

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA STAVEBNÍ**

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

**Mrznutí a tání vody v porézním prostředí**

Freezing and thawing of water in porous media

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martina Sobotková, Ph.D.

Vypracoval: Jakub Jurák

Praha 2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Jurák</u>	Jméno: <u>Jakub</u>	Osobní číslo: <u>460465</u>
Zadávací katedra: <u>K143</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Inženýrství životního prostředí</u>		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Mrznutí a tání vody v porézním prostředí</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Freezing and thawing of water in porous media</u>	
Pokyny pro vypracování: V rámci bakalářské práce zpracujte rešerši na téma tání a zamrznání permafrostu. Využijte stávající laboratorní sestavu k provedení testovacích experimentů mrznutí a tání ve vzorku naplněném vzduchem a vodou, poté proveďte opakované experimenty s plně nasyceným pískem. Změřte deformace během mrznoucí fáze experimentu. Doplňte sestavu o další teplotní čidla a porovnejte jejich odezvu. Výsledky diskutujte.	
Seznam doporučené literatury: Články v odborných časopisech indexovaných v databázi WOS a dalších relevantních časopisech. Slattery, J. C., Interfacial Transport Phenomena, Springer, 2007	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Martina Sobotková, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>25.2.2020</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>17.5.2020</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

<u>25.2.2020</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

# PROHLÁŠENÍ

Jméno studenta: Jakub Jurák

Název bakalářské práce: Mrznutí a tání vody v porézním prostředí

Prohlašuji, že jsem uvedenou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením školitele Ing. Martiny Sobotkové, Ph.D. Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne 17. 5. 2020

---

podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto odstavcem bych chtěl poděkovat těm, kteří mi pomohli při psaní této práce, byli mi oporou a podporovali mě, zejména mé rodině a blízkým přátelům. Zvláštní poděkování patří Ing, Martině Sobotkové, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a vždy přítomnou pomoc.

Tato práce vznikla za podpory projektu grantové agentury GA ČR 17-06759S „Vyšetřování podpovrchového proudění s fázovými přechody”.

## ANOTACE

Hlavním cílem bakalářské práce bylo provést sérii testovacích experimentů mrznutí a tání na vzorku naplněného vzduchem, vodou a plně nasyceným pískem. Měřicí sestava byla v rámci bakalářské práce upravena, byla nainstalována doplňková teplotní čidla a vzorek byl upravován dle zadání testovacích experimentů. Během experimentů se vzduchem, vodou a pískem byly měřeny průběhy teplot uvnitř a vně vzorku umístěného v mrazicí jednotce. Válcová experimentální sestava byla sestavena z vnitřního válcového vzorku, který byl po stranách a spodním okraji obalen izolačními vrstvami. Povrch vzorku byl zakryt hliníkovou pokličkou. Nádoba se vzorkem byla umístěna do mrazicí jednotky, kde byla vystavována teplotám kladným i záporným. Vývoj teplot uvnitř a vně vzorku byl zaznamenáván teplotními čidly (109 SS-L, Campbell Scientific, U.S.A.). Čtyři teplotní čidla byla umístěna v různých hloubkách uvnitř vzorku a tři mimo vzorek. Hodnoty teplot byly díky řídicí a záznamové jednotce (CR 1000, Campbell Scientific, U.S.A.) zaznamenány a uloženy. Byly provedeny dva testovací experimenty se vzduchem a nastavením teplot  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jeden testovací experiment s destilovanou vodou a nastavením teplot  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tři experimenty s plně nasyceným vzorkem písku s různým nastavením teplot. Experimenty poskytly detailní informace o dynamice a teplotně-mechanických změnách během fází tání a mrznutí. Horizontální teplotní gradient byl pozorován během obou fází mrznutí a tání. Výsledky ukazují průběhy teplot a jejich rozložení v průběhu experimentu. Teploty uvnitř i vně vzorku se drží teplotní stratifikace, kdy chladnější vzduch s vyšší hustotou se drží u dna.

## ANNOTATION

The main aim of this thesis was to perform a series of freeze-thaw test experiments on sample filled with the air, distilled water and fully saturated sand. The experimental set-up was modified and the additional temperature sensors were installed. Sample was adjusted according to the assignment of testing experiments. During experiments the inner temperature and outer temperature were monitored. The cylindrical experimental setup was assembled with an inner cylindrical sample, which was wrapped with insulation layers on the sides and bottom edge. The top of the sample was covered with an aluminum lid. The sample container was placed in a freezer unit and it was exposed to positive and negative temperatures. The temperatures were monitored by temperature sensors (109 SS-L, Campbell Scientific, U.S.A.). Four temperature sensors were placed at different depths inside the sample and three outside of the sample. Two test experiments with air and temperature settings of + 5 °C, 0 °C and + 17 °C, + 20 °C, one test experiment with distilled water and temperature settings of + 5 °C, 0 °C and three experiments with different temperature settings were done. The samples provided detailed information on the dynamics and thermo-mechanical changes during the thawing and freezing phases. A horizontal temperature gradient was observed during freezing and thawing cycles. The results show temperature profiles during air testing experiment and their distribution inside and outside the sample. The temperature stratification where the colder air with higher density is kept at the bottom, was monitored.

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Rešerše literatury .....	11
3	Teorie .....	17
3.1	Rovnice vedení tepla bez transportu vzduchu .....	17
3.2	Fázové přeměny .....	18
3.2.1	Rovnováha pro dvě fáze .....	18
3.3	Latentní teplo fázového přechodu.....	19
4	Materiál a metody .....	21
4.1	Mrazicí jednotka .....	21
4.2	Experimentální válcová sestava.....	23
4.3	Teplotní čidla .....	25
4.4	Záznam měřených dat .....	26
4.5	Příprava vzorků.....	27
4.5.1	Vzorek naplněný vzduchem .....	27
4.5.2	Vzorek naplněný destilovanou vodou .....	27
4.5.3	Homogenní pískový vzorek.....	27
4.6	Princip měření experimentu .....	28
4.7	Zpracování dat .....	28
4.8	Nastavení experimentů.....	28
4.8.1	Experiment se vzduchem – S1 .....	28
4.8.2	Experiment se vzduchem – S2 .....	29
4.8.3	Experiment s destilovanou vodou – S3 .....	29
4.8.4	Experiment s homogenním nasyceným pískem – S4 .....	29
4.8.5	Experiment s homogenním nasyceným pískem – S5 .....	29
4.8.6	Experiment s homogenním nasyceným pískem – S6 .....	30

5	Výsledky a diskuze .....	31
5.1	Experiment se vzduchem – S1 .....	31
5.2	Experiment se vzduchem – S2 .....	33
5.3	Experiment s destilovanou vodou – S3.....	34
5.4	Experiment s nasyceným pískem S4.....	36
5.5	Experiment s nasyceným pískem S5.....	38
5.6	Experiment s nasyceným pískem S6.....	40
6	Závěr .....	42
7	Seznam obrázků .....	43
8	Seznam tabulek .....	44
9	Přílohy.....	45



# 1 Úvod

Dlouhodobě je pozornost věnována tání ledovců a jeho důsledkům. O dopadech tání další rozsáhlé zamrzlé plochy na zemi, tzv. permafrostu, zatím víme o něco méně. V současné době zaujímá permafrost přibližně 20 % zemského povrchu, převážně na severní polokouli.

Permafrost je trvale zamrzlá půda, pokrytá několika decimetry silnou vrstvou zeminy a rostlinného detritu, tzv. aktivní vrstvy. Tato svrchní vrstva v létě obvykle taje a v zimě zamrzá. Avšak v poslední době bylo pozorováno, že na některých místech aktivní vrstva ani v zimních měsících nezamrzá (*Welch, 2019*). Dokonce, v arktických oblastech dochází k oteplování této vrstvy dvakrát rychleji než ve zbytku planety. Příčinou může být sněhová pokrývka, která nebyla až do současnosti v oblastech permafrostu obvyklá. Souvislá vrstva sněhu udržuje v zimních měsících teplo uvnitř aktivní vrstvy. (*Welch, 2019*)

V minulosti bylo území, kde se v dnešní době nachází permafrost, považováno za ledovou plochu bez přítomnosti vegetace a živočichů. Dle novějších výzkumů je možné, že se v minulosti na tomto území rozprostíraly úrodné pastviny, které poskytovaly potravu pro býložravce, jako jsou koně, bizoni apod. Jak zvířata hynula a rostliny odumíraly, nízké teploty zpomalovaly jejich rozklad a v průběhu času se staly součástí permafrostu. Vědci na základě provedených studií odhadují, že permafrost zadržuje přibližně 1 600 giga tun uhlíku, což je asi dvakrát více, než kolik je ho přítomno v atmosféře (*Schuur a kol., 2016*).

Tání a opětovné zamrzání permafrostu může způsobit např. deformace budov a dopravní infrastruktury. V oblastech, kde se nacházejí ropovody a plynovody jsou využity speciální konstrukce, které nesou plynovody nebo ropovody nad povrchem půdy. Ropa je transportována při vyšších teplotách, proto ropovody vedou nad půdním povrchem. Např. při těžbě ropy, jsou plošiny založeny na betonových blocích, aby při těžbě nedocházelo k tání permafrostu.

Předkládaná bakalářská práce si klade za cíl prohloubit znalosti o fyzikálních principech tání a mrznutí vody na velkém vzorku (o objemu 3000 cm<sup>3</sup>) naplněného plně nasyceným pískem. Právě laboratorní experimenty na velkém pískovém vzorku se ukázaly vhodné pro studování teplotního gradientu. Během experimentů byly měřeny teplotní průběhy uvnitř a vně vzorku. V rámci bakalářské práce byla experimentální

sestava doplněna o další teplotní čidla. Bakalářská práce představuje výsledky testovacích experimentů se vzduchem, destilovanou vodou a pískem.

Cílem této práce bylo (i) provést rešerši na téma mrznutí a tání permafrostu, (ii) provést testovací experimenty mrznutí a tání ve vzorku naplněného vzduchem a vodou, (iii) provést opakované experimenty s plně nasyceným pískem, (iv) porovnat odezvy více teplotních čidel.

Vzhledem k usnesení vlády České republiky ze dne 12. března 2020 č. 194, vláda v souladu s čl. 5 a 6 ústavního zákona č. 110/1998 Sb., o bezpečnosti České republiky vyhlásila pro území České republiky nouzový stav z důvodu ohrožení zdraví v souvislosti s prokázáním výskytu koronaviru /označovaný jako SARS CoV-2/ na území České republiky na dobu do 17. května 2020. Vzhledem k vyhlášení nouzového stavu vydal rektor ČVUT v Praze příkaz č. 7/2020 o pozastavení kontaktní výuky. Všem studentům ČVUT v Praze byla vyhlášena distanční forma výuky a zákaz vstupu do budovy.

Vzhledem k tomu, že nebylo od 12. 3. 2020 do 20. 4. 2020 možné studentem navštěvovat budovu a provést zbývající experiment týkající se deformací vzorku při různých teplotách, byla tato část po konzultaci s vedoucím diplomové práce a vedoucím katedry nahrazena zpracováním dvou experimentů, které byly naměřeny dříve.

## 2 Rešerše literatury

Cykly, při kterých zemina opětovně mrzne a taje, jsou fenoménem pro mnoho oblastí na planetě. Tyto cykly ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti zemin, které následně ovlivňují např. pozemní stavby. Ty ovlivňuje nejvíce jev, při kterém voda, měnící se v led, jenž má větší objem, nadzdvihává materiál (zeminu) nad sebou a ovlivňuje tak stavební konstrukce.

Zdvihání půdy způsobují primárně ledové čočky. Zmrznutí vody, obsažené v pórech, zvýší její objem a nadzdvihává půdu nad sebou. Ledové čočky vznikají převážně v místech, kde je přítomna voda. Záporný tlak vznikající na čele mrazu (místo, kde se teplota v půdě dostává pod bod mrazu) způsobí, že je voda přemístěna k čelu mrznutí, kde vytvoří ledové čočky. Tak zvané „ztuhnutí“ zeminy nezpůsobují žádné škody do té doby, než roztají, což způsobí např. sedání budov, či nerovnosti na silnicích (Gordon a kol., 2008).

Nsaif a kol. (2019) se zabývali změnami chování zeminy při mrazících a tajících cyklech při nastavení různé velikosti napětí (až do 1 MPa). Navrhli systém na testování zeminy při nastavení různých podmínek. Jejich systém na testování zemin byl sestaven z následujících částí: tříosé zařízení, ve kterém byl umístěn vzorek; zařízení udržující napětí, aplikující a sledující mechanické zatížení a systém na udržování teploty. Počítačem kontrované zařízení pumpovalo zředěný etylenglykol do cívky okolo vzorku. Vzorek byl nasycen odplyněnou vodou a teplota byla měřena dvěma termistory, na vrchní části a spodní části. Test byl spuštěn s nastavením tlaku 100 kPa a probíhal 24 hodin. Teplota ve vzorku klesla na  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  a zůstala po dobu experimentu až do ukončení stabilní. Po ukončení mrazení se teplota uvnitř vzorku začala vyrovnávat s teplotou okolí ( $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Teploty na obou čidlech se snižovaly a zvyšovaly synchronně, horní teplota byla lehce vyšší, a to díky přirozené konvekci, která se může vyskytovat, uvnitř vzorku. Systém byl dále využíván pro aplikování různých počtů mrazících cyklů, byl měřen objem vzorků a sledovány deformace zeminy.

V Japonsku na ostrově Hokkaidó jsou při tání sněhu sesuvy půdy nebo usmýknutí svahu častým jevem. Vulkanické horniny jsou navíc speciální, údržnost u nich závisí na stupni rozrušení částic. Částice se rozrušují již při působení malých tlaků, tudíž cykly s fázovými přechody mají velký vliv na pevnost a deformaci tohoto druhu hornin. Ishikawa a kol. (2016) zkoumali, jaký vliv mají cykly mrznutí a tání na propustnost

a zadržení vody a také zkoumali chování vulkanického materiálu během období tání sněhu. Experiment byl navržen tak, aby bylo možné nasimulovat mrazící cykly ve vzorcích, napodobující podmínky v reálném prostředí. Použili tříosý přístroj na nenasycenou půdu, který byl schopen vzorky vystavit požadované teplotě a kontrolovat tlak vzduchu a vody v pórech. Chladicí destičky byly umístěny z vrchu i zespodu vzorku. Test byl proveden na čtyřech materiálech, tři vulkanické hrubozrnné zeminy a písek. Výsledky ukázaly, že porušení částic u vulkanické hrubozrnné zeminy, po sérii cyklů vzrostlo a zemina měla jemnozrnější texturu.

Sérii testů na různých typech zeminy provedli také *Zeinali a kol. (2016)*. Vzorky zeminy vystavovali mrazu a hlavním cílem jejich výzkumu posledních let bylo kategorizovat půdy, dle jejich citlivosti vůči mrazu. Všechny přístroje, jejichž cílem bylo zkoumání vlivu mrazících cyklů na půdu, fungovali na podobném principu, tzn. byly cylindrické a tepelný tok byl jednodimenzionální. Lišily se pouze v přístupu k volné vodě, výšce, průměru, teplotním gradientu, přetlaku, chladícím systémem nebo stupni saturace.

Mokřady ve vysokých zeměpisných šířkách jsou přirozenými zdroji metanu (*Wagner a kol., 2003*). Metan přirozeně vzniká dvěma mikrobiologickými procesy, liší se jen v dostupnosti kyslíku. Mikrobiologický proces vzniku metanu ( $\text{CH}_4$ ) při opětovném zmrazení na podzim a jeho budoucí osud při tání v létě ještě není dobře prozkoumán. Dlouhodobá Wagnerova studie proudění metanu na Sibiři ukázala, že se metan uložený na podzim předešlého roku přidává k nově vyprodukovanému na začátku vegetační sezóny. Bylo zjištěno, že mikrobiální produkce metanu může probíhat při teplotách okolo  $1\text{ }^\circ\text{C}$  v nižších vrstvách půdy. Proto Wagner a kol. (2003) zkoumali a simulovali vliv cyklů mrznutí a tání na proudění metanu v aktivní vrstvě permafrostu. Zařízení pro tuto studii bylo schopno nezávisle mrazit a rozmrazovat horní a spodní část vzorku, dále 5 vodivostních čidel (TDR), teplotních čidel a přístrojů na měření koncentraci plynů umístěných v různých hloubkách měřilo koncentraci  $\text{CH}_4$ , teplotu, obsah půdní vody a zároveň jedno čidlo měřilo koncentraci metanu uvolněného ze vzorku do atmosféry. Vzorek byl odebrán neporušený s flórou, s jeho přirozenou vlhkostí a do zařízení byl vložen zmrazený. Dvě nezávislé mrznoucí destičky umožňovali provedení experimentů s různými scénáři např. celý vzorek zmrzl, vzorek byl mražen pouze seshora, zespodu, uprostřed nebyl zmrzlý apod. Testy ukázaly spojitost mezi teplotou půdy, obsahem vody a metanu během mrazících

a rozmrazovacích cyklů. Po 60 hodinové kalibraci, byl zahájen proces chlazení (mezi 0 - 4 °C), kdy měřená vlhkost rychle poklesla z 80 % na 10 %. Koncentrace metanu v pórech se také snížila. Po 120 hodinách byl zahájen proces tání, kdy bezprostředně po zahájení byla naměřena nejvyšší koncentrace metanu. Laboratorní výsledky experimentů potvrdily výsledky měření v terénu, které indikovaly, že je metan kromě vegetačního období produkován i v podzimním období. Následně je však v permafrostu zadržen a vypuštěn do atmosféry až při periodě tání následující jaro.

Zvyšování teplot napříč severskými oblastmi vyvolává změny v redistribuci vody a v prostorovém rozložení nezamrzlé vody v půdním profilu. Množství vody v půdě ovlivňuje zemědělství, erozi, mikrobakteriální aktivitu pod zamrzlou vrstvou a chování permafrostu při tání, což má efekt na globální oteplování. *Watanabe a kol. (2011)* se zaměřili na sledování průběhu teplot, obsahu vody a změny tlaku během mrazicích cyklů na písku, jílu a hlinitém jílu. Měření proběhlo na válcových vzorcích se zeminou o průměru 7,8 cm a výšce 35 cm. Dvě mrazící jednotky (shora a zespodu) zajišťovaly požadovanou teplotu uvnitř vzorku. K měření teploty uvnitř vzorku bylo instalováno 34 měděných termočlánků, 7 vodivostních čidel (TDR) měřilo průběh půdní vlhkosti a 7 tenzometrů zaznamenávalo průběh tlaků ve vzorku. K izolaci stěn vzorku byla použita guma o tloušťce 1 cm, která byla navíc obalena skelnou vatou. Před zahájením experimentu, byla teplota vzorku ustálena na 4 °C a následně byl zmrazován na teplotu -8 °C směrem od horního okraje vzorku dolů. Teplota na spodním okraji vzorku byla udržována na + 2 °C. Výsledky ukázaly, že obsah nezamrzlé vody a tlaková výška se snižují se snižující se teplotou. Tlak nezamrzlé vody byl v zamrzlé půdě nižší než v nezamrzlé, a proto se voda pohybovala směrem k zamrzlé vrstvě blíže povrchu. V každém vzorku, byly v průběhu experimentu sledovány tři fáze: nezamrzlá část, stagnující část s teplotou pohybující se okolo 0 °C a část zamrzlá. V průběhu experimentu, se v nezamrzlé části prudce snížil obsah vody, která směřovala vzhůru k čelu mrznutí. Průběh a délka trvání stagnující fáze se v každém vzorku lišila. Vztah mezi vlhkostí a tlakovou výškou během experimentu přibližně korespondoval s retenční čarou naměřenou běžnými metodami. Množství tekuté vody prudce kleslo u písku, postupně u jílu a různými rychlostmi u hlinitého jílu. Množství celkové zamrzlé vody u písku a hlinitého jílu vzrostl, kdežto u jílu se celkové množství změnilo jen poblíž mrazového čela.

Opakované zamrzání půdy má za následek terénní změny jako jsou ledové klíny, ledové valy nebo povrchový led. Se stálou teplotou vzduchu pod bodem mrazu začne mrznout povrch půdy a mráz se postupně dostává i do hlubších částí. Voda v pórech postupně zamrzá a zvětšuje svůj objem, zatímco nezamrzlá voda se z hlubších částí dostává vzhůru k povrchu. S každoročním opakováním, migrující voda a led výrazně přetvářejí terén v chladných oblastech. Teplota půdy má vliv na obsah nezamrzlé vody a sílu ledu v ní, což ovlivňuje mechanické vlastnosti půdy.

*Li a kol. (2017)* zkoumali mechanismy tvorby mrazových zdvihů. K výpočtům použili model, vytvořený v rámci studie a postavený na základech zákona zachování energie, hmoty a hybnosti. Jako testovací vzorek byl použit hlinitý jíl, jehož objemový obsah vody na začátku experimentu byl  $0,485 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Testování proběhlo na vzorku ve válci o průměru a výšce 10 centimetrů. Experiment byl zahájen s teplotou  $+1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , horní část byla následně zchlazena na teplotu  $-1,6 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 90 hodin. Průběh experimentu lze rozdělit do tří fází. V prvních deseti hodinách došlo k rychlému teplotnímu skoku, od desáté do třicáté hodiny bylo snižování teplot pozvolné a od třicáté hodiny teplotní změny spíše stagnovaly. Z počátku se čelo mrznutí posouvalo rychlostí 5 mm/h, později se postup čela zpomalil, až se zastavil ve výšce 47 mm nad spodním okrajem. Přesun vody a tvorba ledových čoček probíhaly pouze ve vrchní a střední části vzorku v prvních dvou fázích. Výsledky ukazují, že čím nižší byla teplota půdy, tím menší byl obsah kapalně vody v pórech. Stupeň nasycení stoupal směrem k nezamrzlé části, kde si udržoval stabilní hodnotu 0,45 - 0,5. Ledové čočky se v průběhu experimentu začaly tvořit nejprve při horním okraji, postupně i v hlubších vrstvách. Na konci experimentu byl podíl ledu ve vzorku 70 %. Díky teplotnímu gradientu byla voda z nezamrzlé části přemístěna k čelu mrazu a tam byl naměřen maximální stupeň nasycení a to 0,96. Maximální rozdíl mezi modelem a naměřeným zdvihem na vzorku byl 1 mm. Průběh naměřených deformací na vzorku lze rozdělit do tří fází, kdy v prvních dvou dosáhla hodnota deformace 72 % ze svého maxima naměřeného na konci experimentu.

*Turetsky a kol. (2019)* varují, že tající permafrost může zdvojnásobit oteplování díky skleníkovým plynům uvolněným z tající tundry. Poukazují na fakt, že Arktida se otepluje a permafrost taje, na některých místech poprvé po tisíci letech. Jak teplota půdy stoupá nad bod mrazu, mikroorganismy začínají rozkládat organický materiál. Skleníkové plyny jako oxid uhličitý, metan nebo oxid dusný jsou vypouštěny

do atmosféry a zrychlují globální oteplování. Permafrost v sobě zadržuje až dvojnásobek uhlíku než atmosféra, a to bez mála 1 600 miliard tun (*Schuur a kol., 2016*). Modely, zabývající se simulacemi skleníkových plynů, ukazují, že permafrost postupně taje od povrchu hlouběji. Hlubší vrstvy organické hmoty jsou odhaleny poprvé po desetiletích až staletích a některé modely, už začínají zahrnovat i tuto skutečnost. Objevuje se zde však závažnější problém. Zmrzlá půda nejen, že zadržuje uhlík, ale doslova drží celou krajinu pohromadě. Napříč Arktidou, vlivem tajících ledových kapes, dochází k náhlému propadání půdy v mnoha oblastech. Místo několika centimetrů za rok jsou destabilizovány metry zeminy během několika hodin až dnů. Navíc, propadliny mohou být zaplaveny rozšiřujícími se jezery a mokřady. Na Aljašce můžeme pozorovat několik oblastí, kde dříve zalesněné oblasti jsou dnes zaplaveny vodou (*Olefeldt a kol., 2016*). Jezera a mokřady se stávají velkým problémem z toho důvodu, že vypouštějí do atmosféry větší množství metanu než jiné povrchy. Eroze na svazích je také problematická. Když zemina na jižních stranách svahů rozmrzá, dochází k sesuvům půdy, při kterém se uvolní množství CO<sub>2</sub> do okolí. *Turetsky a kol. (2019)* se domnívají, že náhlé tání v nížinných jezerech a mokřadech a na úpatí hor, by mohlo uvolnit 60 až 100 miliard tun uhlíku do roku 2300. To je nárůstek ke stávajícím 200 miliardám, které přepokládají současné modely postupného tání permafrostu. A jelikož náhlé tání uvolňuje více metanu než postupné, klimatický dopad těchto dvou událostí bude obdobný (*Koven a kol., 2015*). Reálné důsledky mohou být až dvojnásobně horší oproti predikci modelů.

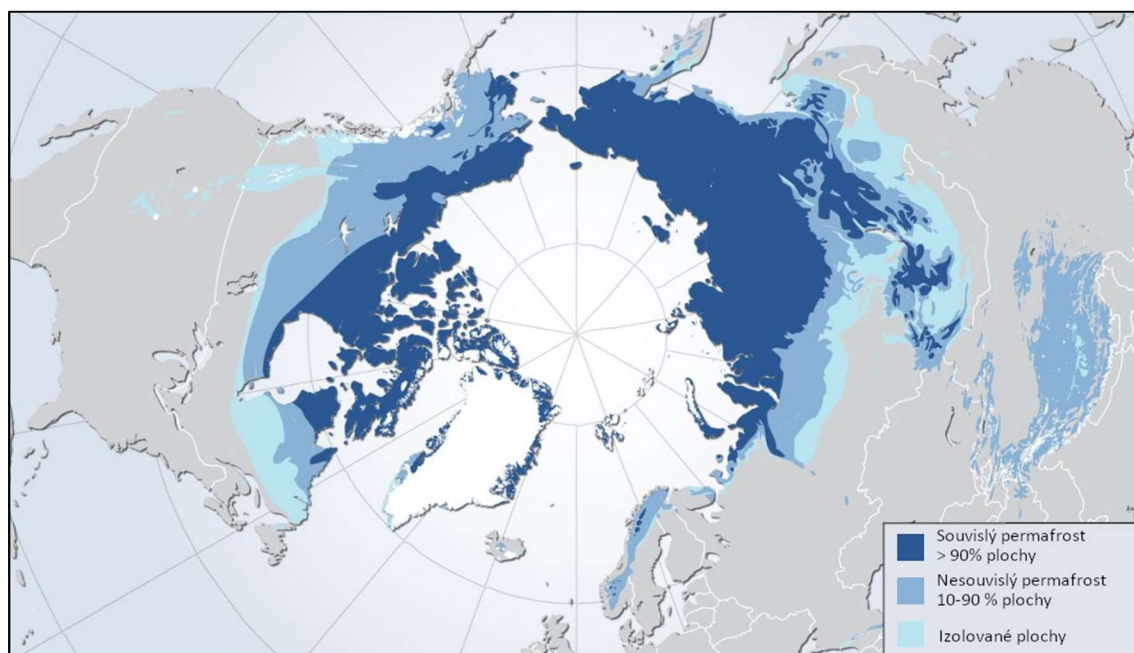
*Shuur a kol. (2015)* se zabývali reakcí velkého množství uhlíku uskladněného ve zmrzlých půdách (permafrostu) v arktických a subarktických oblastech v průběhu klimatických změn. Oteplující se klima zapříčiňuje změny v životním prostředí a zrychlují mikrobiologický rozklad uhlíku a jeho uvolnění do atmosféry společně s metanem. Tato odezva dle jejich studie může urychlit klimatické změny, ale její dopad a doba, kdy se tak stane, zůstávají nejisté.

Termokrasy, významné reliéfové tvary, vznikají roztáním na led bohatého permafrostu, který se propadne a klesne pod okolní terén. *Olefeldt a kol. (2016)* zkoumali, jak se kvůli globálnímu oteplování zvyšuje rychlost vzniku těchto termokrasů, poškozují infrastrukturu a ovlivňují místní hydrologii, ekologii a biochemii. S přibližně 3,6 x 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> se termokrasy rozprostírají asi na 20 % permafrostu na severní polokouli. Odhadují, že téměř polovina podzemního uhlíku je uložena právě

v termokrasu. Jejich výsledky vyzdvihují důležitost zahrnutí termokrasů při posuzování dopadů globálního oteplování v cirkumpolárních oblastech.

Mrazicí a rozmrazovací cykly mohou silně ovlivnit fyzikální a chemické vlastnosti zemin v chladných oblastech, což může mít také efekt na adsorpci a desorpci fosforu v půdě. *Wang a kol. (2017)* provedli v jejich studii sérii jednodimenzionálních testů, aby zjistili chování fosforu v zemině. Výsledky ukázaly, že větší počet cyklů byl spojený se snížením adsorpční kapacity fosforu. A se stejnými koncentracemi exogenního fosforu, desorpční poměr pro zeminy, které byly podrobeny cyklům byl vyšší než poměr naměřený u zemin, které cyklům podrobeny nebyly.

*Stähli a kol. (1996)* podrobili 2 testovací vzorky sérii jednodimenzionálních mrazících a rozmrazovacích testů. Vzorek byl chlazen z vrchní a spodní strany směrem ke středu. Charakteristické křivky průběhu mrazu byly sestaveny pro různé hloubky vzorku a byly použity k odhadu parametrů ve fyzikálně-matematických modelech. Měření obsahu vody v kapalném skupenství v zemině probíhalo pomocí TDR vlhkostních senzorů. Model vytvořený Van Loonem v roce 1991 posloužil k výpočtu koncentrace soli ve vodě z dat naměřených TDR senzory. Výzkum zjistil, že koncentrace soli je velmi citlivá na obsah vody, obzvláště v malém množství. Výsledky ukázaly, že mráz vyvolal redistribuci soli ve vzorku. Zaprvé, se objevilo konvekční proudění soli směrem k mraženým koncům a zadruhé se objevila difuze soli ve směru do středu vzorku.



Obrázek 1: Výskyt permafrostu napříč severkými oblastmi (upraveno z Brown J., 1997)



### 3 Teorie

K vypracování kapitoly 3.1 byla využita publikace *Šimůnek a kol. (2013)*. Kapitoly 3.2 Fázové přeměny a 3.3 Latentní teplo fázového přechodu byly vypracovány z *Opatrný (2009)*.

#### 3.1 Rovnice vedení tepla bez transportu vzduchu

Rovnice vedení tepla při zanedbání efektu difuze vodních par je popsána jednorozměrnou konvektivně – disperzní rovnicí:

$$\frac{\partial C_P(\theta)T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - C_w \frac{\partial qT}{\partial x} - C_w S T \quad (1)$$

kde  $\lambda(\theta)$  je tepelná vodivost půdy [ $\text{MLT}^{-3}\text{K}^{-1}$ ],  $\theta$  je objemový obsah vody [ $\text{L}^3\text{L}^{-3}$ ],  $C_P(\theta)$  je objemová tepelná kapacita pórovitého materiálu [ $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}\text{K}^{-1}$ ],  $C_w$  je objemová tepelná kapacita kapalně fáze [ $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}\text{K}^{-1}$ ],  $q$  je hustota toku [ $\text{LT}^{-1}$ ],  $S$  je propadový činitel [ $\text{L}^{-1}$ ],  $T$  je teplota [ $\text{K}$ ;  $^{\circ}\text{C}$ ],  $t$  je čas [ $\text{T}$ ],  $x$  je prostorová souřadnice [ $\text{L}$ ] (pozitivní vzestupně).

Objemová tepelná kapacita je definována jako součin objemové hustoty a gravimetrické tepelné kapacity. První člen na pravé straně v rovnici 1 představuje tepelný tok, způsobený kondukcí, druhý člen reprezentuje teplo vedené proudící vodou a třetí člen absorpci energie kořeny rostlin spojené s absorpcí vody. Není započítán přenos latentního tepla pohybem par. Rovnice 2 je odvozená z rovnice 1 s využitím rovnice kontinuity popisující proudění vody v proměnlivě nasyceném porézním médiu.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} - S \quad (2)$$

Podle *de Vries (1963)* je tepelná kapacita dána vztahem:

$$\begin{aligned} C_P(\theta) &= C_n \theta_n + C_o \theta_o + C_w \theta + C_a a_v \approx \\ &\approx (1,92\theta_n + 2,51\theta_o + 4,18\theta) \cdot 10^6 \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}] \end{aligned} \quad (3)$$

kde  $\theta$  reprezentuje objemovou frakci [ $\text{L}^3\text{L}^{-3}$ ] a indexy  $n$ ,  $o$ ,  $a$ ,  $w$  představují pevnou fázi, organickou hmotu, plynnou fázi a kapalnou fázi.

### 3.2 Fázové přeměny

Pojem fáze je zobecněním pojmu skupenství, označuje homogenní část makroskopického tělesa. Jednotlivá skupenství v daném prostředí se mohou lišit chemickým složením, skupenstvím, krystalickou strukturou, hustotou, magnetickými vlastnostmi atd.

#### 3.2.1 Rovnováha pro dvě fáze

Teplotní a mechanická rovnováha je dána rovnicí:

$$T_1 = T_2 = T \quad (4)$$

$$p_1 = p_2 = p \quad (5)$$

Kde  $T$  je teplota [K; °C] a  $p$  je tlak [Pa]

Pro systém s konstantním objemem látky v termodynamické rovnováze platí:

$$dF(T, V, N_k) = 0 \quad (6)$$

a při konstantní teplotě můžeme napsat:

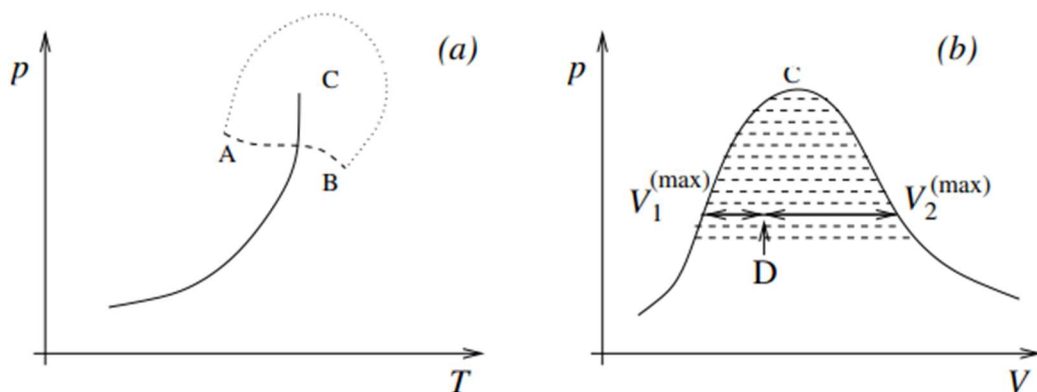
$$dF = \mu_1 dN_1 + \mu_2 dN_2 = (\mu_1 - \mu_2) dN \quad (7)$$

Pokud vyjádříme chemické potenciály jako funkce teploty a tlaku, dostaneme:

$$\mu_1(p, T) = \mu_2(p, T) \quad (8)$$

Rovnice (8) představuje závislost mezi tlakem a teplotou, která je znázorněna na obrázku 2 a lze psát:

$$p = p(T) \quad (9)$$



Obrázek 2: Křivka fázové rovnováhy pro tlak a teplotu a pro tlak a objem (převzato z Opatrný, 2009)

### 3.3 Latentní teplo fázového přechodu

Podobně jako pro vnitřní energii můžeme u systémů s proměnným počtem částic psát vztahy i pro další termodynamické potenciály, konkrétně:

$$dE = TdS - pdV + \mu_1 dN_1 + \mu_2 dN_2 + \dots \quad (10)$$

$$dF = -SdT - pdV + \mu_1 dN_1 + \mu_2 dN_2 + \dots \quad (11)$$

$$dH = TdS + Vdp + \mu_1 dN_1 + \mu_2 dN_2 + \dots \quad (12)$$

$$dG = -SdT + Vdp + \mu_1 dN_1 + \mu_2 dN_2 + \dots \quad (13)$$

Z rovnice (19) plyne Maxwelllova relace:

$$\left(\frac{\partial \mu_k}{\partial T}\right)_{p, N_j} = -\left(\frac{\partial S}{\partial N_k}\right)_{T, p, N_j, \neq N_k} \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial \mu_k}{\partial p}\right)_{T, N_j} = \left(\frac{\partial V}{\partial N_k}\right)_{T, p, N_j, \neq N_k} \quad (15)$$

$$s_k \equiv \left(\frac{\partial S}{\partial N_k}\right)_{T, p, N_j, \neq N_k} \quad (16)$$

Výraz (16) představuje entropii, kterou získá soustava, pokud do ní (za podmínky konstantního tlaku a teploty) přejde jedna částice *k-tého* druhu. Vynásobením tohoto vztahu teplotou získáme  $q_k = T s_k$ , což představuje teplo, které je nutno soustavě dodat, aby při získání jedné částice *k-tého* druhu zůstaly teplota a tlak nezměněné. Pokud soustava přechází z jedné fáze do druhé, pak při přechodu jedné částice z fáze 1 do fáze 2 je nutno dodat soustavě teplo:

$$q = T(s_2 - s_1) = -T \left[ \left(\frac{\partial \mu_2}{\partial T}\right)_{p, N_j} - \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial T}\right)_{p, N_j} \right] \quad (17)$$

tato veličina se nazývá *latentní teplo* (na jednu částici) pro přechod z fáze 1 do fáze 2.

$$v_k \equiv \left(\frac{\partial V}{\partial N_k}\right)_{T, p, N_j, \neq N_k} \quad (18)$$

Výraz (24) má význam objemu, připadajícího na jednu částici *k-tého* druhu (o tuto hodnotu vzroste objem systému, pokud do něj za konstantního tlaku a teploty jednu takovou částici přidáme).

Vztah mezi změnou tlaku s teplotou v rovnováze dvou fází, rozdílem specifických objemů těchto fází a latentním teplem získáme derivací rovnice (8) podle teploty:

$$\frac{\partial \mu_1}{\partial T} + \frac{\partial \mu_1}{\partial p} \frac{dp}{dT} = \frac{\partial \mu_p}{\partial T} + \frac{\partial \mu_2}{\partial p} \frac{dp}{dT} \quad (19)$$

$$-s_1 + v_1 \frac{dp}{dT} = -s_2 + v_2 \frac{dp}{dT} \quad (20)$$

Úpravou získáme rovnici, kterou nazýváme Clausiova – Clapeyronova rovnice:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{s_2 - s_1}{v_2 - v_1} = \frac{q}{T(v_2 - v_1)} \quad (21)$$

Vyplývá z ní např. vztah mezi tlakem a teplotou tání ledu: je-li jedna fáze pevná a druhá kapalná, je  $q$  kladné a pro vodu platí  $v_1 > v_2$ . Pak musí být  $\frac{dp}{dT} < 0$ , tedy s rostoucím tlakem teplota tání klesá. Pro látky, jejichž specifický objem v kapalně fázi je větší než v pevné fázi,  $v_1 < v_2$ , teplota tání s rostoucím tlakem roste.

## 4 Materiál a metody

Laboratorní experimenty mrznutí a tání, které jsou v této práci prezentovány, byly naměřeny v laboratořích katedry Hydromeliorací a krajinného inženýrství (K143), Fakulty stavební, Českého vysokého učení technického v Praze (ČVUT v Praze).

Tato kapitola popisuje experimentální sestavu, která byla navržena k provedení experimentů s fázovými přechody. Experimentální sestava byla navržena Ing. Martinou Sobotkovou Ph.D., ve spolupráci s kolegy Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské, ČVUT v Praze. V rámci bakalářské práce byla sestava vybavena dalšími teplotními čidly. Kapitola obsahuje popis experimentální sestavy, princip provedení samotných experimentů a zpracování dat.

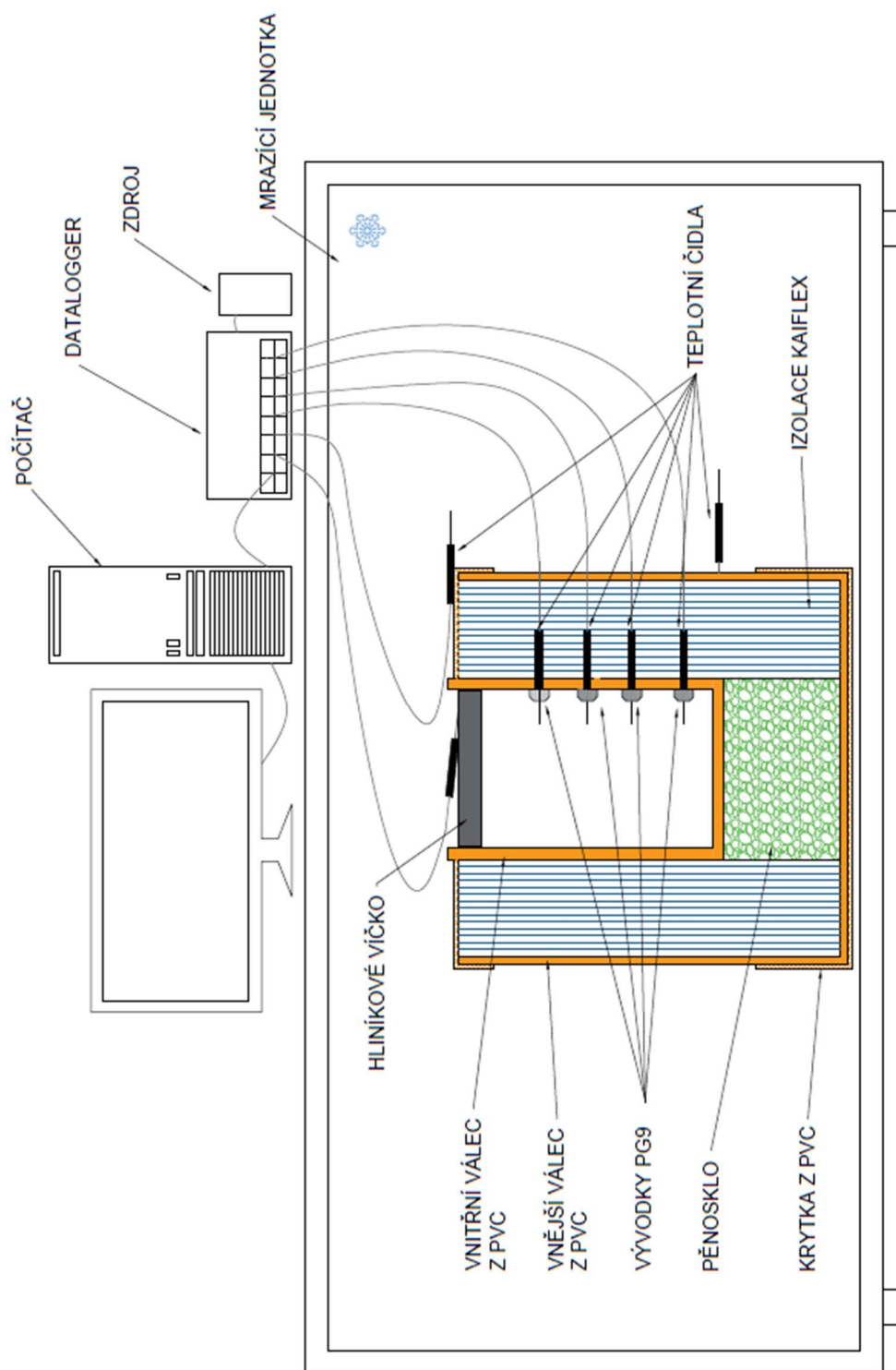
Sestava skládající se z mrazící jednotky, izolované nádoby na vzorek, teplotních čidel, dataloggeru a stolního počítače byla umístěna v laboratoři s nastavenou konstantní teplotou 22 °C.

### 4.1 Mrazící jednotka

Všechny experimenty popsané v této práci byly prováděny v mrazící jednotce (viz. obrázek 4). Jedná se o mrazící skříň KFU 600 s ventilovaným chlazením a provedenou úpravou chladicího agregátu s možností provozu i v plusových teplotách. Byla vyrobena na zakázku firmou KESA s kapacitou 145 l. Mrazící jednotka byla vybavena regulátorem KM 32 a disponovala funkcí mražení až do teploty - 30 °C. Na obrázku 3 je znázorněn programovací display s nastavením jednotlivých teplot a časových intervalů.

Id	Cas	Teplota
0	72:00	5.0 C
1	48:00	0.0 C
2	48:00	5.0 C
3	48:00	0.0 C
4	48:00	5.0 C
5	48:00	0.0 C
6	48:00	5.0 C
7	00:00	0.0 C
8	00:00	0.0 C
9	00:00	0.0 C

Obrázek 3: Programovací display na mrazící jednotce



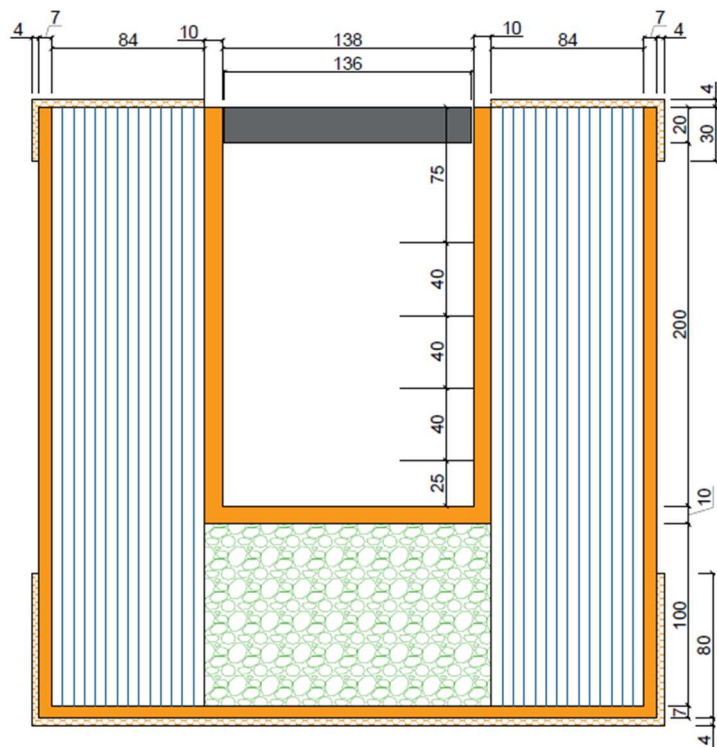
Obrázek 4: Schéma experimentální sestavy (upraveno z Sobotková a kol., 2017)



Obrázek 5: Experimentální válcová sestava umístěná v mrazící jednotce

## 4.2 Experimentální válcová sestava

Na obrázku 5 je znázorněna nádoba na vzorek, která byla navržena a vyrobena z vnitřního a vnějšího válce. Vnitřní válec (průměr 138 mm, výška 220 mm) byl vyroben z polypropylenu o tloušťce stěny 10 mm s teplotním součinitelem  $\lambda=0,17\div 0,22 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Okolo vnitřního válce bylo použito 14 vrstev Kaiflex<sup>®</sup> izolace ( $\lambda=0,034 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). Vnitřní válec byl podepřen vrstvou pěnoskla (OWENS CORNING FOAMGLAS<sup>®</sup>, U.S.A.) o tloušťce 10 cm ( $\lambda=0,04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). Pro snadnější manipulaci byl vnitřní válec s izolačními vrstvami umístěn do vnějšího PVC válce s průměrem 326 mm a tloušťkou stěny 7 mm ( $\lambda=0,200 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). Hliníková destička o průměru 136 mm ( $\lambda=204 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), se pokládala na povrch vzorku, aby bylo zabráněno pohybu pískového vzorku a byl zajištěn přenos teplotních změn. Teplotní čidla byla k plastovému válci upevněna pomocí plastových vývodek PG 9 (Hugro, Německo) znázorněných na obrázku 7. Experimentální válcová sestava byla navržena tak, aby k postupu teplotních změn docházelo pouze seshora a teplotní změny uvnitř vzorku probíhaly horizontálně.



Obrázek 6: Schéma válcové experimentální sestavy

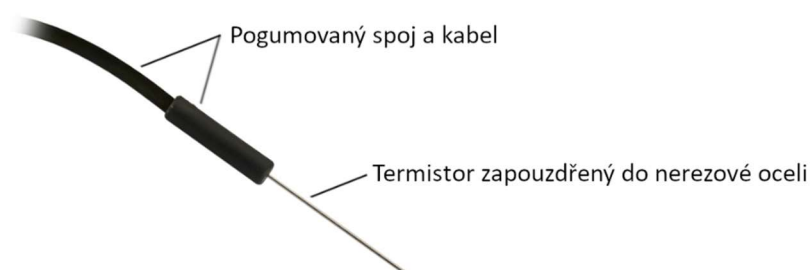


Obrázek 7: Detail umístění vývodek na vnější straně válce



### 4.3 Teplotní čidla

Měření teplot uvnitř i mimo vzorek probíhalo pomocí teplotních čidel 109SS-L (Campbell Scientific, U.S.A.) (obrázek 8). Teplotní čidlo bylo sestaveno z termistoru, který snímal teplotu, byl zapouzdřen do nerezové oceli, která ho chránila v náročných korozivních podmínkách, pogumovaného spoje a kabelu. Termistory byly vyráběny s měřicím teplotním rozpětím od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jako teplotní senzor v čidlech fungoval Micro-BetaCHIP Probe 10K3MCD, 0,5 mm v průměru (Campbell Scientific, U.S.A.). Během experimentů bylo použito celkem sedm teplotních čidel 109SS-L. Čtyři čidla (čidlo č. 1-4) byla nainstalována ve 4 různých hloubkách 7,5; 11,5; 15,5 a 19,5 cm. Čidlo č. 1 měřilo teplotu 3 cm od okraje nádoby, čidla č. 2, 3 a 4 měřila 4 cm od okraje. Dvě čidla (č. 5 a 6) byla umístěna mimo vzorek. Čidlo č. 5 bylo umístěno na horním okraji válce se vzorkem, ve výšce hliníkového víčka a čidlo č. 6 zhruba ve výšce dna vzorku. Poslední čidlo bylo umístěno přímo na hliníkovém víčku, které zakrývalo vzorek, tak, aby se čidlo víčka dotýkalo. Čidla mimo vzorek byla připevněna na požadované místo pomocí pevné lepicí pásky. Pro některá měření bylo čidlo z víčka (čidlo č. 7) přesunuto vedle čidla při horním okraji, a ještě bylo vloženo do pogumovaného pouzdra, aby byla měřena teplota bez okolních vlivů. Všechna čidla byla připojena k dataloggeru CR 1000 (Campbell Scientific, U.S.A.). Data byla automaticky zapisována a časový interval zápisu byl nastaven na 5 sekund. U experimentů naměřených v roce 2018, tj. S4 a S5 byl interval zápisu nastaven na 10 minut.



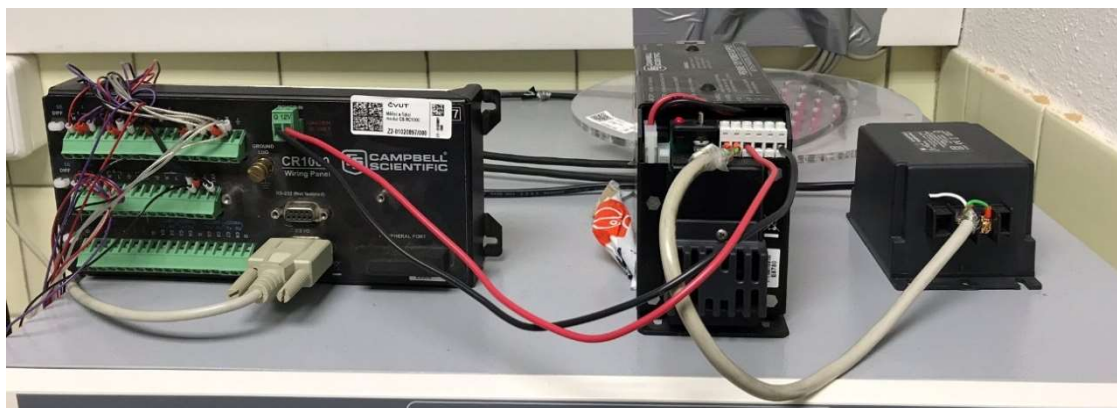
Obrázek 8: Teplotní čidlo 109SS-L, Campbell Scientific, U.S.A. (upraveno z Manuálu k teplotnímu čidlu 109SS-L)

Tabulka 1: Přesnost teplotních čidel v závislosti na teplotě okolí (převzato z Manuál k teplotnímu čidlu 109SS-L)

Teplota okolí	Maximální výchylka
-40 °C	± 0,6 °C
0 °C	± 0,38 °C
25 °C	± 0,1 °C
50 °C	± 0,3 °C
70 °C	± 0,4 °C

#### 4.4 Záznam měřených dat

K záznamu měřených dat všech teplotních čidel byla použita záznamová jednotka CR 1000 (Campbell Scientific, U.S.A.), která byla umístěna mimo mrazící jednotku (viz. obrázek 9) Datalogger byl připojený pomocí USB kabelu ke stolnímu počítači. Digitální vstup, výstup a paměť řídicí jednotky byly ovládány pomocí programu vytvořeného v uživatelském prostředí LoggerNet verze 4.1. Měřená data byla uložena do paměti záznamové jednotky. Odtud byla data importována do souboru MS Excel.



Obrázek 9: Schéma zapojení záznamové jednotky (datalogger CR 1000, Campbell Scientific, U.S.A.) a teplotních čidel 109SS-L

## 4.5 Příprava vzorků

### 4.5.1 Vzorek naplněný vzduchem

Pro provedení testovacího experimentu se vzduchem, byla vnitřní nádoba válcové experimentální sestavy upravena tak, že po vnitřním obvodě vzorku byly umístěny dřevěné podpěry (viz. obrázek 10). Podpěry sloužili ke stabilizaci hliníkového víčka. Mezera mezi hliníkovým víčkem a nádobou byla zalepena průhlednou lepicí páskou, aby bylo omezeno proudění vzduchu z mrazicí jednotky do nádoby a nebyly tak ovlivněny průběhy teplot uvnitř vzorku.



Obrázek 10: Detail umístění dřevěných podpěr ve vzorku se vzduchem

### 4.5.2 Vzorek naplněný destilovanou vodou

Následný testovací experiment byl proveden s vnitřní nádobou, která byla naplněna převařenou destilovanou vodou. Hladina se těsně dotýkala hliníkového víčka. Celkový objem destilované vody v nádobě činil 2,95 l.

### 4.5.3 Homogenní pískový vzorek

Vzorek byl připraven z jemného křemičitého písku. Jednotlivé vrstvy jemnozrnného písku o výšce cca 1 cm byly zhutňovány ve vodní vrstvě destilované

vody, aby bylo docíleno homogenizace vzorku. Na závěr byla přebytečná voda odsáta houbičkou. Hmotnost použitého písku a vody byla vážena na laboratorní váze. Hmotnost použitého písku činila 5 045 g.

#### 4.6 Princip měření experimentu

Připravený vzorek byl umístěn do nádoby v mrazicí sestavě. Teploty a časové intervaly byly nastaveny pomocí programovacího displeje, který byl součástí mrazicí sestavy, a následně byl experiment spuštěn. Nastavení teplot a intervalů se více věnuje kapitola 4.8. Záznam měření byl plně automatický. Měření teplotních čidel bylo zaznamenáváno v intervalu 5 sekund, v experimentech S4 a S5 v intervalu 10 minut.

#### 4.7 Zpracování dat

Naměřená data byla po ukončení experimentu stáhnuta ve formě textového dokumentu pomocí programu LoggerNet 4.1 (viz. obrázek 11). Do textového souboru byla ukládána naměřená data. V prvním řádku lze najít názvy použitého dataloggeru a nastavení teplotních čidel. V druhém řádku se nachází názvy jednotlivých sloupečků, zprava je to přesný čas měření, napětí v dataloggeru, teplota okolí dataloggeru a teploty čidel č. 1-7. Data byla následně zpracována v MS Excel, do programu byla nahrána pomocí funkce: *Načíst data z textu/CSV*.

```
"TOA5","CR1000","CR1000","32082","CR1000.Std.25","CPU:zkouska_teplo.CR1","58749","temperatureNeptun"
"TIMESTAMP","RECORD","batt_volt_Min","PTemp","temp1","temp2","temp3","temp4","temp5","temp6","temp7"
"TS","RN","","","","","","",""
"","","Min","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp","Smp"
"2019-12-10 15:18:40",0,13.31,22.39,-8.73,-8.57,-8.43,-8.46,-5.786,-7.786,-8.79
"2019-12-10 15:18:45",1,13.31,22.39,-8.73,-8.59,-8.44,-8.46,-5.64,-7.661,-8.76
"2019-12-10 15:18:50",2,13.31,22.39,-8.75,-8.59,-8.46,-8.47,-5.484,-7.558,-8.76
"2019-12-10 15:18:55",3,13.31,22.39,-8.75,-8.6,-8.49,-8.47,-5.339,-7.444,-8.72
```

Obrázek 11: Ukázka dat v textovém souboru

#### 4.8 Nastavení experimentů

Tato kapitola popisuje nastavení teplotních intervalů pro jednotlivé experimenty.

##### 4.8.1 Experiment se vzduchem – S1

První testovací experiment byl spuštěn 10. 01. 2020. Teploty uvnitř mrazicí jednotky byly nastaveny na 5 °C a 0 °C a střídaly se po 24hodinových intervalech. Experiment probíhal 10 dní.

#### 4.8.2 Experiment se vzduchem – S2

Měření druhého testovacího experimentu začalo 21. 2. 2020. Teploty byly nastaveny na hodnoty 20 °C a 17 °C a časový interval na 24 hodin. Celková doba trvání experimentu byla sedm dní. U tohoto experimentu bylo jedno teplotní čidlo (čidlo č. 7) přesunuto na horní okraj vzorku a zasunuto do plastové trubice, vedle čidla č. 6 bez plastové trubice (obrázek 12).



Obrázek 12: Detail umístění teplotního čidla č. 6 a 7

#### 4.8.3 Experiment s destilovanou vodou – S3

Experiment s destilovanou vodou probíhal od 19. 1. 2020 a trval 14,5 dne. Průběhy teplot byly nastaveny na 5 °C a 0 °C střídaly se po 48hodinových intervalech

#### 4.8.4 Experiment s homogenním nasyceným páskem – S4

Měření čtvrtého experimentu začalo 14. 6. 2018 a probíhalo téměř 28 dní. V tomto experimentu se střídaly teploty + 10 a – 10 °C nejméně po 72 hodinách. Teplotní čidlo č. 1 nebylo v provozu.

#### 4.8.5 Experiment s homogenním nasyceným páskem – S5

Experiment S5 byl zahájen dne 15. 11. 2018 a jeho měření trvalo 33 dní. Střídaly se zde nastavené teploty + 5 a – 5 °C v intervalech o délce 120 hodin. Teplotní čidlo č. 1 nebylo v provozu u tohoto experimentu.

#### 4.8.6 *Experiment s homogenním nasyceným pískem – S6*

Testování na experimentu S6 začalo 3. 2. 2020 a probíhalo přibližně 10 dní. Teplota byla zpočátku nastavena na 5 °C po dobu 72 hodin. Delší časový úsek byl nastaven z důvodu ustálení teplot uvnitř vzorku, jelikož voda použitá k homogenizaci vzorku měla teplotu vyšší než 40 °C. Po iniciačním intervalu se střídaly teploty 0 °C a 5 °C po 48 hodinách.

.

## 5 Výsledky a diskuze

V rámci bakalářské práce byla využita sestava, která byla modifikována dle požadavků spolupracujících kolegů z Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské, tak aby byly provedeny testovací experimenty se vzduchem, destilovanou vodou a pískem. Byly provedeny dva testovací experimenty se vzduchem (označeny S1 a S2) a jeden testovací experiment s naplněním vnitřního válce destilovanou vodou (S3). Dále byly provedeny tři experimenty s fázovými přechody na plně nasyceném pískovém vzorku (S4, S5 a S6). Výsledky měření budou diskutovány v samotných kapitolách pro vzorek se vzduchem (kapitola 5.1 a 5.2), vodou (kapitola 5.3) a pískem (kapitola 5.4, 5.5 a 5.6). V rámci každého experimentu bylo měřeno více opakování mrznutí a tání, které jsou znázorněny v jednotlivých grafech.

### 5.1 Experiment se vzduchem – S1

Při nastavené teplotě 5 °C se teplota na horním okraji (T5) ustálila na hodnotě 4,7 °C. Teplota naměřená na spodním okraji (T6) byla o 1 °C nižší. Pohybovala se mezi hodnotami 3,7 °C. Po změně teploty z 0 °C na 5 °C se vyskytly výchyly, na horním okraji (T5) až 7 °C a 5,3 °C u spodního okraje (T6).

Při změně teplot z 5 °C na 0 °C v průběhu prvních 15 minut klesla teplota u horního okraje (T5) k hodnotám až -2 °C a následně se ustálila na hodnotě -0,4 °C. U spodního okraje (T6) se teploty pohybovaly okolo -1,3 °C, při přechodu mezi intervaly klesly teploty až k hodnotě -2,4 °C. Výchyly jsou nejspíše zapříčiněné způsobem mražení/ohřívání mrazící jednotky. Při změně teplotních intervalů se teploty vně vzorku měnily skokově. Rozdíl mezi teplotami T5 a T6 mohl být zapříčiněný ventilovaným chlazením mrazící jednotky a přirozenou teplotní stratifikací.

Naměřené hodnoty teplot na hliníkovém víčku (T7) se převážně pohybovaly mezi hodnotami naměřenými na horním (T5) a spodním okraji (T6) mimo vzorek. Při intervalech s nastavenou teplotou 5 °C se teplota na víčku po zhruba 12 hodinách ustálila na hodnotě okolo 4,1 °C. Při intervalech s teplotou 0 °C se teplota po 12 hodinách ustálila na hodnotě okolo -0,9 °C.

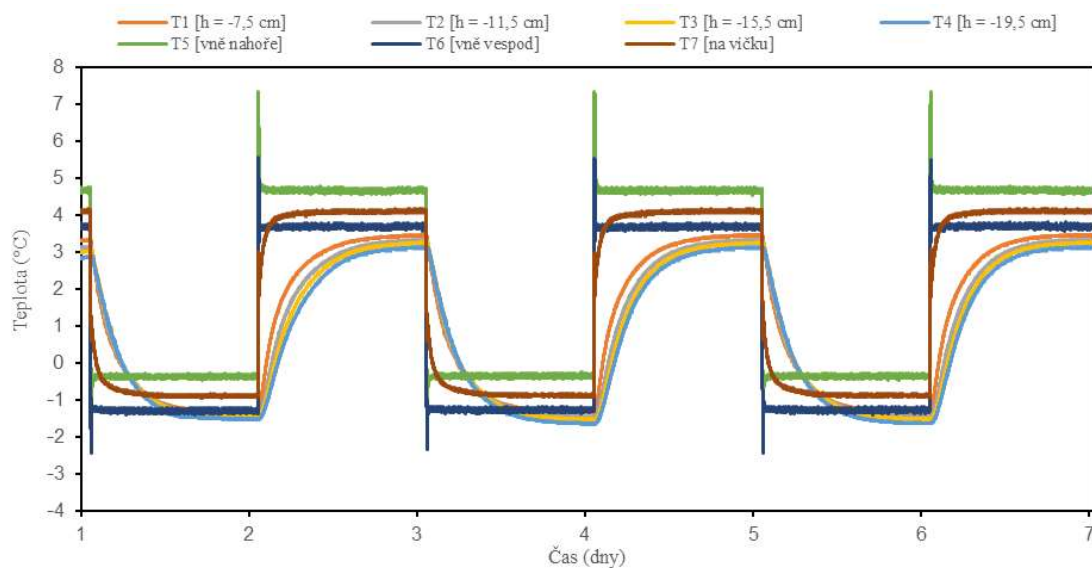
U intervalů s teplotou 5 °C můžeme pozorovat rozdíly, kdy hodnoty nejbližší povrchu jsou nejvyšší (T1 = 3,4 °C), a naopak nejnižší teploty byly naměřeny nejhluběji (T4 = 3,1 °C). S každou teplotní změnou z vyšší teploty do nižší se teploty

uvnitř vzorku přibližně vyrovnávají a klesají stejným tempem. Teplotní rozdělení můžeme pozorovat až zhruba v druhé třetině intervalu a ustálení teplot nastává zhruba po 19 hodinách. Při změně mezi intervaly z teploty 0 °C na 5 °C nejrychlejší změny probíhaly nejbliže povrchu (T1).

Při intervalu s nastavenou teplotou 0 °C byly uvnitř vzorku naměřeny teploty: T1 = -1,3 °C, T2 = -1,4 °C, T3 = -1,4 °C a T4 = -1,5 °C. Teploty uvnitř vzorku jsou ovlivněny teplotní stratifikací, kdy nejnižší teplota se vyskytuje u dna.

Nižší teplota uvnitř vzorku než vně vzorku může být způsobena přesností měření teplotních čidel, která se u teplot kolem 0 °C pohybuje  $\pm 0,38$  °C (z *Manuálu k teplotnímu čidlu 109SS-L, Campbell Scientific*) nebo způsobem chlazení uvnitř mrazicí jednotky, která využívá princip ventilovaného chlazení.

Na obrázku 13 jsou znázorněny průběhy teplot během experimentu S1.



Obrázek 13: Průběhy teplot během experimentu S1

V tabulce 2 jsou vyneseny průběhy teplot ve všech intervalech, hodnoty byly vyhodnoceny jako průměr z posledních tří hodin před zahájením dalšího intervalu a zaokrouhleny na jednu desetinu stupně.



Tabulka 2: Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech během experimentu S1

Profil	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4	Interval 5	Interval 6
Nastavená teplota	0 °C	5 °C	0 °C	5 °C	0 °C	5 °C
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
T1 [h = -7,5 cm]	-1,3	3,4	-1,3	3,4	-1,3	3,4
T2 [h = -11,5 cm]	-1,4	3,3	-1,5	3,3	-1,5	3,3
T3 [h = -15,5 cm]	-1,4	3,2	-1,5	3,2	-1,5	3,2
T4 [h = -19,5 cm]	-1,5	3,1	-1,6	3,1	-1,6	3,1
T5 [vně nahoře]	-0,4	4,7	-0,4	4,7	-0,4	4,7
T6 [vně vespod]	-1,3	3,7	-1,3	3,7	-1,3	3,7
T7 [na víčku]	-0,9	4,1	-0,9	4,1	-0,9	4,1

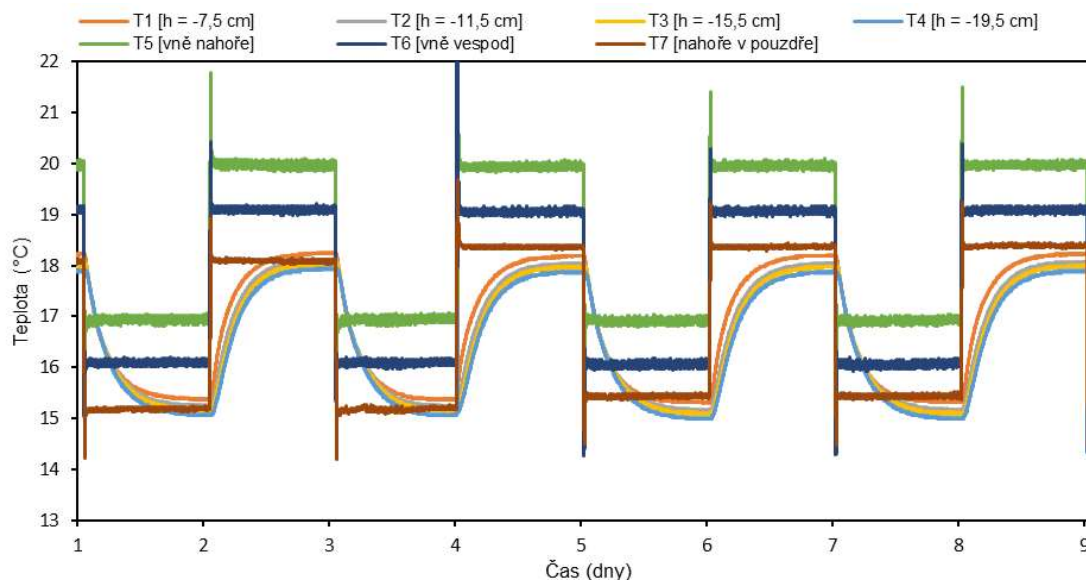
## 5.2 Experiment se vzduchem – S2

Testovací experiment S2 probíhal s přemístěným teplotním čidlem č. 7, to bylo umístěno v úrovni hliněného víčka a bylo zasunuto do plastové trubice, proto aby bylo ochráněno před vlivem proudícího vzduchu uvnitř mrazící jednotky. Hodnoty naměřených teplot v prvním intervalu s nastavenou teplotou 17 °C po ustálení dosáhly u spodního okraje (T5) 16,9 °C, u horního okraje (T6) 16,1 °C a u horního okraje v plastové trubici (T7) 15,2 °C. U dalších intervalů s nastavenými 17 °C se hodnoty zvýšily o cca 1 °C na: T5 = 17,9 °C, T6 = 17,1 °C, T7 = 16,1 °C. V intervalu s nastavenou teplotou na 20 °C byly naměřeny teploty u horního okraje (T5) 20 °C, u spodního okraje (T6) 19,1 °C a u horního okraje v plastové trubici (T7) 18,1 °C. Tyto hodnoty se liší od pozdějších intervalů s 20 °C. Tam byly naměřeny teploty o cca 0,5 °C nižší a to: T5 = 19,4 °C, T6 = 18,5 °C a T7 = 17,9 °C.

Při přechodu mezi intervaly se objevily teploty o stupeň vyšší, nebo naopak nižší. Tyto výchyly se během několika minut ustálili a jsou nejspíše způsobeny principem ohřevu/mražení mrazící jednotky a vlivem ventilace mrazící jednotky.

Druhý experiment byl zahajován s teplotou uvnitř vzorku okolo 0 °C. Při změně nastavené teploty z 20 °C na 17 °C se teploty uvnitř vzorku vyrovnávají a klesají stejným tempem. Rozdělení teplot lze sledovat až v druhé třetině intervalu, T1 = 15,4 °C, T2 = 15,2 °C, T3 = 15,2 °C, T4 = 15,1 °C. Při přechodu z intervalu ze 17 °C do 20 °C, rostly teploty přibližně stejným tempem, avšak stále byla patrná teplotní stratifikace. Ve všech intervalech se teploty uvnitř vzorku (T1 až T4) ustalují po zhruba 20 hodinách. U intervalů s nastavenou teplotou 17 °C lze pozorovat rozdíl mezi intervalem 4 a 6, kdy teploty poklesly o cca jednu desetinu stupně Celsia.

Průběhy teplot uvnitř vzorku nejvíce korespondují naměřené teplotě čidlem T7. To je pravděpodobně způsobeno tím, že čidlo bylo umístěno do plastové trubice a bylo tak chráněno před proudícím vzduchem uvnitř mrazící jednotky. Rozdíl mezi teplotami uvnitř mrazící jednotky na horním a dolním okraji vzorku byl způsoben ventilovaným chlazením a ohříváním. Na obrázku 14 jsou znázorněny průběhy teplot během experimentu S2.



Obrázek 14: Průběhy teplot během experimentu S2

V příložené tabulce 3 jsou vyneseny hodnoty teplot po ustálení ve všech intervalech. Hodnoty byly vyhodnoceny jako průměr za poslední tři hodiny před zahájením dalšího intervalu a zaokrouhleny na jednu desetinu stupně.

Tabulka 3: Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech během experimentu S2

Profil	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4	Interval 5	Interval 6	Interval 7	Interval 8
Nastavená teplota	17 °C	20 °C	17 °C	20 °C	17 °C	20 °C	17 °C	20 °C
(-)	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
T1 [h = -7,5 cm]	15,4	18,2	15,6	18,2	15,3	18,2	15,3	18,2
T2 [h = -11,5 cm]	15,2	18,1	15,3	18,0	15,2	18,0	15,2	18,1
T3 [h = -15,5 cm]	15,2	18,0	15,2	18,0	15,1	18,0	15,1	18,0
T4 [h = -19,5 cm]	15,1	17,9	15,1	17,9	15,0	17,9	15,0	17,9
T5 [vně nahoře]	16,9	20,0	17,9	19,4	17,5	19,4	17,5	19,4
T6 [vně vespod]	16,1	19,1	17,1	18,5	16,6	18,5	16,6	18,5
T7 [nahore v pouzdře]	15,2	18,1	16,1	17,8	16,0	17,9	16,0	17,9

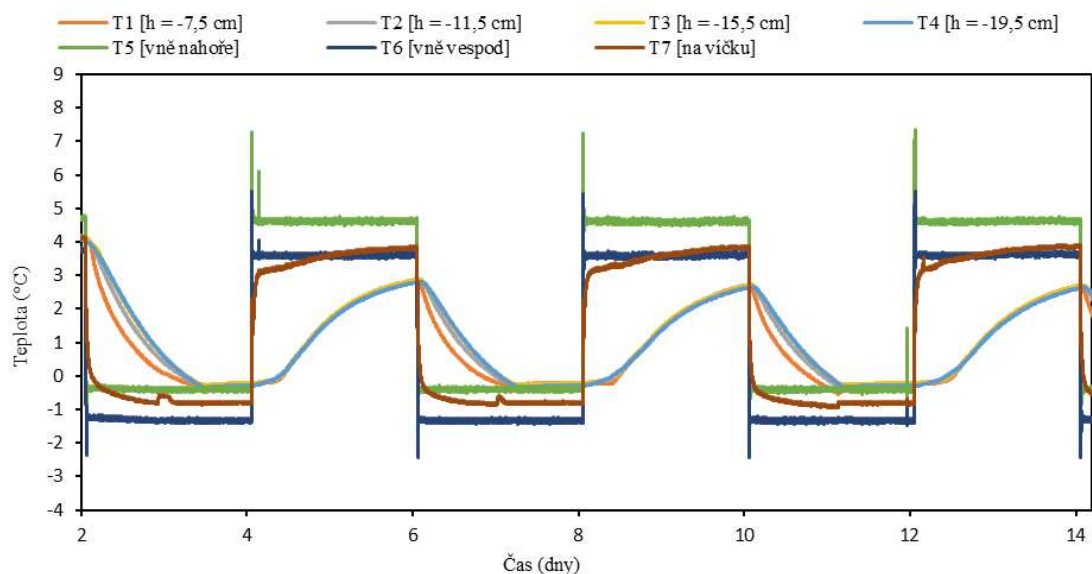
### 5.3 Experiment s destilovanou vodou – S3

Na obrázku 15 jsou znázorněny průběhy teplot během experimentu S3. Rozdíly mezi teplotami u horního (T5) a u spodního okraje (T6) vně vzorku činily u všech

intervalů přibližně 1 °C. Teploty naměřené vně vzorku se při přechodu z 0 °C na 5 °C změnily z hodnot  $T5 = -0,4$  °C,  $T6 = -1,3$  °C a  $T7 = -0,8$  °C na hodnoty  $T5 = 4,6$  °C;  $T6 = 3,6$  °C a  $T7 = 3,8$  °C během 20 minut. Při přechodu mezi jednotlivými intervaly se u čidel T5 a T6 objevovaly výchyly až o 3 °C. Při změně z 0 °C na 5 °C se objevovaly hodnoty  $T5 = 7$  °C a  $T6 = 5,3$  °C a naopak  $T5 = -2$  °C a  $T6 = -2,4$  °C.

Teplota měřená na hliníkovém víčku (T7) se při přechodu mezi intervaly nejrychleji měnila v prvních 4 až 5 hodinách, poté se tempo změny teplot zpomalilo. Při změně nastavení teploty z 5 °C na 0 °C se teplota ustálila zhruba po 12 hodinách. U intervalů 1 a 3 lze u teploty T7 pozorovat odchylku, kdy se hodnota skokově zvýší a pozvolně se navrácí zpět. U intervalu 1 se teplota (T7) zvýší z hodnoty -0,8 °C na hodnotu -0,6 °C během 2 minut. Do původní hodnoty klesne po cca 4 hodinách. U intervalu 3 se opakuje podobný scénář, hodnota se zvýší z hodnoty -0,6 °C na hodnotu -0,8 °C a navrátí se zpět během tří hodin.

Teploty uvnitř vzorku (T1-T4) se během mražení na rozdíl od experimentu se vzduchem nevyrovnávají a neklesají společně, teploty se rozdělují a nejrychlejší změny teplot jsou patrné nejbliže povrchu (T1). Po cca 36 hodinách se teploty ustalují a zůstávají konstantní na hodnotě okolo  $T1 = T2 = T3 = -0,2$  °C,  $T4 = -0,3$  °C. Naopak při přechodu z intervalu s teplotou 0 °C do intervalu s teplotou 5 °C, hodnoty uvnitř vzorku zůstávají vyrovnané a stoupají stejným tempem. Změny v měřených teplotách nastávají až po sedmi až osmi hodinách. Teploty uvnitř vzorku se na konci intervalů s nastavenou teplotou 5 °C neliší a všechny se ustalují na hodnotě v intervalu 2,  $T1 = T4 = 2,8$  °C,  $T2 = T3 = 2,9$  °C, v intervalu 4 a 6 teplota o 0,2 °C klesla. U intervalů s teplotou 0 °C se teplota na všech čidlech uvnitř vzorku ustaluje na hodnotě -0,25 °C. U intervalů s nastavenou teplotou na 0 °C, tedy interval 1, 3 a 5 se teploty T1, T2 a T3 ustálily na hodnotě -0,2 °C, teplota T4 byla o jednu desetinu stupně nižší,  $T4 = -0,3$  °C.



Obrázek 15: Průběhy teplot během experimentu S3

Tabulka 4 znázorňuje hodnoty naměřených teplot ve všech intervalech po ustálení, hodnoty byly vyhodnoceny jako průměr za posledních 10 minut před teplotní změnou a zaokrouhleny na jednu desetinu stupně. Kratší časový úsek byl zvolen z důvodu, že se teploty při ohřívání uvnitř vzorku nestačily ustálit.

Tabulka 4: Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech během experimentu S3

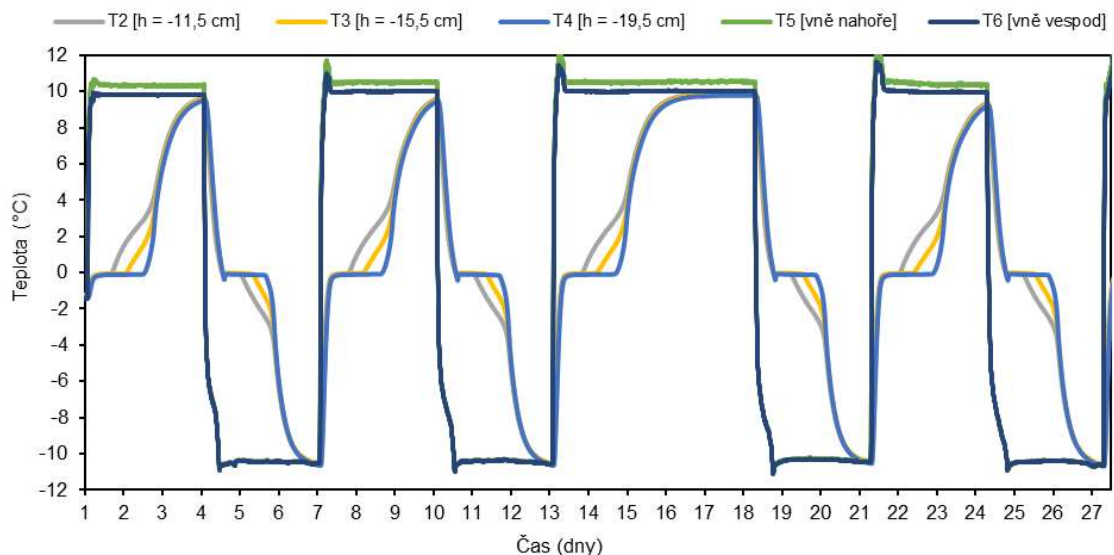
Profil	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4	Interval 5	Interval 6
Nastavená teplota	0 °C	5 °C	0 °C	5 °C	0 °C	5 °C
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
T1 [h = -7,5 cm]	-0,3	2,8	-0,2	2,7	-0,2	2,6
T2 [h = -11,5 cm]	-0,2	2,9	-0,2	2,7	-0,2	2,7
T3 [h = -15,5 cm]	-0,2	2,9	-0,2	2,7	-0,2	2,7
T4 [h = -19,5 cm]	-0,3	2,8	-0,3	2,6	-0,3	2,6
T5 [vně nahoře]	-0,4	4,6	-0,4	4,6	-0,4	4,6
T6 [vně vespod]	-1,3	3,6	-1,3	3,6	-1,3	3,6
T7 [na víčku]	-0,8	3,8	-0,8	3,9	-0,8	3,9

#### 5.4 Experiment s nasyceným pískem S4

Na obrázku 16 jsou znázorněny průběhy teplot během experimentu S4. Experiment byl zahájen s teplotami uvnitř mrazící jednotky okolo 0 °C. Teploty T5 a T6 mimo vzorek se v intervalech s nastavenou teplotou + 10 °C liší pouze 0,5 °C (T5 = 10,3 °C; T6 = 9,8 °C). Při intervalech s - 10 °C se teploty T5 a T6 liší pouze nepatrně (T5 = T6 = - 10,5 °C). Můžeme říci, že se teploty uvnitř mrazící jednotky téměř rovnají teplotám nastaveným.

Teploty uvnitř vzorku těsně před mražením (přechod mezi intervalem s nastavenou teplotou + 10 °C do - 10 °C) dosahují následujících teplot: T2 = 9,7 °C, T3 = 9,6 °C, T4 = 9,5 °C. Teplotní gradient činil 0,2 °C na 8 cm, tedy 2,5 °C/m. Při mražení klesají teploty zprvu stejným tempem a po cca 12 hodinách se všechny ustálí na hodnotě okolo 0 °C. Teplota T2 začíná znovu klesat po dalších 9,2 hodinách, T3 po 16,8 a T4 po 24 hodinách.

Hodnoty před přechodem z intervalu s teplotou - 10 °C do + 10 °C činily: T1 = - 10,5 °C, T2 = - 10,5 °C, T3 = - 10,6 °C. Čidlo T3 tedy naměřilo teplotu nižší, než se vyskytovala v mrazící jednotce, což mohlo být způsobeno přesností měření teplotních čidel. Při ohřívání vzorku teploty (podobně jako u mražení) stoupají stejným tempem a po 12 hodinách se hodnoty stabilizují na hodnotách okolo 0 °C. Jako první začne stoupat teplota T1 (po 4,8 hodinách), poté T2 (po 14,4 h) a poslední T3 (po 26,4 h). Tento jev, kdy teplota při mražení nebo tání se zastaví okolo 0 °C byl pozorován ve studii *Vogel a kol., (2019)*. Jejich simulace občasného zamrznání půdy ukazuje, že se postup záporných teplot skrze půdu zpomaluje díky přeměně latentního tepla vody na citelné teplo.



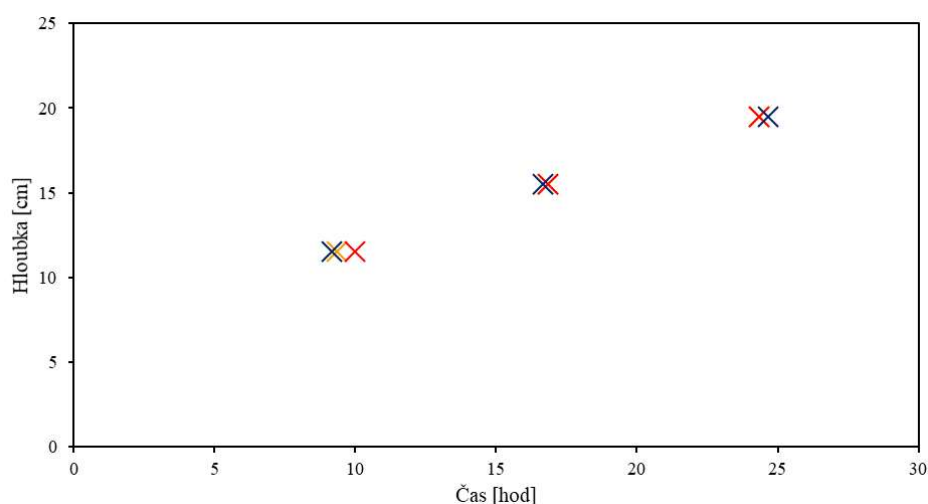
Obrázek 16: Průběhy teplot během experimentu S4

V tabulce 5 jsou vyneseny teploty po ustálení. Hodnoty byly vyhodnoceny jako průměr dvou nejvyšších, resp. nejnižších teplot před zahájením mražení, resp. ohřívání.

Tabulka 5: Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech během experimentu S4

Profil	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4	Interval 5	Interval 6	Interval 7	Interval 8
Nastavená teplota	10 °C	-10 °C	10 °C	-10 °C	10 °C	-10 °C	10 °C	-10 °C
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
T2 [h = -11,5 cm]	9,7	-10,5	9,6	-10,5	9,9	-10,4	9,4	-10,6
T3 [h = -15,5 cm]	9,6	-10,6	9,5	-10,6	9,9	-10,5	9,3	-10,6
T4 [h = -19,5 cm]	9,5	-10,6	9,4	-10,6	9,8	-10,5	9,2	-10,7
T5 [vně nahoře]	10,3	-10,5	10,5	-10,6	10,5	-10,4	10,4	-10,6
T6 [vně vespod]	9,8	-10,5	10,0	-10,6	10,0	-10,5	10,0	-10,7

V příložené tabulce 6 jsou vyneseny délky trvání stagnace teplot na 0 °C v prvních třech mrazících fázích experimentu S4. Lze pozorovat, že doba trvání stagnace je v každém intervalu téměř totožná a opakovaný průběh mražení je identický ve všech mrazících intervalech (obrázek 17).



Obrázek 17: Doba trvání stagnace teplot kolem 0 °C ve fázi mražení v experimentu S4

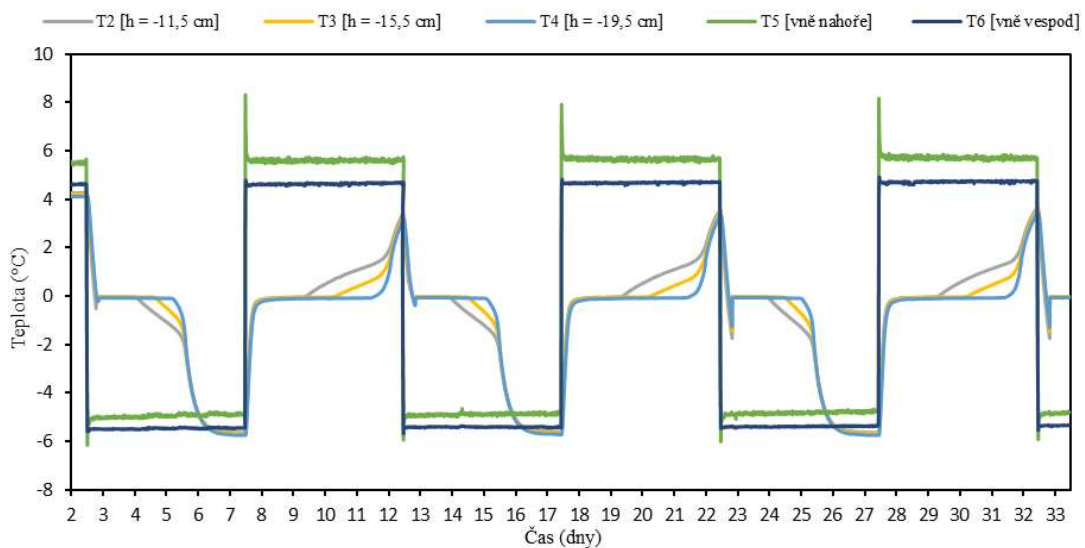
## 5.5 Experiment s nasyceným pískem S5

Na počátku experimentu S5 byla teplota uvnitř mrazící jednotky nastavena na + 5°C pro ustálení teplot. Na začátku měření dosahovaly teploty uvnitř vzorku T2 = 4,3 °C, T3 = 4,2 °C a T3 = 4,1 °C, teplotní gradient činil 2,5 °C/m. Zahajovalo se mražením na teplotu – 5°C. Při ochlazování klesaly teploty uvnitř vzorku společným tempem a po 9,6 hodinách se ustálily na hodnotách okolo 0 °C. Jako první opět začala po 28,8 hodinách klesat teplota T2, následovaná T3 (43,2 h) a T4 (55,2 h). Hodnoty teplot uvnitř těsně před zahájením ohřívání byly T2 = - 5,6 °C, T3 = - 5,7 °C,

$T_4 = - 5,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tyto hodnoty byly nižší, než naměřila čidla mimo vzorek ( $T_5$  a  $T_6$ ), mohlo tak být z důvodu přesnosti měření teplotních čidel.

Teploty mimo vzorek při intervalech s nastavenou teplotou  $- 5 \text{ }^\circ\text{C}$  dosahovaly hodnot  $T_5 = - 4,8 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $T_6 = - 5,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při nastavené teplotě  $+ 5 \text{ }^\circ\text{C}$  teploty činily  $T_5 = + 5,6 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $T_6 = + 4,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Rozdíl těchto hodnot by mohl být zapříčiněn teplotní stratifikací uvnitř mrazicí jednotky. Při přechodu z intervalu s  $- 5 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $+ 5 \text{ }^\circ\text{C}$  se u čidla č. 5 objevují hodnoty až o  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  vyšší, tyto výchyly zřejmě způsobila mrazicí jednotka.

Po zahájení ohřívání (z teploty  $- 5 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $+ 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) teploty uvnitř vzorku stoupaly stejným tempem. Po 19,2 hodinách teploty  $T_1$ ,  $T_2$  a  $T_3$  dosáhly hodnoty přibližně  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Po 28,8 hodinách začala stoupat teplota nejbližší povrchu  $T_2$ , následovaná  $T_3$ , která začala stoupat po 50,4 h.  $T_4$  začala stoupat jako poslední po 79,2 h. Stejně jako u experimentu  $S_4$ , můžeme pozorovat postup horizontálního teplotního gradientu. U sekvence tání, byl nastaven nedostatečný časový interval a teploty uvnitř vzorku nebyly vyrovnány. Na obrázku 17 jsou znázorněny průběhy teplot během experimentu  $S_5$ .



Obrázek 18: Průběhy teplot během experimentu  $S_5$

V tabulce 6 jsou vyneseny teploty po ustálení. Hodnoty byly vyhodnoceny jako průměr dvou nejvyšších, resp. nejnižších teplot před zahájením mražení, resp. ohřívání.

Tabulka 6: Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech během experimentu S5

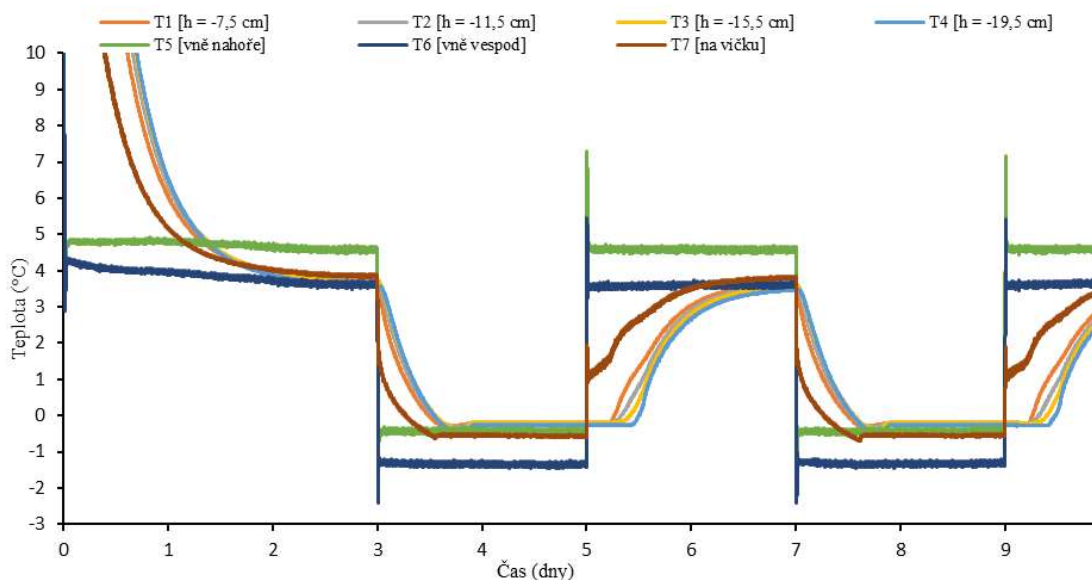
Profil	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4	Interval 5	Interval 6
Nastavená teplota	-5 °C	5 °C	-5 °C	5 °C	-5 °C	5 °C
[·]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
T2 [h = -11,5 cm]	-5,6	3,4	-5,6	3,5	-5,8	3,5
T3 [h = -15,5 cm]	-5,7	3,3	-5,7	3,4	-5,7	3,4
T4 [h = -19,5 cm]	-5,7	3,2	-5,7	3,3	-5,7	3,3
T5 [vně nahoře]	-5,0	5,7	-4,8	5,7	-4,8	5,7
T6 [vně vespod]	-5,4	4,7	-5,4	4,7	-5,4	4,8

## 5.6 Experiment s nasyceným pískem S6

Teploty mimo vzorek se při intervalech s teplotou nastavenou na 5 °C ustálily na hodnotách T5 = 4,6 °C, T6 = 3,6 °C a teplota na hliněném víčku T7 = 3,9 °C. Při intervalu s 0 °C, činily teploty po ustálení T5 = -0,4 °C, T6 = -1,3 °C a T7 = -0,6 °C. U téměř každého přechodu mezi nastavenými teplotami se u T5 a T6 vyskytovaly výchyly až o 1 °C, to je nejspíše zapříčiněno způsobem chlazení mrazící jednotky. Rozdíl mezi teplotami T5 a T6 je způsoben teplotní stratifikací uvnitř mrazící jednotky.

Teplota na víčku T7 při mražení nejprve klesá prudce, posléze se změny zpomalují. To stejné platí při přechodu z 0 °C do +5 °C.

U teplot uvnitř vzorku, můžeme pozorovat, že při mražení (z +5 °C na 0 °C) změny probíhaly nejrychleji nejbliže povrchu a po zhruba 22 hodinách se teploty ustálily na hodnotách: T1 = T2 = T3 = -0,2 °C a T4 = -0,3 °C. Při opačném procesu, teploty uvnitř vzorku stagnují a po určité době začínají stoupat. Jako první začala po 2,4 hodinách stoupat teplota T1, následovala T2 po 4,8 h, T3 po 7,2 h a T4 po 9,6 h. Na obrázku 18 jsou znázorněny průběhy teplot v průběhu experimentu S6.



Obrázek 19: Průběhy teplot během experimentu S6



V tabulce 7 jsou vyneseny teploty po ustálení. Hodnoty byly vyhodnoceny jako průměr za poslední tři hodiny před teplotní změnou.

*Tabulka 7: Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech během experimentu S6*

Profil	Interval 1	Interval 2	Interval 3	Interval 4
Nastavená teplota	5 °C	0 °C	5 °C	0 °C
[ - ]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
T1 [h = -7,5 cm]	3,7	-0,2	3,6	-0,2
T2 [h = -11,5 cm]	3,7	-0,2	3,6	-0,2
T3 [h = -15,5 cm]	3,6	-0,2	3,5	-0,2
T4 [h = -19,5 cm]	3,6	-0,3	3,5	-0,3
T5 [vně nahoře]	4,6	-0,4	4,6	-0,4
T6 [vně vespod]	3,6	-1,3	3,6	-1,3
T7 [na víčku]	3,9	-0,6	3,8	-0,6

## 6 Závěr

Hlavním úkolem této práce bylo vypracovat rešerši na téma mrznutí a tání permafrostu, provést testovací experimenty mrznutí a tání ve vzorku naplněného vzduchem (S1), destilovanou vodou (S2 a S3) a provést opakované měření experimentů s plně nasyceným pískem (S4, S5 a S6). Byla k tomu využita již stávající experimentální sestava, skládající se z válcové nádoby, teplotních čidel, dataloggeru, mrazicí jednotky a stolního počítače. Válcová nádoba byla navržena tak, aby mražení a tání probíhalo v horizontálním směru. Mrazicí jednotka byla upravena, aby byla schopna zajistit kladné i záporné teploty. V rámci bakalářské práce byla sestava doplněna o další teplotní čidla, ta byla připojena k záznamové jednotce a byl upraven program na měření teplot.

Dvě testovací měření provedené na vzorku se vzduchem ukazují na výskyt teplotní stratifikace, kdy nejnižší teplota se nachází u dna vzorku, nejvyšší těsně pod povrchem. U testovacího experimentu s destilovanou vodou byly teploty uvnitř vzorku většinu času přibližně totožné, při mražení klesaly a při tání stoupaly stejnou rychlostí. Teplotní změny probíhaly nejdříve u povrchu vzorku a propagovali se do hlubších vrstev. U experimentů naměřených na nasyceném pískovém vzorku byl pozorován horizontální teplotní gradient. V průběhu fází mražení/tání se teploty uvnitř vzorku při dosažení hodnoty 0 °C zastavují a po určitou dobu stagnují. Doba stagnace závisí na hloubce, kdy změny jsou nejprve patrné u povrchu a postupují hlouběji. Pro přesnější výsledky u experimentů s destilovanou vodou a plně nasyceným pískem navrhuji zaměřit se na delší časové úseky jednotlivých intervalů a zvolit nastavené teploty tak, aby přecházeli přes hodnotu 0 °C. Dále čidlo, dodané v mrazicí jednotce, propojit se softwarem, aby bylo možné zaznamenat skutečnou versus nastavenou teplotu.

Navržená experimentální sestava je plně funkční a lze ji využít pro další experimentální měření s různými materiály. Data byla naměřena ve spolupráci s Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou, ČVUT v Praze a budou nadále využita k verifikaci matematického modelu.

## 7 Seznam obrázků

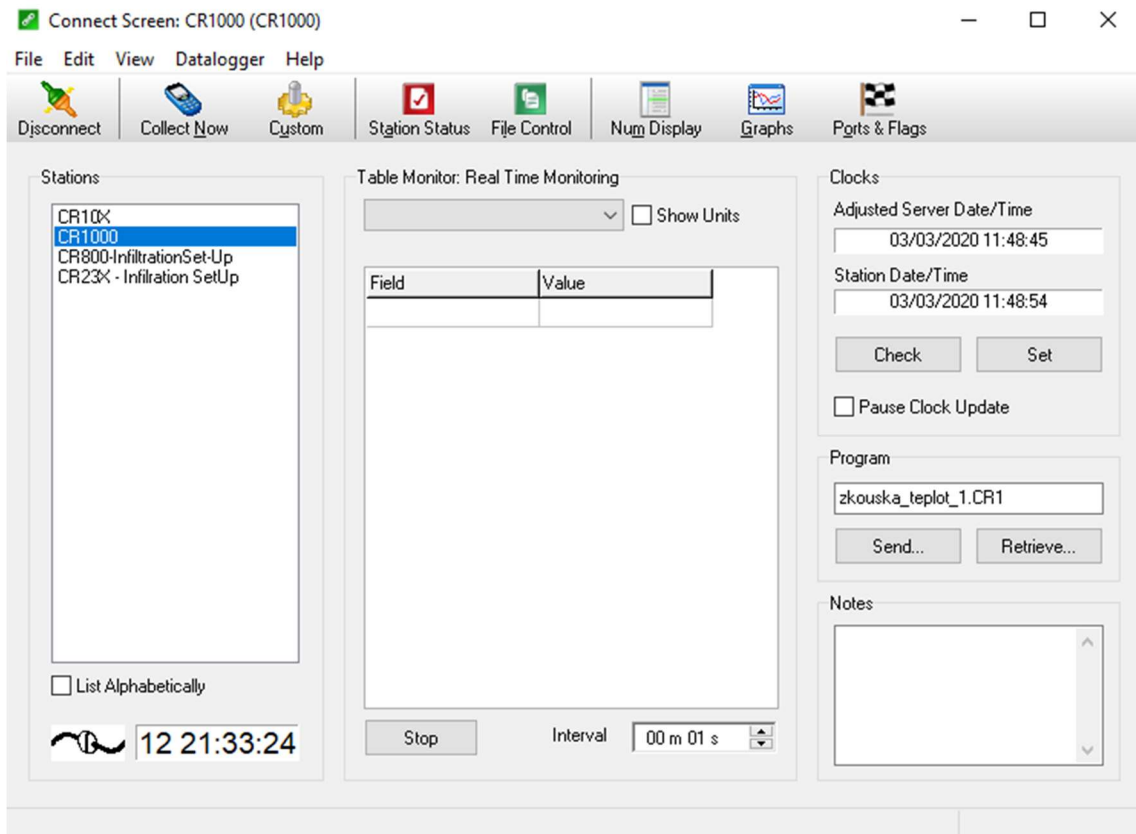
Obrázek 1	Výskyt permafrostu napříč severskými oblastmi .....	16
Obrázek 2	Křivka fázové rovnováhy pro tlak a teplotu a pro tlak a objem .....	18
Obrázek 3	Programovací display na mrazící jednotce.....	21
Obrázek 4	Schéma experimentální sestavy .....	22
Obrázek 5	Experimentální sestava umístěná v mrazící jednotce .....	23
Obrázek 6	Schéma válcové experimentální soustavy .....	24
Obrázek 7	Detail umístění vývodek na vnější straně .....	24
Obrázek 8	Teplotní čidlo 109SS-L .....	25
Obrázek 9	Schéma zapojení záznamové jednotky a teplotních čidel 109SS-L .....	26
Obrázek 10	Detail umístění dřevěných podpěr ve vzorku se vzduchem .....	27
Obrázek 11	Ukázka dat v textovém souboru .....	28
Obrázek 12	Detail umístění teplotního čidla č. 6 a č. 7 .....	29
Obrázek 13	Graf s průběhy teplot v experimentu S1 .....	32
Obrázek 14	Graf s průběhy teplot v experimentu S2 .....	34
Obrázek 15	Graf s průběhy teplot v experimentu S3 .....	36
Obrázek 16	Graf s průběhy teplot v experimentu S4 .....	37
Obrázek 17	Doba trvání stagnace teplot kolem 0 °C ve fázi mražení v experimentu S4 .....	38
Obrázek 18	Graf s průběhy teplot v experimentu S6 .....	39
Obrázek 19	Graf s průběhy teplot v experimentu S6 .....	40

## 8 Seznam tabulek

Tabulka 1	Přesnost teplotních čidel v závislosti na teplotě okolí .....	26
Tabulka 2	Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech v experimentu S1 .....	33
Tabulka 3	Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech v experimentu S2 .....	34
Tabulka 4	Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech v experimentu S3 .....	36
Tabulka 5	Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech v experimentu S4 .....	38
Tabulka 6	Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech v experimentu S5 .....	40
Tabulka 7	Teploty po ustálení v jednotlivých intervalech v experimentu S6 .....	41

## 9 Přílohy

### Příloha 1: Prostředí programu LoggerNet 4.1



## Příloha 2: Seznam připojených teplotních čidel

CR1000 Numeric Display 1: Real Time Monitoring (Connected)

temp1	4.17572				
temp2	1.646393				
temp3	0.3484497				
temp4	-0.2513733				
temp5	14.05042				
temp6	3.330292				
temp7	14.42932				
temp8	-111.4933				
temp8	-111.5				

Show Units      Update Interval      00 m 01 s 000 ms      ?

### Příloha 3: Program na měření teplot, Datalogger CR 1000

'CR3000 Series Datalogger

'To create a different opening program template, type in new

'instructions and select Template | Save as Default Template

'date:

'program author:

'Declare Public Variables

'Example:

Public PTemp, batt\_volt, tlak, temp1, temp2, temp3, temp4, temp5, temp6, temp7, temp8

'Declare Other Variables

'Example:

'Dim Counter

'Declare Constants

'Example:

'CONST PI = 3.141592654

'Define Data Tables

DataTable (temperatureNeptun,1,-1)

    DataInterval (0,5,Sec,10)

    Minimum (1,batt\_volt,FP2,0,False)

    Sample (1,PTemp,FP2)

    Sample (1,temp1,FP2)

    Sample (1,temp2,FP2)

    Sample (1,temp3,FP2)

    Sample (1,temp4,FP2)

    Sample (1,temp5,FP2)

    Sample (1,temp6,FP2)

    Sample (1,temp7,FP2)

    Sample (1,temp8,FP2)

EndTable

```
'Define Subroutines
'Sub
    'EnterSub instructions here
'EndSub

'Main Program
BeginProg
    Scan (5,Sec,0,0)
        PanelTemp (PTemp,250)
        Battery (batt_volt)
        Therm109 (temp1,1,1,Vx1,0,250,1.0,0)
        Therm109 (temp2,1,2,Vx1,0,250,1.0,0)
        Therm109 (temp3,1,3,Vx2,0,250,1.0,0)
        Therm109 (temp4,1,4,Vx2,0,250,1.0,0)
        Therm109 (temp5,1,5,Vx3,0,250,1.0,0)
        Therm109 (temp6,1,9,Vx2,0,250,1.0,0)
        Therm109 (temp7,1,10,Vx3,0,250,1.0,0)
        Therm109 (temp8,1,11,Vx1,0,250,1.0,0)
    CallTable (temperatureNeptun)
        NextScan
EndProg
```



## Seznam literatury

- Brown J., Ferrians Jr. O.J., Heginbottom J.A., Melnikov E.S., editors. 1997. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1:10,000,000, 1 sheet. USGS in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Washington, DC.
- de Vries, D. A., The thermal properties of soils, In Physics of Plant Environment, edited by R. W. van Wijk, 210-235, North Holland, Amsterdam, 1963.
- Gordon E., Sheffield B., Zhang T., Palmer J., Beitler J., Renfrow S., "All About Frozen Ground." National Snow and Ice Data Center. Accessed 6. 12. 2019. /cryosphere/frozenground/index.html., publication date: December 10, 2008.
- Ishikawaa T., Tokorob T. and Miurac S., Influence of freeze–thaw action on hydraulic behavior of unsaturated volcanic coarse-grained soils, Soils and Foundations, 56, (5), 790-804, 2016.
- Koven C. D., Schuur E. A. G., Schädel C., Bohn T. J., Burke E. J., Chen G., Chen X., Ciais P., Grosse G., Harden J. W., Hayes D. J., Hugelius G., Jafarov E. E., Krinner G., Kuhry P., Lawrence D. M., MacDougalln A. H., Marchenko S. S., McGuire A. D., Natali S. M., Nicolsky D. J., Olefeldt D., Peng S., Romanovsky D. E., Schaefer K. M., Strauss J., Treat C. C., Turetsky M., A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon–climate feedback, Phil Trans. R. Soc. A 373, 20140423, 2015.
- Li S., Zhang M., Pei W. and Lai Y, Experimental and numerical simulations on heat-water-mechanics interaction mechanism in a freezing soil, Applied Thermal Engineering, 132, 209 - 220, 2018.
- Manuál k dataloggeru CR 1000, Campbell Scientific, U.S.A., <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cr1000.pdf>, ke dni 4.2.2020
- Manuál k programu LoggerNet 4.1, Campbell Scientific U.S.A., <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/loggernet.pdf>, ke dni 4.2.2020
- Manuál k teplotnímu čidlu 109SS-L, Campbell Scientific, U.S.A., <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/109ss.pdf>, ke dni 4.2.2020

- Nsaif M. H., Heron C. and Marshall A. M., Design of a Freeze-Thaw System for Laboratory Soil Testing, Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, Rome, 2019.
- Olefeldt, D., Goswami S., Grosse G., Hayes D., Hugelius G., Kuhry P., McGuire A. D., Romanovsky V. E., Sannel A.B.K., Schuur E.A.G., Turetsky M. R. et al., Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. *Nat. Commun.* 7, 13043 doi: 10.1038/ncomms13043, 2016.
- Opatrný T., Kapitoly z termodynamiky a statistické fyziky, 2009, <http://www.ktf.upol.cz/tom/bookex1.pdf>, ke dni 10.5.2020
- Schuur, E., McGuire, A., Schädel, C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 171–179, 2015.
- Sobotková M., Zak A., Beneš M., Sněhota M., Freezing and thawing of water in fully saturated packed sand sample, poster, 2017.
- Sophocleous, M., Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media, *Water Resour. Res.*, 15(5), 1195-1206, 1979.
- Stähli M., Stadler D., Measurement of water and solute dynamics in freezing soil columns with time domain reflektometry, *Journal of Hydrology* 195 (1997) 352-369, 1996.
- Šimůnek J., Šejna M., Saito H. a M. Th. Van Genuchten, The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Department of Environmental Sciences University of California Riverside, 2013.
- Turetsky M. R., Abbot B. W., Jones M. C., Anthony K. W., Olefeldt D., Schuur E. A. G., Koven Ch., McGuire A. D., Grosse G., Kuhry P., Hugelius G., Lawrence D. M., Gibson C., Sannel A. B. K., *Nature*, 569, 32-34, 2019.
- Vogel T., Dohnal M., Votubová J., Dušek J., Soil water freezing model with non-iterative energy balance accounting, *Journal of Hydrology* 578, 2019.
- Wagner D., Wille C., Kobabe S. and Pfeiffer E. M., Simulation of Freezing-thawing Cycles in a Permafrost Microcosm for Assessing Microbial Methane Production under Extreme Conditions, Wiley InterScience, 2003.

- Wang Q., Liu J., Wang L., An experimental study on the effects of freeze–thaw cycles on phosphorus adsorption–desorption processes in brown soil, *RSC Advances* 7(59):37441-37446, 2017.
- Watanabe K., Kito T., Wake T. and Sakai M., Freezing experiments on unsaturated sand, loam and silt loam, *Snow, ice and humanity in a changing climate, Annals of Glaciology*, 52, (58), 37-43, 2011.
- Welch C., Arctic permafrost is thawing fast. That affects us all., *National Geographic*, September Issue, 2019.
- Zeinali A., Dagli D. and Edeskär T., Freezing-Thawing Laboratory Testing of Frost Susceptible Soils, *Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting*, 2016.