



**Bakalářská práce**

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**

**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

# **Mineralogické formy, rozšíření a význam sladkovodního ledu**

**Tomáš Vrbický**

**Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů**

**Vedoucí práce: RNDr. Radek Mikuláš, DSc.**

**Studijní program: Geologie**

**Studijní obor: Hospodaření s přírodními zdroji**

**Praha, srpen 2014**



## Poděkování

Rád bych poděkoval především RNDr. Radku Mikulášovi, DSc. za odborné vedení, cenné rady a trpělivý přístup. Dále patří velký dík RNDr. Dobroslavu Matějkovi, CSc., mé rodině a přátelům.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce, ani její podstatná část, nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 14. 8. 2014

.....  
Tomáš Vrbický

## Abstrakt

**Název práce:** Mineralogické formy, rozšíření a význam sladkovodního ledu

**Autor:** Tomáš Vrbický

Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

**Vedoucí práce:** RNDr. Radek Mikuláš, DSc.

**Abstrakt:** Led je jednou ze základních složek životního prostředí. Pokrývá zemský povrch a výrazně ovlivňuje naše životy jak na místní, tak globální úrovni. Je předmětem značného vědeckého zájmu, zejména z hlediska jeho role v klimatických změnách – je schopný uvolňovat znečišťující látky do vodního prostředí nebo modifikovat složení atmosféry, představuje zásobárnu pitné vody či „archiv“ přírodního prostředí.

Tato bakalářská práce „Mineralogické formy, rozšíření a význam sladkovodního ledu“ popisuje nejčastější formy sladkovodního ledu, jeho rozšíření a význam na zemském povrchu i mimo něj. Uvádí nás do problematiky aktuálního směru výzkumu ledu a přibližuje některé stále otevřené otázky. Část práce se také věnuje druhům ledu vyskytujících se na území České republiky.

**Klíčová slova:** mineralogie; sladkovodní led; sníh; permafrost; ledovec; led v ČR.

## Abstract

**Title:** Mineralogical forms, distribution and importance of freshwater ice

**Author:** Tomáš Vrbický

Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources

**Supervisor:** RNDr. Radek Mikuláš, DSc.

**Abstract:** Ice is one of the fundamental components of the environment. It covers the land surface and significantly affects our lives both on a local and global level. It is the subject of considerable scientific interest, particularly in terms of its role in climate change - the ice is capable to release pollutants into the water environment or modify the composition of the atmosphere, represents a drinking water supply or archive of the natural environment.

This thesis „Mineralogical forms, distribution and importance of freshwater ice“ describes the most common forms of freshwater ice, its distribution and importance on the Earth surface and beyond. It introduces us to the issue of current direction of ice researching and approaches some open questions. Part of this work presents types of ice occurring in the Czech Republic.

**Keywords:** mineralogy; freshwater ice; snow; permafrost; glacier; ice in CR.



# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	1
<b>2 Formy ledu</b> .....	2
2.1 Hexagonální .....	3
2.2 Kubická .....	4
2.3 Amorfni .....	5
<b>3 Terestrický led</b> .....	8
3.1 Ledovce .....	9
3.1.1 Tok ledovců .....	9
3.1.2 Povrchové a vnitřní tání (ablace) ledovců .....	10
3.2 Sníh .....	10
3.2.1 Sněhové vločky .....	11
3.2.2 Chemie sněhu .....	12
3.2.3 Firn .....	12
3.3 Permafrost .....	13
3.4 Další formy .....	16
<b>4 Extraterestrický led</b> .....	17
4.1 Laboratorní studia astrofyzikál- ních ledů .....	18
4.2 Kometární led .....	18
4.3 Permafrost na asteroidech .....	20
<b>5 Přírodní sladkovodní led v ČR</b> .....	22
5.1 Hladinové ledy .....	22
5.1.1 Hladinové ledy na tekou- cích vodách .....	22
5.1.2 Hladinové ledy na stoja- tých vodách .....	24
5.2 Dnové ledy ve vodních tocích .....	24
5.3 Sníh .....	26
5.4 Ledopády .....	27
5.5 Jeskynní led .....	29
5.6 Stopy po permafrostu .....	31
5.7 Další hydrometeorologické for- my ledu .....	31
5.7.1 Kroupy .....	32
5.7.2 Námrazové jevy .....	33
<b>6 Diskuze a závěr</b> .....	36
<b>Literatura</b> .....	38
<b>Další zdroje</b> .....	41
<b>A Obrázky</b> .....	43
<b>B Tabulky</b> .....	44

## Tabulky

**B.1.** Objekty Sluneční soustavy a led ... 44

## Obrázky a grafy

2.1.	Fázový diagram H <sub>2</sub> O .....	2
2.2.	Krystalická struktura ledu Ih .....	3
2.3.	Koordinace molekul vody v ledech .	3
2.4.	Amorfní a krystalická struktura pevné látky .....	6
3.1.	Morfologie sněhových vloček .....	11
3.2.	Koloběh uhlíku v permafrostu ....	14
3.3.	Termokarstová jezera .....	15
4.1.	Asteroid Itokawa .....	20
5.1.	Led hladinový .....	23
5.2.	Led dnový .....	26
5.3.	Ledopády .....	28
5.4.	Vznik kroupy .....	32
A.1.	Suncups .....	43
A.2.	Penitentes .....	43

# Kapitola 1

## Úvod

Voda je jednou z nejvýznamnějších složek přírodního prostředí, základním faktorem pro existenci života. Vodu lze za normálních atmosférických podmínek nalézt ve skupenství kapalném, plynném i pevném. Díky svým specifickým vlastnostem a hojnému výskytu na Zemi nemá na naší planetě ve srovnání s ostatními látkami obdoby. Při poklesu teploty pod bod mrazu, což je 0 °C za běžného atmosférického tlaku, voda přechází do pevného skupenství a vzniká led. Led je hmota, která se chová jako nerost, a při jeho větším nahromadění může dokonce tvořit specifickou horninu. (Dvořák 2008).

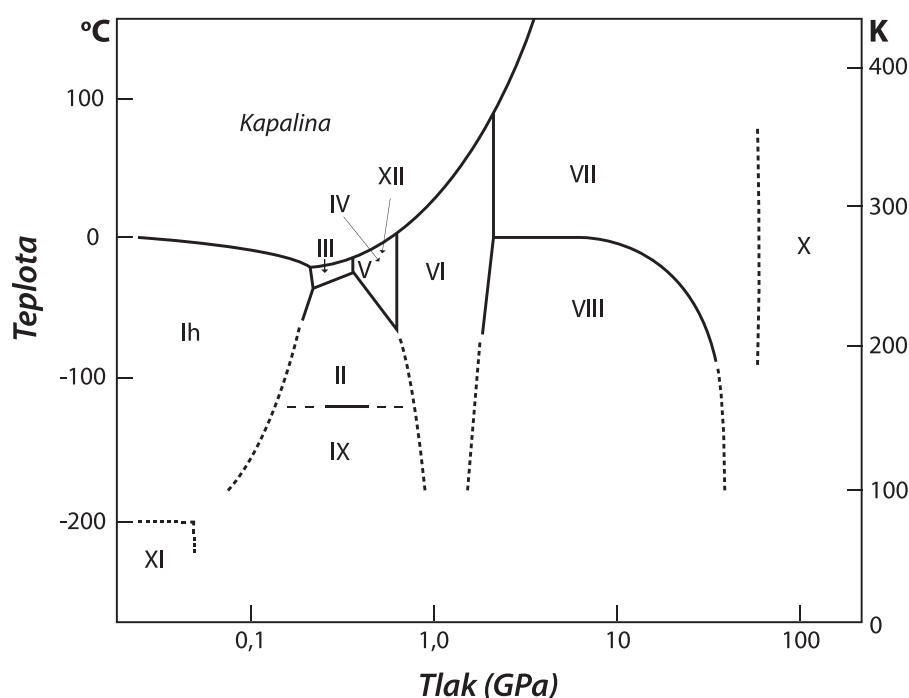
Obdobně jako pojmy „atmosféra“ či „litosféra“ označují určité složky životního prostředí, lze povrch Země, kde se voda nachází v pevném skupenství, označit jako „kryosféra“. Ta pokrývá malou ale pro environmentální pochody významnou část zemského povrchu. Je součástí pevnin i moří a podstatnou roli hraje i v atmosféře Země. Voda v pevném skupenství, tedy led, tvoří též nedílnou součást mnoha vesmírných těles naší sluneční soustavy a bezpochyby i mimo ni. Led je dynamickou složkou, není stálý a vykazuje proměnlivé vlastnosti v závislosti na tlakových a teplotních podmínkách.

Tato práce si neklade za cíl podrobně charakterizovat fyzikální a chemické vlastnosti ledu ani popis jeho veškerých interakcí s okolním prostředím. Toto téma by bylo velmi rozsáhlé a věnují se mu jiné pozoruhodné knihy (Hobbs 1974, Petrenko a Whitworth 1999). Cílem tak bylo vytvořit souhrn základních vlastností a charakteristik mineralogických forem sladkovodního ledu, poukázat na jeho význam a rozšíření v přírodním prostředí a to jak ve světovém měřítku, tak i na území ČR. V kapitole 2 je uveden popis nejrozšířenějšího druhu ledu (hexagonálního) společně s jeho dalšími možnými formami. Kapitola 3 se věnuje otázce terestrického ledu, následující kapitola pak ledu extraterestickému a kapitola 5 přírodnímu sladkovodnímu ledu v České republice.

## Kapitola 2

### Formy ledu

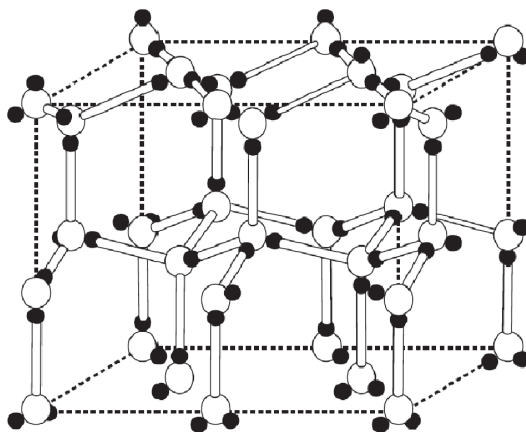
Při změnách okolních tlaků a teplot led není stabilní. Prochází mnoha formami, i když na zemském povrchu se obvykle setkáme jen s ledem obyčejným (hexagonálním). Tímto ledem jsou tvořeny veškeré sněhové srážky, ledovce i ostatní ledy na zemi, o čemž svědčí například šesteréčná symetrie ledových krystalů - sněhových vloček. Při dosažení podmínek jiných, než jsou běžné na Zemi, mohou vznikat další formy ledu. Měnící se tlak a teplota vyvolávají změny z jedné formy do druhé, jak naznačuje fázový diagram na obrázku 2.1. Trojný bod, kde mohou v rovnováze koexistovat tři fáze, je 273,16 K a 611,7 Pa. Teplota tání za atmosférického tlaku dosahuje hodnoty 0 °C (Barlels-Rausch 2012). Převážná část těchto minerálních forem je stabilní v daném rozsahu teplot a tlaků. Většina těchto struktur je však pozorována jen v laboratorních podmínkách nebo se jen předpokládají. V následující části se budeme věnovat přiblížení a charakteristice ledu hexagonálního, tj. nejběžněji se vyskytující formě ledu na Zemi.



**Obrázek 2.1.** Fázový diagram pevného a kapalného skupenství ledu (Trojný bod a koexistence kapalného a plynného skupenství je mimo diagram vlevo). Římské číslice vyjadřují jednotlivé krystalické fáze ledu. Zdroj: (Barlels-Rausch 2012). Vlastní zpracování.

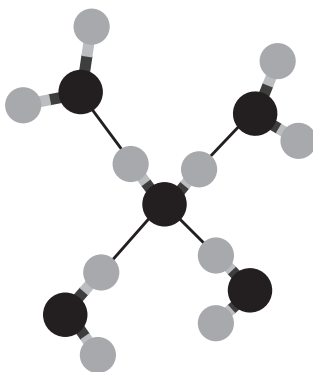
## 2.1 Hexagonální

Za běžných atmosférických podmínek voda mrzne při teplotě pod bodem mrazu. V rozmezí od 0 °C asi do -80 °C jsou molekuly H<sub>2</sub>O uspořádány do pravidelné struktury. Vzniklá krystalická látka s hexagonální symetrií se označuje jako led Ih, nebo „normální led“. Mechanické vlastnosti ledu jsou závislé na jeho struktuře, jedná se o látku polykrystalickou (Furukawa 2011).



**Obrázek 2.2.** Krystalická struktura ledu Ih. Zdroj: (Fletcher 1970). Vlastní zpracování.

Ačkoliv je hexagonální led (Ih) pouze jednou z nejméně 13 krystalických fází, které byly pozorovány za různých teplot a tlaků, má pro nás největší význam. Díky krystalografickým studiím neutronové difrakce už dnes známe molekulární struktury všech těchto fází (Barlels-Rausch 2012). Molekuly vody jsou uspořádány do jednotlivých buněk, které vzájemně navazují a periodicky se opakují a tvoří tak krystalickou mřížku s hexagonální symetrií. Obrázek 2.2 ukazuje krystalickou strukturu ledu Ih. Na strukturu je možné pohlížet jako na soubor vrstev tetraedricky propojených molekul vody, které se opakují ve směru osy c. Každá molekula poskytuje vodíkové vazby dvěma sousedním molekulám a od dvou dalších pak sama dvě vodíkové vazby přijímá (Obr. 2.3). Každý atom kyslíku má čtyři nejbližší sousedy v rozích čtyřstěnu a prostřednictvím vodíkové vazby jsou k sobě navzájem kovalentně připojeny (Furukawa 2011).



**Obrázek 2.3.** Lokální tetraedrání koordinace molekul vody v ledech. Každá molekula přijímá dvě vodíkové vazby a dvě předává sousedním molekulám. Zdroj: (Barlels-Rausch 2012). Vlastní zpracování.

V ledu Ih se O-O-O- úhly blíží ideálnímu úhlu zhruba  $109^\circ$ . S tím, jak stoupá tlak, se molekuly musí znovu uspořádat, aby měly menší objem. K tomu zpočátku dochází jak změnami struktury dané sítě, tak rostoucím zakřivením O-O-O- úhlů (Barlels-Rausch 2012). Například v ledu II se tyto úhly pohybují v rozsahu  $80-129^\circ$ . Budeme-li dále zvyšovat tlak, dojdeme k bodu, ve kterém redukovaný objem nelze doplnit pouhým zvýšením zakřivení vodíkové vazby. Molekuly vody vytvoří vzájemně se prostupující síť, jak je tomu u ledu VII, který v podstatě sestává ze dvou vzájemně se prostupujících mřížek kosočtvercového tvaru (Barlels-Rausch 2012). Elektrická vodivost téměř všech forem hexagonálního ledu (sněhu, ledovcového ledu aj.) je zanedbatelná. Výjimkou je mořský led, u něhož dochází k zatékání mořské vody do pórů a tam se mohou vytvořit izolované kapsy vysoce slané vody (Nobes 2001). To už bychom však odbíhali k tématu mořského ledu, což není cílem této práce. Elektrické vlastnosti ledu jsou zvyšovány v závislosti na příměsích zachycených do ledové mřížky. Význam pro jeho elektrické vlastnosti má také jeho kyselost. Tohoto faktoru se používá při zkoumání ledových jader. Lze tak například detekovat sopečné erupce v minulosti, které zvýšily kyselost atmosféry, a tyto změny byly uloženy v ledu (Xiao 2011).

Hustota ledu je asi  $0,92 \text{ g cm}^{-3}$ , zatímco vody je asi  $1,00 \text{ g cm}^{-3}$  při teplotě  $0^\circ$ . Nižší hustota ledu vychází z jeho mineralogické struktury (Lister a kol. 1995). Praktickým příkladem této skutečnosti jsou například ledové kry, které díky nižší hustotě plavou na vodní hladině.

Led je typický svými mechanickými vlastnostmi. Asi nejvýznamnější a dobře známou vlastností ledu je jeho tvárnost. Pokud je deformace ledu vyvolaná rychle, vede ke křehké deformaci, pokud je ale pomalá, deformace se projeví plasticky. Plastická deformace je velice důležitým jevem, na jehož základě dochází k toku ledovců a formování ledových štítů (Furukawa 2011).

Kromě výše uvedeného je možné na Zemi v přirozeném prostředí (v její atmosféře) pozorovat též led kubický a ojediněle také led amorfní (v oblastech s nejnižšími teplotami) (Barlels-Rausch 2012). Tyto formy budou blíže popsány v následujícím textu.

## 2.2 Kubická

Kubický led, tj. led Ic, je metastabilní skupenství ledu s neuspořádanou vodíkovou strukturou. Je významný pro vědecký výzkum atmosféry. Protože špatně krystalizuje, zaujímá postavení na hranici mezi krystalickými a amorfními ledy. Může se formovat z mnoha výchozích fází a prostředí, například z amorfních ledů, vysokotlakých ledů, vodní páry nebo pomocí extrémního ochlazování (Kohl et al., 2000 in (Barlels-Rausch 2012)). Může tak hrát roli v jednotlivých přechodech v rámci komplexního fázového diagramu vody. Zatímco led Ih představuje termodynamicky stabilní fázi, k formování ledu Ic dochází v důsledku jeho nižší nukleační bariéry. Jeho ideální struktura se typologicky váže ke křemičité struktuře krystobalitu (zatímco šestihranný led se váže ke struktuře tridymitu). Tato struktura ovšem dosud nebyla zkoumána experimentálně. Po první identifikaci ledu Ic (König, 1943, Shallcross a Carpenter 1957 in (Barlels-Rausch 2012)) zjistili, že jeho

difrakční vzorek má šestihhranné komponenty, které byly mylně vykládány jako příměs ledu Ih. Byla učiněna řada pokusů jak tyto šestihhranné komponenty vysvětlit. Výsledkem těchto pokusů byl závěr říkající, že jde o postupný přechod od ledu Ic ke krystalickému ledu Ih.

Jednotlivé odlišné rysy difrakčního vzorku byly připsány narůstajícím zlomům, kombinovaných se zvětšením rozměrů částic. Neexistuje jen jeden led Ic, ale celá škála kubických ledů na různých stupních (ne)dokonalosti a o různých rozměrech částic. Obojí narůstá jak z hlediska času, tak teploty. To se děje různým způsobem v závislosti na podmínkách počátečního formování. Nástroje pro vytváření modelů ledu Ic dnes umožňují studovat do podrobností procesy, které v nich probíhají (Barlels-Rausch 2012).

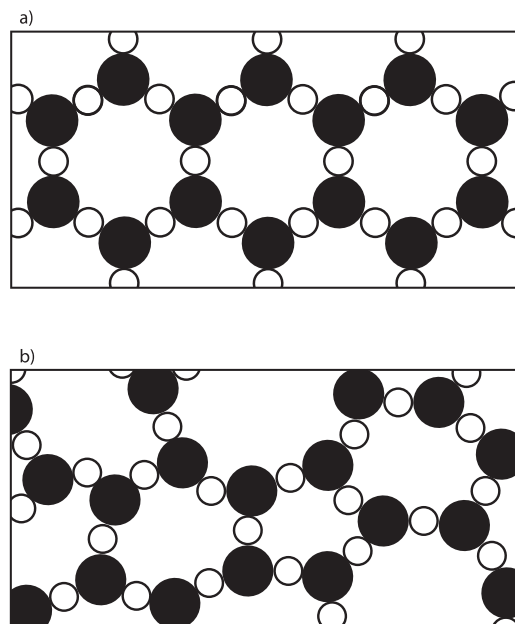
Za zmínku určitě stojí i zajímavá stavba ledu tvořená střídáním plátů kubického ledu s ledem hexagonálním. Tato struktura ledu se označuje jako led Isd. Led Isd hraje významnou roli pro pochopení struktur ledu, ve kterých jsou smíšené kubické a hexagonální ledy. Jedná se o formu ledu hojně se vyskytující v atmosféře a z tohoto důvodu je její pochopení důležité zejména pro letectví (Chaplin 2014b).

Ne všechny záhady spojené s ledem Ic však byly vyřešeny. Dosud není jasné, zda a do jaké míry je rozmístění mřížky ovlivňováno následky hromadících se zlomů nebo lokálního pnutí, které může vznikat v rozhraních mezi nanokrystaly ledu Ic. Molekulární geometrie ledu Ic, vznikající z krystalografické neuspořádanosti atomů kyslíku, je mnohem méně známa, než v případě ledu Ih. Protože mikrostruktura ledu, zejména její povrchové charakteristiky, má své atmosférické a astrofyzikální důsledky, bude třeba tuto otázku ještě více osvětlit. Hlavní podíl na jejím vyřešení lze očekávat od výzkumu rentgenového a neutronového rozptylu, kombinovaného s prací na elektronovém mikroskopu. Pokud jde o poznání způsobu, jakým se tento složitý materiál chová, je výzkum teprve na začátku a k jeho podrobnému pochopení je zatím daleko. Tajemství mnohostranné mikrostruktury ledu a jeho komplexní transformační kinetiky nelze odhalit jediným experimentem, jejich složitá povaha bude ještě vyžadovat dlouhodobou pozornost (Barlels-Rausch 2012).

## 2.3 Amorfní

Amorfní led dominuje v hlubinách mezihvězdného prostoru. Jedná se pravděpodobně o nejběžnější strukturu  $\text{H}_2\text{O}$  ve vesmíru jako celku (Debennetti, Stanley 2003). Nezbytným rysem všech krystalických struktur je fakt, že molekuly jsou uspořádány pravidelným opakujícím se způsobem. Formálně jsme schopni definovat základní buňku každé krystalické struktury a jejím nekonečným opakováním v trojrozměrném prostoru pak vytvořit strukturu celého krystalu. Pokud vznikne struktura bez pravidelného opakování základní buňky, nevzniká struktura krystalická, ale amorfní.

U mnoha kapalin platí, že pokud je dostatečně rychle ochladíme, molekuly nebudou mít dostatek času na to, aby se uspořádaly do vyvážené krystalické struktury, a může vzniknout nekystalická sklovina.



**Obrázek 2.4.** Dvourozměrné analogony a) krystalických a b) amorfních „sklovitých“ pevných látek tvořených trojnásobně koordinovanými základními molekulárními jednotkami. Zdroj: (Barlels-Rausch 2012). Vlastní zpracování.

Jako příklad může posloužit ochlazení kapalin na bázi oxidu křemičitého, které vytvoří sklovinu, jaká je nám důvěrně známa. Totéž může nastat i v případě vody – jsme schopni provést nekystalické uspořádání jejích molekul, pokud ochlazování bude opravdu velmi rychlé. Kromě ochlazování kapalných látek existují i jiné způsoby jak vytvořit nekystalickou formu ledu. Dnes všeobecně platí, že existují tři základní skupiny různých druhů amorfního ledu, které se vzájemně liší především hustotou a také metodami jeho přípravy.

- LDA (Low-density amorphous ice)

Do této skupiny jsou dnes zařazovány amorfní ledy ASW, HGW, LDA-I a LDA-II. LDA se mohou připravit zahřátím amorfního ledu s vysokou hustotou (HDA) těsně nad 120 K při atmosférickém tlaku (Loerting a kol. 2011).

- HDA (High-density amorphous ice)

Tato forma amorfního ledu s vysokou hustotou vzniká stlačením krystalického ledu Ih za tlaku cca 1 GPa, při teplotě 77 K. (Mišima et al., 1984). Vzhledem ke své výrazně vyšší hustotě  $1,15 \text{ g cm}^{-3}$  byla označena jako amorfní led vysoké hustoty (HDA).

- VHDA (Very-high-density amorphous ice)

Další forma ledu o velmi vysoké hustotě, amorfní led VHDA, byla objevena v roce 1996 (Mišima). Bylo zjištěno, že led HDA se stává hustší, pokud se zahřeje na teplotu 160 K při tlacích mezi 1 a 2 GPa a má hustotu  $1,26 \text{ g cm}^{-3}$  při okolním tlaku a teplotě 77 K (Mishima 1996).



Podrobnější charakteristika těchto forem je detailněji popsána na stránce: (Chaplin 2014a).

Ačkoli se dlouho předpokládalo, že atomární struktury tří forem amorfního ledu skupiny LDA vyrobených sice různým způsobem, ale vykazujících stejnou hustotu (ASW, HGW a LDA), jsou podobné, jejich strukturální identitu stanovily až techniky neutronové difrakce, zavedené během několika posledních let (Barlels-Rausch 2012). Struktury hustších forem HDA a VHDA jsou méně komplikované. Analýza počtu koordinací těchto ledů vždy ukazuje, že každý atom kyslíku je bezprostředně přiřazen k přibližně čtyřem sousedním. V kontrastu k formám vykazujícím nižší hustotu (například LDA), kde počet prvních sousedů zůstává na čtyřech, počet koordinací u HDA vzrůstá na pět a u VHDA dokonce na šest. Údaje o neutronech udávají, že každý kyslík vody se váže ke dvěma atomům vodíku, což potvrzuje, že máme síť čtyř koordinovaných vodíkových vazeb. Vyšší hustoty těchto dvou forem je dosaženo pomocí molekul, které se vyskytují dále od typické „centrální“ molekuly, se kterou netvoří vodíkovou vazbu (Barlels-Rausch 2012).

## Kapitola 3

### Terestrický led

Led pokrývající zemský povrch výrazně ovlivňuje naše životy jak na místní, tak globální úrovni. Je předmětem značného vědeckého zájmu, zejména z hlediska jeho role při klimatických změnách, z důvodu jeho významu jako zásobárny pitné vody, jako „archivu“ přírodního prostředí a je látkou, která je schopná uvolňovat znečišťující látky do vodního prostředí i modifikovat složení atmosféry.

Ledovce dnes pokrývají méně než 10 % zemského povrchu a toto množství se v geologickém čase výrazně mění. Kdyby ledové tabule v Antarktidě zcela roztály, hladina moře by stoupla o 57 m. V období největší rozlohy ledovců během čtvrtohor, tj. zhruba před 18 000 lety, byla hladina moře o 120 m níže než dnes. Způsobilo to uchování velkého množství ledu v ledovcích. Změnu zapříčinilo z valné části formování velkých ledových tabulí na severu Severní Ameriky a v Evropě. Svou roli sehrály ovšem i horské ledovce (Vaughan 2007).

Většinu ledu na zemském povrchu tvoří antarktické a grónské ledové tabule s 97 % zledovatělého povrchu a 99,8 % jeho objemu (Ohmura a kol., 199 in (Barlels-Rausch 2012)). Vzhledem k jejich obrovské masě reagují na změny přírodního prostředí velmi pomalu. V případě zápa-doantarktické ledové tabule je doba reakce velice dlouhá (řádově tisíce let), nicméně má velký potenciál k tomu, aby ovlivňovala hladinu moře (Marshall 2007). Zdá se, že mnohem menší ledovce a ledové špice na horských svazích (známé též jako alpské ledovce), reagují na takovéto změny velmi citlivě, což z nich díky rozsáhlému výskytu činí vhodné kandidáty na funkci klimatických indikátorů. Z hlediska krátkodobého zvýšení hladiny moře jsou středem zájmu ledová pole a ledové špice v Patagonii, na Islandu, Aljašce a v Arktidě. Jsou dost malé na to, aby reagovaly na klimatické změny v rozmezí desetiletí, a zároveň dost velké na to, aby hrály významnou roli při změně výšky hladiny moře (Marshall 2007). Přímý vztah mezi výškou hladiny moře a objemem ledovců vyvolal intenzivní výzkum ledovců během globálního oteplování. Kromě toho, led a sníh představují pozitivní zpětnou vazbu v klimatickém systému Země. Množství ledové pokrývky určuje povrchové albedo (poměr množství odraženého elektromagnetického záření k množství záření dopadajícího) a tím i rovnováhu záření. Výška ledové tabule ovlivňuje geometrii vln horní atmosféry, tající voda pak může ovlivňovat globální cirkulaci oceánů (Andrews, 2007 in (Barlels-Rausch 2012)). Nejdůležitějším procesem je tání povrchu ledu a pohyb ledové masy (Marshall 2007).

## 3.1 Ledovce

Ledovec je pevná, hustá a kompaktní ledová masa pokrývající povrch země. Tato masa je formována prostřednictvím rekrystalizace sněhu a v důsledku zatížení vlastní vahou se pohybuje vpřed. Ledovec se utváří po mnoho let akumulací sněhu v oblastech, kde množství nahromaděného sněhu převyšuje množství sněhu roztátého. Ledovec je dynamické ledové těleso, jež se skládá ze tří základních zón: zóny akumulace, zóny ablace a čela ledovce.

### 3.1.1 Tok ledovců

Tok ledovců je důsledkem tíhových a pohybových vlastností ledu. U ledovců pevně spojených s podkladem jej lze úspěšně matematicky popsat (Marshall 2007). Sklon a hmotnost ledu vyvolávají v mase potřebné smykové napětí. Pohyb ledu je tímto vnitřním smykovým napětím, vedoucím až k tečení nebo plastické deformaci, ovládan. Dvěma klíčovými faktory, které určují tlak pohánějící tok ledovce, jsou tloušťka ledu a sklon povrchu (Lawson, 2007 in (Barlels-Rausch 2012)). Rychlost pohybu ledových mas může být ovlivněna i dalšími faktory, jako je například snížení tření mezi ledovcem a podkladem vlivem kapalné vody (Kumar 2011).

Profil rychlosti toku ledovce je charakterizován integrací smykové deformace ve vztahu k hustotě ledovce a je ovlivňován teplotou, obsahem vody, přítomností nečistot a krystalickými vlastnostmi. Kromě výše uvedených faktorů má na chování toku ledovce velký dopad i charakter podkladové horniny. Podkladová hornina se sklonem k erozi urychluje tok (Lawson, 2007 in (Barlels-Rausch 2012)). Měkké plastické sedimenty nasycené vodou zvyšují bazální skluz a vedou tak rovněž k rychlejšímu pohybu ledovců (Kumar 2011). Na tvrdé podkladové hornině pak drsnost negativně ovlivňuje míru sesuvu. Sesuv přes drsný podklad doprovází dva mechanismy: 1. nepatrné výčnělky na podkladu vyvolávají soustředěný tlak v ledu a zvyšují objem plastického toku a ledových proudů kolem těchto výčnělků, 2. led v sousední horní části výčnělků je vystaven vyššímu tlaku, který snižuje teplotu tání a způsobuje, že některý led taje, a vespu do dochází ke konverzi a tající voda mrzne. Tento proces se nazývá opětovné mrznutí. Oba procesy způsobují sesuv podkladu. Ačkoli v obecné rovině je proces sesuvu ledovců přes podkladovou horninu jasný, pro vysvětlení nejednotné viskozity ledovce a vlivu na podkladovou horninu je třeba dalšího výzkumu. Kromě vlastního pohybu ledových mas po podloží dochází i k pohybu internímu, jež může nastat v jakékoli části ledovce. Takovéto pohyby jsou vázány na zlomy a plochy poruch přímo uvnitř ledových mas. Jednotlivé proudy ledu mohou po takovýchto plochách stékat rychleji nebo naopak pomaleji než okolní ledové proudy. Nejvýznamnější částí pro tyto pohyby je čelo ledovce, kde dochází i k překocení jednotlivých proudů (Kumar 2011). V současné době probíhají satelitní mise se speciálním zaměřením na kryosféru. Díky nim by měli být lépe popsány některé procesy a navíc se od nich očekává, že poskytnou přesnější údaje s širším záběrem na antarktický kontinent.

### ■ 3.1.2 Povrchové a vnitřní tání (ablace) ledovců

Fyzika tání sněhu a ledu v ledovcových tabulích je dobře známa, nicméně v důsledku prostorové nesourodosti není snadné ji v jednotlivých modelech kvantifikovat (Marshall 2007). Navíc, ne všechna tající voda z ledovce odteče; může znovu zmrznout a proniknout do hlubší a chladnější sněhové masy. Toto opětovné zmrznutí může vést k podstatnému růstu ledové tabule zespodu. Povrch sněhu přijímá teplo ze slunečního záření o krátké vlnové délce, ze záření z mračen nebo vodní páry o dlouhé vlnové délce, z turbulencí teplého vzduchu, z vedení tepla směrem vzhůru z teplejších dolních vrstev, z tepla uvolněného kondenzací rosy nebo jinovatky a z mrznutí tekuté vody. Tepla ubývá díky turbulentnímu přechodu na studenější vzduch, dále díky teplu potřebnému k vypařování, sublimaci nebo tání ledu a kvůli vedení tepla směrem dolů do dolních vrstev. Největším zdrojem tepla je běžné sluneční záření, ačkoli jeho většina se odráží od sněhového povrchu a většina ubylého tepla se zužitkuje na tání ledu. Nelze se domnívat, že sníh nebo led tají přímo úměrně s teplotou; většinu přenosu tepla z atmosféry určují struktura větru a turbulence v blízkosti povrchu. V ledovcích a sezónním sněhu může dlouhodobá ablace vést k povrchovým jevům, označovaným anglicky "suncups" a "penitentes" (Barlels-Rausch 2012).

"Suncups" jsou typické kvazi-periodické struktury, které se formují na sněhových polích po dlouhodobé ablaci v důsledku vystavení slunečním paprskům. „Šálky“ vypadají jako mělké parabolické prohloubeniny, oddělené ostrými špicemi jak je vidět na Obr. A.1 v příloze. Formují se proto, že dutiny zachycují sluneční světlo účinněji, než vrcholky (špice).

"Penitente" je sloupec sněhu, který má širokou základnu a směrem k vrcholu se postupně zužuje. Svě španělské jméno dostal proto, že se údajně podobá místu, odkud se „kající mniši“ v bílých róbách vydávají na pouť. Penitenty se formují v létě na ledovcích a sněhových polích ve velkých výškách. Obr. A.2 v příloze ukazuje jejich typické pole (Barlels-Rausch 2012).

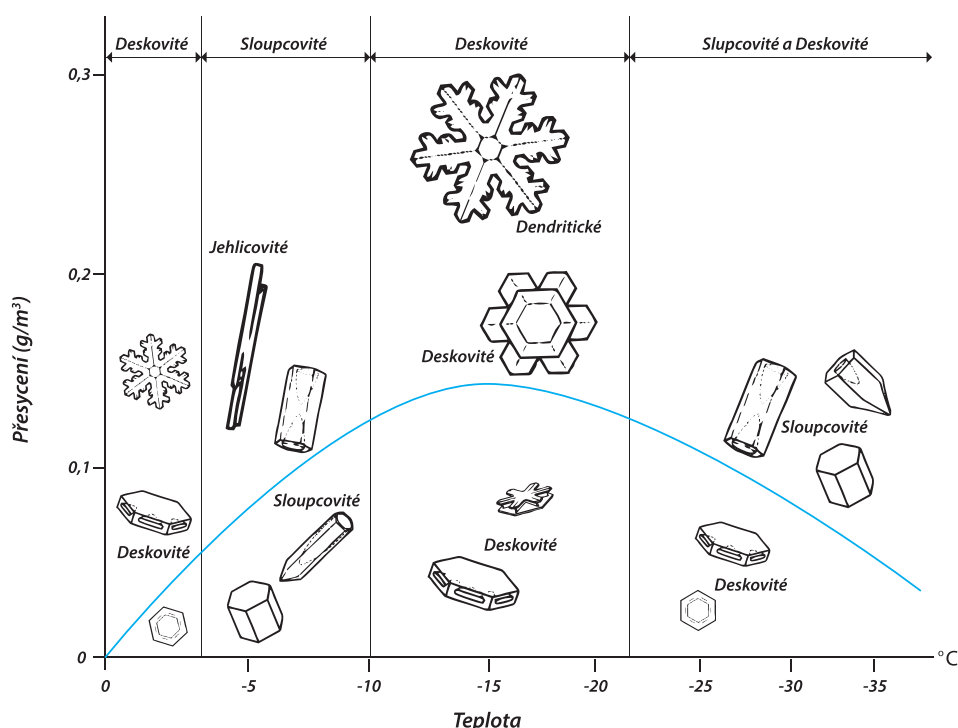
## ■ 3.2 Sníh

Sníh je forma srážek tvořená ledovými krystaly, jež mohou nabývat různých tvarů a velikostí. Jedná se o hydrometeor tuhého skupenství, vypadávající z mraků. Po dopadu na zemský povrch s teplotou bodu mrazu a nižší vytváří sněhovou pokrývku nebo poprašek (Monroe 1993). V porovnání s vodou je jeho hustota menší, přičemž nejnižší je u čerstvě napadaného sněhu. Jakmile vločky dopadnou na zem, nastává u nich proces transformace, který se projevuje jejich růstem nebo rozpadem. V oblastech, kde se sníh udrží po celý rok, se sněhové vločky v průběhu času mění ve firn a následně z firnu může vznikat ledovcový led (Singh 2011). Sníh je termodynamicky aktivní látka vykazující atypické chování v blízkosti teploty tání a neustále prochází metamorfózou. Ze strukturního hlediska jde o zrnitý materiál, u kterého snadno dochází ke kompakci vlivem soudržnosti mezi zrny ledu, za vzniku porézní struktury. Unikátní vlastností sněhu je jeho vysoká stlačitelnost. Jakmile na sníh napadne další vrstva, dochází pod hmotností překrývajícíchho sněhu ke kompakci materiálu a rekrystalizaci ledových zrn (Singh 2011). V mnoha částech světa je sníh

primárním zdrojem vody. Sníh jakožto ekvivalent vody je předmětem velkého zájmu vodohospodářů. Je také důležitým jevem pro rekreační činnosti, může však způsobit i značné škody nebo ztráty na životech vlivem lavin či narušením statiky staveb (Singh 2011).

### 3.2.1 Sněhové vločky

Sněhové vločky, tj. sněhové krystaly, jsou jednotlivé krystaly ledu, které rostou z vodní páry. Tvoří se v atmosféře, odkud jsou v podobě sněžení transportovány na zemský povrch (Libbrecht 2011). Nabývají nejrůznějších podob, často se vyznačujících svým jedinečným tvarem, díky čemuž jsou od nepaměti zdrojem značné zvědavosti a předmětem vědeckého zájmu.



**Obrázek 3.1.** Diagram ukazuje morfologie sněhových vloček v závislosti na přesycení podchlazené vody a teplotě. Teplota určuje, zda vločky rostou do tvaru sloupců nebo destiček, zatímco přesycení ovlivňuje složitost struktury. Zdroj: (Libbrecht 2005). Vlastní zpracování.

U mnoha vzorků je možné vidět různé druhy složitých krystalů, zachovávajících si symetrii. To je způsobeno citlivostí růstu krystalů sněhu na teplotě a přesycení. Když krystal vzniká, dochází nejprve k nukleaci uvnitř mraku. Krystal je zpočátku formován do tvaru jednoduchých šestihránných destiček. Vlivem difúze dochází k větvení, čímž se krystal zvětšuje. Na vrcholech šestiúhelníků pak dochází k rychlejšímu růstu částic, než na jejich hranách. Takovýto efekt se nazývá Mullins-Sekerka instability (Saito, 1996; Langer, 1980 in (Libbrecht 2011)). Nedojde-li k tomuto efektu, částice přirůstají stejně rychle na hranách i vrcholech krystalu, což vede ke vzniku vloček v podobě makroskopických šestihránných destiček (Libbrecht 2011). Růst sněhových krystalů je tak

obvykle ovlivněn propojením kinetiky a difúze molekul vody ve vzduchu. Růst ledu je velice citlivý na procesy v okolním prostředí. Negativní vliv na růst krystalů má především vzájemné srážení ledových krystalů mezi sebou nebo kolize s kapkami vody a další procesy probíhající při turbulentních pohybech sněhu v atmosféře. Výsledkem toho je jedinečný tvar každé sněhové vločky.

Morfologie sněhových vloček byla sestavena na základě pozorování růstu krystalů v závislosti na okolní teplotě. Následující diagram se vztahuje na sněhové krystaly rostoucí na vzduchu při tlaku 1 bar, takže se používají ke klasifikaci přírodních sněhových krystalů.

### ■ 3.2.2 Chemie sněhu

V minulosti se sněh považoval za pouhý „pasivní“ pokryv zemského povrchu, tvořený zmrzlou vodou. Dnes již víme, že zemský povrch, sněh a atmosféra na sebe působí a zásadním způsobem se navzájem ovlivňují. Zvýšené hladiny oxidu dusnatého a zoxidovaných organických látek v ovzduší, kde se vyskytuje sněh, a vysílání emise halogenů a peroxidu vodíku ze sněhu představují jen několik příkladů vzájemného působení sněhu a ovzduší (Barlels-Rausch 2012). Důsledky tohoto vzájemného působení, vedoucí ke změnám a modifikacím atmosférických plynů a složení sněhu, jsou velice rozsáhlé a komplikované. Správné pochopení těchto procesů je klíčové pro komplexní výklad údajů z ledového jádra, coby archivu klimatu a přírodního prostředí. Díky v ledu uchovaným stopám po přenosu znečišťujících látek do sněhu v dané době dnes můžeme čerpat mnoho informací o historii naší planety. V dnešní době máme mnoho poznatků o těchto procesech, avšak stále zůstává mnoho otázek otevřených. Kvantitativní identifikace a popis jednotlivých procesů, které přispívají k interakci ovzduší se sněhem, jsou cílem soudobého výzkumu. Vyřešení všech otázek nebude snadným úkolem. Rád bych zde uvedl několik příkladů řízených laboratorních studií a terénních průzkumů, jejichž cílem je vysvětlit současný vývoj a nadhodit některé otevřené otázky. Jedná se o práce Abbata (2003), Dominého a kol. (2008), Dominého a Shepsona (2002), Grannase a kol. (2007), Huthwelkera a kol. (2006) Simpsona a kol. (2007) a Steffena a kol. (2008) jak uvádí Barlels-Rausch (2012).

### ■ 3.2.3 Firn

Firn je hmotou tvořící přechod mezi sněhem a ledem. Vzniká za situace, kdy dojde k dostatečně velkému nahromadění sněhu a následné metamorfóze. Při této metamorfóze napadaný sněh rekrystalizuje a v důsledku vytlačování vzduchových bublin dochází k jeho kompakci, čímž vzniká firn. Pokud tato přeměna dále pokračuje vznikne ledovcový led. Rychlost tohoto procesu závisí na akumulaci rychlosti a teplotě. U ledovců mírného pásu je firn definovaný jako sněh, který pře-trval alespoň přes jedno období tání (léto). V polárních oblastech, tam kde nedochází k tání sněhu, se firn nachází převážně pod sněhovou pokrývkou. Na povrchu se vyskytuje jen v oblastech, ve kterých lze pozorovat nízkou akumulaci, jako například na antarktických náhorních plošinách. Vrstva firnu může být mocná od několika cm až po stovky metrů. Glaciologové a klimatologové

využívají ledových jader ke studiu minulosti klimatu. Obvykle vycházejí z analýzy struktury a chemie ledu, avšak například obsahy plynných inkluzí se zkoumají především z firnu, neboť díky jeho nekompaktnosti atmosférický vzduch proniká do hloubky několika desítek metrů (Obbard a kol. 2011).

### 3.3 Permafrost

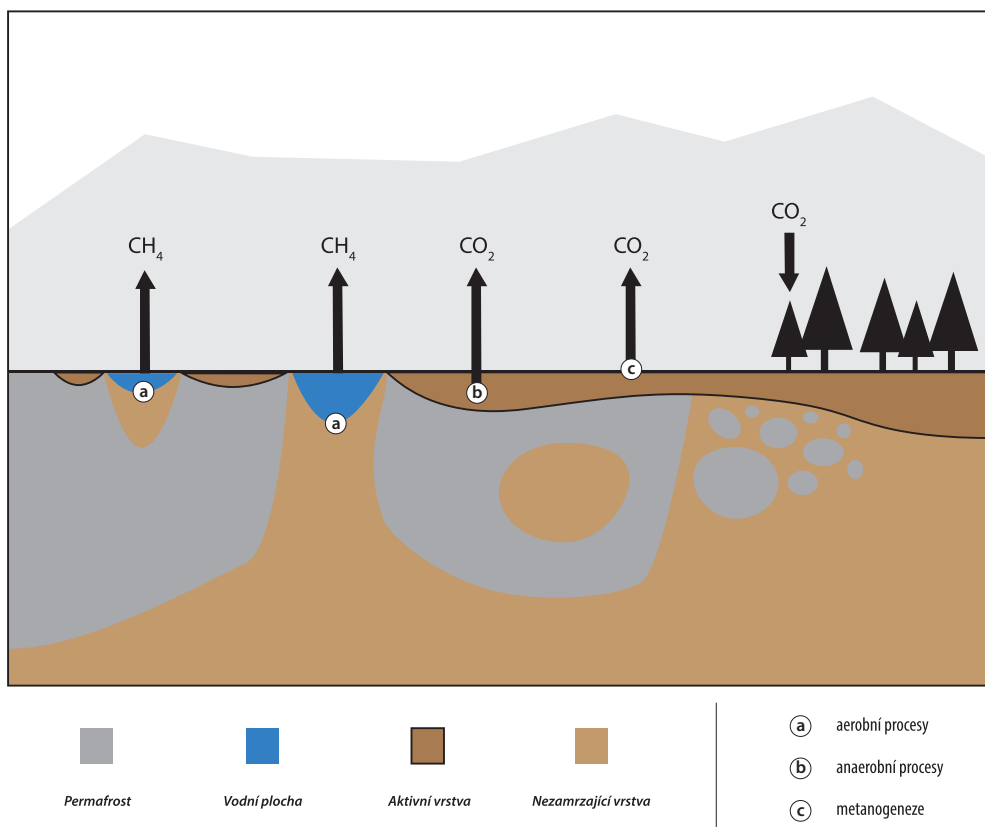
Mluvíme-li o trvale zmrzlé půdě – permafrostu, je řeč o významném kryosférickém jevu, který je předmětem rozsáhlých výzkumů. Pojem permafrost je označení pro půdu nebo horninu, jejíž teplota zůstává na hodnotě nebo pod hodnotou bodu mrazu po dobu nejméně dvou let. Je definován na základě teploty. Z toho vyplývá, že všechny trvale zmrzlé půdy patří pod permafrost. Ne všechny permafrost však musí být trvale zmrazen. Permafrost zahrnuje trvale zmrzlé půdy, ne však ledovce nebo povrchové vody s teplotou trvale pod bodem mrazu. Tloušťka permafrostu se může pohybovat v rozmezí 1 až 1 000 metrů (Harris 1988).

Permafrost se nachází převážně na severní polokouli. Radek Mikuláš (2005) uvádí, že souvislá plocha permafrostu sahá v Eurasii zhruba od území řeky Pečory do Pečorského moře k Norilsku na Tajmyru, tam se hranice stáčí na jihovýchod k Bajkalskému jezeru a přibližně na úrovni 55° severní šířky pokračuje k Ochotskému moři. Na severoamerickém kontinentě je hranice souvislého permafrostu blízko 60° severní šířky při pobřeží Tichého oceánu a poblíž 50° při pobřeží Atlantického oceánu. Jižně od této hranice je plocha trvale zmrzlé půdy nesouvislá-vázaná na vyšší nadmořské výšky či mrazové kotliny (Mikuláš 2005).

Permafrost by neměl být považován za trvalý, protože fyzické nebo antropogenní změny klimatu nebo prostředí mohou vést k jeho roztátí (Harris 1988). Jedním z hlavních dopadů na životní prostředí a lidstvo bezpochyby budou procesy vyvolané narušením stability půdy, vlivem tání permafrostu. Po celém území, kde k tomuto tání bude docházet, se výrazně zvýší množství svahových pohybů (sesuvů a bahnotoků) a v rovinatých oblastech vzniknou rozsáhlá území nezpevněné půdy (bažiny). V důsledku toho dojde ke zvýšené sedimentaci v říčních korytech. Cesty a silniční síť budou zásadně poškozeny a místy nastane jejich úplné zničení. Ohroženy budou rovněž stavby vybudované na permafrostu, u kterých bude hrozit destrukce vyvolaná nestabilitou podloží. Tyto škody budou značně rozsáhlé a budou mít citelný dopad na ekonomiku mnoha států, na jejichž území se permafrost nachází (Mikuláš 2005).

Dalším výrazným dopadem by mohl být poměrně nový fakt, že v permafrostu je uchováno velké množství plynných uhlovodíků. Obsah uhlíku v zemské atmosféře se zvýšil z cca 360 gigatun (Gt), během maxima posledního glaciálu, na cca 560 GT v preindustriální době, až na 730 Gt, což je aktuální hodnota. Tyto změny odrážejí přerozdělování mezi hlavními globálními rezervoáry uhlíku. Největší takové „nádrže“ jsou oceán (40 000 Gt), půda (1500 GT) a vegetace (650 Gt) (Zimov a kol. 2006). Permafrost je tedy další velký rezervoár uhlíku, bývá však jen zřídka zahrnován do analýz změn globálních rezervoárů uhlíku.





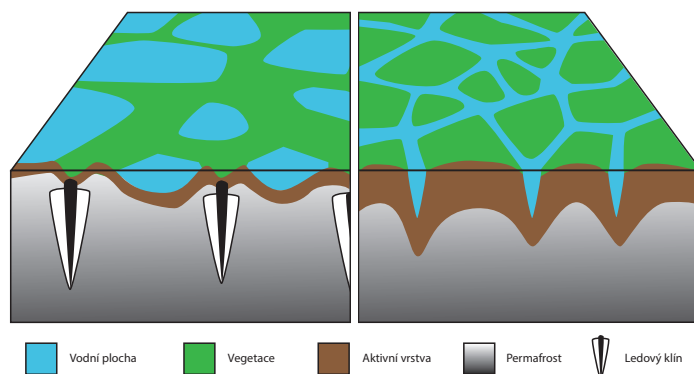
**Obrázek 3.2.** Základní biologické procesy koloběhu uhlíku v prostředí permafrostu. Zdroj: (Kemp 2013, Machens 2013). Vlastní zpracování.

Nejnovější studie poukazují na to, že nejnáchylnějšími oblastmi jsou permafrost příbřežní a podmořský. Největší „nebezpečí“ hrozí v oblasti severního pobřeží Sibiře, lemovaného rozsáhlým šelfem v délce okolo 7 000 km. Vlivem zvyšující se teploty mořské vody dochází k tání ledu, jenž zpevňuje břehy. Na pobřeží vznikají veliké útesy, které se vlivem narušení ledu bortí do moře. Teplá mořská voda také rozpouští podmořský permafrost. Uhlík je v permafrostu uložen v podobě metanu a metanových hydrátů v drobných organických zbytcích, bublinkách CO<sub>2</sub> v ledu a v některých dalších formách, ze kterých se může uvolnit (Cílek 2013).

Další velice citlivou oblastí je území pokryté druhem permafrostu zvaným Yedoma. Během doby ledové bylo uloženo velké množství zmrzlé spráše, z níž vznikl tento permafrost. Pokrývá více než 1 milion km<sup>2</sup> severní Sibiře a střední Aljašky v průměrné hloubce cca 25 m. Yedoma představuje reliktní půdy z prostředí tundro-stepního ekosystému, který pokrýval toto území během ledových dob. Tyto sedimenty obsahují málo humusu, který je charakteristický pro moderní ekosystémy regionu, ale obsahují velké množství kořenů trávy a zvířecích kostí (včetně mamutích). To vede k mnohem vyššímu obsahu uhlíku, než je typické pro většinu rozmrzlé půdy. Yedoma na Sibiři a Aljašce obvykle mají průměrný obsah uhlíku od 2% do 5%, přibližně 10 až 30 krát více, než je obvyklé množství uhlíku v nezmrzlé půdě (Zimov a kol. 2006). V reakci na oteplo-



vání klimatu již začal permafrost tát. Extrémní odhady říkají, že téměř všechny permafrost typu yedoma roztaje do konce 21. století (Lawrence, Slater 2005).



**Obrázek 3.3.** Vznik termokarstových jezer vlivem rozmrznání a zamrznání ledových klínů v permafrostu. Zdroj: (Agriculture, Canada 2013, Piel 2014). Vlastní zpracování.

V některých oblastech s permafrostem dochází vlivem rozmrznání ke změně topografie. Mohou tak vznikat útvary velice podobné krasovým, jako například kanály, propady, závrtý, jezera aj. Tyto projevy se označují jako termokarst. Termokarst vzniká v důsledku degradace permafrostu, jež je způsobena zvýšením teploty (Shur a kol. 2011). Když v permafrostu rozmrazí ledové klíny, tvoří se jezera. Termokarstová jezera často mění svou velikost a rozlohu. Při vytvoření deprese v terénu dojde k vyplnění těchto sníženin vodou, voda však může zamrznout a vytvořit opět ledové těleso v permafrostu. Pokud toto ledové těleso znovu roztaje a v okolí se vytvoří jiná deprese, voda se přesune a vytvoří nové jezero. Vzniknou-li tato jezera v oblastech s permafrostem obsahujícím velké množství uhlíku, dochází k jeho nahromadění ve formě organických zbytků. V jezerech nahromaděný uhlík rozkládají mikroorganismy za anaerobních podmínek a produkují metan, jak je naznačeno v obrázku 3.2. Ten je následně uvolňován do ovzduší především probubláváním. Při cyklu tání a mrznutí v těchto jezerech cca 30 % uhlíku rozloží mikrobi a přetvoří jej na metan. Jako účinný skleníkový plyn přispívá metan k oteplování klimatu. (Zimov a kol. 2006)

Permafrost je celosvětově významné úložiště uhlíku, které reaguje na klimatické změny jedinečným a velmi jednoduchým způsobem. Oteplováním jeho prostorový rozsah klesá, což způsobuje rychlé uvolňování uhlíku. S ochlazením se v permafrostu uhlík pomalu zadrží a může tak sloužit jako atmosférický záznam  $\text{CO}_2$  v minulosti. Je pravděpodobné, že v teplejším klimatu se uhlík z permafrostu stává součástí celkového rezervoáru uhlíku obsaženého v atmosféře. Faktory vyvolávající oteplování klimatu ve vyšších zeměpisných šířkách by měly být zmírněny, aby se minimalizovalo riziko potenciálně velkého uvolnění uhlíku, které by dále zvyšovalo rychlost oteplování klimatu. (Zimov a kol. 2006)

## 3.4 Další formy

Kromě výše uvedených se na zemském povrchu vyskytuje celá řada dalších forem ledu. Některé z těchto dalších forem, které se nachází na našem území, jsou popsány v následující kapitole.

Podle základního dělení jsou na Zemi ledy pozemní, atmosférické a mořské. Protože mořské ledy již nepatří mezi sladkovodní, nejsou předmětem zájmu této práce. Je však velmi obtížné toto téma zcela opominout a musíme jej zde alespoň zmínit, neboť interakce mezi mořským a sladkovodním ledem jsou velmi úzké. Důkazem toho je fakt, že i některé ledy na mořské hladině mohou být sladkovodního původu. Tak je tomu například u čel ledovců, která přes pevninu stékají až do moře. Čela takovýchto ledovců se označují jako "ice wall" (Organization 2014). Kromě ledovců a permafrostu jsou hlavními formami ledu na Zemi ledy říční a ledy stojatých vod, jejich tvorba zásadním způsobem ovlivňuje život a hospodářskou činnost člověka v oblastech jako je například Kanada nebo Sibiř. Další skupinou jsou ledy nacházející se na povrchu Země nebo i pod ním. Mohou vytvářet prostředí podobné krasu - tvoří skalní ledy, ledopády, rampouchy, ledové kaskády aj. Pokud voda zateče do podzemí a následně zamrzne, vytvoří se ledové jeskyně s pestrou výzdobou v podobě ledových povlaků, ledových záclon, rampouchů a mnoha dalších forem podobných krasovým útvarům.

Nejvýznamnějším typem ledu tvořícím se v atmosféře je pro nás sníh. Další formy ledu vznikající vlivem atmosféry se obvykle označují jako meteorologické. Do této skupiny řadíme například kroupy nebo námrazové jevy. Je tedy patrné, že vzhledem k množství forem ledu a jeho výrazným interakcím s okolím, je k pochopení ledů nutná spolupráce mnoha vědních disciplín jako jsou glaciologie, hydrologie, meteorologie, ale také geografie, technické obory a mnoho dalších.

## Kapitola 4

### Extraterestrický led

V astrofyzice jsou „ledy“ tvořeny různými sloučeninami, nejen  $H_2O$ , jako je tomu u ledu na Zemi. Z hlediska astrofyziky budí vodní led zájem díky jeho velkému množství ve srovnání s ostatními druhy ledu i schopnosti tvořit s ostatními „ledy“ směsi. Vodní led se vyskytuje v mnoha objektech sluneční soustavy. Kromě toho výskyt zmrzlých těkavých molekul v těchto objektech je v současné době předmětem diskuse. V Tabulce B.1 je uveden souhrn zjištěných a hypoteticky existujících druhů ledu, které se vyskytují na povrchu různých těles sluneční soustavy. V současné době podává sonda Messenger, obíhající Merkur, informace naznačující, že v polárních kráterech může být přítomen led (Schilling 2011). Jednou z nejspornějších otázek je možná přítomnost vody na měsíci. Mnoho odborných článků se na základě různých výkladů stávajících důkazů vyslovilo pro i proti. Poslední výsledky, založené na analýze úlomků měsíčního povrchu, dokazují přítomnost vody (Colaprete a kol., 2010 in (Barlels-Rausch 2012) ). Led ovšem dosud objeven nebyl. V minulosti se dokonce uvažovalo o možnosti, že by Země mohla mít kolem sebe tenký ledový prstenec, způsobující drobné klimatické změny. Současný výzkum (Hancock a Povenmire, 2010) je k existenci prstence coby tvůrce ledu skeptický. Bohaté na ledy jsou polární oblasti na Marsu (zejména na kysličník uhlíčitý a vodu); zmrzlé aerosoly obsahující tyto druhy, pak byly zjištěny i v jeho stratosféře (Mc Cleese a kol., 2010 in (Barlels-Rausch 2012) ).

Nedávno podaly dva týmy (Campins a kol., 2010, Rivkin a Emery, 2010) důkaz o vodním ledu na asteroidu 24 Themis, čímž oživily diskusi o možné cestě vody na Zemi z těchto objektů, hojně se vyskytujících v pásu asteroidů mezi Marsem a Jupiterem. Ještě později přispěli k této argumentaci Licardo a kol., když objevili vodu a organické látky na asteroidu 55 Cybele. Na satelitech ostatních planet (Jupiteru aj.) převládá vodní led. Europa a Enceladus vykazují zvrásněné povrchy a bloky vodního ledu, podobné ledovým povrchům na Zemi. Jak předpokládal Anisimov, prstence Saturnu a dalších těles Sluneční soustavy včetně těch, kterými disponují Jupiter, Uran a Neptun, tvoří z 95% právě vodní led (Heisselmann a kol., 2010 in (Barlels-Rausch 2012)). Určité druhy ledu byly objeveny i na Plutu a dalších tzv. trans-neptunských objektech, tvořených početnou skupinou malých objektů, které dosud nejsou dostatečně prozkoumány. Složení vzdálených objektů není dosud plně probádáno, nicméně údaje o odrazu infračervených paprsků ukazují na existenci vody a možná i metanových ledů. Voda byla nalezena jak v krystalickém tak amorfním skupenství (Barlels-Rausch 2012).

## 4.1 Laboratorní studia astrofyzikálních ledů

Jedním ze způsobů, jak učinit sondu do ledové frakce v částicích mezihvězdného media a složení a do fyzikálních vlastností kometárního ledu, je provádět laboratorní pokusy, kdy se modely vytvářejí a zkoumají za podmínek, které se podobají podmínkám v astrofyzikálních mediích, nebo jim dovolují dosažené výsledky alespoň přiblížit. Klasické experimenty spočívají v přípravě ledových vzorků, zejména sedimentací páry jednotlivých prvků a jejich směsí za kontrolovaných podmínek tlaku a teploty. Frakci v pevném skupenství lze studovat pomocí infračervených paprsků, Ramanovy spektroskopie a pozorováním pod elektronovým mikroskopem. Frakci v plynném skupenství pak lze sledovat pomocí hmotnostní spektrometrie. V některých případech lze ledy vystavit různým formám ozáření, které simulují sluneční nebo mezihvězdné emise, s cílem studovat fyzikálně-chemické procesy za pevného skupenství. Zahřívání komet v situaci, kdy se přibližují ke Slunci, se obvykle simuluje zahřátím vzorků, které mohou informovat o vzájemném působení látek v plynném a pevném skupenství (Barlels-Rausch 2012).

Zrnka prachu v mezihvězdném prostoru jsou běžně pokryta tenkým ledovým povlakem, formovaným při velmi nízkých teplotách daného mezihvězdného media (Tielens, 2005 in (Barlels-Rausch 2012)). Ledové povlaky lze najít na daném mezihvězdném mediu, v mračnu, na planetasimále (malém vesmírném tělese, které se vytvořilo při vzniku sluneční soustavy), asteroidech, kometách a jiných vesmírných objektech, na površích ledových planet a měsíců a na prstencích v atmosférách planet.

Od 60. let minulého století se vědci snaží morfologii ledového povlaku klasifikovat v závislosti na podmínkách jeho ukládání. Povlak je zkoumán na mnoha různých materiálech – keramice, polovodičích, kovech. Nedávno bylo zjištěno, že tytéž morfologie lze zjistit u všech ledových povlaků bez ohledu na velmi odlišné chemické vazby s materiály, na nichž je výzkum prováděn (Barlels-Rausch 2012).

Zvláště je třeba zmínit téma astrofyzikálních klatratických hydrátů, jakožto media pro uchování těkavých druhů krystalické vody. Zatímco většina klatrátů na Zemi existuje v podmínkách vysokého tlaku, u nebeských těles, kde je teplota mnohem nižší, není tento požadavek zásadní (Barlels-Rausch 2012).

## 4.2 Kometární led

Množství ledů obsahují komety. Komety jsou jedny z nejjednodušších těles, existují již od dob vzniku Sluneční soustavy. Jejich výzkum může poskytnout vodítko k pochopení procesů probíhajících ve vesmíru (Blake a kol. 1999). Kometární a trans-neptunské objekty (TNO) tak tvoří důležité téma studií o ledu sluneční soustavy. Komety a TNO poskytují neocenitelné informace o procesech, které probíhaly během počátečních stadií formování Sluneční soustavy. Protože tyto objekty mají vysoký obsah zmrzlých materiálů, má fyzika ledů tohoto prostředí podstatný význam.

Kometární ledy byly pozorovány po sublimaci během proletu komet v blízkosti Slunce. Jejich přítomnost je často „zamaskována“ povrchovými materiály. V hustých studených mračnecích jednotlivé druhy plynu mrznou na studené zrnité povrchy (s teplotou cca. 10K), mohou chemicky reagovat a formovat nové molekuly. Interakce s fotony a kosmickými částicemi vede k formování dalších molekul, jak bylo simulováno v rámci pokusů prováděných v laboratořích po celém světě. V těchto složitých systémech je termální vývoj velkou měrou závislý na jejich strukturálních charakteristikách, a proto nelze získávat spolehlivé informace bez využití vhodných termofyzikálních modelů (Barlels-Rausch 2012).

V dnešní době je hlavním problémem povaha komet. Dosud například neznáme ani makro ani mikrostrukturu kometárních jader a jejich skladebných elementů. Kometární jádra jsou tvořena žáruvzdornými materiály, obecně popisovanými jako prach, a směsí různých zmrzlých těkavých látek. Hlavní složkou je vodní led, smíšený s nepatrným množstvím více než 25 těchto látek. Druhou těkavou látkou je CO v rozsahu od 0,01% do 10%, v závislosti na typu komety. Další těkavé látky s podílem pod 1% jsou CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> a HCN. Jedním z nejdiskutovanějších a dosud nevyřešených problémů, týkajících se komet, je sublimace těchto látek. Přijmeme-li fakt, že sublimaci těkavých látek spouští jejich izolace, očekávalo by se, že různé těkavé látky by se měly objevovat v různých vzdálenostech od Slunce. Tato okolnost naznačuje, že vysoce těkavé složky, nebo alespoň část z nich, mohou být zachyceny v dané struktuře vodního ledu, ačkoli mechanismy jejich zachycování a ukládání nejsou příliš známé. Pro popis zachycování vysoce těkavých molekul byly navrženy dva odlišné mechanismy: hromadění těkavých látek v amorfním vodním ledu a jejich zachycování v krystalickém vodním ledu ve formě klatrát-hydrátů.

- Amorfni versus krystalický led

Má se za to, že komety se formují při velmi nízkých teplotách. Při těchto teplotách voda kondenzuje v amorfní fázi, vykazuje otevřenou strukturu a je tudíž schopna zachytit další těkavé sloučeniny. Existují laboratorní pokusy, které ukazují, že základní led v zrnkách pre-solární nebuly (mlhoviny), která je pokládána za semena kometárních jader, není nutně amorfní. Krystalizace amorfního ledu je ve fyzice ledu pečlivě studovaným jevem: tomuto tématu bylo věnováno množství laboratorních studií. Všechny tyto studie se obecně shodují, že přechod je postupný coby funkce času – čím vyšší je teplota, tím rychleji probíhá a nakonec vede ke vzniku kubického ledu, ledu Ic.

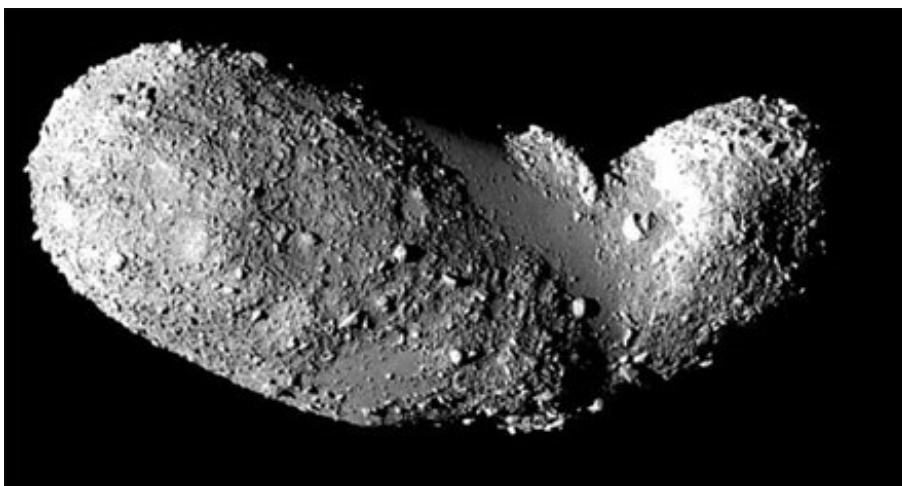
- Klatráty

Vraťme se nyní k popisu zachycování vysoce těkavých molekul komet. Celé řady termofyzikálních modelů vznikly s cílem popsat vývoj kometárních jader. Formování klatrát-hydrátů v podmínkách solární mlhoviny bylo prokázáno pouze u CH<sub>3</sub>OH (Blake a kol., 1991) a H<sub>2</sub>S (Richardson a kol., 1985) (Barlels-Rausch 2012). Formování klatrát-hydrátů se v posledních letech stalo přitažlivým tématem, zejména po sledování Hale-Boppovy komety a analýze vzorků v rámci mise Stardust (Brownlee a kol., 2006 in (Barlels-Rausch 2012)). Z analýzy vyplývá možnost existence

cirkulačních procesů v mlhovině. Takováto cirkulace by naznačovala, že klatrát-hydráty se mohou formovat za poměrně vysokých teplot a tlaků. Jelikož množství vody je omezené, některé molekuly CO a N<sub>2</sub> klatráty formovat nemusí, a nebyly by ani začleněny přinejmenším do některých kometárních jader. Protože kompletní obraz kometárních ledů není k dispozici, jsou dosud nutné numerické i laboratorní experimenty o chování směsí prášných ledů, a zároveň je při jejich plánování třeba brát v úvahu výsledky příslušných pozorování (Barlels-Rausch 2012).

### 4.3 Permafrost na asteroidech

Většinu asteroidů, zejména pak objektů NEOs (Near Earth Objects), považujeme za pusté, suché, a holé hromady kamení. Povrch těchto vesmírných těles je pokryt regolitem, což je nepevněná zvětralina pokrývající nejsvrchnější část podloží. Nachází se jak na Zemi, tak na planetách a na mnoha dalších kosmických tělesech. Extraterrestrický regolit se vytváří v důsledku dopadání meteoritů na povrch tělesa. Na Zemském povrchu je nejčastěji tvořen vlivem mechanického zvětrávání hornin. Analýza vývoje regolitu na povrchu asteroidů vykazuje značné podobnosti s vývojem těchto zvětralin v periglaciálním prostředí naší planety (Rafferty 2014).



**Obrázek 4.1.** Snímek asteroidu Itokawa. Zdro: (Smith 2013).

V roce 2005 japonští vědci ze společnosti JAXA pozorovali asteroid 25143 – Itokawa, nacházející se ve vzdálenosti 320 milionů kilometrů od Země. Ve srovnání se dvěma mnohem většími kamenými asteroidy Ceres a Eros je Itokawa považován za malý. Eros byl pozorován prostřednictvím kosmické sondy společnosti NASA Shoemaker v roce 2000. Tato umělá družice obíhala asteroid ve vzdálenosti okolo 50 km nad jejím povrchem (Mahaney 2011). Řadu snímků z oběžné dráhy včetně dalších informací získaných při této misi lze nalézt na stránkách: <http://www.nasa.gov/>. Snímky asteroidu 25143 - Itokawa, které lze vidět na obrázku 4.1 a které byly zveřejněny vědeckým týmem JAXA v roce 2007, ukazují mnoho zvláštních struktur. Je možné zde pozorovat množství horninové suti, které je formováno ve velice chladném prostředí. Nálezy z fotografií, na kterých jsou patrné suťové proudy usměrněně orientovaných kamenů, polygonální půdy a akumulace jemnozrného materiálu, naznačují, že by zde mohl existovat permafrost a mohly by zde

probíhat procesy podobné periglaciálním procesům na Zemi. Nalezení podobných periglaciálních rysů na povrchu Eros (NASA, Near-Shoemaker, mise 2000) naznačuje, že permafrost by mohl být na asteroidech mnohem více rozšířený, než se dříve předpokládalo (Mahaney 2011).

Z existence periglaciálních forem reliéfu lze odvodit, že by mělo docházet k periodickým nebo epizodickým změnám teplot na povrchu těchto těles. Tyto tepelné změny musí být dostatečně velké, aby mohl permafrost alespoň částečně tát. Mohou být způsobeny vysokou variabilitou teplot během přísluní a odsluní nebo impaktem vesmírných těles. Přítomnost vody v pevném stavu na Itokawa by mohla mít veliký význam z hlediska záznamu paleohydrologické historie planety. Dokonce se předpokládá, že by led mohl uchovávat i existující nebo fosilní záznam mikrobiálního života. K transportu materiálu na povrchu asteroidu dochází působením gravitačních proudů a vibracemi. Pokud by aktivní vrstva permafrostu občasně tála, mohlo by to vést k usměrnění orientace hrubějších klastů vlivem gravitačních toků a separaci jemnozrnného materiálu. Kromě vibrací se předpokládá, že větší akumulace nejjemnější frakce vznikly díky transportu vodou z roztátého permafrostu (Mahaney 2011).

Podobné jevy jako na asteroidech je možné pozorovat na Zemi v oblasti Antarktidy, kde byly nalezeny v okolí „Dry Valleys“ obdobné útvary. Průměrná povrchová teplota na Itokawa (-73 °C) a v Antarktidě (-65 °C) vykazuje jen malý rozdíl, proto je pravděpodobné, že formy reliéfu pozorované na asteroidech mohou vznikat v podobném prostředí jako je chladné a suché klima Antarktidy (Mahaney 2011).

Litologie asteroidů by mohla představovat vhodné podmínky pro existenci života. Častá přítomnost železa a dalších minerálních látek ve spojení s vodou představují ideální podmínky pro rozvoj mikrobiálního života (Mahaney 2011).



# Kapitola 5

## Přírodní sladkovodní led v ČR

Česká republika se rozkládá na rozloze 78 866 km<sup>2</sup>, což ze světového hlediska není příliš mnoho. Avšak díky geografické poloze a geomorfologickým podmínkám vzniklo na tomto malém území velice pestré a dynamické prostředí, které je svým charakterem jedinečné, není však příliš vhodné pro tvorbu a uchování ledu v jeho nejznámější podobě jakou jsou ledovec či permafrost. Takové formy ledu se však na našem území také vyskytovaly z hlediska geologického času relativně nedávno, o čemž svědčí mnoho stop zanechaných v naší krajině ledovci nebo permafrostem. Lze se tak setkat s formami ledu, které jsou z hlediska světového považovány spíše za marginální. Tuto skutečnost je možné vnímat pozitivně, neboť světová věda se těmito jevy, z jejího pohledu okrajovými, zabývá velmi sporadicky. Led se na našem území vyskytuje spíše jen sezónně, v zimním období obvykle zahalí celou krajinu a vytvoří nejrůznější úkazy. V následujících kapitolách budou popsány nejvýznamnější formy ledu, se kterými se lze v prostředí České republiky setkat.

### 5.1 Hladinové ledy

V naší zimní krajině jsou na první pohled nejvíce patrné ledy tvořící se na povrchu řek i stojatých vod, které označujeme jako ledy hladinové nebo povrchové. Tyto jevy zahrnují komplexní interakce mezi hydrodynamickými, mechanickými a tepelnými procesy pod vlivem meteorologických a hydrologických podmínek (Tao 2011). Kromě romantického pohledu na zamrzlou krajinu nám takovéto ledy mohou připravit i nepříjemné události. Pochopení těchto jevů je pro nás důležité, abychom mohli předcházet nebezpečným situacím (povodním) nebo finančním a materiálním škodám (poškození hrází, mostů nebo zastavení lodní dopravy).

#### 5.1.1 Hladinové ledy na tekoucích vodách

V oblastech při břehu zamrzlé řeky mohou vznikat nebezpečná místa. Led zde může být popraskaný, opírat se o břehy nebo se pod ním může vytvářet dutina mezi spodní stranou ledu a vodní hladinou. Pro takovéto jevy je nejpříhodnější podmínkou kolísání hladiny během zamrzání, jež může být způsobeno jak teplotními změnami, tak vlastním vlivem ledu (Mikuláš 2010, Matoušek 2004).

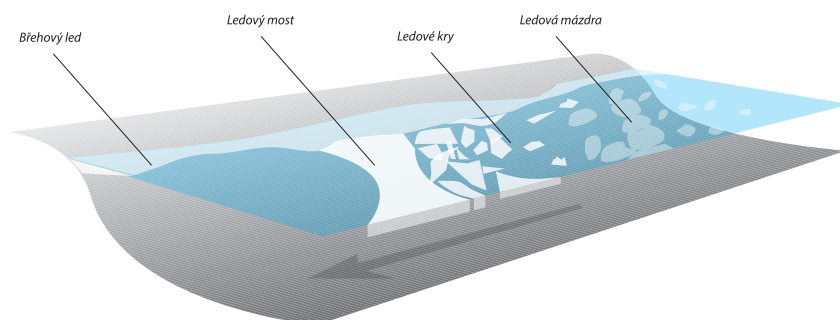
Hladinový led v říčním prostředí vzniká a roste na přechlazené hladině, jeho růst je podmíněn rychlostí toku. Hladinový led roste, jestliže je říční proud dostatečně klidný a nestrhává ledové částice z hladiny. Nejlépe se utváří v tocích s malou rychlostí vody a větší hloubkou (Matoušek 2004). Tomuto kritériu odpovídají především nížinné toky, kanály a náhony s malým sklonem



hladiny. Kromě sklonu hladiny je důležitým faktorem i rychlost vody. Když je rychlost příliš vysoká, nedochází k zamrznání hladiny a tokem prochází led jen v podobě ledové kaše. Pokud se zamrznáním přechlazené hladiny vytváří hladinový led, je pro jeho setrvání důležité, aby nedocházelo k tání tepelným působením nebo mechanickým rozrušením vodou proudící pod ním. Říční koryto zamrzá rozšiřováním břehových ledů nebo zastavením pohybu ledových částic na hladině (Matoušek 2004).

V oblastech při břehu řek bývá rychlost vody velice malá. Snáze se zde hladina přechladí a vytvoří se tak ideální podmínky pro vznik počátečních ledových částic, ze kterých se následně vyvíjí břehový led. Ten narůstá formou tenkých rozvětvených krystalů zvaných dendrity. Pokud se zvýší rychlost toku nebo jsou tokem unášeny úlomky ledu, dochází k odlamování těchto dendritů a šíření břehového ledu může být úplně zastaveno (Matoušek 2004).

Kromě zarůstání toku břehovými ledy se může led na hladině utvářet díky chodu ledové mázdry. Pojmem ledová mázdra se rozumí shluky ledových krystalů plovoucích na hladině. Podle Matouška (2004) je chod ledové mázdry zpočátku těžko rozpoznatelný a zaznamenáváme jej teprve, když jsou větší kusy velmi tenkého ledu zachyceny na hladině. Nejlépe je mázdra pozorovatelná, pokud dojde k jejímu rozrušení u břehů a na překážkách v toku. V takovýchto zónách dojde k rozlámání ledové mázdry a jednotlivé kry vypadající jako průhledné tabule skla se na sebe nakupí. Ledová mázdra vzniká v případech, kdy dojde k nakupení velice malých jehličkovitých krystalů, které zůstávají na hladině a postupně narůstají do rozvětvených útvarů-dendritů. Při přetrvávání vhodných podmínek pro tvorbu mázdry se z narůstajících ledů tvoří plošné útvary, jež tvoří souvislé tabule a mohou pokrýt i celou šířku řeky (Matoušek 2004).



**Obrázek 5.1.** Druhy hladinového ledu. Zdroj: Autor.

Jestliže ledy narůstající v korytě toku postupem času narostou do rozměrů, kdy velikost a pevnost zabrání dalšímu pohybu částic ledu na hladině, vytvoří se ledový most. Ten tvoří překážku pro další řekou unášený led a za vytvoření souvislé ledové pokrývky tok postupně zamrzá. Pokrývka pak dále narůstá rozšiřováním linie břehového ledu nebo hromaděním ledu unášeného tokem

řeky. Kry přinášeného ledu zastavené o překážku v podobě ledového mostu se za ním hromadí. Mohou tak zvětšovat jeho plochu nebo dochází k jejich nasunutí na souvislý led, kde přimrzají nebo se noří pod souvislý led, kde často vlivem tření způsobeného rychlejším proudem vody tají. Tloušťka ledové pokrývky může narůstat vlivem několika faktorů a to na její horní i spodní straně, jak popisuje Matoušek (2004). Na spodní straně led přirůstá díky výměně tepla mezi ledem a vodou. Při zvýšení průtoku dochází k vytékání vody a natlačení ledových ker na souvislou ledovou pokrývky, kde voda i kry přimrzají. Tloušťka ledu při povrchu se také může zvětšovat v důsledku sněžení, napadaný sníh se prosytí vodou a zamrzá ve formě ledu. Jakmile dojde k zvýšení teploty nebo se změní příhodné fyzikální podmínky v toku řeky, povrchový led taje. V případech, kdy k takovýmto změnám dojde náhle, mohou nastat až katastrofické scénáře v podobě ledových povodní.

### ■ 5.1.2 Hladinové ledy na stojatých vodách

S hladinovým ledem se setkáváme i u stojatých vod, na rybnících, údolních nádržích a dokonce i v močálech. Mechanizmy vzniku ledu jsou zde takřka totožné se vznikáním ledu v klidných tocích. Ve stojatých vodách nedochází k ovlivnění růstu ledu vlivem proudu vody. Při silnějším proudění větru na stojatých vodách často vznikají vlny, které mohou mít podobný efekt jako říční proud a růst ledu mohou zpomalit. U údolních nádrží, které patří k největším vodním plochám na našem území, se často setkáváme se šikmými nebo stupňovitými ledovými plochami u břehů, které vznikají poklesem hladiny vyvolaným odpouštěním vody z přehrady (Mikuláš 2010). Nejnápadnější ledové plochy v naší krajině představují zamrzlé rybníky. Vzhledem k jejich malé hloubce a klidné hladině se u nich hladinový led vytváří nejrychleji. Tyto ledy jsou díky snadnému zamrznání často velice silné a pevné, díky čemuž vydrží velice dlouho a mohou přečkat i několik oblev. To může vést ke změnám textury, k rekrystalizaci ledu a mnoha dalším zvláštním jevům. Kromě rybníků a údolních nádrží se s hladinovými ledy stojatých vod setkáme i u močálů, které však na rozdíl od rybníků zamrzají velice neochotně i přes jejich malou hloubku. Je to způsobeno hnilobnými procesy v rašelině nebo bahně, při kterých se uvolňuje teplo (Mikuláš 2010). Kromě tepla dochází těmito procesy také k uvolňování plynů, které unikají formou bublin, jež v ledu mohou zamrznat a vytvářet tak bizarní úkazy. Hladinové ledy na stojatých vodách bývají častým cílem vyznavačů zimních sportů a rekreace, stávají se tak nedílnou součástí zimní atmosféry v naší krajině.

## ■ 5.2 Dnové ledy ve vodních tocích

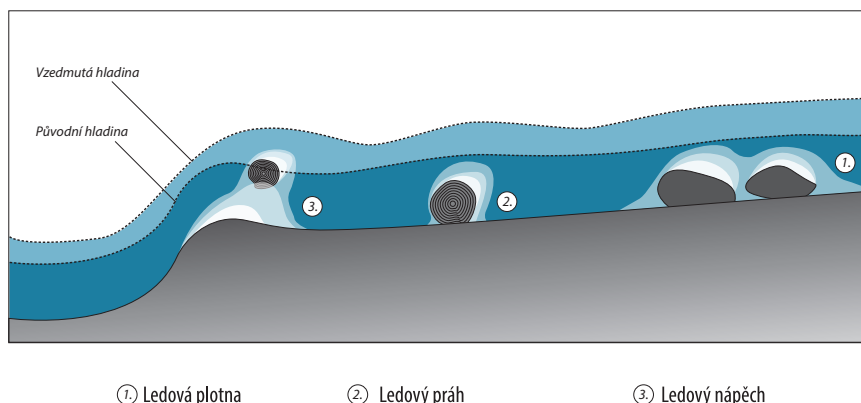
Ve vodním toku se kromě povrchového ledu může vytvářet také led dnový. Tento druh ledu není tak častý a vzniká za specifických podmínek. Dnový led je možné rozdělit do dvou typů. Prvním je led s vyšší hustotou vznikající blíže u dna a druhý led má menší hustotu a vzniká blíže k povrchu (Stickler 2008). Tvorba dnového ledu může také vytvářet nebezpečné situace jako rozkolísání velikosti průtoku, vylití toku z koryta nebo tvorbu ledových nápěchů. V tocích, kde dochází ke

kombinaci dnového i povrchového ledu, se obvykle setkáváme s velice pestrými ledovými úkazy a extrémním zaledněním koryta. Pestrost a rozmanitost těchto jevů podporuje členitost koryta, rozkolísanost průtoku a průběh mrazivého počasí (Matoušek 2004). I při relativně malých změnách počasí hrozí odlepení dnového ledu ode dna. Náhlý odchod dnového ledu pak může způsobit ucpání koryta, či změny velikosti průtoku. Jevy spojené s odchodem dnového ledu mohou nabýt až katastrofických podob jak bylo zaznamenáno například na Otavě a na Chomutovce (Mikuláš 2010).

Dnové ledy vznikají zachycením částeczek vnitrovodního ledu u dna. Tyto částičky se zachytávají o nerovnosti na dně a proto je základním předpokladem pro tvorbu dnového ledu šterkopískové, kamenité nebo balvanité dno. Dalším faktorem ovlivňujícím vznik dnových ledů je hloubka vody a velikost průtoku. Pokud je průtok malý a hloubka vody je malá, dochází k zachytávání vnitrovodního ledu na dně. Oproti tomu za velkých průtoků je hloubka vody většinou příliš velká, tudíž nedochází k zachycení veškerého vnitrovodního ledu, a proto obvykle pozorujeme spíše chod ledové kaše. Na rozdíl od pevného povrchového ledu bývá dnový led houbovitý (Matoušek 2004). Dnové ledy lze nejlépe pozorovat na divokých podhorských říčkách s kamenitým dnem, jako jsou Úpa, Vydra, Divoká Orlice aj. (Mikuláš 2010, Matoušek 2004).

Zarůstání koryta dnovým ledem způsobuje vzduť vody, které může vést k zamrznutí hladiny v důsledku snížení rychlosti toku vody. Zvýšení vodní hladiny je závislé na narůstajícího dnového ledu. Když se hladina zvýší a voda se vylije z hlubší části toku na mělčinu, rychlost vody se značně zpomalí a dojde k jejímu zamrznutí. Takto vzniklý led je na rozdíl od dnového ledu velice pevný a označuje se jako povrchový led. S intenzivnějšími mrazy pak dochází k rychlému nárůstu jak ledu dnového, tak i ledu povrchového. Při volné hladině toku je tento nárůst nejmarkantnější, volná hladina nepůsobí jako izolátor a ztráta tepla mezi vodou a jejím okolím podporuje produkci ledu. Přetrvává-li takováto situace dostatečně dlouho, celé koryto toku může být vyplněno ledem a voda se vylije z koryta (Matoušek 2004). Vznikáním dnového ledu může rovněž dojít ke změně charakteru toku. Dočasně vzniká dynamické prostředí s peřejemi v místech kde dříve byly klidnější tůně. Takovéto změny přichází velice rychle a mění fyzické a biologické vlastnosti prostředí (Stickler 2008). Dnové ledy vznikající ve vodním toku tvoří ledové prahy a ledové plotny. U ledových ploten dochází ke zvýšení hladiny v závislosti na vyplnění části koryta plochou dnového ledu. V případě prahů led narůstá spíše vertikálním způsobem a práh pak působí jako ponořená hráz zadržující vodu. Voda nad takovýmito prahy ztrácí svou rychlost a zvyšuje hladinu.

Led je lehčí než voda a tudíž má snahu se odlomit ode dna a vyplout na hladinu. Za určitých okolností se led ode dna snadno uvolní. Matoušek (2004) uvádí, že měření prováděná na Chomutovce prokázala, jak malý nárůst teploty (o 0,002-0,004 nad bod mrazu) stačí, aby dnový led ztratil vazbu se dnem. U ledových prahů se uvolní část ledu v nejméně pevné části a práh se stává propustným. Voda pak má volnou cestu a místo přetékání prahu jí přímo protéká (Matoušek 2004).



**Obrázek 5.2.** Druhy dnového ledu. Zdroj: Autor.

Bouřlivý odchod dnového ledu je náhlým procesem vznikajícím v případě, že dnový led trvale narůstá až do doby, než vztaková síla převáží sílu vazby ledu ke dnu a led se odtrhne. Uvolněním prahů a ploten dojde k vyprázdnění drobných zdrží, což vede k vytvoření průtokové vlny. Vlna postupně narůstá, se zvyšující se hladinou a silou vlny je odnášeno stále více a více ledu. Postup průtokové vlny se zastaví až o větší překážku, kterou bývá obvykle jez. Nebezpečí tohoto procesu tkví v jeho náhlém příchodu, který se jen velice těžko předpovídá. Vyvolává nebezpečné ledové situace, z nichž nejčastější je tvorba ledové zácpy, ta může ucpat celé říční koryto po délce i několika kilometrů (Matoušek 2004). Náhlý odchod dnových ledů je stále jedním z nejméně prozkoumaných ledových procesů, k jeho detailnímu popsání a pochopení všech procesů bude zapotřebí ještě mnoho výzkumné práce.

### 5.3 Sníh

Definice sněhu a jeho charakteristiky byly uvedeny v kapitole 3.2 této práce. Tato kapitola popisuje sníh ve vazbě na Českou republiku. Sníh může zásadním způsobem ovlivnit jak životní prostředí, tak i hospodářskou činnost člověka. Při nejnižších ročních teplotách slouží sníh jako izolace pro rostlinstvo, tající sněhová pokrývka je zdrojem pro povrchové i podzemní vody. Na dobrých sněhových podmínkách je závislá zimní rekreace. Při nadměrném množství sněh však působí značné komplikace, například v dopravě, zvyšuje se lavinové ohrožení a za rychlé oblevy mohou vznikat povodně. Sníh se na našem území vyskytuje převážně v zimních měsících, jen v nejvyšších oblastech se ojedinělé sněhové přeháňky mohou objevit takřka po celý rok. V teplejších měsících u nás však spadlý sníh nevydrží dlouho a rychle taje. Na zemský povrch je transportován sněžením. Po celé ploše našeho území je rozmístěna síť klimatických a srážkoměrných stanic, odkud jsou získávány informace o sněhu a sněhové pokrývce. Pokud je pozorované území pokryto sněhem méně, než z poloviny, hovoříme o nesouvislé sněhové pokrývce. Tolasz a

kol. (2007) popisuje souvislou sněhovou pokrývku jako vrstvu sněhu o výšce nejméně 1 cm, která pokrývá alespoň polovinu pozorované plochy a vznikla v důsledku pevných srážek ( sníh, kroupy, sněhové kroupy, sněhová zrna, zmrzlý déšť, námrazové kroupy, náledí), naměřenou v sedm hodin ráno. Hlavními měřenými charakteristikami na našich stanicích, jak uvádí (Židek, Lipina 2003) jsou :

- Výška nového sněhu. To znamená vrstva tuhých srážek (sněhu nebo ledu), která napadla od sedmé hodiny ranní předešlého dne do sedmé hodiny dne měření. Výška nového sněhu se měří pravítkem od destičky, která se po každém naměření nového sněhu očistí.
- Celková výška sněhové pokrývky. Za tento údaj se považuje vrstva sněhu nebo ledu vzniklá v důsledku tuhých srážek. Měří se v sedm hodin ráno pomocí sněhoměrné tyče nebo latě. Měření probíhá každý den, pokud existuje souvislá sněhová pokrývka.
- Vodní hodnota celkové sněhové pokrývky. Tímto pojmem se označuje množství vody, které obsahuje sněhová pokrývka, jež by vzniklo jejím úplným rozpuštěním. Vodní hodnota celkové sněhové pokrývky se měří pomocí sněhoměru nebo srážkoměrnou nádobou.

U stanic, které se nacházejí na bezlesých územích, jsou často údaje nepřesné. Způsobuje to činnost větru, která sněhovou pokrývku značně ovlivňuje, dochází k odvátí nebo nadměrné akumulaci sněhu (Klose 2008).

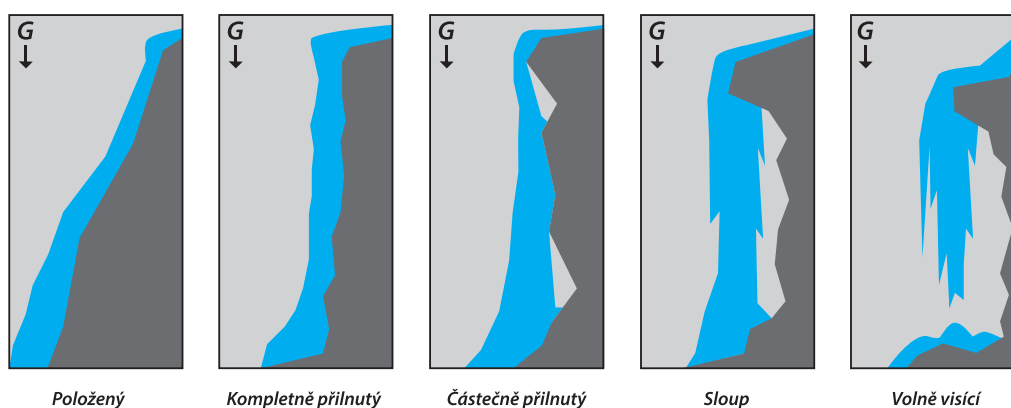
Tolasz a kol. (2007) uvádí, že v nejvyšších polohách našich hor je až 110 dní se sněžením, v nížinách je to méně než polovina.

## 5.4 Ledopády

Ledopády jsou krásné přírodní útvary nabývající až mystických podob. Svou krásou lákají fotografy a v poslední době se stávají předmětem zájmu ledolezců. Pojem ledopád je obtížné přímo definovat. V zahraniční literatuře jako například (Bhutyani 2011) je ledopád (icefall) definovaný jako část ledovcového tělesa, kde dochází k vertikálnímu rozrušení do mnoha částí oddělených trhlinami a ledovcovými sloupy. I další zahraniční encyklopedie a slovníky uvádí pojem ledopád (icefall) spíše ve spojení s ledovci. V odbornější literatuře nalézáme definici ledopádu jako zmrzlý vodopád nebo led narůstající na skalách bez kontinuálního proudu vody (Bianchi 2004). Takovýmto způsobem rozdělují ledy vzniklé zamrznáním vodopádů a pomalým stékáním vody po skále i (Mikuláš 2010). Ledopády tvořené zamrznáním vodopádů jsou logicky spjaty s výskytem vodopádů. Na první pohled vodopádů v české krajině příliš není, ale jen ve své knize (Janoška 2008) popisuje okolo stovky nejkrásnějších českých vodopádů. Menší vodopády, které se za vhodných zimních podmínek mění v ledopády, nalezneme ve všech horských oblastech našeho území. Takovéto ledopády mají často podobný tvar jako samotný vodopád. Díky síle protékající vody téměř nikdy nedochází k jejich úplnému zamrznutí. Voda stéká po ledu nebo si razí cestu mezi ledem a skálou.

Voda z malých pramenů nebo z tajícího sněhu může stékat nebo jen skapávat po skále. Při příchodu mrazivého počasí jsou taková místa nejvhodnější pro tvorbu ledopádů, tvořených skalními ledy. Skalní ledy vznikají relativně rychle a bývají mohutnější než v případě zamrzlých vodopádů. Tento rychlejší a mohutnější nárůst je způsobený především tím, že nedochází k odtávání ledu silnějším proudem vody. Tvary ledové výzdoby mohou být opravdu pestré a svým vzhledem tvoří ledovou analogii ke krasovým útvarům. Ledopády se dokonce mohou zbarvovat do rozličných odstínů barev. Pochází-li prosakovaná voda z rašelinišť nebo obsahuje vyšší koncentraci železa, můžeme nalézt mnoho odstínů hnědé, okrové až oranžové barvy. U vod protékajících vápenatým nebo žulovým podložím vzniklý led získává namodralé odstíny (Mikuláš 2010).

Vznik ledopádů je analogický se vznikem rampouchů. Na počátku se vytváří malý rampouch, který vzniká vlivem seskupení krystalů kolem krystalizačního jádra. Tyto krystaly jsou vlivem gravitačního působení uskupeny do podélného tvaru rampouchu. Růst rampouchů do šířky vzniká díky přimrzání velmi malých vrstviček vody po stranách rampouchu (Švec 2014). Do délky umožňuje růst rampouchu malá dutinka v jeho centrální části, která slouží jako izolace a voda uvnitř může stékat až na špičku, kde zamrzá (Takahashi 1984 in Švec 2014).



**Obrázek 5.3.** Klasifikace ledopádů podle jejich sklonu. Zdroj: (Bianchi 2004). Vlastní zpracování.

Pokud okolní podmínky nejsou vhodné nebo vodní kapka je příliš velká, nepřimrzne na konci a odpadne. Ledopády nemusí vždy vznikat jen narůstáním z rampouchů, ale mohou se utvořit jako drobné povlaky ledu přímo na skále, které následně přirůstají. U ledopádů vzniklých mrznutím vodopádů se mimo těchto projevují i další způsoby vzniku. Prvotní led se utváří buď odspodu na namrzajících kamenech nebo od vodní tříště. Vznik ledopádů je tak jako vznik ostatních ledových jevů úzce spjat s příznivostí hydrologických a meteorologických podmínek. Zatímco vodní proud může tvorbu ledopádu zpomalit nebo úplně zastavit, vítr nebo pokles teplot tvorbu ledopádu podporují.

(Bianchi 2004) ve své práci klasifikuje ledopády podle jejich sklonu. Tímto sklonem je myšlen sklon vzhledem ke gravitačnímu působení Země. Na základě této klasifikace se ledopády dělí na ledopády ukloněné, ledopády svislé a ledopády převislé.



Jak jsem již uvedl, ledopády se dají nalézt ve všech českých pohořích. Z geologického hlediska jsou nejvhodnějšími místy krajiny zmlazené nedávnými tektonickými pohyby, což se týká všech pohraničních horstev, jak uvádí Mikuláš (2010). Nejvýznamnějšími oblastmi s ledopády tvořenými na zamrzlých vodopádech jsou Krkonoše, Jizerské hory, České středohoří, Krušné hory, Šumava a také Český kras, jak lze odvodit z (Pilous 2003) a (Mikuláš 2010), který dále uvádí i nejvýznamnější lokality s ledopády tvořenými skalním ledem. Takovéto lokality se nachází na horním toku říčky Křinice v Českém Švýcarsku, v blízkém okolí skály Vrkoč v Českém středohoří, v Císařské rokli u Srbska či Českém krasu a na spoustě dalších míst.

## 5.5 Jeskynní led

Led v jeskyních si nejčastěji spojujeme s fenoménem ledových jeskyní. Skutečných ledových se u nás však mnoho nevyskytuje. Nejbližší velké ledové jeskyně za hranicemi našeho území jsou Dobšinská a Demänovská ledová jeskyně na Slovensku a Rieseneishöhle v Německu. U nás se však relativně hojně vyskytují jeskyně paledové, kde se led vytváří shodnými procesy jako v jeskyních ledových.

Monroe (1993) definuje ledové jeskyně jako: jeskyně, v nichž průměrná teplota je pod  $0^{\circ}\text{C}$  a které obvykle obsahují celoroční led. Led zde může tvořit přírodní útvary podobné jako v krasových jeskyních (stalaktity, stalagmity, ledové sloupy nebo zmrazené vodopády).

Princip vzniku ledových jeskyní je závislý na specifickém mikroklimatu a na morfologii jeskyní. Těžší studený vzduch zatéká do prohlubní, musí však nastat ideální podmínky, aby došlo k překonání tepelné setrvačnosti skalních masívů (Mikuláš 2010). Mechanismů, které vedou ke vzniku ledu v jeskyni je mnoho a jsou velmi složité. Sezónní led se může tvořit v zimě, protože voda, která štěrbinami ve skále prosakuje, zamrzne blízko ústí jeskyně, kde jsou teploty jeskyně ovlivněny studeným vzduchem v okolním prostředí. V jiném případě jeskynní led může vznikat v důsledku akumulace a přeměny sněhu, který spadá do vstupní šachty. Nahromaděný sníh, napadaný do jeskyně, je stlačován vlastní tíhou a může tak tvořit led. Takto vzniklý led je obvykle hrubě krystalický, vzhledem blízky ledovcovému ledu. Led v jeskynních systémech může vznikat i z vodní páry - mrznutím vodní páry se mohou vytvářet některé druhy námrazových jevů (viz kap. Námraza). Vnitřní prostory pak bývají pokryty jemnými krystalky ledu vzhledově připomínající peří nebo stříbrné šupinky.

Patrně jedinou skutečnou ledovou jeskyní na našem území je jeskyně Naděje (Jeskyně České republiky 2014). Jedná se o nekrasovou puklinovou jeskyni, jež vznikla ve fonolitovém tělese Suchého vrchu v Lužických horách. Podle Malík (1998) (in Pokorný, Holec 2009) v jeskyni nalezneme vrstvu podlahového ledu, jež přetrvává po celý rok. Během zimního období se v jeskyni vytváří i bohatší ledová výzdoba v podobě ledových stalaktitů a záclon.

Mnohem hojnější jsou u nás jeskyně paledové. Ačkoli jsou svým charakterem velice podobné jeskyním ledovým, díky shodě faktorů (malá velikost a délka, částečné oslunění vstupu, perio-

dické protékání vodou aj.) přetrvává v těchto jeskyních opožděná zimní výzdoba jen do jarního maximálně letního období. K ochlazování vzduchu v jeskyních také často přispívají návěje firnového sněhu v ústí jeskyní, jež jsou pro paleodové jeskyně charakteristické (Pokorný, Holec 2009). Mezi nejvýznamnější přírodní úkazy tohoto typu patří následující jeskyně:

- Jeskyně Piková Dáma se nachází v oblasti přírodní rezervace Bílá voda v CHKO Moravský kras. Jedná se o jeskynní komplex, spadající do hloubek až okolo 60m. Vzhledem ke specifické dynamice tohoto jeskynního systému jsou některé části vyplněny unikátním zaledněním, které přetrvává až do pozdních letních měsíců (Mikuláš 2010). Jednu z větví této jeskyně tvoří tak zvaná Ledová chodba, v níž se led drží nejdéle (Jeskyně České republiky 2014).
- Ledové sluje můžeme nalézt v první ochranné zóně Národního parku Podyjí. Oblast je prokáná kratšími chodbami, dlouhými jen několik desítek metrů, přičemž led vzniká jen v některých z nich (Židková 2012).
- V polovině 20.stol. byl v Průvanové jeskyni u Hrádku veden průzkum, za účelem zjištění možnosti výskytu celoročního zalednění, alespoň v části jeskyně. Bylo zde pozorováno mnoho indicií, nasvědčujících celoročnímu zalednění, jako např. teploty pozorované v okolních nepropustných trhlinách, blízkost bodu mrazu a chladná voda vytékající z pramene pod jeskyní. Okud se zde celoroční ledová výzdoba skutečně nachází, vyplňuje pouze systém neprostupných trhlinek. Větší celoroční ledová výzdoba zde však nebyla dokázána (Vítek 1970).
- Objekty, mající charakter paleodových jeskyní, nalezneme také na území Ústeckého kraje. Tyto jeskyně jsou soustředěny především na okolí Bukové hory a některé nesou svůj chladný charakter již v názvu: Ledová jeskyně a Sněhová jeskyně (Pokorný, Holec 2009). I z dalších míst našeho území máme zprávy o výskytu menších útvarů, v nichž led roztaje alespoň s malým zpožděním oproti okolnímu prostředí. Jak říká Mikuláš (2010) takovýchto míst u nás bude asi hodně, ale pokud nejsme jeskyňáři, patrně se s nimi budeme v přírodě míjet.

Ledy v jeskyních mohou připravit opravdu nádhernou podívanou. Tvoří útvary nejrůznějších podob, přejímají barvu okolních hornin a hlín a díky jejich pomalému růstu se v nich vytvářejí jemné skulptury puklinek a bublin (Mikuláš 2010). Díky tvorbě ledu v krasových jeskyních mohou také za příhodných podmínek vznikat vzácné minerály, jako například ikait. Ikait je nestabilní karbonát vznikající v krasových prostředích, kde dochází k mrznutí kalcium bikarbonátových krasových vod. Díky vznikajícímu ledu dochází ke značnému zvýšení celkové mineralizace zbytkového roztoku. Vznik ikaitu lze očekávat v jeskyních mírného klimatického pásma a středních nadmořských výšek, kde mají krasové vody příhodnější mineralizaci než v arktickém nebo vysokohorském prostředí (Žák a kol. 2010). Tyto podmínky jsou pro naše prostředí příhodné, jak vyplývá z výzkumu prováděného v Kodske jeskyni. Precipitáty se zde hromadí především ve spodních částech stalaktitů, kde dochází k pomalému přísunu skapové vody. Vytváří drobné krystalky a krystalové agregáty bílé až světle žluté barvy. Když dochází v nejnižších partiích stalaktitů k úplnému odpaření ledu, mohou vznikat akumulace samotných krystalů karbonátového



precipitátu bez ledu. Výzkum v Kodské jeskyni zřejmě přinesl první prokázané zjištění tohoto minerálu v České Republice (Žák a kol. 2010).

## 5.6 Stopy po permafrostu

Z dnešního pohledu se permafrost jeví jako záležitost týkající se dalekých polárních a subpolárních oblastí. Je však třeba se nad tímto fenoménem pozastavit a uvědomit si, že z geologického pojetí času se na našem území permafrost vyskytoval ještě nedávno. Lze předpokládat, že v nejvyšších oblastech našich hor (Krkonoše, Šumava, Kralický Sněžník, Krušné hory) se ve vrcholových částech na vhodných místech mohl permafrost udržet i na povrchu do období zhruba před 3000 – 4000 lety (Mercier a kol. 2002). Na základě geologických a geomorfologických pozorování uvádí Czudek (1986, 1997), že ve svrchním pleniglaciálu viselského zalednění mohla sahat mocnost permafrostu od 50 m až do hloubky okolo 250 m. Na mnoha místech byla naše krajina ovlivněna nebo přímo utvářena vlivem permafrostu. Dokladem toho jsou mnohé geologické a geomorfologické důkazy – přímé i nepřímé. U přímých důkazů je jejich vznik a vývoj vázán přímo na permafrost, zatímco nepřímé důkazy vznikaly vlivem hlubokého sezónního promrzání hornin. Přímými geologickými důkazy jsou například pseudomorfozy po ledových klínech, mrazové klíny s výplní eolického písku, mrazové rozvolnění pevných hornin podél puklin až do hloubek okolo 60 m, kry sedimentů transportované kontinentálními ledovci ve zmrzlém stavu a deformace původního uložení vrstev v hloubce větší než byla mocnost činné vrstvy. Zajímavým přímým geologickým důkazem podle J. Tyráčka jsou travertiny, typické sedimenty teplých období, kdy výstupné cesty jejich vod byly uzavřeny permafrostem. Přímými geomorfologickými indikátory permafrostu jsou na našem území kamenné ledovce, tvary připomínající ledovcové kary, kamenná moře, kamenné a kamenito-hlinité proudy (Czudek 2005).

Nepřímými geologickými důkazy pleistocenního permafrostu na našem území jsou zemní klíny, kryogenní zvětrávání hornin, pleistocenní sedimenty (například spraše, sprašové hlíny, akumulace úpatních hald, některé geliflukční sedimenty) dále pak i tříděné polygony, pruhy a kruhy (Czudek 2005).

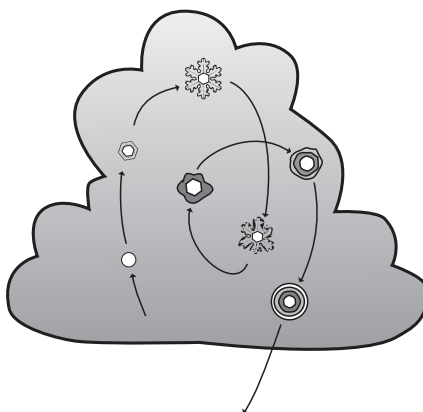
Nepřímými geomorfologickými důkazy pleistocenního permafrostu na našem území jsou například říční terasy, klimatická asymetrie údolí, náhorní kryoplanační plošiny a terasy, skalní tvary typu mrazových srubů, pleistocenní sesuvy a široká údolní dna. (Czudek 2005).

## 5.7 Další hydrometeorologické formy ledu

Led formovaný za specifických podmínek dává vzniknout mnoha dalším meteorologickým jevům. Tyto jevy vnikají jen zřídka a bývají krásné, mohou však mít velice negativní účinky na přírodní prostředí, hospodářskou činnost i na vlastní život člověka.

### ■ 5.7.1 Kroupy

Jako kroupy označují ledová tělesa kulového, kuželovitého nebo i nepravidelného tvaru, dosahující většího průměru než 5 mm. Kroupy zpravidla vznikají v letních bouřkových mracích typu kumulonimbus. Vyskytují se nejčastěji v odpoledních nebo podvečerních hodinách, kdy jsou nejvhodnější podmínky pro vznik vertikálně mohutných bouřkových oblaků (Tolasz a kol. 2007). Četnější výskyt krup se váže na oblasti s členitějším reliéfem a dostatkem vlhkosti, které jsou příhodné pro vznik konvekčních oblaků (Monroe 1993). Kroupy v oblacích mohou vznikat dvěma způsoby, jak uvádí Monroe (1993). Prvním způsobem je namrzání kapek přechlazené vody a druhým přímé ukládání molekul vodní páry na ledových částicích (Monroe 1993). Vzniklé ledové krystalky mají tendence vypadávat z mračen, při pádu částečně tají a při kontaktu s dalšími částicemi přechlazené vody může dojít k jejich nabalování a vytvoření ledových kuliček tj. krup. Ve spodní části mračen jsou zachyceny mohutnými vzestupnými proudy, které kroupy vynesou znovu vzhůru (Skřehot 2004).



**Obrázek 5.4.** Vznik kroupy v oblacích. Zdroj:(Skřehot 2004). Vlastní zpracování.

Tento proces se většinou několikrát opakuje, tím dochází k nabalování dalších vrstviček a kroupy se zvětšují. Díky tomuto jevu jsou většinou kroupy v průřezu koncentricky zvrstvené. V závislosti na převládajícím způsobu narůstání ledu, který při přirůstání jednotlivých vrstviček převládá, se u krup střídají vrstvičky krystalického a amorfního ledu (Monroe 1993). Kroupy také mohou být tvořeny jen jedním druhem ledu, pak jsou čiré. Kroupy se vyskytují při krupobití. Krupobití je proces, při kterém dochází k vypadávání krup z oblaku typu kumulonimbus a nejčastěji se projevuje jako doprovodný jev při bouřce (Monroe 1993). Krupobití je bráno jako faktor ohrožující člověka, je-li velikost průměru krup větší než cca 2cm, podle Českého hydrometeorologického ústavu (2014). Ojedinele jsou popsány případy, kdy kroupy dosahují průměru nad 5 cm. Rekordem zaznamenaným na území České republiky byl výskyt krup o velikosti cca 12 cm (Český hydrometeorologický ústav 2014). Délka krupobití obvykle netrvá více než několik minut, maximálně až půl hodiny a zpravidla zasahuje oblast nevelkého rozsahu (Monroe 1993).

Výskyt krup je na našem území nejhojnější v letním období v měsících květen až srpen. Vzácněji se mohou kroupy objevit i v zimním či jarním období. Jako místo s největším počtem dní s kroupami na našem území uvádí Tolasz a kol. (2007) stanici Praděd (5,4 dne). Kroupy mohou mít ničivé účinky, které mohou způsobit až katastrofální následky na životním prostředí, majetku člověka, i na vlastním lidském životě. K jejich prevenci slouží meteorologické radiolokátory, jež jsou součástí výstražné služby (Monroe 1993).

### ■ 5.7.2 Námrazové jevy

K námrazovým jevům dochází relativně často a ač mohou krajinně dodat nádherný vzhled a romantický ráz, přinášejí často přírodě i člověku značné negativní dopady. Námrazové jevy často způsobují potíže v dopravě, zemědělství, narušují statiku budov atd. Například v zimě 1995/1996, kdy se z důvodů silného větru a teplot pod bodem mrazu, které přetrvávaly souvisle déle než jeden měsíc, došlo v Krušných horách a oblastech nad 700 m n.m. k vytvoření velkého množství námrazy. Tento jev měl za následek obrovské škody na lesích, elektrických vedeních, budovách a na mnoha dalších objektech (Český hydrometeorologický ústav 2014). Voda mrzne při teplotách pod bodem mrazu, je však možné, že teplota země nebo předmětů je nižší než teplota vzduchu, a pak dochází na těchto objektech k tvorbě námrazových jevů. Námrazové jevy mohou vznikat i za teplot vzduchu nad 0 °C, jsou-li zem nebo předměty chladnější než vzduch. Výskyt námrazových jevů je obvykle vázán na teploty od +3 do -12 °C (Český hydrometeorologický ústav 2014). Za teplot pod -12 °C jsou srážky v oblacích jen zřídkakdy tvořeny kapkami vody, většinou jsou za takových teplot srážky tvořeny pevnými krystalky ledu. Proto se námrazové jevy netvoří.

#### ● Ledovka

Ledovka vzniká vlivem mrznoucího deště nebo mrznoucího mrholení, které se při dopadu na tělesa (zemský povrch, budovy, vegetace atd.) o teplotě pod bodem mrazu rozlévá a mrzne. Ledovka vzniká za předpokladu, že teplota vzduchu je větší než 0 °C a srážky vypadávající z oblak jsou v kapalném stavu. Po dopadu na chladná tělesa vytváří průhlednou a hladkou vrstvu ledu obalující povrch těchto předmětů. Ledovka může vznikat v lokálním měřítku, ale také na velkém území. Vznik rozsáhlé ledovky je obvykle vázán na celkovou změnu počasí. Nejpříhodnější podmínky nastávají v případě, že po studeném počasí, kdy povrch stačil dostatečně promrznout, začne proudit teplý vzduch přinášející oblačnost a s ní i srážky. Promrzlý povrch se nestačí prohřát a srážky v kapalném stavu na jeho povrchu rychle zamrzají. Vrstva ledovky může být, v závislosti na intenzitě srážek, až několik centimetrů mocná a velice hladká. Díky těmto vlastnostem se stává velice nebezpečnou. Může nadměrně zatížit např. větve stromů nebo budovy a vyvolat tak jejich zhroucení. Díky jejímu klouzavému povrchu často ztěžuje až znemožňuje pohyb vozidel i osob. Nebezpečí ledovky tkví i v rychlosti její tvorby, vzniká náhle a může tak např. namrznout na oknech aut a negativně zhoršit viditelnost řidiče (Český hydrometeorologický ústav 2014).

- Náledí

Český hydrometeorologický ústav (2014) definuje náledí jako vrstvičku ledu pokrývající povrch země, která vzniká postupným namrzáním nepřechlazených srážek (kapek deště nebo mrholení). Obvykle vzniká při náhlém poklesu teplot, což vzhledem k dennímu chodu teplot nejčastěji bývá krátce po západu slunce. Náledí může také vznikat z úplně nebo jen částečně natátého sněhu, dojde-li vlivem poklesu teploty k jeho opětovnému zamrznutí. Náledí často vzniká i v důsledku lidské činnosti. Typickým příkladem je tvorba ledové vrstvy vzniklé na vozovce ze sněhu tajícího pod koly vozidel. Pro tvorbu takového náledí jsou zvláště příhodná místa na mostech nebo místa zastíněná před slunečním svitem (Český hydrometeorologický ústav 2014).

- Námraza

Námraza vzniká mrznutím vertikálních ( déšť) nebo horizontálních (mlha, rosa) srážek dopadajících na zemský povrch nebo na jiná tělesa. Podle (Český hydrometeorologický ústav 2014) se námraza může tvořit i pouhým srážením vzdušné vlhkosti na předmětech, tedy v podmínkách bez oblačnosti. Vznik námrazy je také spjat s činností větru. Na hranách předmětů vystavených větru přirůstá námraza rychleji než na závětrných stranách těchto předmětů (Český hydrometeorologický ústav 2014). Námraza vzniká převážně tehdy, když se vyskytuje oblačnost s vysokým obsahem přechlazených kapek vody. Jak uvádí Skřehot (2004) tato podmínka je nejčastěji splněna, vyskytují-li se oblaky typu nimbostratus a altostratus, za teplot vzduchu od 0 °C do -10 °C. Na území České republiky vzniká námraza nejčastěji při meteorologických podmínkách, kdy na naše území vniká jihovýchodní proudění vlhkého vzduchu (Český hydrometeorologický ústav 2014). Druhy námrazy jsou:

1. Námraza zrnitá

Pro tento typ námrazy je charakteristická zrnitá struktura projevující se krystalky ledu ve tvaru větviček, skládajících se z ledových zrněk, jež jsou oddělené vzduchovými mezerami. Námraza zrnitá vzniká za teplot v rozmezí od -2 do -10°C (Monroe 1993). Kvůli jejímu rychlému mrznutí, se nestíhají vyplnit kapkami vody nerovnosti povrchu, ke kterému kapky přimrzají a ani se nestačí zaplnit prostor mezi již přimrzlými kapkami. Z tohoto důvodu tento typ námrazy není dobře přílnavý a lze jej z povrchu předmětů odstranit. Povrch námrazy je hrubý až zrnitý a jeho barva je neprůhledná především z důvodu zamrzlých bublinek vzduchu (Český hydrometeorologický ústav 2014).

2. Námraza průsvitná

Tento druh námrazy je tvořen kompaktní vrstvou ledu, průsvitného zbarvení, s drsným povrchem. Vzniká pomalým přimrzáním kapek za teplot okolo 0 až -3 °C (Monroe 1993). Díky nízké rychlosti mrznutí stačí kapičky vody vyplnit nerovnosti povrchu těles i zalít prostor mezi již zamrzlými kapkami. Výsledkem toho je vrstva ledu velice podobná ledovce. Nejčastěji se vytváří na předmětech ze stran směřujících proti větru. Takto vzniklá námraza je charakteristická vy-

sokou přilnavostí a její odstranění je možné pouze táním nebo mechanickým způsobem (Český hydrometeorologický ústav 2014).

### 3. Námrazy ohrožující letectví

Nejvýznamnějším druhem je námraza žlábkovitá. Tento typ námrazy se vytváří na letadlech během jejich letu. Nevytváří se na náběžných hranách letadel, jelikož jejich teplota se pohybuje z důvodu kinetického zahřátí nad bodem mrazu. Jejím vlivem může dojít ke změnám aerodynamice letadel, a proto je považována za nejnebezpečnější námrazový jev v letectví (Monroe 1993). Z hlediska letecké dopravy jsou definovány ještě další druhy námrazy, které mohou ohrozit její provoz: 1) Námraza profilová, která vzniká při teplotách nižších než  $-20^{\circ}\text{C}$  (Monroe 1993). Vzhledem k tomu, že nemění aerodynamické vlastnosti letadla, se nepovažuje za příliš nebezpečnou. 2) Námraza beztvářá tato námraza se vytváří za teplot mírně kolísajících pod bodem mrazu. Její největší nárůst nastává, stoupá-li letadlo smíšenými oblaky (Monroe 1993).

### 4. Jinovatka

Jinovatka, někdy též označována jako krystalická námraza je jedním z námrazových jevů. Jinovatka je tvořena jemnými ledovými jehlami nebo šupinami, jež vytváří tenkou vrstvičku na povrchu těles (vegetace, předměty, zemský povrch). Jinovatka vzniká zejména při klesání z chladnějšího a suššího do teplejšího a vlhčího prostředí. Nejčastěji se tvoří při teplotách nižších než  $-8^{\circ}\text{C}$  (Monroe 1993). Díky její snadné přilnavosti nepřináší jinovatka žádné škody na vegetaci a lze ji snadno odstranit.

## Kapitola 6

### Diskuze a závěr

Led je specifická sloučenina, která svým charakterem a rozšířením nemá na Zemi obdoby, může nabývat nejrůznějších podob a je nedílnou součástí mnoha přírodních procesů. Ač se s ním lidstvo setkává již od počátku věků, ne všechny otázky již byly vyřešeny.

Významnou část naší planety tvoří ledovce nebo ledovcové tabule, v závislosti na měnícím se klimatu jsou ovlivňovány a mohou zásadním způsobem měnit přírodní prostředí, jejich tání může způsobit stoupání hladiny moří na globální úrovni. Protože je led častým zdrojem pitné vody, při jeho roztátí by mohly nastat obrovské problémy se zásobováním pitnou vodou v určitých oblastech. Z těchto důvodů je v poslední době výzkum ledovců směřován k pochopení veškerých procesů, při kterých dochází k jeho tání.

Vzhledem k tomu, že sníh je základním prvkem, jehož akumulací se vytváří ledovce nebo firnová pole, je pochopitelné, že je předmětem zájmu vodohospodářů jakožto zásobárna pitné vody. Neopominutelným je též pro rekreační činnost, pochopení jeho chemizmu a mineralogie by mohlo například přispět k zefektivnění tvorby umělého sněhu v oblastech, kde již nejsou meteorologické podmínky dostatečně příznivé. Kromě těchto kladných přínosů může mít sníh na lidstvo i negativní vliv: lavinové nebezpečí nebo narušení statiky staveb často vede k značným materiálním škodám nebo i ztrátám na životech. A proto v poslední době vznikají četné studie zabývající se touto problematikou.

Oteplování naší planety přináší veliké změny a to především v severských oblastech. Tamní trvale zmrzlé půdy - permafrost, již na mnoha místech tají. Tento fakt představuje závažný problém. Vlivem rozmrazení permafrostu dochází k narušení mechaniky hornin, což vede ke značným materiálním škodám, které pak mohou vytvářet obrovskou zátěž pro ekonomiku mnoha států. Dalším problémem je vysoké množství uhlíku obsažené v permafrostu. Při jeho tání se pak uhlík uvolňuje a dále tak urychluje oteplování klimatu. Toto téma je stále v mnoha studiích o distribuci uhlíku v atmosféře opomíjeno a nepřikládá se mu veliký důraz. Je potřeba se nad tímto tématem hlouběji zamyslet a věnovat mu více pozornosti, protože by mohlo vyvolat závažné změny v klimatologii Země.

V současné době probíhají satelitní mise se speciálním zaměřením na kryosféru. Díky nim by měly být lépe popsány některé procesy a navíc se od nich očekává, že poskytnou přesnější údaje s širším záběrem na antarktický kontinent.

Kromě naší planety se vodní led vyskytuje na mnoha objektech sluneční soustavy a patrně i mimo ní. Mnoho studií například popisuje možnost výskytu ledu na Měsíci, existuje však řada argu-

mentů pro i proti. Výzkum ledu ve vesmíru je důležitý z mnoha důvodů. Kometární ledy mohou podat důkazy a záznamy o procesech, které probíhaly při vzniku Sluneční soustavy. V posledních letech mise sondy Near-Shoemaker (NASA) a družice Messenger (v současné době obíhající Merkur (Havlíček 2006)) přinesly zajímavé poznatky v oblasti výzkumu asteroidů a předpokládají existenci podmínek podobných periglaciálnímu prostředí na Zemi a existenci permafrostu. Tyto výzkumy říkají, že výskyt permafrostu na asteroidech a trans-neptunských objektech (TNO) je mnohem hojnější, než se dříve předpokládalo. Permafrost na těchto tělesech by mohl sloužit jako záznam existujícího nebo fosilního mikrobiálního života.

Ohledně ledu a problematiky s ním související je stále mnoho otázek, které čekají na vysvětlení a kterými je potřeba se dále zabývat.

## Literatura

- Barlels-Rausch, T. a. k. (2012): Ice structures, patterns, and processes: A view across the ice-fields. *Výzkumná zpráva*. 62 str.
- Bhutiyani, M., R. (2011): Icefall. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 628 – 630.
- Bianchi, A. (2004): Frozen waterfalls: how they develop, how they collapse. *International Federation of Mountain Guides Association. Výzkumná zpráva.*, 23 str.
- Blake, G., A., Qi, C., Hogerheijde, M., R., Gurwell, M., A., Muhleman, D., O. (1999): Sublimation from icy jets as a probe of the interstellar volatile content of comets. *Nature*, 398, str. 213–216.
- Czudek, T. (2005): Pleistocenní permafrost v České republice. In: Czudek, T. (ed.): *Geomorfologický sborník. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích*, str. 145–148.
- Cílek, V. (2013): Uhlík, hodně uhlíku. *Vesmír*, 92, č. 1, str. 13.
- Debennetti, P., G., Stanley, H., E. (2003): Supercooled and Glassy Water. *Physics Today*, str. 40 – 46. june.
- Dvořák, J. (2008): Led neobyčejný minerál. *Časopis Krkonoše - Jizerské hory*, , č. 4.
- Fletcher, N., H. (1970): *The Chemical Physics of Ice*. Cambridge University Press, 271 str.
- Furukawa, Y. (2011): Ice. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 557 – 560.
- Harris, S., A. a. k. (1988): *Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*. National Research Council of Canada, 156 str.
- Janoška, M. (2008): *Nejkrásnější vodopády České republiky*. Academia, 283 str.
- Klose, Z. (2008): *Kvantitativní vývoj sněhové pokrývky na experimentálním povodí Modrava 2*. Magisterská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí. Diplomová práce., Praha, 76 str. 4 příl.
- Kumar, R. (2011): Glacier sliding. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 415.
- Lawrence, D. M., Slater, A. G. (2005): A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. *Geophysical Research Letters*, 32, č. 24.



- Libbrecht, K., G. (2011): Snow crystal Structure. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 1038 – 1040.
- Libbrecht, G., K. (2005): The physics of snow crystals. *Reports on Progress in Physics*, 68, str. 855–895.
- Lister, T., O'Driscoll, C., Reed, N., of Chemistry (Great Britain). Education Division, R. S. (1995): *Classic Chemistry Demonstrations*. Education Division, Royal Society of Chemistry, 284 str.
- Loerting, T., Winkel, K., Seidl, M., Bauer, M., Mitterdorfer, C., Handle, P., H., Salzmann, Ch., G., Mayer, E., Finneyd, J., L., Bowronde, D., T. (2011): How many amorphous ices are there? *Physical chemistry chemical physics*, 13, str. 8783–8794.
- Mahaney, W., C. (2011): Permafrost on asteroids. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. springer, str. 848 – 852.
- Marshall, J., S. (2007): Modelling Glacier Response to Climate Change. In: Knight. P., G. (ed.): *Glacier Science and Environmental Change*. str. 163–173.
- Matoušek, V. (2004): *Ledový režim vodních toků*. výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, Praha, 203 str.
- Mercier, J., L., Bourlés, D., L., Kalvoda, J., Engel, Z., Braucher, R. (2002): Report on radiometric 10 Be dating of glacial and periglacial landforms in the Giant Mountains. *Opera corcontica*, , č. 39, str. 169–174.
- Mikuláš, R. (2005): Permafrost a změny klimatu. *Vesmír*, 6, č. 84, str. 346–348.
- Mikuláš, R. (2010): *Ledové Čechy*. Academia, Praha, 296 str.
- Mishima, O. (1996): Relationship between melting and amorphization of ice. *Nature*, 384, č. 384, str. 546 – 549.
- Monroe, W. H. (1993): *Meteorologický slovník výkladový & terminologický*. Academia, 594 str.
- Nobes, D., C. (2001): Ground penetrating radar measurements over glaciers. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 490 – 505.
- Obbard, R., W., Baker, I., Lomonaco, R., W. (2011): Firn. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 290 – 293.
- Pilous, V. (2003): Ledové Vodovády. *Časopis Krkonoše - Jizerské hory*, , č. 2, str. 4 – 5. únor.
- Pokorný, R., Holec, M. (2009): *Jeskyně Ústeckého kraje*. XYZ, Praha, 273 str.
- Schilling, G. (2011): Dark ice on a hot planet. *Science*, 334, č. 6053, str. 160–162.
- Shur, Y., Jorgenson, M., T., Kanevskiy, M., Z. (2011): Permafrost. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 841 – 848.

Singh, A., K. (2011): Snow. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 1031–1032.

Skřehot, P. (2004): *Stručné základy teorie bouřek*. Meteorologická Operativní Rada, Praha, 36 str.

Stickler, M. (2008): *Anchor ice formation and habitat choice of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr in steep streams*. Magisterská práce. Norwegian University of Science and Technology, 65 str.

Švec, M. (2014): *Ledopády v Krkonoších*. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie. Bakalářská práce., Praha, 65 str. 65 s.

Tao, S., H. (2011): River ice hydrology. In: Singh, V., P. and Singh, P. and Haritashya, U., K. (eds.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 939–942.

Tolasz, R., Míková, T., Valeriánová, A., Voženílek, V. (2007): *Atlas podnebí Česka*. Univerzita Palackého v Olomouci a ČHMU, Praha a Olomouc, 255 str.

Vaughan, D., G. (2007): The Antarctic Ice Sheet. In: Knight, P., G. (ed.): *Glacier Science and Environmental Change*. str. 209–220.

Vítek, J. (1970): Pseudokrasové tvary Trstěnické tabule a přilehlého údolí Tiché Orlice. *Československý kras*, , č. 22, str. 35–48.

Xiao, C. (2011): Acidity of glacier ice. In: Singh, V., P., Singh, P., Haritashya, U., K. (ed.): *Encyklopedia of snow, ice and glaciers*. Springer, str. 3 – 4.

Zimov, S., A., Schuur, E., A., Chapin III, F., S. (2006): Permafrost and the Global Carbon Budget. *Science*, 312, č. 5780, str. 1612 – 1613.

Židek, D., Lipina, P. (2003): Návod pro pozorovatele meteorologických stanic. *Metodický předpis*, 13, str. 1 – 90.

Žák, K., Skála, R., Filippi, M., Plášil, J. (2010): Ikait - málo známý minerál zaledněných jeskyní: výskyt v občasném sezónním zalednění jeskyně Koda (Český kras). *Bulletin mineralogicko-petrologického oddělení Národního muzea v Praze*, 18, č. 1, str. 109–115.

## Další zdroje

Agriculture, Canada, A.-F. (2013): Periglacial features associated with permafrost - affected (Cryosolic) soils in the Northwest Territories and Nunavut.

<http://sis.agr.gc.ca/cansis/images/nt/peri/index.html> [cit. 9.3.2014].

Chaplin, M. (2014a): Amorphous Ice and Glassy Water.

<http://www1.lsbu.ac.uk/water/amorph.html> [cit. 15.3.2014].

Chaplin, M. (2014b): Cubic Ice: Ice Ic/ Ice Ih alternate layers; Ice Isd.

<http://www1.lsbu.ac.uk/water/ice1h1c.html> [cit. 14.4.2014].

Havlíček, A. (2006): Messenger.

<http://spaceprobes.kosmo.cz/index.php?cid=108> [cit. 12.5.2014].

Heimbuch, J. (2014): Formations Called Penitentes.

<http://www.treehugger.com/natural-sciences/nature-blows-my-mind-strange-snow-formations-called-penitentes.html> [cit. 12.5.2014].

Jeskyně České republiky (2014): Nej... v jeskyních.

<http://www.jeskyne.cz/cz/sprava/kras-a-jeskyne/nej-v-jeskynich/> [cit. 14.4.2014].

Kemp, N. (2013): Where Am I?

<http://www.polartrec.com/expeditions/predatory-spiders-in-the-arctic-food-web-2013/journals/2013-07-03> [cit. 16.4.2014].

Lichtman, H. (2014): Sun Cups - Stoney Indian Pass.

<http://www.harrylichtman.com/sun-cups-stoney-indian-pass> [cit. 18.2.2014].

Machens, C. (2013): Estimating northern polar CH<sub>4</sub> flux.

<http://climatestate.com/2013/09/03/estimating-northern-polar-ch4-flux/> [cit. 5.4.2014].

Organization, W. M. (2014): WMO Sea-ice nomenclature.

<http://www.aari.nw.ru/gdsidb/XML/volume1.php?lang1=0&lang2=1&arrange=0&self=0> [cit. 5.4.2014].

Piel, K. (2014): Eispolygone.

[http://www.awi.de/fileadmin/user\\_upload/News/Press\\_Releases/2009/4.\\_Quartal/Eispolygone\\_KPiel\\_w.jpg](http://www.awi.de/fileadmin/user_upload/News/Press_Releases/2009/4._Quartal/Eispolygone_KPiel_w.jpg) [cit. 12.6.2014].

Rafferty, J., P. (2014): Regolith.

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/496174/regolith> [cit . 20.5.2014].

Smith, J., H. (2013): Robotic Scouts for a Human Mission to an Asteroid.

<http://start1.jpl.nasa.gov/caseStudies/asteroidSurveyors.cfm> [cit . 12.6.2014]

Český hydrometeorologický ústav (2014): Systém integrované výstražné služby (SIVS) a Informační zprávy hlásné a předpovědní povodňové služby ČHMÚ.

<http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/sivs/sivs> [cit. 8.4.2014].

Židková, K. (2012): V puklinových jeskyních vydrží rampouchy až do června.

<http://znojemsky.denik.cz/serialy/v-puklinovych-jeskynich-vydrzi-rampouchy-az-do-cervna-20120916-aib9.html> [cit. 18.2.2014].

# Kapitola A

## Obrázky



**Obrázek A.1.** Suncups. Zdroj: (Lichtman 2014).



**Obrázek A.2.** Penitentes. Zdroj: (Heimbuch 2014).

# Kapitola B

## Tabulky

Planet	Observed species in order of abundance
<b>Mercury</b>	H <sub>2</sub> O in polar craters
<b>Earth</b>	
Moon	H <sub>2</sub> O at poles and in craters
<b>Mars</b>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O surface, subsurface, and stratospheric aerosols
<b>Asteroids</b>	H <sub>2</sub> O detected on 24 Themis, 65 Cybele
<b>Jupiter</b>	NH <sub>4</sub> SH, H <sub>2</sub> O
Io	SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> O
Europa	H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Ganymede	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
Callisto	H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
<b>Saturn</b>	
Main rings	H <sub>2</sub> O
Titan	H <sub>2</sub> O on surface; CH <sub>4</sub> clathrates buried?; HCN, nitriles as icy stratospheric aerosols
Mimas	H <sub>2</sub> O
Enceladus	H <sub>2</sub> O
Tetis	H <sub>2</sub> O
Dione	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub>
Rhea	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub>
Hyperion	H <sub>2</sub> O
Iapetus	H <sub>2</sub> O
<b>Uranus</b>	
Miranda	H <sub>2</sub> O
Ariel	H <sub>2</sub> O
Umbriel	H <sub>2</sub> O
Titania	H <sub>2</sub> O
Oberon	H <sub>2</sub> O
<b>Neptune</b>	
Triton	N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
<b>Trans-Neptunian objects</b>	
Pluto	N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, H <sub>2</sub> O
Charon	H <sub>2</sub> O
Haumea	H <sub>2</sub> O

**Tabulka B.1.** Objekty Sluneční soustavy, na kterých byl existence ledu zjištěna, nebo se předpokládá.  
Zdro: (Barlels-Rausch 2012).