



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

NAMRZAVOST ZEMIN A MATERIÁLŮ V AKTIVNÍ ZÓNĚ NÁSYPŮ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FROST SUSCEPTIBILITY OF THE SOILS AND MATERIALS IN THE ACTIVE ZONE OF THE
ROADS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LENKA JUCHELKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Lenka Juchelková
Název	Namrzavost zemin a materiálů v aktivní zóně násypů pozemních komunikací
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2011
Datum odevzdání bakalářské práce	25. 5. 2012
V Brně dne 30. 11. 2011	

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Výzkumné zprávy z let 2000 až 2011

internetové odkazy na [www.stranky s informacemi o namrzavosti zemin](http://www.stranky.s informacemi o namrzavosti zemin)

sborníky zahraničních konferencí s příspěvky popisujícími sledování namrzavosti v mrazových zdvihů

Zásady pro vypracování

Základem práce je zpracování řešerše zaměřené na stanovení namrzavosti zemin a upravených zemin. Rešeršní práce je zaměřená na sledování zkušebních teplot při zkoušení namrzavosti v zemích EU. praktická část práce je zaměřená na zkoušení namrzavosti konkrétní zeminy v závislosti na změně chladicí teploty zkušebních vzorků.

Předepsané přílohy

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Teoretická část
4. Praktická část
5. Zhodnocení práce
6. Závěr
7. Literatura

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací



Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá způsoby stanovení míry namrzavosti zemin a materiálů v podloží pozemních komunikací. Teoretická část srovnává způsoby zkoušení míry namrzavosti v České republice a vybraných zemích Evropské Unie. Praktická část je zaměřena na sledování změny chladicí teploty v závislosti na konkrétní metodě stanovení míry namrzavosti. Na závěr jsou jednotlivé metody a výsledky zkoušek porovnány mezi sebou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mrazový zdvih, míra namrzavosti, aktivní zóna, Scheibleho kritérium, přímá zkouška namrzavosti, index mrazu, saturace, Proctorova zkouška, optimální vlhkost, součinitel namrzavosti, mrazuvzdornost, čára zrnitosti, minerální kritérium, jemnozrnná zemina, mez tekutosti, mez plasticity, zkušební těleso.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with methods of determining frost susceptibility of soils and materials in the subgrade of roads. The theoretical part compares frost heave tests used in Czech Republic and selected countries of the European Union. The practical part is focused on monitoring changes in freezing temperature depending on the method of determining the frost susceptibility of soils. In conclusion, the individual methods and results are compared with each other.

KEYWORDS

Frost heave, frost susceptibility, Scheible criterion, frost heave test, frost index, saturation, Proctor test, optimal water content, coefficient of frost susceptibility, frost resistance, mineral criterium, fine-grained soil, liquid limit, plasticity limit, specimen.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JUCHELKOVÁ, Lenka. *Namrzavost zemin a materiálů v aktivní zóně násypů pozemních komunikací*. Brno, 2012. 71 s., 14 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23. 5. 2012


.....
podpis autora

Poděkování:

Tímto chci poděkovat Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a cenné rady v průběhu zpracování bakalářské práce. Dále děkuji všem pracovníkům laboratoře ústavu pozemních komunikací, zejména panu Pavlu Strakovi za pomoc při provádění laboratorních zkoušek. Rovněž chci poděkovat Dr. Peteru Clealloví z Cardiffské univerzity, paní Gunille Franzén a Håkanu Arvidssonovi ze švédského institutu VTI, M.Sc. Hannibalu Gudmundssonovi z Dánského ředitelství silnic za poskytnutí odborných informací týkajících se zkoušek namrzavosti v jednotlivých státech. Zvláštní poděkování patří panu M.Sc. Gontranu Herrierovi, Ph.D. z Belgie a zejména panu M.Sc. Henriku Bromsovi, Ph.D. ze Švédska za neocenitelnou pomoc a podporu při psaní této práce.

OBSAH

1 ÚVOD.....	11
2 CÍL PRÁCE.....	12
3 TEORETICKÁ ČÁST.....	13
3.1 ZJIŠŤOVÁNÍ MÍRY NAMRZAVOSTI V ČESKÉ REPUBLICE	13
3.1.1 NAMRZAVOST ZEMIN A MATERIÁLŮ	13
3.1.1.1 Základní pojmy	13
3.1.1.2 Zdroje vody v zemině během zmrazování	14
3.1.2 ÚČINKY A PRŮBĚH TÁNÍ NA VOZOVCE	16
3.1.3 OCHRANA VOZOVEK PROTI MRAZU A VODĚ.....	17
3.1.3.1 Redukce mrazových zdvihů	18
3.1.3.2 Redukce účinků tání	19
3.1.4 METODY STANOVENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI	20
3.1.4.1 Nepřímá metoda	20
3.1.4.2 Přímá metoda	21
3.2 ZKOUŠKY NAMRZAVOSTI V EU	25
3.2.1 FRANCIE	26
3.2.1.1 Zkušební tělesa	26
3.2.1.2 Postup zkoušky.....	27
3.2.1.3 Vyhodnocení zkoušky	27
3.2.2 NĚMECKO	28
3.2.2.1 Zkušební tělesa	29
3.2.2.2 Postup zkoušky.....	29

3.2.2.3 Vyhodnocení zkoušky	30
3.2.3 RAKOUSKO	31
3.2.3.1 Zkušební tělesa	32
3.2.3.2 Postup zkoušky.....	32
3.2.3.3 Vyhodnocení zkoušky	33
3.2.4 FINSKO.....	33
3.2.4.1 Zkušební tělesa	33
3.2.4.2 Postup zkoušky.....	34
3.2.4.3 Vyhodnocení zkoušky	35
3.2.5 ŠVÉDSKO	37
3.2.5.1 Zkušební tělesa	37
3.2.5.2 Postup zkoušky.....	37
3.2.5.3 Vyhodnocení zkoušky	38
3.2.6 NORSKO.....	38
3.2.6.1 Zkušební tělesa	38
3.2.6.2 Postup zkoušky a její vyhodnocení	38
3.2.7 BELGIE	39
3.2.8 DÁNSKO	39
3.2.9 VELKÁ BRITÁNIE	39
3.2.9.1 Zkušební tělesa	39
3.2.9.2 Postup zkoušky.....	40
3.2.9.3 Vyhodnocení.....	40
4 PRAKTICKÁ ČÁST	41
4.1 KLASIFIKACE ZEMINY	41
4.1.1 POPIS VZORKU	41

4.1.2 ZRNITOST	42
4.1.3 STANOVENÍ KONZISTENČNÍCH MEZÍ	44
4.1.3.1 Mez tekutosti	44
4.1.3.2 Mez plasticity	45
4.1.3.3 Index plasticity	46
4.1.4 ZATŘÍDĚNÍ ZEMINY	46
4.2 STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ VLHKOSTI	47
4.3 VYHODNOCENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI NEPŘÍMOU METODOU ...	49
4.4 VYHODNOCENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI PŘÍMOU METODOU	50
4.4.1 VZOREK Č. 1	51
4.4.2 VZOREK Č. 2	53
4.4.3 VZOREK Č. 3	55
4.4.3.1 Vzorek č. 3-1	56
4.4.3.2 Vzorek č. 3-2	58
4.4.4 VZOREK Č. 4	60
5 ZÁVĚR.....	62
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	64
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	67
SEZNAM TABULEK.....	68
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	69
SEZNAM GRAFŮ	70
A PŘÍLOHY – PROTOKOLY ZKOUŠEK	72

1 ÚVOD

Problematika namrzavosti zemin a materiálů je z hlediska silničního stavitelství velmi důležitá. Kvalita a vlastnosti zemin v podloží mají podstatný vliv na únosnost, provozní způsobilost a ve velké míře i na životnost pozemních komunikací. Poruchy na vozovce, vzniklé v důsledku výskytu mrazových zdvihů během zimního období nebo případně vlivem ztráty únosnosti během jarního tání, nejsou na našich silnicích bohužel nijak ojedinělým jevem. Při návrhu a provádění zemního tělesa pozemních komunikací, je proto nutné věnovat velkou pozornost právě vlastnostem zemin v podloží, mezi které patří i namrzavost. Je tedy velmi žádoucí přesné stanovení míry namrzavosti.

Způsoby stanovení namrzavosti je v současnosti velmi aktuální problém týkající se nejen České republiky, ale i Evropské Unie. V rámci Evropské unie vznikly snahy o vypracování sjednocené metodiky stanovení míry namrzavosti společné pro všechny členské státy. Za tímto účelem byla evropskou komisí pro normalizaci vytvořena pracovní skupina CEN TC 227, WG4, která má za úkol zpracovat veškeré známé poznatky týkající se namrzavosti do podoby ucelené evropské normy.

V České republice se přímá zkouška namrzavosti provádí podle normy ČSN 72 1191 „Zkoušení míry namrzavosti zemin“, která vyšla v platnost v roce 1989. V posledních letech se však ukázalo, že je tato norma již poněkud zastaralá a je nutné připravit co nejdříve její revizi.

2 CÍL PRÁCE

V teoretické části je hlavním cílem práce shrnutí současných dostupných poznatků o laboratorním zkoušení namrzavosti zemin a materiálů v podloží vozovek pozemních komunikací. Obsahem teoretické části je zejména porovnání odlišných principů a metod zkoušení namrzavosti užívaných v České republice a dalších evropských státech, které je důležité pro přípravu revize ČSN 72 1191 v letošním roce.

Cílem praktické části této práce je ověření stanovení míry namrzavosti jemnozrnné zeminy při různých podmínkách teplotního zatížení. Tato část je zaměřena na sledování změny chladicí teploty v závislosti na konkrétní metodě stanovení míry namrzavosti. Porovnání je provedeno celkem na třech zkušebních postupech. Mezi ně patří nepřímá metoda (tedy tzv. Scheibleho kritérium) a přímá metoda stanovení namrzavosti dle stávající normy ČSN 72 1191, která umožňuje dva různé způsoby provádění a vyhodnocení zkoušky. Jedná se o stanovení součinitele namrzavosti β a součinitele namrzavosti K_n .

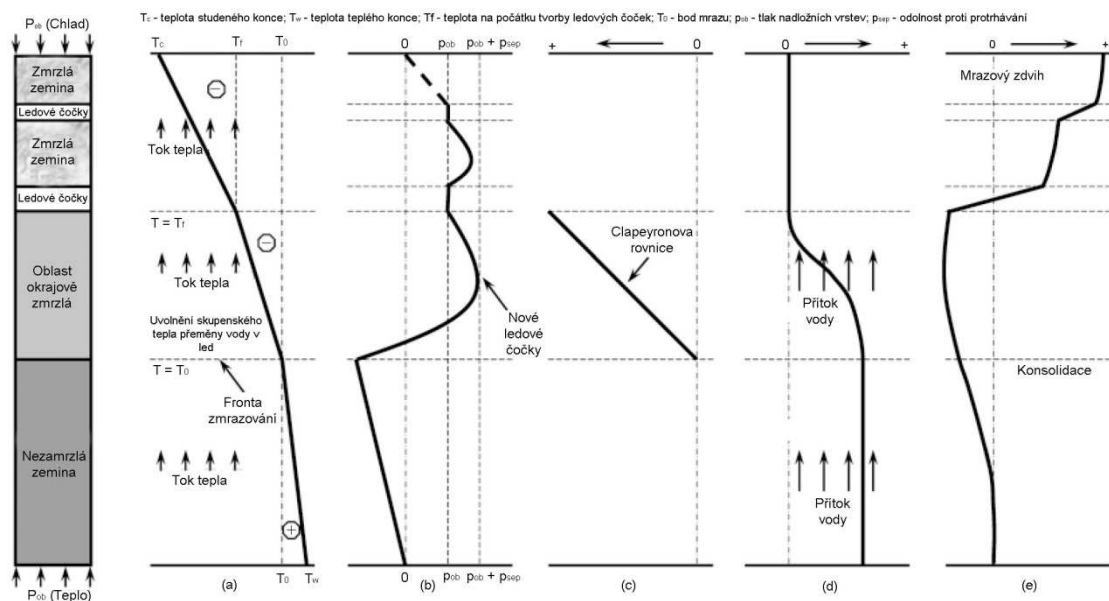
3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Zjišťování míry namrzavosti v České republice

3.1.1 Namrzavost zemin a materiálů

3.1.1.1 Základní pojmy

Vertikální posunutí povrchu, způsobené průsakem a zamrznutím podpovrchové vody v zemině v důsledku pronikání mrazu, je definováno jako **mrazový zdvih**. Jeho výskyt je spojen s cyklickým střídáním období zmrazování a tání, což může vést až k deformacím vozovky. **Míra namrzavosti** je oproti tomu stanovena jako poměr zdvihu zkušební vzorku a přírůstku odmocniny indexu mrazu při pevně stanovených podmínkách. [1] [2]



Graf 3-1 – Schéma zobrazující promrzání zeminy s tvorbou ledu: (a) teplota, (b) pórový tlak, (c) kryogenní sání, (d) rychlost vodního toku, (e) posuny (zdroj [3], upraveno)

Zeminy mohou být na základě míry namrzavosti klasifikovány do dvou základních skupin:

- **Zeminy nenamrzavé** – zmrznou jako hmota, bez výrazných změn ve struktuře nebo vlhkosti. Je patrný pouze mírný zdvih způsobený zvětšením objemu vody

přibližně o 9 %. Tento typ mrazového zdvihu se však průměrně pohybuje do 3 % hloubky zóny promrzání u nesaturovaných zemin. Míra tohoto zdvihu závisí na počátečním stupni nasycení zeminy.

- **Zeminy namrzavé** – jejich struktura je působením mrazu pozměněna, vzrůstá vlhkost a dochází k výraznému zdvihu. Dohází k přesouvání vody z teplejších, hlouběji usazených vrstev směrem k vznikající zmrzlé ploše, kde tato voda zamrzá a dochází tím ke vzniku ledových čoček a vrstviček. Růst těchto ledových vrstev může probíhat takřka neomezeně, tedy dokud je zemina vystavena záporným teplotám a její zásobování vodou je dostačující. Ve chvíli, kdy je přísun vody ze spodních vrstev vyčerpán, pokračuje pouze samotné zamrzání zeminy a to až do doby, kdy jsou podmínky znova příhodné pro tvorbu ledových čoček. Ledové vrstvičky se tak se vzrůstající hloubkou promrzání vytváří ve spodnějších vrstvách. Dochází k snižování jejich tloušťek a jejich vzájemnému oddalování (viz obr. 3-1). [4] [1]

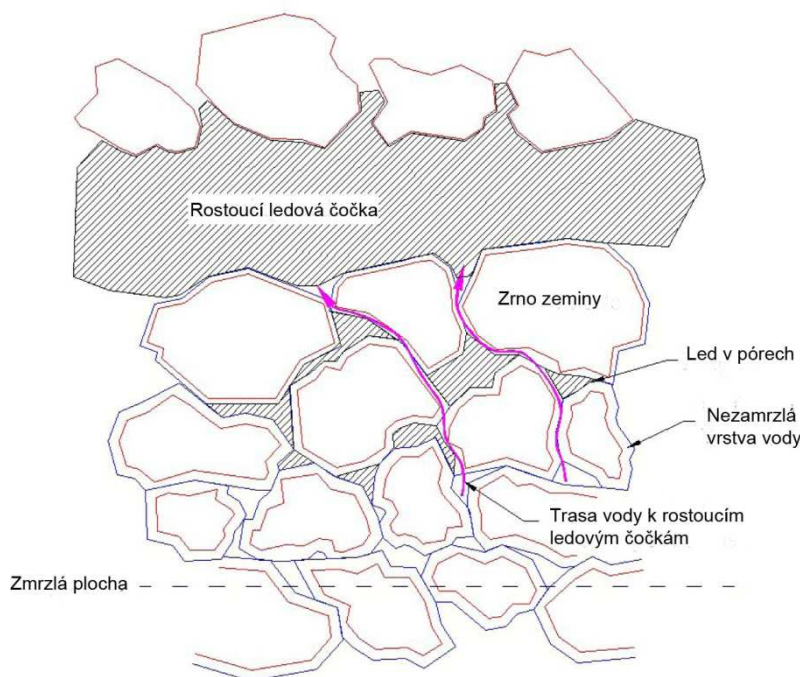


Obr. 3-1 – Formace ledových čoček ve zkušebním tělese (zdroj [1])

3.1.1.2 Zdroje vody v zemině během zmrazování

Přísunu vody z teplejších zemin v podloží směrem k zamrzlé ploše se účastní tři hlavní mechanismy:

- **Tlak vodní páry** – ve vrstvách podloží je tento tlak mnohem větší než v chladnějších nadložních vrstvách, což způsobuje proudění páry z teplejších oblastí do těch chladnějších, kde dojde k její kondenzaci a v mrazovém prostředí ke konečnému zamrznutí do ledových čoček.
- **Osmóza** – během skupenské přeměny vody v led dochází k uvolňování solí, které jsou ve vodě obsaženy. Tyto soli se rozpouští v dosud nezamrzlé vodě, kde vytváří oblast s vyšší koncentrací iontů. V zemině tedy dojde k vytvoření nerovnovážného stavu. Voda v pórech se začíná přesouvat směrem k zamrzlé ploše, kde je koncentrace iontů nižší.
- **Kapilární elevace** – voda obalující povrch zrn a vyplňující mezery mezi jednotlivými zrny vytváří v zemině síť kanálků, kterými může vzlínat vzhůru. Se snižováním teploty a tvorbou ledu v pórech dochází k snížení efektivní průchodnosti vodní sítě, což vyvolá nárůst kapilárního sání. V určité chvíli už ale ani vzrůstající kapilární sání nedokáže překonat snižující se propustnost a vzlínání vody je zastaveno. Dojde k formování ledových čoček (viz obr. 3-2). [2]



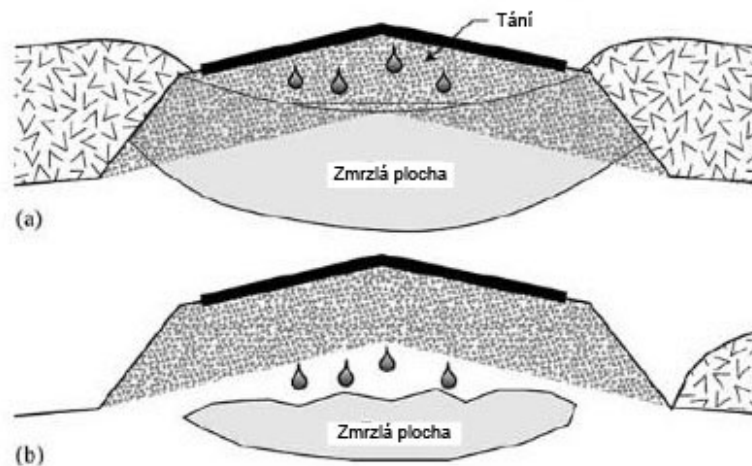
Obr. 3-2 – Schéma tvorby ledových čoček (zdroj [1], upraveno)

3.1.2 Účinky a průběh tání na vozovce

Tání se může negativně projevit na vozovce ve dvou kritických obdobích:

- Během mírné zimy a na začátku jara, kdy nahromaděná voda v důsledku tání může způsobit snížení únosnosti materiálů v podkladních vrstvách vozovky.
- Na konci jara, během rozmrzání namrzavých zemin v podloží.

V počáteční fázi postupuje tání hlouběji směrem ke středu vozovky. Díky nahromaděnému sněhu po stranách a tmavému povrchu vozovky, který snáze absorbuje sluneční záření, postupuje tání mnohem rychleji uprostřed silničního tělesa než na jeho okrajích (viz obr. 3-3a). Během tohoto období je voda obsažená v podkladních vrstvách vlivem tání rychle uvolňována, ale zároveň díky zmrzlým spodním vrstvám nemůže volně odtéct. Současně může být nahromaděným sněhem a ledem zachycena i povrchová voda, která přes trhliny na povrchu vozovky a zemní těleso prosakuje do podkladních vrstev a zvyšuje tím množství nahromaděné vody. V tomto období může být únosnost podkladních vrstev snížena, což se může projevit poruchou krytu vozovky. Jakmile tání zasáhne i namrzavé zeminy v podloží, začnou ve vozovce probíhat procesy srovnatelné s Therzaghiho teorií konsolidace [6] (viz obr. 3-3b). [5]



Obr. 3-3 – Schéma: (a) počáteční fáze tání; (b) pozdní fáze tání (zdroj [5], upraveno)

Průběh tání ovlivňují tři hlavní činitelé:

- Množství ledu ve vrstvách vozovky
- Rychlost tání
- Stupeň konsolidace



Obr. 3-4 – Poruchy na vozovce způsobené táním (zdroj [23], upraveno)

Pokud je množství ledu malé a dochází k jeho pozvolnému tání spolu s vysokou kapacitou odvodnění a stupněm výsledné konsolidace, pak účinek ztráty únosnosti zeminy je krátký a omezený pouze na malou oblast. Únosnost zeminy není nijak výrazně ohrožena. Oproti tomu větší množství ledu a zvýšená rychlost jeho tání spolu se snížením kapacity odvodnění se na únosnosti zeminy může projevit v podobě trvalých deformací. [5]

3.1.3 Ochrana vozovek proti mrazu a vodě

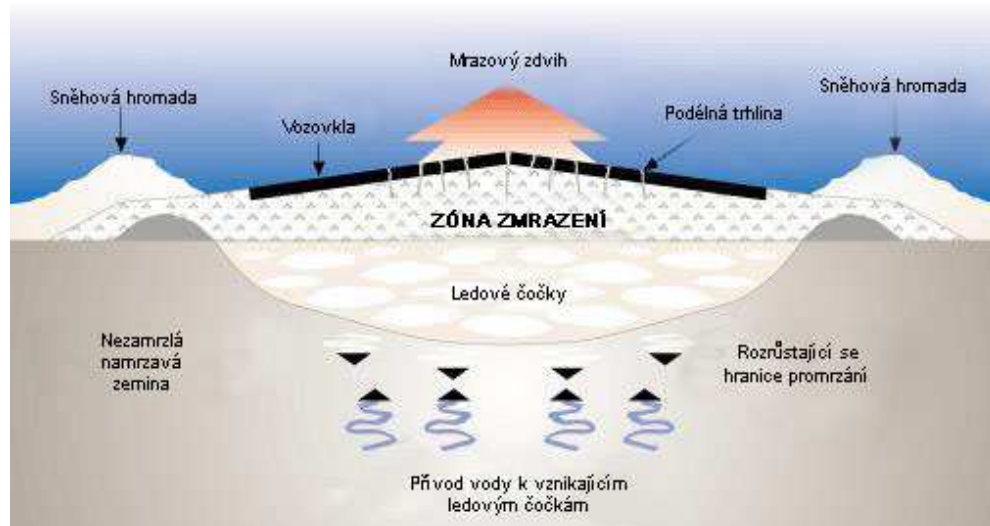
Podmínky potřebné pro vznik nebezpečí promrzání vozovky:

- Dlouhodobý výskyt teplot bod bodem mrazu
- Dostatečný přísun vody
- Zemina musí být namrzavá

Pokud lze vznik jedné z těchto podmínek eliminovat, mrazový zdvih a s ním související nebezpečné účinky tání se nedostaví vůbec nebo jen v omezené míře. Zmenšením nebo zabráněním promrzání zemního tělesa pozemní komunikace se může zvýšit životnost vozovky a výrazně snížit náklady na její údržbu. Nebezpečí vyplývající z mrazového zdvihu je největší v případě jeho nerovnoměrnosti. Homogenní zdvih vozovku nepoškodí. Projevy tání jsou u některých druhů zemin výraznější než u jiných. Pokud je v této době pozemní komunikace navíc vystavena silnému provoznímu zatížení, pak jsou účinky tání přímo destruktivní. Existuje řada metod pro snížení

nebezpečí poškození komunikace, některé z nich zabraňují samotnému promrzání vozovky, jiné pouze zmenšují škody způsobené mrazem.

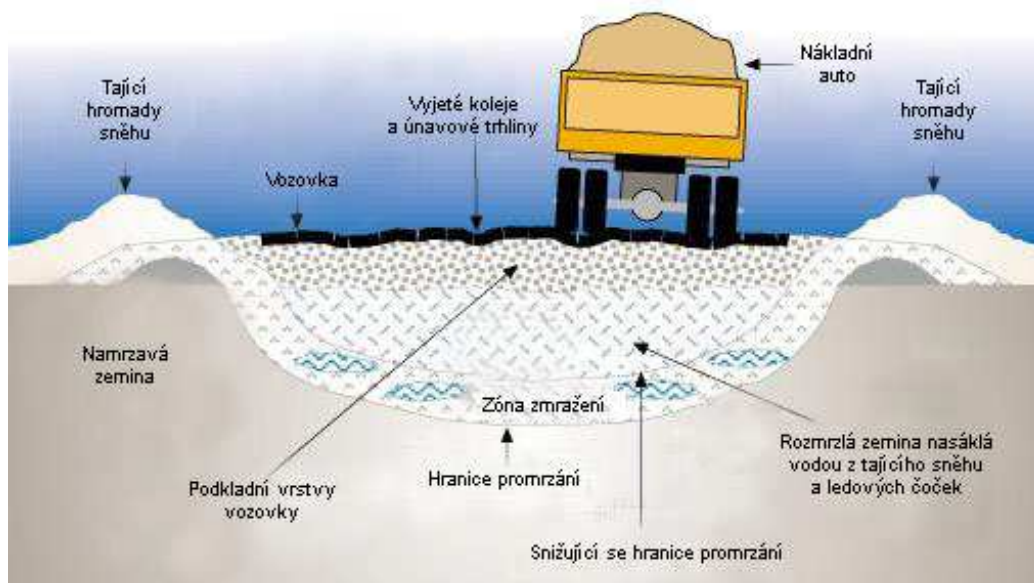
3.1.3.1 Redukce mrazových zdvihů



Obr. 3-5 – Princip vzniku mrazového zdvihu (zdroj [7], upraveno)

- Zvětšení tloušťky stmelěných vrstev vozovky, jejich větší mocnost vede k snížení hloubky promrzání podloží.
- Odstranění a nahrazení nebezpečně namrzavých zemin v celém nebo jen částečném rozsahu hloubky promrzání. Norma ČSN 73 6133 výslovně nedoporučuje v aktivní zóně ponechat zeminy nebezpečně namrzavé bez případné úpravy / stabilizace.
- Zajištění dostatečného odvodnění vedoucího k snížení hladiny spodní vody a odvedení povrchové vody.
- Zabezpečení přechodového pásma mezi namrzavými a nenamrzavými zeminami, včetně podloží.
- Přerušení kapilárního vztlínání v hloubce promrzání za pomoci vrstvy kamenů nebo drenážní geotextílie, které zamezí přísunu spodní vody k promrzající zemině.
- Použitím materiálů, které redukují nebo odstraňují samotné promrzání vozovky. Pokud je totiž možné zamezit nebo snížit ztrátu tepla, pak nemusí být namrzavé zeminy vůbec vystaveny teplotám pod bodem mrazu.

3.1.3.2 Redukce účinků tání



Obr. 3-6 – Deformace vozovky v období tání (zdroj [7], upraveno)

- Návrh struktury vozovky na základě sníženého modulu pružnosti podloží. Tato metoda jednoduše zvyšuje tloušťku vozovkových vrstev, což zapříčiní snížení výskytu poruch a ztráty únosnosti způsobené mrazovým zdvihem.
- Zajištění dostatečného odvodnění vedoucího k snížení hladiny spodní vody a odvedení povrchové vody.
- Omezení zátěže vozovky během období tání, kdy je snížená únosnost podloží.
- Užití chemické stabilizace na určitý typ zemin v podloží v celém nebo jen částečném rozsahu hloubky promrzání. Čímž se sníží vlhkost a doba potřebná k zotavení z účinků tání.
- Včlenění geotextílie do návrhu vozovky. Celou konstrukci tím během tání dodatečně zpevníme.
- Užití určitého typu materiálu (drcený štěrk nebo jiné kamenivo s dobře odstupňovanou zrnitostí) do podkladních vrstev přímo pod asfaltový kryt. Docílíme tím rychlého odvodnění a zároveň nedojde k snížení únosnosti v důsledku zvodnění. [8]

3.1.4 Metody stanovení míry namrzavosti

Míra namrzavosti zemin a materiálů v aktivní zóně pozemních komunikací se v České republice stanovuje nepřímou nebo přímou metodou. Nepřímá metoda je uvedena v normě ČSN 73 6133, namrzavost se podle ní určuje z *kritéria zrnitosti* (tzv. *Scheibleho kritéria*). Jedná se o hojně využívanou metodu i v zahraničí. Její obrovskou předností je rychlost a praktičnost. K jejímu vyhodnocení je potřeba pouze graficky vykreslit křivku zrnitosti a tedy provést síťový rozbor podle ČSN EN 17 892-4. Stanovením míry namrzavosti přímou metodou se zabývá norma ČSN 72 1191. Namrzavost je stanovena laboratorní zkouškou provedenou na čtyřech zkušebních tělesech konkrétních vzorků zemin, zlepšených zemin a materiálů.

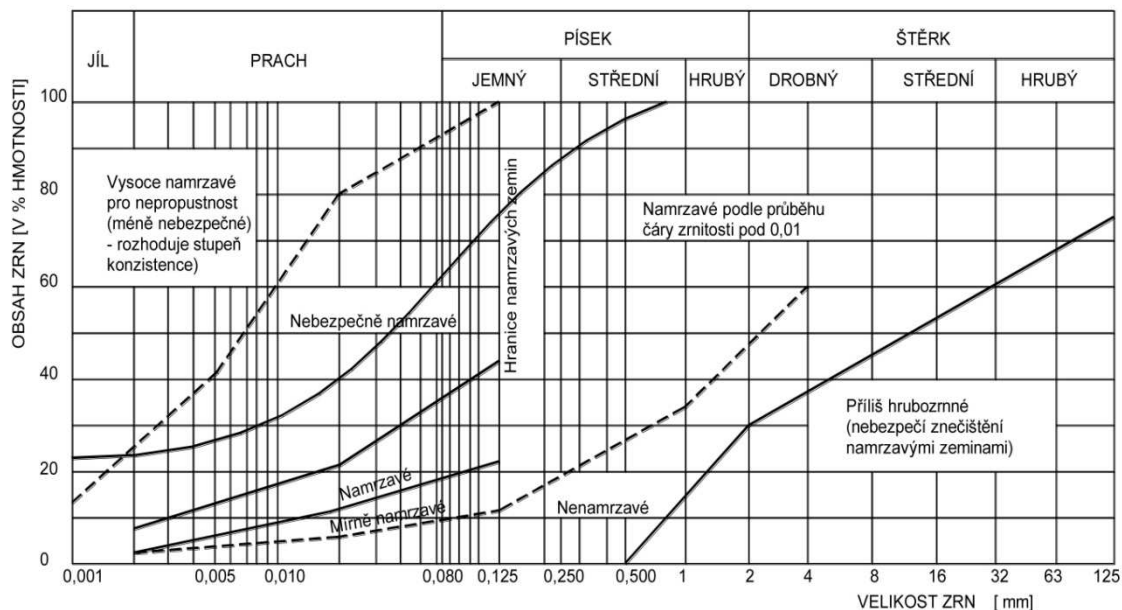
Zeminy třídy SW, SP, S-F, GW, GP, G-F jsou považované za nenamrzavé, nebo případně jen za mírně namrzavé, u ostatních neupravených zemin se namrzavost stanoví nepřímou metodou. Posouzení namrzavosti se nemusí provádět u vozovek s dopravním zatížením třídy IV. Míra namrzavosti materiálů, které se vyskytují v aktivní zóně pozemních komunikací, ovlivňuje návrh konstrukce vozovky. V případě, že se v aktivní zóně prokáže výskyt nebezpečně namrzavé zeminy, doporučuje se tuto zeminu upravit (např. stabilizací). [9]

3.1.4.1 Nepřímá metoda

Normou ČSN 73 6133 „Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací“ byla nahrazena zrušená norma ČSN 72 1002 „Klasifikace zemin pro dopravní stavby“.

Scheibleho kritérium dělí zeminy celkem do 6 skupin:

- 1 **Vysoce namrzavé** – pro nepropustnost méně nebezpečné, rozhoduje stupeň konzistence
- 2 **Nebezpečně namrzavé** – obsah zrn pod 0,063 mm je větší než 35 %
- 3 **Namrzavé**
- 4 **Mírně namrzavé**
- 5 **Namrzavé podle průběhu čáry zrnitosti pod 0,010 mm**
- 6 **Nenamrzavé** – obsah zrn pod 0,002 mm je menší než 3 %

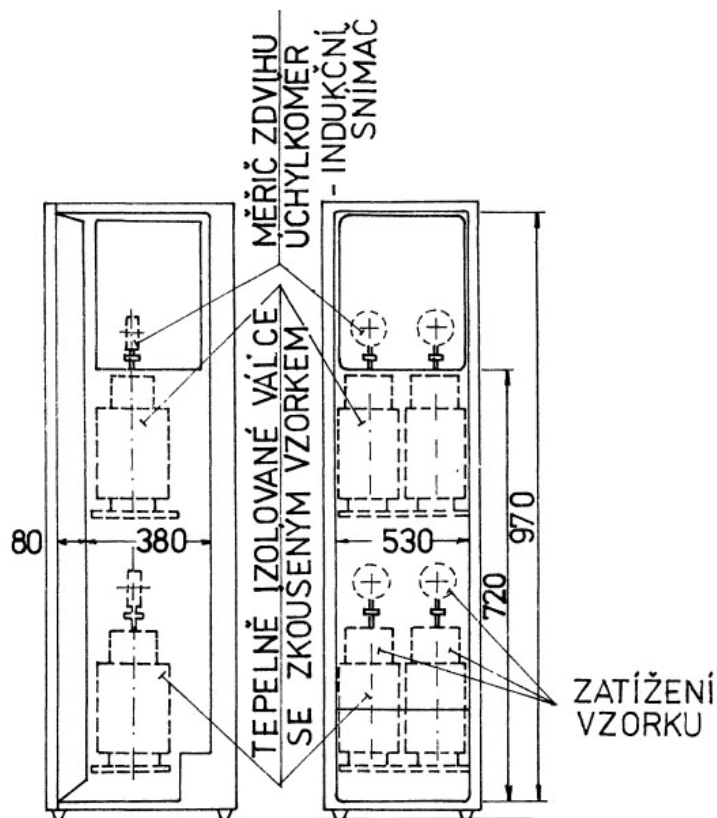


Graf. 3-2 - Scheibleho kritérium namrzavosti (zdroj [9])

Norma udává ještě poslední skupinu tzv. zeminy *příliš hrubozrné*, u kterých akutně hrozí znečištění namrzavými zeminami. U zemin upravených pojivy je nutné přistoupit k ověření namrzavosti přímou metodou. Přímá metoda je doporučena i v případech, kdy se vyskytnou pochyby při stanovení míry namrzavosti nepřímou metodou.

3.1.4.2 Přímá metoda

Stanovení míry namrzavosti zemin laboratorní zkouškou se řídí normou ČSN 72 1191:1988 „Zkoušení míry namrzavosti zemin“. Zkouška se provádí pro zeminy, zlepšené zeminy a materiály, které mají víc než 5 % částic menších než 0,125 mm. Zeminy, které tuto podmínku nesplňují, jsou brány jako nenamrzavé. Během této zkoušky je napodobován účinek mrazu na vozovku při stálém vodo-tepelném režimu. Zdvih zkušební vzorku je vyjádřením postupného nárůstu ledových vrstviček, průběh tohoto nárůstu ($\Delta h / \Delta \sqrt{t_m}$) stanovuje míra namrzavosti vzorku.

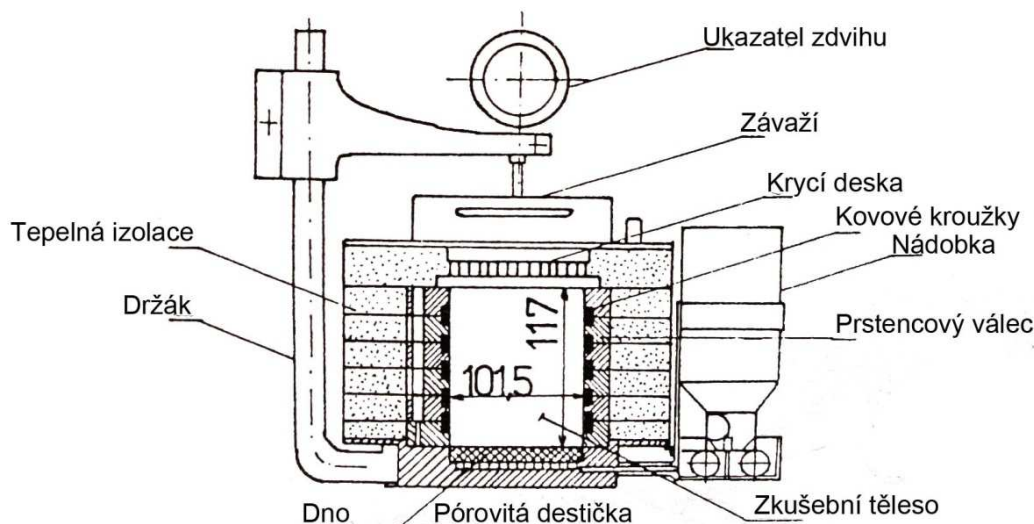


Obr. 3-7 – Chladicí skříň (zdroj [3])

Zkušební přístroj se skládá z upravené chladicí skříně (viz obr. 3-7), která obsahuje čtyři tepelně izolované prstencové válce (tzv. zkušební buňky), do kterých se umísťuje zkušební těleso. Dno je vybaveno pórovitou destičkou s prostorem na vodu spojeným s nádrží se stálou výškou hladiny vody. Ke dnu je připevněn ukazatel zdvihu zkušebního tělesa s citlivostí minimálně 0,1 mm. Zkušební těleso se může rozpínat vlivem zmrazování pouze ve svislém směru. Vrch tělesa je zakryt deskou se čtyřmi chladicími termoelektrickými bateriemi s vodním chlazením. Na této desce je rovněž umístěno závaží o hmotnosti 8 kg, které simuluje tlak nadložných vrstev vozovky. Pokud bude zaručeno zajištění teploty $(-4 \pm 1) ^\circ\text{C}$, je možné použít i jiný způsob chlazení. Zdvih vzorku je měřen buď vizuálně úchylkoměrem, nebo elektronickým snímačem.

Postup zkoušky předepsaný touto normou není nijak složitý. Tělesa umístěná ve čtyřech zkušebních buňkách se uloží do mrazicí skříně, kde se nechají po dobu nejméně 17 hodin při teplotě $(5^{+3}_{-1}) ^\circ\text{C}$ ze spodu saturovat vodou. Chladicí deska v této době není v provozu, neměří se ani případný zdvih zbobtnáním tělesa. Po uplynutí této doby se horní část těles začne zmrazovat při teplotě $(-4 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Spodní saturovaná

část tělesa je vystavena kladné teplotě, která je o něco málo nižší než teplota v chladicí skříni. Tento ustálený teplotní režim je udržován po dobu 5 dní (120 hodin). V této době se začíná s měřením časového průběhu zdvihu [mm]. Zdvih se měří v závislosti na čase průběžně, nebo při automatickém záznamu po hodinách. Pokud se určuje vizuálně, pak je nutné ho měřit minimálně třikrát za den (např. v 8, 12 a 16 hodin). Měří se vždy ve středu horní kruhové plochy vzorku.



Obr. 3-8 – Zkušební buňka (zdroj [2], upraveno)

Norma udává dvě metody, jak lze ke zkoušce přistupovat:

- **Metoda A** – využívá lineární vztah mezi zdvihem shora zmrazované zeminy při stálém teplotním spádu, při sycení vzorku vodou zespod (Δh) a mezi druhou odmocninou indexu mrazu ($\Delta\sqrt{I_m}$). Zrna zeminy, které nepropadnou sítí 16 mm, se ze vzorku vyloučí a provede se korekce popsaná v ČSN EN 13286-2 (odstavec 6.5.2 a 6.5.3). Vzorek zeminy se zhutňuje při optimální vlhkosti na maximální objemovou hmotnost pýchem o hmotnosti 2,5 kg (A) v Proctorově formě (A) užívaném při standardní Proctorově zkoušce dle ČSN EN 13286-2.

Po zhutnění se zkušební tělesa seříznou a urovňají. Vloží se do zkušebních buněk a urovňají do chladících skříní. Podobným způsobem se připraví i prachovitý, písčitý nebo štěrkopískový materiál s omezenou zrnitostí. Je-li zemina zlepšená pojivem (vápno, cement), pak ke zkoušce namrzavosti dojde až po 28 dnech, kdy je vzorek ošetřován v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 95 až 100 % a teplotě $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Tato zemina je považována za nenamrzavou, případně mírně

namrzavou pokud $\beta \leq 0,5$. V případě že vzorek zeminy nevyhoví po 28 dnech ošetřování, zkouška se provede se vzorky po 90 denním ošetřování.

Míra namrzavosti se vyjádří hodnotou $\beta / \text{mm } (^{\circ}\text{C} \cdot \text{h})^{-1/2}$, která je definována vztahem:

$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta \sqrt{I_m}} \quad (3-1)$$

Δh naměřený zdvih zkušebního tělesa [mm] odpovídající $\Delta \sqrt{I_m}$,

I_m index mrazu [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$].

Tab. 3-1 – Stanovení míry namrzavosti dle součinitele β (zdroj [2])

Míra namrzavosti	Průměrná hodnota β
Nenamrzavé	< 0,25
Mírně namrzavé a namrzavé	0,25 až 0,50
Nebezpečně namrzavé	> 0,50

Samotné vyhodnocení je provedeno graficky. Index mrazu je brán jako souhrn absolutních hodnot průměrné teploty pod bodem mrazu na povrchu vzorku ($^{\circ}\text{C}$) a času (h). Na ose grafického hodnocení je za jeho počátek bráno období druhé hodiny (po hodině) po zapojení chladicí desky na hodnotu -4°C . V této době se čte i nulová hodnota zdvihu. Během mrznutí vody v pórech není vztah mezi Δh a $\sqrt{I_m}$ lineární. Lineárním nastává pouze v některých případech, kdy je dosaženo kritického indexu mrazu a hodnocená charakteristika namrzavosti je tangentou tohoto vztahu.

- **Metoda B** – při vyhodnocování výsledků je vyčíslen součinitel namrzavosti K_n . Zrna nad 10 mm je nutné odstranit. Příprava zkušebního tělesa a jeho zhutnění odpovídá zkoušce zhutnitelnosti podle ČSN 13286-2. Vzorek zeminy je hutněn na maximální objemovou hmotnost při optimální vlhkosti, nebo na objemovou hmotnost, která odpovídá stavu zeminy v zemním tělese. U zemin zlepšených pojivy je příprava a hutnění zkušebního tělesa podobná. Ke zkoušce se přistoupí v případě, kdy vzorky zemin dosáhnou po uložení v zadaných podmínkách parametrů, které byly stanoveny v projektu. Pokud je to nutné, mrazový zdvih se stanoví pod odlišným zatížením než je 8 kg, při teplotách -20°C , při cyklech zmrazování atd.

Po ukončení zmrazování se tělesa nechávají v chladicí skříni rozmrazovat při teplotě +5 °C. Sleduje se svislá deformace tělesa. Zkouška je ukončena po ustálení výšky vzorku, nejdříve však po 72 hodinách. Výška vzorku je brána jako ustálená pokud po dobu 6 hodin není její změna větší než 0,1 mm. Výsledek zkoušky se vyhodnotí stanovením součinitele namrzavosti K_n [%], který se zaokrouhluje na 0,1 % a určí se ze vztahu:

$$K_n = \frac{\Delta h'}{h} \cdot 100 \quad (3-2)$$

$\Delta h'$ naměřený zdvih tělesa zkoušeného bez zatížení [mm]

h původní výška vzorku [mm]

Materiály se součinitelem namrzavosti menším než 1 % jsou považovány za nenamrzavé.

Míra namrzavosti je vyjádřena jako aritmetický průměr ze 4 měření, zároveň ale rozdíl mezi jednotlivými hodnotami nesmí přesáhnout 15 %. Pokud je jedna z naměřených hodnot extrémní, je možné ji zanedbat. [2]

Norma je při popisu metody B málo specifická, díky čemuž vyvstává nesrovnalost týkající se samotného procesu zkoušky a jeho vyhodnocování. Za hlavní zdroj lze považovat veličinu $\Delta h'$, která je popsána jako naměřený zdvih tělesa zkoušeného bez zatížení. V postupu zkoušky však není nikde stanoveno, že se těleso má zmrazovat bez zatížení. Naopak je v normě přímo uvedeno, že metoda B zahrnuje provádění zkoušky namrzavosti v širším rozmezí teplot prochlazování vzorků a při jejich různém zatěžování. Je zde tedy přímo uvedeno, že se tělesa mají během doby zmrazování zatěžovat. Za zatížení se však v definici $\Delta h'$ může považovat zatížení zmrazováním, z čehož by pak vyplývalo, že se jedná o zdvih měřený až v procesu rozmrazání. Je tedy zřejmé, že je třeba definici $\Delta h'$ upravit, protože ve stávající podobě je poněkud zavádějící a nepřesná.

3.2 Zkoušky namrzavosti v EU

Problematikou namrzavosti se v rámci Evropské Unie zabývá CEN TC 227, WG4. Tato pracovní skupina má za úkol připravit sjednocenou metodiku testu přímého měření namrzavosti pro připravovanou evropskou normu. Mezi členy této komise patří Velká Británie, Rakousko, Německo, Belgie, Dánsko, Finsko, Švédsko, Norsko a rovněž i

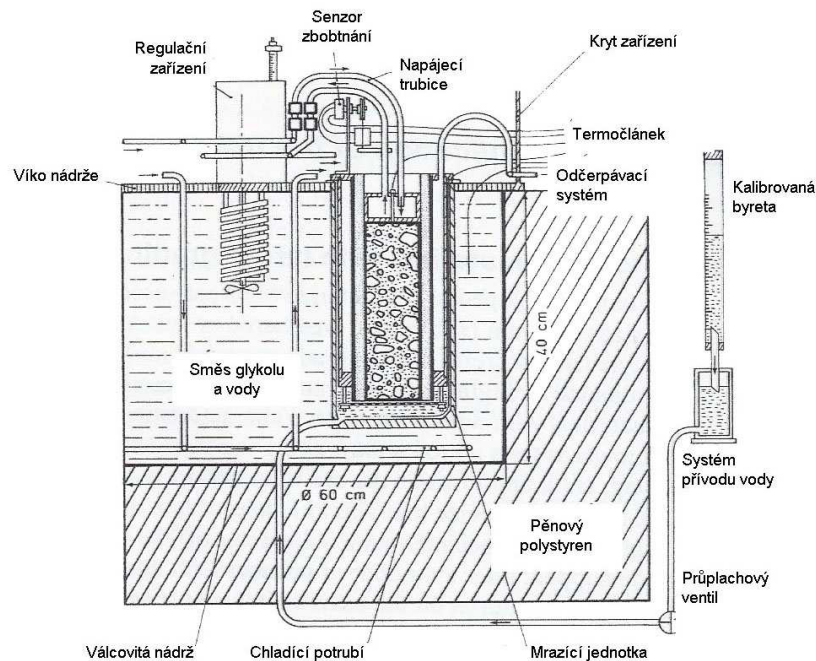
Česká republika. K dispozici je již první návrh normy EN 13286-54 „Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – část 54: Zkušební metody pro stanovení odolnosti proti mrazu - Odolnost hydraulicky stmelených směsí proti zmrazování a rozmrazování.“ V současnosti se přezkoumávají požadavky a stanoviska jednotlivých států, rovněž se jedná i o národní podobě ČSN EN 13286-54. [10]

Jednotlivé státy přistupují k samotnému zkoušení namrzavosti odlišnými způsoby. Závisí to zejména na rozdílných klimatických podmínkách v jednotlivých zemích a tedy i nebezpečí možného vzniku deformací vozovky působením mrazu a vody, které je např. v severských státech mnohem výraznější. Pro srovnání jsou uvedeny odlišné přístupy některých členských států CEN TC 227, WG4, které se touto problematikou dlouhodobě zabývají.

3.2.1 Francie

3.2.1.1 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa jsou zhutněna standardní nebo modifikovanou Proctorovou hutnicí energií při vlhkosti, která odpovídá objemové hmotnosti zeminy v suchém stavu s 95 % optimem. Cílem je dosažení vysokého stupně saturace a vytvoření podmínek pro dosažení maximálního mrazového zdvihu. Hutní se 2 zkušební tělesa. Rozměry použitého zkušebního tělesa závisí na zrnitosti zkoušeného materiálu. Pro materiály se zrnitostí 0/20 mm se užívá těleso s průměrem (150 ± 10) mm a délkou (320 ± 10) mm. Zkušební těleso s průměrem 865 mm a délkou 1050 mm je využíváno pro materiály se zrnitostí 0/200 mm.



Obr. 3-9 – Měřicí zařízení užívané ve Francii (zdroj [4], upraveno)

3.2.1.2 Postup zkoušky

Zkušební těleso se nechá po (18 ± 2) h odpočívat. Po této době se spodní část tělesa ponoří do vody o teplotě $(1 \text{ až } 2) ^\circ\text{C}$ a vrchní část je vystavena teplotě $-5,7 ^\circ\text{C}$ po dobu 12 dní. Po ukončení zkoušky jsou pořízeny fotografie tělesa, zaznamenána úroveň zmrzlé plochy a pozice každé ledové čočky, včetně jejího typu (tloušťka a tvar). Zkušební těleso je podélně rozpůleno za účelem určení vlhkosti v každé jeho vrstvě.

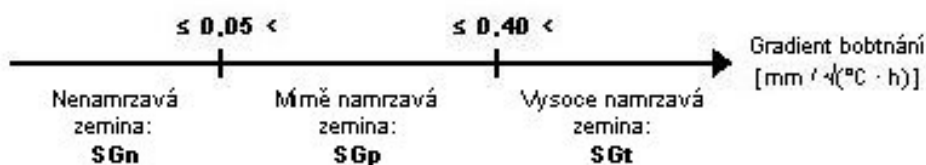
3.2.1.3 Vyhodnocení zkoušky

- Měří se zbobtnání zkušebních těles.
- Určí se závislost mezi bobtnáním materiálu X_G [mm] a indexem mrazu I [$^\circ\text{C} \cdot \text{den}$] působícím na povrch zkušebního tělesa. Výsledek cyklu zmrazování je vyjádřen kombinací intenzity mrazu a doby trvání teplot pod bodem mrazu. Index mrazu je suma průměrných denních teplot během období mrazu:

$$I = \int_0^t T(^{\circ}\text{C}) dt \quad (3-3)$$

- Stanoví se gradient této lineární závislosti, který se užívá k charakterizování míry namrzavosti testovaného materiálu. Pro návrh vozovek z hlediska ochrany proti

mrazu jsou stanoveny dva gradienty prahových hodnot, které definují tři třídy namrzavosti (viz graf 3-3). [4]



Graf. 3-3 – Třídy namrzavosti ve Francii (zdroj [4], upraveno)

3.2.2 Německo

Německé předpisy zavádí při rozhodování o vhodnosti zemin, nestmeleného kameniva a směsí pro výstavbu vozovek dva pojmy **namrzavost** a **mrazuvzdornost**. Míra namrzavosti definuje režim soustavy (zrno-voda-vzduch), který se v zemině vyskytuje. Mrazuvzdornost vyjadřuje odolnost jednotlivého zrna v nestmeleném kamenivu nebo směsi proti účinkům mrazu v kombinaci s vodou. Požadavek na stanovení míry namrzavosti nebo mrazuvzdornosti je podmíněn materiálem. Kvůli posouzení míry namrzavosti jsou zeminy klasifikovány na základě DIN 18196 „Klasifikace zemin pro účely výstavby“.

Pro zatřídění je důležitý podíl maximální velikosti zrn okolo 63 mm:

- Velikost zrna > 0,063 mm je větší než 95 % - klasifikace dle čáry zrnitosti
- Velikost zrna ≤ 0,063 mm je větší než 40 % - klasifikace dle konzistence
- Velikost zrna ≤ 0,063 mm je mezi 5 % a 40 % - klasifikace dle čáry zrnitosti a konzistence

Tab. 3-2 – Zjednodušená klasifikace zemin podle namrzavosti (zdroj [11], upraveno)

Třída namrzavosti	Míra namrzavosti	Klasifikace dle DIN 18196
F1	Nenamrzavá	Štěrk, písky, materiály s úzkou, mezerovitou nebo otevřenou zrnitostí
F2	Mírně namrzavá až namrzavá	Jíly s vysokou plasticitou
		Humusové půdy
		Směsné písčité zeminy
F3	Vysoce namrzavá	Jíly se střední a nízkou plasticitou
		Směsné prachovité zeminy
		Štěrk a písky s vysokým obsahem prachovitých a jílovitých částic

Zeminy s namrzavostí třídy F3 jsou po úpravě stabilizací, za předpokladu dodržování podmínek určených pro kvalifikovanou zemní stabilizaci, zařazeny do třídy F2.

Namrzavost a mrazuvzdornost zemin stabilizovaných hydraulickým pojivem se vyjádří změnou délky zkušebního tělesa po zmrazovacích cyklech:

$$\Delta l / l \leq 1 \% \quad (3-4)$$

Namrzavost a mrazuvzdornost zemin stabilizovaných vápnem nebo hydroxidem vápenatým je stanovena pevností v tlaku na válcových zkušebních tělesech po zmrazovacích cyklech:

$$\text{pevnost v tlaku} \geq 0.2 \text{ N/mm}^2 \quad (3-5)$$

3.2.2.1 Zkušební tělesa

Maximální velikost zrn je omezena na 22,4 mm. Zemina se hutní standardní Proctorovou energií při optimální vlhkosti do válcové formy o průměru 150 mm a výšky 125 mm. Forma se skládá z pěti prstenců, které jsou vyrobeny z teflonu kvůli snížení tření u stěn.



Obr. 3-10 – Měřící zařízení, prstence formy a děrovaná spodní deska užívané v Německu (zdroj [11], upraveno)

3.2.2.2 Postup zkoušky

Těleso je umístěno do zmrazovacího zařízení, kde je po dobu 24 hodin vystaveno konstantní teplotě vzduchu ($+1,5 \pm 0,5$) °C. Povrch je zatížen závažím o hmotnosti 0.5 N/cm², které simuluje zatížení vyvolané spodní podkladní vrstvou o velikosti cca 20 cm.

Rozlišují se dvě varianty dle způsobu zmrazování:

- **Varianta A** – povrch tělesa je ochlazován tak, aby po uplynutí 4 dnů bylo uprostřed tělesa docíleno 0 °C. Tento stav se následně udržuje po dobu 3 dnů. Teplota zmrazování tedy není konstantní, ale je regulována podle individuálních teplotních podmínek.
- **Varianta B** – povrch zkušebního tělesa je zmrazován při stálé teplotě -4°C po dobu 7 dní.

Výhodou varianty A je postupné promrzávání zkušebního tělesa. Konstantní hloubka promrzání je nezávislá na termofyzikálních vlastnostech zkoušeného materiálu a tepelných podmínkách na povrchu tělesa po celou dobu trvání testu. Je zaručen konstantní tepelný gradient nezamrzlé spodní části zkušebního tělesa i neměnná vzdálenost k vodní lázni. Z těchto důvodů je varianta A upřednostňována. Po ukončení zkoušky je vzorek zeminy ponechán rozmrazovat při pokojové teplotě po 24 hodin.

3.2.2.3 Vyhodnocení zkoušky

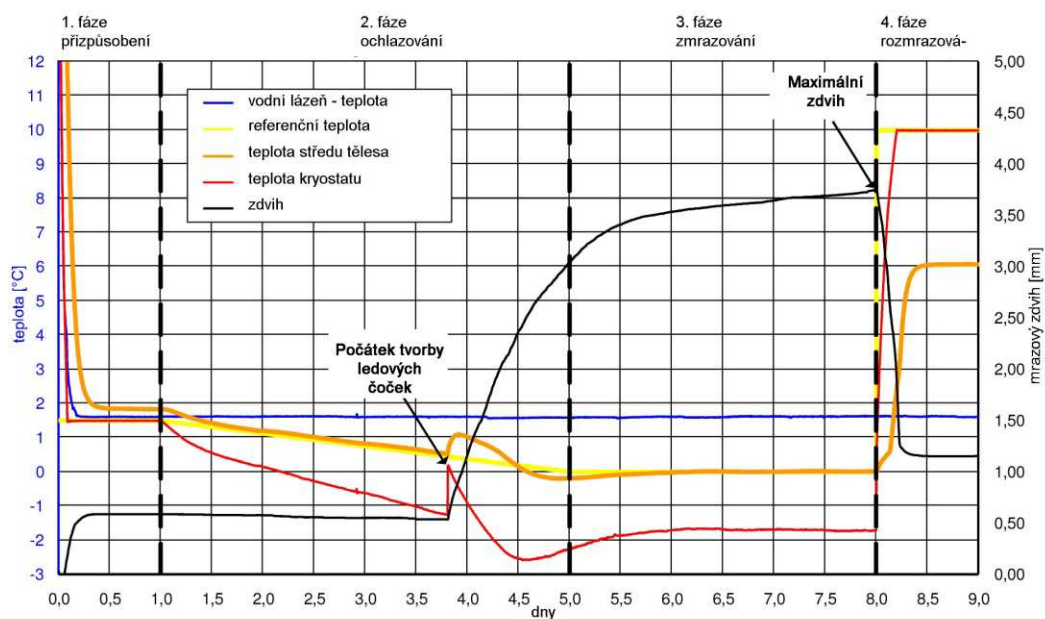
Jsou stanoveny následující parametry:

- zdvih během počáteční fáze, $s_{FH,0}$ [mm]
- zdvih po 7 dnech, $s_{FH,7}$ [mm]
- zdvih na konci stádia zmrazení, $s_{FH,E}$ [mm]
- zdvih po rozmrazení, $s_{FH,A}$ [mm]

Na základě stanovených parametrů jsou odvozeny následující hodnoty:

- bobtnání v počáteční fázi, Δs_0
- největší mrazový zdvih, $\Delta s_{FH,max} = s_{FH,E} - s_{FH,0}$ (3-6)
- možný mrazový zdvih, $\Delta s_{FH,R} = s_{FH,A} - s_{FH,0}$ (3-7)
- směrodatná rychlost tvorby mrazových zdvihů, $V_{FH} = s_{FH,E} - s_{FH,7}$ (3-8)

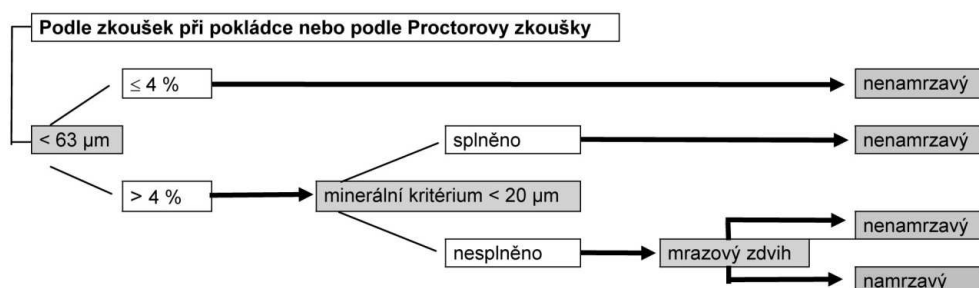
Všechna měřená data jsou zaznamenána každých 5 minut a automaticky uložena. Vše je graficky vyhodnoceno (viz graf 3-4). [11]



Graf. 3-4 – Grafické znázornění teplot a zdvihů v průběhu zkoušky namrzavosti (zdroj [11], upraveno)

3.2.3 Rakousko

Při posuzování namrzavosti se postupuje podle normy ÖNORM B 4810 „Zkušební metody pro ověření mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Namrzavost směsí pro nestmelený podklad při výstavbě silnic a letištních ploch“. Tato norma je založena na předpokladu, že míra namrzavosti přírodního kameniva a směsí může být určena pouze při splnění pevně daných podmínek (viz graf 3-5). Z tohoto důvodu je laboratorně nejdříve provedena modifikovaná Proctorova zkouška. Teprve po vykonání této zkoušky je pomocí rentgenové analýzy (XRD, RDA) stanoven podíl jemných částic < 0,063 mm respektive < 0,02 mm (viz tab. 3-3).



Graf. 3-5 – Třístupňový model pro posouzení namrzavosti dle ÖNORM B 4810 (zdroj [13])

Tab. 3-3 – Mezní hodnoty minerálního kritéria podle normy ÖNORM B 4811(zdroj [13])

Podíl < 0,02 mm	Mineralogické složení frakce < 0,02 mm
do 3 % hmotnosti	Stanovení jednotlivých minerálů není nutné, je přípustné použití 100 % aktivních minerálů
> 3 % – 5 % hmotnosti	U ověřených směsí kameniva stanovení jednotlivých minerálů není nutné U neověřených směsí kameniva se postupuje takto: 1. neaktivní minerály: 100 % 2. heterogenní směsi neaktivních a aktivních minerálů, přičemž dále uvedené mezní hodnoty [a] až e)] a dodatečně i mezní hodnoty [f] až i)] kombinací aktivních minerálů nesmějí být překročeny (množství: 5 % hmotnosti frakce < 0,02 mm): a) 10 % skupina kaolinitů b) 30 % skupina chloritů c) 30 % skupina vermikulitů d) 40 % skupina smektitů e) 50 % skupina slíd f) 60 % skupina slíd + skupina chloritů g) 50 % skupina slíd + skupina chloritů + skupina kaolinitů h) 50 % skupina slíd + skupina kaolinitů i) 40 % skupina slíd + skupina chloritů + skupina kaolinitů + skupina smektitů Směsi křemičitanů s vrstevnatou strukturou, které zde dále nejsou uvedeny, jsou přípustné do celkového objemu max. 40 % (množství: 5 % hmotnosti frakce < 0,02 mm), jinak je nezbytné provedení zkoušek mrazových zdvihů. Mezi 3 % hmotnosti (je přípustné 100 % aktivních minerálů) a 5 % hmotnosti [mezní hodnoty a) až i)] je nutno přípustné mezní hodnoty lineárně interpolovat. 3. Pokud výrazné červenohnědé zbarvení poukazuje na možnost přítomnosti hydroxidů železa, je rovněž nezbytné provedení zkoušek mrazových zdvihů.
>5 % – 8 % hmotnosti	Při podílu 8 % hmotnosti lze používat výhradně neaktivní minerály. Mezi 5 % – 8 % hmotnosti je nutno přípustné mezní hodnoty lineárně interpolovat.

Používání minerálního kritéria se v zásadě osvědčilo, směs kameniva vyhodnocená jako nenamrzavá, v praxi skutečně svou nenamrzavost prokázala. Přesto se v mnoha případech jeho hodnoty ukázaly jako příliš přísné. Nevýhodou je i způsob jeho vyhodnocování, který je velmi nákladný a nepřesný. Proto se objevila snaha tuto metodu upravit nebo případně modifikovat mezní hodnoty kritéria.

3.2.3.1 Zkušební tělesa

Zkouška se provádí na směsi kameniva, která propadne přes síto 31,5 mm. Připraví se dvě válcová zkušební tělesa průměru 150 mm a výšky 150 mm, která se zhutní standardní proctorovou energií při optimální vlhkosti. Do každého tělesa se umístí teplotní snímač (max. tloušťka 5 mm) nejméně 4 cm od stěny tělesa a 1,5 – 3 cm pod jeho povrch.

3.2.3.2 Postup zkoušky

Zkušební těleso se umístí do izolované nádrže tak, aby voda mohla být ze spodu saturována a těleso bylo možné zatížit. Vodní hladina by měla být v úrovni alespoň (1 – 2) cm nad horní hranou zkušební tělesa. Tyto podmínky spolu s teplotou vody

($4 \pm 0,5$) °C je nutné udržet po 24 hodin. Po této době proběhne první počáteční měření. Po 4 dnech zmrazování by se uprostřed tělesa mělo docílit 0 °C. Tento stav je za stálé teploty udržován po dobu 3 dnů. Po uplynutí této doby nastává rozmrazování, které by mělo trvat alespoň 24 hodin při pokojové teplotě.

3.2.3.3 Vyhodnocení zkoušky

Mrazový zdvih ($\pm 0,1$ mm) je měřen dvakrát denně, dokud poměr zdvihu mezi dvěma dny není nižší než 1 mm. Teplota se měří každou hodinu. Po zmrazení je nutné stanovení gradientu. Výsledkem je určení střední hodnoty zdvihu obou vzorků pro každý den, maximální odchylka jednotlivých výsledků od střední hodnoty by se měla pohybovat ± 2 mm. [12] [13]

3.2.4 Finsko

Zkouška namrzavosti ve Finsku se skládá ze tří individuálních zkoušek mrazových zdvihů (zatížením 2, 20 a 40 kPa) a rozmrazování. Během rozmrazování je těleso zatíženo 20 nebo 40 kPa.

3.2.4.1 Zkušební tělesa

Zkouška mrazového zdvihu je využívána pro vyjádření účinků mrazového zdvihu na vzorcích rostlé půdy a vzorcích připravených ve formách. V závislosti na zrnitosti použité zeminy jsou používány zkušební buňky o průměru 150 mm, 100 mm, nebo 80 mm.

Přírodní zkušební tělesa:

- **Nezmrzlý vzorek** je odebrán do tenkostěnného odběrného válce s vnitřním průměrem 100 mm a výškou 150 – 200 mm. Vzorek je pořízen opatrným zatlačením odběrného válce do dna kopané sondy tak, aby byla zachována původní struktura zeminy.
- **Zmrzlý vzorek** je pořízený jádrovým vrtákem s vnitřním průměrem 100 mm. Odebírají se pokud možno ze zmrzlých, jemnozrnných sedimentů a písků. Uchovávají se v chladících přepravních boxech.

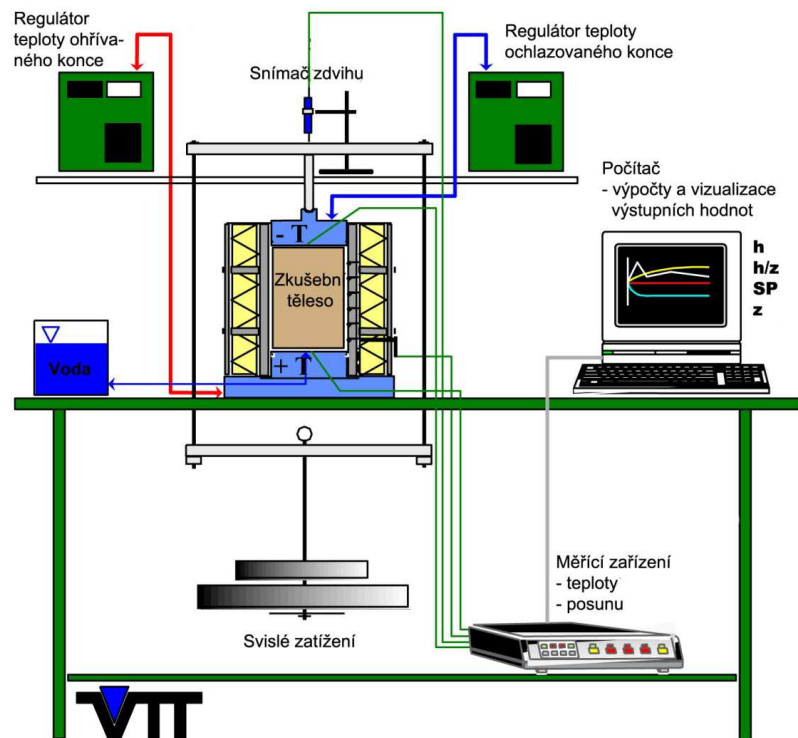
Zkušební tělesa vytvořená ve formách:

- Tělesa jsou vytvořena napěchováním a zhutněním zeminy ve formě o průměru 100 mm a výškou 100 mm.

Vzorky rostlé půdy se uchovávají pokud možno v co nejpřirozenějším stavu. Pro potřeby zkoušky jsou všechny vzorky seříznuty na požadovanou výšku, jsou zváženy a důkladně změřeny. Na zbylé zemině je zjištěna dodatečně vlhkost.

3.2.4.2 Postup zkoušky

Před zahájením zkoušky se ve většině případů nechá zkušební těleso zmrazit bez zatížení. Účelem je dosažení úplné saturace vzorku. Instalace tělesa do zařízení by měla proběhnout v místnosti s teplotou $(0 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Po instalaci je zkušebnímu tělesu umožněno po 24 hodin rozmrzávat. Teplota tekutiny cirkulující ve spodní i vrchní části zkušební buňky je $+ 3 ^\circ\text{C}$. Během této doby je velikost zatížení obvykle 20 kPa. Se zahájením zkoušky je zatížení sníženo na 2 kPa. Vrchní část tělesa je vystavena teplotě $- 3 ^\circ\text{C}$, spodní část $+ 1 ^\circ\text{C}$. Tyto podmínky jsou udržovány minimálně po dobu 24 hodin. Zmrazování je ukončeno ve chvíli, kdy celková hodnota promrznání (promrznání minus mrazový zdvih) je nulová po dobu alespoň 4 hodin.



Obr. 3-11 – Měřicí zařízení užívané ve Finsku (zdroj [14], upraveno)

Po ukončení zmrazování je zatížení zvětšeno na 20 kPa, teplota horní části je změněna na $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a spodní část na $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozmrazování je ukončeno ve chvíli, kdy výška tělesa zůstává konstantní minimálně po dobu 4 hodin. Jakmile jsou tyto podmínky splněny a rozmrazování je ukončeno, nastává opět fáze zmrazování tělesa tentokrát se zatížením 20 kPa. Po ukončení této fáze, je těleso znova vystaveno fázi rozmrazování se zatížením 40 kPa. Obvykle poslední fází této zkoušky (pokud není staveno jinak) je opětovné zmrazování vzorku zeminy pod zatížením 40 kPa.

3.2.4.3 Vyhodnocení zkoušky

- **Mrazový zdvih (h)** – vyjadřuje změnu výšky zkušební tělesa v průběhu zkoušky. Vyčísluje se jako rozdíl mezi aktuální hodnotou odečtenou v průběhu testu a původní hodnotou stanovenou před začátkem zkoušky [mm].
- **Výška nezamrzlé části zkušební tělesa (Z_s)** – je počítána jako výška izotermie $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ z měřeného teplotního profilu za pomoci interpolace (na konci měřicího cyklu) [mm].
- **Hloubka promrznání (Z_j)** – počítá se jako hloubka izotermie $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ užitím měřeného teplotního profilu stěny zkušební buňky. Hloubka promrznání je suma počáteční výšky zkušební tělesa (H) a mrazového zdvihu (h) odečtených od výšky nezamrzlé části zkušební tělesa (Z_s) [mm].

$$Z_j = H + h + Z_s \quad (3-9)$$

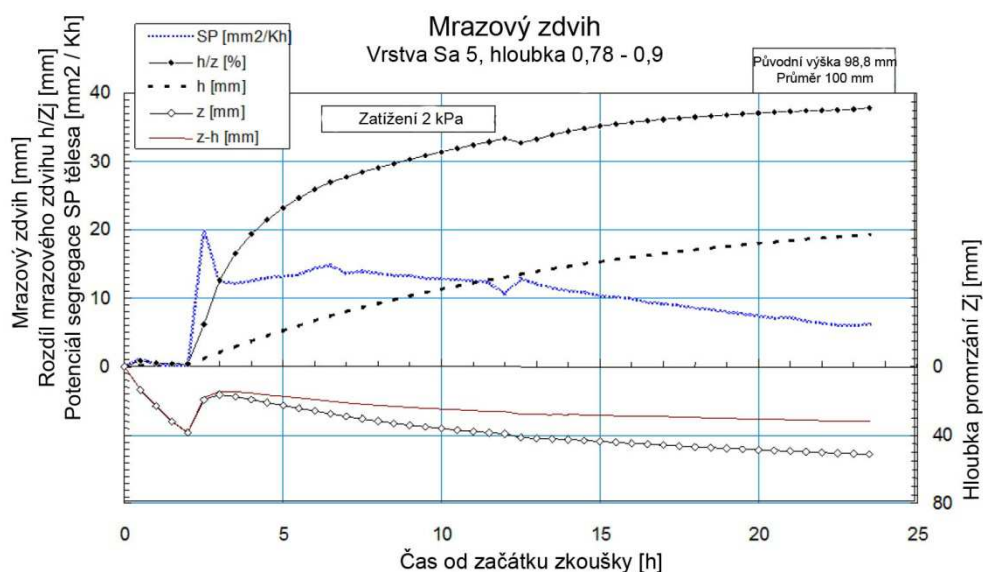
- **Rozdíl mrazových zdvihů (h / Z_j)** – stanoví se jako rozdíl mezi mrazovým zdvihem a promrznáním. Je uvažován jako relativní podíl v procentech mezi mrazovým zdvihem a hloubkou promrznání [%].
- **Poměr mrazového zdvihu ($\Delta h / \Delta t$)** – vyjadřuje přírůstek mrazového zdvihu děleného délkou aktuálního snímaného intervalu [mm/den].
- **Teplotní gradient (gradT)** – jedná se o teplotní rozdíl mezi izotermou $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vrchní částí zkušební tělesa vyděleným tloušťkou zmrzlého zkušební tělesa [$^{\circ}\text{C} / \text{m}$].

$$\text{gradT} = 1000 \cdot \frac{0 - T_{\text{kansi}}}{Z_j} \quad (3-10)$$

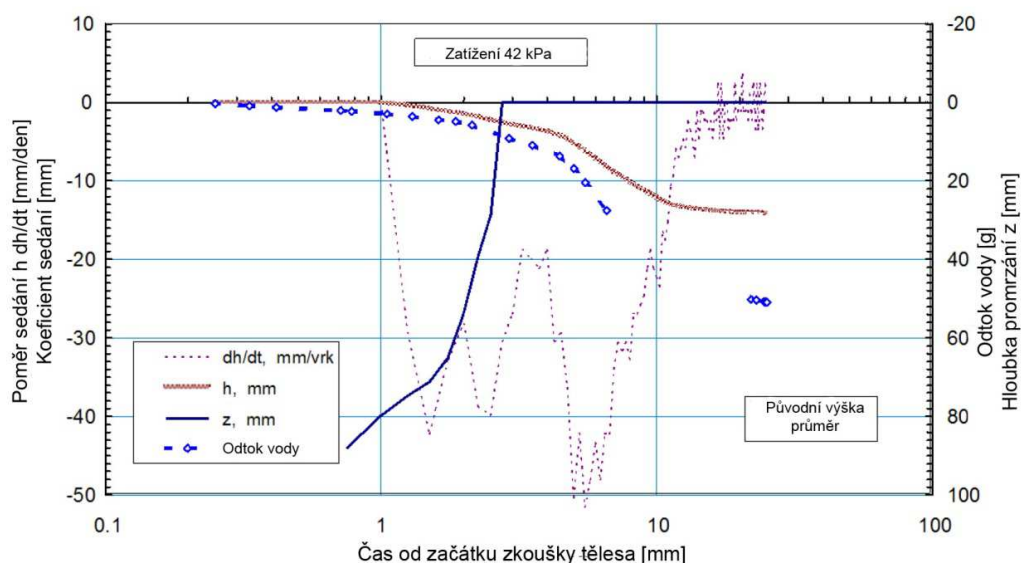
- **Potenciál segregace (index mrazového zdvihu, SP)** – rozdíl mezi poměrem mrazového zdvihu a aktuálním teplotním gradientem nad zmrzlou částí zkušebního tělesa [mm^2 / Kh].

$$SP = \frac{1000}{24} \cdot \frac{\Delta h / \Delta t}{\text{grad} T} \quad (3-11)$$

- **Koeficient konsolidace během tání (c_v)** – stanovuje se z výsledků fáze rozmrazování. Využívá se pro posouzení pórového tlaku v tající zemině a doby dodatečné konsolidace po tání. [14]



Graf 3-6 – Grafické vyhodnocení finské zkoušky zmrazování (zdroj [14], upraveno)



Graf 3-7 – Grafické vyhodnocení finské zkoušky rozmrazování (zdroj [14], upraveno)

3.2.5 Švédsko

3.2.5.1 Zkušební tělesa

Ve Švédském národním silničním a dopravním výzkumném institutu VTI byla Åkem Hermanssonem vyvinuta zcela nová metoda zkoušení namrzavosti zemin. Její vznik byl podmíněn snahou o obdržení názornějších a přesnějších poznatků o působení vody během zmrazování. Zkušební tělesa používaná při této metodě mají průměr 122,5 mm a výšku 580 mm, tvoří je vzorky zeminy získané buď přímo in situ nebo hutněné v laboratořích.

Zkušební zařízení se skládá z teleskopického válce, vyrobeného z PVC, který se skládá celkem ze dvou částí. Spodní část se nazývá sací a její výška je 480 mm, vrchní tvoří víko o výšce 200 mm. Obě části do sebe dokonale zapadají (viz obr. 3-12).



Obr. 3-12 – Zkušební zařízení užívané ve Švédsku: a) teleskopický válec; b) sací část válce vyplněná vzorkem zeminy; c) nasazení víka; d) průběh zkoušky (zdroj [16], upraveno)

3.2.5.2 Postup zkoušky

Samotná zkouška je prováděna v místnosti s regulovanou teplotou vzduchu mezi 4 a 6 °C. Zkušební těleso je zatíženo svislým zatížením 10 kg, které simuluje tíhu podkladních vrstev. Před zahájením zkoušky je na víko instalováno chladicí zařízení a spodek válce je ponořen do nádrže s vodou. V nádrži je udržována konstantní úroveň vodní hladiny a průběžně je zaznamenávána saturace zeminy. Zmrazována je pouze horní část tělesa (cca do 250 mm). Pro kontrolu míry a rychlosti promrzání byl vypracován speciální kontrolní program, který automaticky ukončí zmrazování tělesa ve chvíli, kdy je již jeho celá horní část zmrazena (teplotní snímače vykazují teplotu

pod 0 °C). Průměrná doba trvání zkoušky je 5 dnů. První dva dny je zkušební těleso ponecháno volně saturovat a konsolidovat. K zmrazování dochází teprve třetí den zkoušky a je většinou automaticky ukončeno po třech až čtyřech dnech.

3.2.5.3 Vyhodnocení zkoušky

Po ukončení zkoušky je obvykle zkušební těleso vytlačeno ze sacího válce, jeho spodní nezamrzlá část je nakrájena na plátky o tloušťce 50 mm a stanoví se vlhkost uprostřed každého z plátků. Případně může být na tělese po ukončení zmrazování provedena zkouška pevnosti v tlaku. Výsledkem celé zkoušky je vyčíslení průměrného mrazového zdvihu, který nastane během třetího dne zmrazování [mm/h]. [16] [17]

3.2.6 Norsko

V Norsku se pro zjištění míry namrzavosti používají dvě metody. Jedná se o metodu NTNU, jejímž základem je metoda CRREL, a metoda NGI. Metoda NGI využívá velmi rozsáhlý měřicí systém, a tudíž je využívána zejména pro výzkumné účely.

3.2.6.1 Zkušební tělesa

K oběma zkouškám se využívá směs kameniva frakce 0/32. Maximální velikost částic je 20 mm (případně 10 mm). Vzorky zeminy jsou zhutněny nejčastěji standardní proctorovou energií při optimální vlhkosti. Připraveny jsou dvě tělesa o průměru 125 mm (NTNU) a 90 mm (NGI). Výška těles je 125 mm (NTNU) a 100 mm (NGI).

3.2.6.2 Postup zkoušky a její vyhodnocení

Oproti zkouškám užívaných v ostatních zemích se tělesa před zahájením zkoušky nenechávají po určitou dobu saturovat, ale naopak se ke zkoušce přistupuje hned po jejich zhutnění. Během zkoušky je těleso ze spodu saturováno vodou o teplotě + 1 °C (NTNU) nebo + 2 °C (NGI). Horní část tělesa je vystavena teplotám – 5 °C (NTNU) a – 4 °C (NGI). V mrazící skříni je po celou dobu zkoušky udržovaná teplota mezi – 5 °C a + 1 °C (NTNU) případně – 2 °C (NGI). U metody NTNU je zkouška ukončena po 4 dnech (96 hodinách), v případě metody NGI není doba trvání zkoušky nijak omezena, většinou se však pohybuje mezi 4 a 10 dny. Po ukončení zkoušky je vyhodnocen mrazový zdvih [mm / h]. [18]

3.2.7 Belgie

Zjišťování míry namrzavosti se v Belgii provádí pro hydraulicky zpevněné směsi podle francouzské metody popsané v normě NF P 98-234-1. Tato metoda je založena na srovnání pevnosti v tlaku vzorků směsí vystavených cyklickému zmrazování a rozmrazování s původně odebranými vzorky těchto směsí. Odlišná zkouška se užívá pro nezpevněné směsi kameniva. Pro tyto účely slouží upravená evropská norma EN 1367-1 „Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání - Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování“. V současnosti v Belgii neexistuje přímá metoda zkoušení namrzavosti vhodná výlučně pro upravené a neupravené zeminy.

3.2.8 Dánsko

V Dánsku se v současné době neprovádí přímé zkoušení namrzavosti zemin a jiných materiálů pro účely silničního stavitelství. Naopak se využívají poznatky ze zkoušek, které byly provedeny již v minulosti na podobných zeminách. Vše vychází z geologických podmínek. Nejběžnějšími zeminami, které se v Dánsku nachází, jsou morénové jíly a písky (případně jejich obměny, kterých ale není mnoho). Bližší informace o způsobu zkoušení míry namrzavosti, jakým byly zeminy v minulosti podrobeny, se nepodařilo zjistit.

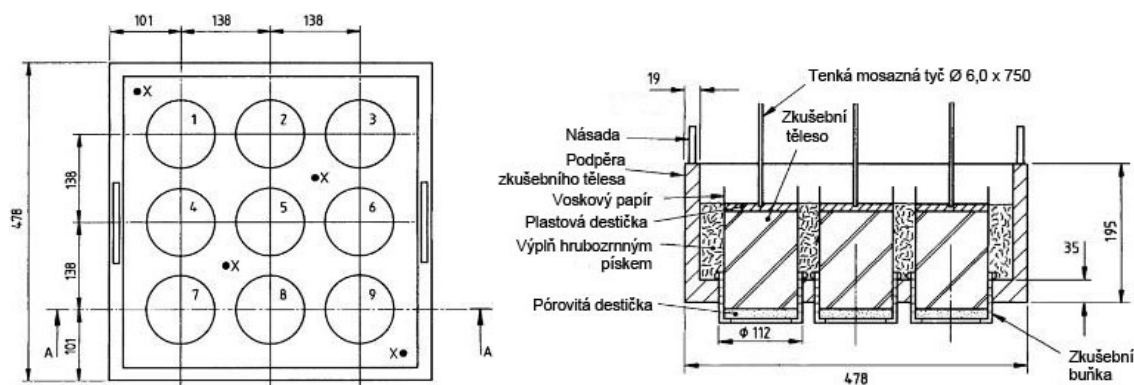
Poněkud pasivní přístup Dánska ve spojení s problematikou namrzavosti se mění přijímáním evropských norem. Některé přijaté normy se totiž zkoušením namrzavosti materiálů přímo zabývají, jedná se například o normu EN 1367-1 „Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání - Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování“.

3.2.9 Velká Británie

3.2.9.1 Zkušební tělesa

Zkouška se provádí na třech sadách vzorků zkoušených směsí zemin. Každá sada obsahuje celkem tři zkušební tělesa. První dvě sady jsou určeny pro zkoušený materiál, třetí sada je vyhrazena pro kontrolní vzorky normalizovaných materiálů. Jako kontrolní vzorek se používá nejčastěji směs suchého písku a vápenné moučky. Samotná zkušební tělesa mají výšku 150 mm a průměr 100 mm. Jsou zhutněna vibračním kladivem při optimální vlhkosti. Po zhutnění se jednotlivá tělesa obalí

voskovým papírem, který se upevní lepicí páskou a ponechají se ve vodní lázni saturovat po dobu (115 ± 5) hodin (viz obr. 3-13).



Obr. 3-13 – Uložení zkušebních těles během zkoušky (zdroj [19], upraveno)

3.2.9.2 Postup zkoušky

Po uplynutí této doby se přistoupí k samotné zkoušce. Tělesa jsou ochlazována při stálé teplotě vzduchu (-16 až -18) °C. Teplota vodní lázně se udržuje mezi (3 a 4,5) °C. Zkouška je ukončena nejdříve po 4 dnech (96 hodinách) ochlazování.

3.2.9.3 Vyhodnocení

Pro každé zkušební těleso je stanovena maximální hodnota mrazového zdvihu, který byl zaznamenán v průběhu zkoušky. Tyto hodnoty jsou pro každou sadu vzorků pro potřebu kontroly zprůměrovány. Aby byly výsledky zkoušky platné, je nutné splnění určitých podmínek:

- Průměrná hodnota mrazového zdvihu pro sadu těles kontrolních vzorků se pohybuje v rozsahu $(4,0 \pm 13,6)$ mm.
- Rozsah maximálních hodnot (tedy minima a maxima) pro všechny tři sady zkušebních těles nesmí překročit 6 mm.

Pokud není splněna ani jedna z těchto podmínek, pak je zkouška považována za neplatnou a je nutné ji opakovat. [19]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato část bakalářské práce pojednává o provedených laboratorních zkouškách a jsou zde prezentovány i jejich výsledky. Zkoušky byly provedeny v prostorách laboratoře ústavu pozemních komunikací FAST v Brně. Protokoly a záznamy jednotlivých zkoušek s naměřenými údaji jsou uvedeny v příloze této práce.

4.1 Klasifikace zeminy

4.1.1 Popis vzorku

Zkoumaný vzorek zeminy pochází z areálu stavební fakulty na Žižkově, ze stavby pozemních garáží za touto budovou (viz obr. 4-1). Má temně hnědou barvu. V suchém stavu je jeho barva hnědo-šedá. Tato zemina má tendenci vytvářet různě velké hrudky, které se po vysušení obtížně rozrušují. V suchém stavu je rovněž velmi prašná, lze tedy usuzovat na vyšší podíl jemných částic.



Obr. 4-1 – Zkoumaný vzorek zeminy

4.1.2 Zrnitost

Laboratorní stanovení zrnitosti zeminy bylo provedeno dle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-4. Zrnitost zeminy byla zjištěna metodou promývání přes sadu kontrolních sít v souladu s ISO 565 a ISO 3310. Promývání jsem upřednostnila před metodou prosévání z důvodu předpokládaného většího podílu jemných částic ve zkoušeném vzorku zeminy. Před samotným zahájením zkoušky jsem jednotlivá síta vizuálně zkontrolovala a očistila.



Obr. 4-2 – Zůstatek na sítích dle pořadí zleva: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8

Síta byla sestavena do kontrolní řady dle tohoto pořadí 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5 mm. Pro síťový rozbor jsem použila navážku zeminy o hmotnosti 1257,1 g. Navážka se nasypala na připravenou kontrolní řadu sít a následně došlo k důkladnému promývání proudem vody. To jsem ukončila ve chvíli, kdy z výtokové trubice spodní misky začala vytékat čirá voda. Tento stav znamenal, že došlo k odplavení všech jemných částic < 0,063 mm. Celá sestava sít spolu se zachycenými frakcemi zeminy byla vložena do sušárny, kde se nechala sušit při teplotě 50 °C do ustálení hmotnosti. Frakce zeminy zachycené jednotlivými síty jsem zvažila a vyhodnotila dle vztahu (4-1).

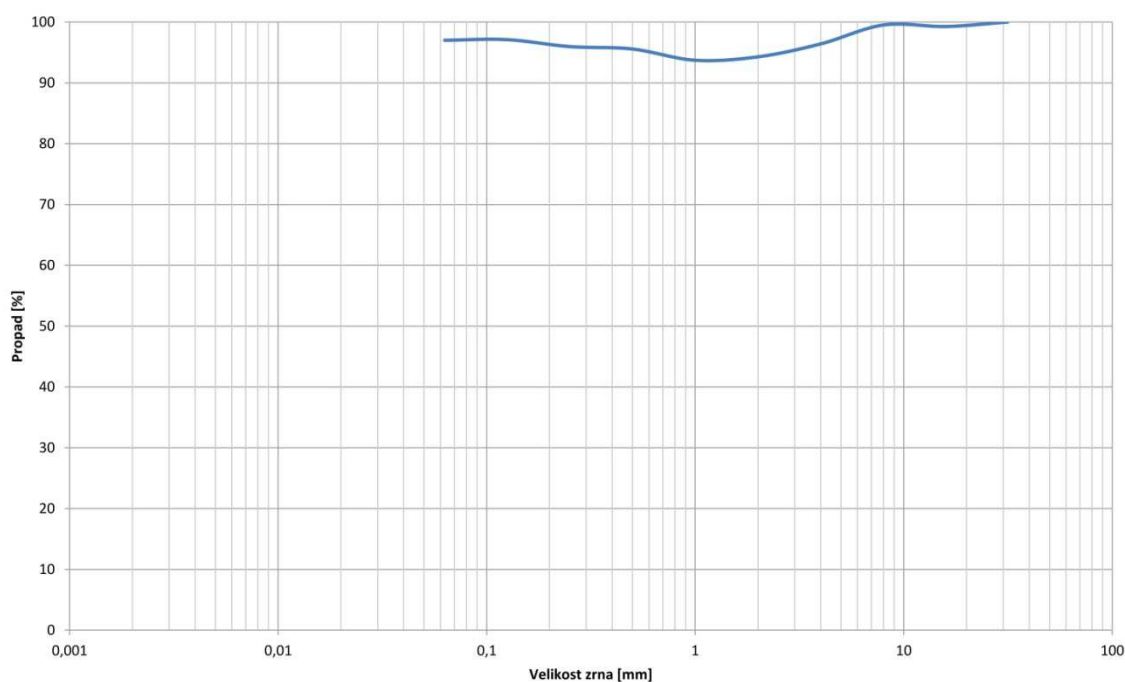
$$f_n = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{m} \cdot 100 \quad (4-1)$$

f_n frakce zeminy propadlá sítem [%];

m_1 hmotnost zeminy propadlé sítem s otvorem [g];

m_2, m_n hmotnost zeminy propadlé síty po sobě jdoucími až do vhodně zvolené velikosti oka síta [g];

m celková hmotnost zkušebního vzorku [g].

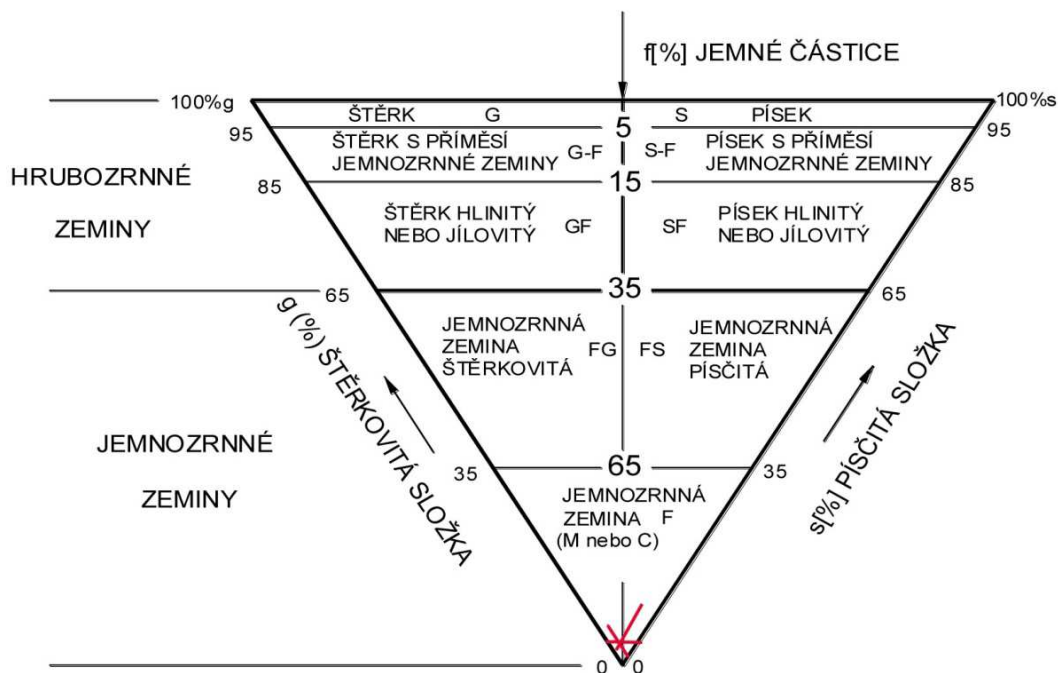


Graf 4-1 – Křivka zrnitosti zkoušené zeminy

Z křivky zrnitosti bylo odečteno procentuální zastoupení jednotlivých složek zeminy:

- Jemné částice $f = 97 \%$
- Písčítá složka $s = 1 \%$
- Štěrková složka $g = 2 \%$

Za pomoci trojúhelníkového diagramu (viz graf 4-2) jsem zjistila, že se jedná o jemnozrnnou zeminu.



Obr. 4-2 – Trojúhelníkový diagram pro částice do 60 mm (zdroj [5], upraveno)

4.1.3 Stanovení konzistenčních mezí

Důležitým kvalitativním znakem jemnozrnných zemin je plasticita, proto bylo nezbytné laboratorně stanovit mez tekutosti a plasticity spolu s indexem plasticity. Stanovení konzistenčních mezí bylo provedeno v souladu s ČSN CEN ISO/TS 17892-12.

4.1.3.1 Mez tekutosti



Obr. 4-3 – Penetrometr 80 g/30° pro určení meze tekutosti

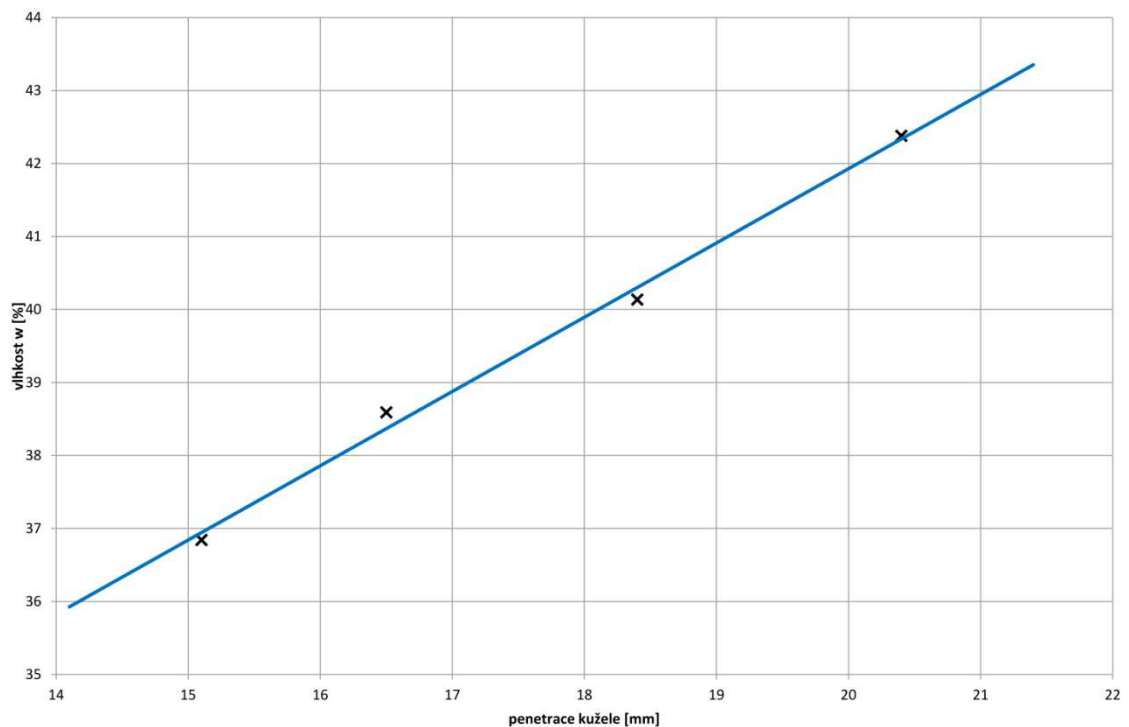
Mez tekutosti je vlhkost zeminy, při které zemina přechází ze stavu tekutého do stavu plastického. Její stanovení bylo provedeno kuželovou metodou (viz obr. 4-3). Hmotnost použitého kužele byla 80 g a jeho vrcholový úhel 30 °. Zeminu jsem nejprve prosela sítím 0,5 mm a po té jsem ji rozdělila na 4 vzorky o hmotnosti 200 g. Do jednotlivých vzorků jsem přidala potřebné množství vody. Vzniklá pasta byla důkladně promíchána, její povrch byl vyhlazen a zarovnan s miskou. Penetrační kužel se nastavil tak, aby se dotkl uhlazeného povrchu zeminy, uvolnil se a po dobu 5 sekund se nechal vnikat do vzorku. Po té jsem odečetla hodnotu penetrace a stanovila vlhkost dle vztahu (4-2).

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (4-2)$$

w vlhkost [g];

m_w hmotnost vlhkého vzorku [g];

m_s hmotnost suchého vzorku [g].



Graf 4-3 – Stanovení meze tekutosti w_L

4.1.3.2 Mez plasticity

Mez plasticity vyjadřuje vlhkost, při které zemina ztrácí svojí plasticitu a přechází v pevnou konzistenci. Ze zeminy připravené podle postupu pro určení meze tekutosti jsem odebrala vzorek o hmotnosti cca 50 g. Zkoušený vzorek zeminy se nechal

vyschnout do té míry, až z něj šla zformovat koule. Tu jsem hnětla a válela, dokud se na ní neobjevily drobné praskliny. Po té byla rozdělena na čtyři části. Každá z částí se rolovala po skleněné podložce pomocí dlaně ruky, dokud se vzniklé válečky o průměru cca 3 mm nezačaly postupně rozpadávat. Válečky se vložily do váženky a stanovila se jejich vlhkost dle vztahu (4-2).



Obr. 4-4 – Vzorky zeminy ve váženkách připravené pro stanovení vlhkosti

4.1.3.3 Index plasticity

Index plasticity vyjadřuje schopnost zeminy vázat vodu, aniž by došlo ke změně jejího stavu. Je to tedy rozsah vlhkosti, ve kterém je zemina stále plastická. Slouží i jako ukazatel množství jílovitých minerálů obsažených v zemině. Jeho hodnotu jsem stanovila podle vzorce (4-3).

$$I_p = W_L - W_p \quad (4-3)$$

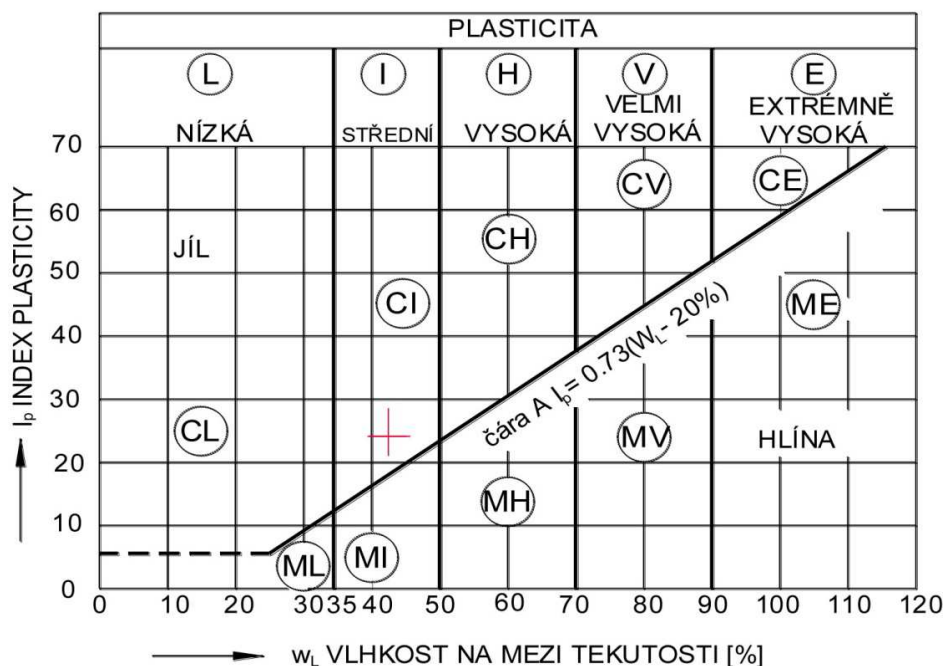
I_p Index plasticity [%];
 W_L vlhkost na mezi tekutosti [%];
 W_p vlhkost na mezi plasticity [%].

4.1.4 Zatřídění zeminy

Tab. 4-1 – Konzistenční meze zkoumaného vzorku zeminy

Vlhkost na mezi tekutosti w_L [%]	Vlhkost na mezi plasticity w_p [%]	Index plasticity I_p [%]
42	18	24

Vynesením konzistenčních mezí do Casagrandeho diagramu plasticity (viz graf 4-4) byla stanovena plasticita jemnozrnné zeminy.



Graf. 4-4 – Diagram plasticity pro částice < 0,50 mm (zdroj [5], upraveno)

Samotné zatřídění zeminy bylo provedeno dle normy ČSN 73 6133 „Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací“ (viz tab. 4-3).

Tab. 4-4 – Klasifikace zeminy dle ČSN 73 6133

Název zeminy	Třída a symbol	Obsah jemných částic f [%]	Mez tekutosti w_L [%]	Postavení v diagramu plasticity	Vhodnost do násypů	Vhodnost pro podloží vozovky (aktivní zónu)
Jíl se střední plasticitou	F6 CI	97	42	nad čarou A	podmínečně vhodná	nevhodná

4.2 Stanovení optimální vlhkosti

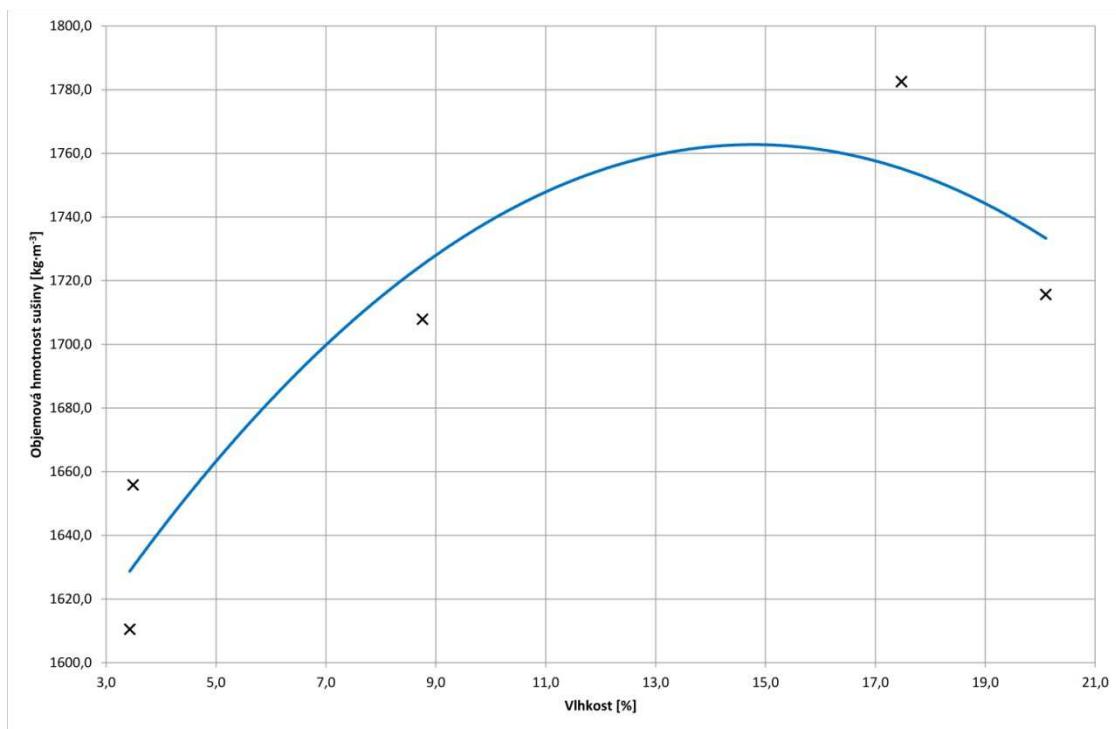
Optimální vlhkost zeminy byla stanovena pomocí standardní Proctorovy zkoušky v souladu s ČSN EN 13286-2. Při této zkoušce byl použit pěch o hmotnosti 2,5 kg (A) dopadající z výšky 305 mm na zeminu ve třech vrstvách v Proctorově formě (A). Vzorek zeminy o hmotnosti cca 10 kg jsem nechala vysušit při teplotě 50 °C. Následně se rozdělil na 5 částí o hmotnostech cca 2 kg. Do jednotlivých vzorků jsem přidala takové množství vody, abych docílila jejich odlišné vlhkosti. Každý vzorek jsem důkladně promíchala a ponechala přikrytý po dobu 18 hodin stát tak, aby se vlhkost

rovnoměrně rozdělila. Po uplynutí této doby jsem přistoupila k samotnému zhutňování vzorků zeminy.



Obr. 4-5 – *Přístroj Proctor standard užitý pro hutnění těles*

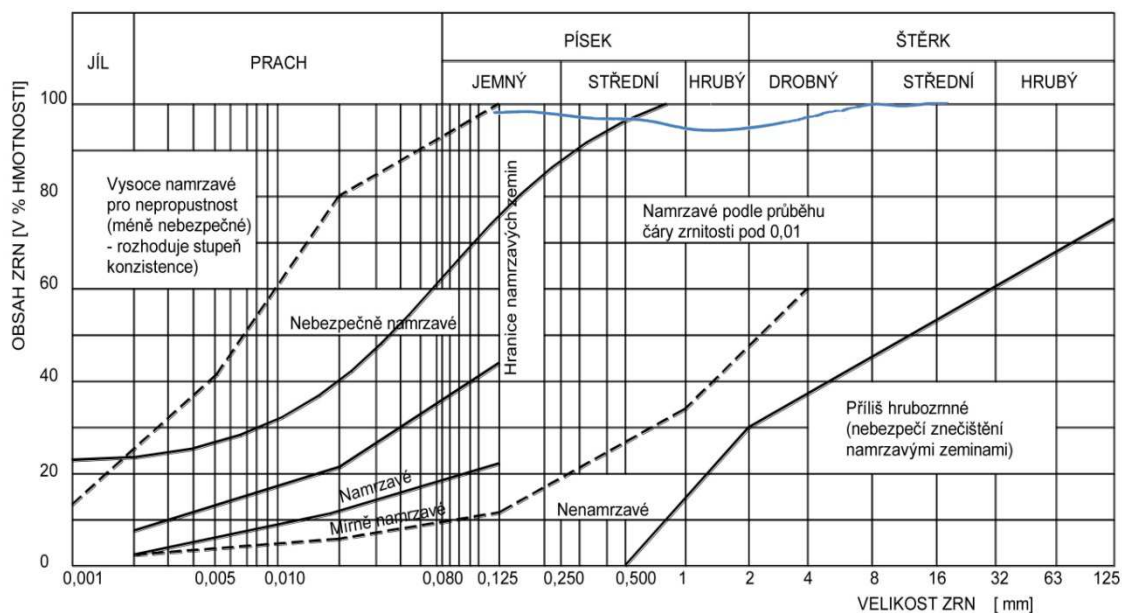
Zemina se hutnila v zhutňovacím válci 25 rázy ve třech vrstvách. Po zhutnění byl povrch zeminy seříznut, zarovnán s okrajem válce a zvážen. Ze středu válce jsem odebrala zeminu pro stanovení vlhkosti dle rovnice (4-2). Provedením zkoušky byla obdržena křivka, jejíž vrchol odpovídá maximální objemové hmotnosti vysušené zeminy, které bylo dosaženo při optimální vlhkosti (viz. graf 4-5).



Graf 4-5 – Vyhodnocení Proctorovy zkoušky

4.3 Vyhodnocení míry namrzavosti nepřímou metodou

Vzorek zeminy je dle nepřímé metody stanovení míry namrzavosti vyhodnocen jako **vysoce namrzavý** (viz graf 4-6).



Graf 4-6 - Scheibleho kritérium namrzavosti s křivkou zrnitosti zkoušené zeminy

4.4 Vyhodnocení míry namrzavosti přímou metodou

Při stanovování míry namrzavosti jednotlivých vzorků zeminy jsem postupovala dle podmínek uvedených v normě ČSN 72 1191, které jsou podrobně rozebrány v kapitole 3.1.4.2. Jednotlivé zkoušky se od sebe lišily v teplotě ochlazování zkušebních vzorků zeminy. Zkoušení probíhalo v prostorách laboratoře ústavu pozemních komunikací FAST v Brně. Průběžné hodnoty zkoušek byly automaticky zaznamenány a ukládány do počítače. Kompletní záznamy jsou obsaženy v příloze této práce. Jednotlivé vzorky byly vyhodnoceny dle metody A i metody B popsaných v normě ČSN 72 1191. V případě metody B byla tři tělesa ponechána při teplotě 5 °C rozmrazovat po dobu 72 hodin.



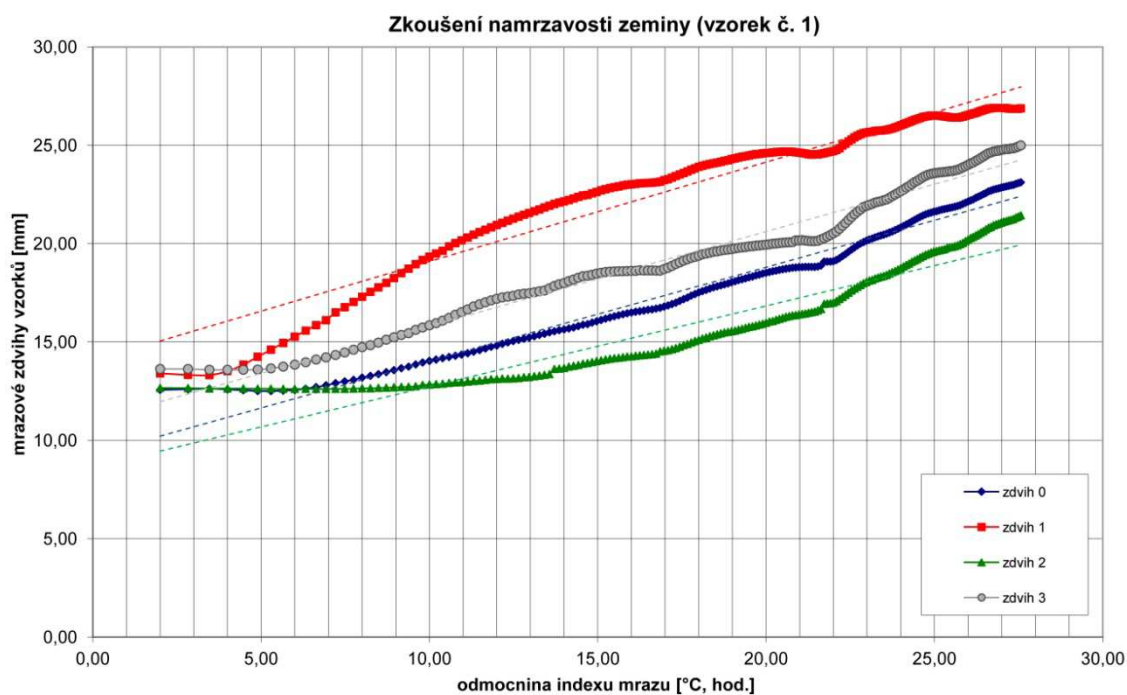
Obr. 4-6 – Uložení těles v chladícím zařízení

4.4.1 Vzorek č. 1

Ze zeminy F6Cl jsem zhotvila zkušební tělesa výšky 100 mm, ta jsem nechala vystavit teplotě -4°C .



Obr. 4-7 – Vzorek č. 1: a) pohled na vzniklou ledovou čočku; b) zdvih vzorku po ukončení zkoušky

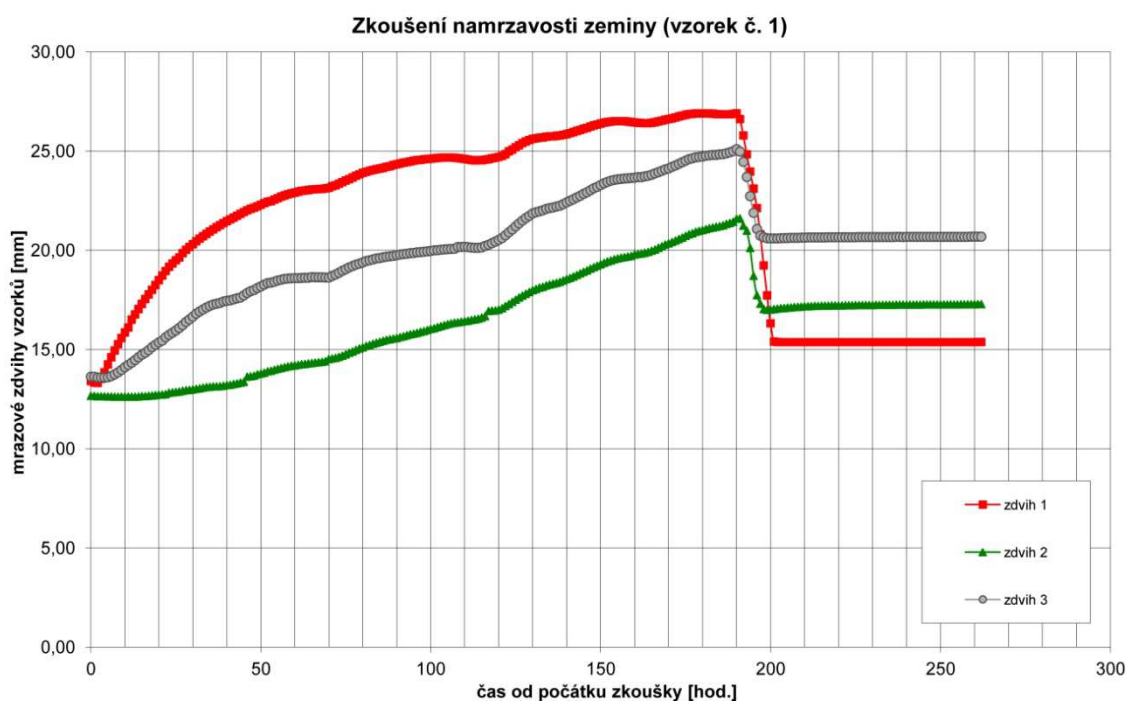


Graf 4-7 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)

Tab. 4-3 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 1 dle metody A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	12,57	13,41	12,67	13,63
Konečná hodnota [mm]	23,12	26,88	21,44	25
Rozdíl [mm]	10,55	13,47	8,77	11,37
Součinitel β	0,51	0,49	0,49	0,53
Průměrná hodnota β	0,51			

Vzorek č. 1 byl dle metody A normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **nebezpečně namrzavý**.



Graf 4-8 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1 v závislosti na čase (metoda B)

Tab. 4-4 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 1 dle metody B

	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	13,41	12,67	13,63
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	26,91	21,59	25,10
Koncová hodnota zdvihu [mm]	15,38	17,29	20,69
Součinitel K_n	1,57	1,41	0,97
Průměrný součinitel K_n	1,32		

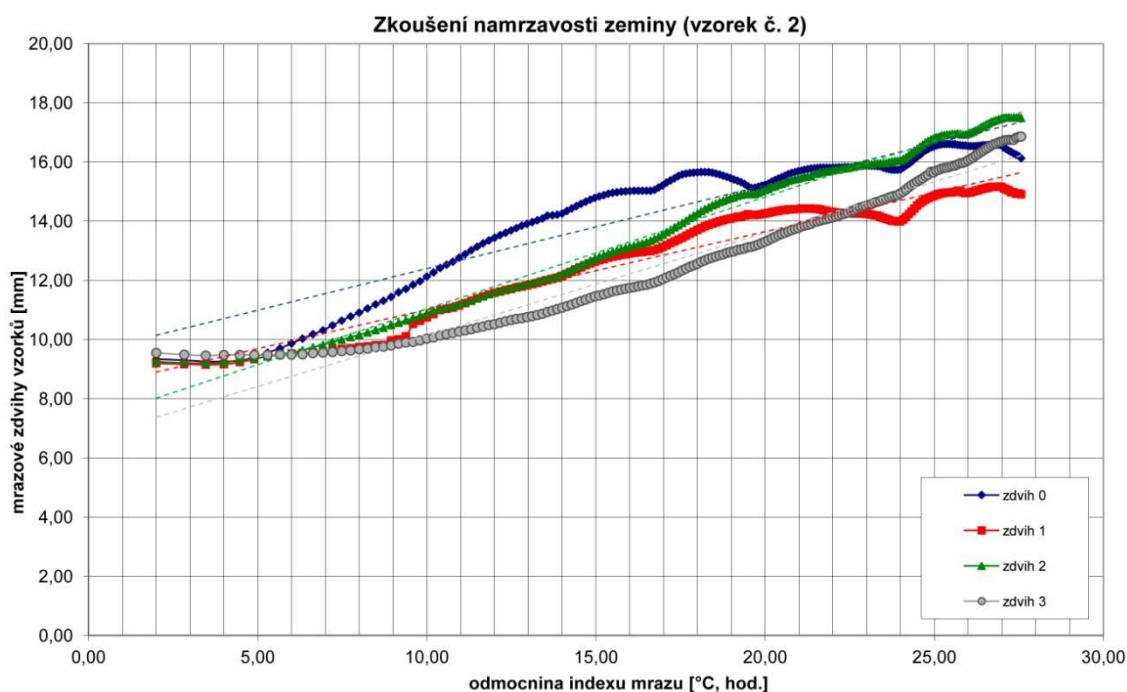
Vzorek č. 1 byl dle metody B normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **namrzavý**.

4.4.2 Vzorek č. 2

Ze zeminy F6Cl jsem zhutnila zkušební tělesa výšky 120 mm, ta jsem vystavila teplotě -4°C .



Obr. 4-8 – Vzorek č. 2: a) před zkouškou; b) po zkoušce

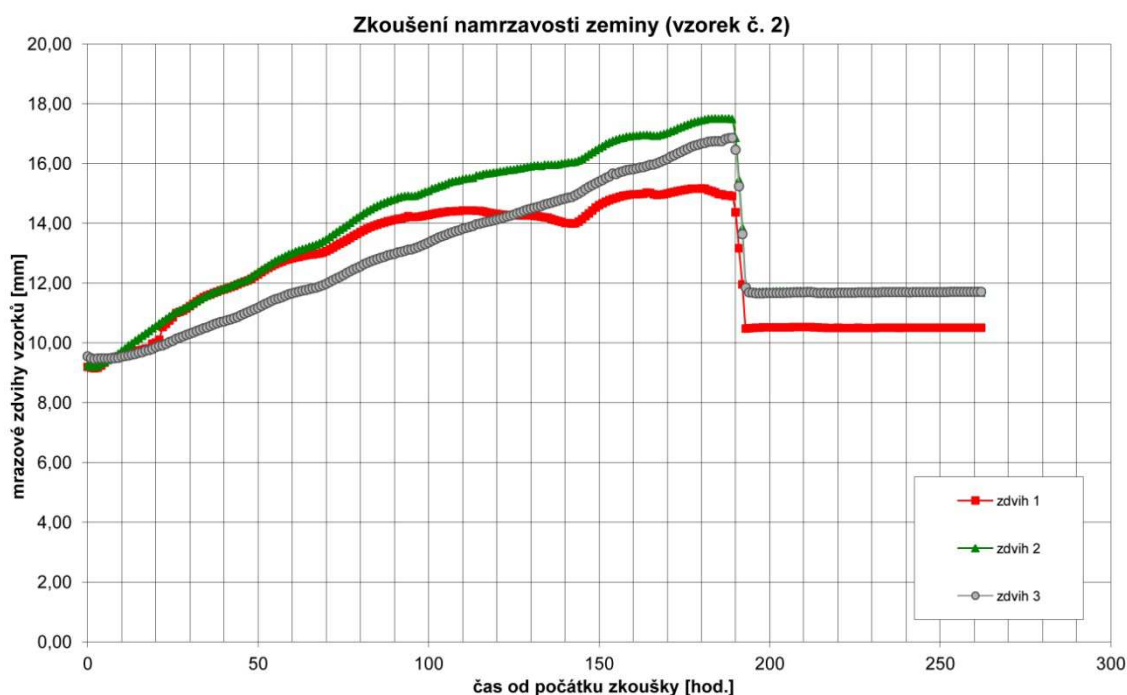


Graf 4-9 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 2 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)

Tab. 4-5 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 2 dle metody A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	9,34	9,20	9,25	9,55
Konečná hodnota [mm]	16,13	14,91	17,49	16,86
Rozdíl [mm]	6,79	5,71	8,24	7,31
Součinitel β	0,36	0,46	0,37	0,38
Průměrná hodnota β	0,39			

Vzorek č. 2 byl dle metody A normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **namrzavý**.



Graf 4-10 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 2 v závislosti na čase (metoda B)

Tab. 4-6 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 2 dle metody B

	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	9,20	9,25	9,55
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	14,37	16,86	16,46
Koncová hodnota zdvihu [mm]	10,51	11,68	11,71
Součinitel K_n	1,23	1,60	1,49
Výsledný součinitel K_n	1,44		

Vzorek č. 2 byl dle metody B normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **namrzavý**.

4.4.3 Vzorek č. 3



Obr. 4-9 – Odlišný mrazový zdvih vzorku č. 3

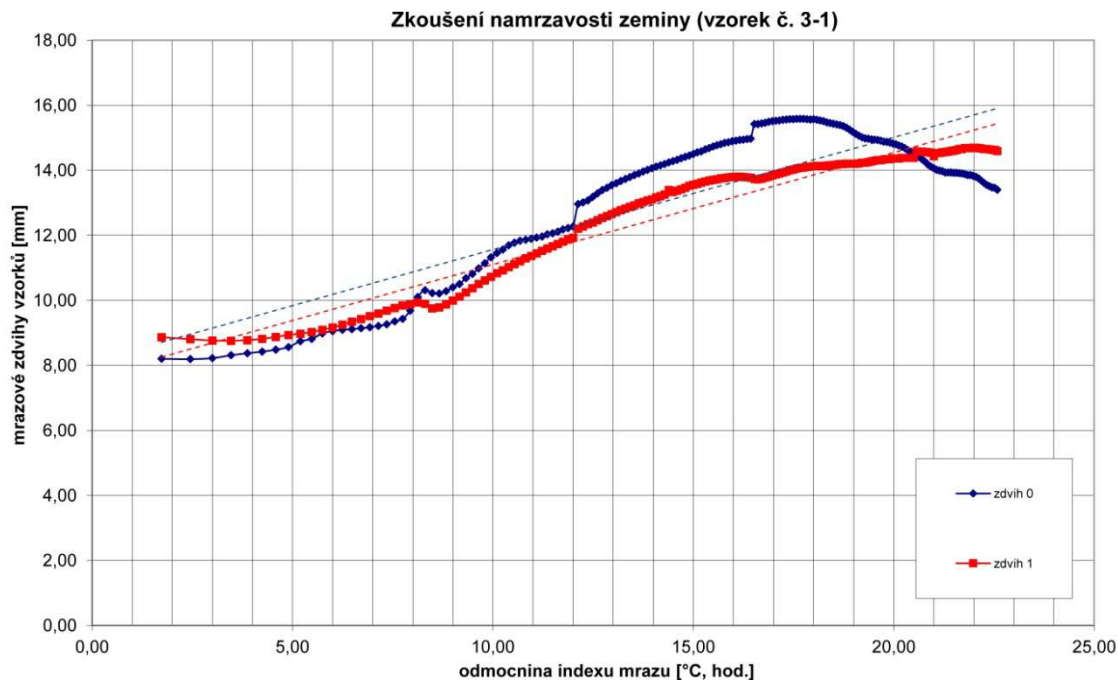
Ze zeminy F6Cl jsem zhutnila zkušební tělesa výšky 120 mm, ta měla být vystavena teplotě – 6°C. V průběhu zkoušky však došlo k chybě. První dvě tělesa umístěná ve spodní části chladicího zařízení byla zmrazována při teplotě – 6 °C. Vrchní tělesa byla však v důsledku chyby vystavena teplotě zmrazování – 3 °C. Po důkladném zvážení jsem se rozhodla vzorek č. 3 nevyloučit z vyhodnocení, ale výsledky prezentovat odděleně jako vzorek č. 3-1 a vzorek č. 3-2.

4.4.3.1 Vzorek č. 3-1



Obr. 4-10 – Saturace zkušebních vzorků před zahájením zkoušky

Zkušební tělesa vzorku č. 3-1 byla zmrazována při teplotě - 3 °C.

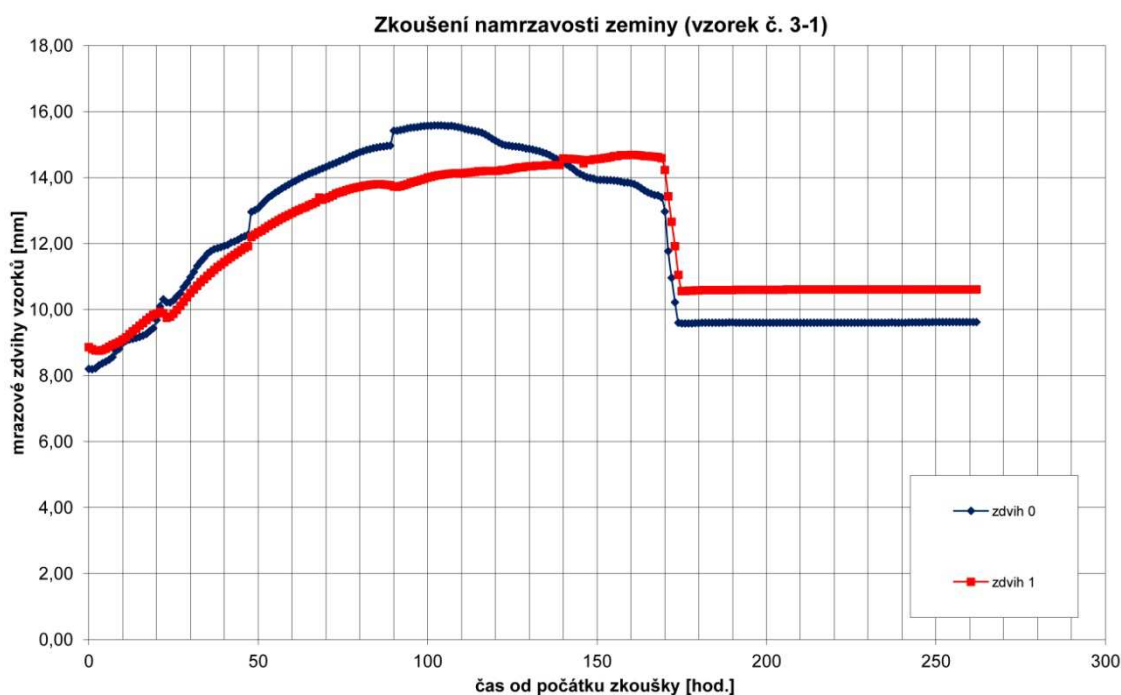


Graf 4-11 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 3-1 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)

Tab. 4-7 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3-1 dle metody A

	Zdvih 0	Zdvih 1
Počáteční hodnota [mm]	8,20	8,86
Konečná hodnota [mm]	13,4	14,59
Rozdíl [mm]	5,2	5,73
Součinitel β	0,36	0,24
Průměrná hodnota β	0,31	

Vzorek č. 3-1 byl dle metody A normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **namrzavý**.



Graf 4-12 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 3-1 v závislosti na čase (metoda B)

Tab. 4-8 - Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3-1 dle metody B

	Zdvih 0	Zdvih 1
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	8,20	8,86
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	12,97	14,23
Koncová hodnota zdvihu [mm]	9,62	10,61
Součinitel K_n	1,00	0,72
Průměrný součinitel K_n	0,86	

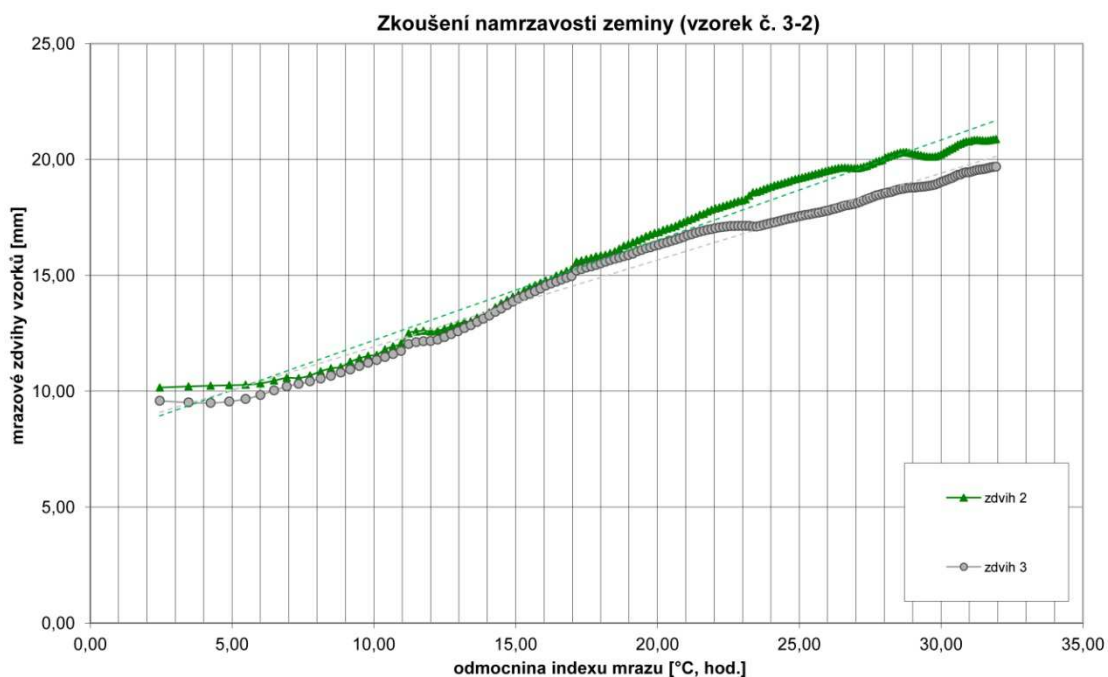
Vzorek č. 3-1 byl dle metody B normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **nenamrzavý**.

4.4.3.2 Vzorek č. 3-2

Zkušební tělesa vzorku č. 3-2 byla zmrazována při teplotě - 6 °C.



Obr. 4-11 – Vzorek č. 3-2 po zmrazování, pohled na rozbředlou zeminu v důsledku tání ledové čočky

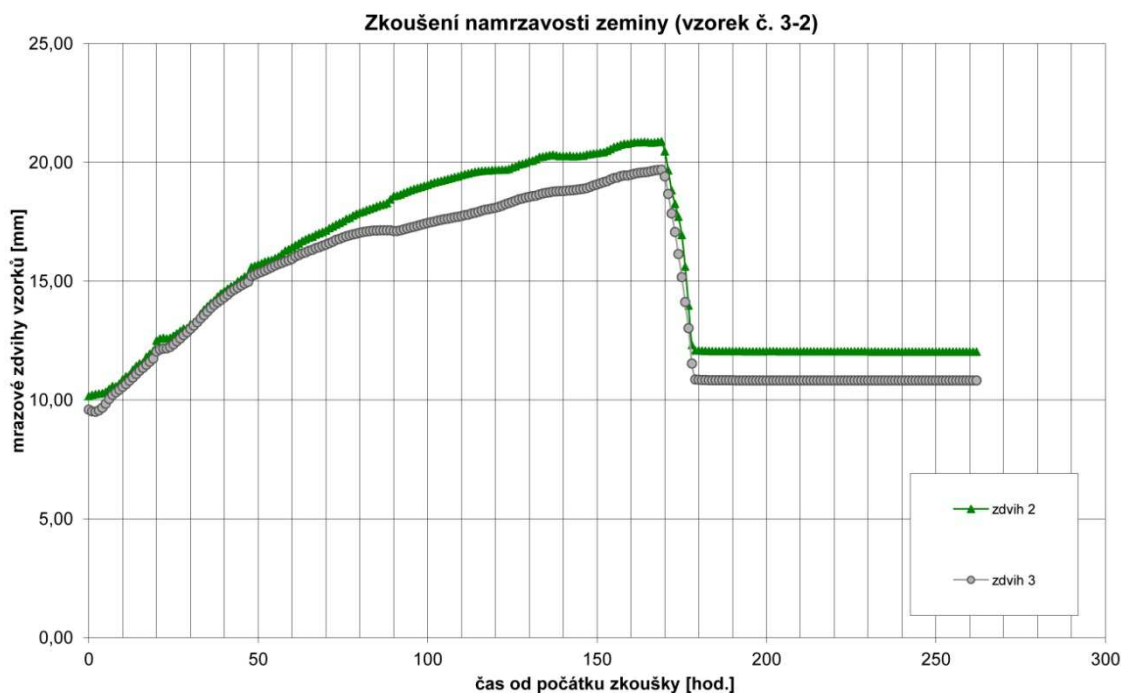


Graf 4-13 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 2-3 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)

Tab. 4-9 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3-2 dle metody A

	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	10,16	9,59
Konečná hodnota [mm]	20,88	19,69
Rozdíl [mm]	10,72	10,10
Součinitel β	0,41	0,35
Průměrná hodnota β	0,38	

Vzorek č. 3-2 byl dle metody A normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **namrzavý**.



Graf 4-14 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 3-2 v závislosti na čase (metoda B)

Tab. 4-10 - Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3-2 dle metody B

	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	10,16	9,59
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	20,46	19,41
Koncová hodnota zdvihu [mm]	12,03	10,82
Součinitel K_n	1,38	1,24
Průměrný součinitel K_n	1,31	

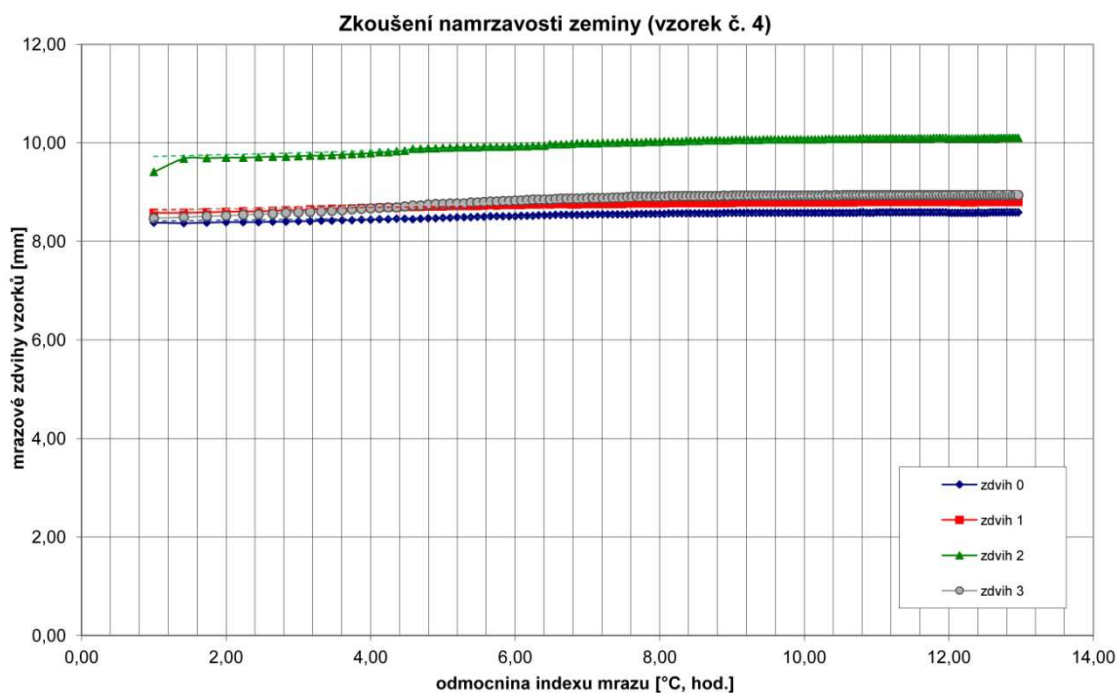
Vzorek č. 3-2 byl dle metody B normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **namrzavý**.

4.4.4 Vzorek č. 4

Ze zeminy F6Cl jsem zhuťnila zkušební tělesa výšky 120 mm, ta byla vystavena teplotě $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 4-12 – Vzorek č. 4 po vykonání zkoušky

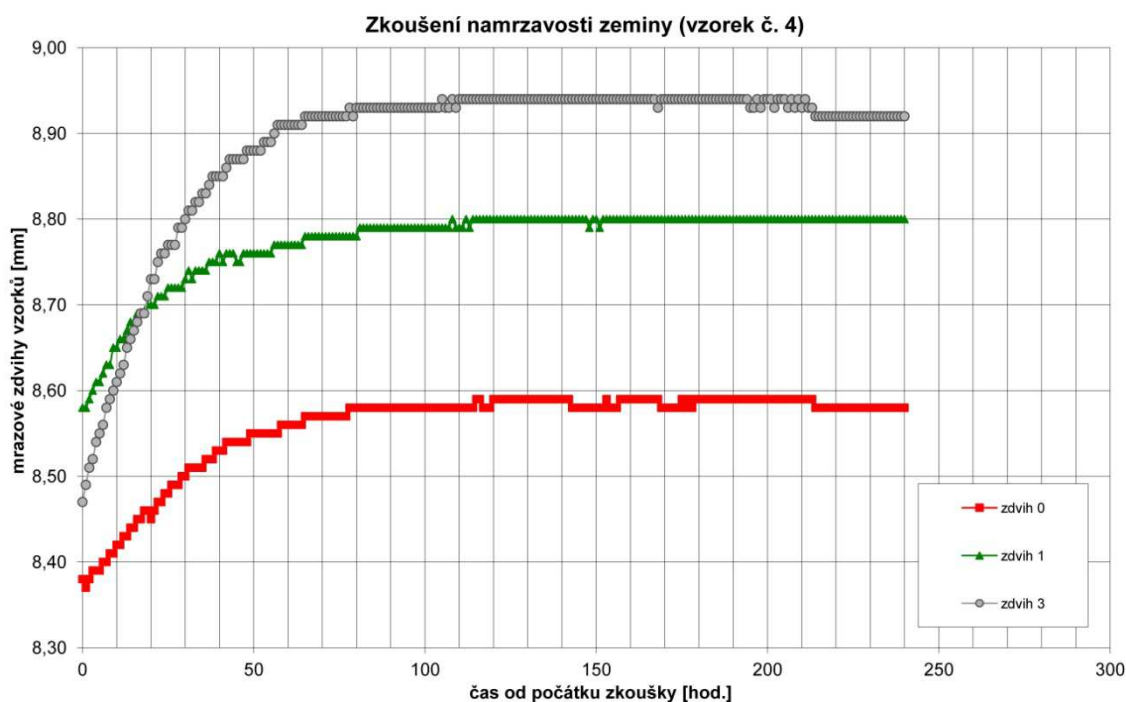


Graf 4-15 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 4 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)

Tab. 4-11 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 4 dle metody A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	8,38	8,58	9,41	8,47
Konečná hodnota [mm]	8,59	8,80	10,10	8,94
Rozdíl [mm]	0,21	0,22	0,69	0,47
Součinitel β	0,03	0,03	0,05	0,30
Průměrná hodnota β	0,10			

Vzorek č. 4 byl dle metody A normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **nenamrzavý**.



Graf 4-16 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 4 v závislosti na čase (metoda B)

Tab. 4-12 - Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 4 dle metody B

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 3
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	8,38	8,58	8,47
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	8,59	8,80	8,93
Koncová hodnota zdvihu [mm]	8,58	8,80	8,92
Součinitel K_n	0,01	0,02	0,02
Průměrný součinitel K_n	0,01		

Vzorek č. 4 byl dle metody B normy ČSN 72 1191 vyhodnocen jako **nenamrzavý**.

5 ZÁVĚR

V rámci teoretické části práce jsem shrnula poznatky o metodách zkoušení namrzavosti ve vybraných zemích Evropské Unie, které jsou zároveň i členy evropské komise pro normalizaci CEN TC 227, WG4. Konkrétně se jedná o Velkou Británii, Rakousko, Německo, Belgii, Dánsko, Finsko, Švédsko a Norsko. Podobné principy zkoušení namrzavosti jako v České republice používají i některé tyto země, jde zejména o Francii, Norsko a Německo (metoda B). Princip zkoušek v těchto státech je téměř shodný, sada těles je ze spodu saturována vodou o teplotě v rozmezí $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a svrchu je zmrazována při teplotě $(-4 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu minimálně 4 dnů.

Poněkud odlišný přístup zvolilo Rakousko a Německo (varianta A). Povrch zkušebního tělesa je ochlazován tak, aby uprostřed tělesa bylo docíleno izotermie $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota zmrazování tedy během zkoušky není konstantní, ale je regulována podle individuálních teplotních podmínek. Rakousko se vydalo poněkud odlišnou cestou i u nepřímé metody stanovení míry namrzavosti, hovořím o tzv. minerálním kritériu, podle kterého je míra namrzavosti určena podle procentuálního zastoupení aktivních a neaktivních minerálů v zemině.

Zvláštní zkušební zařízení pro zkoušení míry namrzavosti vyvinuli ve švédském institutu VTI. Zařízení se skládá z teleskopického válce o průměru 122,5 mm a výšce 580 mm. Důvodem vzniku tohoto zařízení je snaha o obdržení přesnějších poznatků o vlivu vody na velikost mrazového zdvihu. Počtem zkušebních těles a podmínkami zkoušky se liší i způsob zkoušení namrzavosti ve Velké Británii. Ke zkoušce je potřeba celkem 9 zkušebních těles, které jsou během zkoušky vystaveny teplotě vzduchu mezi $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aby byly hodnoty zkoušky platné, je navíc nutné splnění určitých podmínek stanovených normou. Poslední zemí, o jejíž metodě zkoušení namrzavosti bych se ráda zmínila, je Finsko. Metoda zkoušení používaná ve Finsku je totiž jedinečná v tom, že v sobě zahrnuje cyklické zmrazování a rozmrazování spolu s proměnným zatížením těles, což umožňuje zkoušený vzorek zeminy vyhodnotit nejen z hlediska mrazového zdvihu ale i konsolidace v době tání.

V praktické části práce jsem nejprve provedla klasifikační zkoušky sledované zeminy. Jedná se o jíl se střední plasticitou F6 CI, kde optimální vlhkost pro maximální zhutnění je 15 %. Hlavním cílem praktické části bylo sledování namrzavosti podle tří známých metod užívaných v České republice. Jak je vidět v tab. 5-1, nejstabilněji pro sledování

namrzavosti se jeví metoda A, tedy vyhodnocení pomocí součinitele namrzavosti β , kdy je zemina vyhodnocena jako zcela nenamrzavá pouze v případě vzorku č. 4. Naopak metoda B, a tedy vyčíslení součinitele namrzavosti K_n , se ukázala jako velmi nestabilní. Důvodem bude závislost součinitele K_n na hodnotě mrazových zdvihů, které v případě vzorku č. 3-1 a vzorku č. 4 nejsou nijak výrazné. Pro přesnější porovnání jednotlivých metod by však bylo potřeba provést mnohem více srovnávacích zkoušek.

Tab. 5-1 – Celkové vyhodnocení namrzavosti všech vzorků zeminy F6 CI dle různých metod určování namrzavosti

	Výška vzorku [mm]	Teplota ochlazování [°C]	Scheibleho kritérium	Součinitel namrzavosti β	Součinitel namrzavosti K_n
Vzorek č. 1	100	-4	Vysoce namrzavý	0,51	1,32
				Nebezpečně namrzavý	Namrzavý
Vzorek č. 2	120	-4		0,39	1,44
				Namrzavý	Namrzavý
Vzorek č. 3-1		-3		0,31	0,86
				Namrzavý	Nenamrzavý
Vzorek č. 3-2		-6		0,38	1,31
				Namrzavý	Namrzavý
Vzorek č. 4		-1		0,10	0,01
				Nenamrzavý	Nenamrzavý

Závěrem je možné konstatovat, že pro chystanou revizi normy ČSN 72 1191 je důležité, že používané zrnitostní kritérium je na bezpečné straně hodnocení namrzavosti.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LAY, D. Russel. *Developement of frost heave test apparatus*. Brigham, 2005. 87 s. Thesis. Brigham Young University, Department of Civil and Enviromental Engineering.
- [2] ČSN 72 1191. *Zkoušení míry namrzavosti zemin*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1989.
- [3] THOMAS, H. R. et. al. Modelling of cryogenic processes in permafrost and seasonally frozen soils. *Géotechnique* 59. [online]. 2009, s 173-184 [cit.11.1.2012]. ISSN: 0016-8505. Dostupné z: DOI: 10.1680/geot.2009.59.3.173
- [4] MAUDUIT, Caroline. *French frost heave test, from the procedure to its application in French pavement design*. CEN TC 227, WG4, TG 5: Frost susceptibility, 21.10.2008: Copenhagen, Denmark, 13 s.
- [5] DORÉ, Guy a ZUBECK, K. Hannele. *Cold regions pavement engineering*. [online]. 1. vyd. Reston: American society of civil engineers, 2009. [Cit. 11.1.2012]. ISBN 978-0-07-160088-0. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/55425919/Cold-Regions-Pavement-Engineering>
- [6] WAIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2007. 186 s. ISBN 978-80-7204-507-5.
- [7] *Transport Québec* [online]. Québec: Gouvernement du Québec, 2012. [Cit. 12.1.2012]. Dostupné z: <http://www.mtq.gouv.qc.ca>
- [8] *Volume I: National Standards – Highway Design Guide* [online]. Augusta, Maine: Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2004 [Cit. 16.1.2012]. Dostupné z: <http://www.maine.gov/mdot/technical-publications/hwydesignguide.php>
- [9] ČSN 73 6133. *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [10] ZAJÍČEK, Jan. *Zpráva o činnosti TC 227 / WG 4 za rok 2011* [online]. CEN TC 227, WG4, TG 5: Frost susceptibility, 24.5.2011: Duisburg, Německo, 4 s.
Dostupné z: <http://www.pragoprojekt.cz/normy-banner>
- [11] BLUME, Ursula. *Assessment of the frost susceptibility and frost resistance of soils, aggregates and unbound mixtures according the German guidelines for streetbuilding*. CEN TC 227, WG4, TG 5: Frost susceptibility, 6 s.
- [12] PFEILER, Andreas. *Austrian Test Method „Frostheave-Test“*. CEN TC 227, WG4, TG 5: Frost susceptibility, 16.5.2008, 3 s.
- [13] KUGLER, Hannes et. al. *Přednormativní výzkum nenamrzavosti nestmelených podkladních vrstev; modifikované minerální kritérium*. 2004, 13 s.
- [14] ONNINEN, Heikki. *Method description TPPT-R07: Frost heave test; Thaw compression test*. CEN TC227, WG4, TG5: Frost susceptibility, 22.12.2008: Kodaň, Dánsko, 10 s.
- [15] *Document circulated by Finland*. CEN TC 227, WG4, TG 5: Frost susceptibility, 22.12.2008: Kodaň, Dánsko, 6 s.
- [16] HERMANSSON, Åke. *Frost Modelling and Pavement Temperatures*. 2001. 53 s. Thesis. Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) a Luleå University of Technology.
- [17] UTHUS, Lillian. *Deformation Properties of Unbound Granular Aggregates*. Trondheim, 2007. 182 s. Thesis. Norwegian University of Science and technology, Faculty of Civil and Transposrt Engineering.
- [18] *Questionnaire responses – Frost heave test parameters*. CEN TC227, WG4, TG5: Frost susceptibility, 9.5.2009, 7 s.
- [19] BS 812-124:2009. *Method for determination of frost heave*. BSI, 2009.
- [20] SAARELAINEN, Seppo. *Field and laboratory methods for detemining deformation properties in thawing soils*. Rotterdam, 1997, s 53-62. ISBN 90-541-0872-X.

- [21] 1. Draft: Frost heave tests used in Europe and some selected test procedures from US. CEN TC227, WG4, TG5: Frost susceptibility, 21.10.2008: Kodaň, Dánsko, 3 s.
- [22] Notes of initial discussion during the TG2 meeting in Copenhagen. CEN TC 227, WG4, TG5: Frost susceptibility, 22.10.2008: Kodaň, Dánsko, 3 s.
- [23] Pavement interactive [online]. Washington: Pavia system, 2012. [Cit. 10.4.2012]. Dostupné z: <http://www.pavementinteractive.org/article/Frost-action/>
- [24] VELÍŠEK, Jan. *Odolnost zemin a materiálů proti vodě v podloží vozovek pozemních komunikací*. Diplomová práce. Brno, 2010. 70 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací.
- [25] ČSN EN 13286-2. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [26] ČSN 72 1002. *Klasifikace zemin pro dopravní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [27] ČSN EN ISO/TS 17892-4. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zeminosti*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [28] ČSN EN ISO/TS 17892-12. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení konzistenčních mezí*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [29] ČSN 73 6114. *Vozovky pozemních komunikací – Základní ustanovení pro navrhování*. Praha: Český normalizační institut, 1994.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

atd.	a tak dále
cca	přibližně
CEN	Evropská komise pro normalizaci
č.	číslo
ČSN	česká technická norma
DIN	německá národní technická norma
EN	evropská norma
FAST	Fakulta stavební
G-F	šterk s příměsí jemnozrnné zeminy
GP	šterk špatně zrněný
GW	šterk dobře zrněný
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci
např.	například
NF P	francouzská technická norma
obr.	obrázek
ÖNORM	rakouská národní technická norma
S-F	písek s příměsí jemnozrnné zeminy
SP	písek špatně zrněný
SW	písek dobře zrněný
tab.	tabulka
TC	Technická komise
tzv.	tak zvané
viz	lze vidět
WG	pracovní skupina

SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1	<i>Stanovení míry namrzavosti dle součinitele β (zdroj [2])</i>	24
Tab. 3-2	<i>Zjednodušená klasifikace zemin podle namrzavosti (zdroj [11], upraveno).....</i>	28
Tab. 3-3	<i>Mezní hodnoty minerálního kritéria podle normy ÖNORM B 481 (zdroj [13])</i>	32
Tab. 4-1	<i>Konzistenční meze zkoumaného vzorku zeminy.....</i>	46
Tab. 4-2	<i>Klasifikace zeminy dle ČSN 73 6133</i>	47
Tab. 4-3	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 1 dle metody A</i>	52
Tab. 4-4	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 1 dle metody B</i>	52
Tab. 4-5	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 2 dle metody A</i>	54
Tab. 4-6	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 2 dle metody B</i>	54
Tab. 4-7	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3-1 dle metody A</i>	56
Tab. 4-8	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3-1 dle metody B</i>	57
Tab. 4-9	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3-2 dle metody A</i>	59
Tab. 4-10	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3-2 dle metody B</i>	59
Tab. 4-11	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 4 dle metody A</i>	61
Tab. 4-12	<i>Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 4 dle metody B</i>	61
Tab. 5-1	<i>Celkové vyhodnocení namrzavosti všech vzorků zeminy F6 CI dle různých metod určování namrzavosti</i>	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1	<i>Formace ledových čoček ve zkušebním tělese (zdroj [1])</i>	14
Obr. 3-2	<i>Schéma tvorby ledových čoček (zdroj [1], upraveno)</i>	15
Obr. 3-3	<i>Schéma: a) počáteční fáze tání; (b) pozdní fáze tání (zdroj [5], upraveno)</i>	16
Obr. 3-4	<i>Poruchy na vozovce způsobené táním (zdroj [23], upraveno)</i>	17
Obr. 3-5	<i>Princip vzniku mrazového zdvihu (zdroj [7], upraveno)</i>	18
Obr. 3-6	<i>Deformace vozovky v období tání (zdroj [7], upraveno)</i>	19
Obr. 3-7	<i>Chladicí skříň (zdroj [2])</i>	22
Obr. 3-8	<i>Zkušební buňka (zdroj [2], upraveno)</i>	23
Obr. 3-9	<i>Měřicí zařízení užívané ve Francii (zdroj [4], upraveno)</i>	27
Obr. 3-10	<i>Měřicí zařízení, prstence formy a děrovaná spodní deska užívané v Německu (zdroj [11], upraveno)</i>	29
Obr. 3-11	<i>Měřicí zařízení užívané ve Finsku (zdroj [14], upraveno)</i>	34
Obr. 3-12	<i>Zkušební zařízení užívané ve Švédsku: a) teleskopický válec; b) sací část válce vyplněná vzorkem zeminy; c) nasazení víka; d) průběh zkoušky (zdroj [16], upraveno)</i>	37
Obr. 3-13	<i>Uložení zkušebních těles během zkoušky (zdroj [19], upraveno)</i>	40
Obr. 4-1	<i>Zkoumaný vzorek zeminy</i>	41
Obr. 4-2	<i>Zůstatek na sítích dle pořadí zleva: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8</i>	42
Obr. 4-3	<i>Penetrometr 80 g/30° pro určení meze tekutosti</i>	44
Obr. 4-4	<i>Vzorky zeminy ve váženkách připravené pro stanovení vlhkosti</i>	46
Obr. 4-5	<i>Přístroj Proctor standard užitý pro hutnění těles</i>	48
Obr. 4-6	<i>Uložení těles v chladícím zařízení</i>	50
Obr. 4-7	<i>Vzorek č. 1: a) pohled na vzniklou ledovou čočku; b) zdvih vzorku po ukončení zkoušky</i>	51
Obr. 4-8	<i>Vzorek č. 2: a) před zkouškou; b) po zkoušce</i>	53
Obr. 4-9	<i>Odlišný mrazový zdvih vzorku č. 3</i>	55
Obr. 4-10	<i>Saturace zkušebních vzorků před zahájením zkoušky</i>	56
Obr. 4-11	<i>Vzorek č. 3-2 po zmrazování, pohled na rozbředlou zeminu v důsledku tání ledové čočky</i>	58
Obr. 4-12	<i>Vorek č. 4 po vykonání zkoušky</i>	60

SEZNAM GRAFŮ

Graf 3-1	Schéma zobrazující promrzání zeminy s tvorbou ledu: (a) teplota, (b) pórový tlak, (c) kryogenní sání, (d) rychlost vodního toku, (e) posuny (zdroj [3], upraveno)	13
Graf 3-2	Scheibleho kritérium namrzavosti (zdroj [9])	21
Graf 3-3	Třídy namrzavosti ve Francii (zdroj [4], upraveno)	28
Graf 3-4	Grafické znázornění teplot a zdvihů v průběhu zkoušky namrzavosti ve Francii (zdroj [11], upraveno)	31
Graf 3-5	Třístupňový model pro posouzení namrzavosti dle ÖNORM B 4810 (zdroj [13])	31
Graf 3-6	Grafické vyhodnocení finské zkoušky zmrazování (zdroj [14], upraveno).....	36
Graf 3-7	Grafické vyhodnocení finské zkoušky rozmrazování (zdroj [14], upraveno).....	36
Graf 4-1	Křivka zrnitosti zkoušené zeminy.....	43
Graf 4-2	Trojúhelníkový diagram pro částice do 60 mm.....	44
Graf 4-3	Stanovení meze tekutosti w_L	45
Graf 4-4	Diagram plasticity pro částice < 0,50 mm (zdroj [6], upraveno).....	47
Graf 4-5	Vyhodnocení Proctorové zkoušky.....	49
Graf 4-6	Scheibleho kritérium namrzavosti s křivkou zrnitosti zkoušené zeminy	49
Graf 4-7	Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)	51
Graf 4-8	Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1 v závislosti na čase (metoda B).....	52
Graf 4-9	Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 2 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)	53
Graf 4-10	Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 2 v závislosti na čase (metoda B).....	54
Graf 4-11	Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 3-1 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)	56
Graf 4-12	Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 3-1 v závislosti na čase (metoda B)	57
Graf 4-13	Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 3-2 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)	58

Graf 4-14	<i>Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 3-2 v závislosti na čase metoda B)</i>	59
Graf 4-15	<i>Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 4 v závislosti na odmocnině indexu mrazu (metoda A)</i>	60
Graf 4-16	<i>Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 4 v závislosti na čase (metoda B)</i>	61

A PŘÍLOHY – PROTOKOLY ZKOUŠEK

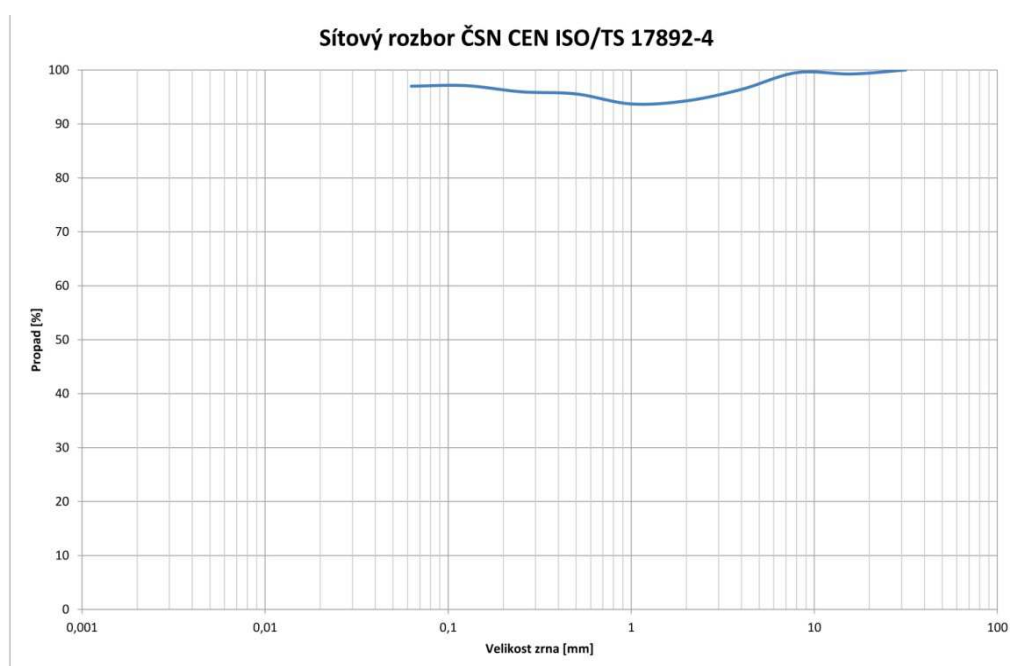
Seznam protokolů zkoušek:

<i>Stanovení zrnitosti zeminy</i>	<i>70</i>
<i>Stanovení konzistenčních mezí</i>	<i>71</i>
<i>Stanovení optimální vlhkosti</i>	<i>72</i>
<i>Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 1.....</i>	<i>73</i>
<i>Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 2.....</i>	<i>75</i>
<i>Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 3-1.....</i>	<i>77</i>
<i>Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 3-2.....</i>	<i>79</i>
<i>Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 4.....</i>	<i>81</i>

Stanovení zrnitosti zeminy

Provedla: Lenka Juchelková
Datum: 21.11.2011
Místo: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek: F6 CI (Areál stavební fakulty na Žižkově v Brně)
Navážka: 1257,1 g

Velikost ok	Zůstalo na síti		Propad sítem
[mm]	[g]	z [%]	[%]
31,5	0	0	100
16	9,2	0,73	99,27
8	6,1	0,49	99,51
4	45,1	3,59	96,41
2	71,8	5,71	94,29
1	78,9	6,28	93,72
0,5	55,7	4,43	95,57
0,25	50,6	4,03	95,97
0,125	36,3	2,89	97,11
0,063	37,6	2,99	97,01
< 0,063	923,6	73,47	



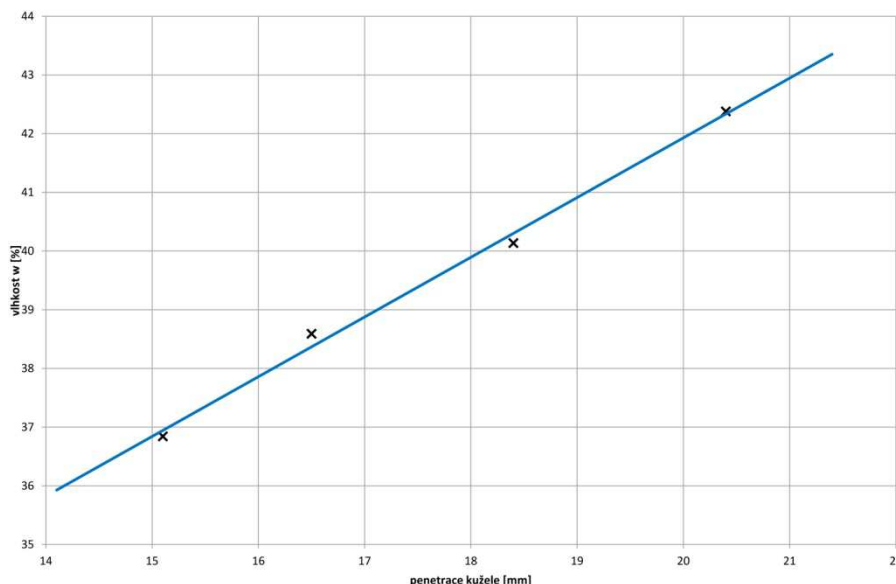
Obsah jemných částic $f = 97 \%$
 Obsah písčité složky $s = 1 \%$
 Obsah štěrkovité složky $g = 2 \%$

Stanovení konzistenčních mezí

Provedla: Lenka Juchelková
Datum: 28.11.2011
Místo: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek: F6 CI (Areál stavební fakulty na Žižkově v Brně)

Stanovení meze tekutosti

	Mez tekutosti w_L			
	1	2	3	4
vlhká zemina s váženkou [g]	54,8	59,9	58,4	71,1
sušina s váženkou [g]	43,4	48,1	46,9	56,4
váženka [g]	16,5	18,7	17,1	16,5
voda [g]	11,4	11,8	11,5	14,7
vlhkost [%]	42,4	40,1	38,6	36,8
penetrace [mm]	20,4	18,4	16,5	15,1



$w_L = 42 \%$

Stanovení meze plasticity

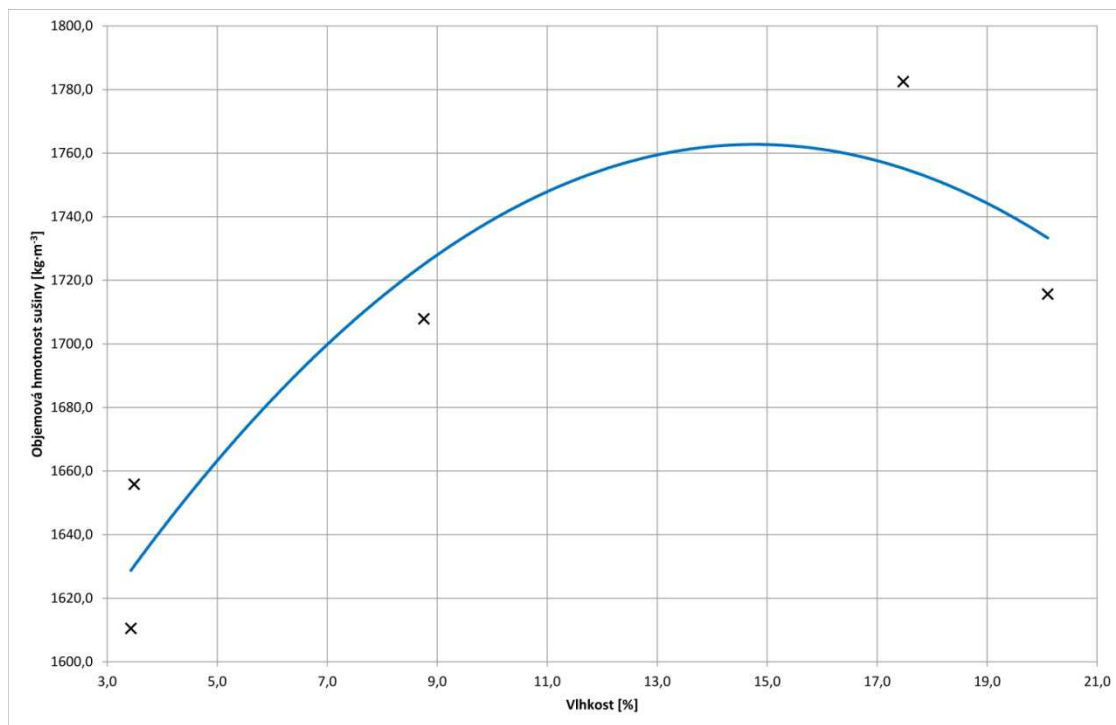
	Mez plasticity w_P			
	1	2	3	4
vlhká zemina s váženkou [g]	38,9	42,9	43,8	47,9
sušina s váženkou [g]	38,5	42,1	42,6	47,2
váženka [g]	36,2	37,6	35,8	43,2
voda [g]	0,4	0,8	1,2	0,7
vlhkost [%]	17,4	17,8	17,6	17,5
Σ [%]	17,6			

$w_P = 17,6 \%$

Stanovení optimální vlhkosti

Provedla: Lenka Juchelková
Datum: 6.12.2011
Místo: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek: F6 CI (Areál stavební fakulty na Žižkově v Brně)
Hmotnost Proctorova válce: 2196 g
Objem Proctorova válce: 942,5 cm³

Vzorek	Hmotnost válce a zeminy [g]	Hmotnost zeminy [g]	Hmotnost váženky [g]	Hmotnost vlhké zeminy s váženkou [g]	Hmotnost suché zeminy s váženkou [g]	Průměrná vlhkost [%]	Objemová hmotnost sušiny [kg·m ⁻³]
1	3503,6	1307,6	29,9	132,4	129,0	3,4	1610,5
2	3541,2	1345,2	29,4	130,2	126,8	3,5	1655,8
3	3654,1	1458,1	29,4	121,3	113,9	8,8	1707,9
4	3839,8	1643,8	28,4	132,6	117,1	17,5	1782,5
5	3813,5	1617,5	30,2	125,8	109,8	20,1	1715,7



$W_{\text{opt}} = 15 \%$

$\rho_{\text{dmax}} = 1764 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

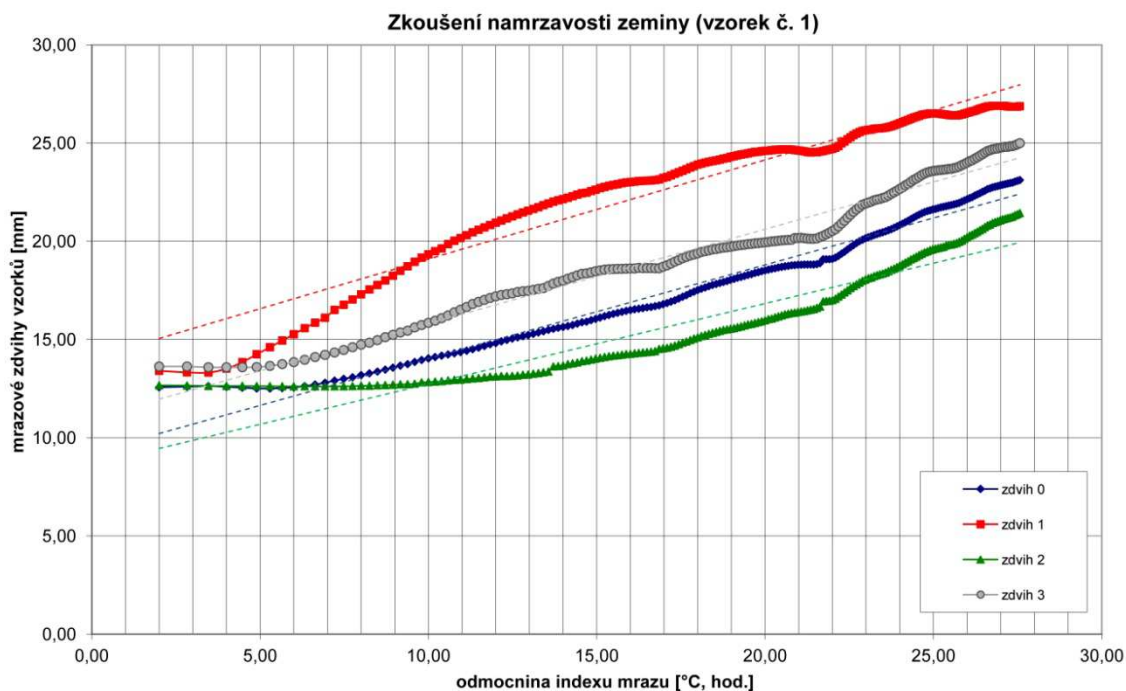
Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 1

Provedla: Lenka Juchelková
Místo: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek: F6 CI (Areál stavební fakulty na Žižkově v Brně)
Výška zkušebních těles: 100 mm
Počet zkušebních těles: 4
Doba saturace vzorku: 18 hodin
Datum zahájení zkoušky: 29.2.2012
Datum ukončení zkoušky: 11.3.2012
Doba ochlazování vzorků: 190 hodin
Doba rozmrzání vzorků: 72 hodin
Teplota chlazení: - 4 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	12,57	13,41	12,67	13,63
Konečná hodnota [mm]	23,12	26,88	21,44	25
Rozdíl [mm]	10,55	13,47	8,77	11,37
Součinitel β	0,51	0,49	0,49	0,53
Průměrná hodnota β	0,51			

Použitý vztah:
$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta \sqrt{I_m}}$$

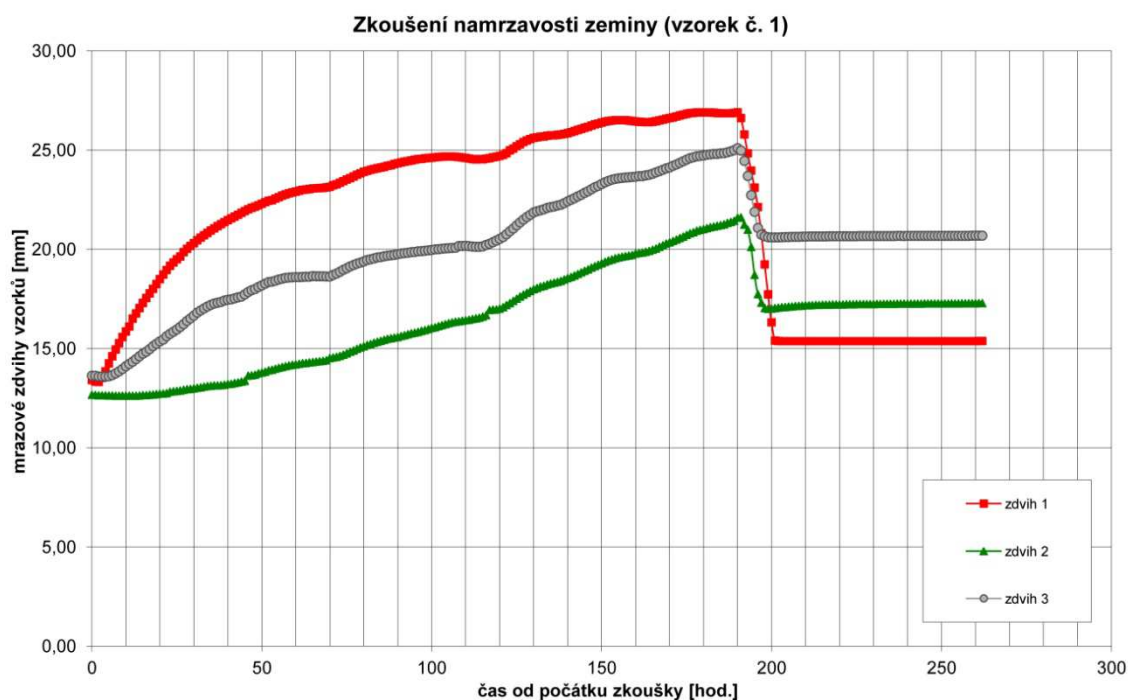


$\beta = 0,51 > 0,50 \rightarrow$ vzorek č. 1 je **nebezpečně namrzavý**

Metoda B

	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	13,41	12,67	13,63
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	26,91	21,59	25,10
Koncová hodnota zdvihu [mm]	15,38	17,29	20,69
Součinitel Kn	1,57	1,41	0,97
Průměrný součinitel Kn	1,32		

Použitý vztah: $Kn = \frac{\Delta h'}{h} \cdot 100$



Kn = 1,32 > 1 → vzorek č. 1 je namrzavý

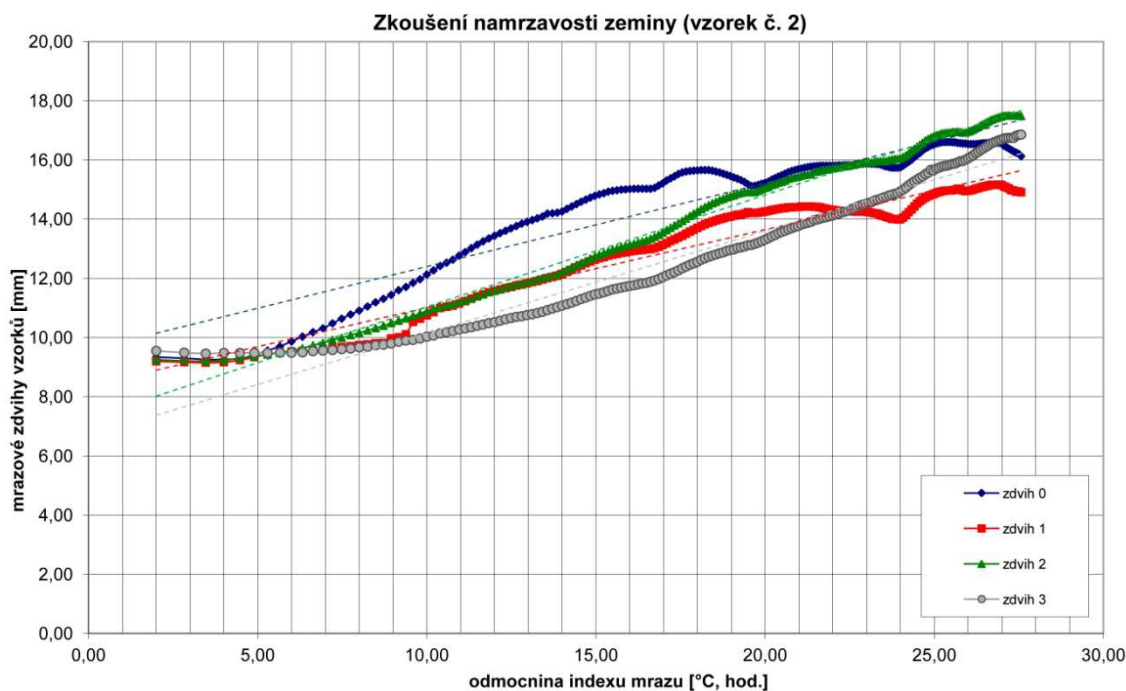
Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 2

Provedla: Lenka Juchelková
Místo: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek: F6 CI (Areál stavební fakulty na Žižkově v Brně)
Výška zkušebních těles: 120 mm
Počet zkušebních těles: 4
Doba saturace vzorku: 18 hodin
Datum zahájení zkoušky: 13.3.2012
Datum ukončení zkoušky: 24.3.2012
Doba ochlazování vzorků: 190 hodin
Doba rozmrzání vzorků: 72 hodin
Teplota chlazení: - 4 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	9,34	9,20	9,25	9,55
Konečná hodnota [mm]	16,13	14,91	17,49	16,86
Rozdíl [mm]	6,79	5,71	8,24	7,31
Součinitel β	0,36	0,46	0,37	0,38
Průměrná hodnota β	0,39			

Použitý vztah:
$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta \sqrt{I_m}}$$



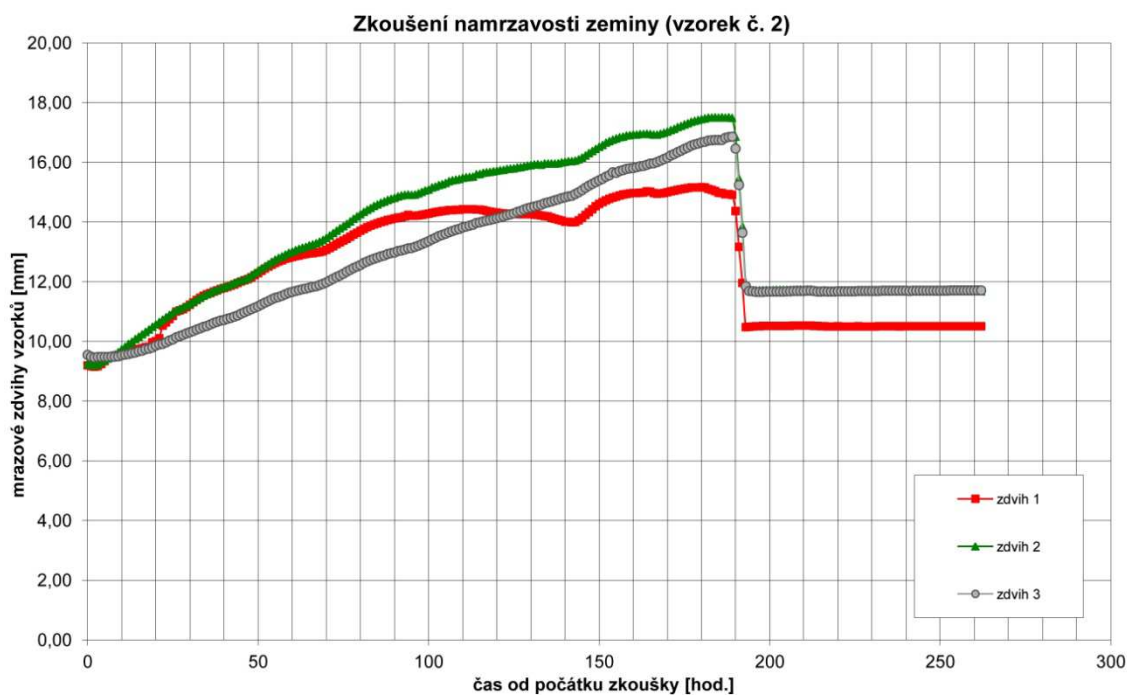
$0,25 > \beta = 0,39 < 0,50 \rightarrow$ vzorek č. 2 je mírně namrzavý až namrzavý

Metoda B

	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	9,20	9,25	9,55
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	14,37	16,86	16,46
Koncová hodnota zdvihu [mm]	10,51	11,68	11,71
Součinitel Kn	1,23	1,60	1,49
Výsledný součinitel Kn	1,44		

Použitý vztah:

$$Kn = \frac{\Delta h'}{h} \cdot 100$$



Kn = 1,44 > 1 → vzorek č. 2 je namrzavý

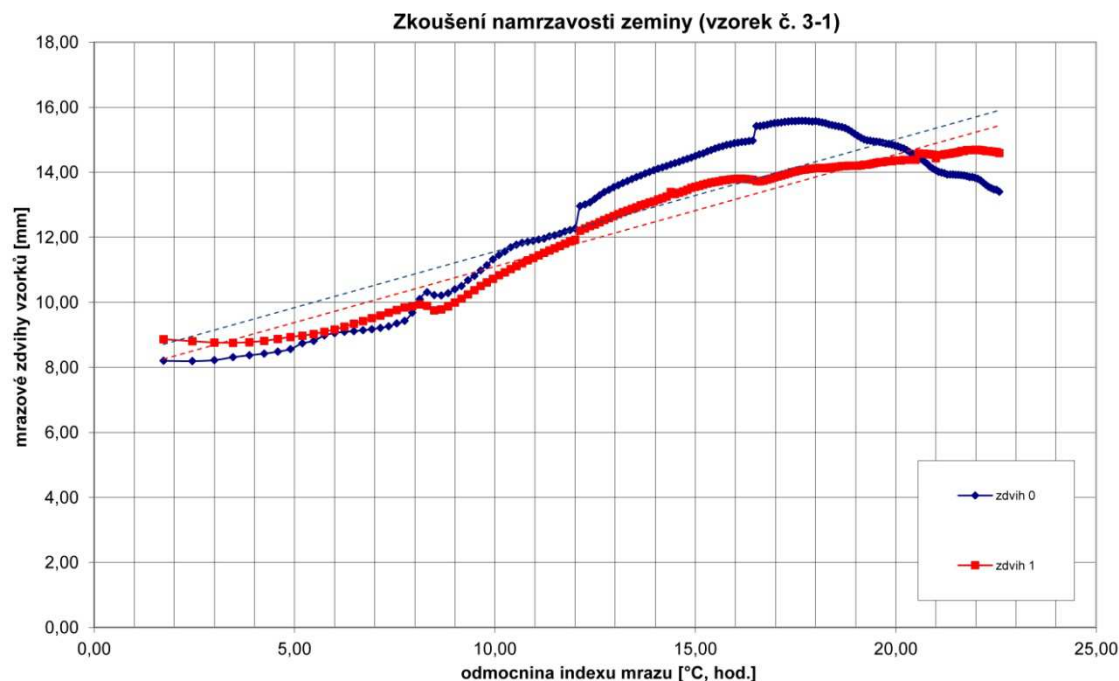
Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 3-1

Provedla:	Lenka Juchelková
Místo:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CI (Areál stavební fakulty na Žižkově v Brně)
Výška zkušebních těles:	120 mm
Počet zkušebních těles:	2
Doba saturace vzorku:	18 hodin
Datum zahájení zkoušky:	30.3.2012
Datum ukončení zkoušky:	10.4.2012
Doba ochlazování vzorků:	190 hodin
Doba rozmrzání vzorků:	72 hodin
Teplota chlazení:	- 3 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1
Počáteční hodnota [mm]	8,20	8,86
Konečná hodnota [mm]	13,4	14,59
Rozdíl [mm]	5,2	5,73
Součinitel β	0,36	0,24
Průměrná hodnota β	0,31	

Použitý vztah:
$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta \sqrt{I_m}}$$



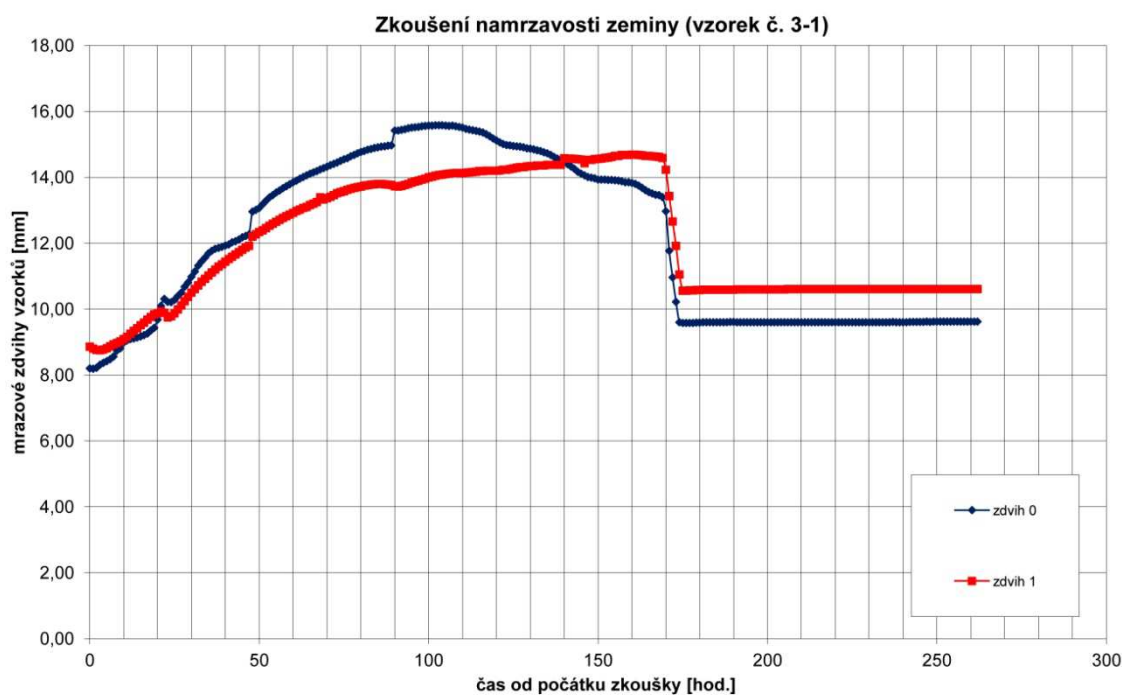
$0,25 > \beta = 0,31 < 0,50 \rightarrow$ vzorek č. 3-1 je **mírně namrzavý až namrzavý**

Metoda B

	Zdvih 0	Zdvih 1
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	8,20	8,86
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	12,97	14,23
Koncová hodnota zdvihu [mm]	9,62	10,61
Součinitel Kn	1,00	0,72
Průměrný součinitel Kn	0,86	

Použitý vztah:

$$Kn = \frac{\Delta h'}{h} \cdot 100$$



Kn = 0,86 < 1 → vzorek č. 3-1 je nenamrzavý

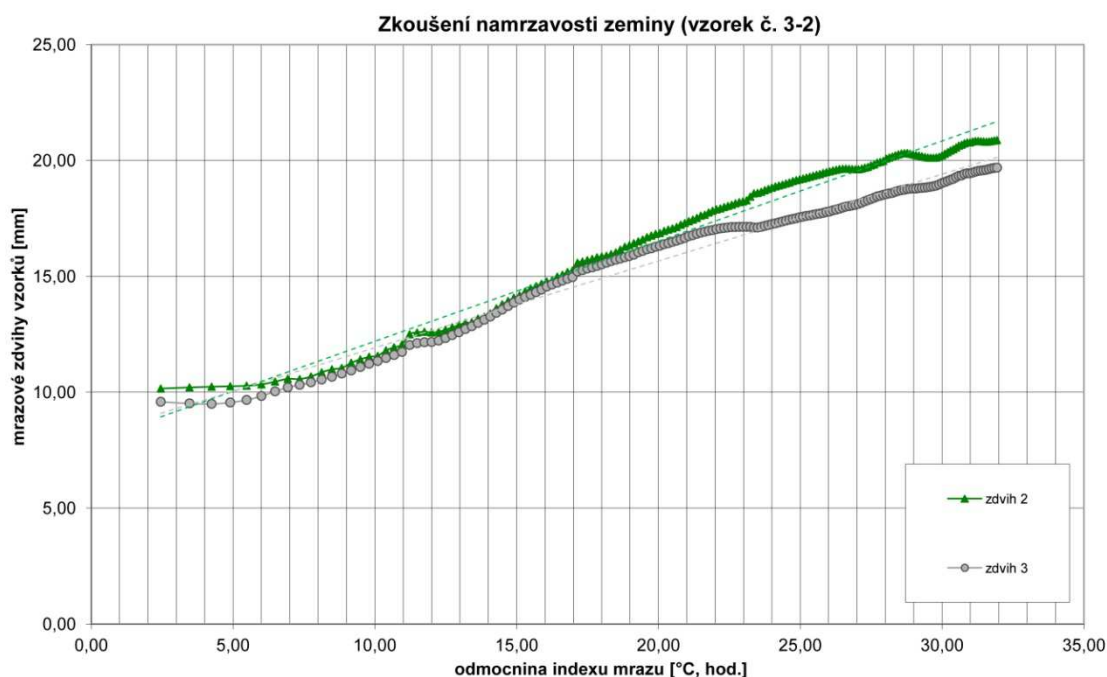
Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 3-2

Provedla: Lenka Juchelková
Místo: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek: F6 CI (Areál stavební fakulty na Žižkově v Brně)
Výška zkušebních těles: 120 mm
Počet zkušebních těles: 2
Doba saturace vzorku: 18 hodin
Datum zahájení zkoušky: 30.3.2012
Datum ukončení zkoušky: 10.4.2012
Doba ochlazování vzorků: 190 hodin
Doba rozmrzání vzorků: 72 hodin
Teplota chlazení: - 6 °C

Metoda A

	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	10,16	9,59
Konečná hodnota [mm]	20,88	19,69
Rozdíl [mm]	10,72	10,10
Součinitel β	0,41	0,35
Průměrná hodnota β	0,38	

Použitý vztah:
$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta \sqrt{Im}}$$



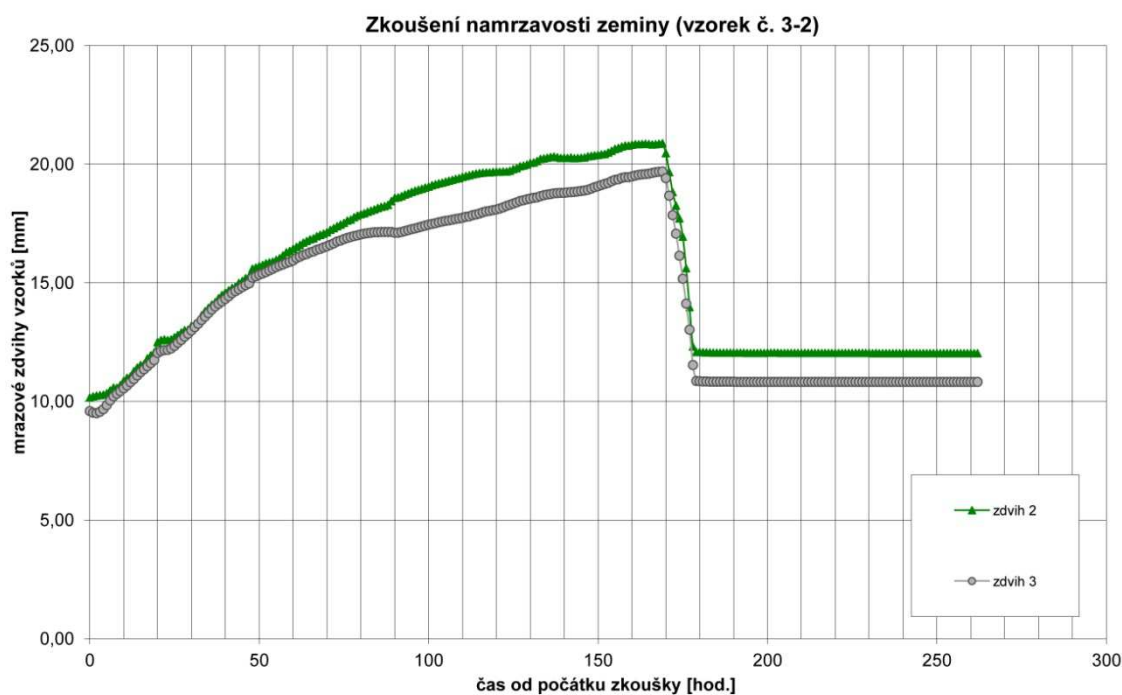
$0,25 > \beta = 0,38 < 0,50 \rightarrow$ vzorek č. 3-2 je **mírně namrzavý až namrzavý**

Metoda B

	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	10,16	9,59
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	20,46	19,41
Koncová hodnota zdvihu [mm]	12,03	10,82
Součinitel Kn	1,38	1,24
Průměrný součinitel Kn	1,31	

Použitý vztah:

$$Kn = \frac{\Delta h'}{h} \cdot 100$$



Kn = 1,31 > 1 → vzorek č. 3-2 je namrzavý

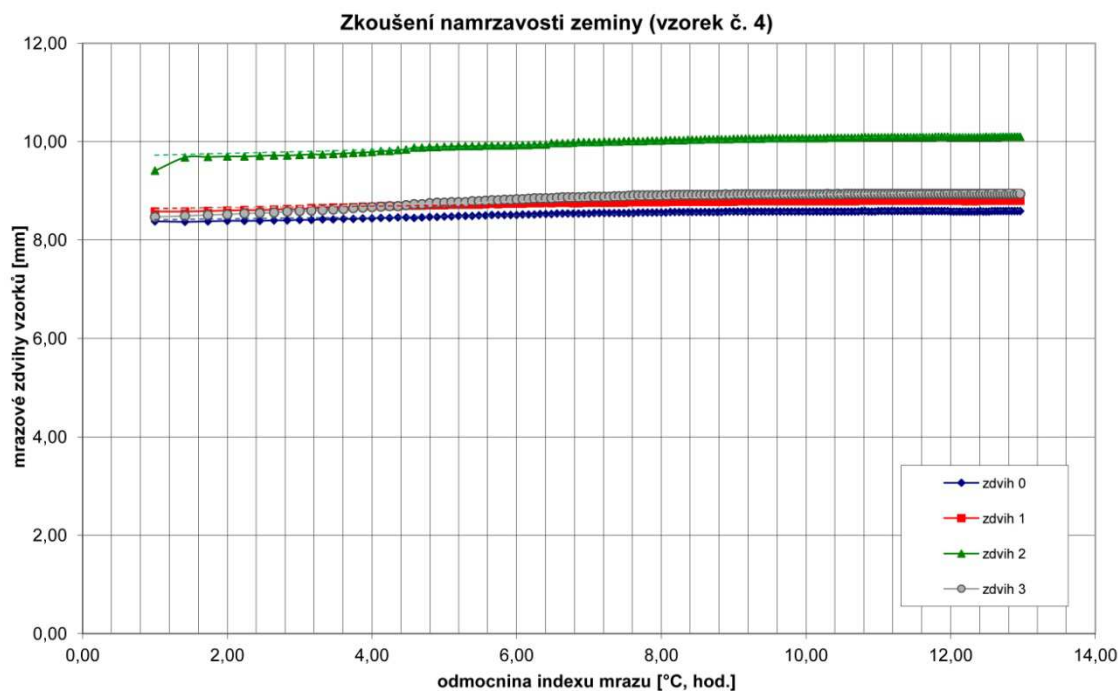
Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 4

Provedla: Lenka Juchelková
Místo: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek: F6 CI (Areál stavební fakulty na Žižkově v Brně)
Výška zkušebních těles: 120 mm
Počet zkušebních těles: 4
Doba saturace vzorku: 18 hodin
Datum zahájení zkoušky: 12.4.2012
Datum ukončení zkoušky: 23.4.2012
Doba ochlazování vzorků: 190 hodin
Doba rozmrzání vzorků: 72 hodin
Teplota chlazení: - 1 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	8,38	8,58	9,41	8,47
Konečná hodnota [mm]	8,59	8,80	10,10	8,94
Rozdíl [mm]	0,21	0,22	0,69	0,47
Součinitel β	0,03	0,03	0,05	0,30
Průměrná hodnota β	0,10			

Použitý vztah:
$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta \sqrt{I_m}}$$



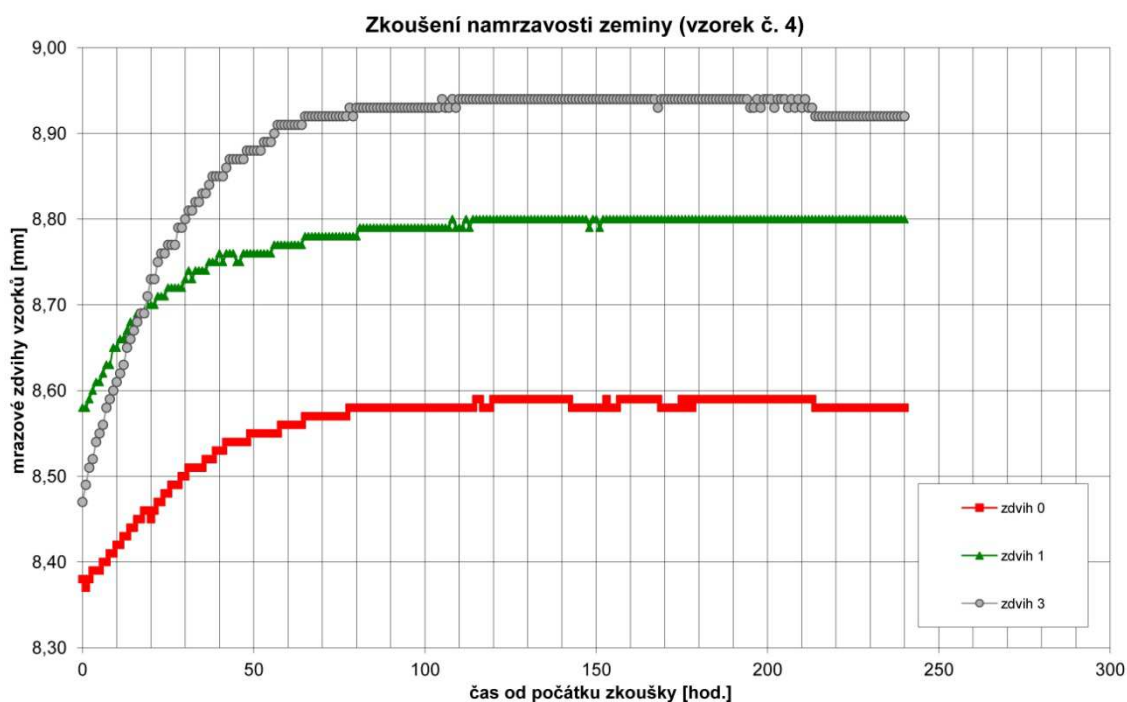
$\beta = 0,10 < 0,25 \rightarrow$ vzorek č. 4 je nenamrzavý

Metoda B

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 3
Počáteční hodnota zdvihu při zmrazování [mm]	8,38	8,58	8,47
Počáteční hodnota zdvihu při rozmrazování [mm]	8,59	8,80	8,93
Koncová hodnota zdvihu [mm]	8,58	8,80	8,92
Součinitel Kn	0,01	0,02	0,02
Průměrný součinitel Kn	0,01		

Použitý vztah:

$$Kn = \frac{\Delta h'}{h} \cdot 100$$



Kn = 0,01 < 1 → vzorek č. 4 je nenamrzavý