

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

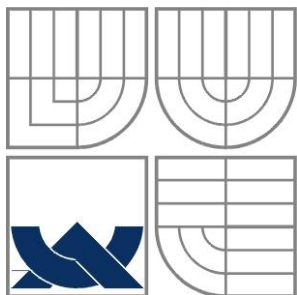
NAMRZAVOST ZEMIN A MATERIÁLŮ V PODLOŽÍ VOZOVEK

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB MAŠEK

BRNO 2012



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 PODLOŽÍ VOZOVEK

THE FROST SUSCEPTIBILITY OF THE SOILS AND MATERIALS TO SUBGRADE OF THE
PAVEMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB MAŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2012



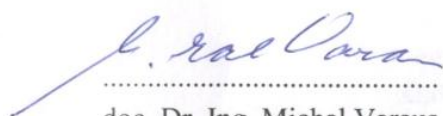
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. Jakub Mašek
Název Namrzavost zemin a materiálů v podloží vozovek
Vedoucí diplomové práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce 30. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce 11. 1. 2013

V Brně dne 30. 3. 2012


.....
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu




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

Podklady a literatura

materiály z CEN TC 227/ WG4 Unbound and hydraulically bound mixtures TG5 - Frost susceptibility

ČSN 72 1191 Zkoušení namrzavosti zemin (1988)

ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací

ČSN EN 13 286-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metody pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání

ČSN EN 13286-7 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 7: Zkouška nestmelených směsí cyklickým zatěžováním v triaxiálním přístroji

diplomové a bakalářské práce na dané téma z období 2000-2010

výzkumné zprávy a studie týkající se téma zadání práce

internet

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Sledování stanovení namrzavosti zemin a materiálů v podloží vozovek pozemních komunikací ve vztahu s posouzením dlouhodobě sledovaného parametru indexu mrazu na celém území CR. Nastavení návrhových parametrů namrzavosti pro typické zeminy a materiály v podloží vozovek použitelné při navrhování vozovek pozemních komunikací. Uvedení několika příkladů srovnání návrhů vozovek s využitím zkoušeného materiálu.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



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

Abstrakt

Tato předložená diplomová práce se zabývá problematikou stanovení míry namrzavosti zemin v podloží pozemních komunikací. V teoretické části jsou porovnány způsoby zkoušení namrzavosti v České republice a ve vybraných zemích Evropské unie a dále je zde popsán vývoj indexu mrazu v České republice. Praktická část je zaměřena na laboratorní zkoušení namrzavosti zadaného vzorku zeminy přímou metodou mrazových zdvihů. Dále se pak zabývá simulací pronikání mrazu podložím a možností zkrácení doby zmrazování při přímém zkoušení namrzavosti.

Abstract

This diploma thesis deals with the issue of the determination of the frost susceptibility of soils in the subgrades of road structures. The theoretical part compares the ways of testing the frost susceptibility in the Czech Republic and other selected countries of the European Union. Furthermore, it also deals with the development of the frost susceptibility index in the Czech Republic. The empirical part focuses on the laboratory testing of the frost susceptibility of the given sample of soil by the direct frost heave method. Moreover, it also deals with the simulation of penetration of frost by the subgrade and the possibility of shortening the length of the freezing during the direct testing the frost susceptibility.

Klíčová slova

Mrazový zdvih, míra namrzavosti, Scheibleho kritérium, podloží, přímá zkouška namrzavosti, index mrazu, mrazuvzdornost, mez tekutosti, mez plasticity, Proctorova zkouška, optimální vlhkost, ledové čočky, vodní režim, mapa indexu mrazu, jemnozrnná zemina, zkušební těleso.

Keywords

Frost heave, frost susceptibility, Scheible criterion, subgrade, frost heave test, frost index, frost resistance, liquid limit, plasticity limit, Proctor test, optimal water content, ice lenses, water regime, map of frost index, fine-grained soil, specimen.

Bibliografická citace VŠKP

MAŠEK, Jakub. *Namrzavost zemin a materiálů v podloží vozovek*. Brno, 2012. 80 s., 97 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Dušanem Stehlíkem Phd. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne

.....

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Dušanu Stehlíkovi, Phd. za cenné připomínky, rady a ochotu kterou projevoval po celou dobu vzniku této diplomové práce. Děkuji své rodině za poskytnutí zázemí při studiu na Fakultě stavební.

Obsah

1	ÚVOD.....	11
2	CÍLE PRÁCE.....	12
3	TEORETICKÁ ČÁST.....	13
3.1	Namrzavost zemin a materiálů v podloží vozovek	13
3.1.1	Definice základních pojmů.....	13
3.1.2	Chování zemin v podloží vozovek při promrzání	13
3.1.3	Navrhování podloží z nenamrzavých materiálů	18
3.2	Index mrazu	21
3.2.1	Vývoj indexu mrazu v ČR	23
3.3	Metodika zkoušení namrzavosti v ČR	27
3.3.1	Nepřímá metoda – Znitostní kritérium dle Scheibleho	28
3.3.2	Přímá metoda	29
3.4	Metodika zkoušení namrzavosti v EU	33
3.4.1	Německo	33
3.4.2	Rakousko.....	37
3.4.3	Finsko	40
3.4.4	Francie.....	44
3.4.5	Přehled zkoušení namrzavosti v EU	48
4	PRAKTICKÁ ČÁST	49
4.1	Klasifikace zeminy.....	49
4.1.1	Popis vzorku	49
4.1.2	Zrnitost.....	50

4.1.3	Stanovení konzistenčních mezí	52
4.1.4	Zatřídění zeminy	55
4.2	Stanovení optimální vlhkosti	56
4.3	Vyhodnocení míry namrzavosti nepřímou metodou	57
4.4	Vyhodnocení míry namrzavosti přímou metodou	58
4.4.1	Vzorek č. 1	59
4.4.2	Vzorek č. 2	60
4.4.3	Vzorek č. 3	61
4.4.4	Vzorek č. 4	62
4.4.5	Vzorek č. 5	63
4.4.6	Vzorek č. 6	64
4.4.7	Vzorek č. 7	65
4.5	Vyhodnocení délky cyklu zkoušky namrzavosti	66
4.6	Simulace průniku mrazu do podloží	67
4.6.1	Vzorek č. 1	67
4.6.2	Vzorek č. 2	68
5	ZÁVĚR	70
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
	SEZNAM TABULEK	78
	SEZNAM GRAFŮ	78
	A PŘÍLOHY – PROTOKOLY ZKOUŠEK	80
	B PŘÍLOHY – MAPY	80

1 ÚVOD

Z hlediska silničního stavitelství je problematika namrzavosti zemin a materiálů velmi důležitá. Vlastnosti zemin v podloží vozovky mají výrazný vliv na únosnost, provozní způsobilost a tedy i na životnost pozemních komunikací. Díky změnám vodo-teplotního režimu v podloží pozemních komunikací na styku podloží a konstrukčních vrstev dochází v zimním a podzimním období k výskytu mrazových zdvihů zemin v podloží tvořené především jemnozrnnými zeminami. Během jarního tání pak dochází ke ztrátě únosnosti horní vrstvy podloží vozovky. Z těchto důvodů je nezbytně nutné věnovat velkou pozornost možné namrzavosti zemin v podloží, a to ne jen při navrhování ale i při provádění zemního tělesa pozemních komunikací a při rekonstrukcích stávajících pozemních komunikací. Způsoby stanovení namrzavosti jsou velmi aktuální problém, který se týká nejen České republiky, ale i zemí Evropské Unie. V České republice se používají dva typy stanovení namrzavosti, a to zjednodušená nepřímá zkouška tzv. Scheibleho zrnitostní kritérium a přímá zkouška namrzavosti, kterou se zabývá norma ČSN 72 1191 „Zkoušení míry namrzavosti“ z roku 1988. Tato norma je již zastaralá a je nezbytné provést její revizi s navázáním na nové nebo revidované předpisy, které se týkají navrhování spodní stavby pozemních komunikací. O důležitosti zkoušení namrzavosti svědčí i vůle Evropské unie, která se v posledních letech snaží sjednotit jednotlivé metodiky všech členů EU do jediné evropské normy. Za tímto účelem byla evropskou komisí sestavena skupina odborníků s pracovním názvem CEN TC 227, WG4, která se tohoto úkolu měla zhostit. Bohužel zatím byly práce na jednotném předpisu zkoušení namrzavosti zemin podloží vozovky pozastaveny.

2 CÍLE PRÁCE

V teoretické části této práce je cílem shrnutí všech současných dostupných poznatků o laboratorním zkoušení namrzavosti zemin a materiálů v podloží vozovek pozemních komunikací. Hlavním cílem této části je porovnávání odlišných principů a metod zkoušení namrzavosti užívaných v České republice a v dalších zemích Evropské unie. Dále je zde rozebíráno téma dlouhodobě sledovaného parametru indexu mrazu na celém území České republiky. Výstupem z této části jsou mapy charakteristických hodnot indexu mrazu pro střední dobu návratnosti 10, 7, a 4 let.

Cílem praktické části mé práce je stanovit míru namrzavosti zkoušené jemnozrné zeminy pomocí přímého zkoušení namrzavosti metodou A. Z těchto výsledků se pokusím zvážit, možnost úpravy délky doby zmrazování zkušebních těles řídící se stávající normou ČSN 72 1191 „Zkoušení míry namrzavosti“. Dalším cílem je snaha simulovat podmínky při průchodu mrazu podložím a popsat časový průběh teplot v podloží vozovky. Jedná se o experimentální měření podle připraveného zkušebního harmonogramu.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Namrzavost zemin a materiálů v podloží vozovek

3.1.1 Definice základních pojmů

- ❖ **Mrazový zdvih** – vertikální posunutí povrchu, způsobené průsakem a zamrznutím podpovrchové vody v zemině v důsledku pronikání mrazu. Jeho výskyt je spojen s cyklickým střídáním období zmrazování a tání, což může vést až k deformacím vozovky. [1]
- ❖ **Míra namrzavosti** – hodnota vyjádřená poměrem zdvihu zkoušeného vzorku a přírůstkem odmocniny indexu mrazu při pevně stanovených podmínkách. [1]
- ❖ **Aktivní zóna (podloží vozovky)** – je část terénu pod násypem, zpravidla po odstranění orniční vrstvy; podloží násypu se zpravidla omezuje hloubkou, do níž působí vlivy přetížení násypem; do zemního tělesa se zahrnuje pouze hloubka, do níž zasahují případné stavební úpravy (např. odvodnění, náhrada nevhodné zeminy do stanovené hloubky, úprava zeminy apod.)“ [2]

3.1.2 Chování zemin v konstrukci vozovky a podloží vozovek při promrzání

Opakované cykly zmrazení a následného tání může ovlivňovat mechanické vlastnosti materiálů dvojím způsobem [3]:

- Dojde k rozpadu zrn (u kameniva, zejména zvětralého) v důsledku teplotního namáhání anebo v důsledku zvětšení objemu vody v pórech kameniva. V souvislosti s tímto jevem mluvíme o „mrazuvzdornosti“.
- „Namrzavost“ oproti tomu znamená, že při zamrzání zvyšuje zhutněný nebo ulehlý materiál obsah vody, kterou „nasává“ z okolí (nejčastěji zespodu), ta následně při zamrznutí způsobí objemové změny

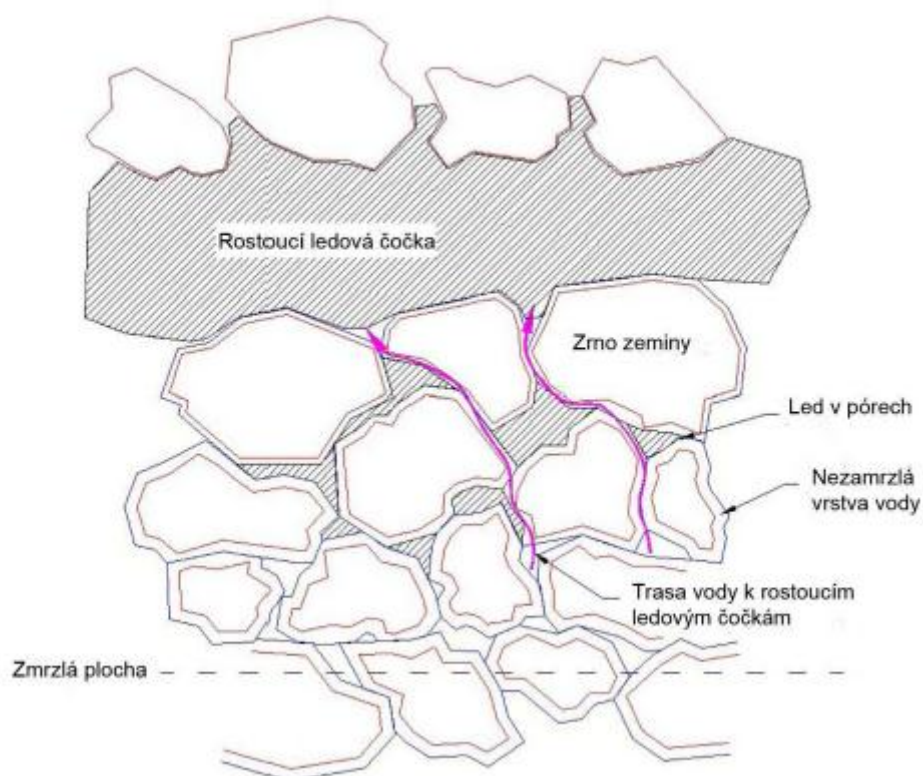
- Odolnost proti mrazu a vodě sledovaná především u stmelých směsí hydraulickým pojivem, kde při promrznutí směsi může dojít k porušení vazeb mezi materiálem a pojivem a tím dojde k vytvoření mrazových trhlin a porušení zhutěnné stmelené vrstvy.

Co se týče podloží vozovky, pokud má voda obsažená v zemině možnost dilatovat (při dostatečném objemu pórů, které jsou navzájem propojeny – u hrubozrnných nebo směsných zemin), celkově nedochází k objemovým změnám zeminy a tedy ani ke zdvihům. Dokonce i v případě jemnozrnných zemin, pokud je průběh zmrazování velmi rychlý (šokem), mohou homogenně zmrznout a jejich objem se nezvětší. To však reálně v podloží vozovky pozemních komunikací nenastává, protože účinky mrazu se projevují postupně. [4]

Zeminy používané do podloží vozovek můžeme z obecného hlediska namrzavosti rozdělit na tyto dvě základní skupiny:

- ❖ **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 promrznání 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. Dochází k přesouvání vody z teplejších, hlouběji usazených vrstev směrem k vznikající zmrzlé ploše, kde tato voda zamrzá. K tomuto přesunu dochází díky třem základním mechanismům:
 - **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 přeměny skupenství 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. [5]



Obr 3.1 – Schéma tvorby ledových čoček [6] (upraveno)

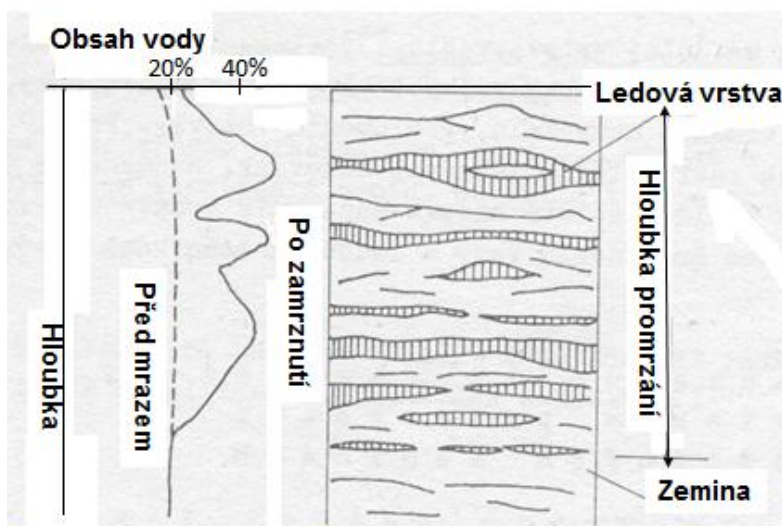
V důsledku těchto mechanismů dochází ke vzniku kontaktního tahového napětí. Tlak v krystalu ledu je vyšší v porovnání s okolní doposud nezamrzlou vodou, takže dochází ke vzniku tzv. krystalizačního tlaku. Krystal ledu „nasává“ vodu z okolí. Tímto mechanismem se postupně

vytváří ledové čočky a vrstvičky. 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. [5]



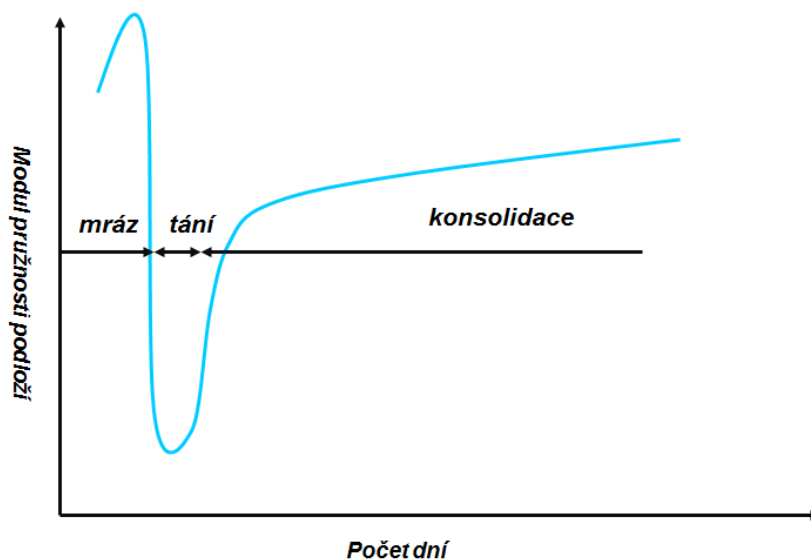
Obr. 3.2 – Formace ledových čoček ve zkušebním tělese [6]

Velikost ledových čoček se pohybuje od milimetrů do několika centimetrů, někdy tvoří souvislou vrstvu s velkým množstvím nahromaděné vlhkosti. K tvorbě ledových čoček dochází nejčastěji u zemin, které mají větší množství zrn menších než 0.125 mm. Tyto zeminy váží velké množství vody, což znamená, že průměr zrna má důležitou úlohu při tvorbě ledových čoček.



Obr. 3.3 – Rozmístění ledových čoček a vody v zeminách [7]

Kvůli těmto vlastnostem namrzavých zemin dochází v zimním období ke zdvihu vozovek, na jaře ke snižování únosnosti a deformaci vlivem dopravního zatížení. Díky zdvihům vozovky, které jsou ve středu vozovky větší, než na krajnicích vozovky vznikají nerovnosti v příčném i podélném směru, dále může dojít k prolomení vozovky, což vede ke snížení životnosti vozovky. [8]



Graf 3.1 – Schématické znázornění průběhu únosnosti podloží [8]

Průběh změn únosnosti podloží má tři typické znaky:

- 1) Vysoká únosnost v době mrazu
- 2) Náhlý pokles únosnosti v době jarního tání

3) Postupné zvyšování únosnosti (konsolidace)

Snížení únosnosti v době tání se vyjadřuje pomocí redukčního součinitele u , který závisí na:

- druhu zeminy a její namrzavosti
- vodním režimu v podloží
- poměru tloušťky vozovky a hloubky promrzání

Redukční součinitel se pohybuje v rozmezí 0.55-0.96. [8]

3.1.3 Navrhování podloží z nenamrzavých materiálů

Při navrhování podloží ze zemin či jiného materiálu se určuje, zda je materiál do podloží vozovky vhodný či nevhodný z hlediska namrzavosti materiálu. Při návrhu je třeba přihlédnout k základním charakteristikám prostředí, které ovlivňují kvalitu podloží. Jedná se především o klimatické podmínky a vodně – teplotní režim podloží:

- ❖ Klimatické podmínky jsou především charakterizovány:
 - Průměrnými ročními teplotami vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]
 - Průměrnými denními teplotami vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]
 - Indexem mrazu I_m [$^{\circ}\text{C}$], (blíže popsán v následující podkapitole 3.2)

Tyto charakteristické hodnoty se stanoví z údajů meteorologických stanic dané oblasti nebo z příslušných map či tabulek dle normy ČSN 73 6114 „Vozovky pozemních komunikací – Základní ustanovení pro navrhování“. [9]

- ❖ Promrzání podloží vozovky je závislé na 3 typech vodního režimu:

- Příznivý (difúzní) vodní režim popsán podmínkami

$$h_{pv} \geq d_{pr} + 2 * h_s$$

$$I_c > 1$$

- Nepříznivý (pendulární) vodní režim je dán vztahy:

$$d_{pr} + h_s < h_{pv} < d_{pr} + 2 * h_s$$

$$0,7 \leq I_c \leq 1$$

- Velmi nepříznivý (kapilární) vodní režim je popsán takto:

$$h_{pv} < d_{pr} + h_s$$

$$I_c < 0,7$$

Jednotlivé veličiny mají tento význam:

h_{pv} průměrná vzdálenost hladiny podzemní vody od nivelety vozovky [m]

d_{pr} hloubka promrzání vozovky a podloží [m]

h_s kapilární výška při úplném nasycení pórů zeminy vodou [m]

I_c číslo konzistence zeminy v podloží

Podle čísla konzistence se určuje vodní režim podloží v případě, není-li k dispozici údaj o úrovni hladiny podzemní vody. [9]

V tabulce č. 3.1 jsou uvedeny přibližné hloubky promrzání v závislosti na nadmořské výšce. V našich poměrech je hloubka promrzání v rozmezí 0,8 – 1,2 m. [10]

nadmořská výška [m]	< 250	250 – 400	400 – 700	700 – 900
hloubka promrzání [m]	0,75 – 0,85	0,8 – 0,9	0,9 – 1,1	1,1 – 1,3

Tab. 3.1 – Hloubka promrzání [10]

V závislosti na charakteristice namrzavosti zeminy, typu vodního režimu podloží a indexu mrazu se požaduje minimální tloušťka vozovky. Do tloušťky vozovky je možno zahrnout vrstvu z nenamrzavých materiálů zlepšující podloží vozovky, u níž je splněno filtrační kritérium mezi touto vrstvou a vrstvou podloží ležící pod ní. Plnění filtračních kritérií se nepožaduje v případě nenamrzavé vrstvy zlepšené zeminy s příměsí pojiv. Minimální tloušťky jsou uvedeny v tab. 3.2 a tab. 3.3 [11]

Návrhová hodnota indexu mrazu °C	Vodní režim podloží	Nejmenší přípustná tloušťka vrstev z nenamrzavých materiálů pro vozovky s návrhovou úrovní porušení, m			
		D0	D1	D0	D1
		je-li zemina podloží			
		namrzavá a mírně namrzavá		nebezpečně namrzavá	
300	difuzní	-	-	-	-
	pendulární	-	-	0,30	-
	kapilární	0,30	-	0,40	0,30
400	difuzní	-	-	0,30	-
	pendulární	0,30	-	0,40	0,30
	kapilární	0,40	0,30	0,50	0,40
500	difuzní	0,40	0,30	0,45	0,35
	pendulární	0,45	0,35	0,55	0,45
	kapilární	0,55	0,45	0,65	0,55
600	difuzní	0,50	0,40	0,55	0,45
	pendulární	0,55	0,45	0,65	0,55
	kapilární	0,65	0,55	0,75	0,65
700	difuzní	0,60	0,50	0,65	0,55
	pendulární	0,65	0,55	0,75	0,65
	kapilární	0,75	0,65	0,85	0,75
800	difuzní	0,70	0,60	0,75	0,65
	pendulární	0,75	0,65	0,85	0,75
	kapilární	0,85	0,75	0,95	0,85

Tab. 3.2 – Požadovaná min. tloušťka nenamrzavých vrstev netuhé vozovky [11]

Návrhová hodnota indexu mrazu °C	Vodní režim podloží	Nejmenší přípustná tloušťka vrstev z nenamrzavých materiálů pro vozovky s návrhovou úrovní porušení, m			
		D0	D1	D0	D1
		je-li zemina podloží			
		namrzavá a mírně namrzavá		nebezpečně namrzavá	
300	difuzní	-	-	0,35	-
	pendulární	0,35	-	0,45	0,35
	kapilární	0,50	0,40	0,60	0,50
400	difuzní	0,40	0,30	0,45	0,40
	pendulární	0,45	0,35	0,55	0,50
	kapilární	0,60	0,50	0,70	0,60
500	difuzní	0,50	0,40	0,55	0,50
	pendulární	0,55	0,45	0,60	0,60
	kapilární	0,70	0,60	0,80	0,70
600	difuzní	0,60	0,50	0,65	0,55
	pendulární	0,65	0,55	0,75	0,65
	kapilární	0,80	0,70	0,90	0,80
700	difuzní	0,65	0,60	0,70	0,65
	pendulární	0,70	0,65	0,80	0,70
	kapilární	0,85	0,75	0,95	0,85
800	difuzní	0,70	0,65	0,75	0,70
	pendulární	0,75	0,70	0,85	0,75
	kapilární	0,90	0,80	1,00	0,90

Tab. 3.3 – Požadovaná min. tloušťka nenamrzavých vrstev tuhé vozovky [11]

Není-li tloušťka vozovky splněna, zvýší se tloušťka ochranné vrstvy nebo se navrhne:

- úprava zeminy v podloží (výměna, zlepšení zeminy mechanicky nebo použitím příměsi pojiva) se snížením namrzavosti zeminy nebo s dosažením nenamrzavé úpravy
- úprava vodního režimu (zvýšení nivelety, hloubková a plošná drenáž, vodonepropustná membrána apod.). [11]

3.2 Index mrazu

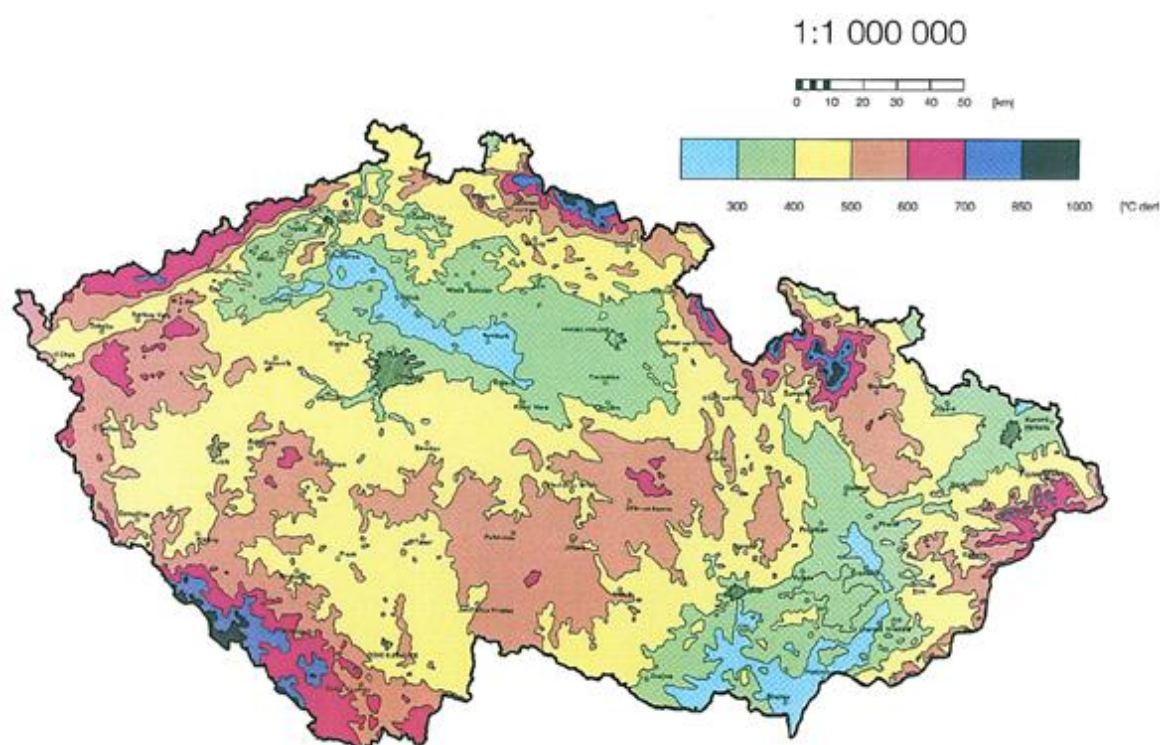
Hodnota indexu mrazu je definována jako klimatická charakteristika, vyjadřující intenzitu a trvání období mrazu. Stanovuje se jako součet absolutních hodnot největší a nejmenší pořadnice postupného součtu průměrných denních teplot v zimním období pro střední dobu návratu. Mezi faktory ovlivňující index mrazu na území České republiky patří nadmořská výška, čistota vzduchu, proudění tepla, vegetace a členitost území. Základní hodnota indexu mrazu se odečítá z tabulky č. 3.4 nebo z mapy (viz obr. 3.4)

V případě, že sledovaný úsek komunikace prochází místy, ve kterých nastává vlivem konfigurace terénu chladnější klima, se tato základní hodnota indexu mrazu násobí součinitelem 1,15. To nastává v případech:

- inverzní polohy
- severní svahy (terén v řezu vedeném od komunikace k jihu má do vzdálenosti 100 m průměrný sklon 1:5, tj. přibližně 11° až 12° nebo strmější a klesá směrem ke komunikaci)
- horské hřebeny exponované vůči severním větrům (tj. polohy nad 600 m. n. m., které v sektoru od SZ přes S k SV nejsou převýšené o více než 15 m terénní překážkou bližší než 1000 m. [9])

Výškové pásmo [m n. m.]	Index mrazu I_m [°C] pro střední dobu návratu		
	4 (roky)	7 (roků)	10 (roků)
do 200	224	290	332
nad 200 do 300	259	320	375
nad 300 do 400	297	380	424
nad 400 do 500	346	419	475
nad 500 do 600	389	479	523
nad 600 do 700	449	528	582
nad 700 do 900	566	652	701
nad 900 do 1 100	694	785	840
nad 1 100 do 1 300	841	934	994
nad 1 300 do 1 500	1 008	1 092	1 169
nad 1 500	1 097	1 189	1 268

Tab. 3.4 – Základní hodnoty indexu mrazu pro území ČR k roku 1995 [9]



Obr. 3.4 – Mapa charakt. hodnot indexu mrazu I_m (pro střední dobu návratnosti 10 let) [9]

Hodnota indexu mrazu slouží k výpočtu hloubky promrzání vozovky, která se také řídí normou ČSN 73 6114. Hloubka promrzání se určí empiricky podle vztahu:

$$d_{pr} = h_v + k_z \cdot ((0,178 \cdot Im_d^{0,3}) / K_0) - R_v$$

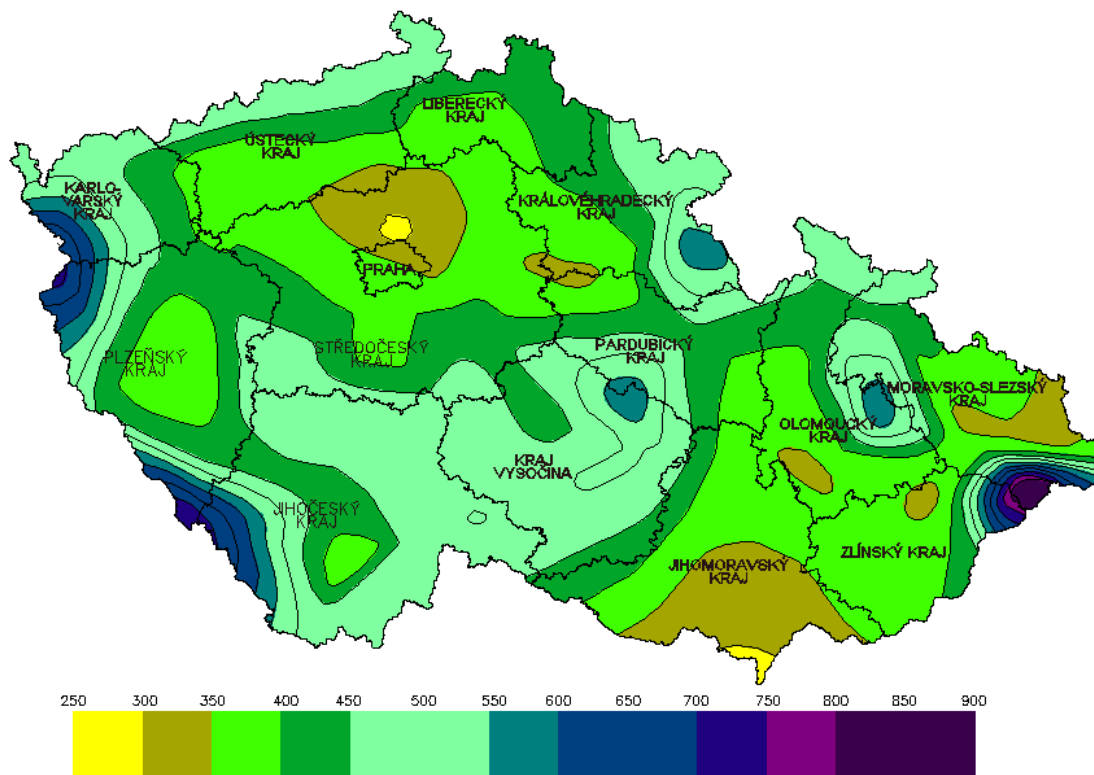
Jednotlivé veličiny mají tento význam:

d_{pr}	hloubka promrzání vozovky a podloží [m]
h_v	tloušťka konstrukce vozovky [m]
K_z	součinitel tepelné vodivosti promrzlé zeminy v podloží [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
K_0	součinitel tepelné vodivosti vztažného materiálu [m]
R_v	tepelný odpor vozovky [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]
Im_d	index mrazu oblasti s periodicitou výskytu n. [9]

3.2.1 Vývoj indexu mrazu v ČR

V České republice se nachází přibližně 200 meteorologických stanic, ze kterých jsou získávána potřebná data k určení indexu mrazu. Meteorologická stanice je zařízení pro měření meteorologických údajů potřebných pro další předpověď průběhu počasí. Na typické stanici se provádějí měření teploty vzduchu (maximální, minimální teplota, minimální teplota ve výšce 5 cm a 2 m nad zemí), měření vlhkosti vzduchu, směru a rychlosti větru, množství vodních srážek, množství napadaného sněhu a pozorují se další meteorologické jevy (bouřky, mlha, jinovatka, náledí, námraza, rosa apod.). Meteorologických stanic je více typů. Podle odborného zaměření se rozlišují stanice synoptické, klimatologické, letecké, zemědělsko - meteorologické a se speciálním zaměřením jako jsou např. silniční stanice. Silniční meteorologické stanice slouží jednak pro potřeby zimní údržby komunikací a jednak pro informování účastníků silničního provozu, resp. řízení dopravy. Kromě obvyklých atmosférických senzorů tyto stanice zahrnují především vozovkové senzory, které detekují stav a teplotu povrchu vozovky a také bod mrznutí roztoku na vozovce (koncentraci soli). Silničních meteorologických stanic je v ČR zhruba 400 (pro rok 2011) a většinu z nich vlastní ŘSD ČR z titulu správy silnic I. a vyšší třídy. [12]

K zadání mé diplomové práce mi byly poskytnuty hodnoty indexů mrazu z 65 meteorologických stanic rozmístěných po území celé České republiky, které mi posloužili k popsání vývoje indexu mrazu u nás. Mapa s rozmístěním těchto stanic je obsažena v příloze této práce. Získané hodnoty byly naměřeny za zimních období roku 2001/2002 až 2010/2011. Z těchto hodnot jsem vytvořil nové mapy charakteristických oblastí indexu mrazu pro ČR se střední dobou návratnosti 10, 7 a 4 let (viz obr. 3.5, obr. 3.6, obr. 3.7)

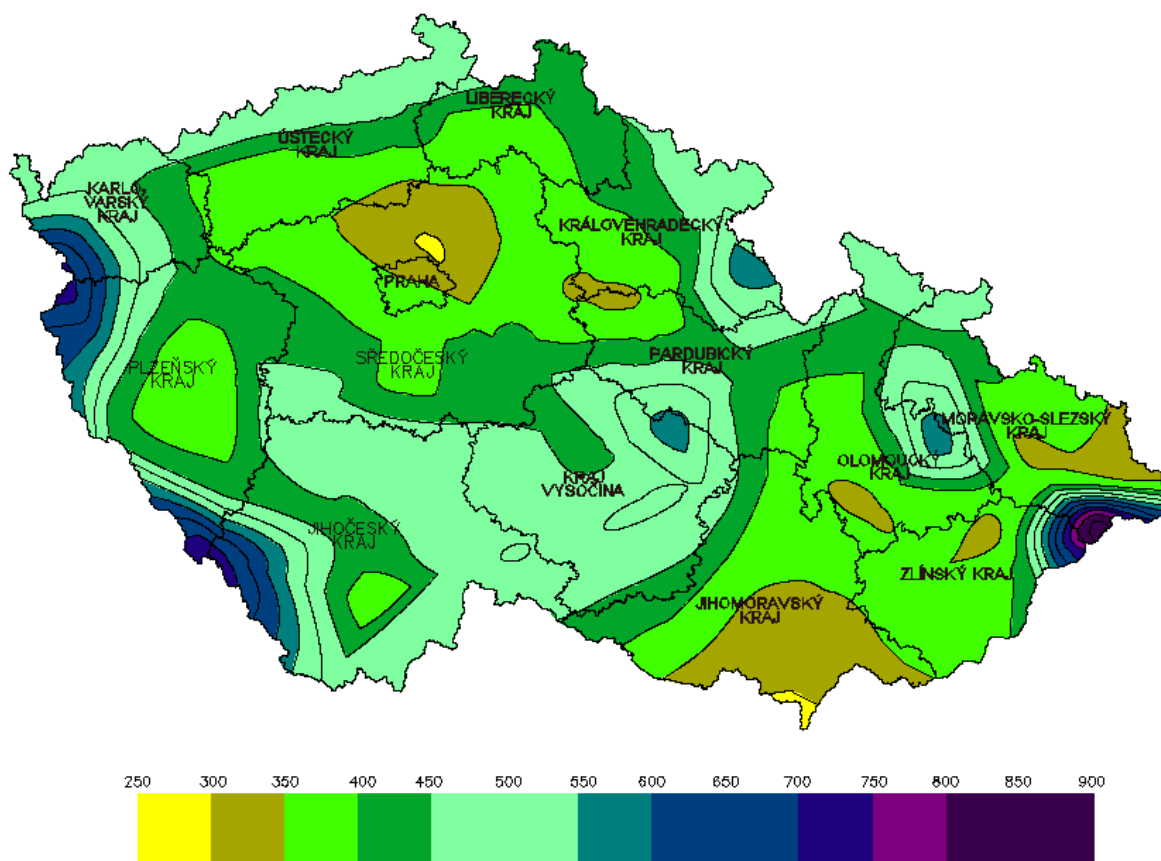


Obr. 3.5 – Mapa charak. hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 10 let

Dále jsem porovnal hodnoty indexů mrazu z jednotlivých nadmořských oblastí obsažených v normě ČSN 73 6114 se zpracovanými hodnotami ze získaných dat. Hodnoty z výše uvedené normy se střední dobou návratnosti jsou zpracovány ze zimních období let 1985/1986 až 1994/1995. Jak je patrné z tabulky č. 3.5, hodnoty indexů mrazu z jednotlivých nadmořských oblastí postupně klesají. Nejvýraznější poklesy za posledních 15 let jsou zaznamenány ve výškových pásmech 600 – 1300 m. n. m. Největší poklesy jsou patrné ve výškovém pásmu 700 – 900 m. n. m.

Výškové pásmo [m n. m.]	Index mrazu I_m [°C] pro střední dobu návratu			
	Střední doba návratnosti 10 let			
	ČSN 736114	Stanice	Pokles	Pokles
do 200	332	297	-35	-10,54%
nad 200 do 300	375	359	-16	-4,30%
nad 300 do 400	424	370	-54	-12,74%
nad 400 do 500	475	432	-43	-9,05%
nad 500 do 600	523	490	-33	-6,31%
nad 600 do 700	582	495	-87	-14,95%
nad 700 do 900	701	575	-126	-17,98%
nad 900 do 1100	840	724	-116	-13,81%
nad 1100 do 1300	994	852	-142	-14,30%

Tab. 3.5 – Porovnání hodnot indexu mrazu (střední doba návratnosti 10 let) k roku 2010

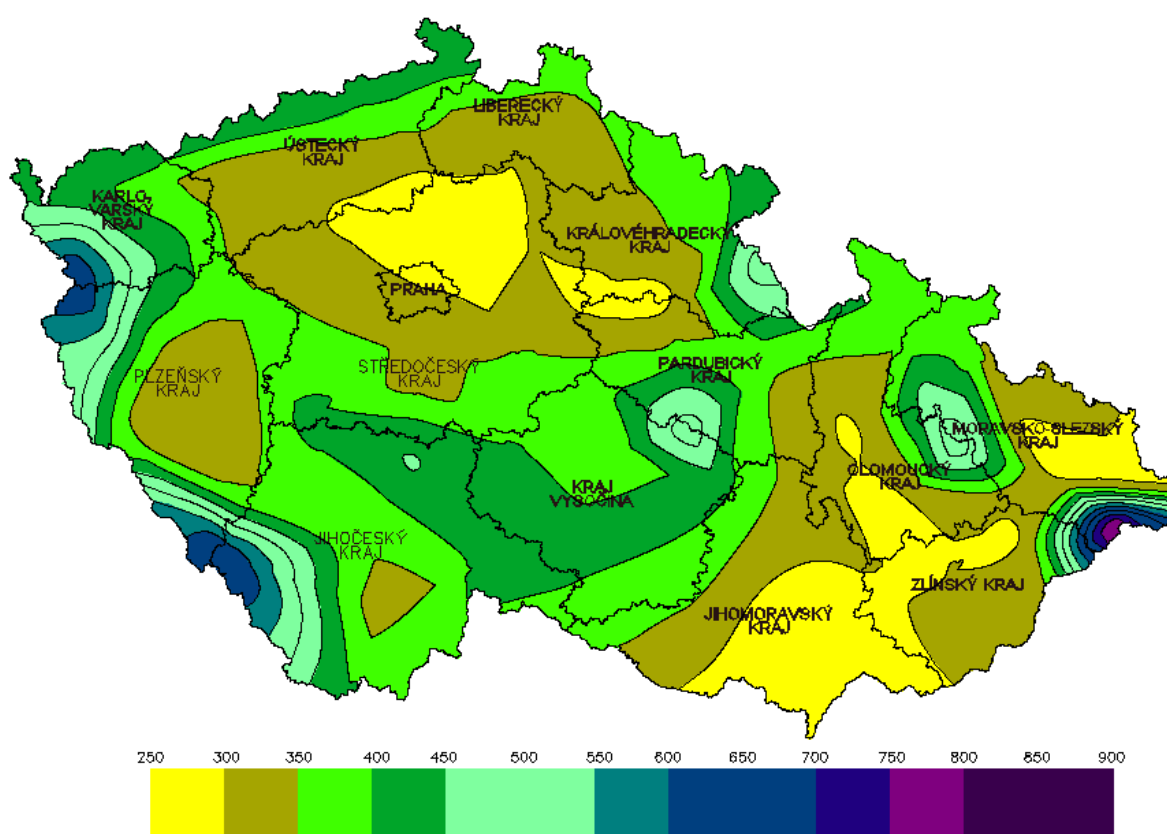


Obr. 3.6 – Mapa charak. hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 7 let

V tabulce č. 3.6 jsou obsaženy nově vypracované hodnoty indexů mrazu se střední dobou návratnosti 10, 7 a 4 let pro rok 2010.

Výškové pásmo [m n. m.]	Index mrazu I_m [°C] pro střední dobu návratu		
	4 roky	7 roků	10 roků
do 200	251	297	297
nad 200 do 300	301	359	359
nad 300 do 400	319	369	370
nad 400 do 500	358	432	432
nad 500 do 600	405	490	490
nad 600 do 700	450	495	495
nad 700 do 900	513	567	575
nad 900 do 1100	642	724	724
nad 1100 do 1300	781	852	852

Tab. 3.6 – Základní hodnoty indexu mrazu pro území ČR k roku 2010



Obr. 3.7 – Mapa charak. hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 4 let

Důvodů, kvůli kterým dochází ke snižování indexu mrazu, může být hned několik. Jedním z nich může být globální oteplování. Globální oteplování označuje zvyšování průměrné teploty zemské atmosféry a oceánů. Je pravděpodobně způsobeno zvýšenou koncentrací skleníkových plynů v atmosféře v důsledku

lidské činnosti, jako je odlesňování a spalování fosilních paliv. Tato zjištění akceptují státní akademie věd všech významných industrializovaných států a nejsou zpochybněna jakýmkoliv státním či mezinárodním vědeckým orgánem. Přesto vzbuzují kontroverzi a část vědců a veřejnosti nesouhlasí s tím, že by bylo oteplování způsobeno lidskou činností. [13]

Jedna z dalších možností změn klimatu může být změna sluneční aktivity v souvislosti s menším počtem slunečných skvrn, tedy čím méně je na Slunci slunečních skvrn, tím větších teplotních výkyvů jsme v Česku svědky. [14]

Z těchto důvodů jsem při zkouškách namrzavosti aplikoval zkrácený postup zkoušky, který by jednak umožnil rychlejší stanovení výsledků zkoušení namrzavosti, což by praxe jen uvítala a dále pak zkrácením doby trvání konstantního vodoteplotního stavu na zkušební tělesa simuloval snižování hodnot indexu mrazu v České republice.

3.3 Metodika zkoušení namrzavosti v ČR

Namrzavost zemin a materiálů 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). Její nespornou předností je rychlost a praktičnost. K vyhodnocení je potřeba pouze graficky vykreslit křivku zrnitosti a tedy provést síťový rozbor podle ČSN EN 17 892-4. Scheibleho metoda je hojně využívána i v zahraničí. Stanovením míry namrzavosti přímou metodou se zabývá norma ČSN 72 1191. Míra namrzavosti je stanovena laboratorní zkouškou provedenou na čtyřech zkušebních tělesech zemin nebo častěji upravených 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. [2]

Obecně se zeminy z hlediska namrzavosti dělí takto:

- Minerály – nejvíce namrzavé – kaolinity
– nejméně namrzavé – montmorillonity
- Jíly – obecně jsou hodnoceny jako namrzavé až silně namrzavé
- Stejnozrnné zeminy – namrzavé, pokud obsahují > než 10 % zrn < 0,002 mm
- Nestejnozrnné zeminy – namrzavé, pokud obsahují > než 3 % zrn < 0,002 mm [8]

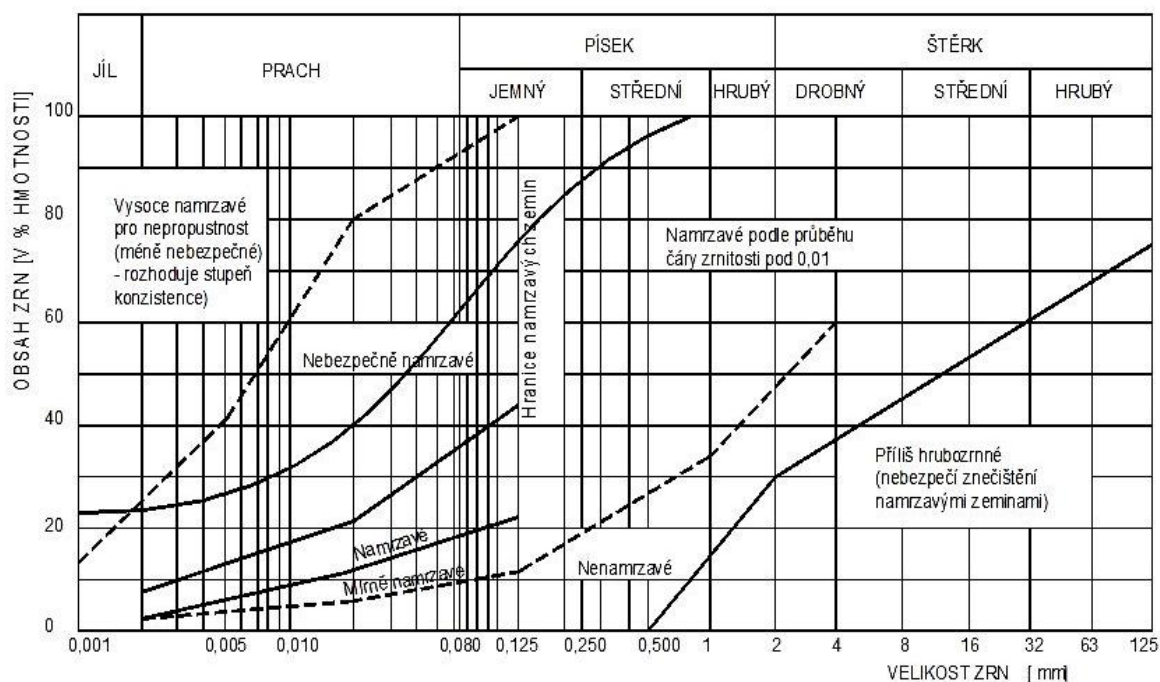
3.3.1 Nepřímá metoda – Zrnitostní kritérium dle Scheibleho

Namrzavost se určuje nepřímo na základě porovnání křivky zrnitosti zkoušené zeminy či druhotného materiálu s normovým zrnitostním nomogramem (graf 3.2) s popisem stupně namrzání. Upravené zeminy a některé materiály (např. recykláty a další druhotné materiály) se doporučují zkoušet přímou metodou.

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

Podle Scheibleho kritéria se zeminy dělí do šesti skupin:

- 1.) Vysoce namrzavé
- 2.) Nebezpečně namrzavé – obsah částic < 0,063 mm je větší než 35%
- 3.) Namrzavé
- 4.) Mírně namrzavé
- 5.) Namrzavé podle průběhu čáry zrnitosti pod 0,01 mm
- 6.) Nenamrzavé – obsah zrn < 0,002 je méně než 3%



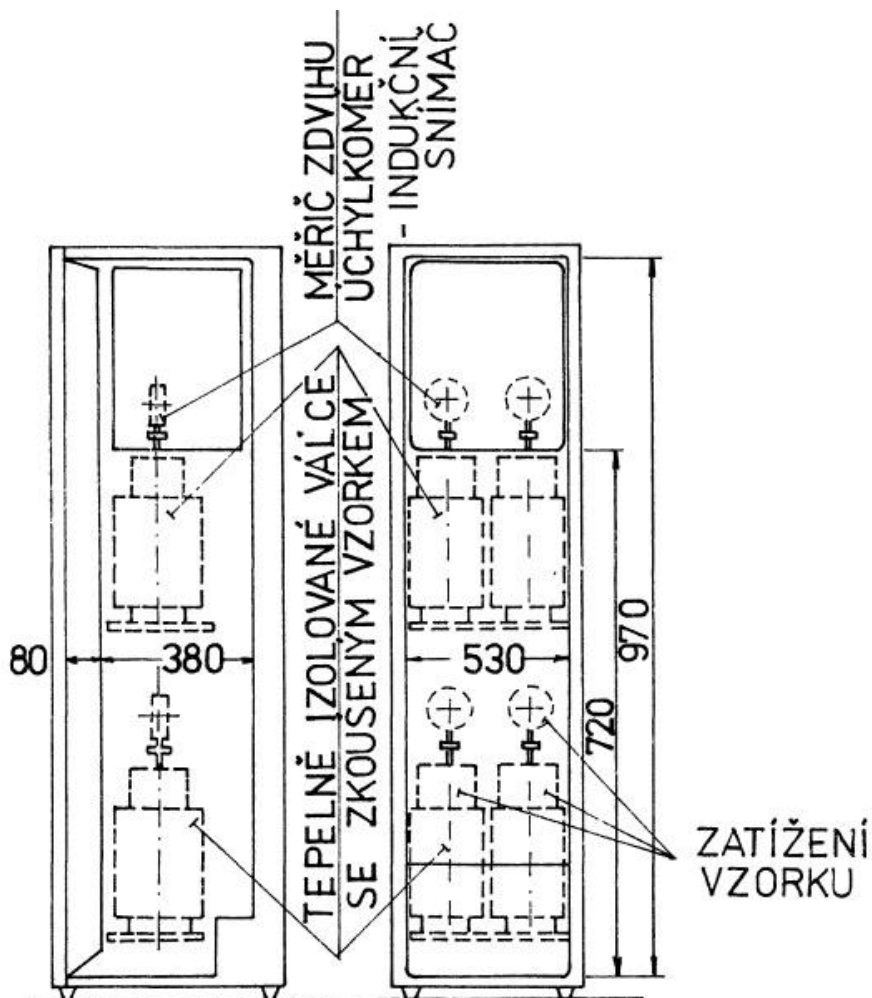
Graf 3.2 – Scheibleho kritérium namrzavosti [2]

3.3.2 Přímá metoda

Určení míry namrzavosti zemin přímou metodou se provádí již od roku 1988 podle normy ČSN 72 1191 „Zkoušení míry namrzavosti zemin“. Tato zkouška napodobuje účinek promrzání zeminy do hloubky. Stanovuje se pouze pro zeminy, zlepšené zeminy a materiály, které obsahují více než 5 % částic menších než 0,125 mm. Ostatní zeminy jsou nenamrzavé. Míra namrzavosti určuje vhodnost zeminy (materiálu) při návrhu zemního tělesa a ochranné a podsypné vrstvy vozovky. Poskytuje základní vstupní údaje pro dimenzování vozovky z hlediska její ochrany proti mrazu. [1]

Během této zkoušky je napodobován účinek mrazu na vozovku při stálém vodotepelném režimu. Hodnota zdvihu zkušební vzorku je vyjádřením postupného nárůstu ledových vrstviček a průběh tohoto nárůstu ($\Delta h / \Delta \sqrt{t}$) stanovuje míru namrzavosti vzorku. Zkušební přístroj se skládá z upravené chladicí skříně (obr. 3.8), 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 zkušební tělesa s citlivostí minimálně 0,1 mm. Prstenec je obalen tepelněizolační látkou. Zkušební těleso se může rozpínat vlivem zmrazování pouze ve svislém směru. Vrch tělesa je zakryt deskou se

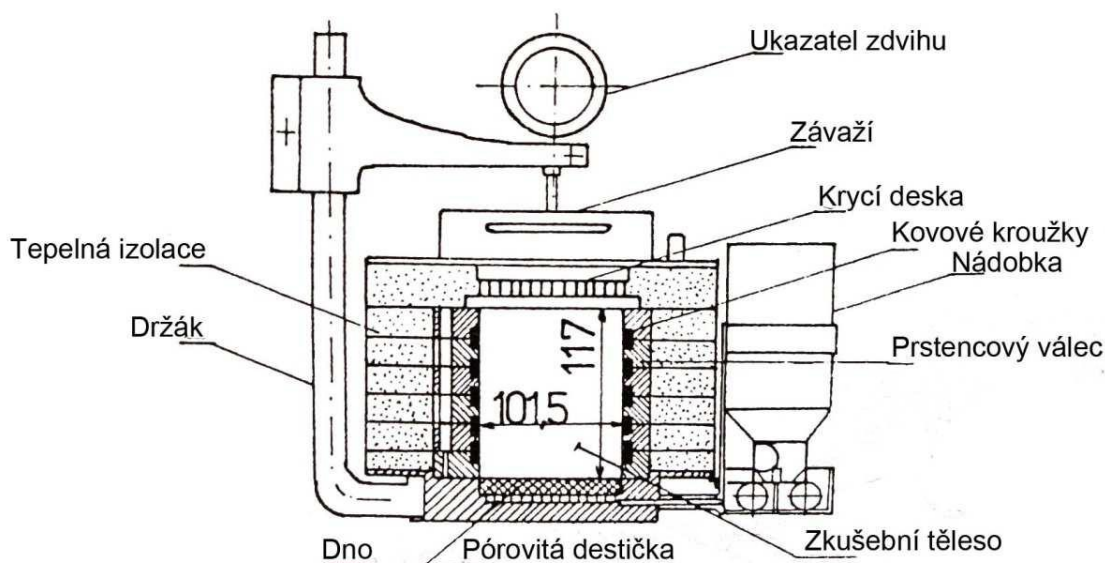
čtyřmi chladicími termoelektrickými bateriemi s vodním chlazením. Na desce je umístěno závaží o hmotnosti 8 kg, které simuluje tlak nadložních vrstev vozovky. Pod podmínkou, že bude zaručena teplota $(-4 \pm 1) ^\circ\text{C}$, je možné použít i jiný způsob chlazení. Zdvih vzorku je měřen buď vizuálně úchylkoměrem, nebo elektronickým snímačem.



Obr. 3.8 – Chladicí skříň se čtyřmi zkušebními buňkami [1]

Postup této zkoušky není složitý. Zkušební tělesa uložená ve čtyřech zkušebních buňkách se uloží do mrazicí skříně při teplotě $5 ^\circ\text{C}$, kde se nechají po dobu nejméně 17 hodin ze spodu saturovat vodou. Chladicí deska v této době není v činnosti, neměří se ani případný zdvih zbobtnáním tělesa. Po uplynutí této doby se horní část těles začne zmrazovat při teplotě $(-4 \text{ až } \pm 1) ^\circ\text{C}$ prostřednictvím zmrazovací hlavy. Spodní saturovaná část tělesa je vystavena kladné teplotě, která je o něco málo nižší než teplota v chladicí skříni. Ustálený konstantní vodnotepelný režim je udržován po dobu 5 dní (120 hodin). V této době se měří časový průběh 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). Mrazový zdvih se měří vždy ve středu horní kruhové plochy vzorku.



Obr. 3.9 – Zkušební buňka [1]

Norma ČSN 72 1191 udává dvě podobné metody, jak lze ke zkoušce namrzavosti přistupovat:

- **Metoda A**

Tato metoda využívá lineární vztah mezi zdvihem shora zmrazované zeminy při stálém teplotním spádu, při syčení vzorku vodou zespod (Δh) a mezi druhou odmocninou indexu mrazu ($\Delta \sqrt{Im}$). Ze vzorku zeminy se odstraní zrna nad 16 mm a dále se zhutňuje při optimální vlhkosti na maximální objemovou hmotnost pěchem o hmotnosti 2,5 kg v Proctorově formě užívaném při zkoušce Proctor standard dle ČSN EN 13286-2. Po zhutnění zeminy se přebývající část zeminy seřízne a urovná. Připravený vzorek se vloží do zkušebních buněk a posléze do chladicí skříně. V případě, že je zemina zlepšená pojivem (vápno, cement), pak ke zkoušce namrzavosti dojde až po 28 dnech, kdy je vzorek uložen v prostředí s vlhkostí vzduchu 95 - 100 %, teplotě $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

Míra namrzavosti je vyjádřena hodnotou $\beta / \text{mm } [^\circ\text{C} \cdot \text{h}]^{-1/2}$, která je definována vztahem:

$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta \sqrt{Im}}$$

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

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

Míra namrzavosti	Průměrná hodnota β
Nenamrzavé	$< 0,25$
Mírně namrzavé a namrzavé	$0,25 \text{ až } 0,50$
Nebezpečně namrzavé	$> 0,50$

Tab. 3.7 – Stanovení míry namrzavosti podle součinitele β [1]

Konečné vyhodnocení se provádí graficky. Index mrazu je součet součinů absolutních hodnot průměrné teploty pod bodem mrazu na povrchu vzorku [$^{\circ}\text{C}$] a času [h]. 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. Míra namrzavosti se určí jako průměr ze čtyř měření, přičemž nesmí být rozdíl mezi jednotlivými hodnotami větší jak 15 %.

- **Metoda B**

U této metody je nutné odstranit zrna větší než 10 mm. Příprava zkušebního tělesa a jeho zhutnění je totožné s přípravou vzorku v metodě A, tedy dle ČSN 13286-2. Pokud je to nutné, mrazový zdvih se stanoví pod odlišným zatížením než je 8 kg, při teplotách -20°C , při cyklech zmrazování atd. Po skončení prochlazování, se vzorky ponechají v chladicí skříni rozmrazovat při teplotě 5°C a sleduje se svislá deformace vzorků. Zkouška se ukončí po ustálení výšky vzorku (po 6 hodinách se nezmění výšky vzorků o více jak 0,1 mm), nebo nejdříve po 72 hodinách.

Při samostatném vyhodnocení je vyčíslen součinitel namrzavosti K_n [%], který se zaokrouhluje na 0,1% a určí se podle vztahu:

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

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

h původní výška vzorku [mm]

Materiály, jejichž součinitel namrzavosti K_n je menší než 1 %, se považují 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. Tato metoda není pro stanovení míry namrzavosti zemin a materiálů v ČR příliš rozšířená. [1]

3.4 Metodika zkoušení namrzavosti v EU

Tématem namrzavosti v Evropské unii se zabývá pracovní skupina CEN TC 227, WG4, která sdružuje přední odborníky, kteří se mimo jiné zabývají i problematikou stanovení namrzavosti. Tato skupina má za úkol připravit a sjednotit podklady potřebné k ucelení přímého zkoušení namrzavosti v evropských zemích, které budou sloužit jako podklady pro budoucí připravovanou evropskou normu. Mezi členy této skupiny patří Velká Británie, Německo, Rakousko, Finsko, Švédsko, Dánsko, Belgie, Norsko a také Česká republika. V současné době bohužel snaha o vyřešení společné EN na stanovení a hodnocení namrzavosti přenechala místo důležitějším evropským předpisům a řešení se odložilo. Namrzavost lze obecně stanovit dvěma způsoby. Prvním způsobem se stanovuje prostřednictvím zrnitostního kritéria, kdy se hlavně zjišťuje obsah jemných částic, které výrazně zvyšují riziko namrzavosti materiálů. Dalším způsobem je tzv. funkční zkouška, která simuluje účinky mrazu na horní vrstvu podloží vozovky. U těchto zkoušek se měří vertikální zdvih zhutněného zkušebního tělesa ať už ze zemin či jiného materiálu v pravidelných intervalech. Tyto zdvihy jsou způsobeny tvořením ledových vrstviček a čoček ve zkušebním vzorku. Zkoušky se u jednotlivých států liší díky odlišným klimatickým podmínkám. V této kapitole jsou shrnuty principy zkoušení v některých vybraných zemích EU.

3.4.1 Německo

Německé předpisy při rozhodování o vhodnosti zemin, směsí a nestmeleného kameniva do konstrukce vozovek zavádí dva důležité 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. Hodnocení namrzavosti zemin se v Německu řídí normou DIN 18196 „Klasifikace zemin pro konstrukční účely“. Pro výběr zkušební metody je rozhodující množství zrn o velikosti 0,063 mm [15]:

- obsah zrn $> 0,063$ mm je větší než 95 % celkové hmotnosti – klasifikace podle křivky zrnitosti
- obsah zrn $\leq 0,063$ mm je větší než 40 % celkové hmotnosti – klasifikace podle konzistence
- obsah zrn $\leq 0,063$ mm je mezi 5 – 40 % celkové hmotnosti - klasifikace podle křivky zrnitosti i podle konzistence

Tato klasifikace podle velikosti částic a plasticity umožňuje posouzení citlivosti vůči mrazu. Voda v zemině může být buď vázaná, nebo volná. Německá norma dále uvádí zjednodušenou klasifikaci zemin dle namrzavosti (v zásadě je tato klasifikace založena na Casagrandeho kritériu – viz tabulka č. 3.8).

Klasifikace namrzavosti zemin	Hodnocení namrzavosti	Klasifikace zeminy dle DIN 18196
F1	Nenamrzavá	Štěrk, písky, materiály úzké až otevřené zrnitosti
F2	Mírně namrzavá až namrzavá	Jíly s vysokou plasticitou
		Organické zeminy
		Směšené písčité hlíny
F3	Vysoce namrzavá	Jíly se střední nebo nízkou plasticitou
		Prachovité zeminy
		Štěrk a písky s vysokým obsahem prachovitě nebo jílové složky

Tab. 3.8 – Zjednodušená klasifikace zemin podle namrzavosti [15]

V případech nejasností (např. nestandardní materiál apod.) se doporučuje provést zkoušku mrazových zdvihů či mineralogický rozbor.

Zeminy s namrzavostí třídy F3 jsou po úpravě stabilizací, za předpokladu dodržování podmínek určených pro kvalifikovanou zemní stabilizaci, zařazeny do třídy F2. [15].

3.4.1.1 Příprava zkušebních těles

Maximální velikost zrna směsi je omezena na 22,4 mm. Celkem čtyři válcové vzorky jsou zhutněny při optimální vlhkosti na maximální objemovou hmotnost (podle Proctorovy standardní zkoušky) a vloženy do zkušebních forem (viz obr. 3.10). Forma má vnitřní průměr 150 mm a výšku 125 mm a skládá se z 5 teflonových prstenců, které minimalizují tření u stěn. [15].



Obr. 3.10 – Válcová forma s teplotním čidlem a perforovaná ocelová destička (upraveno)
[15]

3.4.1.2 Průběh zkoušky

Těleso je umístěno do zmrazovacího zařízení (viz obr. 3.11), kde je po dobu 24 hodin vystaveno konstantní teplotě vzduchu ($+1,5 \pm 0,5$) °C. Povrch je zatížen závažím o hmotnosti $0,5 \text{ N/cm}^2$, které simuluje zatížení vyvolané spodní podkladní vrstvou o mocnosti cca 20 cm.



Obr. 3.11 – Měřící zařízení pro zkoušku namrzavosti [15]

Rozlišují se dvě varianty podle způsobu zmrazování:

- **Varianta A** – povrch tělesa je ochlazován tak, aby po uplynutí 4 dnů bylo

uprostřed tělesa docíleno teploty 0 °C (tzv. izotermie). Tento stav se následně udržuje po dobu 3 dnů. Teplota zmrazování tedy není konstantní, ale je regulována podle individuálních teplotních podmínek. Následně jsou vzorky rozmrazovány po dobu 24 hodin při pokojové teplotě.

- **Varianta B** – povrch zkušebního tělesa je zmrazován při stálé teplotě -4°C po dobu 7 dní.

Výhodou varianty A je postupné promrzání vzorku. Konstantní hloubka promrzání je nezávislá na termofyzikálních vlastnostech zkoušeného materiálu a tepelných podmínkách na povrchu tělesa po dobu trvání zkoušky. Konstantní teplotní gradient v ještě nezamrzlé části vzorku je zajištěn neměnným odstupem od nádoby s vodou. Z těchto důvodů je upřednostňována varianta A. [15]

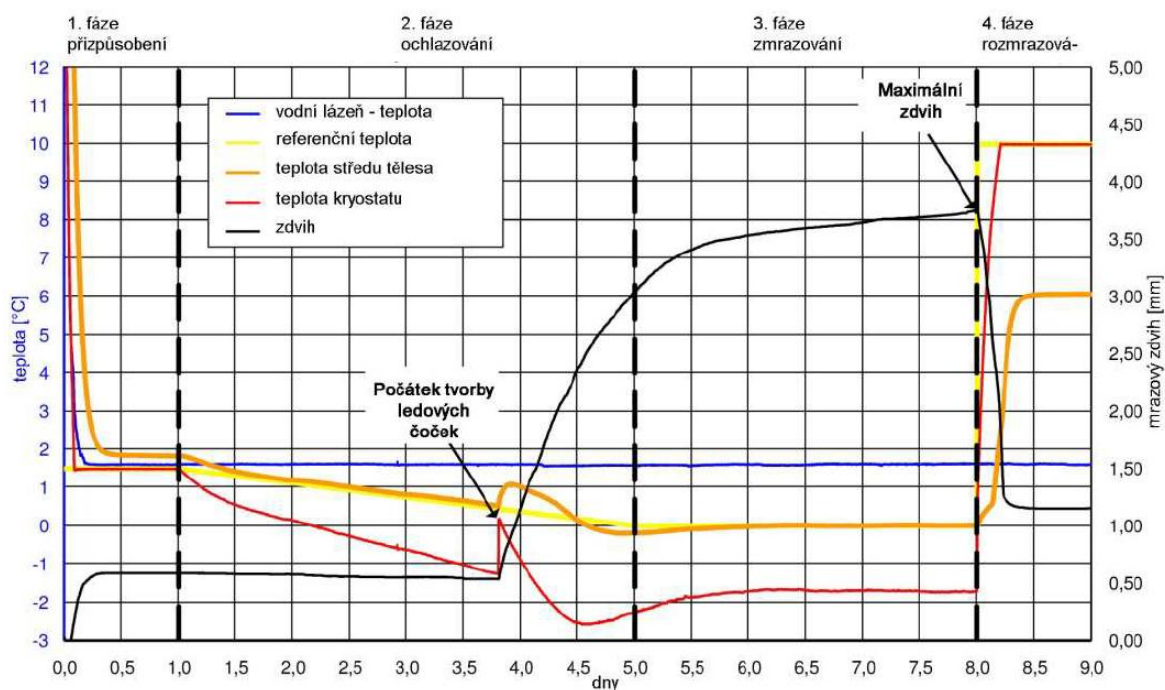
3.4.1.3 Vyhodnocení zkoušky

Hodnoty naměřených mrazových zdvihů jsou automaticky zaznamenávány každých 5 minut. Pro vyhodnocení jsou stanoveny následující hodnoty: [15]

- ❖ zdvih během počáteční fáze (temperování při $+1,5 \pm 0,5$ °C) [mm]
- ❖ zdvih po 7 dnech [mm]
- ❖ zdvih na konci stádia zmrazení [mm]
- ❖ zdvih po rozmrazení [mm]

Ze stanovených parametrů jsou odvozeny následující hodnoty:

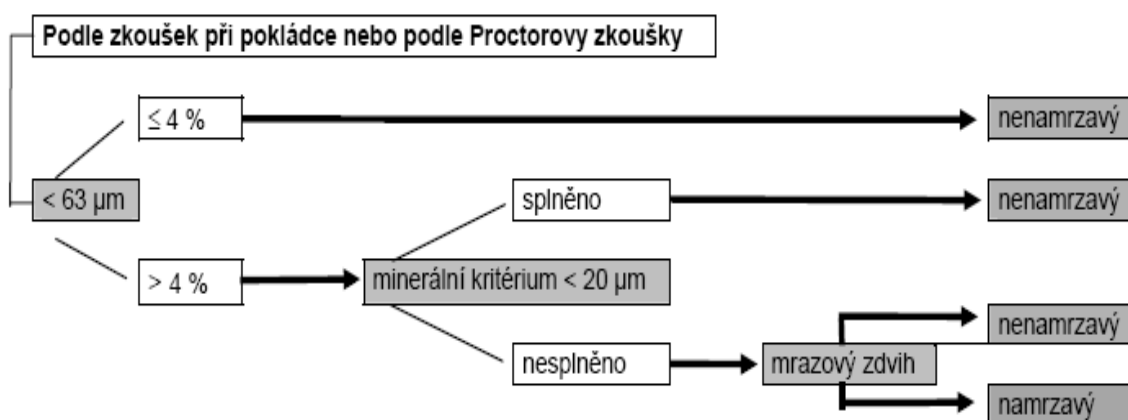
- ❖ bobtnání v počáteční fázi
- ❖ největší mrazový zdvih
- ❖ možný mrazový zdvih
- ❖ směrodatná odchylka tvorby mrazových zdvihů



Graf. 3.3 – Záznam teplot a zdvihů z průběhu zkoušky namrzavosti (upraveno) [15]

3.4.2 Rakousko

Zkoušení namrzavosti se posuzuje na základě zrnitostního kritéria dle Casagrandeho a dále podle minerálního složení zemin 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“. Norma uvádí, že míra namrzavosti se určuje za pevně daných podmínek (viz obr. 3.12). Nejdříve se provede Proctorova zkouška modifikovaná, poté se stanoví podíl jemných částic menších jak 0,063 mm respektive < 0,02 mm (viz tab. 3.9).



Obr. 3.12 – Třístupňový model pro posouzení namrzavosti dle ÖNORM B 4810 [16]

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.

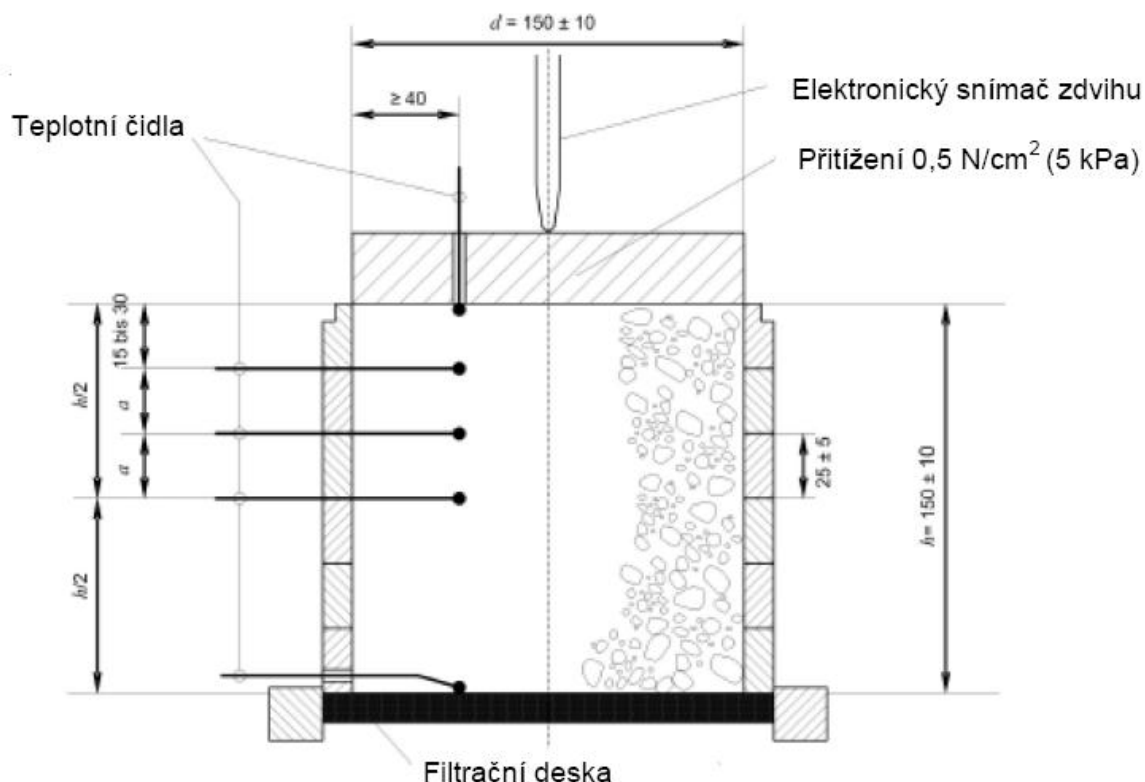
Tab. 3.9 – Mezní hodnoty minerálního kritéria dle rakouské normy *ÖNORM B 4810* [16]

V podstatě se minerální kritérium dosud osvědčovalo, protože směsi, které byly podle něho hodnoceny jako nenamrzavé, prokázaly nenamrzavost i v praxi. Mezní hodnoty minerálního kritéria se však v mnoha případech ukázaly jako příliš přísné a mineralogická metoda vyhodnocování jako nepřesná. Některé příklady v minulosti často používaných směsí se v praxi ukázaly jako nenamrzavé, přitom však mezní hodnoty minerálního kritéria nesplňovaly. Proto se objevila snaha tuto metodu upravit nebo modifikovat hodnoty kritéria.

3.4.2.1 Příprava zkušebních těles

Zkouška se provádí na směsi zeminy propadlé sítem o velikosti oka 31,5 mm. Připraví se dvě válcová zkušební tělesa, která se zhutní standardní proctorovou energií při optimální vlhkosti. Používají se dva typy forem malé a velké proctor formy. Malá o vnitřním průměru 150 mm, výšce 150 mm anebo velká o vnitřním průměru 250 mm a výšce 150 mm. Do každého vzorku se umístí teplotní čidla a to ve vodorovném směru min 4 cm od hrany vzorku, ve svislém směru 1,5 až 3 cm pod horní stranu vzorku, dále v polovině vzorku a jedno mezi tyto dvě čidla (viz obr. 3.13). Další čidlo je umístěno na spodní straně vzorku na filtrační destičce,

kteří slouží k ověření teploty vody. Poloha čidel pro určení teplotních gradientů musí být ve vertikálním směru splněna s přesností ± 5 mm. [17]



Obr. 3.13 – Rozmístění teplotních čidel a rozměry formy [17]

3.4.2.2 Průběh zkoušky

Obě zkušební tělesa se umístí do izolované vany tak, aby mohly být zespodu saturovány vodou o teplotě $(4 \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C})$ a zatíženy po dobu 24 hodin. Výška hladiny vody je nastavena tak, aby sahala 1 až 2 cm nad spodní hranu vzorku. Po této době proběhne počáteční měření.

Následuje zmrazování vzorků po dobu 4 dnů, kdy by mělo být docíleno teploty $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ uprostřed tělesa. Tento stav by měl být udržován po dobu 3 dnů za stálé teploty. Po uplynutí této doby nadchází rozmrazování vzorků při pokojové teplotě po dobu 24 hodin. [17]

3.4.2.3 Vyhodnocení zkoušky

Hodnoty mrazových zdvihů jsou měřeny dvakrát denně s přesností $\pm 0,1$ mm. Teplota se měří každou hodinu. Průměrná hodnota zdvihů zjištěná z obou vzorků se vynese v závislosti na čase. Maximální odchylka jednotlivých výsledků od střední hodnoty by se měla pohybovat v rozmezí ± 2 mm. Podle normy ÖNORM B

4811 je zkoušený vzorek považován za nenamrzavý, pokud maximální mrazový zdvih po ustálení nepřesáhne 15 mm. [17]

3.4.3 Finsko

Ve Finsku se nejprve při zkoušení namrzavosti sleduje obsah jemných částic a teprve posléze se v nerozhodných případech provede zkouška mrazových zdvihů. Zkouška se skládá ze tří samostatných zkoušek mrazových zdvihů s různým zatížením (2, 20 a 40 kPa) a rozmrazováním. Během rozmrazování je vzorek zatížen 20 nebo 40 kPa. Vzorky se při horní části ochlazují a ve spodní části je udržována vyšší teplota. V průběhu zkoušky se sleduje průnik námrazy do vzorku a také zdvih vzorku. [18]

3.4.3.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa jsou buď z neporušené zeminy (v přírodním stavu) nebo tělesa, které jsou zhutněná do forem. V závislosti na zrnitosti použité zeminy se používají zkušební formy o průměru 150 mm, 100 mm, nebo 80 mm.

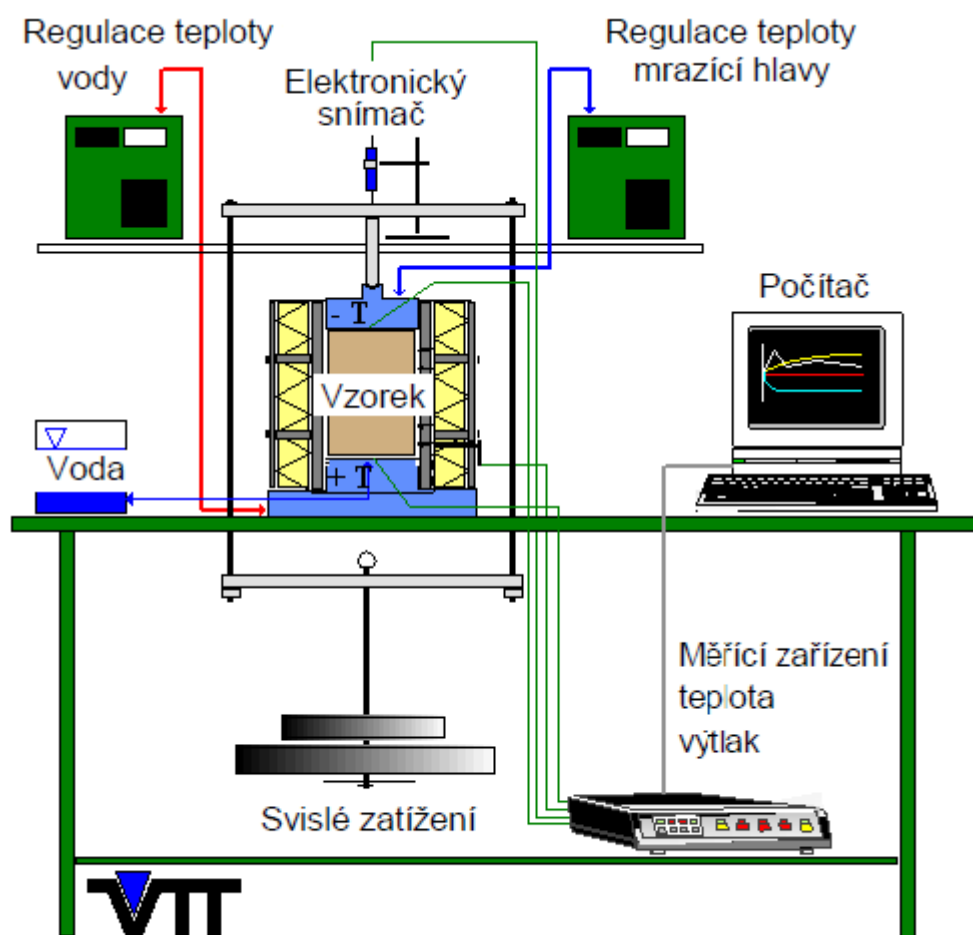
- Přírodní zkušební tělesa:
 - ❖ Nezmrzlý vzorek – odebírá se do tenkostěnné ocelové trubky o vnitřním průměru 100 mm a výšky 150 – 200 mm. Vzorek se pořizuje opatrným zatlačením trubky do dna kopané sondy tak, aby byla zachována původní struktura zeminy. Konce trubek jsou neprodyšně uzavřeny a jsou přepravovány ve svislé poloze. Vzorky je nutné udržovat při pokojové teplotě.
 - ❖ Zmrzlý vzorek – odebírá se prostřednictvím jádrového vývrtu o vnitřním průměru 100 mm. Jádrový vývrt je posléze v laboratoři rozřezán na vzorky výšky 100 – 300 mm. Zmrzlé vzorky je nutné před uložením do zkušebního přístroje udržovat při teplotě -3 až -1 °C.
- Zhutněná tělesa do forem:
 - ❖ Tělesa jsou vytvořena hutněním po tenkých vrstvách do formy o průměru 100 mm a výšky 100 mm. Aby bylo usnadněno vyjmutí vzorku z formy a následná instalace do zkušební buňky, jsou stěny a dno formy obaleny tenkou plastickou fólií. Z přebytečného materiálu je určena vlhkost.

Před uložením těles do zkušebních buněk jsou zváženy, změřeny a dále je ze zbytků zeminy určena vlhkost. Vložení do zkušebního zařízení probíhá při teplotě 0 ± 1 °C. vzorek je umístěn na filtrační papír, uložený na filtrační desce. Na vzorek je položena chladicí hlava přetažená gumovou membránou. Tato membrána je následně utěsněna silikonem. V poslední fázi přípravy je osazeno čidlo, které měří vertikální zdvih a zatěžovací rám. [18]

3.4.3.2 Průběh zkoušky

Před zahájením zkoušky se nechá těleso zmrazit bez zatížení, kvůli dosažení úplné saturace vzorku. Posléze se nechá těleso po dobu 24 hodin rozmrazit. Teplota vody, která cirkuluje jak v dolní, tak i horní části zkušební buňky je + 3 °C. V této fázi je obvyklé zatížení o velikosti 20 kPa. Se zahájením zkoušky se zatížení sníží na pouhé 2kPa. Vrchní část tělesa je zmrazována teplotou – 3 °C, spodní část je vystavena teplotě + 1 °C. Tyto podmínky je nutné udržovat minimálně po dobu 24 hodin. Zmrazování se ukončuje v době, kdy celková hodnota prostupu mrazu (promrznání mínus mrazový zdvih) je nulová po dobu alespoň 4 hodin. Po ukončení zmrazování je zatížení opět zvýšeno na 20 kPa, teplota horní části je změněna na – 0,5 °C a spodní části na + 15 °C. Rozmrznání je ukončeno ve chvíli, kdy výška vzorku je ustálena alespoň po dobu 4 hodin. Po splnění této fáze následuje opětovné zmrazování, tentokrát při zatížení 20 kPa. Po tomto kroku následuje rozmrazání při zatížení 40 kPa. Poslední fáze zkoušky je opětovné zmrazování vzorku zeminy pod zatížením 40 kPa.

Po ukončení zkoušky se vyjme vzorek, odstraní se gumová membrána, změří se konečná výška a tloušťka zmrazené části, zdokumentují se vzniklé ledové čočky a určí se vlhkost zmrazené a nezmrazené části vzorku. [18]



Obr. 3.14 – Zařízení k měření mrazových zdvihů (Finsko) - upraveno [18]

3.4.3.3 Vyhodnocení zkoušky

- **Mrazový zdvih (h)** – vyjadřuje změnu výšky zkušební vzorku v průběhu zkoušky. Vyčísluje se jako rozdíl mezi skutečnou hodnotou v průběhu testu a původní hodnotou stanovenou před začátkem zkoušky [mm].
- **Výška nezamrzlé části zkušební tělesa (Zs)** – se vypočte jako výška izotermie 0 °C z měřeného teplotního profilu za pomoci interpolace (na konci měřicího cyklu) [mm].
- **Hloubka promrzání (Zj)** – se vypočte jako hloubka izotermie 0 °C užitím měřeného teplotního profilu stěny zkušební buňky. Hloubka promrzání je součtem počáteční výšky zkušební tělesa (H) a mrazového zdvihu (h) odečtených od výšky nezamrzlé části zkušební tělesa (Zs) [mm].

$$Z_j = H + h + Z_s$$

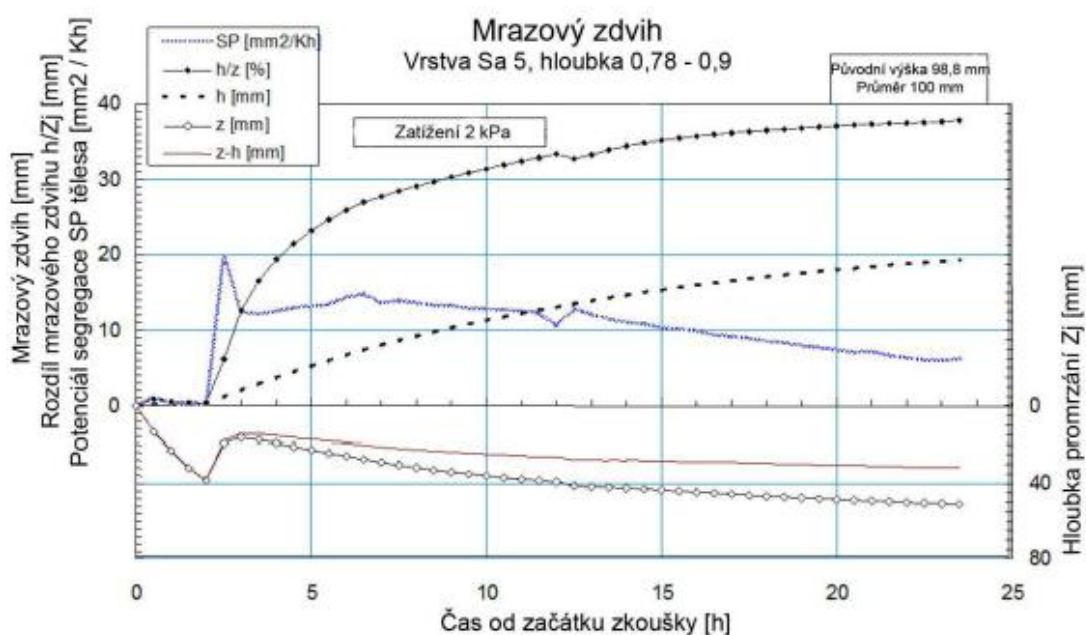
- **Poměr mrazových zdvihů (h / Z_j)** – vypočítá se jako poměr zdvihu mrazu a promrzání. Je předpokládán jako relativní podíl mezi mrazovým zdvihem a hloubkou promrzání [%].
- **Rychlost průběhu mrazového zdvihu ($\Delta h / \Delta t$)** – vyjadřuje přírůstek mrazového zdvihu děleného délkou skutečného čtení intervalu [mm/den].
- **Teplotní gradient ($\text{grad}T$)** – jedná se o teplotní rozdíl mezi izotermou 0°C a horní částí zkušebního tělesa poděleným tloušťkou zmrzlého zkušebního tělesa [$^\circ\text{C} / \text{m}$].

$$\text{grad}T = 1000 \times \frac{0 - T}{Z_j}$$

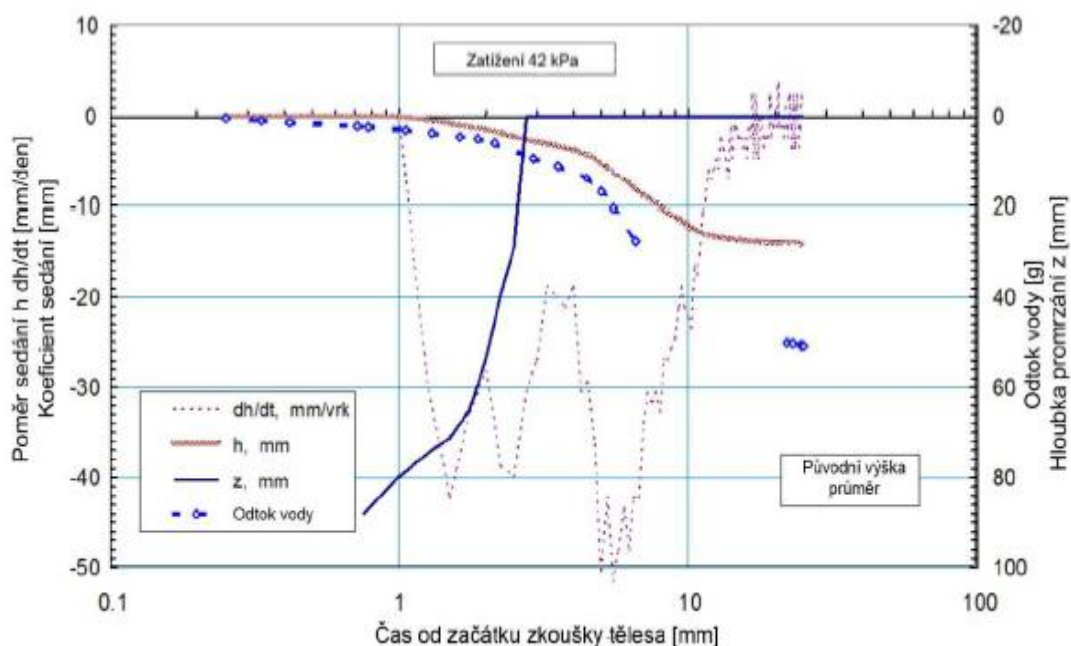
- **Závislost koeficientu mrazového zdvihu (SP)** – rozdíl mezi poměrem mrazového zdvihu a aktuálním teplotním gradientem nad zmrzlou částí zkušebního tělesa [mm^2 / Kh].

$$SP = \frac{1000}{24} \times \frac{\Delta h / \Delta t}{\text{grad}T}$$

- **Koeficient konsolidace během tání (c_{vt})** – stanovuje se z výsledků fáze rozmrazování. Využívá se pro posouzení pórového tlaku v tající zemině a doby dodatečné konsolidace po tání. [19]



Graf. 3.4 – Grafické vyhodnocení zkoušky zmrazování (Finsko) - upraveno [19]



Graf. 3.5 – Grafické vyhodnocení zkoušky rozmrazování (Finsko) - upraveno [19]

3.4.4 Francie

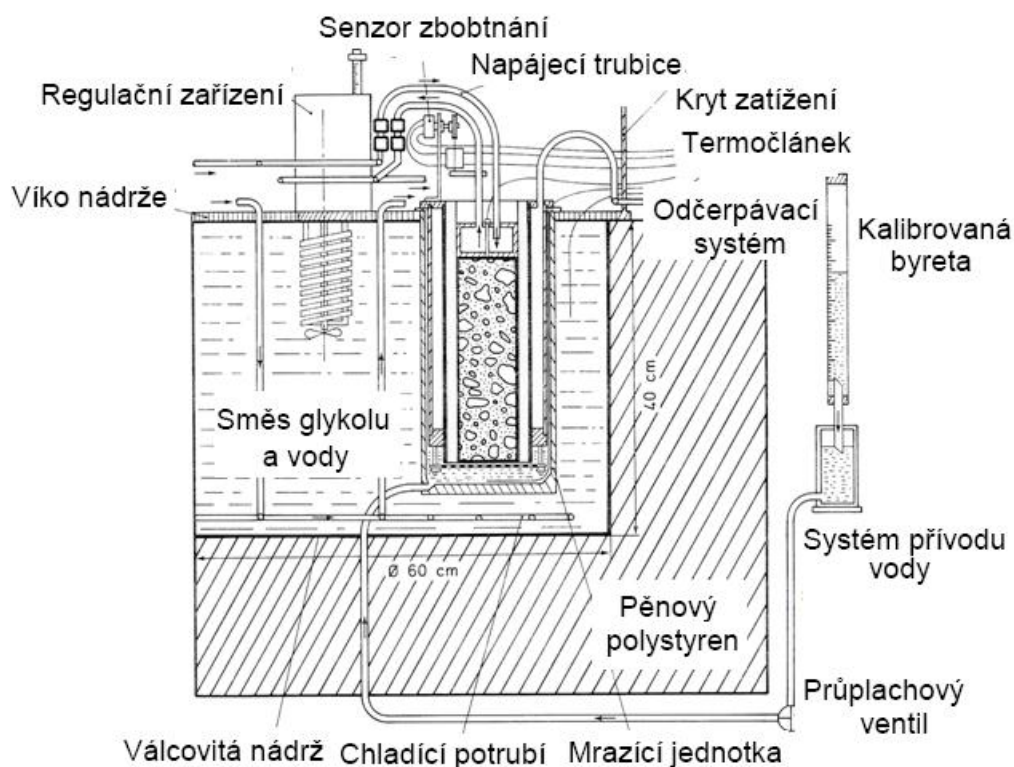
Na počátku 70. let (1962/1963) Francie zažila velmi kruté zimy, které způsobily velké škody na komunikacích a chodnících, což bylo prvním podnětem četných výzkumů zkoumání namrzavosti s cílem vytvořit optimální postup a podmínky pro zkoušení zemin i druhotných materiálů.

V období let 1960 a 1970 byly pro zkoušení namrzavosti navrhovány různé zrnitostní kritéria (Casagrande, Scheible, Morton, Bedkow atd.), které ovšem ne vždy vystihovaly reálné chování zeminy či jiného materiálu. Díky procesům, které se odehrávají v namrzavých materiálech při zmrazování a rozmrazování dochází k tepelným přeměnám, které závisí na chemicko-fyzikálních vlastnostech a proudění vody v zemině. Proto byl v období let 1965 až 1970 v Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées a v CNRS Aerothermics Laboratory započat výzkum, jehož výsledkem je metoda zkoušení materiálu in situ (přímá zkouška). [20]

Zkoušecí zařízení (viz obr. 3.15) se skládá z mrazící jednotky (freezing unit), která obsahuje zkušební vzorek ponořený do nádoby s vodou o teplotě 1 nebo 2 °C, který je nepřetržitě nasáván vodou. Chladicí hlava zmrazuje vzorek z vrchní strany teplotou -5,7 °C. Tento systém je schopen měřit množství nasávané vody. Zajištění izolovanosti vzorku je provedeno umístěním mrazící jednotky, která se

nachází v prostoru o tlaku $< 1 \text{ Pa}$ a dále je vzorek izolován prostřednictvím pěnového gumového obalu, díky jemuž je umožněna boční deformace při nárůstu objemu. Mrazový zdvih je měřen potenciometrem při horní straně vzorku (swelling sensor).

Tato zkouška byla původně vyvinuta pouze pro zeminy o velikosti zrna do 5 mm. Kvůli stále častějšímu používání hrubozrnných materiálů používaných do konstrukcí pozemních komunikací se stalo nutností zkoumat namrzavost i u hrubších zemin a samozřejmě i u nestandardních materiálů (R-materiál, recyklát asfaltový atd.) V roce 1980 byl vyvinut nový zkušební přístroj, který byl schopen zkoušet vzorek směsi frakce 0/20 mm – forma je o poloměru $150 \pm 10 \text{ mm}$ a výšky $320 \pm 10 \text{ mm}$. V roce 1989 byla tato zkouška dále rozšířena na směsi frakce 0/200 mm (vzorek o průměru 865 mm a délky 1050 mm). Pro kontrolu bylo provedeno zkoušení namrzavosti jemné zeminy na obou zařízeních, jejímž výstupem byly totožné výsledky.



Obr. 3.15 – Zařízení k měření mrazových zdvihů (upraveno) [20]

3.4.4.1 Příprava zkušebních těles

Zkouška vyžaduje 3 válcové vzorky zeminy či jiného materiálu, která jsou zhutněna standardní nebo modifikovanou Proctorovou hutnící energií při vlhkosti

odpovídající min. 95% maximální suché objemové hmotnosti. Rozměry zkušebních vzorků jsou odvozeny od velikosti zrnitosti zkoušeného materiálu. Těleso s průměrem 150 ± 10 mm a délkou 320 ± 10 mm se používá pro materiál se zrnitostí 0/20 mm. Těleso s průměrem 865 mm a délky 1050 mm se používá pro materiál o zrnitosti 0/200 mm.

3.4.4.2 Průběh zkoušky

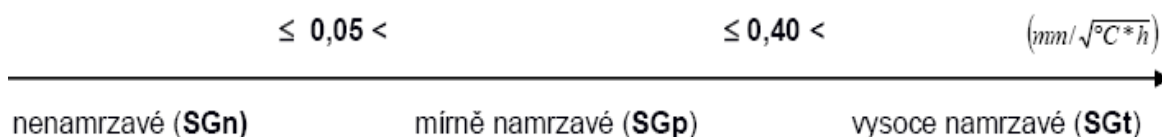
Zkušební tělesa se nechají po dobu 18 hodin ± 2 hod odpočívat, následně je spodní část zkušebního vzorku ponořena do vody o teplotě 1 nebo 2 °C a horní část vzorku je zmrazována teplotou -5,7 °C po dobu 12 dní. Po ukončení zkoušky je provedeno měření zdvihu, zaznamenání úrovně plochy, pozice, tloušťky a tvaru ledové čočky. Vzorky jsou vyfoceny a podélně rozpůleny pro určení obsahu vody v jednotlivých vrstvách.[20]

3.4.4.3 Vyhodnocení zkoušky

Měří se mrazový zdvih zkušebních těles. Určuje se lineární závislost mezi mrazovým zdvihem a indexem mrazu I_m [°C-den], který je aplikován na povrch vzorku. Výsledek periody zmrazování je vyjádřen kombinací intenzity mrazu a doby trvání teplot pod bodem mrazu. Index mrazu je potom definován jako suma průměrných denních teplot během zmrazování [20]

$$I = \int_0^t T(^{\circ}C)dt$$

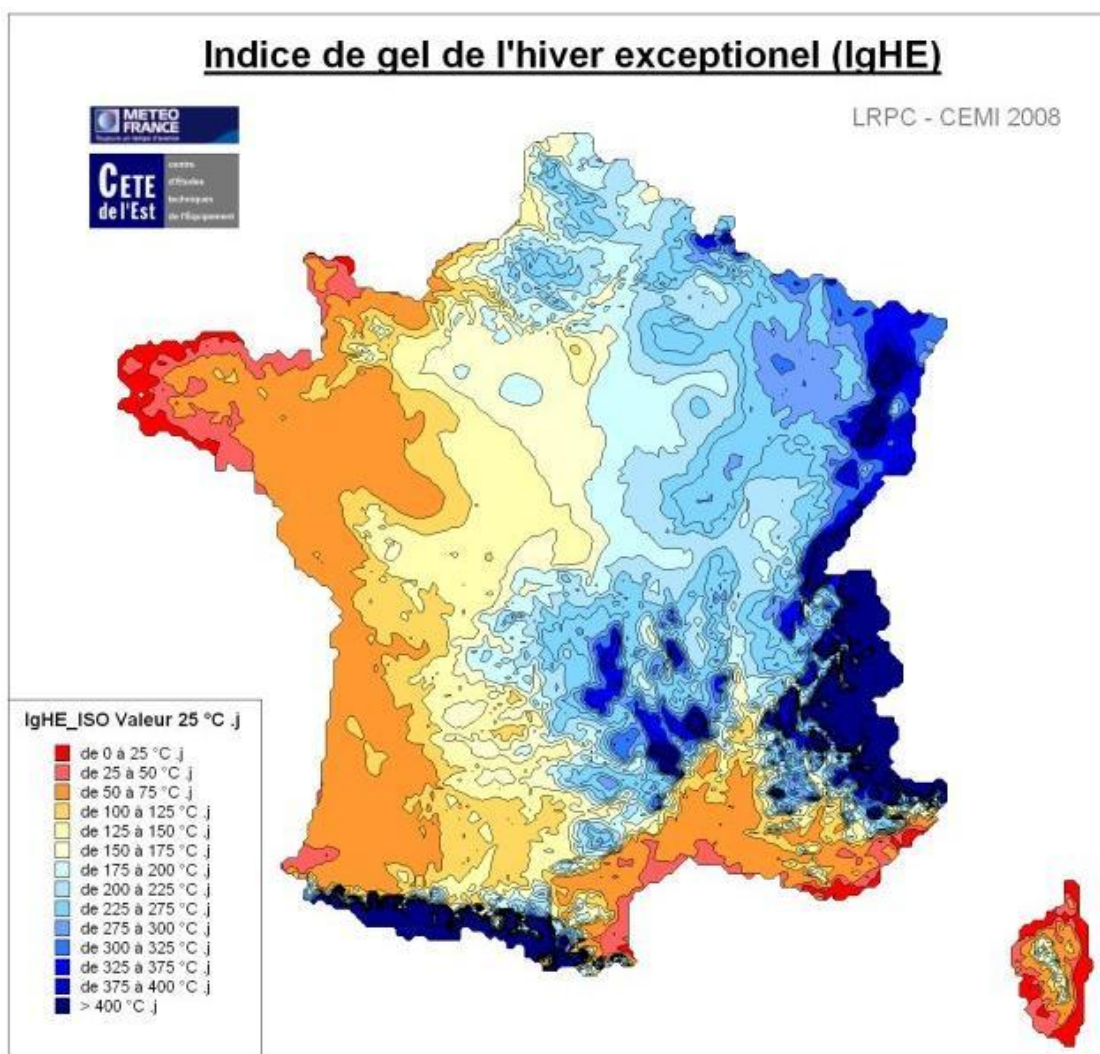
Následně se určí gradient této lineární závislosti, který se užívá k charakterizování míry namrzavosti zkoušeného materiálu. Pro návrh vozovek z hlediska ochrany proti mrazu jsou stanoveny dle [18] dva gradienty hraničních hodnot, které definují tři stupně namrzavosti materiálů:



Graf 3.6 – Stupně namrzavosti ve Francii [20], (upraveno)

3.4.4.4 Index mrazových oblastí ve Francii

V charakteristických oblastech indexu mrazu jsou zahrnuty hodnoty získané v průběhu několika desítek let. Riziko poškození podloží vozovky namrzavostí je hodnoceno ve vztahu k referenční zimě, která je mnohem vážnější než běžná zima ve Francii. Tento koncept rizika znamená, že způsob jakým je brán mráz v úvahu, je velmi odlišný od všech skandinávských zemí. Níže je na obr. 3.16 uvedena mapa indexu mrazu za dvě největší referenční zimy. Velmi důležitá hodnota indexu mrazu během výjimečné zimy je 400 [°C-den] na severovýchodě země (vyjma v horské oblasti). Tato hodnota odpovídá zimě v roce 1955-1956 nebo 1962-1963, která již dlouho dobu nebyla překonána. [20]



Obr. 3.16 – Mapa výjimečného indexu mrazu ve Francii [20]

3.4.5 Přehled zkoušení namrzavosti v EU

V níže uvedené tabulce (viz tab. 3.10), je zaznamenán přehled charakteristik, hodnocení a zkoušení namrzavosti v některých zemích Evropské unie, které byly uspořádány pracovní skupinou CEN TC 227, WG4, která byla vytvořena evropskou komisí pro normalizaci. Tato skupina, má za úkol zpracovat veškeré známé poznatky týkající se namrzavosti do podoby ucelené evropské normy.

Metoda určení	CRREL	TRRL	LCPC	Rakousko	Švýcarsko	VTT
Země vývinu - popis metody	UK	FR	AU	ZE	SWE	FI
Norma	BS 812-124:1989	AFNORF NF Jan 1996	ØNORM B 4810	SN 670 321 a	-	TPPT-R07
Výška vzorku	152	320	150	127	580	150-200
Průměr vzorku	102	150	150	158	122	100
Kontrola bočního tření	voskovaný	namazaná	multi-	kónický	multi-	-
	papír	pryž	kroužek	epoxid	kroužek	
Zmrazovací teplota [°C]	-17	-5,7	-	-7,5	-	-3
Spodní teplota [°C]	4	1 až 2	-	1,5	4 až 6	1
Svislé zatížení [kPa]	0	0	-	1,4	proměnlivé	proměnlivé
Doba trvání zkoušky [hod]	250	150 - 200	-	24-zmrazov. 24-rozmrazání	400	min 24-zmraz. perioda
Posuzované kritérium	mrazový zdvih za den	celkový mrazový zdvih	zdvih/ index mrazu (mm/√°C*h)	minerální kritéria	zdvih/ index mrazu (mm/√°C*h)	mrazový zdvih
						mrazový poměr

Tab. 3.10 – Charakteristiky zkoušení namrzavosti v některých zemích EU (upraveno) [21]

- Vysvětlivky:
 - ❖ CRREL - Výzkumná inženýrská laboratoř (USA)
 - ❖ TRRL - Výzkumná laboratoř pro dopravu (UK)
 - ❖ LCPC - Výzkumná laboratoř pro mosty a chodníky (FR)
 - ❖ VTT - Národní výzkumná laboratoř pro dopravu (SWE)

4 PRAKTICKÁ ČÁST

V této části diplomové práce popisují provedení laboratorních zkoušek a dále zde prezentují i jejich výsledky. Zkoušky jsem prováděl v laboratoři ústavu pozemních komunikací Fast VUT v Brně. Jednotlivé protokoly a výstupy z provedených zkoušek jsou uvedeny v příloze mé práce.

4.1 Klasifikace zeminy

4.1.1 Popis vzorku

Zkoumaný vzorek zeminy byl odebrán v areálu stavební fakulty na ulici Žižkova, ze stavby podzemních garáží (viz obr. 4.1). Za přirozené vlhkosti má tmavě hnědou barvu. V suchém stavu je barvy hnědo – šedé a dále je velmi prašná, což značí vysoký podíl jemných prachovitých částic.



Obr. 4.1 – Zkoumaný vzorek zeminy

4.1.2 Zrnitost

Stanovení zrnitosti jsem provedl v souladu s normou ČSN CEN ISO/TS 17892-4. Zrnitost zeminy jsem zjistil pomocí promývací metody přes sestavu kontrolních sít. Tuto metodu jsem upřednostnil před prosévací metodou, jelikož zemina je velmi prašná a tedy v ní lze předpokládat větší podíl jemných částic. Před samotnou zkouškou jsem vizuálně zkontroloval jednotlivá síta, zda nejsou nějak poškozena a odstranil zanesená zrna z jednotlivých otvorů sít.



Obr. 4.2 – Zůstatek na sítích podle pořadí zleva: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8

Pořadí jednotlivých sít jsem uspořádal takto: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16 mm. K síťovému rozboru jsem použil zkušební navážku o hmotnosti 1347,2 g. Navážku jsem nechal saturovat vodou po dobu 1 hodiny kvůli uvolnění slepených zrn a potom jsem ji promýval přes síta sestavená v pořadí 2; 0,063 mm, dokud voda z výtokové trubice nebyla viditelně čistá. Sestavu sít se zachycenými frakcemi jsem vložil do sušárny a sušil při teplotě 50 °C do ustálené hmotnosti. Po vysušení jsem provedl síťový rozbor v třídícím vibračním přístroji a zvážil jednotlivé frakce zachycené na kontrolních sítích. Jednotlivé frakce jsem vyhodnotil podle níže uvedeného vztahu.

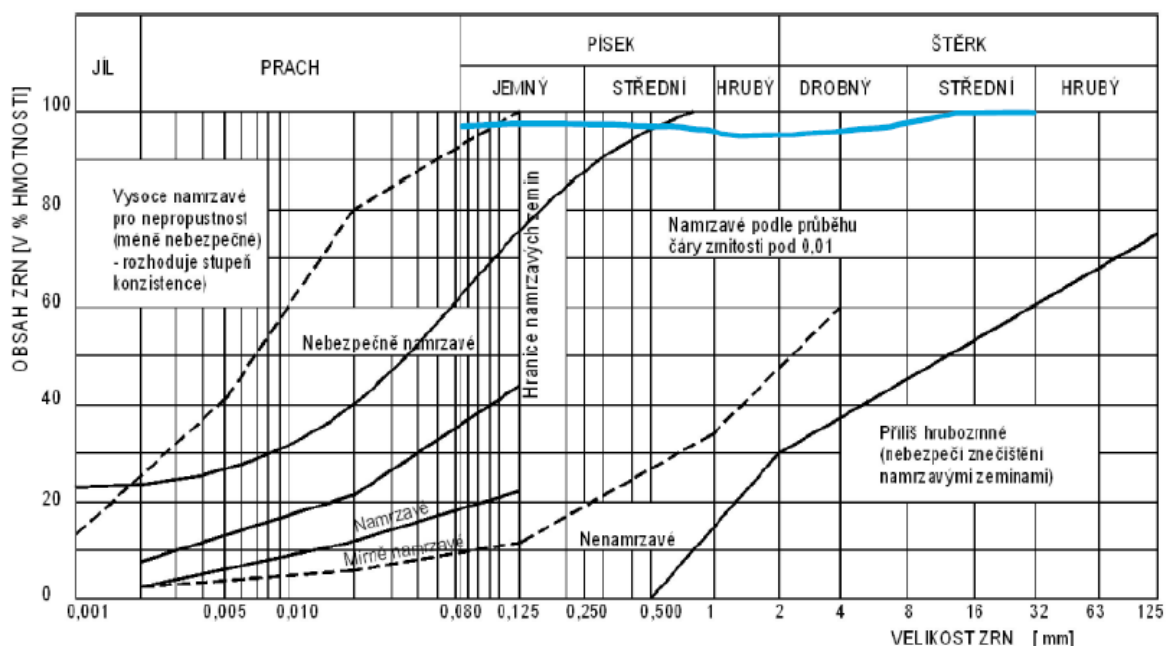
$$f_n = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{m} \cdot 100$$

f_nfrakce zeminy propadlá sítím [%]

m_1hmotnost zeminy propadlé sítím s otvorem [g]

m_2, m_nhmotnost zeminy propadlé sítí po sobě jdoucími až do vhodně zvolené velikosti oka síta [g]

mcelková hmotnost zkušebního vzorku [g]

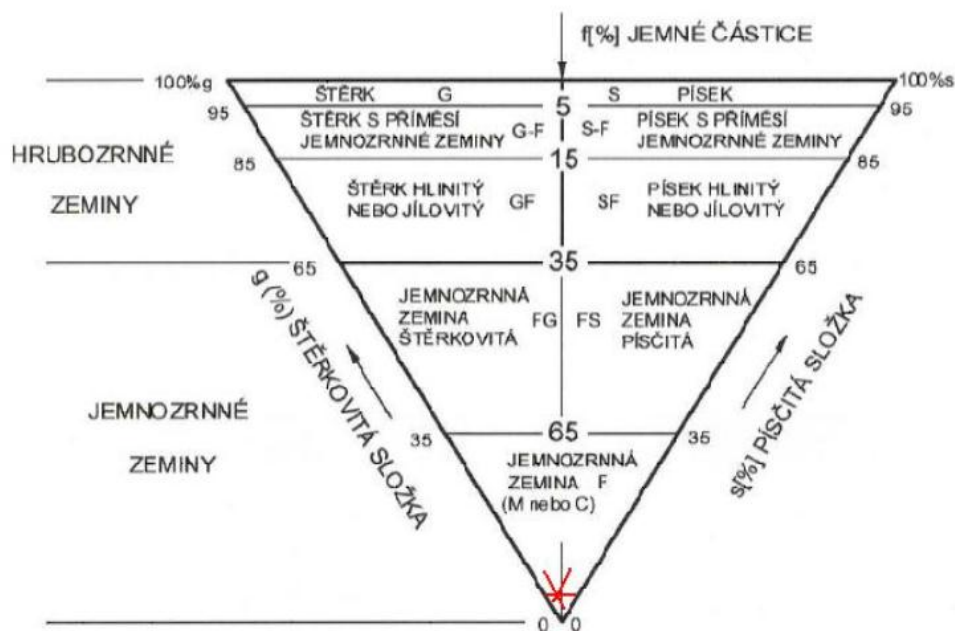


Graf 4.1 – Křivka zrnitosti zkoumané zeminy

Z křivky zrnitosti jsem odečetl procentuální zastoupení jednotlivých složek zeminy:

- Obsah jemných částic $f = 96 \%$
- Obsah písčitých částic $s = 1 \%$
- Obsah štěrkovitých částic $g = 3 \%$

Prostřednictvím trojúhelníkového diagramu pro částice do 60 mm (viz graf 4.2) jsem zjistil, že se jedná o jemnozrnnou zeminu.



Graf 4.2 – Trojúhelníkový diagram pro částice do 60 mm (upraveno) [22]

4.1.3 Stanovení konzistenčních mezí

Velmi důležitým znakem jemnozrnných zemin je jejich plasticita, proto tedy bylo nezbytné stanovit vlhkosti na mezích tekutosti, plasticity a index plasticity. Stanovení konzistenčních mezí (Atterbergových) jsem provedl podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-12.

4.1.3.1 Mez tekutosti



Obr. 4.3 – Penetrometr 80g/30° pro určení meze tekutosti

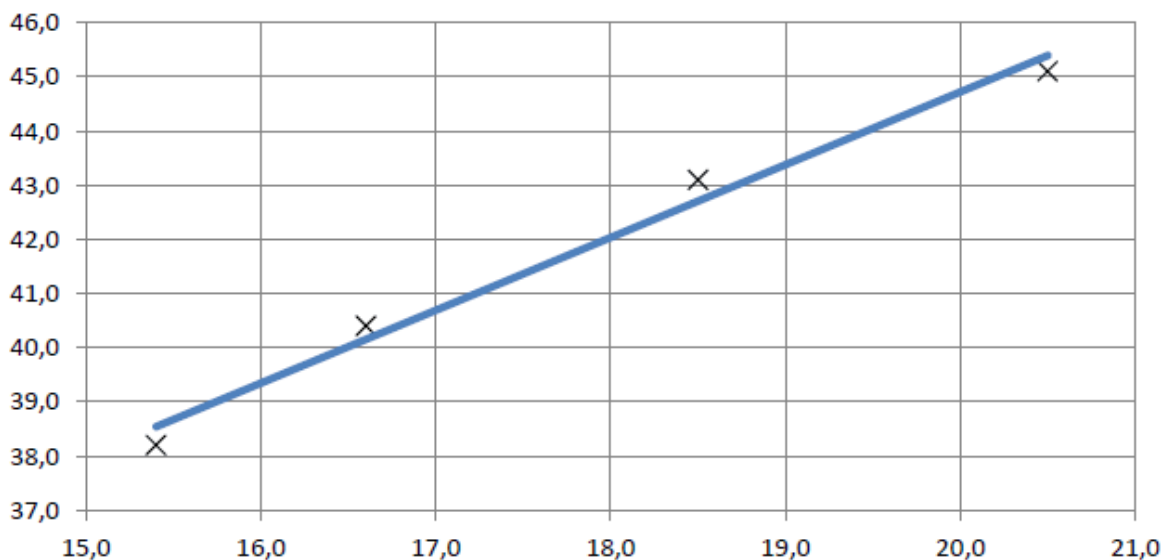
Mez tekutosti je vlhkost zeminy, při které zemina přechází ze stavu tekutého do stavu plastického. Stanovení meze tekutosti jsem provedl pomocí kuželové zkoušky za použití kužele o hmotnosti 80 g a s vrcholovým úhlem 30 °. V první řadě jsem zeminu prosel přes síto o velikosti ok 0,5 mm a poté jsem ji rozdělil na 4 vzorky o přibližné hmotnosti 200 g. Do jednotlivých vzorků jsem přidal potřebné množství destilované vody a míchal je, dokud nevznikla suspenze. Míchání je velmi důležité, protože nedostatečné promíchání, nebo vmíchání vzduchových bublin může výrazně ovlivnit konečné výsledky. Vzniklou pastou jsem vyplnil porcelánovou misku a zarovnal souběžně s okrajem. Penetrační kužel se nastavil tak, aby se hrotem dotkl uhlazeného povrchu zeminy, uvolnil se a po dobu 5 sekund se nechal vnikat do vzorku. Poté jsem odečetl penetraci s přesností 0,1 mm a opakoval, dokud se výsledky neustálily. Na odebrané části zeminy jsem stanovil její vlhkost podle vztahu:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100$$

wvlhkost [g]

m_whmotnost vlhké zeminy vzorku [g]

m_shmotnost suché zeminy vzorku [g]



Graf 4.3 – Stanovení meze tekutosti w_L

4.1.3.2 Mez plasticity

Mez plasticity je empiricky stanovená vlhkost, při které zeminy přechází ze stavu tekutého do stavu plastického. Ze zeminy vzorku připraveného stejným způsobem jak pro zkoušení meze tekutosti jsem odebral cca 50 g. Zkoušený vzorek zeminy jsem vysušil do té míry, až z ní šla zformovat koule. Tu jsem vysoušel válením a hnětením v dlaních, dokud se neobjevily jemné prasklinky. Vzorek jsem rozdělil na 4 stejné části. Každou tuto část jsem roloval na skleněné desce za stejného tlaku dlaně ruky, dokud se válečky o velikosti 3 mm nezačali rozpadat v příčném i podélném směru. Válečky jsem vložil do váženek a stanovil jejich jednotlivé vlhkosti.



Obr. 4.4 – Vzorky připravené pro stanovení vlhkosti

4.1.3.3 Index plasticity

Index plasticity je rozdíl meze tekutosti a meze plasticity a vyjadřuje schopnost zeminy vázat vlhkost, aniž by došlo ke změně jejího stavu. Dále slouží i jako ukazatel množství jílovitých minerálů. Hodnotu indexu plasticity jsem stanovil podle vzorce:

$$I_p = w_L - w_P$$

I_pIndex plasticity [%]

w_Lvlhkost při mezi tekutosti [%]

w_Pvlhkost na mezi plasticity [%]

4.1.4 Zatřídění zeminy

Vlhkost při mezi tekutosti w_L [%]	Vlhkost při mezi plasticity w_P [%]	Index plasticity I_p [%]
42	19	23

Tab. 4.1 – Konzistenční meze zkoušeného vzorku zeminy

Po vynesení konzistenčních mezí do Casagrandeho diagramu plasticity (viz graf 4.4), jsem stanovil plasticitu jemnozrnné zeminy.

Diagram plasticity pro jemnozrnné zeminy



Graf 4.4 – Diagram plasticity pro částice < 0,50 mm (upraveno) [22]

Zatřídění zeminy jsem provedl podle normy ČSN 73 6133 „Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací“ (viz tab. 4.2).

Název zeminy	Třída - symbol	Obsah jemných částic f [%]	Mez tekutosti w_L [%]	Postavení v diagramu plasticity	Vhodnost do násypu	Vhodnost do aktivní zóny
Jíl se střední plasticitou	F6 CI	96	42	nad čarou A	podmínečně vhodná	nevhodná

Tab. 4.2 – Klasifikace zeminy podle normy ČSN 73 6133

4.2 Stanovení optimální vlhkosti

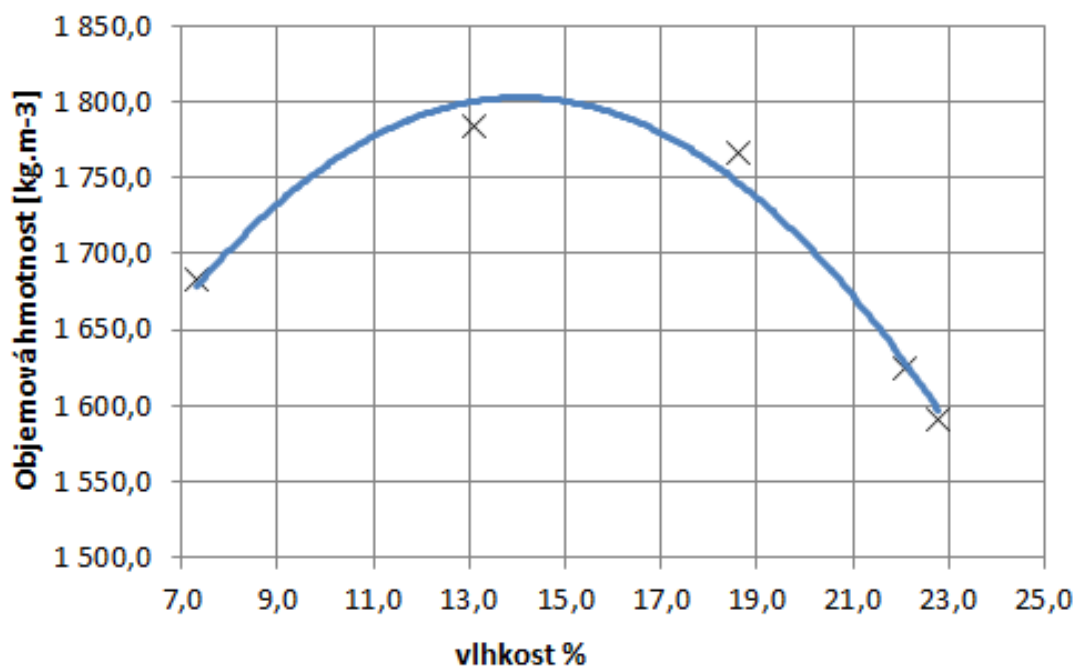
Optimální vlhkost zeminy jsem stanovil prostřednictvím Proctorovy zkoušky podle normy ČSN EN 13286-2. K hutnění jsem použil pěch o hmotnosti 2,5 kg (A) dopadající na zeminu z výšky 305 mm. Vzorek zkoušené zeminy o hmotnosti cca 10 kg jsem vysušil v sušárně při teplotě 50 °C. Vysušený vzorek jsem posléze rozdělil na 5 stejných částí o přibližné hmotnosti 2 kg. Do dílčích vzorků jsem přidal potřebné procentuální množství vody (5; 10; 15; 20; 25 %). Každý jednotlivý vzorek jsem důkladně promíchal a nechal přikrytý odstát 24 hodin, aby se rovnoměrně rozložila vlhkost ve vzorcích. Po uplynutí této doby, jsem začal se samotným zhutňováním vzorků zeminy.



Obr. 4.5 – Přístroj Proctor standard použitý pro hutnění těles

Hutnění zeminy jsem prováděl do formy válcového průřezu o vnitřním poloměru 100 mm a výšce 120 mm a to vždy ve třech vrstvách po 25 úderech. Po zhutnění jsem vzorek seříznul a uhladil zároveň s formou, poté jsem vzorek i s formou zvážil. Ze středu hutnicí formy jsem odebral vzorek zeminy, na kterém jsem stanovil jeho vlhkost. Tento průběh jsem opakoval i na zbylých vzorcích.

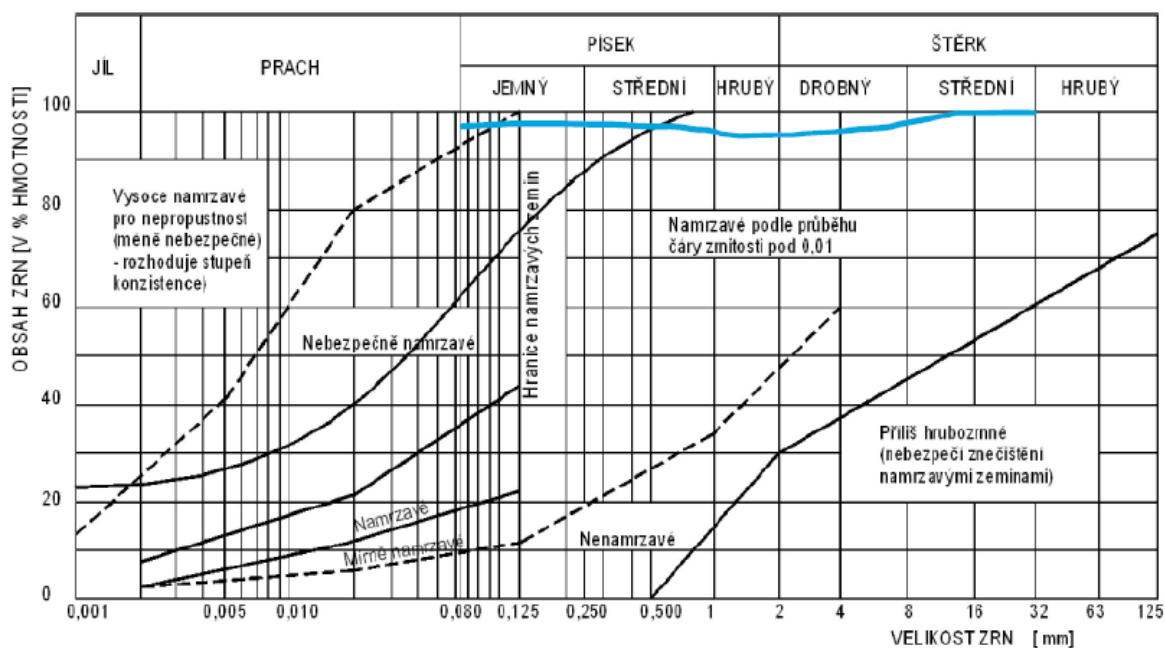
Vyhodnocením zkoušky byla obdržena křivka, kde její vrchol odpovídá maximální objemové hmotnosti zeminy $\rho_{dMAX} = 1802 \text{ kg.m}^{-3}$ dosažené při optimální vlhkosti $w_{opt} = 14 \%$ (viz graf 4.5).



Graf 4.5 – Vyhodnocení zkoušky Proctor standard

4.3 Vyhodnocení míry namrzavosti nepřímou metodou

Vzorek zkoumané zeminy byl pomocí nepřímé metody (Scheibleho kritéria) vyhodnocen jako **vysoce namrzavý** (viz graf 4.6)



Graf 4.6 – Scheibleho kritérium namrzavosti s křivkou zrnitosti zkoumané zeminy

4.4 Vyhodnocení míry namrzavosti přímou metodou

Pro stanovení míry namrzavosti jednotlivých vzorků zeminy jsem využil platnou normu ČSN 72 1191. Detailně popsany průběh zkoušek jsem rozebral v kapitole 3.3.2. Zkoušení míry namrzavosti přímou metodou jsem prováděl v laboratoři ústavu pozemních komunikací FAST VUT v Brně. Jednotlivé vzorky byly vystaveny vždy stejné zmrazovací teplotě - 4,5 °C. Měření jsem provedl na 28 vzorcích válcového průřezu s vnitřním průměrem 100 mm a výšky 120 mm.

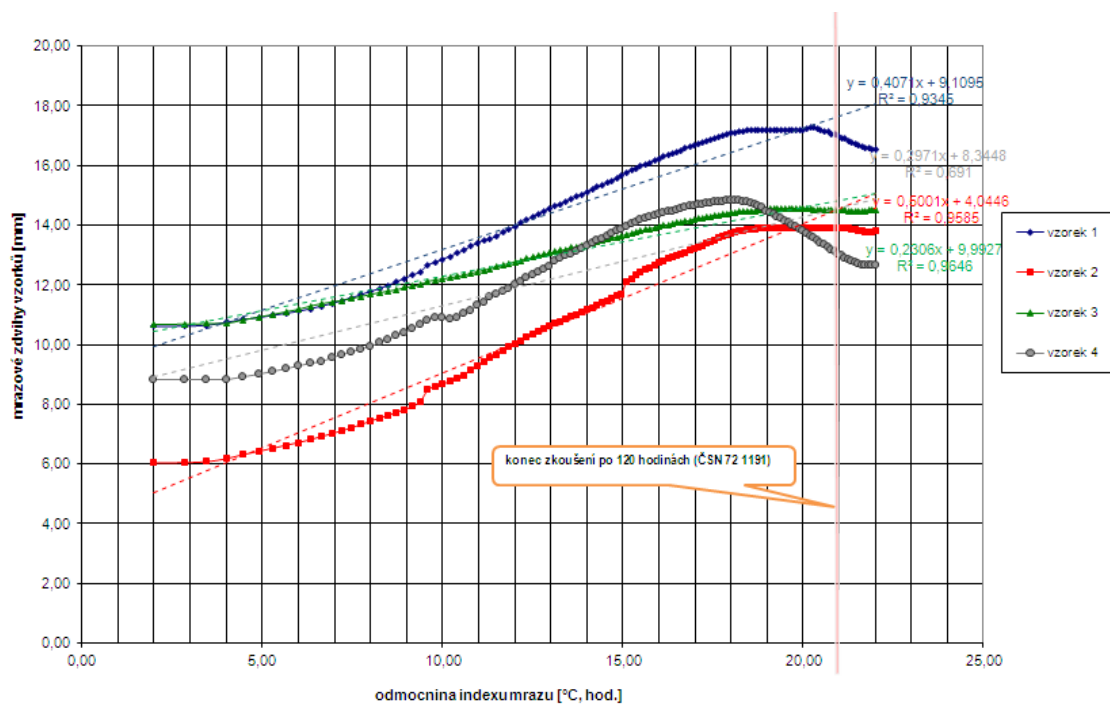


Obr. 4.6 – Uložení zkušebních těles do chladicího zařízení

4.4.1 Vzorek č. 1



Obr. 4.7 – Srovnání vzorku před a po zkoušení míry namrzavosti



Graf 4.7 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	10,68	8,82	10,61	6,04
Konečná hodnota [mm]	14,53	12,65	16,56	13,81
Rozdíl [mm]	3,85	3,83	5,95	7,77
Součinitel β	0,27	0,25	0,18	0,10
Průměrná hodnota β	0,23			

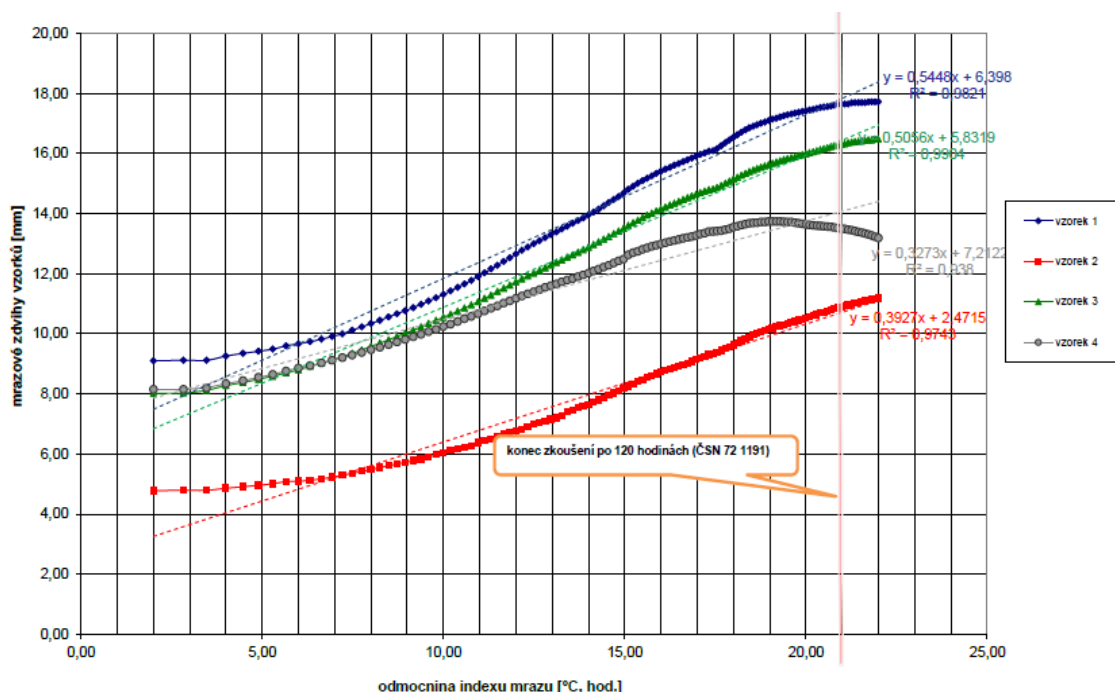
Tab. 4.3 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 1

Vzorek č. 1 byl vyhodnocen metodou A normy ČSN 72 1191 jako **nenamrzavý**.

4.4.2 Vzorek č. 2



Obr. 4.8 – Vznik ledové čočky a zdvih vzorku po ukončení zkoušky



Graf 4.8 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	8,02	8,15	9,1	4,78
Konečná hodnota [mm]	16,48	13,19	17,72	11,19
Rozdíl [mm]	8,46	5,04	8,62	6,41
Součinitel β	0,45	0,22	0,47	0,25
Průměrná hodnota β	0,34			

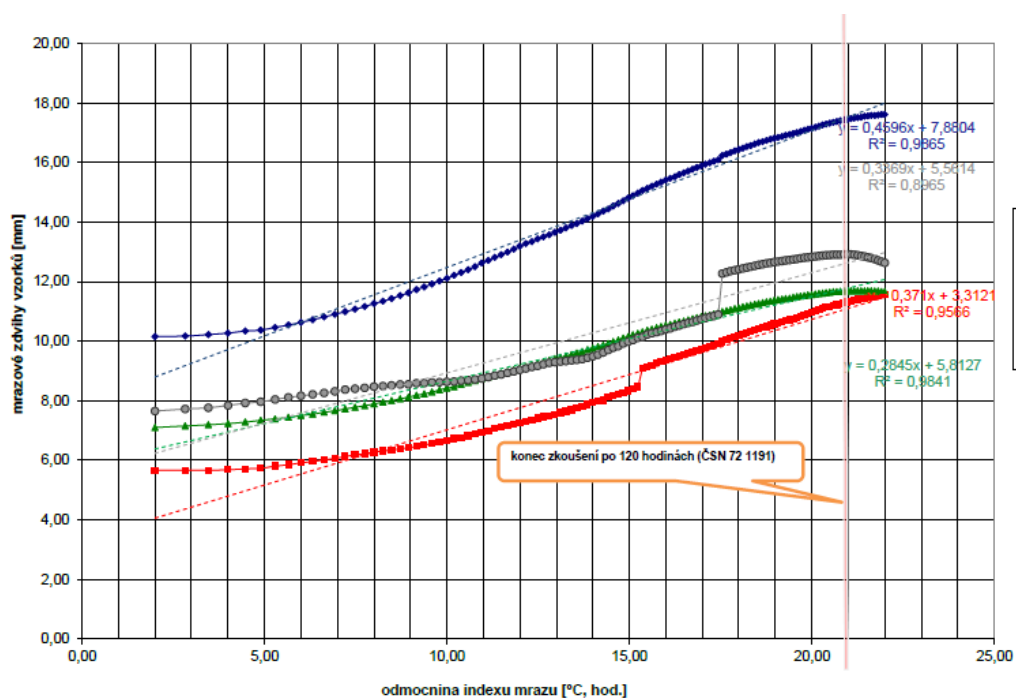
Tab. 4.4 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 2

Vzorek č. 2 byl vyhodnocen metodou A normy ČSN 72 1191 jako **mírně namrzavý až namrzavý**.

4.4.3 Vzorek č. 3



Obr. 4.9 – Saturace zkušebních vzorků před zahájením zkoušky



Graf 4.9 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	7,10	7,65	10,15	5,66
Konečná hodnota [mm]	11,66	12,63	17,61	11,56
Rozdíl [mm]	4,56	4,98	7,46	5,9
Součinitel β	0,24	0,28	0,41	0,25
Průměrná hodnota β	0,29			

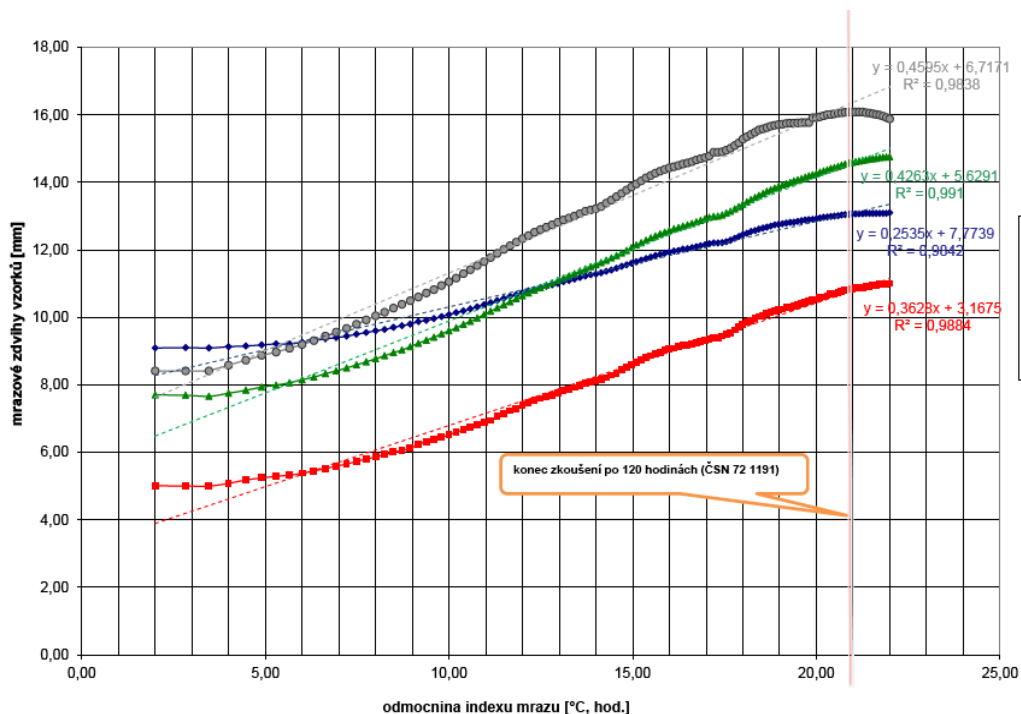
Tab. 4.5 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3

Vzorek č. 3 byl vyhodnocen metodou A normy ČSN 72 1191 jako **mírně namrzavý až namrzavý**.

4.4.4 Vzorek č. 4



Obr. 4.10 – Mrazové zdvihy jednotlivých vzorků



Graf. 4.10 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	7,70	8,41	9,09	5,01
Konečná hodnota [mm]	14,76	15,88	13,10	11,00
Rozdíl [mm]	7,06	7,47	4,01	5,99
Součinitel β	0,22	0,25	0,39	0,37
Průměrná hodnota β	0,31			

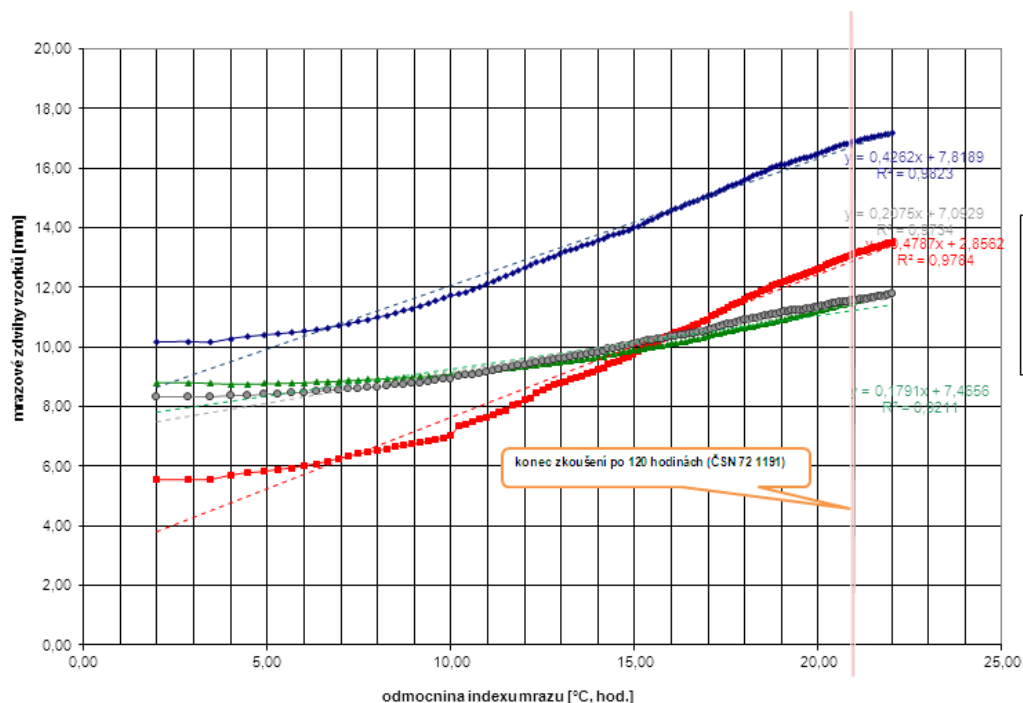
Tab. 4.6 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 4

Vzorek č. 4 byl vyhodnocen metodou A normy ČSN 72 1191 jako **mírně namrzavý až namrzavý**.

4.4.5 Vzorek č. 5



Obr. 4.11 – Pohled na rozbředlou zeminu díky tání ledové čochy



Graf 4.11 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	8,81	8,34	10,18	5,56
Konečná hodnota [mm]	11,85	11,77	17,17	13,52
Rozdíl [mm]	3,04	3,43	6,99	7,96
Součinitel β	0,21	0,21	0,4	0,25
Průměrná hodnota β	0,27			

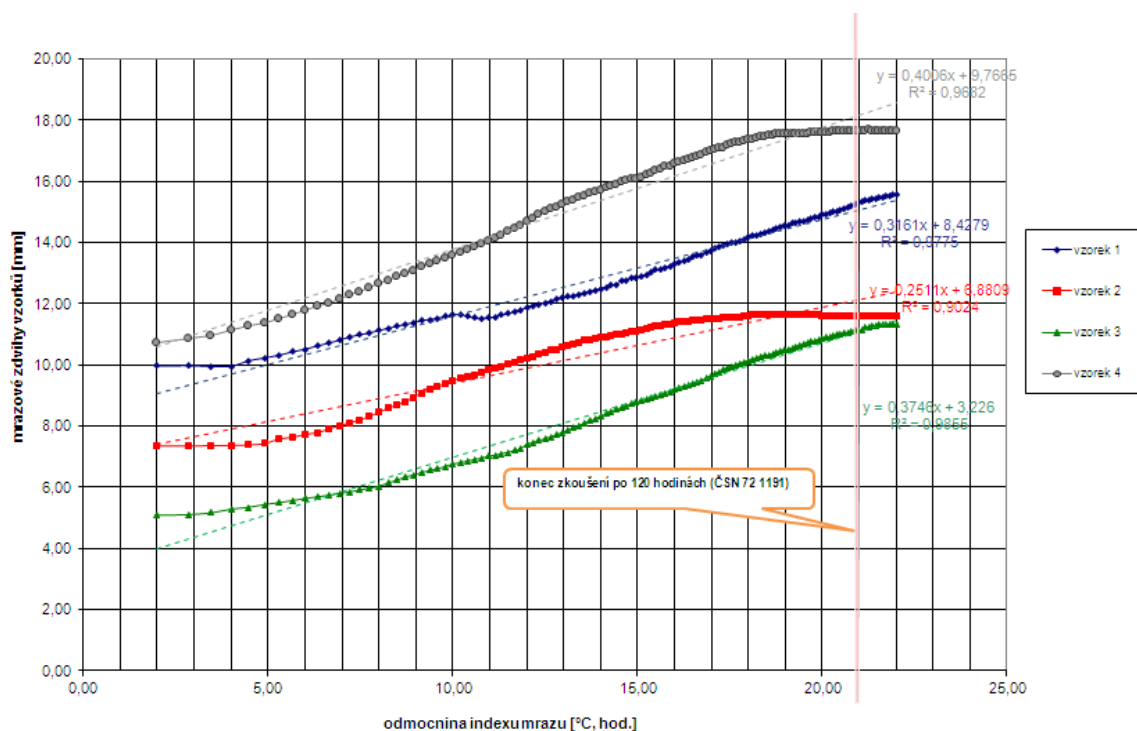
Tab. 4.7 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 5

Vzorek č. 5 byl vyhodnocen metodou A normy ČSN 72 1191 jako **mírně namrzavý až namrzavý**.

4.4.6 Vzorek č. 6



Obr. 4.12 – Zkušební vzorky po provedení zkoušky namrzavosti



Graf 4.12 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	5,09	10,71	9,97	7,35
Konečná hodnota [mm]	11,32	17,66	15,59	11,59
Rozdíl [mm]	6,23	6,95	5,62	4,24
Součinitel β	0,35	0,32	0,32	0,25
Průměrná hodnota β	0,31			

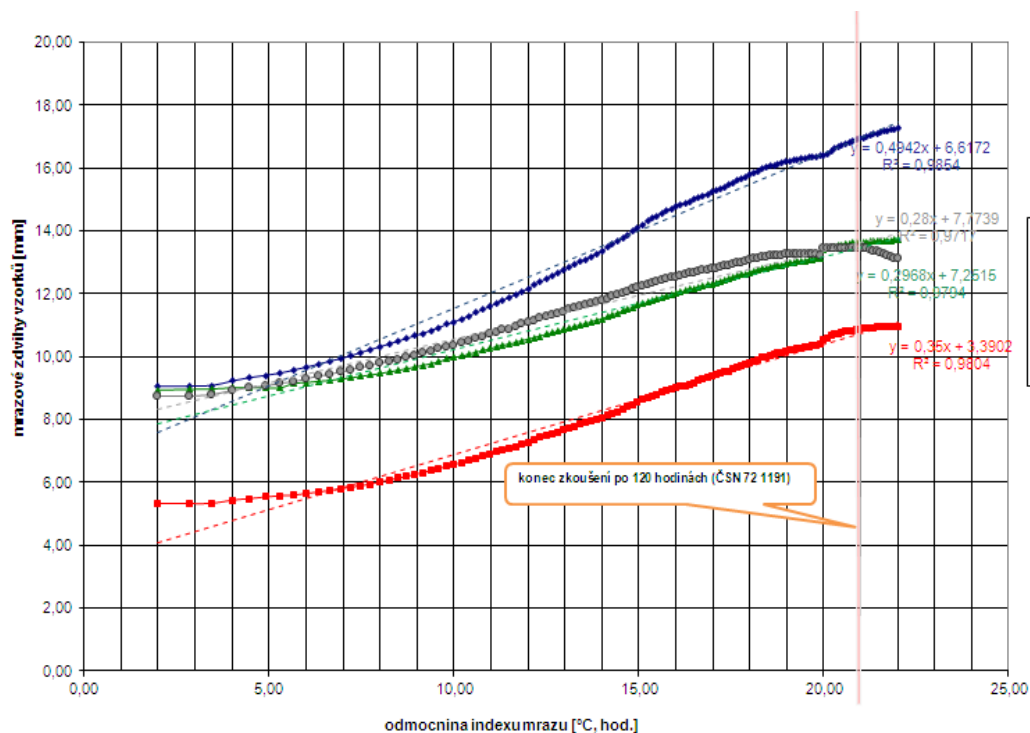
Tab. 4.8 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 6

Vzorek č. 6 byl vyhodnocen metodou A normy ČSN 72 1191 jako **mírně namrzavý až namrzavý**.

4.4.7 Vzorek č. 7



Obr. 4.13 – Zkušební vzorky po provedení zkoušky namrzavosti



Graf 4.13 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

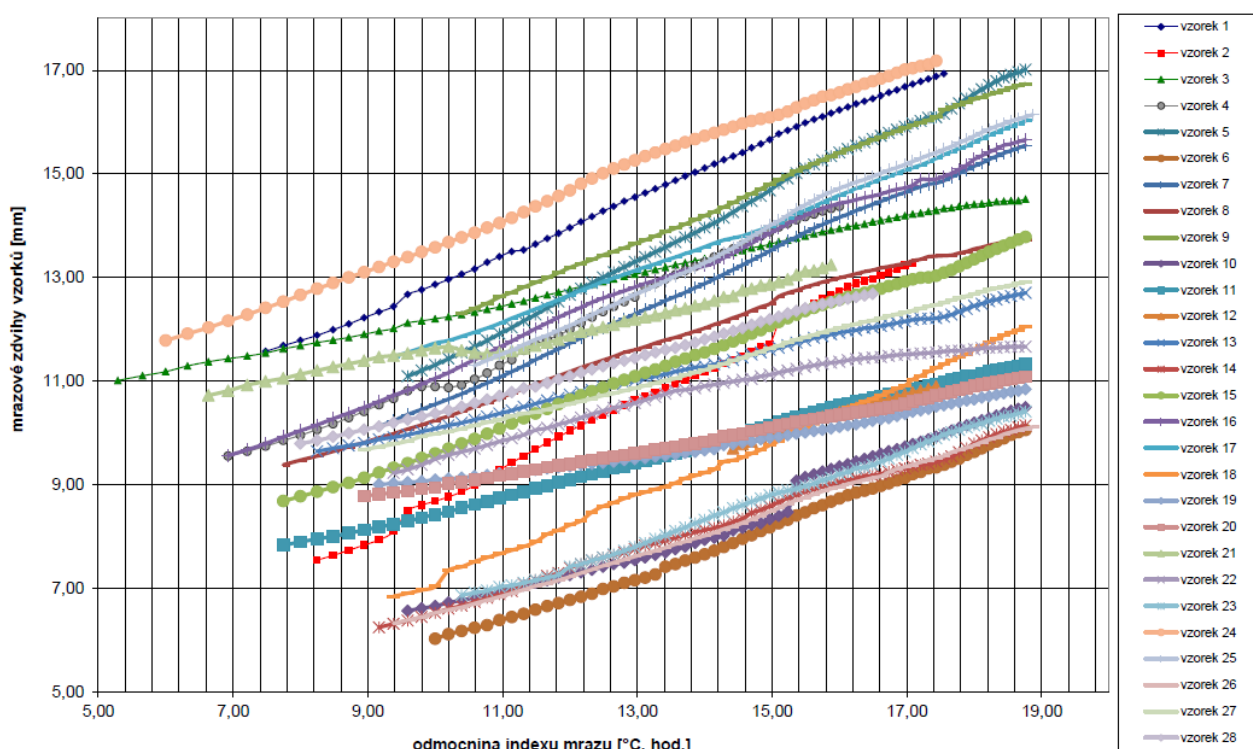
	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	8,95	8,74	9,06	5,33
Konečná hodnota [mm]	13,71	13,11	17,27	10,97
Rozdíl [mm]	4,76	4,37	8,21	5,64
Součinitel β	0,28	0,2	0,46	0,25
Průměrná hodnota β	0,30			

Tab. 4.9 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 7

Vzorek č. 2 byl vyhodnocen metodou A normy ČSN 72 1191 jako **mírně namrzavý až namrzavý**.

4.5 Vyhodnocení délky cyklu zkoušky namrzavosti

Jedním z dalších výstupů této práce je vyhodnocení délky cyklu zkoušení namrzavosti. Podle normy ČSN 72 1191 „Zkoušení míry namrzavosti“ z roku 1988 má délka zmrazovacího cyklu trvat min. 5 dní tj. 120 hodin při teplotě mrazící hlavy – 4 °C. Zkoušením namrzavosti přímou metodou jsem vyhodnotil 28 vzorků ze zeminy F6 Cl. Průběhy mrazových zdvihu jednotlivých vzorků, jsem vynesl do jednoho grafu. Nárůst mrazových zdvihů má lineární průběh, který probíhá většinou v polovině zkušební doby. Jednotlivé křivky jsem upravil podle jejich regresních přímek a odmazal hodnoty odchylovící se od této směrnice. Výsledkem jsou lineární části grafů zmrazovacích zkoušek. Po zprůměrování výsledků tohoto pokusu, jsem došel k teoretickému zjištění, že délku zmrazovacího cyklu při zkoušení namrzavosti je možné zkrátit na dobu 65 hodin, aniž by se pro zkoušenou zeminu F6Cl změnila výsledná hodnota součinitele namrzavosti β . Jednotlivé časové průběhy jsou shrnuty v tabulce v příloze této práce.

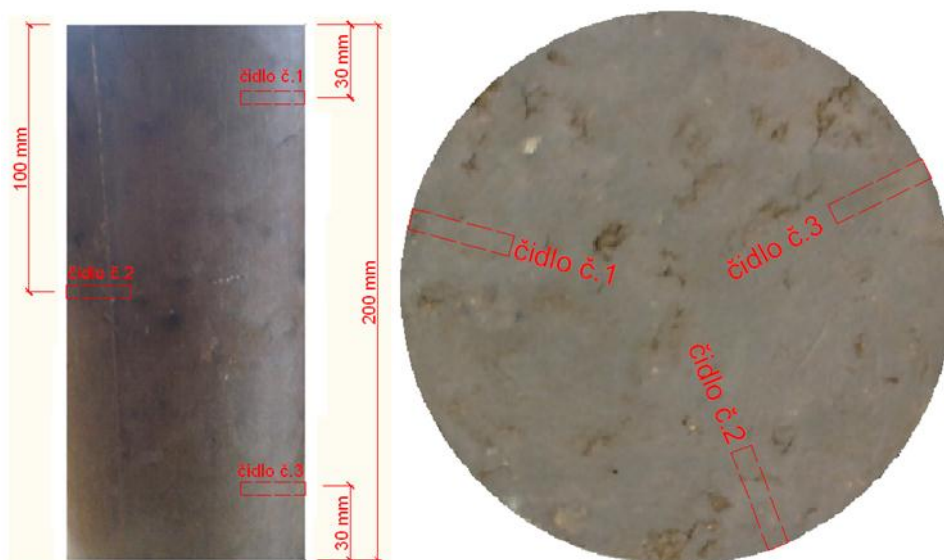


Graf 4.16 – Lineární části křivek mrazových zdvihů všech zkoušených vzorků

4.6 Simulace průniku mrazu do podloží

4.6.1 Vzorek č. 8

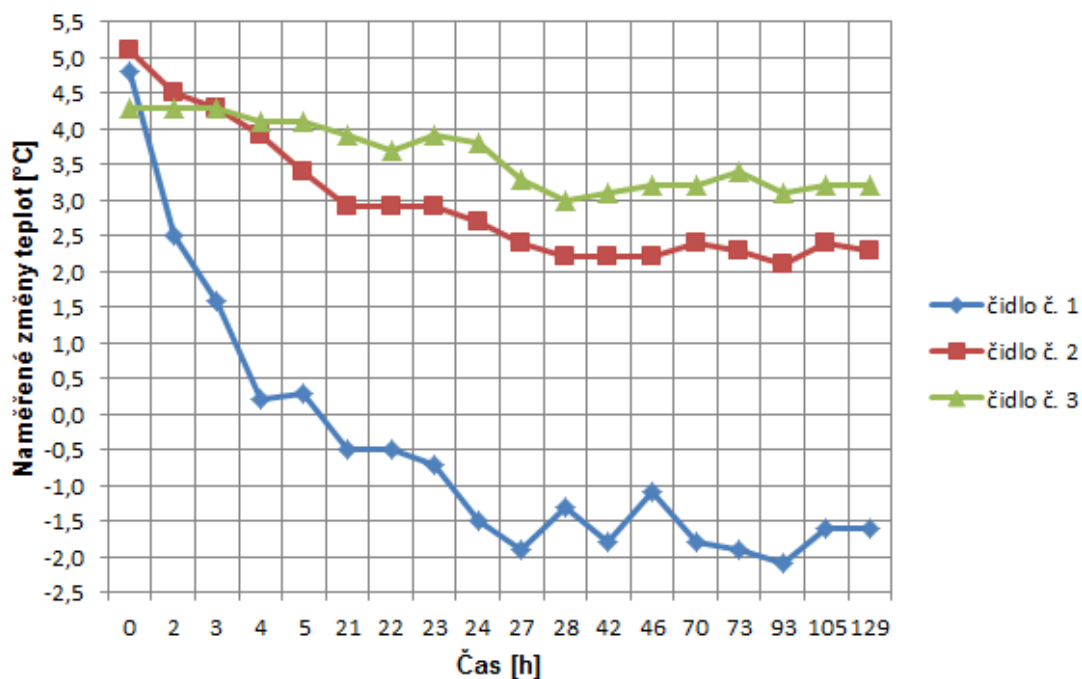
Vzorek č. 8. jsem zhotovil o průměru 100 mm a výšce 200 mm. Na tomto vzorku jsem se pokusil simulovat snižování teploty vlivem pronikání mrazu skrze podložní vrstvu. Do zkušebního tělesa jsem zabudoval 3 teplotní čidla značky Emos. Tyto teplotní čidla jsem zabudoval do různých výškových úrovní vzorku (viz obr. 4.14). Na vzorku není měřena namrzavost pouze teplotní změny ve vzorku.



Obr. 4.14 – Rozmístění teplotních čidel ve vzorku č. 8.



Obr. 4.15 – Saturace vzorku č. 8 se zabudovanými teplotními čidly.

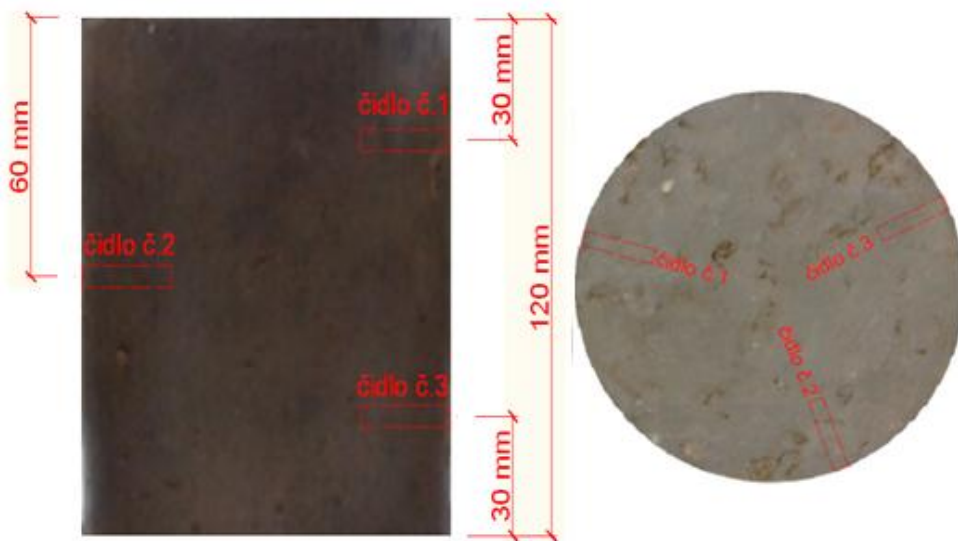


Graf 4.14 – Průběh pronikání mrazu zaznamenaný teplotními čidly ve vzorku č. 8

Záporných hodnot bylo naměřeno pouze čidlem č. 1 přibližně po 20 hodinách zmrazování. Minimální naměřená hodnota dosahovala - 2,1 °C.

4.6.2 Vzorek č. 9

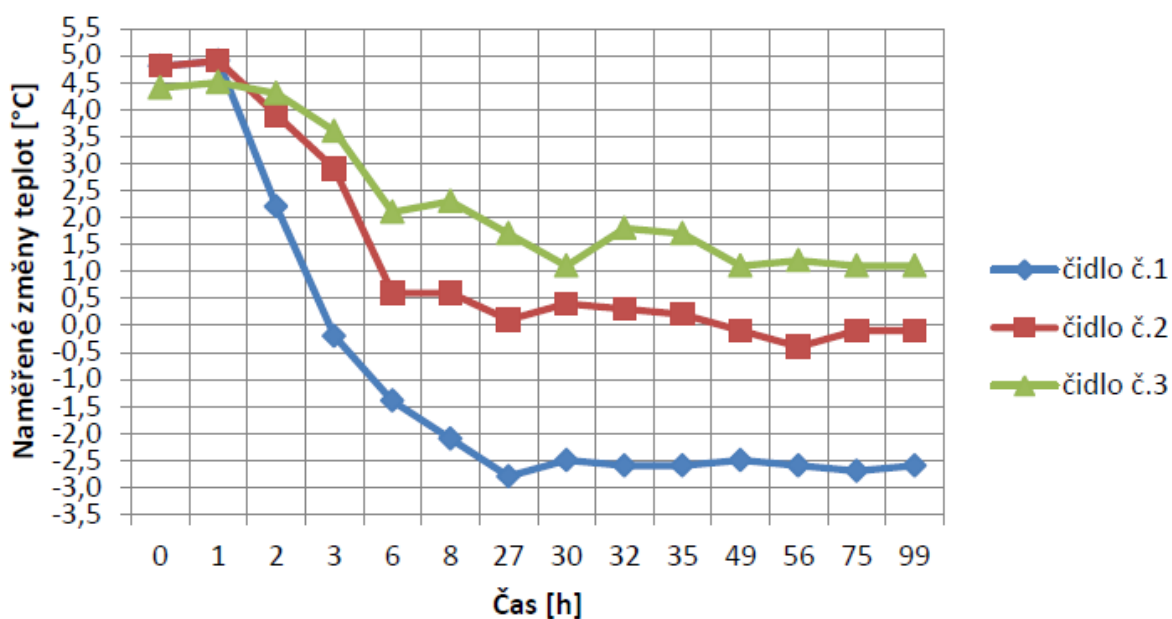
Vzorek č 9. jsem zhotovil o průměru 100 mm a výšce 120 mm. Do zkušebního tělesa jsem zabudoval 3 teplotní čidla značky Emos zabudovaná do různých výškových úrovní vzorku (viz obr. 4.16). Na vzorku není měřena namrzavost pouze teplotní změny ve vzorku.



Obr. 4.16 – Rozmístění teplotních čidel ve vzorku č. 9.



Obr. 4.17 – Umístění vzorku č. 9 s teplotními čidly do mrazicí skříně.



Graf 4.15 – Průběh pronikání mrazu zaznamenaný teplotními čidly ve vzorku č. 9

Záporných hodnot bylo naměřeno čidly č. 1 a to přibližně po 3 hodinách a čidlem č. 2 přibližně po 48 hodinách. Minimální hodnota naměřená čidlem č. 1 byla $-2,8^{\circ}\text{C}$ a minimální hodnota naměřená čidlem č. 2 dosahovala teploty $-0,4^{\circ}\text{C}$.

5 ZÁVĚR

V teoretické části jsem shrnul poznatky o metodách zkoušení namrzavosti ve vybraných státech Evropské unie, které se zároveň podílí na vypracovávání nové normy týkající se namrzavosti. Konkrétně se jedná o Rakousko, Německo, Finsko a Francii. V Německu a Francii se používají podobné principy zkoušení namrzavosti jako v České republice. Podstata zkoušek je u těchto států velmi podobná naší metodě B. Odlišný postup oproti naší metodě A používají v Rakousku a Německu. Teplota zmrazování není konstantní ale regulovaná podle teplotních podmínek. Metoda zkoušení používaná ve Finsku v sobě zahrnuje cyklické zmrazování a rozmrazování spolu s proměnným zatížením těles, což umožňuje zkoušený vzorek vyhodnotit nejen z hlediska mrazového zdvihu ale i konsolidace v době tání.

Z vyhodnocování vývoje indexu mrazu na našem území lze pozorovat poklesy indexů mrazu v jednotlivých nadmořských oblastech. Nejvýraznější poklesy za posledních 15 let jsou zaznamenány ve výškových pásmech 600 – 1300 m. n. m a to průměrně 15 %. Největší poklesy jsou patrné ve výškovém pásmu 700 – 900 m. n. m. a činí cca 18 % a naopak nejmenší poklesy byly zaznamenány ve výškovém pásmu 200 – 300 m. n. m a to cca 4 %.

V praktické části jsem nejprve provedl klasifikační zkoušky zadané zeminy. Klasifikací zeminy podle ČSN 73 6133 jsem zjistil, že se jedná o jíl střední plasticity F6 Cl, který má optimální vlhkost 14 % při maximálním zhutnění. Po domluvě s vedoucím mé práce jsme se rozhodly pozměnit hlavní cíl této práce na sledování pronikání mrazu podloží a zkoušení namrzavosti zadané zeminy ve významném statickém souboru ke stanovení opakovatelnosti součinitele namrzavosti β . Zeminu jsem nejprve vyhodnotil nepřímou metodou a došel jsem ke zjištění, že podle Scheibleho kritéria se jeví jako vysoce namrzavá. Poté jsem zeminu vyhodnotil přímou metodou a šest zkoušek ze sedmi vyšly jako mírně namrzavé až namrzavé. Zkouška číslo jedna vyšla jako nenamrzavá, což si můžeme vysvětlovat nedostatečným zhutněním za optimální vlhkosti. Jednotlivé hodnoty součinitele namrzavosti jsou shrnuty v níže uvedené tabulce.

	Výška vzorku [mm]	Scheibleho kritérium	Součinitel β	Slovní hodnocení
zkouška č. 1	120	Vysoce namrzavý	0,23	nenamrzavý
zkouška č. 2	120		0,34	mírně namrzavý až namrzavý
zkouška č. 3	120		0,29	mírně namrzavý až namrzavý
zkouška č. 4	120		0,31	mírně namrzavý až namrzavý
zkouška č. 5	120		0,27	mírně namrzavý až namrzavý
zkouška č. 6	120		0,31	mírně namrzavý až namrzavý
zkouška č. 7	120		0,30	mírně namrzavý až namrzavý
Průměrná hodnota součinitele β			0,29	mírně namrzavý až namrzavý

Tab. 5.1 – Celkové vyhodnocení namrzavosti všech zkoušek zeminy F6 CI

Průměr	0,29
Medián	0,30
Směrodatná odchylka	0,032
Mez opakovatelnosti	0,091
Koeficient spolehlivosti ($\alpha = 0,05$)	0,024
Interval spolehlivosti levý	0,266
Interval spolehlivosti pravý	0,314

Tab. 5.2 – Statistické vyhodnocení součinitele namrzavosti β

Všech 28 křivek mrazových zdvihů ze zkoušení namrzavosti přímou metodou jsem upravoval tak, aby zůstaly jen lineární části křivek. Z takto upravených křivek jsem zjistil, že vzorky mají většinou lineární nárůst mrazových zdvihů v polovině zmrazovací doby. Po zprůměrování hodnot jsem došel k závěru, že by teoreticky bylo možné tuto dobu zkrátit ze 120 hodin na 65 hodin, aniž by se pro zkoušenou zeminu F6 CI změnila výsledná hodnota součinitele β .

Simulací průniku mrazu do podloží na vzorku č. 8 bylo naměřeno záporných hodnot pouze čidlem č. 1 přibližně po 20 hodinách zmrazování, kdy min. teplota byla - 2,1 °C. Teploty naměřené čidly č. 2 a č. 3 se ustálily přibližně po 30 hodinách zmrazování s maximálními výkyvy 0,5 °C. Z naměřených výsledků můžeme vypožorovat, že mráz o teplotě - 4,5 °C během zkoušecí doby 120 hodin nepronikl ani do poloviny výšky vzorku (do 100 mm). Na vzorku č. 9 se hodnoty naměřené čidlem č. 1 blížily k záporným hodnotám již po 3 hodinách zmrazování, kdy se ustálily přibližně po 30 hodinách zmrazování na teplotě cca - 2,6 °C. Čidlem č. 2 byla teplota blížící se bodu mrazu naměřena přibližně po 48 hodinách. Dosahovala min. hodnoty - 0,4 °C. Čidlem č. 3 nebylo naměřeno záporných hodnot. Z naměřených výsledků můžeme vypožorovat, že mráz o teplotě - 4,5 °C během zkoušecí doby 120 hodin pronikl do poloviny výšky vzorku (do 60 mm).

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN 72 1191. *Zkoušení míry namrzavosti zemin*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1989.
- [2] ČSN 73 6133. *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*; Únor 2010
- [3] Mauduit C.: *The French frost heave test, from the procedure to its application in French pavement design*; Working Group 4 in Copenhagen, 21.10.2008
- [4] Adam D.: *Grundbau und Bodenmechanik I*, skriptum k přednáškám, TU Wien, 2010
- [5] 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.
- [6] LAY, D. Russel. *Developement of frost heave test apparatus*. Brigham, 2005. 87 s. Thesis. Brigham Young University, Department of Civil and Enviromental Engineering.
- [7] ING. HRUBEŠOVÁ, Alena. FAST VUT. *Vodní režim zemin v podloží*. Brno, 2010.
- [8] ING. HRUBEŠOVÁ, Alena. FAST VUT. *Klimatické vlivy a vlastnosti cestních stavebních materiálů*. Brno, 2010.
- [9] ČSN 73 6114. *Vozovky pozemních komunikací – Základní ustanovení pro navrhování*. Praha: Český normalizační institut, 1994.

- [10] DOC. ING. KOŘÍNEK CSC., Robert. *Mechanika hornin a zemin*. In: [online]. [cit. 2012-12-30]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/korinek/MHZ/MHZ-04.pdf>
- [11] TP 170 *Navrhování vozovek pozemních komunikací*; schváleno Ministerstvem dopravy dne 12.8.2010 s účinností od 1.9.2010
- [12] *Meteorologická stanice*. [online]. 2010 [cit. 2012-12-31]. DOI: http://cs.wikipedia.org/wiki/Meteorologick%C3%A1_.
- [13] *Globální oteplování*. [online]. 2010 [cit. 2012-12-31]. DOI: http://cs.wikipedia.org/wiki/Glob%C3%A1ln%C3%AD_ot.
- [14] ING.ZEMÁNEK, Josef. Překvapivý objev: *Prudké teplotní výkyvy v Česku způsobuje nízká sluneční aktivita*. [online]. 9.11.2010 [cit. 2012-12-30]. DOI: <http://www.euroekonom.cz/analyzy-clanky.php?type=j>.
- [15] 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.
- [16] KUGLER, Hannes et. al. *Přednormativní výzkum nenamrzavosti nestmelených podkladních vrstev; modifikované minerální kritérium*. 2004, 13 s.
- [17] PFEILER, Andreas. *Austrian Test Method „Frostheave-Test“*. CEN TC 227, WG4,TG 5: Frost susceptibility, 16.5.2008, 3 s.
- [18] Onninen H.: *Frost heave test, Thaw compression test*; TG 5 Meeting – Frost Susceptibility in Nancy, 22.12.2008
- [19] 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.

- [20] 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.
- [21] TASK GROUP 5, Working Group 4. *Frost heave tests used in Europe and some selected test procedures from US: Overview of test procedure characteristics and evaluation*. 22.10.2008.
- [22] *Mechanika hornin* [online]. 2010. vyd. [cit. 2012-12-31]. DOI: http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/mech_hornin/mh.

SEZNAM POUŽITÝCH 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
EU	Evropská unie
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
TP	technické podmínky
tzv.	tak zvané
viz	lze vidět
WG	pracovní skupina

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.1 – Schéma tvorby ledových čoček [6] (upraveno)

Obr. 3.2 – Formace ledových čoček ve zkušebním tělese [6]

Obr. 3.3 – Rozmístění ledových čoček a vody v zeminách [7]

Obr. 3.4 – Mapa charakt. hodnot indexu mrazu I_m (pro střední dobu návratnosti 10 let) [9]

Obr. 3.5 – Mapa charak. hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 10 let

Obr. 3.6 – Mapa charak. hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 7 let

Obr. 3.7 – Mapa charak. hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 4 let

Obr. 3.8 – Chladicí skříň se čtyřmi zkušebními buňkami [1]

Obr. 3.9 – Zkušební buňka [1]

Obr. 3.10 – Válcová forma s teplotním čidlem a perforovaná ocelová destička (upraveno) [15]

Obr. 3.11 – Měřicí zařízení pro zkoušku namrzavosti [15]

Obr. 3.12 – Třístupňový model pro posouzení namrzavosti dle *ÖNORM B 4810* [16]

Obr. 3.13 – Rozmístění teplotních čidel a rozměry formy [17]

Obr. 3.14 – Zařízení k měření mrazových zdvihů (Finsko) - upraveno [18]

Obr. 3.15 – Zařízení k měření mrazových zdvihů (upraveno) [20]

Obr. 3.16 – Mapa výjimečného indexu mrazu ve Francii [20]

Obr. 4.1 – Zkoumaný vzorek zeminy

Obr. 4.2 – Zůstatek na sítích podle pořadí zleva: 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8

- Obr. 4.3** – Penetrometr 80g/30° pro určení meze tekutosti
- Obr. 4.4** – Vzorky připravené pro stanovení vlhkosti
- Obr. 4.5** – Přístroj Proctor standard použitý pro hutnění těles
- Obr. 4.6** – Uložení zkušebních těles do chladicího zařízení
- Obr. 4.7** – Srovnání vzorku před a po zkoušení míry namrzavosti
- Obr. 4.8** – Vznik ledové čočky a zdvih vzorku po ukončení zkoušky
- Obr. 4.9** – Saturace zkušebních vzorků před zahájením zkoušky
- Obr. 4.10** – Mrazové zdvihy jednotlivých vzorků
- Obr. 4.11** – Pohled na rozbředlou zeminu díky tání ledové čočky
- Obr. 4.12** – Zkušební vzorky po provedení zkoušky namrzavosti
- Obr. 4.13** – Zkušební vzorky po provedení zkoušky namrzavosti
- Obr. 4.14** – Rozmístění teplotních čidel ve vzorku č. 8.
- Obr. 4.15** – Saturace vzorku č. 8 se zabudovanými teplotními čidly.
- Obr. 4.16** – Rozmístění teplotních čidel ve vzorku č. 9.
- Obr. 4.17** – Umístění vzorku č. 9 s teplotními čidly do mrazící skříně.

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 – Hloubka promrzání [10]

Tab. 3.2 – Požadovaná min. tloušťka nenamrzavých vrstev netuhé vozovky [11]

Tab. 3.3 – Požadovaná min. tloušťka nenamrzavých vrstev tuhé vozovky [11]

Tab. 3.4 – Základní hodnoty indexu mrazu pro území ČR k roku 1995 [9]

Tab. 3.5 – Porovnání hodnot indexu mrazu (střední doba návratnosti 10 let) k roku 2010

Tab. 3.6 – Základní hodnoty indexu mrazu pro území ČR k roku 2010

Tab. 3.7 – Stanovení míry namrzavosti podle součinitele β [1]

Tab. 3.8 – Zjednodušená klasifikace půdních zemin podle namrzavosti [15]

Tab. 3.9 – Mezní hodnoty minerálního kritéria dle rakouské normy *ÖNORM B 4810* [16]

Tab. 3.10 – Charakteristiky zkoušení namrzavosti v některých zemních EU (upraveno) [21]

Tab. 4.1 – Konzistenční meze zkoušeného vzorku zeminy

Tab. 4.2 – Klasifikace zeminy podle normy ČSN 73 6133

Tab. 4.3 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 1

Tab. 4.4 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 2

Tab. 4.5 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 3

Tab. 4.6 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 4

Tab. 4.7 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 5

Tab. 4.8 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 6

Tab. 4.9 – Naměřené hodnoty mrazových zdvihů a vyhodnocení vzorku č. 7

Tab. 5.1 – Celkové vyhodnocení namrzavosti všech zkoušek zeminy F6 CI

Tab. 5.2 – Statistické vyhodnocení součinitele namrzavosti β

SEZNAM GRAFŮ

Graf 3.1 – Schématické znázornění průběhu únosnosti podloží [8]

Graf 3.2 – Scheibleho kritérium namrzavosti [2]

Graf. 3.3 – Znázornění teplot a zdvihů z průběhu zkoušky namrzavosti (upraveno) [15]

Graf. 3.4 – Grafické vyhodnocení zkoušky zmrazování (Finsko) - upraveno [19]

Graf. 3.5 – Grafické vyhodnocení zkoušky rozmrazování (Finsko) - upraveno [19]

Graf 3.6 – Stupně namrzavosti ve Francii [20], (upraveno)

Graf 4.1 – Křivka zrnitosti zkoumané zeminy

Graf 4.2 – Trojúhelníkový diagram pro částice do 60 mm (upraveno) [22]

Graf 4.3 – Stanovení meze tekutosti w_L

Graf 4.4 – Diagram plasticity pro částice $< 0,50$ mm (upraveno) [22]

Graf 4.5 – Vyhodnocení zkoušky Proctor standard

Graf 4.6 – Scheibleho kritérium namrzavosti s křivkou zrnitosti zkoumané zeminy

Graf 4.7 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

Graf 4.8 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

Graf 4.9 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

Graf. 4.10 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

Graf 4.11 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

Graf 4.12 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

Graf 4.13 – Grafické znázornění mrazových zdvihů vzorku č. 1

Graf 4.14 – Průběh pronikání mrazu zaznamenaný teplotními čidly ve vzorku č. 8

Graf 4.15 – Průběh pronikání mrazu zaznamenaný teplotními čidly ve vzorku č. 9

A PŘÍLOHY – PROTOKOLY ZKOUŠEK

Seznam protokolů zkoušek:

Stanovení zrnitosti zeminy

Stanovení konzistenčních mezí

Stanovení optimální vlhkosti

Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 1

Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 2

Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 3

Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 4

Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 5

Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 6

Vyhodnocení míry namrzavosti vzorku č. 7

Průběh pronikání mrazu vzorkem č. 8

Průběh pronikání mrazu vzorkem č. 9

Vyhodnocení délky cyklu zkoušky namrzavosti

B PŘÍLOHY – MAPY

Seznam map:

Mapa meteorologických stanic

Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 10 let

Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 7 let

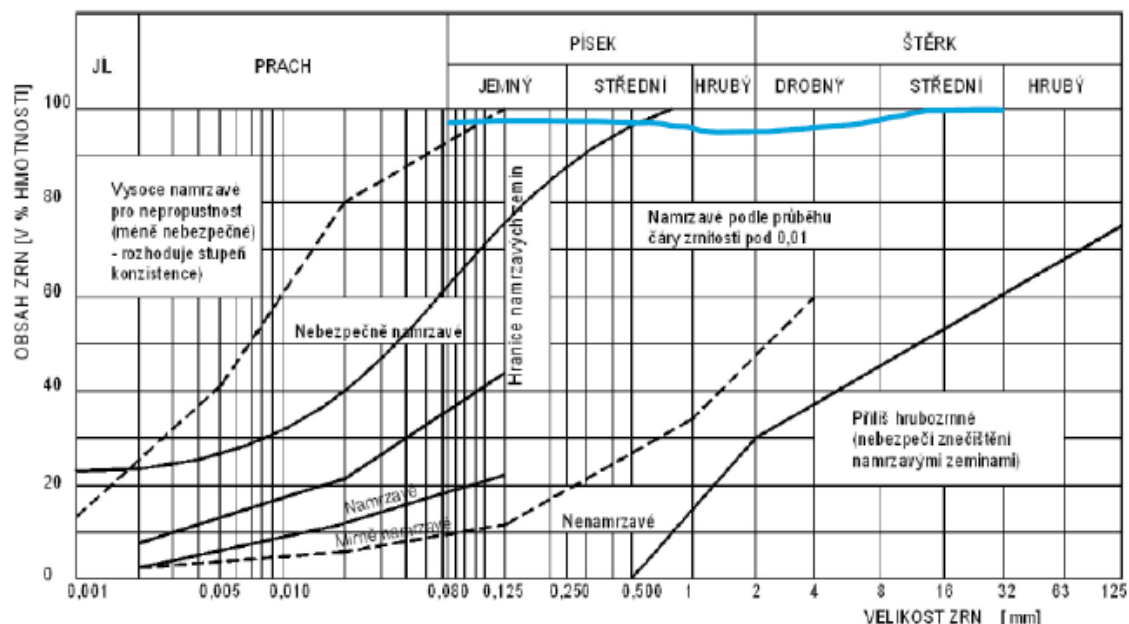
Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 4 let

PŘÍLOHY A

STANOVENÍ ZRNITOSTI ZEMINY

Provedl: Bc. Jakub Mašek
 Datum: 5.11.2012
 Lokalita: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
 Vzorek: F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
 Navážka: 1347,2 g

Velikost ok [mm]	Zůstalo na síti		Propad sítím [%]
	[g]	z[%]	
31,5	0	0	100
16	0	0	100
8	7,54	0,56	99,44
4	50,79	3,77	96,23
2	79,75	5,92	94,08
1	86,89	6,45	93,55
0,5	58,20	4,32	95,68
0,25	48,23	3,58	96,42
0,125	43,78	3,25	96,75
0,063	53,21	3,95	96,05
<0,063	964,33	71,58	



Obsah jemných částic
 Obsah písčité složky
 Obsah štěrkovité složky

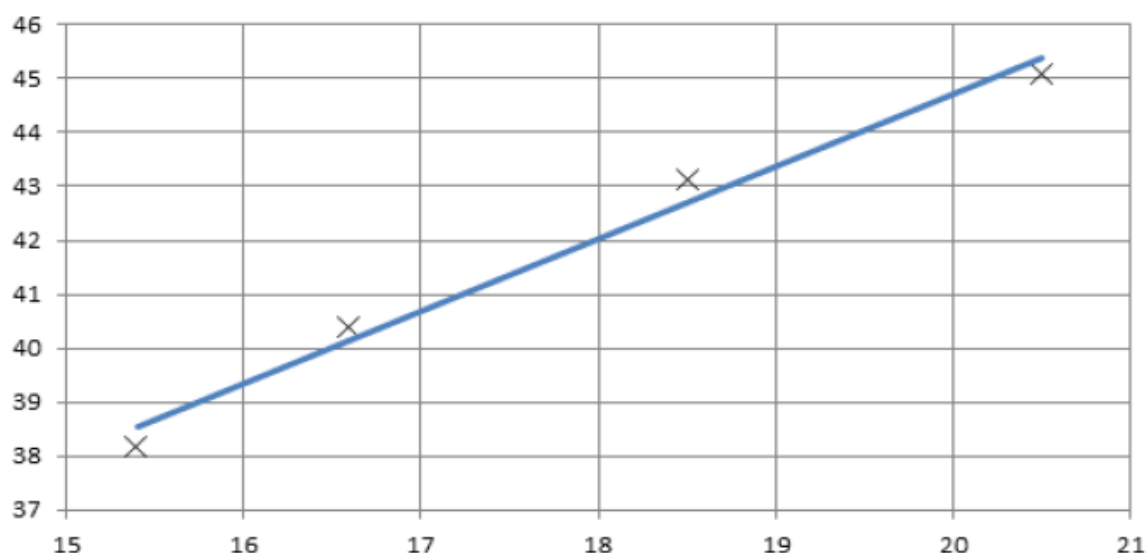
f = 96 %
 s = 1 %
 g = 3 %

STANOVENÍ KONZISTENČNÍCH MEZÍ

Provedl: Bc. Jakub Mašek
Datum: 5.11.2012
Lokalita: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek: F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)

Stanovení meze tekutosti

	Mez tekutosti w_L			
	1	2	3	4
vlhká zemina s váženkou [g]	72,9	70,8	68,5	67,8
suchá zemina s váženkou [g]	59,5	58,1	57,4	57,1
váženka [g]	29,8	28,6	29,9	29,1
voda [g]	13,4	12,7	11,1	10,7
vlhkost [%]	45,1	43,1	40,4	38,2
penetrace [mm]	20,5	18,5	16,6	15,4



$w_L = 42\%$

Stanovení meze plasticity

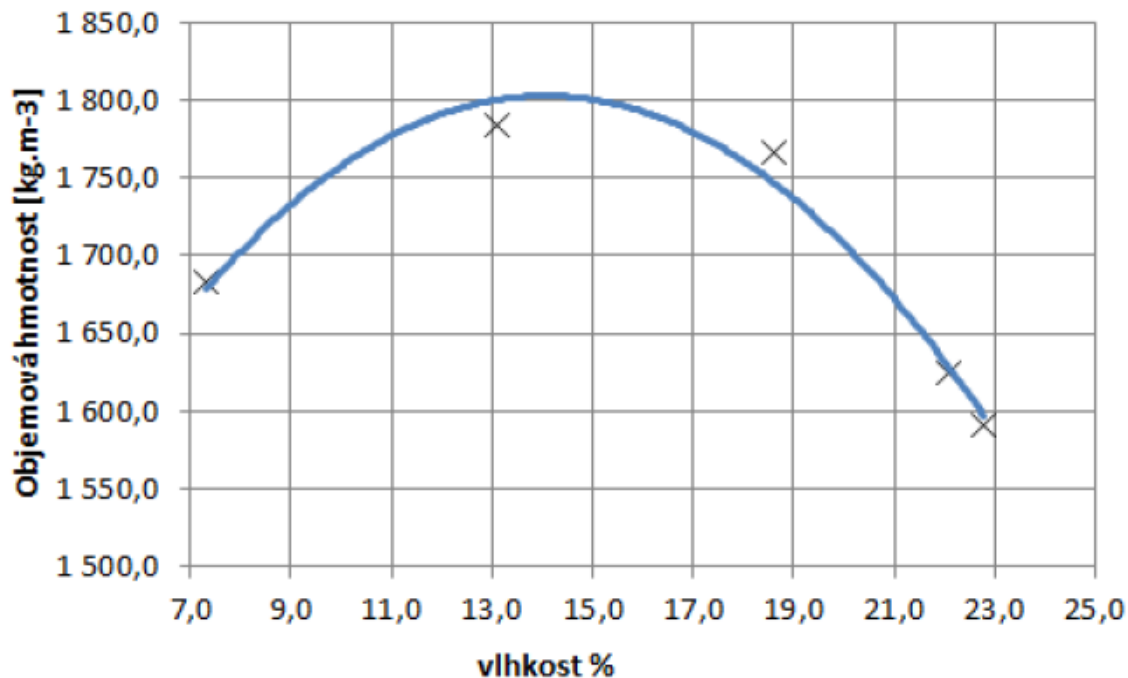
	Mez plasticity w_P			
	1	2	3	4
vlhká zemina s váženkou [g]	24,3	22,9	24,5	22,8
suchá zemina s váženkou [g]	23,4	22,1	23,5	21,7
váženka [g]	18,7	18,0	18,4	16,0
voda [g]	0,9	0,8	1,0	1,1
vlhkost [%]	19,1	19,5	19,6	19,3
Σ [%]	19,4			

$w_P = 19,4\%$

STANOVENÍ OPTIMÁLNÍ VHLKOSTI

Provedl: Bc. Jakub Mašek
Datum: 21.11.2012
Lokalita: Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek: F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Hmotnost Proctorova válce: 2321,2 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 [%]	Objem. hmotnost sušiny [kg.m ³]
1	3986,5	1665,3	29,3	110,6	105,1	7,3	1683,1
2	4246,8	1925,6	29,8	110,2	100,9	13,1	1784,8
3	4222,5	1901,3	29,2	107,2	94,9	18,6	1766,6
4	4186,8	1865,6	29,4	110,1	95,5	22,1	1625,0
5	4153,3	1832,1	28,7	111,0	95,7	22,8	1590,7



w_{opt} = 14%

ρ_{dMAX} = 1802 kg.m⁻³

VYHODNOCENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI VZORKU Č. 1

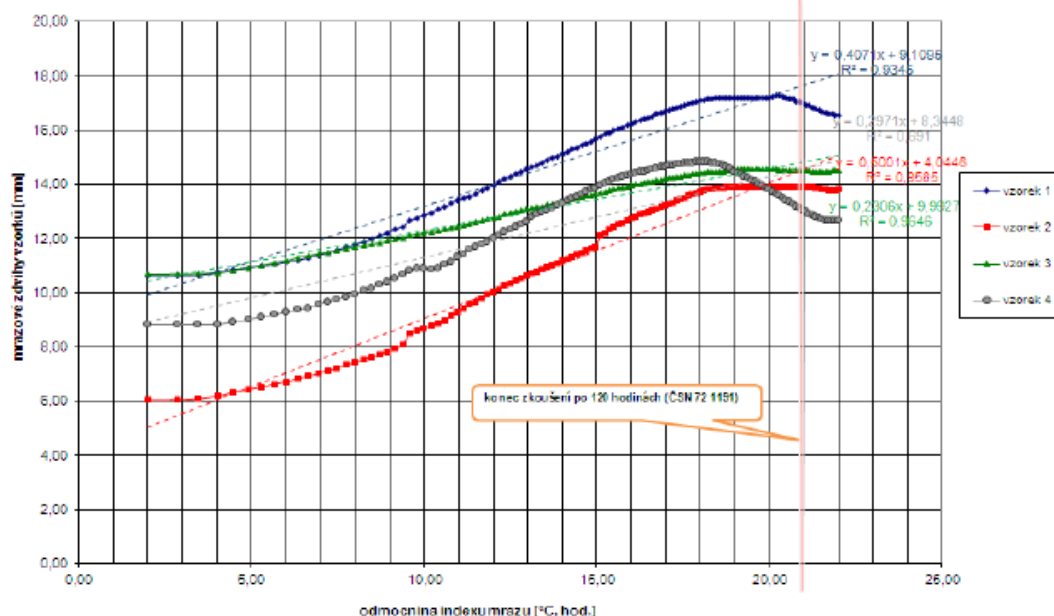
Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST Žižkova, v Brno)
Počet zkušebních těles:	4
Výška zkušebních těles:	120 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Datum zahájení zkoušky:	24.10.2012
Datum ukončení zkoušky:	29.10.2012
Doba ochlazování vzorků:	190 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	10,68	8,82	10,61	6,04
Konečná hodnota [mm]	14,53	12,65	16,56	13,81
Rozdíl [mm]	3,85	3,83	5,95	7,77
Součinitel β	0,27	0,25	0,18	0,10
Průměrná hodnota β	0,23			

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

Zkoušení namrzavosti zeminy (vzorek č. 1)



Zdvih číslo 3 byl z měření vyloučen.

$\beta = 0,23 < 0,25 \leftrightarrow$ vzorek č. 1 je nenamrzavý

VYHODNOCENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI VZORKU Č. 2

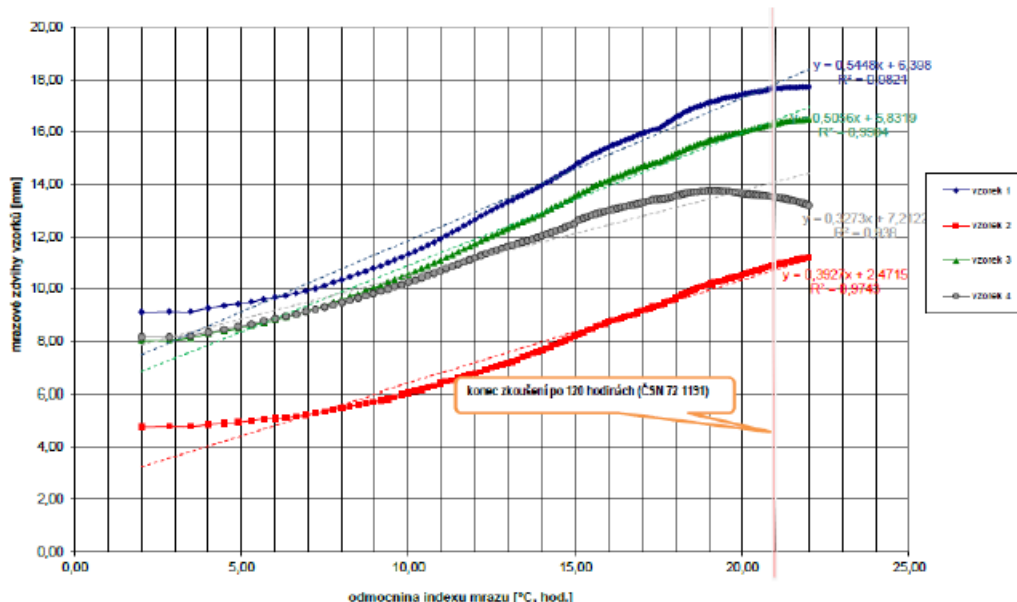
Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Počet zkušebních těles:	4
Výška zkušebních těles:	120 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Datum zahájení zkoušky:	30.10.2012
Datum ukončení zkoušky:	4.11.2012
Doba ochlazování vzorků:	190 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	8,02	8,15	9,1	4,78
Konečná hodnota [mm]	16,48	13,19	17,72	11,19
Rozdíl [mm]	8,46	5,04	8,62	6,41
Součinitel β	0,45	0,22	0,47	0,25
Průměrná hodnota β	0,34			

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

Zkoušení namrzavosti zeminy (vzorek č. 2)



$\beta = 0,34 < 0,50 \Leftrightarrow$ vzorek č. 2 je mírně namrzavý až namrzavý

VYHODNOCENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI VZORKU Č. 3

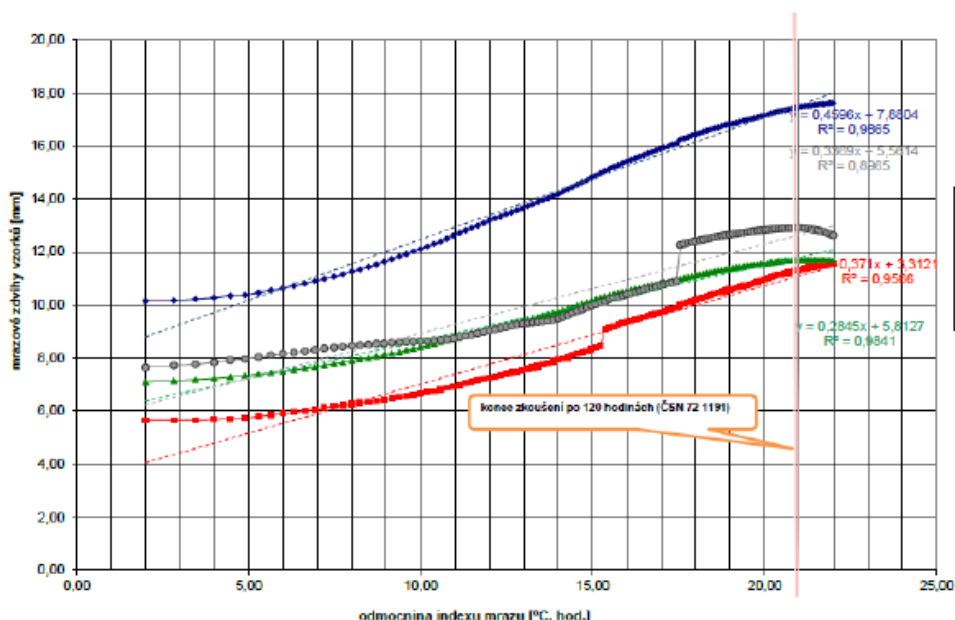
Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Počet zkušebních těles:	4
Výška zkušebních těles:	120 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Datum zahájení zkoušky:	6.11.2012
Datum ukončení zkoušky:	11.11.2012
Doba ochlazování vzorků:	190 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	7,10	7,65	10,15	5,66
Konečná hodnota [mm]	11,66	12,63	17,61	11,56
Rozdíl [mm]	4,56	4,98	7,46	5,9
Součinitel β	0,24	0,28	0,41	0,25
Průměrná hodnota β	0,29			

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

Zkoušení namrzavosti zeminy (vzorek č. 3)



$\beta = 0,29 < 0,50 \leftrightarrow$ vzorek č. 3 je mírně namrzavý až namrzavý

VYHODNOCENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI VZORKU Č. 4

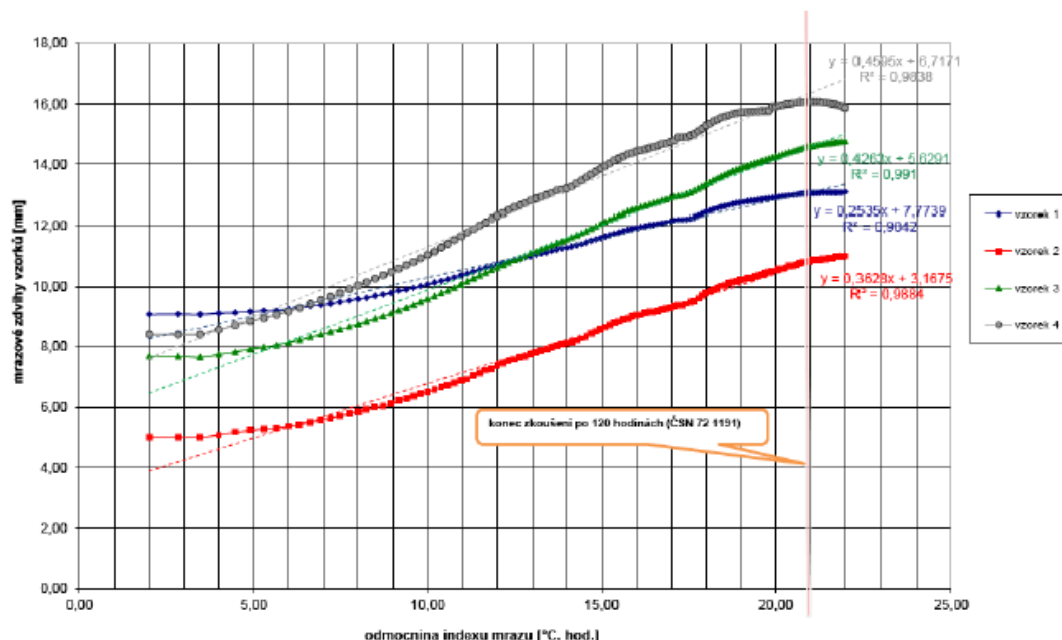
Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Počet zkušebních těles:	4
Výška zkušebních těles:	120 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Datum zahájení zkoušky:	13.11.2012
Datum ukončení zkoušky:	18.11.2012
Doba ochlazování vzorků:	190 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	7,70	8,41	9,09	5,01
Konečná hodnota [mm]	14,76	15,88	13,10	11,00
Rozdíl [mm]	7,06	7,47	4,01	5,99
Součinitel β	0,22	0,25	0,39	0,37
Průměrná hodnota β	0,31			

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

Zkoušení namrzavosti zeminy (vzorek č. 4)



$\beta = 0,31 < 0,50 \leftrightarrow$ vzorek č. 4 je mírně namrzavý až namrzavý

VYHODNOCENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI VZORKU Č. 5

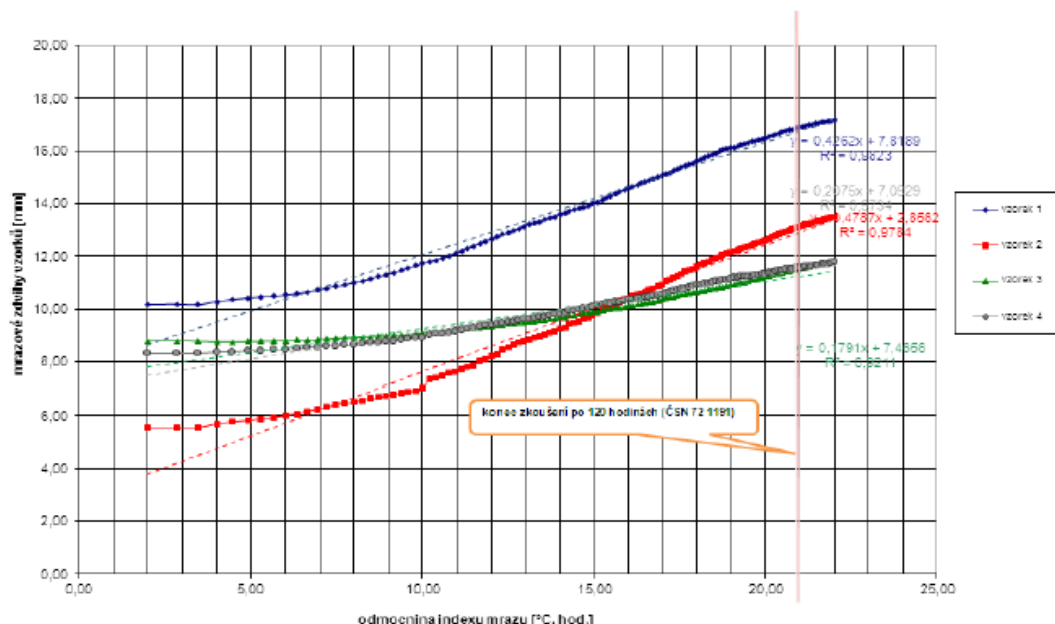
Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Počet zkušebních těles:	4
Výška zkušebních těles:	120 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Datum zahájení zkoušky:	20.11.2012
Datum ukončení zkoušky:	25.11.2012
Doba ochlazování vzorků:	190 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	8,81	8,34	10,18	5,56
Konečná hodnota [mm]	11,85	11,77	17,17	13,52
Rozdíl [mm]	3,04	3,43	6,99	7,96
Součinitel β	0,21	0,21	0,4	0,25
Průměrná hodnota β	0,27			

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

Zkoušení namrzavosti zeminy (vzorek č. 5)



$\beta = 0,27 < 0,50 \leftrightarrow$ vzorek č. 5 je mírně namrzavý až namrzavý

VYHODNOCENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI VZORKU Č. 6

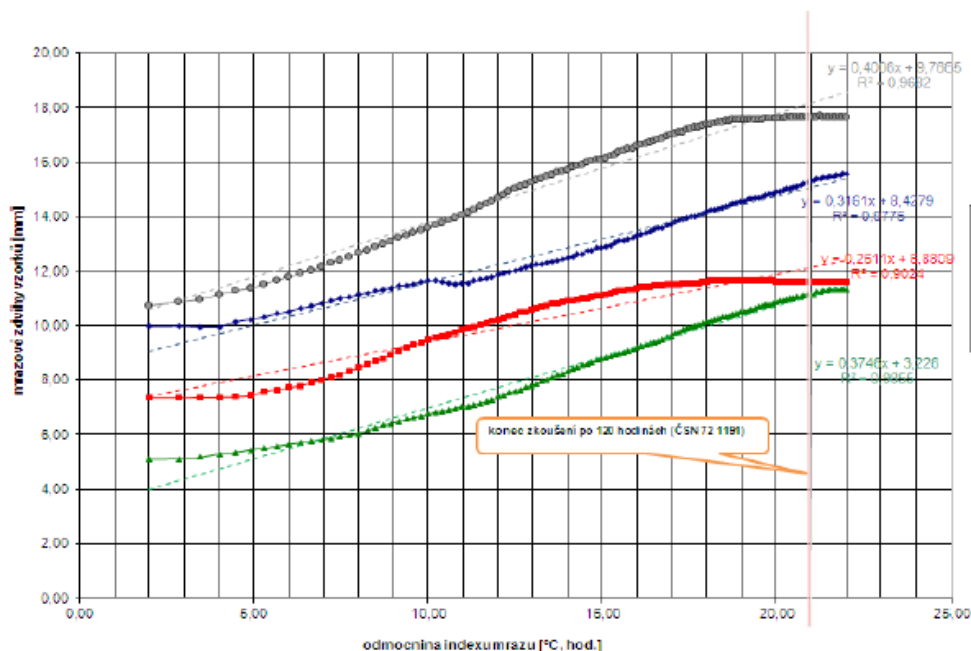
Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Počet zkušebních těles:	4
Výška zkušebních těles:	120 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Datum zahájení zkoušky:	27.11.2012
Datum ukončení zkoušky:	1.12.2012
Doba ochlazování vzorků:	190 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	5,09	10,71	9,97	7,35
Konečná hodnota [mm]	11,32	17,66	15,59	11,59
Rozdíl [mm]	6,23	6,95	5,62	4,24
Součinitel β	0,35	0,32	0,32	0,25
Průměrná hodnota β	0,31			

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

Zkoušení namrzavosti zeminy (vzorek č. 6)



$\beta = 0,31 < 0,50 \leftrightarrow$ vzorek č. 6 je mírně namrzavý až namrzavý

VYHODNOCENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI VZORKU Č. 7

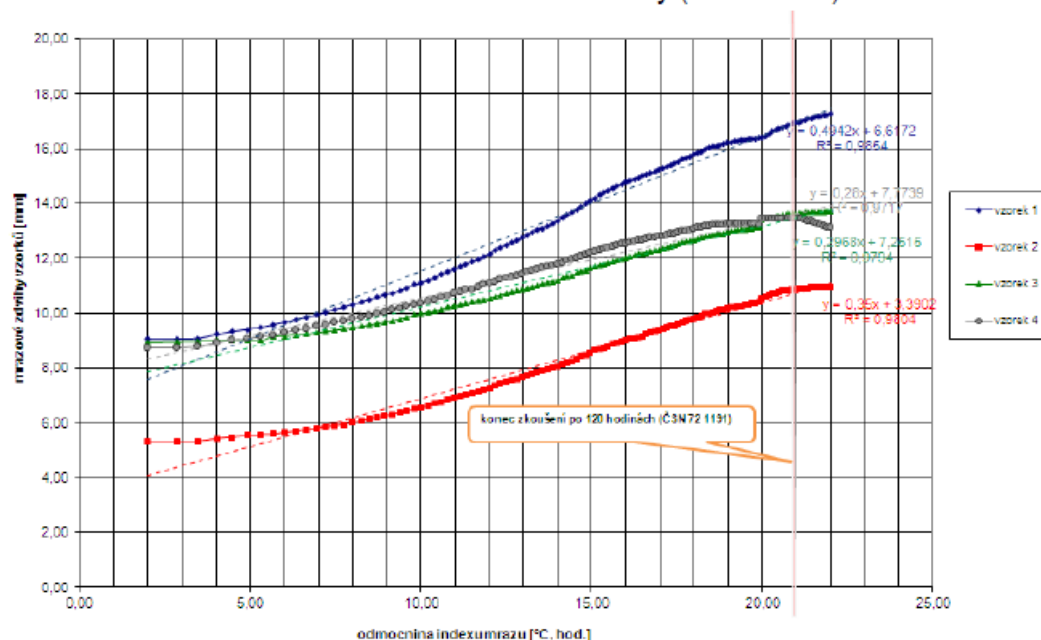
Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Počet zkušebních těles:	4
Výška zkušebních těles:	120 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Datum zahájení zkoušky:	4.12.2012
Datum ukončení zkoušky:	9.12.2012
Doba ochlazování vzorků:	190 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

Metoda A

	Zdvih 0	Zdvih 1	Zdvih 2	Zdvih 3
Počáteční hodnota [mm]	8,95	8,74	9,06	5,33
Konečná hodnota [mm]	13,71	13,11	17,27	10,97
Rozdíl [mm]	4,76	4,37	8,21	5,64
Součinitel β	0,28	0,2	0,46	0,25
Průměrná hodnota β	0,30			

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

Zkoušení namrzavosti zeminy (vzorek č. 7)

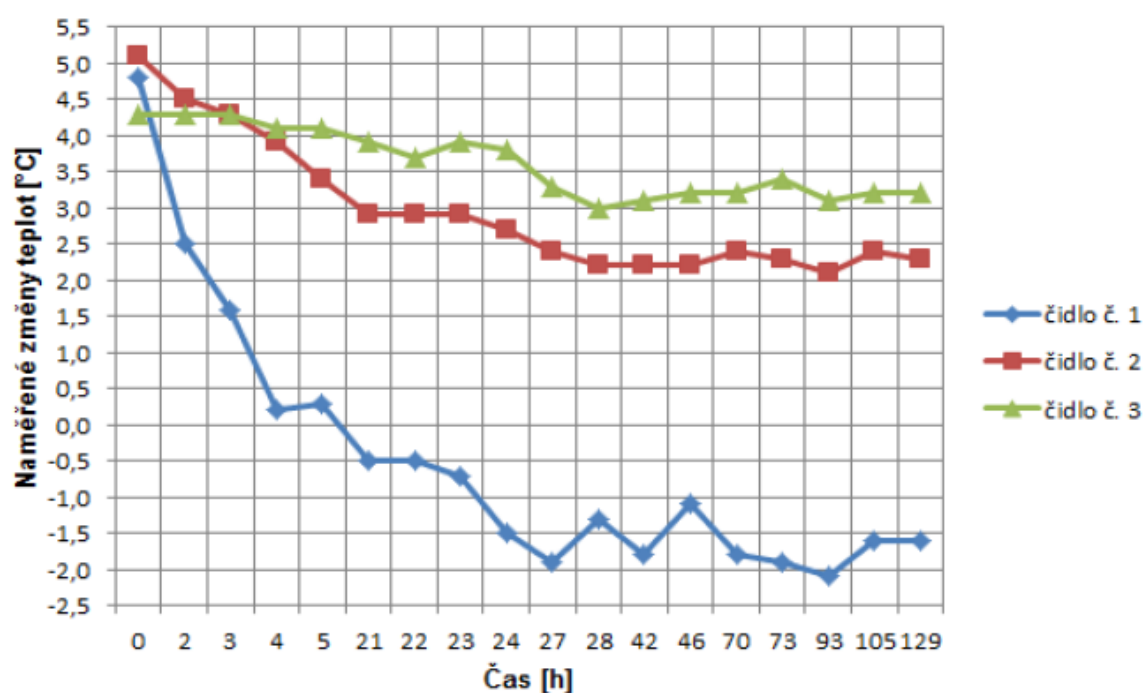


$\beta = 0,30 < 0,50 \leftrightarrow$ vzorek č. 7 je mírně namrzavý až namrzavý

PRŮBĚH PRONIKÁNÍ MRAZU VZORKEM Č. 8

Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Počet zkušebních těles:	1
Výška zkušebního tělesa:	200 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Doba ochlazování vzorků:	130 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

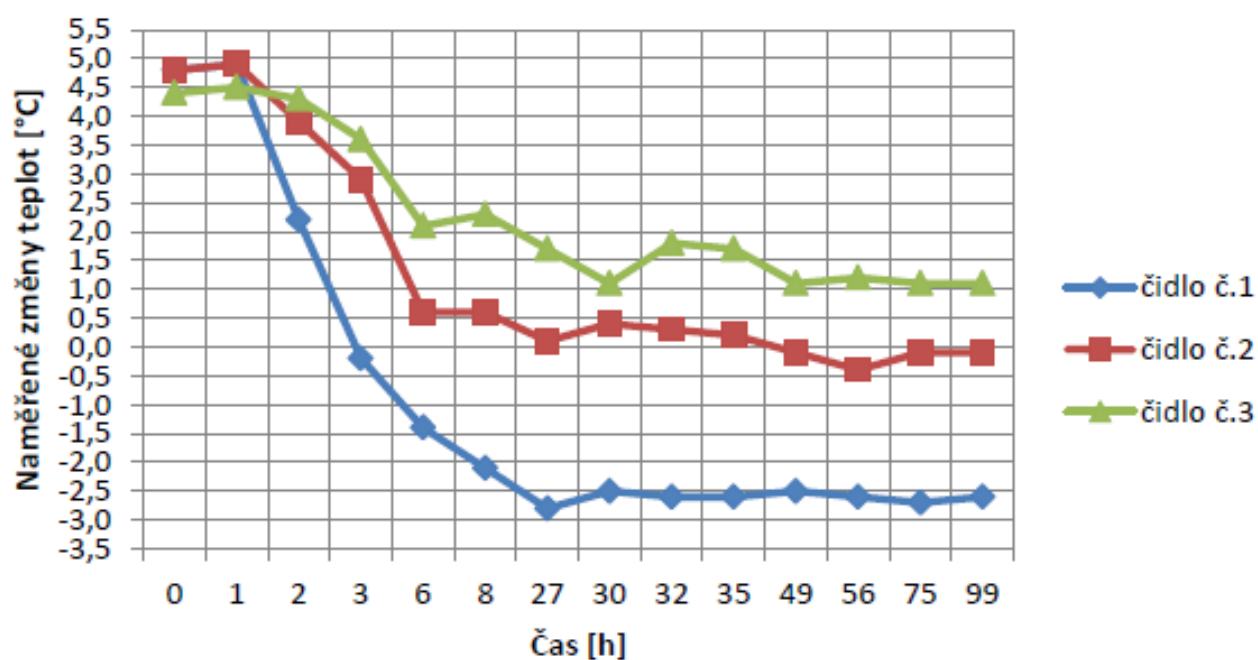
Záznam teplot			
Čas [h]	Čidlo 1 [°C]	Čidlo 2 [°C]	Čidlo 3 [°C]
0	4,8	5,1	4,3
2	2,5	4,5	4,3
3	1,6	4,3	4,3
4	0,2	3,9	4,1
5	0,3	3,4	4,1
21	-0,5	2,9	3,9
22	-0,5	2,9	3,7
23	-0,7	2,9	3,9
24	-1,5	2,7	3,8
27	-1,9	2,4	3,3
28	-1,3	2,2	3,0
42	-1,8	2,2	3,1
46	-1,1	2,2	3,2
70	-1,8	2,4	3,2
73	-1,9	2,3	3,4
93	-2,1	2,1	3,1
105	-1,6	2,4	3,2
129	-1,6	2,3	3,2



PRŮBĚH PRONIKÁNÍ MRAZU VZORKEM Č. 9

Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Počet zkušebních těles:	1
Výška zkušebního tělesa:	120 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Doba ochlazování vzorků:	130 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

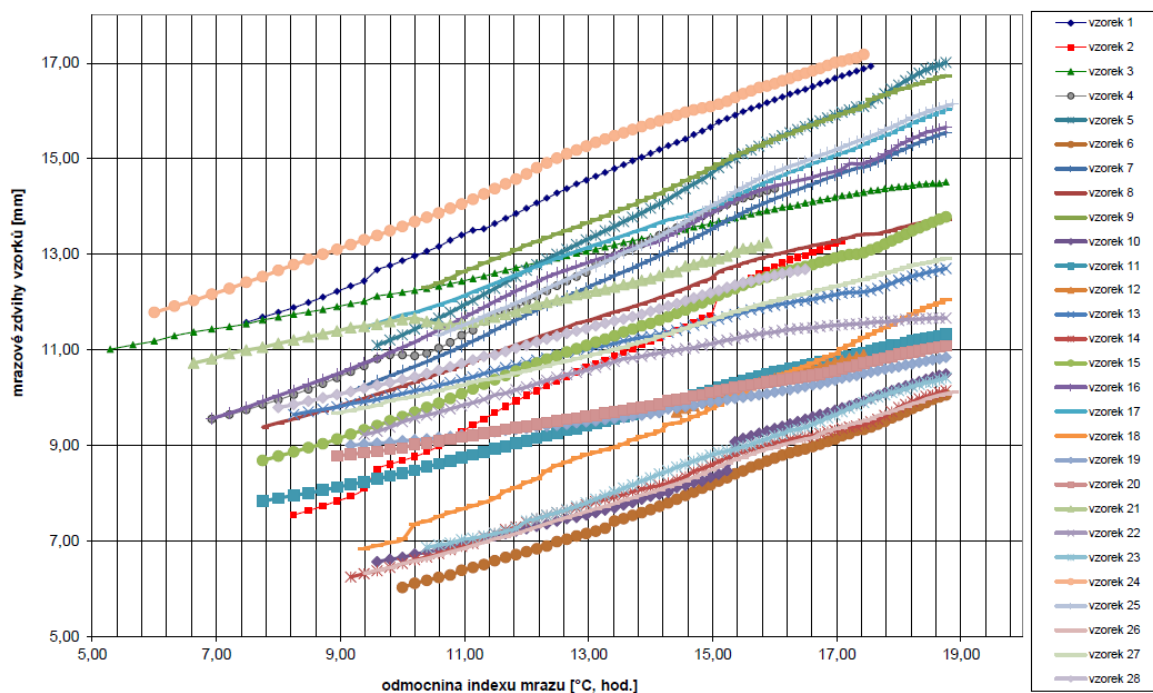
Záznam teplot			
Čas [h]	Čidlo 1 [°C]	Čidlo 2 [°C]	Čidlo 3 [°C]
0	4,8	4,8	4,4
1	4,9	4,9	4,5
2	2,2	3,9	4,3
3	-0,2	2,9	3,6
6	-1,4	0,6	2,1
8	-2,1	0,6	2,3
27	-2,8	0,1	1,7
30	-2,5	0,4	1,1
32	-2,6	0,3	1,8
35	-2,6	0,2	1,7
49	-2,5	-0,1	1,1
56	-2,6	-0,4	1,2
75	-2,7	-0,1	1,1
99	-2,6	-0,1	1,1



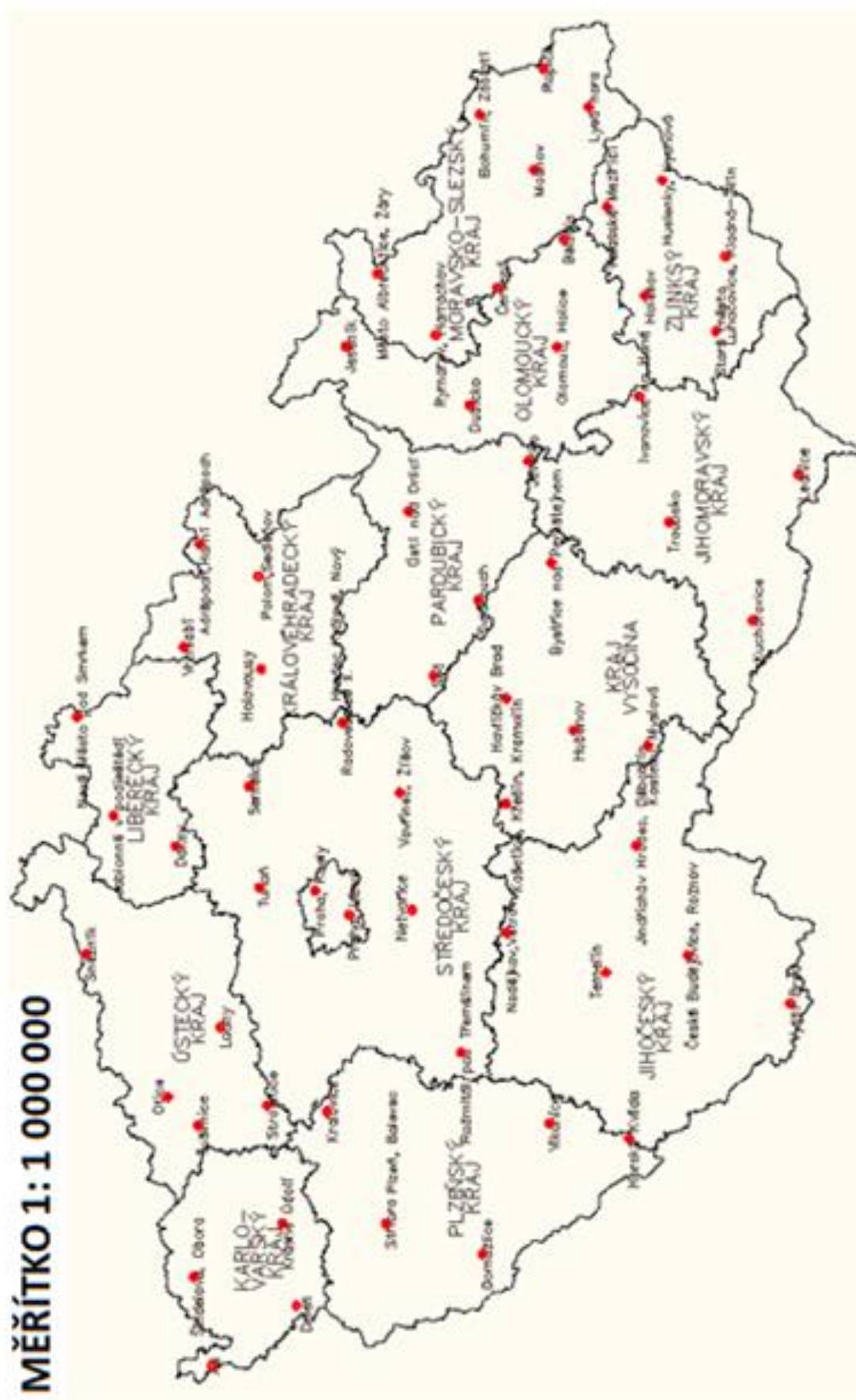
VYHODNOCENÍ DÉLKY CYKLU ZKOUŠKY NAMRZAVOSTI

Provedl:	Bc. Jakub Mašek
Lokalita:	Laboratoř ústavu PKO, VUT FAST v Brně
Vzorek:	F6 CL (Areál FAST na Žižkově ul. v Brně)
Počet zkušebních těles:	28
Výška zkušebních těles:	120 mm
Doba saturace vzorku:	20 hodin
Doba ochlazování vzorků:	190 hodin
Teplota chlazení:	-4,5 °C

Číslo vzorku	Čas [h]	Číslo vzorku	Čas [h]
vzorek 1	63,00	vzorek 15	74,00
vzorek 2	57,00	vzorek 16	77,00
vzorek 3	82,00	vzorek 17	67,00
vzorek 4	53,00	vzorek 18	67,00
vzorek 5	66,00	vzorek 19	68,00
vzorek 6	64,00	vzorek 20	69,00
vzorek 7	68,00	vzorek 21	53,00
vzorek 8	74,00	vzorek 22	67,00
vzorek 9	62,00	vzorek 23	63,00
vzorek 10	66,00	vzorek 24	68,00
vzorek 11	74,00	vzorek 25	62,00
vzorek 12	49,00	vzorek 26	68,00
vzorek 13	25,00	vzorek 27	69,00
vzorek 14	68,00	vzorek 28	53,00
Průměr	62,21	-	66,07
Celkový průměr		64,14 hodin	

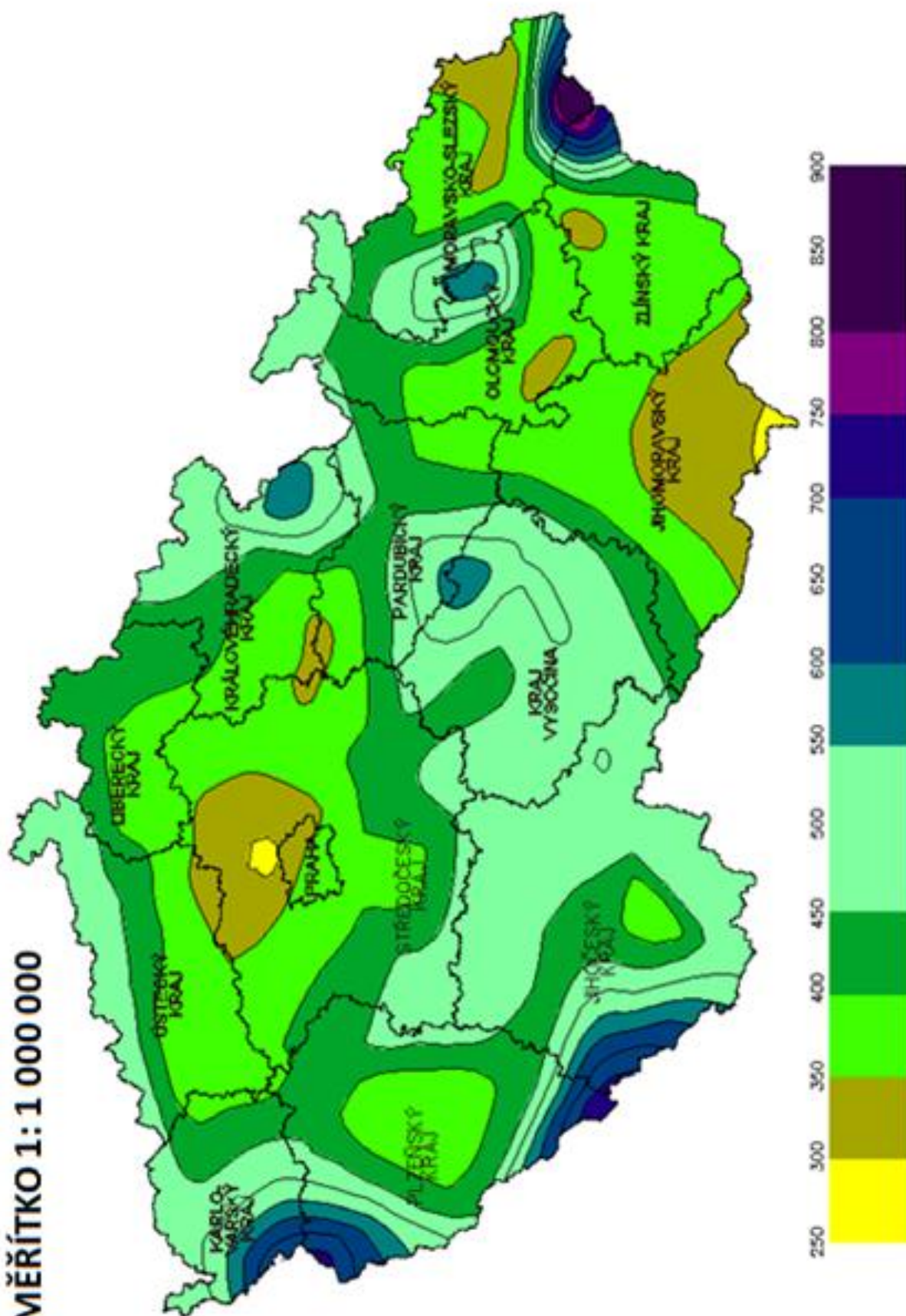


PŘÍLOHY B



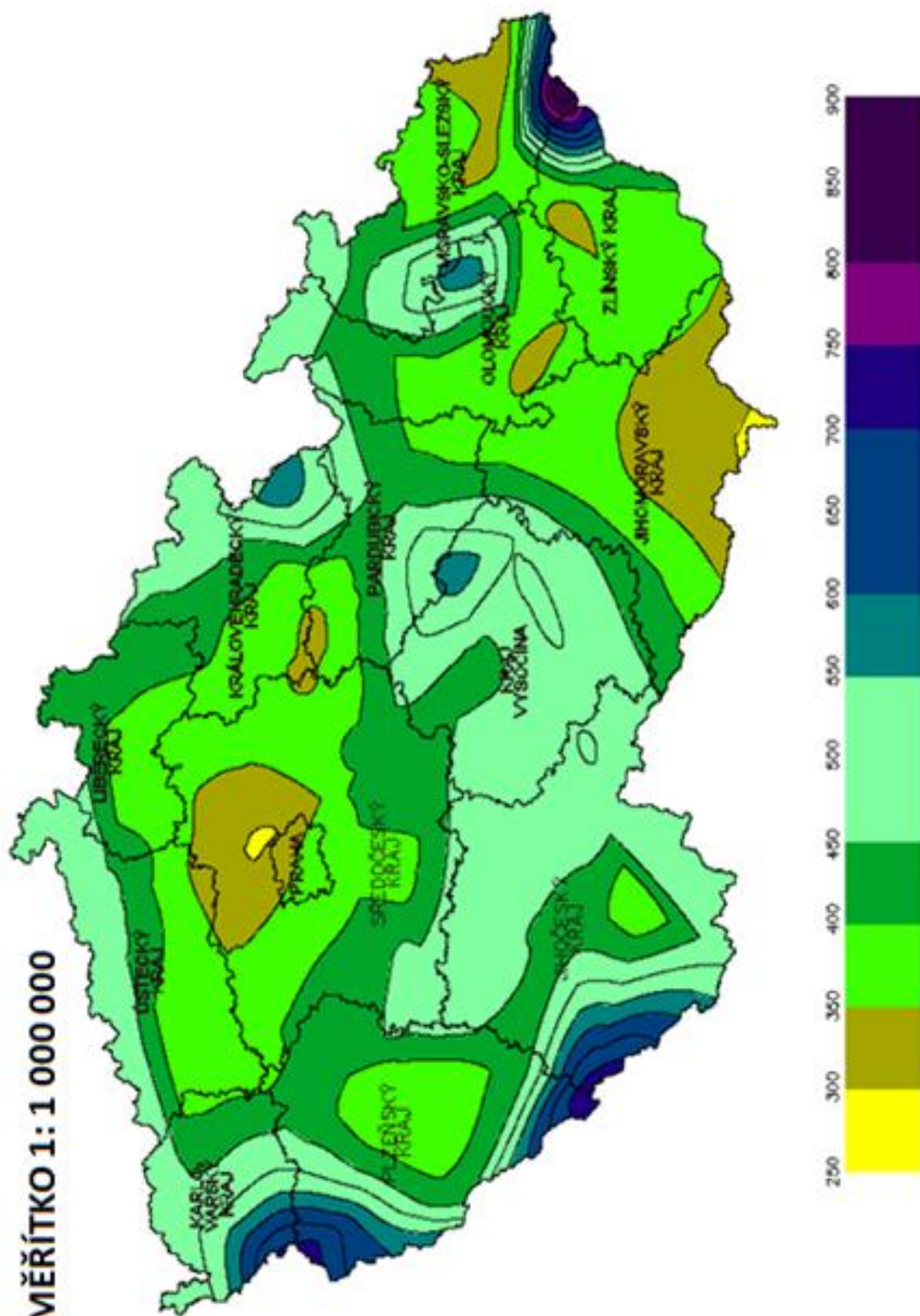
Mapa rozmístění meteorologických stanic

MĚŘÍTKO 1:1 000 000



Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 10 let

MĚŘÍTKO 1: 1 000 000



Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu I_m pro střední dobu návratnosti 7 let

