedbatelné. Škodlivé vlivy na klima by byly jistě lokální záležitostí pro oblast zasaženou samotnou erupcí.

Pozorováním slunečního cyklu došlo k porovnání vývoje slunečních skvrn. Všechna sledovaná období měla stejný vývoj. Erupce vždy proběhla v období narůstajících hodnot.

Podle měsíčních hodnot byla však zjištěna detailnější míra záření okolo období samotné erupce. V případě erupce sopky Tambora došlo v nadcházejícím měsíci po samotné erupci (květen 1815) k výraznému propadu hodnot slunečních skvrn. Měsíční hodnoty erupce Krakatoa (1883) byly ve výrazném pokles přímo v měsíci erupce (srpen). Sluneční skvrny erupce Pinatubo se nacházely celkově ve vyšších hodnotách a krátce po erupci následovali měsíce s klesajícími hodnotami.

Z teoretické části je rozumné porovnat sopky podle indexu vulkanické výbušnosti. Sopka Tambora dosáhla hodnoty 7. To vypovídá o její obrovské síle, díky které se tato sopka zapsala do dějin jakožto jedna z nejvýznamnějších sopek historie lidstva. Erupce sopek Krakatoa a Pinatubo sdílí hodnotu 6. I když se jedná o nižší hodnotu, nelze pochybovat o ničivých dopadech těchto dvou sopek.

Zajímavé jsou také zmíněné průměry kalder, které erupcí vznikly. Průměr kaldery sopky Tambora činí 6 km. Největší průměr kaldery zanechala sopka Krakatoa. Průměr kaldery sopky Pinatubo má v tomto porovnání pouhých 2,5 km.

K předpokládané situaci, ve které by došlo k výbuchu takto enormních dosahů v roce 2024, je nutné dodat, že by následky byly nejspíš ještě katastrofičtější než v případech pozorovaných období. V současné době čelí lidstvo klimatické krizi, kterou si částečně zavinilo samo, a zároveň je závislé na moderních technologiích, což zvyšuje jeho zranitelnost v této situaci. Proto je vzdělání v této oblasti o to důležitější.

6 Závěr

Milióny lidí žijí ve stínu nevyhnutelné přírodní katastrofy, kterou je erupce sopky. Avšak dopady, které je schopna tato nenadálá vulkanická činnost způsobit, mohou ovlivnit ještě mnohem větší množství lidí po celé planetě Zemi. Sopečné erupce jsou událostmi, které doposud není možné předpovědět. O to větší hrozbu pro lidstvo představují.

V teoretické části je vysvětlený pojem „vulkanismus“, od kterého jsou odvozeny následující kapitoly. Následně jsou teoreticky popsány procesy a různá rozdělení sopek. Je zde uvedena charakteristika Ohnivého kruhu, jehož součástí jsou sopky vybrané pro následující analýzu. Teoretická část je zakončena popisem vybraných historických sopek a současnou globální vulkanickou situací.

Praktická část odkrývá variabilní povahu vlivu sopečných erupcí na klima a upozorňuje na nutnost zkoumání odlišností a dopadů. V první fázi byla zkoumána teplota a její rozdíly v průběhu sledování dvacetiletého období. Stejně tak došlo k pozorování srážek, složení atmosféry a slunečních skvrn.

V závěru je také nutné krátké shrnutí předchozích poznatků o vlivu sopečných erupcí na teplotu, srážky a sluneční cyklus v globálním kontextu. Erupce sopky Tambora v roce 1815 představovala bez pochyby jednu z největších přírodních katastrof. V průběhu erupce sopky došlo k výraznému ochlazení, s průměrným globálním poklesem teploty o 0,5-1 °C. Výrazné teplotní poklesy byly pozorovány i na území Anglie a České republiky. Erupce Krakatoa v roce 1883 způsobila pokles teploty v centrální Anglii a globálně, ale následně došlo k oteplení v dlouhodobém horizontu. Erupce Pinatubo v roce 1991 vedla k dočasnému ochlazení, ale v průběhu následujícího desetiletí došlo k oteplení.

V oblasti srážek byly pozorovány rozdíly především na území České republiky. Erupce Tambora způsobila snížení srážek v České republice, zatímco Krakatoa vedla k nízkým hodnotám před erupcí. Erupce Pinatubo naopak přinesla zvýšení srážek v České republice.

Analýza aerosolů ukázala, že erupce Tambora měla největší depozici sulfátů s vysokými hodnotami na Antarktidě. Erupce Krakatoa měla nejnižší hodnoty depozice sulfátů, ale výraznou dobu trvání erupce. Sledování CO₂ ukázalo, že vliv vulkanické činnosti na globální úrovni je zanedbatelný ve srovnání s antropogenními emisemi.

Pozorování slunečního cyklu odhalilo, že erupce často nastávají v období narůstajících hodnot slunečních skvrn. Detailnější analýza ukázala, že erupce Tambora vedla k výraznému poklesu hodnot slunečních skvrn, zatímco erupce Krakatoa a Pinatubo byly spojeny

s poklesem v následujících měsících. Je zde možná spojitost mezi vulkanickou aktivitou a slunečním cyklem. To by mohlo být důsledkem interakcí mezi vulkanickými aerosoly a slunečním zářením.

Až do dnešních dob je Tambora z roku 1815 klasifikována jako nejkatastrofičtější erupce na světě v historii lidského života. Celosvětový výzkum a shromažďování informací o sopce Tambora by měl pokračovat, aby byla databáze úplnější. Informace o sopce by měly být distribuovány zúčastněným institucím za účelem zmírnění sopečné činnosti. Tyto metody lze použít ke studiu dalších sopek v Indonésii i ve světě.

VEI erupce sopky Tambora bylo klasifikováno na stupeň 7, což představuje jednu z nejmocnějších erupcí v historii. Tato erupce měla katastrofální dopady na globální klima, vedoucí k tzv. "rokům bez léta" v roce 1816.

Erupce sopky Krakatoa v roce 1883 a sopky Pinatubo v roce 1991 byly klasifikovány jako VEI 6. I když tyto erupce jsou dodnes považovány za výjimečně mohutné a měly vliv na klima, nebyly tak intenzivní jako Tambora. Erupce Krakatoa vedly k ochlazení globálního klimatu, avšak erupce Pinatubo způsobila dočasné ochlazení o několik desetin stupně Celsia. Z globálního hlediska se zdají být dopady vulkanické erupce podstatné, avšak jsou ovlivněny i jinými událostmi. Podle klimatických dat bylo však možné vypořádat značné výkyvy, které napovídaly o přímé souvislosti. Práce se dotýká tří pilířů udržitelného rozvoje, které jsou propojeny na globální úrovni.

Sopečné erupce v první řadě přinášejí sociální problémy, jako jsou ztráty na lidských životech, ztráty obydlí, negativní vliv na lidské zdraví, hladomor a chudoba. Tyto nepředvídatelné události narušují běžný život komunit a mohou mít rozsáhlé dopady nejen na postižené regiony.

Enviromentální dopady jsou zřejmé z teplotních a dalších změn, které vedou ke změně klimatu. Dalšími dopady jsou znečištění ovzduší, půdy a vodních ekosystémů. Nehledě na pohromy, které jsou s erupcí spojené jako jsou zemětřesení a tsunami vyvolané vulkanickou činností. Erupce jsou zároveň nesmírně důležitým přírodním procesem, bez kterého by planeta nefungovala tak, jak má. Erupce může svým následným ochlazením planety i pozitivní dopad na dnešní stále oteplující se podmínky.

Vulkanické erupce způsobují škody nevyčísitelné hodnoty. Dokonce i erupce menších rozměrů znamenají ekonomické potíže globálního charakteru. Ekonomické škody jsou nejpatrnější u zničeného majetku lokálních dosahů. Erupce však způsobuje také narušení

turismu, dopravní infrastruktury nebo dokonce zemědělství. Takové dopady již přesahují do globálních rozměrů.

Přestože byla erupce sopky Tambora nejmivnější ze všech vybraných sopek, tak to nic nemění na významnosti erupce sopky Krakatoa a Pinatubo. Krakatoa je považována za nejhlučnější sopku doposud a Pinatubo představovala nečekanou erupci i přes moderní monitorovací možnosti, které v předchozích obdobích nebyly ani zdaleka tak „dokonalé“. To opět přináší otázky týkající se nevyzpytatelnosti vulkanických erupcí.

Vulkanologové, klimatologové a geologové musí neustále zkoumat dopady vulkanismu, aby bylo možné v budoucnu zachránit lidské životy a předcházet ještě větším škodám, než je nutné. Hlubší znalost vulkanických procesů pomůže vytvořit smysluplné evakuační plány, které umožňují předcházet nejen sociálním, ale také již zmíněným ekologickým a enviromentálním problémům. Je nutné mít na paměti přirozenost vulkanických procesů a vnímat, že mnoho lidí žije v symbióze se sopkami. Proto je vzdělávání v těchto oborech klíčovým aspektem.

Výsledky této práce mohou pomoci k další formě vzdělání se o vulkanismu a dopadech vulkanických erupcí nejen na klima. Avšak klimatické změny velmi napomáhají k bližšímu pochopení procesů sopek. Zároveň stále existuje potenciál pro další rozvoj tohoto tématu a přidávání nových poznatků o dopadech sopečných událostí.

Historické erupce takové síly jako byly vybrané erupce významných sopek nás mohou dále posouvat ve vědě vulkanologie a předcházet mnoho katastrofickým scénářům. Jak již bylo zmíněno v úvodu práce: „Sopky představují úchvatnou sílu přírody, která se zároveň stává nevyzpytatelnou zbraní, proti níž je člověk bezbranný. V ten moment teprve dochází k uvědomění, že příroda je mocnější než samotné lidstvo.“ a povinností každého člověka je přírodu poznávat, učit se z jejích krás i hrůz a zachovávat ji pro budoucí generace.

Seznam použitých zdrojů

Literární zdroje

AIELLO, G., 2018. *Volcanoes Geological and Geophysical setting, Theoretical Aspects and Numerical Modeling, Applications to Industry and Their Impact on The Humam Health*. 1. vyd., Londýn, Velká Británie: IntechOpen. s. 284 ISBN 978-1-78923-348-3.

AKHMEITEV M., KVAČEK Z., WALTHER H., 2009. *Mid – latitude Palaeogene floras of Eurasia bound to volcanic settings and palaeoclimatic events – Experience obtained from the far East of Russia (Sikhote – Alin') and CentralEurope. – Acta Musei Nationalis Pragae, Series B – Historia Naturalis Pragae, Vol. 65, No. 3-4, 61–129.*

ALLARD, P., 1992. Global emissions of helium-3 by subaerial volcanism, *Geophys. Res. Lett.*, 19(14), 1479–1481, doi:10.1029/92GL00974.

BANFI, C., ČALKOVSKÁ, M., 2023. *Nejvýbušnější sopky: Velká desítka*. Praha: DOBROVSKÝ, 40 s. ISBN 978-80-277-2166-5.

BARROS, V., 2006. *Globální změna klimatu*. Praha: Mladá fronta, 1. vyd., 165 s. Kolumbus, sv. 181. ISBN 80-204-1356-1.

BARTIMORO A., GUIGNARD G., LUMAGA M. R. B., BARATTOLO F., CHIODINI G., AVINO R., GUERRIERO G., BARALE G. (2012): *Influence of volcanic gases on the epidermis of Pinus halepensis Mill. in Campi Flegrei, Southern Italy: A possible tool for detecting volcanism in present and past floras. - Journal of Volcanology and Geothermal Research 233–234, 1–17.*

BRÁZDIL, R., DOLÁK, L., BĚLÍNOVÁ, M., ŘEZNÍČKOVÁ, L., CHROMÁ, K., DOBROVOLNÝ, P., BURIANOVÁ, J., 2019. Kněz Šimon Hausner a jeho meteorologická pozorování v Buchlovicích v letech 1803–1831. Moravský zemský archiv v Brně. (pp.17-33)

BRÖNNIMANN, S. a D. KRÄMER, 2016. *Tambora and the “Year Without a Summer” of 1816*. University of Bern, Switzerland: GEOGRAPHICA BERNENSIA, 48 s. ISBN 978-3-905835-45-8.

BŘEZINA, J., BŘÍZOVÁ, E., CHLÁB, J., LOUN, J., PETRÁNEK, J., ZELENKA, P., 2016. *Encyklopedie Geologie*. Praha: Česká geologická služba, 349 s. ISBN 978-80-7075-901-1.

- CÍLEK, V., 2016. *Co se děje se světem: kniha malých dobrodiní v časech velké proměny Země*. Praha: Dokořán, 269 s. ISBN 978-80-7363-761-3.
- ŘURICA, D., HOLÝ, M., SUK, M., OBRTTEL, R., 2008. *Člověk jako geologický činitel*. Brno: Moravské zemské muzeum, 177 s. ISBN 978-80-7028-331-8.
- FAGAN, B., 2007. *Malá doba ledová, jak klima formovalo dějiny v letech 1300–1850*. Praha: Academia, 289 s. ISBN 978-80-200-1457-3.
- FLANNERY, T., 2005. *The Weather Makers. The History and Future Impact of Climate Change*. Melbourne: Text Publishing Company, s. 270. ISBN 978-80-7363-121-5.
- FRIEDLINGSTEIN, P., HOUGHTON, R. A., MARLAND, G., HACKLER, J., BODEN, T. A., CONWAY, T. J., CANADELL, J. G., RAUPACH, M. R., CIAIS, P., LE QUÉRÉ C., 2010. Update on C, emissions, *Nat. Geosci.*, 3(12), 811-812, doi: 10.1038/ngeol022.
- GAO, C., ROBOCK, A., AMMANN, C., (2008), Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based
- GERLACH, T. M., 1991. Present-day CO₂ emissions from volcanoes, *Eos Trans. AGU*, 72(23), 249, 254-255.
- HANSEN J.E., JOHNSON D., LACIS A., LEBEDEFF S., LEE P., RING D., RUSSEL G., 1981. *Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide*. *Science* 213: 957-966
- HERDIWIJAYA, D., ARIF, J., NURZAMAN, M., 2014. *On the Relation between Solar and Global Volcanic Activities*. 2014 International Conference on Physics, ICP 2014. 10.2991/icp-14.2014.21.
- HINGA, B., Rinard, D., 2015. *Ring of Fire: An Encyclopedia of the Pacific Rim's Earthquakes, Tsunamis, and Volcanoes*. 1. Bloomsbury: Bloomsbury Publishing, 432 s. ISBN 9798216139881.
- KANDLBAUER, J., P. O. HOPCROFT, P. J. VALDES, and R. S. J. SPARKS, 2013. *Climate and carbon cycle response to the 1815 Tambora volcanic eruption*, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 12,497–12,507, doi:10.1002/2013JD019767.
- LOCKWOOD, J., Richard, P., HAZLETT, W., DE LA CRUZ-REYNA, S., 2022. *Volcanoes Global Perspectives Second Edition*. 2. Oxford, UK: Wiley Blackwell. ISBN 9781119478850.
- MARTY, B., TOLSTIKHIN, I. N., 1998. CO₂ fluxes from mid-ocean ridges, arcs and plumes, *Chem. Geol.*, 145(3-4), 233–248, doi:10.1016/S0009 -2541(97)00145-9.
- NOVÁK, Jan A., 2011. *Smrtící sopky*. XYZ (ČR), 336 s. ISBN 978-80-7388-418-5.

- OPPENHEIMER, C., 2011. *Eruptions that Shook the World*. 1. Cambridge, Velká Británie: Cambridge University Press, 391 s. ISBN 978-0-521-64112-8.
- PERKINS, D., HENKE, R., C. SIMON, A., D. YARBROUGH, L., 2019. *EARTH MATERIALS: Components of a Diverse Planet*. London, UK: Taylor & Francis Group, 532 s. ISBN 978-0-367-14565-1.
- POST, J. D., 1977. *The Last Great Subsistence Crisis in the Western World*, Baltimore: The Johns Hopkins University Press.
- RAMPINO, M. R., SELF, S., 1982. *Historic Eruptions of Tambora (1815), Krakatau (1883), and Agung (1963), their Stratospheric Aerosols, and Climatic Impact*. *Quaternary Research*, 18(02), 127–143. doi:10.1016/0033-5894(82)90065-5
- ROBOCK, A., 2000. *Volcanic eruptions and climate*, *Rev. Geophys.*, 38, 191–219, doi:10.1029/1998RG000054.
- SACHS, J., 2008. *Common Wealth: Economics for a Crowded Planet*. 1. vydání, Londýn: Allen Lane, 386 s. ISBN 978-0-713-99919-8.
- SANO, Y., WILLIAMS, S. N., 1996. *Fluxes of mantle and subducted carbon along convergent plate boundaries*, *Geophys. Res. Lett.*, 23(20), 2749–2752, doi:10.1029/96GL02260.
- SCHMINKE, H., U., 2004. *Volcanism*. 32. Berlín, Německo: Springer-Verlag, 324 s. ISBN 978-3-540-43650-8.
- SELF, S., RAMPINO, M. R., BARBERA, J. J. (1981). *The possible effects of large 19th and 20th century volcanic eruptions on zonal and hemispheric surface temperatures*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 11(1), 41–60. doi:10.1016/0377-0273(81)90074-3
- SELF S., THORDARSON T., WIDDOWSON M. (2005) Gas Fluxes from Flood Basalt Eruptions. - *Elements*, 1, 283–287.
- SHEN J., *et al.* 2019. Evidence for a prolonged Permian-Triassic extinction interval from global marine mercury records. *Nature Communications* 10, číslo článku: 1563; doi: 10.1038/s41467-019-09620-0
- SIGL, M., MCCONNELL, J. R., LAYMAN, L., MASELLI, O., MCGWIRE, K., PASTERIS, D., KIPFSTUHL, S. (2013). *A new bipolar ice core record of volcanism from WAIS Divide and NEEM and implications for climate forcing of the last 2000 years*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(3), 1151–1169. doi:10.1029/2012jd018603

- SIGURDSSON H., 2015. *Encyclopedia of Volcanoes*. Nizozemsko: Elsevier Science. 1456 s. ISBN 9780123859396.
- STŘEŠTÍK, J., 2003. *Solar variability as an input to the Earth's environment. International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium, 23–28 June 2003, Tatranská Lomnica, Slovak Republic*. Ed.: A. Wilson. ESA SP-535, Noordwijk: ESA Publications Division, s. 393–396. ISBN 92-9092-845-X
- VACCARO, J., GLISSENAAR F., GROVESTINS, A., REINKING, C., VAN ROEKEL, A., WILSCHUT, M., KRÍŽEK, M., ENGEL, Z., 2006. *100 největších přírodních katastrof: Ničivá síla přírody na pěti kontinentech*. 3. Dobřejovice: Rebo Productions CZ, spol.s r.o., 207 s. ISBN 978-80-7234-842-8.
- VAREKAMP, J. C. R., KREULEN, R., POORTER, R. P. E., VAN BERGEN M. J., 1992. *Carbon sources and arc volcanism, with implications for the carbon cycle, Terra Nova, 4(3)*, 363–373, doi:10.1111/j .1365-3121.1992.tb00825.x.
- WILSON, R. M., 1998. *Volcanism, Cold Temperature, and Paucity of Sunspot Observing Days (1818-1858): A Connection?* Marshall Space Flight Center, Marshall Space Flight Center, Alabama: NASA. NASA/TP- 1998–208592.
- WIRAKUSUMAH A., D., RACHMAT, H., 2017. *Impact of the 1815 Tambora Eruption to global climate change, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 71012007. doi: 10.1088/1755-1315/71/1/012007

Internetové zdroje

Atmospheric CO₂ Data. *Scripps CO₂ Program* [online]. [cit. 2024-02-04]. Dostupné z: https://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_co2/icecore_merged_products.html

Average Annual Temperature by Year. *NOAA* [online]. [cit. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.weather.gov/media/slc/ClimateBook/Annual%20Average%20Temperature%20By%20Year.pdf>

Co je to sluneční cyklus? Online. MARKOVÁ, Eva. *Česká astronomická společnost – astronomický – informační server*. 2002. Dostupné z: <https://www.astro.cz/clanky/slunecni-soustava/co-je-to-slunecni-cyklus.html>. [cit. 2024-01-07].

Global Volcanism Program, 2024. Report on Reykjanes (Iceland) (Sennert, S, ed.). Weekly Volcanic Activity Report, 28 February-5 March 2024. Smithsonian Institution and US Geological Survey.

Global Volcano Model website, 2019. *WOVO – World Organization of Volcano Observatories* [online]. [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://wovo.iavceivolcano.org/news/5-global-volcano-model-website>

Ice-Core Merged Products, 2006. Scripps CO₂ Program [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: https://scrippsco2.ucsd.edu/assets/data/atmospheric/merged_ice_core_mlo_spo/merged_ice_core_yearly.csv

Interactive Map of Active Volcanoes and recent Earthquakes world-wide [online]. [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://earthquakes.volcanodiscovery.com>

ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression. *Space Weather Prediction Center – NOAA* [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

JUDD, J. W., STRACHEY, R., WHARTON, W. J. L., EVANS, F. J., RUSELL, F. A. R., ARCHIBALD, D., Whipple, G. M., 1888. *The Eruption of Krakatoa and Subsequent Phenomena* [online]. Londýn: Trübner & Company [cit. 2024-01-27]. s. 494 Dostupné z: https://www.google.cz/books/edition/The_Eruption_of_Krakatoa/Vk8PAAAAYAAJ?hl=cs&gbpv=1&dq=eruption&printsec=frontcover

Krakatoa. *Oregon State University – Volcano World* [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://volcano.oregonstate.edu/krakatau>

Magma carto, 2015. *The Economist* [online]. [cit. 2024-11-28]. Dostupné z: <https://www.economist.com/graphic-detail/2015/04/15/magma-carto>

Mount Krakatoa. *Britannica* [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/place/Krakatoa>

Mount Tambora. BAUER, Pat. *Britannica* [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/place/Mount-Tambora>

Mount Pinatubo. *Britannica* [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/place/Mount-Pinatubo>

NEWHALL, C., W. HENDLEY, J., H. STAUFFER, P., 1997. The Cataclysmic 1991 Eruption of Mount Pinatubo, Philippines. *Reducing Risk from Volcano Hazards* [online]. U.S. Geological Survey, 1 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: https://www.google.cz/books/edition/The_Cataclysmic_1991_Eruption_of_Mount_P/xZKyxKw2BH8C?hl=cs&gbpv=1

NOAAGlobalTemp uncertainty. *Met Office* [online]. [cit. 2024-01-02]. Dostupné z: https://climate.metoffice.cloud/formatted_data/gmt_NOAAGlobalTemp.csv

Office of Satellite and Product Operation, 2024. *Volcanic Ash Advisory Centers (VAACs)* [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/vaac/other-vaacs.html>

Praha Klementinum. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/praha-klementinum#>

Ring of Fire, 2024. *Britannica* [online]. [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/place/Ring-of-Fire>

Seasonal Central England Temperature, 1659 to 2022. Met Office [online]. [cit. 2024-03-11]. Dostupné z: https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcet/data/legacy/ssn_HadCET_mean.txt

Skidmore, M. and Toya, H. (2002) *Do Natural Disasters Promote Long-Run Growth? Economic Inquiry*, 40, 664-687. [online]. [cit. 2024-11-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/ei/40.4.664>

Smithsonian Institution – *Global Volcanism Program National – Museum of Natural History* [online], 2013. [cit. 2024-11-28]. Dostupné z: <https://volcano.si.edu>

Sopečné katastrofy, 2011. *Přírodní katastrofy a environmentální hazardy* [online]. [cit. 2024-11-24]. Dostupné z: <https://www.sci.muni.cz/~herber/volcanodisasters.htm>

Sopky a jejich vliv na klima, 2008. *Science Week – Aktuální články ze světa vědy, techniky a výzkumu* [online]. [cit. 2024-01-24]. Dostupné z: <https://www.scienceweek.cz/sopky-a-jejich-vliv-na-klima-iid-25175>

Types of volcano, 2024. *BGS – British Geological Survey* [online]. [cit. 2024-11-26].
Dostupné z: <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/earth-hazards/volcanoes/how-volcanoes-form/>

Volcanoes Can Affect Climate. USGS – science for a changing world [online]. [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/programs/VHP/volcanoes-can-affect-climate>

Volcanoes Monitoring Volcanic Activity and Tracking Impacts from Eruptions, 2024. *NASA – Earth Science Applied Sciences*[online]. [cit. 2024-01-08]. Dostupné z: <https://appliedsciences.nasa.gov/what-we-do/disasters/volcanoes>

Volcanoes of The World, 2024. *Volcano Discovery* [online]. [cit. 2024-11-28]. Dostupné z: <https://www.volcanodiscovery.com/volcanoes.html>

What We Do, 2023. *Centre Sismologique Euro-Méditerranéen Euro-Mediterranean Seismological Centre* [online]. [cit. 2024-11-28]. Dostupné z: https://www.emsc-csem.org/about_us/what_we_do/

What We Do – Volcano Hazards Program. *USGS science for changing world* [online]. [cit. 2024-11-28]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/programs/VHP/what-we-do-volcano-hazards-program>

What is the Ring of Fire? *NOAA – Ocean Exploration* [online]. [cit. 2024-01-02]. Dostupné z: <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/rof.html>

Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratek

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma sopečné činnosti	Chyba! Záložka není definována.
Obrázek 2 - Mapové znázornění Ohnivého kruhu.....	9
Obrázek 3 - Schéma posloupnosti klimatických změn v čase	17
Obrázek 4 - Poloha sopky Tambora	23
Obrázek 5 - Poloha sopky Krakatoa	26
Obrázek 6 - Historické zobrazení události vulkanické erupce Krakatoa.....	27
Obrázek 7 - Mapové znázornění ostrova Krakatoa po erupci v roce 1883.....	29
Obrázek 8 - Poloha sopky Pinatubo.....	30
Obrázek 9 - Mapové znázornění aktuální vulkanické globální aktivity	34

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Shrnutí charakteristik vybraných sopek	37
Tabulka 2 - Průměrné roční teploty v období vybraných erupcí naměřené z centrální Anglie	40
Tabulka 3 - Průměrné roční teploty pro území České republiky	42
Tabulka 4 - Globální průměrné teploty pro období sopek Krakatoa a Pinatubo	45
Tabulka 5 - Průměrné roční srážkové anomálie v období Pinatubo (1981-2001).....	48
Tabulka 6 - Průměrné roční srážky na území České republiky ve vybraných obdobích	50
Tabulka 7 - Porovnání měření bipolárních signálů v ledovcích	53
Tabulka 8 - Průměrné roční koncentrace CO ₂ sledované ve vybraných obdobích	56
Tabulka 9 - Průměrné relativní číslo slunečních skvrn ve vybraných obdobích.....	59
Tabulka 10 - Hodnocení celkové doby trvání a depozice sulfátů jednotlivých erupcí.....	69

Seznam grafů

Graf 1 - Porovnání průměrných ročních teplot v období Tambora (1805-1825).....	62
Graf 2 - Porovnání průměrných ročních teplot v období Krakatoa (1873-1893)	63
Graf 3 - Porovnání teplot v období Pinatubo (1981-2001)	64
Graf 4 - Vývoj ročních srážek v ČR ve sledovaném období Tambora	65
Graf 5 - Vývoj ročních srážek v ČR ve sledovaném období Krakatoa.....	66
Graf 6 - Vývoj ročních srážek v ČR ve sledovaném období Pinatubo	67
Graf 7 - Vývoj roční koncentrace CO ₂	70
Graf 8 - Vývoj slunečního cyklu v období Tambora	71
Graf 9 - Vývoj slunečního cyklu v období Krakatoa	72
Graf 10 - Vývoj slunečního cyklu v období Pinatubo	72

Seznam fotografií

Fotografie 1 - Kosmický snímek kaldery sopky Tambora.....	25
Fotografie 2 - Zachycení erupce sopky Pinatubo.....	33

Seznam použitých zkratek

EMSC – European-Mediterranean Seismological Centre

GVM – Global Volcano Model

GVP – Global Volcanism Program

IAVCEI – International Association of Volcanology and Chemistry

ISES – International Space Environment Service

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

OSPO – Office of Satellite and Product Operation

UARS – Upper Atmospheric Research Satellite

USGS – United States Geological Survey

VAACs – Volcanic Ash Advisory Centers

WOVO – World Organization of Volcano Observatories