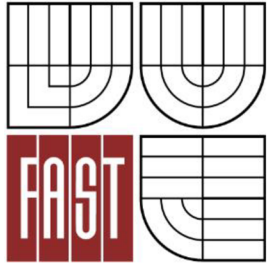




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

NAMRZAVOST ZEMIN A MATERIÁLŮ V AKTIVNÍ ZÓNĚ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ADAM PUDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2013

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Adam Puda

Název Namrzavost zemin a materiálů v aktivní zóně pozemních komunikací

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

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2012

Datum odevzdání bakalářské práce 24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012

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

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

Podklady a literatura

díplomové a bakalářské práce z roku 2005-2011

výzkumné práce na dané téma

ČSN 72 1191 Zkoušení míry namrzavosti zemin (1988)

odborné články a publikace z českých a zahraničních vědeckých sborníků

on-line informace z internetu

Zásady pro vypracování

Rešeršní přehlednou formou zpracovat dostupné informace o sledování namrzavosti zemin v podloží vozovek pozemních komunikací. Zdůraznit problémy nebezpečně namrzavých materiálů. V samostatné kapitole se očekává uvedení zahraničních zkušeností s měřením namrzavosti zemin v podloží vozovek pozemních komunikací.

Požadované výstupy:

Úvod se specifikací cílů bakalářské práce

Teoretická část zahrnující široké aktuálně dostupné informace na dané téma. (80% náplně bakalářské práce)

Praktická část - popis konkrétních praktických úkonů provedených v bakalářské práci (výpočtové modely, laboratorní nebo polní zkoušky, empirické statistické výpočty, apod.) (20% náplně bakalářské práce)

Zhodnocení výsledků práce

Závěr (odpověď na stanovené cíle práce)

Literatura

Přílohy

Předepsané přílohy

.....

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

Abstrakt

Bakalářská práce se v teoretické části věnuje deformacím způsobených účinkem mrazu, především však mrazovým zdvihům, jejich postupným rozvojem a faktory ovlivňující jejich vznik. Dále rozdílnými způsoby měření míry namrzavosti v České republice a jejich porovnání. Seznámení s odlišnými metodami měření míry namrzavosti ve vybraných zemích v rámci Evropské Unie. Praktická část je zaměřena na průběh mrazového zdvihu vzorků s a bez použití tepelněizolační látky.

Klíčová slova

Mrazový zdvih, míra namrzavosti, hladina podzemní vody, aktivní zóna, působení mrazu, ledová čočka, mrazová citlivost zemin, saturace, Scheibleho kritérium, přímá zkouška namrzavosti, index mrazu, Proctorova zkouška, mrazuvzdornost, jemnozrnné částice, bobtnání, zmrzlý vzorek, rozmrzání

Abstract

The bachelor thesis deals with the theoretical part of the deformation caused by frost action, but primarily frost heave, their gradual development and factors affecting their final formation. Furthermore, different ways of measuring the frost susceptibility in the Czech Republic and their comparison. Introduction to the different methods of measuring frost susceptibility in selected countries within the European Union. The practical part is focused on the process of frost heave samples with and without thermal insulation material.

Keywords

Frost heave, frost susceptibility, groundwater level, active zone, frost action, ice lens, frost sensitivity of soil, saturation, Scheible criterion, frost heave test, frost index, Proctor test, frost resistant, fine-grained soil particles, swelling, frozen sample, thawing

Bibliografická citace VŠKP

PUDA, Adam. *Namrzavost zemin a materiálů v aktivní zóně pozemních komunikací*. Brno, 2013. 65 s., 12 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval (a) samostatně a že jsem uvedl (a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21. 5. 2013

.....
podpis autora
Adam Puda

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 21. 5. 2013

.....
podpis autora
Adam Puda

Poděkování:

Děkuji především mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc, a také panu Pavlu Strakovi za nesmírnou ochotu a pomoc při provádění zkoušek v laboratoři ústavu pozemních komunikací.

Dále děkuji své spolubydlící a kamarádce Petře Smělikové za neocenitelnou přítomnost a vzájemnou morální spolupráci při dokončování našich prací. Kamarádu a kolegovi Pavlu Dočkalovi za názory, připomínky a pomoc při technických potížích a především své rodině a obzvláště Silvii Koudelkové za neutuchající psychickou podporu.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Teoretická část	12
2.1	Poruchy vozovky vzniklé působením mrazu na povrch vozovky	12
2.1.1	Mrazové trhliny	12
2.2	Poruchy vozovky vzniklé působením mrazu v aktivní zóně podloží	14
2.2.1	Přísun vody do podloží vozovky.....	14
2.2.2	Propustnost.....	17
2.2.3	Voda v kombinaci s mrazem.....	18
2.2.4	Příčiny vzniku mrazových zdvihů.....	20
2.2.5	Rozdělení zemin.....	21
2.2.6	Mrazový zdvih	22
2.2.7	Ztráta únosnosti	22
2.2.8	Chování obrusných vrstev.....	23
2.3	Možné opatření proti vzniku mrazových zdvihů.....	24
2.4	Řešení problematiky v ČR	25
2.4.1	Nepřímá metoda posouzení míry namrzavosti.....	25
2.4.2	Přímá metoda posouzení míry namrzavosti	26
2.4.3	Porovnání přímé a nepřímé metody	29
2.4.4	Původní norma ČSN 72 1191	30

2.5	Řešení problematiky v zemích Evropy.....	31
2.5.1	Rakousko.....	31
2.5.2	Německo	33
2.5.3	Francie.....	38
2.5.4	Finsko.....	41
3	Praktická část	47
3.1	Tepelná izolace.....	47
3.2	Průběh zkoušky	48
3.2.1	Příprava vzorku	48
3.2.2	Průběh zkoušky	49
3.2.3	Porovnání výsledků zkoušek.....	53
4	Závěr	56
5	Seznamy	60
6	Podklady a použitá literatura.....	64
7	Přílohy	66

1 Úvod

Navrhování pozemních komunikací je samo o sobě ne příliš jednoduchá záležitost. Musí být dodržena řada vstupních podmínek a požadavků uvedených v normách a předpisech se snahou o to, aby výsledné řešení bylo jednoduché, efektivní a v dnešní době především co nejlevnější. Nicméně při vytváření trasy by neměla být opomíjeno komplexní řešení včetně technologické části stavby, která může ovlivnit její celkovou trvanlivost a použitelnost.

Problematika působení mrazu na pozemní komunikace je dlouhodobou záležitostí. Mráz totiž působí jak na povrch vozovky, kde se projevuje především vznikem trhlin, tak i v podloží vozovky, kde způsobuje mrazové zdvihy při zmrznutí saturované, především jemnozrnné zeminy a následně při rozmrzání ztrátu únosnosti. Ať už mráz působí na povrchu pozemní komunikace nebo pod ní, vždy ji negativně ovlivní a zkrátí tak její životnost.

Cílem práce bylo zaměřit se na sledování namrzavosti zemin a jejího důsledku v podloží vozovky z hlediska aktuálních zkušebních postupů v ČR i v zahraničí s konkrétním praktickým cílem, posoudit odizolování zkušebních vzorků při zkoušení namrzavosti přímou metodou podle ČSN 72 1191 (viz. praktická část kapitola 3).

2 Teoretická část

Každá hmota podléhá účinkům klimatického prostředí a zatěžování provozem, kdy dochází k jejímu poškození a následnému narušení její struktury. Bohužel tento jev můžeme pouze omezit, a to výběrem vhodných materiálů a použitím správných technologií při novém navržení nebo rekonstrukci pozemní komunikace. Různých poruch a deformací vozovek nebo konstrukčních vrstev je široká škála, tato práce se zabývá v první teoretické části poruchami vzniklými během a po působení mrazu na vozovku v aktivní zóně. Dále pak sleduje vývoj zkušebních metod na zkoušení namrzavosti v ČR a zahraničí. [1]

2.1 Poruchy vozovky vzniklé působením mrazu na povrch vozovky

2.1.1 *Mrazové trhliny*

2.1.1.1 *Vznik mrazových trhlin*

Za běžných klimatických podmínek se asfaltové pojivo chová jako viskoelastická látka. Taková látka je kombinací vlastností viskózní kapaliny a elastické látky, což má za následek, její pomalé tečení, neboť se projevuje vnitřní tření kapaliny, a pružné chování. Tyto vlastnosti asfaltové pojivo přenáší i na asfaltovou směs a díky této kombinaci není zapotřebí, u netuhých obrusných vrstev, dilatačních spár. Problém nastává tehdy, jsou-li běžné klimatické podmínky nedodržené a nastávají extrémní výkyvy počasí, konkrétně při dlouho trvajících mrazech, kdy se poddajná vlastnost asfaltového pojiva, s rostoucím mrazem, pomalu vytrácí, látka se stává křehkou a právě i kvůli absenci dilatačních spár vznikají tahová napětí, která i při působení menšího zatížení, mají za následek vznik a vývoj trhlin v obrusné vrstvě vozovky – vznikají mrazové trhliny.

Tomuto problému bylo věnováno mnoho různých zkoumání za účelem zjištění podrobnějšího vzniku a rozvoje mrazových trhlin, které byly založeny na dlouhodobém pozorování stovek úseků, nacházejících se v odlišných klimatických oblastech. Závěry výzkumů jednoznačně potvrdili tvorbu nízkoteplotních trhlin v důsledku působících faktorů, které jsou – index mrazu, gradace asfaltového pojiva a tloušťka asfaltových vrstev, kde ovlivnitelným faktorem, který má rozhodující vliv na odolnost tvorby trhlin

je gradace asfaltového pojiva, což je určující faktor tvrdosti asfaltu při teplotě 25°C, který je výsledkem penetrační zkoušky.

Dalším faktorem ovlivňujícím celkové vlastnosti je oxidace asfaltů, kdy asfalt, jakožto organická látka, reaguje s kyslíkem v okolním prostředí, což má za následek její stárnutí a přeměnu její struktury na tvrdší a křehčí. To se stává především za vysokých teplot, např. při míchání asfaltové směsi na obalovně, nebo při zimní rychlé lokální opravě za užití nevhodné technologie SILKOT, kdy se asfaltové pojivo přepálí infrazářiči a životnost asfaltové směsi se tak radikálně sníží z obvyklých 10 let na méně než 1 rok. [1]

2.1.1.2 *Modifikované asfalty*

Příznivou změnu přináší možnost využití modifikovaných asfaltů, což jsou asfalty, jejichž vlastnosti byly záměrně pozměněny přidáním přísad tzv. aditiv, čímž byly jejich chemické nebo fyzikálně mechanické vlastnosti upraveny ve prospěch vyšší kvality asfaltové směsi, jedná se především o zlepšení přilnavosti asfaltu ke kamenivu, zlepšení odolnosti proti vzniku trvalých deformací a snížení stárnutí asfaltu a hlavně snížení teplotní citlivosti a jeho křehkosti v oblasti nízkých teplot (snížení bodu lámavosti) a zvýšení bodu měknutí, čili je při vysokých teplotách tvrdší a při nízkých teplotách měkčí než obyčejný asfalt.

2.1.1.3 *Shrnutí problému mrazových trhlin*

I přes snahu, co nejvíce snížit bod lámavosti a tím oddálit vznik mrazových trhlin, tak i při velmi nízké teplotě se asfaltová směs i s modifikovaným pojivem smrští. Klesne-li teplota pod hodnotu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo je-li teplotní pokles povrchu vozovky rychlý, většinou dochází k vytvoření příčné smršťovací trhlince, která oslabí asfaltové vrstvy. Při opakování poklesu teploty trhlínka roste do hloubky obrusné vrstvy, dokud nedosáhne ložní nebo podkladní vrstvy vozovky, kde naruší spojení vrstev. Nejdříve vznikne úzká trhlínka nepostihující celou šířku vozovky, následně při nedodržení správné běžné údržby obrusné vrstvy netuhé vozovky se úzká trhlínka rozšíří přes celou šířku vozovky – obvykle v jejím nejslabším místě, což je u kanalizačních jímek nebo poklopů uličních vpustí. Poté následuje její rozvětvení nebo vytvoření přidružených

trhlinek doprovázené jejich prohlubováním a vznik široké trhliny, kde se olamují hrany, čili dochází ke ztrátě hmoty z obrusné vrstvy a vznikne díra neboli výtluk. [1] [2]

2.2 Poruchy vozovky vzniklé působením mrazu v aktivní zóně podloží

Další typ poruchy vozovky vlivem namrzavosti zemin v horní vrstvě násypu je možný vývoj deformace, která vzniká při působení mrazivých klimatických podmínek, a kterou se tato práce podrobněji zabývá, je nadzdvížení konstrukčních vrstev v aktivní zóně mrazovými zdvihy. Tento jev může nastat během období zimy, kdy se venkovní teplota pohybuje pod bodem mrazu a mrazový zdvih je způsoben působením mrazu v zemině za přítomnosti zdroje vody. Nicméně velikost a rozsáhlost mrazového zdvihu ovlivňuje více faktorů, které jsou popsány v následující kapitole. [3]

2.2.1 Přísun vody do podloží vozovky

Odtok vody z vozovky je jedním z nejdůležitějších požadavků při navrhování konstrukce vozovky. Špatný odvod vody je jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících změnu zeminy v podloží. Voda se do podloží dostává nejčastěji pronikáním z povrchu dna příkopů nebo přes trhliny do podloží skrze obrusnou a ložní vrstvu. Nahromaděná voda poté může způsobit významné snížení únosnosti podloží, která pod zatížením dopravou selhává. Průsak vody je dále zodpovědný za erozi nebo poškození celé konstrukce v zářezu. Navíc nahromaděná voda způsobuje značné problémy v kombinaci s mrazem.

Možné zdroje dodávky vody:

- Z povrchu – povrchová voda
- Z podzemí – podzemní voda

2.2.1.1 Povrchová voda

I přes veškerou snahu a přijetí různých opatření proti vniknutí povrchové vody do podloží, vznikají na vozovce dříve nebo později spáry a trhlinky, které následný vstup umožní. Před vznikem deformací vozovky má povrchová voda možnost dostat se do podloží skrze nezpevněnou krajnici. Pro snížení tohoto rizika jsou ramena a příkopy

v šikmém sklonu, aby ji bylo možno přijatelně odvádět. Ovšem není-li dodržena pravidelná údržba odvodňovacích zařízení po celou dobu životnosti komunikace, nárůst vegetace, sedimenty a odpadky mohou zhoršit odtok vody, popřípadě způsobit její stání příkopu, kdy se voda následně vstřebává do podloží a zemního tělesa. [4]

2.2.1.2 Podzemní voda

Ta se vyskytuje v různé hloubce v podzemí a její stav je ovlivňován několika faktory:

- Volnou neboli gravitační vodou
- Hygroskopickou vlhkostí
- Kapilární vlhkostí – vzlínavostí

2.2.1.2.1 Volná neboli gravitační voda

Voda, která pronikne z povrchu, prostupuje hlouběji, dokud nenarazí na zeminu, která omezí její průsak do větší hloubky. Tato zemina se může nacházet v konstrukční vrstvě, ale spíše v podloží. Její únosnost není příliš vysoká a její pórovitost způsobuje, že množství vody, které opouští tuto oblast, odtokem skrze ni, je menší, než množství vody, které přitéká z povrchu. Většinou se jedná o zeminy jemnozrnné se značným podílem jílové nebo hliněné složky. Za dobu hromadění voda postupně vyplní všechny okolní volné dutiny. Tato voda, kterou zemina obsahuje, se nazývá volná nebo gravitační z důvodu jejího ovlivňování pouze atmosférickým tlakem. Ta protéká skrze zeminu volně a omezuje jí pouze odpor tření mezi jednotlivými zrny zeminy. Tento pohyb volné vody je označován jako prosakování. Hranice saturované oblasti může ovlivnit hladinu podzemní vody, která se liší podle klimatických podmínek. Během mokré zimy hladina podzemní vody stoupá a v průběhu suchého léta je omezen zdroj vody, což má za následek pokles hladiny podzemní vody. Hromadění vody u nepropustné zeminy ji nasycuje a to může způsobit zvýšení hladiny podzemní vody. [4]

2.2.1.2.2 Hygroskopická vlhkost

Při vysoušení zeminy na vzduchu se vlhkost vypaří až po vlhkost hygroskopickou, což je vlhkost, která je v rovnováze s vlhkostí vzduchu v okolí, neboť hygroskopické látky

na sebe vážou vodní páru a uchovávají ji v sobě. Většinou se jedná o jílovité minerály, kde se přítomnost hygroskopické vlhkosti projevuje bobtnáním těchto minerálů. Množství hygroskopické vlhkosti se určuje jako rozdíl hmotnosti vysušené zeminy na vzduchu a konstantní hmotnosti zeminy po 24 hodinách vysoušení za teploty 100 – 110 °C. [4]

2.2.1.2.3 Kapilární vlhkost – vzlínavost

Poslední významný faktor ovlivňující hladinu podzemní vody je dán kapilárním potencionálem zeminy, kdy zrna suché zeminy na sebe vážou vlhkost podobně jako sklo. Důkazem toho je kapilární elevace vody, kdy kapalina s nízkým povrchovým napětím stoupá vzhůru a proto porézní materiály nasávají vodu. Tím pádem čím menší dutiny v materiálu jsou, tím větší je výška kapilárního vzlínání. Kapilární vzlínání je ovlivněno mnoha faktory, nejpodstatnějším je typ zeminy. V tomto případě je podstatný rozdíl ve velikosti pórových dutin v zemině, který se liší podle velikosti jejich zrn, čili jemnozrná zemina dosáhne vyšší hodnoty kapilární vzlínavosti než hrubozrná zemina, to z důvodu mnohonásobně menších pórových dutin. Tím se liší i přibližné hodnoty kapilární vzlínavosti (h_c) v odlišných zeminách:

➤ Písek	$h_c = 0,03 \sim 0,1 \text{ m}$
➤ Hlinitý písek	$h_c = 0,5 \sim 2,0 \text{ m}$
➤ Hlína (silt)	$h_c = 2,0 \sim 5,0 (10,0) \text{ m}$
➤ Jíl	$h_c = 0,5 \sim 2,0 \text{ m}$

Kapilární vlhkost se tedy v zemině nachází nad hladinou podzemní vody, kde se přenáší vzhůru ve třech odlišných formách:

- Kapilární sytostí – Vlhkost v této oblasti je závislá nejen na typu zeminy, ale i na předešlém stavu hladiny podzemní vody. Byla-li oblast v nadloží již vystavena podzemní vodě, pronikání vlhkosti bude zde usnadněno a výška hladiny podzemní vody bude větší
- Částečnou kapilární vzlínavostí – V tomto případě je vzlínavost také závislá na předchozím stavu hladiny, neboť vlhkost se v této formě přenáší pomocí

vzduchu, ovšem je zde zapotřebí, aby hladina podzemní vody, svým pohybem, dala vzniknout několika větším dutinám, přes které jí přenos bude umožněn. Za jistých okolností může být vzlínavost větší než v případě kapilární sytosti

- Kontaktní vlhkostí – Tato vlhkost vzlíná v případě částečného odpařování podzemní vody v zemině a následné kondenzaci vodních par v menších dutinách [4] [5]

2.2.2 Propustnost

Propustnost je schopnost zeminy propouštět tekutinu účinkem hydraulického gradientu. Je ovlivněna především typem zeminy, které se od sebe mohou značně lišit. Hrubozrnné zeminy jako písek a štěrk působí malý odpor proti protékání tekutiny zato jemnozrnné zeminy, zejména jíly a hlíny, působí odpor značně větší. Propustnost zeminy je vyjádřena koeficientem propustnosti, koeficientem filtrace a dalšími koeficienty a faktory, které klasifikují zeminy na:

- Dobře odvodněné
- Špatně odvodněné
- Nепropustné

Propustnost zeminy úzce souvisí s působením mrazu v podloží pozemní komunikace.

2.2.2.1 Koeficient propustnosti

Tento koeficient vyjadřuje míru propustnosti pórového prostředí a závisí na vlastnostech dotyčné kapaliny a zeminy. Obecně je za kapalinu považována především voda, která se běžně nachází v každém typu zeminy, proto je tento koeficient považován za vlastnost zeminy, jenž je ovlivněn především faktory:

- Velkostí zrn
- Pórovitostí
- Strukturou

Jejich proměnné vztahy jsou pro typické zeminy výpočetně velice složité a tím brání v rozvoji výpočetních vzorců pro koeficient propustnosti s výjimkou těch

nejjednodušších typů zemin, proto byl koeficient pro běžné zeminy stanoven experimentálně v laboratoři nebo v terénu.

2.2.2.2 *Dobře odvodněné zeminy*

Do této skupiny patří dobře i špatně zrněný čistý písek a štěrk, které se značí jako GW, GP, SW a SP. Používají se v místech pro odvod vody z povrchu nebo pro zachycení vody z okolních oblastí a následně ji usměrněna do příkopů nebo jiných odvodňovacích zařízení. Tento přístup je velice efektivní při omezení pronikání vody do podkladu nebo podloží. Obecně by mělo platit, že hladina podzemní vody by se měla nacházet právě v těchto typech zemin.

2.2.2.3 *Špatně odvodněné zeminy*

V této kategorii jsou zahrnuty zeminy anorganické a organické s jemným pískem a příměsí jemnozrnných zemin, organické jíly s nízkou plasticitou a hrubozrnné zeminy obsahující příměsí jemnozrnných zemin. Jsou to zeminy značené ML, MH, GM, GC, SC, a SM. Odvodnění pouze pomocí gravitace je pro tyto zeminy značně obtížné.

2.2.2.4 *Nepropustné zeminy*

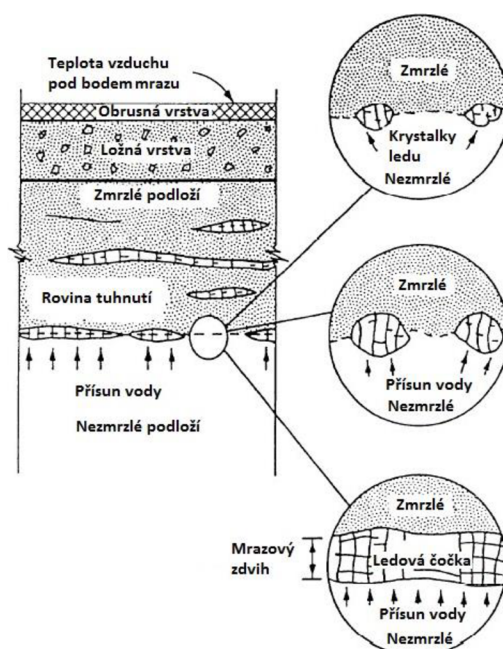
Zde nalezneme jemnozrnné, homogenní, plastické zeminy a hrubozrnné zeminy obsahující značné množství příměsí jemnozrnných, převážně jílovitých zemin. Jsou značeny jako CL a CH. Podpovrchové odvodnění je tak pomalé, že jakákoliv snaha o zlepšení jejich odtokové situace má velice malý význam a výhodnější řešení je nahrazení těchto typů zemin za lépe odvoditelné zeminy. [4]

2.2.3 *Voda v kombinaci s mrazem*

Kromě hromadění vody v jednotlivých typech zemin a s tím spojených nepříjemností nastává při změně klimatických podmínek další problém. Vlivem působení mrazu nastává proces zmrazení a poté následného rozmrazení, který nepříznivě ovlivňuje celkovou strukturu zeminy a způsobuje její poškození, čili může dojít i k vážnému narušení pozemní komunikace. Problém tedy vyplývá z působení mrazu v zimě a tání na jaře.

2.2.3.1 Zmrazení – mrazový zdvih

Při přechodu z kapalného skupenství do pevného zvětší voda svůj objem přibližně o 9 %. Toto navýšení objemu vody se u zemin, které ji obsahují, projevuje nadzdvížením vrstev ležících nad místem zvýšeného objemu. Samotný jev se označuje jako mrazový zdvih a je způsoben vznikem ledové čočky v místě největší hloubky působení mrazu. Rozdíl mezi zmrzlou vodou kdekoliv v hloubce působení mrazu a místem její maximální hloubky je ten, že ke vzniku ledové čočky napomáhá neustálý přísun vody z nezamrzlých vrstev, kdy na sebe vzniklé ledové krystalky neustále váží další vodu, která je působením mrazu v okolí ochlazená a postupně vzlíná, a při vzájemném kontaktu dojde k vytvoření dalších krystalků ledu. Tím pokračuje jejich růst a vede k vytvoření ledové čočky a to do doby, dokud není přerušen přísun vody nebo pokud teplota nestoupne nad bod mrazu. Hloubka, do které pronikne mráz pod povrchem vozovky, je závislá zejména na teplotě vzduchu, době trvání pod bodem mrazu a na množství přítomné vody. Zásobování vodou pro ledovou segregaci je zajištěno podzemní vodou, nachází-li se její hladina během roku do 1,5 m od navrhovaného podloží. Je-li hladina podzemní vody ve více než 3 m od navrženého podloží, zdroj vody bude přítomen, bude-li zemina obsahovat dostatečný podíl jemnozrnné složky.



Obr. 2-1 Schéma postupného vzniku mrazového zdvihu [4]

2.2.3.2 *Rozmrazení – ztráta únosnosti*

Druhá fáze poškození mrazem nastává ke konci zimy nebo na začátku jara, kdy se teploty vzduchu začnou pohybovat nad bodem mrazu. Rozmrazení promrzlého podloží probíhá jak z horní, tak i z dolní části a dá se rozdělit do tří možných průběhů:

2.2.3.2.1 Od spodní části vzhůru

Je-li teplota vzduchu těsně pod bodem mrazu po dostatečně dlouhou dobu, tak rozmrazení zamrzlé zeminy probíhá od spodní části směrem vzhůru. Tento typ rozmrazení je žádoucí, neboť rozpuštěná voda z ledových čoček má snahu odtéct směrem dolů a takový odtok vody nezatěžuje systém povrchového odvodnění a nesnižuje stabilitu podloží z důvodu nasycení.

2.2.3.2.2 Od horní části dolů

K rozmrazení od shora dolů dojde při teplotě vzduchu nad bodem mrazu, kdy zmrzlé vrstvy zůstanou pod rozmrzlým podložím. To bohužel znemožní odtok rozmrzlé vody směrem dolů, výsledkem čehož je přesycení zeminy a tím snížení stability podloží, což vede ke vzniku poruch.

2.2.3.2.3 Z obou částí zároveň

Rozmrazení z horní i dolní části zároveň nastane při teplotě vzduchu těsně nad bodem mrazu, což má také za následek snížení stability zeminy, ale již ne v takovém rozsahu jako při rozmrzání shora dolů. [4]

2.2.4 *Příčiny vzniku mrazových zdvihů*

Teplota vzduchu pod bodem mrazu musí proniknout do podloží a způsobit zmrznutí nasycené zeminy. Obecně platí, že tloušťka ledové vrstvy je nepřímo úměrná rychlosti pronikání mrazu hlouběji do podloží. Z toho vyplývá, že kolísavé teploty na začátku zimy napáchají větší škody než extrémně chladné zimy, kde je více pravděpodobné, že voda bude zmrazena ještě před možností ledové segregace. Musí být k dispozici stálý zdroj vody pro podporu navyšování objemu ledových čoček a musí probíhat ve vhodném typu zeminy podporující její růst. Hlavními příčinami tedy jsou:

- Opakovaný nebo dlouhodobý pokles teploty pod bod mrazu
- Neustálý přísun vody
- Přítomnost namrzavé a nebezpečně namrzavé zeminy – obsah částic menších než 0,063 mm ve více jak 35 % [4] [6]

2.2.5 Rozdělení zemín

Anorganické zeminy obsahující více než 3% hmotnosti zrna menší než 0,02 mm se považují za mrazově citlivé. Nicméně některé zeminy, které obsahují do 10 % hmotnosti zrna menší než 0,02 mm, nemusí být náchylné na působení mrazu. I přes všechnu různorodost byly nakonec zeminy rozděleny např. v Německu nebo Rakousku podle citlivosti na působení mrazu do následujících skupin F-1 až F-4. Jsou uvedeny v přibližném pořadí se zvyšující se náchylností na mrazový zdvih nebo oslabení v důsledku rozmrzání. Zeminy ve skupině F-4 jsou na působení mrazu nejvíce citlivé. [4]

Tab. 2-1 Rozdělení zeminy podle mrazové citlivosti [4]

Mrazová skupina	Druh zeminy	Obsah částic menších než 0,02 mm	Výchozí klasifikační systém zemín
F-1	Štěrkovité zeminy	6-10 %	GM, GW-GM, GP-GM
F-2	Štěrkovité zeminy	10-20 %	GM, GW-GM, GP-GM
	Písky	6-15 %	SM, SW-SM, SP-SM
F-3	Štěrkovité zeminy	>20 %	GM, GC
	Písky kromě velmi jemnozrnných	>15 %	SM, SC
	Jíly	-	CL, CH
F-4	Všechny naplaveniny – bláto	-	ML, MH
	Velmi jemnozrnné písky	>15 %	SM
	Jíly	-	CL, CL-ML
	Usazené jemnozrnné jíly, vrstvené sedimenty	-	CL+ML, CL+ML+SM, CL+CH+ML, CL+CH+ML+SM

2.2.6 Mrazový zdvih

Je způsoben ledovou segregací za vzniku ledové čočky v zemním tělese pozemní komunikace. Zdvihy mohou být rovnoměrné nebo nerovnoměrné v závislosti na změnách charakteru v zemině a vodním režimu v místě, na nichž se komunikace nachází. Tendence nárůstu ledových vrstev se zvyšuje s klesající zrnitostí zeminy. Zato rychlost proudění vody se snižuje s klesající zrnitostí zeminy. Proto je rozumné očekávat největší mrazové zdvihy v zeminách se střední zrnitostí, což jsou prachovité zeminy, jílovito-prachovité písky a šterky. [4]



Obr. 2-2 Schéma zemního tělesa při vzniku mrazového zdvihu [6]

2.2.7 Ztráta únosnosti

Nastane-li ledová segregace v zeminách citlivých na působení mrazu, tak dojde v této zemině i ke snížení její únosnosti. K tomu často dochází v mezidobí zimy a jara, neboť povrch začíná rozmrazat, stejně tak taje nahromaděný sníh a k tomu se můžou přidat sněhové nebo dešťové přeháňky. Voda se potom hromadí a nemůže odtéct přes zamrzlou zeminu a v důsledku toho je zemina přesycena vodou a změkne. Nicméně ke snížení únosnosti zeminy v podloží může dojít i při nepatrném zdvihu, neboť voda se při vzniku ledové čočky extrahuje ze zeminy v okolí. Tím oslabí krystalickou mřížku

zeminy, kterou dočasně vyváží vzniklá ledová čočka. Mimo to může doprava svým provozem následně přeskupit původní zhutnění, neboť vyvine tlak v pórech oslabené zeminy, což vede k dalšímu celkovému snížení únosnosti zeminy. Celková míra a doba snížené únosnosti zeminy při rozmrzání závisí na:

- Typu zeminy
- Teplotní podmínce a celkové době rozmrzání
- Četnosti a typu dopravního zatížení během rozmrzání
- Dostupnosti vody během rozmrzání
- Odvodňovacích poměrech [4]



Obr. 2-3 Schéma zemního tělesa při ztrátě únosnosti [6]

2.2.8 Chování obrusných vrstev

2.2.8.1 Tuhá vozovka

Beton má obecně malou pevnost v tahu a při navrhování tuhé vozovky je deska navržena tak, aby odolávala zatížením od dopravy ze shora. Proto mají desky tendenci trhat se při působení nerovnoměrného zdvihu, neboť působí jako bodové zatížení. Pokud tuhé vozovky přečkají účinky zdvihů, následně může dojít k jejich porušení v období rozmrzání, neboť v některých místech pod deskou může dojít ke ztrátě styku

s podkladní vrstvou. V železobetonové desce spolupůsobí beton a ocel, čili má větší pravděpodobnost, v období rozmrzání, vše přečká bez vzniku trvalých deformací.

2.2.8.2 *Netuhá vozovka*

I když mají asfaltové směsi oproti betonu větší pružnost a jsou více flexibilní při změně tvaru, tak mrazové zdvihy jsou natolik rozsáhlé, že dojde ke vzniku trhlin. Nicméně ty nevedou k rychlejšímu selhání vozovky, zato nadprůměrné zatížení dopravou během období rozmrzání směřuje k jejímu rychlému celkovému selhání. [4]

2.3 Možné opatření proti vzniku mrazových zdvihů

Jsou-li omezeny příčiny vzniku ledových čoček, je potom možné mrazové zdvihy úplně nebo alespoň částečně eliminovat. Příznivých účinků můžeme docílit:

- Zvýšením stmelené vrstvy – navýšením tloušťky snížíme hloubku promrzání
- Navržením vozovky na základě nižšího modulu pružnosti podloží – navýšením tlouštěk jednotlivých vrstev je snaha omezit ztrátu únosnosti způsobené mrazovým zdvihem
- Použitím efektivnějšího způsobu odvodnění – snížení rizika ovlivnění zvýšené hladiny podzemní vody
- Použitím drenážní geotextílie a v rizikových místech použitím speciálních odvodňovacích systémů – syntetické membrány, podzemní drény a další
- Navržením vhodného propustného materiálu – docílení efektivnějšího a rychlejšího odtoku vody, navíc eliminuje snížení únosnosti
- Nenavrhováním nebo dodatečným odstraněním namrzavé zeminy do hloubky promrzání a snažit se dodržet difúzní vodní režim
- Použitím materiálů snižujících únik tepla – polystyren, izolační beton a jiné izolační látky, kdy zeminy poté nemusí být vystaveny účinkům mrazu
- Použitím hydraulických stabilizátorů zemin v podloží – vápno za účelem snížení vlhkosti zeminy
- Zpevněním celého zemního tělesa začleněnou geotextílií prokládanou již při výstavbě – vyztužené násypy apod.

Každá z těchto výše navržených opatření se přímo nebo nepřímo projeví především po finanční stránce, avšak i přes počáteční investice, které jsou jednoznačně vyšší, tak z dlouhodobého hlediska životnosti pozemní komunikace může jít stále o výhodnější řešení, nicméně ne vždy tomu tak musí být, a proto je vhodné každou investici zvážit. [6]

2.4 Řešení problematiky v ČR

Působení mrazu na pozemní komunikace a problémy spojené s tím řeší každý stát podle svého. Ať už je to především z důvodu rozdílných klimatických podmínek nebo odlišného hodnocení a rozdělení typů zemin. V České republice se posuzuje namrzavost stmelené a nestmelené směsi dvojitým způsobem a to pomocí přímé a nepřímé metody.

2.4.1 *Nepřímá metoda posouzení míry namrzavosti*

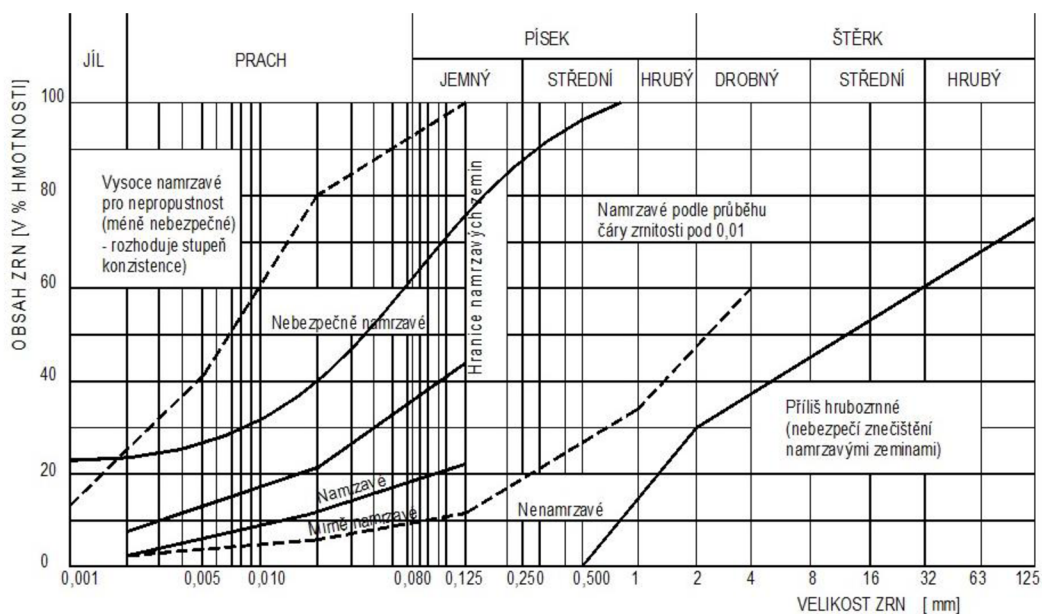
Nepřímá metoda je popsána v normě ČSN 73 6133, kde se uvádí určení namrzavosti přirozených zemin a materiálů podle tzv. Scheibleho kritéria zrnitosti. K použití této metody je zapotřebí pouze zrnitostní křivka zkoumaného vzorku, což je součtová čára, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna v milimetrech. Ta se získá podstoupením prosévací zkoušky vzorku a pro částice menší než 0,06 mm se provede hustoměrná zkouška podle normy ČSN EN 17 892-4.

2.4.1.1 *Vyhodnocení metody*

Výsledná zrnitostní křivka se poté graficky vynese do nomogramu Scheibleho kritéria uvedeného v příloze ČSN 73 6133 a zkoušený vzorek přiřadíme do příslušné skupiny, které jsou rozděleny a popsány v normě do 7 stupňů promrzání:

- Vysoce namrzavé pro nepropustnost – méně nebezpečné, rozhoduje stupeň konzistence
- Nebezpečně namrzavé – obsah částic menších než 0,063 mm je více než 35 % celku
- Namrzavé
- Namrzavé podle průběhu křivky zrnitosti pod 0,01 mm

- Mírně namrzavé
- Nenamrzavé – obsah částic menších než $0,002\text{ mm}$ je méně než 3 % celku
- Příliš hrubozrné – nebezpečí znečištění namrzavými zeminami



Obr. 2-4 Nomogram Scheibleho kritéria zrnitosti [7]

2.4.1.2 Použitelnost metody

Nepřímá metoda se používá především pro svoji časovou nenáročnost, nicméně její použití je značně omezeno, neboť její přesnost závisí pouze na stanovení zrnitostní křivky. Proto se tato metoda používá pro přibližné určení namrzavosti materiálů z podloží vozovky. Navíc tato metoda nemůže být použita u vzorků zemin, které byly upraveny hydraulickým nebo jiným pojivem, kde se očekává časová změna charakteru struktury materiálu. [7]

2.4.2 Přímá metoda posouzení míry namrzavosti

Přímou metodu popisuje zkušební norma ČSN 72 1191 novelizovaná v roce 2012. V této normě se míra namrzavosti určuje jen pro zeminy, zlepšené zeminy a materiály, které obsahují více než 5 % částic menších než $0,125\text{ mm}$. Výsledná hodnota namrzavosti poskytuje základní vstupní údaj pro návržení vozovky z hlediska její

ochrany vůči působení a poškození mrazem, a tím i určuje vhodný typ zeminy nebo materiálu pro zemní těleso, ochrannou nebo podsypnou vrstvu vozovky. Normu je také možno použít i pro určení vhodného typu zeminy nebo materiálů pro stavbu zemního tělesa železnic nebo letišť.

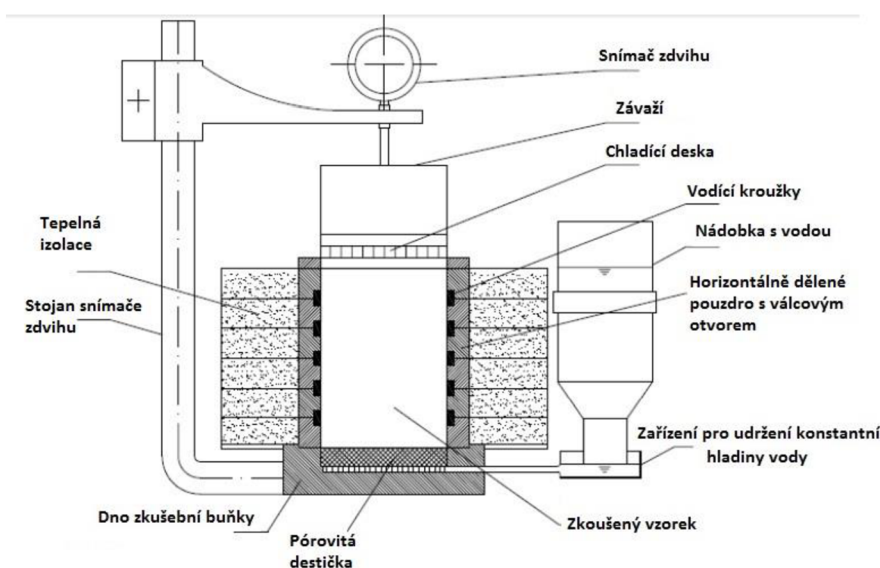
2.4.2.1 Princip zkoušky

Laboratorní zkouška stanovuje míru namrzavosti při napodobení účinku a působení mrazu na podloží vozovky za stálého vodo-tepelného režimu. Zkouška je konvenčního charakteru, čili nevystihuje přesně venkovní podmínky, neboť nezahrnuje dynamické působení od dopravy a nezohledňuje teplotní proměnlivost v čase.

Hodnota mrazového zdvihu u zkoušeného vzorku odpovídá postupnému vzniku a nárůstu ledových vrstviček k přírůstku druhé odmocniny indexu mrazu, kde tento vztah ($\Delta h / \Delta \sqrt{I_m}$) určuje míru namrzavosti zkoušeného vzorku.

2.4.2.2 Průběh zkoušky

K provedení zkoušky je zapotřebí vzorek zeminy připravit a ztuhnit v pouzdře většinou pomocí Proctorovy standardní zkoušky. Pouzdro se vloží do izolačního obalu, na který se poté nasadí mrazící deska, závaží a zařízení na měření zdvihu. Takto připravíme čtyři zkušební buňky.



Obr. 2-5 Schéma zkušební buňky [8]

Všechny buňky se následně uloží do chladicí skříně, kde se udržuje teplota 4 až 8 °C. V první fázi se vzorky nechávají minimálně 17 hodin v konstantním vodo-tepelném režimu z důvodu aklimatizace a nasycení vodou. Mrazicí deska není v činnosti a měření zdvihu se nezapočítává, neboť může docházet k nabobtnání vzorku.

Po uplynutí minimální doby se mrazicí deska udržuje při teplotě $-4(\pm 1)^{\circ}\text{C}$ a za stálého vodo-tepelného režimu se po dobu 120 hodin měří průběžný zdvih vzorku ve středu horní kruhové plochy.

U vzorků zeminy upravených stabilizátory a pojivy se zkouška provádí po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí a teplotě $20(\pm 5)^{\circ}\text{C}$. Jestliže je vzorek po uplynulé době vyhodnocen zkouškou jako namrzavý, tak se u vzorku určí konečná hodnota míry namrzavosti zkouškou po 90 dnech zrání. Delší doba zrání se používá za předpokladu příznivějšího výsledku nenamrzavosti, čili je možné uznat i zkrácenou dobu zrání při prokázání nenamrzavosti vzorku.

2.4.2.3 Vyhodnocení zkoušky

Míra namrzavosti je stanovena hodnotou β vyjádřená vztahem:

$$\beta = \Delta h / \Delta \sqrt{I_m}$$

kde Δh je naměřený zdvih zkoušeného vzorku (mm)

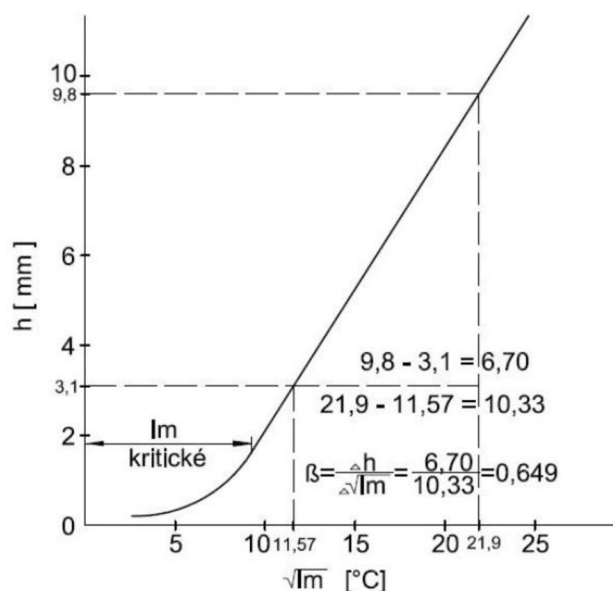
$\Delta \sqrt{I_m}$ je index mrazu ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)

Tab. 2-2 Stanovení míry namrzavosti podle součinitele β [8]

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

V době přeměny skupenství je vztah nelineární, proto se pro vyhodnocení používá lineární část závislosti zdvihu a druhé odmocniny indexu mrazu. Míra namrzavosti je

určena jako aritmetický průměr ze všech čtyř vzorků, přičemž odchylka od průměru naměřených hodnot nesmí být větší než 10 %, to se stává v případě nehomogenního zhutnění zeminy nebo porušení vodo-tepelného režimu. [8]



Obr. 2-6 Vzorový graf pro vyhodnocení míry namrzavosti přímou metodou [8]

2.4.3 Porovnání přímé a nepřímé metody

Praktické srovnání obou metod bylo provedeno na Vysokém učení technickém v Brně, fakultě stavební, ústavu pozemních komunikací v silniční laboratoři pro dvanáct různých typů zemin, kde byl nejdříve každý vzorek klasifikován na základě obsahu jemných částic, poté by vyhodnocen na namrzavost podle zrnitostního kritéria a v poslední řadě byl podroben laboratorní zkoušce za účasti přímého působení mrazu.

Tab. 2-3 Porovnání výsledků míry namrzavosti obou metod [9]

Symbol zeminy	Název zemin	Obsah jemných částic	Nepřímá metoda	Přímá metoda
F6 CL	Jíl s nízkou plasticitou	86 %	Nebezpečně namrzavá	0,72 – nebezp. namrzavá
G3 G-F *	Štěrk s příměsí jemnozrné zeminy	6,5 %	Nenamrzavá	0,12 - nenamrzavá
S4 SM	Písek hlinitý	26,5 %	Namrzavá	0,37 – mírně namrzavá
F7 MH	Hlína s vysokou plasticitou	88,3 %	Nebezpečně až vysoce namrzavá	1,82 – nebezp. namrzavá

F6 CL	Jíl s nízkou plasticitou	89,5 %	Nebezpečně až vysoce namrzavá	0,69 – nebezp. namrzavá
F2 CG	Štěrkovitý jíl	41,1 %	Namrzavá až nebezp. namrzavá	0,22 - nenamrzavá
F8 CH	Jíl s vysokou plasticitou	91,4 %	Vysoce namrzavá	0,79 – nebezp. namrzavá
G4 GM *	Štěrk hlinitý	18,5 %	Mírně namrzavá až namrzavá	0,67 – nebezp. namrzavá
F3 MS₂	Písčítá hlína II	60,9 %	Nebezpečně namrzavá	0,52 – nebezp. namrzavá
F5 ML	Hlína s nízkou plasticitou	71,7 %	Nebezpečně namrzavá	0,80 – nebezp. namrzavá
F5 MI	Hlína se střední plasticitou	77,5 %	Nebezpečně namrzavá	0,17 - nenamrzavá
F4 CS₂	Písčítý jíl II	66 %	Nebezpečně namrzavá	0,42 – mírně namrzavá

* vzorek zeminy ze směsného recyklátu

2.4.3.1 Vyhodnocení porovnání

Při porovnání 12 vzorků se metody rozcházejí pouze ve dvou případech, což činí téměř 85% shodu. Důvod neshody v těchto dvou případech je hodnocení namrzavosti podle zrnitostního kritéria, kde vyšší obsah jemných zrn vyhodnocuje zeminu jako namrzavou. Čili u štěrkovitých jílu a štěrku s vyšším obsahem jílovitých příměsí se budou metody v konečném hodnocení rozcházet, kde věrohodnější výsledek bude po přímé laboratorní zkoušce. [9]

2.4.4 Původní norma ČSN 72 1191

Novela normy z roku 2012 vychází z původní verze platné od roku 1988. V té byly detailněji popsány minimální prostory chladicí skříně, od kterých se upustilo. Dále se zde uváděl průběh přímé zkoušky podle metody B. Ta byla v normě používána z důvodu minulého režimu, kdy bývalá ČSR byla součástí Rady vzájemné hospodářské pomoci (RVHP) což byla organizace sdružující socialistické státy sovětského bloku a další stejně smýšlející v době studené války, kde bylo možno danou metodu použít v kterékoliv jiné zemi. Nicméně samotná metoda B a její vyhodnocení, podle součinitele namrzavosti, vychází jen z naměřeného zdvihu k původní výšce vzorku, což není příliš objektivní výsledek, proto se od používání této metody také upustilo. Původní metoda A se v novele stala jedinou normovanou laboratorní zkouškou, podle které je možné určit mrazový zdvih v České republice. [10]

2.5 Řešení problematiky v zemích Evropy

Podstatný rozdíl k přístupu problematiky mrazu států nejen Evropy je především z důvodu odlišných klimatických podmínek, které zapříčiňují rozdíl vzniku mrazových zdvihů v severních zemích – Švédsko, Finsko a další, oproti zemím s mírnějším klimatem. Z tohoto důvodu každý stát přistupuje k problematice jiným způsobem.

2.5.1 Rakousko

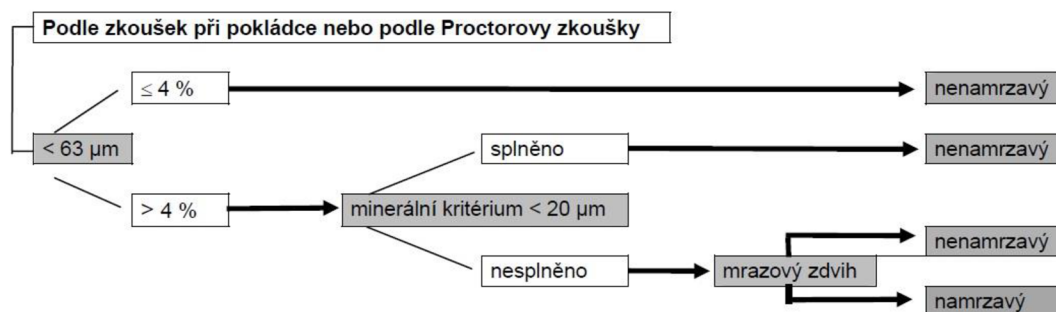
Rakouská norma je založena na předpokladu, že míra namrzavosti se určuje pouze u zhutněných přírodních zemin a směsí, proto se Proctorova zkouška provádí jako první. Až poté se u vzorku zjišťuje obsah zrn menších než 0,063 mm resp. menších než 0,02 mm pomocí rentgenové analýzy. Nejsou-li rentgenové výsledky uspokojující, provede se laboratorní zkouška na určení míry namrzavosti.

2.5.1.1 Příprava vzorku

Zkušební vzorek se zhutní pomocí Proctorovy zkoušky a následně se stanoví obsah zrn menších než 0,063 mm.

- Vyjde-li podíl zrn menší než 4 %, vzorek je vyhodnocen jako nenamrzavý
- Při obsahu zrn ve více než 4 % celku se následně provede posouzení na minerální kritérium, to ve vzorku určí obsah jemných částic menších než 0,02 mm
- Vyjde-li podíl jemných částic menší než 3 % je vzorek určen jako nenamrzavý
- Při podílu menším než 8 % se podle minerálního kritéria stanoví minerální složení vzorku, kde se určuje přítomnost „aktivních“ minerálů, především slídy a chloridu

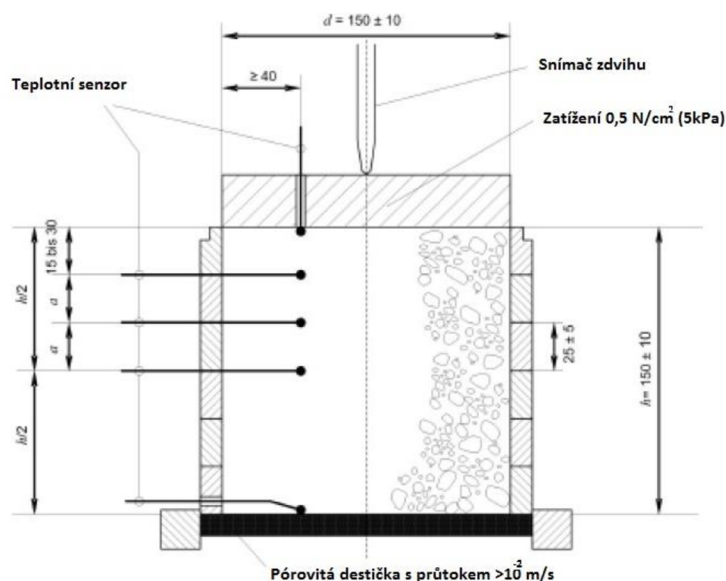
Procentuální zastoupení aktivních minerálů ve vzorku s obsahem jemných částic do 5 % je popsáno v normě ÖNORM 4811, dále je zde uvedeno, že za nepřítomnosti aktivních minerálů, se vzorek za nenamrzavý považuje při přítomnosti maximálně 8 % jemnozrnných částic.



Obr. 2-7 Třístupňový model pro posouzení nenamrzavosti materiálu v Rakousku [11]

2.5.1.2 Příprava vzorku a průběh zkoušky

Zkušební vzorek se částečně usuší při teplotě menší než 60 °C, následně se rozdělí pro dvě zkušební tělesa a natřikrát se zhutní do válcové formy Proctorovým kladivem. Skrze otvory se do zkušebního tělesa umístí teplotní senzory ve vzdálenosti minimálně 4cm od vnitřního okraje po každých 1,5 až 3 cm do půlky výšky tělesa, dále jeden na vršek a jeden dospod tělesa. Prvních 24 hodin se oba vzorky nechají plně aklimatizovat a nasytit vodou při teplotě 4(±0,5) °C za neustálého vodo-tepelného režimu kdy hladina vody je udržována 1 až 2 cm nad spodní hranou vzorku. Po uplynutí této doby je zaznamenáno počáteční měření a po dobu následujících 4 dnů jsou vzorky zmrazovány tak, aby izoterma probíhala středem vzorku. V následujících 3 dnech jsou teploty v konstantním stavu. Po uplynutí této doby následuje rozmrznutí vzorků za pokojové teploty po dobu minimálně 24 hodin, kdy je zaznamenáván mrazový zdvih dvakrát denně s odstupem 8 až 16 hodin. Teplota se zaznamenává každou hodinu a po úplném rozmrznutí se provede síťový rozbor.



Obr. 2-8 Schéma zkušební buňky v Rakousku [11]

2.5.1.3 Vyhodnocení zkoušky

Určí se střední hodnoty obou vzorků pro každý den s přesností $0,1 \text{ mm}$. Průměrná hodnota zdvihu obou vzorků se vynese v závislosti na čase, kde maximální povolená odchylka jednotlivých výsledků od střední hodnoty je $\pm 2 \text{ mm}$. Výsledný vzorek je nenamrzavý tehdy, je-li maximální mrazový zdvih po ustálení, nárůst zdvihu o méně než 1 mm za více než 2 dny, obvykle mezi 6 a 7 dnem, menší než 15 mm .

Posouzení vzorku podle minerálního kritéria se ukázalo jako osvědčené, neboť vzorky vyhodnocené jako nenamrzavé, prokázaly svojí nenamrzavost i v praxi. Nicméně mezní hodnoty minerálního kritéria se v mnoha případech ukázaly jako velice přísné, kdy se v některých případech různé vzorky v praxi ukázaly jako nanemrzavé a přitom dané kritérium v laboratoři nesplnily. Navíc postupy pro mineralogické složení vzorku se ukázaly jako ne zcela přesné a velice nákladné. [11]

2.5.2 Německo

V německé normě jsou zeminy a směsi definovány jako namrzavé tehdy, jsou-li zaznamenány trvalé deformace po mrazovém zdvihu nebo při ztrátě únosnosti ztuhlé vrstvy po mrazovém zdvihu, kde se míra namrzavosti určuje z definované soustavy

zrno-voda-vzduch. Zato za mrazuvzdorné se zeminy a směsi považují, jsou-li jejich jednotlivá zrna odolná proti působení mrazu v kombinaci s vodou.

2.5.2.1 Namrzavost zemin a materiálů

Pro určení míry namrzavosti je zapotřebí roztřídit zeminy a směsi na základě normy DIN 18196, kde je rozhodující obsah zrn větších nebo menších než 0,063 mm.

- Obsah zrn větších než 0,063 mm ve více než 95 % celku - klasifikace podle křivky zrnitosti
- Obsah zrn menších než 0,063 mm v méně než 40 % celku - klasifikace podle konzistence
- Obsah zrn menších než 0,063 mm v rozmezí 5 až 40 % celku - klasifikace podle křivky zrnitosti a konzistence

Pro jednodušší a rychlejší klasifikaci zeminy podle namrzavosti se používá tabulka

Tab. 2-4 Zjednodušená klasifikace podle míry namrzavosti v Německu [12]

Třída namrzavosti	Míra namrzavosti	Klasifikace podle DIN 18196
F 1	Nenamrzavá	Štěrk, písek, zeminy s úzkou až otevřenou zrnitostí
F 2	Mírně namrzavá až namrzavá	Jíly s vysokou plasticitou Humusové zeminy Smíšené písčité zeminy
F 3	Vysoce namrzavá	Jíly se střední nebo nízkou plasticitou Smíšené prachovité zeminy Štěrk a písek s obsahem prachovitých nebo jílovitých částic

Při existenci pochybností zjednodušené klasifikace, je vždy doporučeno provést laboratorní testy mrazového zdvihu nebo mineralogického rozboru pro přímé určení míry namrzavosti daného vzorku.

2.5.2.2 *Mrazuvzdornost upravených zemin*

Zeminy klasifikované jako třída F3 lze pomocí stabilizátorů a pojiv upravit na zlepšenou zeminu a při zachování určitých kritérií je možné tyto zeminy přehodnotit na třídu F2.

2.5.2.3 *Mrazuvzdornost hornin*

Mrazuvzdornost hornin je posouzena na jednom z testů:

- Posouzení podle normy EN 1097-6 – určení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva a stanovení její objemové hmotnosti a nasákavosti, kdy nasákavost je menší než 0,5 %
- Posouzení podle normy EN 1367-1 – stanovení odolnosti proti opakovanému zmrazování a rozmrazování, kdy je povolená ztráta maximálně 4 %

2.5.2.4 *Mrazuvzdornost nestmeleného a hydraulicky stmeleného kameniva*

Posouzení mrazuvzdornosti u těchto materiálů se provádí ve třech krocích:

- Stanovení nasákavosti podle normy EN 1097-6, kdy povolená hranice je 0,5 %. Při nevyhovění této podmínky se následně provede:
- stanovení odolnosti proti opakovanému zmrazování a rozmrazování podle normy EN 1367-1, kdy je povolená ztráta maximálně 4 %. Při nevyhovění i této podmínky, se u vzorku se následně provede:
- stanovení odolnosti proti opakovanému zmrazování a rozmrazování za přítomnosti soli podle normy EN 1367-6, ve které musí vzorek vyhovět, aby byl vyhodnocen jako mrazuvzdorný

2.5.2.5 *Míra namrzavosti a mrazuvzdornost stmelovaných směsí hydraulickými pojivy*

Namrzavost a mrazuvzdornost zemin stabilizovaných hydraulickými pojivy se vyjadřuje změnou délky vzorku po opakovaném zmrazování a rozmrazání, kde je kritérium stanoveno v poměru $\Delta l/l \leq 1 \text{ ‰}$.

Namrzavost a mrazuvzdornost zemin stabilizovaných vápnem a vápenným hydrátem se stanovuje výslednou pevností v tlaku po opakovaném zmrazování a rozmrazání, kde je kritérium stanoveno v minimální pevnosti, která musí být $\geq 0,2 \text{ N/mm}^2$.

2.5.2.6 *Používaná metoda pro určení míry namrzavosti*

Německá norma rozlišuje dvě metody působení mrazu na zkušební vzorek:

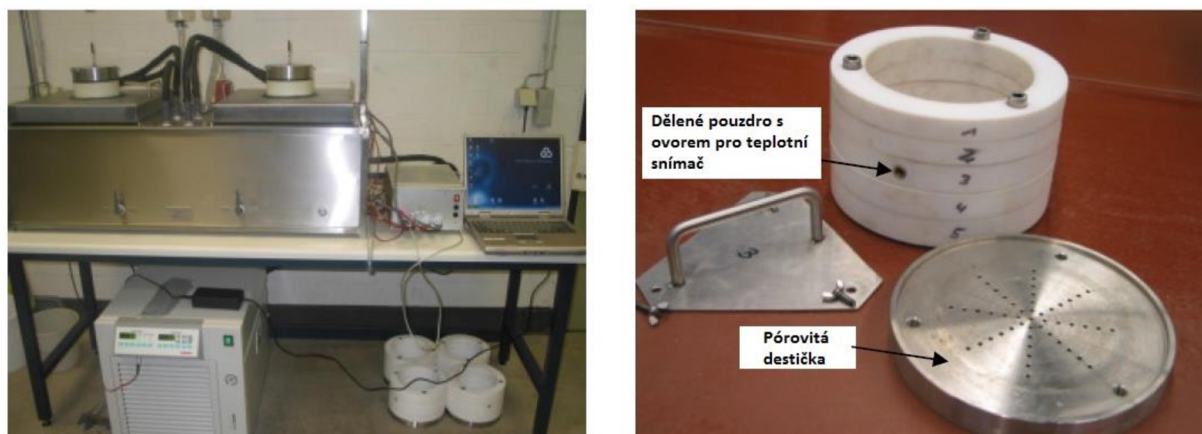
- Metoda A – rychlost ochlazování vzorku od povrchu je nastavena tak, aby středová izoterma tělesa dosáhla teploty 0°C po působení mrazu za dobu 4 dnů, tento stav je poté udržován po dobu následujících 3 dnů. Teplota zmrazování není konstantní, neboť jednotlivé složení vzorku se může lišit a tím i její součinitel prostupu tepla
- Metoda B – povrch vzorku je vystavován teplotě -4°C po dobu 7 dnů

Výhodou metody A je pomalé pronikání mrazu a konstantní penetrace promrzání vzorku bez ohledu na složení, a tím i jeho termických vlastností a teplotních podmínek na povrchu tělesa po celou dobu zkoušky. Konstantní teplotní gradient v nezamrzlé spodní části je zaručen stálou vzdáleností od vodní lázně. Z tohoto důvodu je metoda A používána pro stanovení mrazových zdvihů.

2.5.2.7 *Příprava vzorku a průběh zkoušky*

Zkouška se provádí za stálého vodo-tepelného režimu s neomezeným přísunem vody a za stálé teploty vzduchu $1,5(\pm 0,5)^\circ \text{C}$. Vzorek je postaven na kovové pórovité destičce, která umožňuje neustálou saturaci vodou, kde je hladina vody udržována 1 až 2 cm nad spodní hranou vzorku. Od horní hrany je vzorek vystavován účinkům mrazu a do svislého středu vzorku je umístěn snímač pro záznam průběhu teplot.

Samotný vzorek může obsahovat zrna s maximální velikosti $22,4\text{ mm}$. Je hutněn pomocí Proctorovy zkoušky ve válcové formě $150 \times 125\text{ mm}$ poskládaných z pěti teflonových kroužků se snahou minimalizovat vliv tření stěny při vzniku mrazového zdvihu. Vzorek je ze shora přitížen závažím za působení $0,5\text{ N/cm}^2$, simulující 20 cm materiálu nadloží.



Obr. 2-9 Zkušební zařízení a zkušební buňka používaná v Německu [12]

Samotný průběh zkoušky se rozděluje do čtyř fází

- Asimilační fáze – kdy se vzorek přizpůsobuje uvnitř zařízení při teplotě $1,5(\pm 0,5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 24 hodin
- Ochlazovací fáze – ochlazování konstantní penetrační rychlostí do vzorku, za účelem dosažení $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ středové izotermy tělesa za dobu 4 dnů
- Mrazící fáze – udržování $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ středové izotermy vzorku po dobu 3 dnů
- Rozmrazovací fáze – rozmrazení vzorku za pokojové teploty po dobu 24 hodin

2.5.2.8 Vyhodnocení zkoušky

Celkový průběh zkoušky je automaticky ukládán a následující parametry se zapisují každých 5 minut.

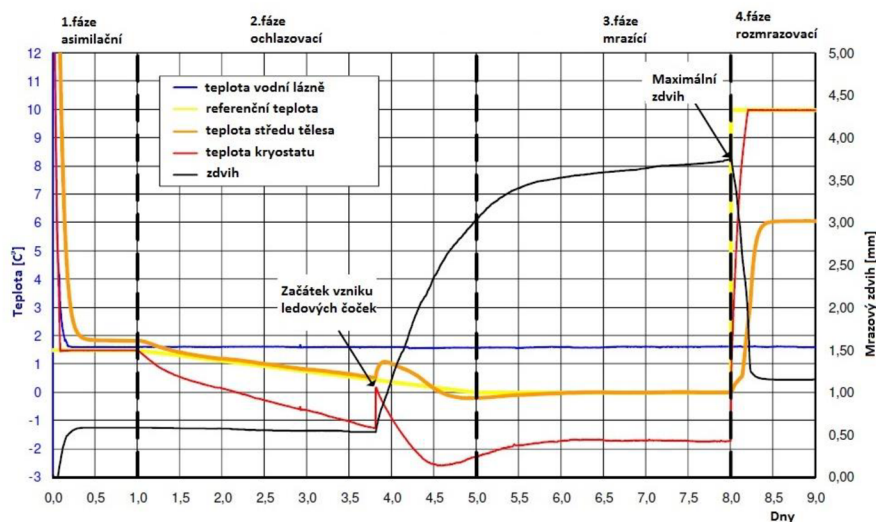
- Zdvih během asimilační fáze $S_{FH,0}$ [mm]
- Zdvih po 7 dnech $S_{FH,7}$ [mm]
- Zdvih po mrazící fázi $S_{FH,E}$ [mm]

- Zdvih po rozmrazení vzorku $S_{FH,A}$ [mm]

Naměřené parametry jsou následně vyhodnoceny:

- Bobtnání v asimilační fázi ΔS_0
- Maximální mrazový zdvih $\Delta S_{FH,max} = S_{FH,E} - S_{FH,0}$
- Trvalý zbytkový zdvih $\Delta S_{FH,R} = S_{FH,A} - S_{FH,0}$
- Rychlost mrazového zdvihu $V_{FH} = S_{FH,E} - S_{FH,7}$

Po ukončení zkoušky míry namrzavosti je určen i úbytek hodnoty CBR [12]



Obr. 2-10 Grafické znázornění průběhu zkoušky míry namrzavosti v Německu [12]

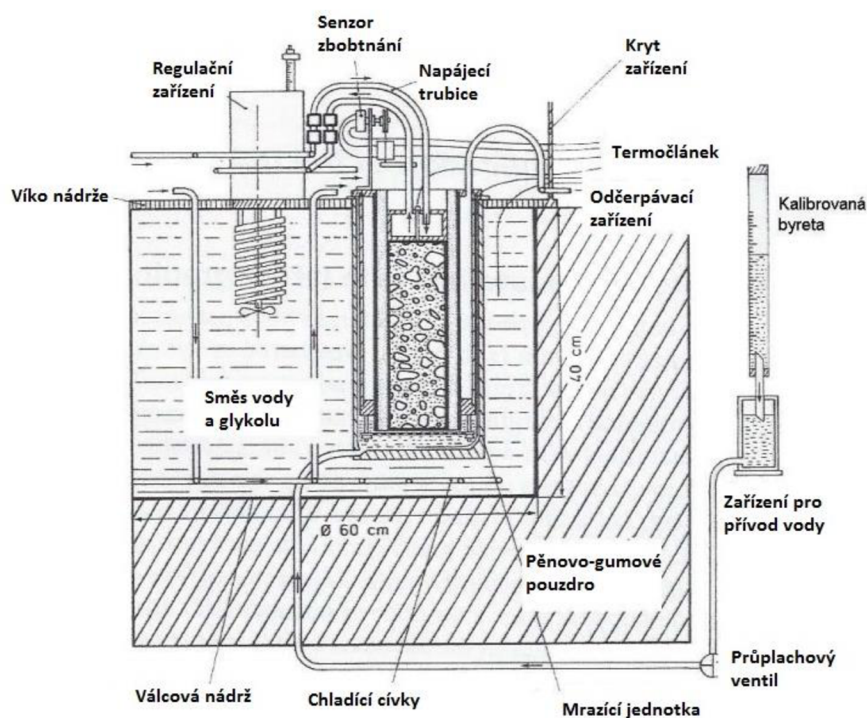
2.5.3 Francie

Míra namrzavosti je ve Francii jednou ze základních složek navrhování vozovek již od 70. let, a to z důvodu mimořádně krutých zim v předešlých letech, které způsobily značné škody vozovek a chodníků. Za účelem posouzení vlivu mrazových zdvihů na vozovku byla snaha vytvořit testovací zařízení a postup pro zkoušení míry namrzavosti zeminy a různých druhů materiálů. V období mezi 60. a 70. lety byl definován značný počet mrazových kritérií a klasifikací mrazu pouze na základě geotechnických vlastností zemín, nicméně tento předpoklad byl následně vyvrácen, neboť vznik mrazového zdvihu ovlivňuje nejen struktura zeminy, ale i její fyzikálně-chemické vlastnosti a s tím i schopnost prostoupení mrazu druhem zeminy. V druhé polovině 60. let byl započat

teoretický a experimentální laboratorní výzkum, jehož výsledkem byla metoda přímého zkoušení zeminy v terénu, která byla používána od roku 1970.

2.5.3.1 Příprava vzorku a průběh zkoušky

Pro vyhodnocení míry namrzavosti je zapotřebí tři vzorků zeminy nebo materiálu, které jsou zhutněny metodou Proctor standard nebo Proctor modifikovaný při vlhkosti odpovídající nejméně 95 % suché objemové hmotnosti pro zajištění vysoké kapilární vztlakovosti vody ve vzorku. Velikost zkušebních těles závisí na velikosti zrn zkoušené zeminy nebo materiálu, kde pro zrnitost do 20 mm se vyrábí tělesa o rozměrech 150 x 320 mm, tak pro zrnitost do 200 mm se zkouška provádí na tělesech o rozměru 865x1050mm. Chladicí kovový píst je uložen na horním líci vzorku, na němž je umístěn kruhový potenciometr pro neustálé sledování vzdušnosti vzorku, v jehož okolí je tlak $< 1 \text{ kPa}$, který zajišťuje, společně s pěno-gumovým pouzdem, izolaci od okolí.



Obr. 2-11 Schéma zkušebního zařízení ve Francii [13]

Zkušební vzorky se nechají 18 ± 2 hodiny přizpůsobit laboratorním podmínkám, kdy je těleso umístěno do chladicí nádrže s obsahující regulovanou teplotu kapaliny, většinou směs glycerolu a vody, při teplotě mírně nad $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Po této době je spodní část vzorku

vystavována saturaci vodou o teplotě 1 až 2 °C, zapne se chladicí píst nastavený na teplotu -5,7 °C po dobu následujících 12 dnů. Po ukončení zkoušky se provedou fotografie vzorku, změří se mrazový zdvih a přesně zaznamená poloha, typ a velikost vzniklých ledových čoček, dále je vzorek podélně rozpůlen za účelem určení vlhkosti v každé jednotlivé vrstvě.

2.5.3.2 Vyhodnocení zkoušky

Po zpracování naměřených parametrů se vyhodnotí:

- Nepřímé bobtnání vzorku
- Lineární závislosti mezi nárůstem výšky tělesa vlivem působení mrazu čili mrazovým zdvihem Δh a indexem mrazu I působícím na povrch vzorku

Δh je naměřený zdvih zkoušeného vzorku (mm)

I je index mrazu (°C. h) definován jako součet průměrných denních teplot během zmrazování vzorku $I = \int_0^t T(^{\circ}\text{C})dt$

- Určení gradientu tohoto vztahu k určení výsledné míry namrzavosti, která může být vyjádřena:

$$SG_x = \Delta h / \sqrt{I}$$

Určení namrzavosti zeminy nebo materiálu podle tabulky:

Tab. 2-5 Stanovení míry namrzavosti podle hodnoty SG_x [13]

	$\leq 0,05 <$	$\leq 0,40 <$	$(\text{mm}/\sqrt{^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}})$
nenamrzavé (SGn)	mírně namrzavé (SGp)	vysoce namrzavé (SGt)	→

Hlavním předpoklad pro vyhodnocení laboratorní zkoušky na stanovení míry namrzavosti zeminy nebo materiálu ve Francii vychází ze stejného předpokladu jako přímá zkouška v České republice, a to z lineárního vztahu mezi mrazovým zdvihem a odmocninou indexu mrazu. [13]

2.5.4 Finsko

2.5.4.1 Příprava vzorku

Zkouška mrazového zdvihu se ve Finsku provádí na třech samostatných vzorcích, které mohou být z neporušené zeminy v přírodním stavu nebo připravené zhutněním do formy v laboratoři. Od velikosti zrn zkoušené zeminy se odvíjí i šířka průřezu zkušebního tělesa, která může být 80 mm, 100 mm nebo 150 mm. Před samotnou zkouškou se vzorek zatíží, a poté se postupně přitěžuje během zmrazování 2 kPa, 20 kPa a 40 kPa, stejně tak je vzorek zatěžován i při rozmrzání 20 kPa nebo 40 kPa.

Odebírání neporušeného vzorku v přírodním stavu se rozlišuje s ohledem na stav terénu, tedy jestli je vzorek ze zmrzlé nebo z nezmrzlé zeminy:

- Nezmrzlý vzorek – je odebrán pomocí tenkostěnné ocelové trubky o průřezu 100 mm a výšce 150 ~ 200 mm, větší výška vzorku se doporučuje s ohledem na možné poškození při manipulaci a přepravě. Kvůli zachování vlhkosti se trubka neprodyšně uzavře krytkami
- Zmrzlý vzorek – je odebrán jako jádrový vrt s průměrem 100 mm. Provedení odběru je možné nejen v zmrzlé zemině, ale i v jemnozrnných sedimentech a pískách. Vývrty se dělají do hloubky 100 ~ 300 mm, vzorky jsou následně uloženy do izolovaného chladicího přepravního boxu, který je bezprostředně poté odvezen do skladovací místnosti s regulovanou teplotou

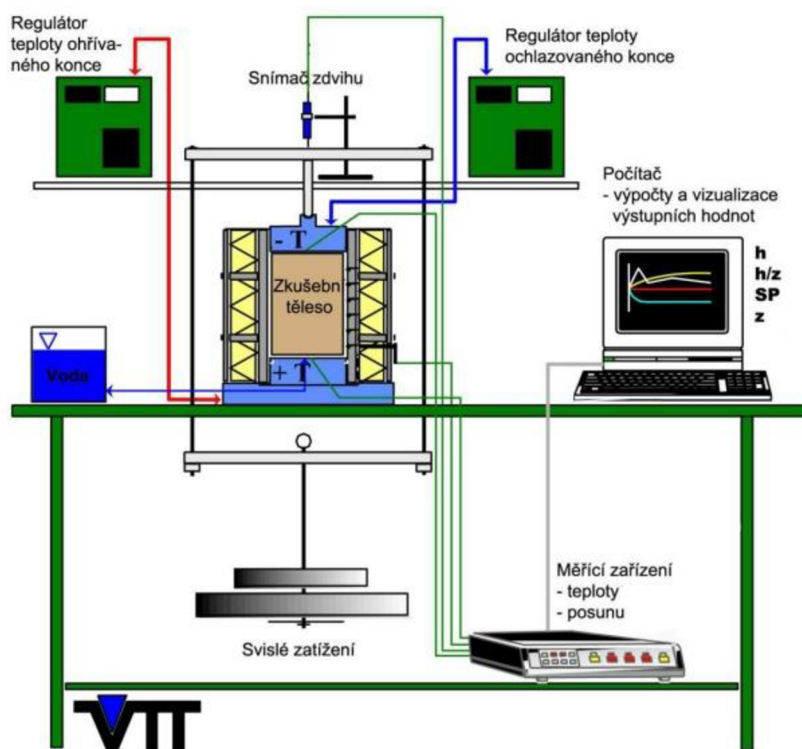
Oba vzorky se opatrně vytlačí do zkušebního zařízení tak, aby byla zachována přirozená struktura zeminy. Nezmrzlý vzorek při pokojové teplotě a zmrzlý za teploty od -1 až -3 °C. Při nerovnostech na horních a dolních hranách se hrany zarovnají a přítomné dutiny na hranách se vyplní stejným materiálem.

Porušený vzorek se zhutní po tenkých vrstvách do formy o velikosti 100 x 100 mm. Před vložením vzorku se zkušební buňka vystele plastovou fólií pro následné lehčí vyjmutí zkoušeného tělesa. Buňka s připraveným vzorkem se před zkouškou uloží na pár hodin do chladicí místnosti.

Každý z obou typů vzorků se před uložením do zařízení jednotlivě zváží, změří se jejich výška ve třech bodech a určí se objemová hmotnost. Vlhkost se určí z materiálu přivezeného navíc a suchá hmotnost vzorku se dopočte.

2.5.4.2 Popis zkušebního zařízení

Zkušební buňka je válcovitého tvaru, tepelně izolovaná s průměrem 100 mm. Teplotní snímače jsou umístěny ve vnitřních stěnách pro sledování teplotního rozdílu povrchu vzorku po výšce. Na vzorku je umístěno mrazící zařízení, přes které proudí chladicí kapalina – kryomat, sloužící zároveň i jako přitížení, pod kterým je umístěno teplotní čidlo pro sledování teploty horního povrchu vzorku. Dolní hrana je také teplotně monitorována, z důvodu kontroly nezmrznutí této části vzorku, a vystavena stálému přítoku vody. Hmotnost přidaného závaží odpovídá zemnímu tlaku vyvolanému původním nadložím. Elektrický snímač monitoruje mrazové zdvihy při tuhnutí vzorku a usazování při rozmrzání.



Obr. 2-12 Schéma zkušebního zařízení ve Finsku [14]

2.5.4.3 Průběh zkoušky

Samotné vzorky se před umístěním do zkušebního zařízení často ponechají nějakou dobu v chladu, z důvodu dosažení úplné saturace vodou. Toto před zmrazovací ochlazení se provádí vždy u předchozího porušeného vzorku nebo u vzorku, který nebyl nikdy vystaven mrazu, z důvodu hloubky svého přirozeného umístění. Také je doporučen provádět u vzorku, který je sypký, méně kvalitní – praskliny, nebo byl upravován – vyplňování dutin. Zkouška je prováděna při okolní teplotě 0 ± 1 °C. Zkušební vzorek je umístěn na filtrační papír, který leží na pórovité destičce. Na vrchní hranu je položeno chladicí zařízení a kolem vzorku je nasazena gumová membrána, která je ještě na povrchu utěsněna silikonem, následně je vzorek uzavřen v izolované buňce, na její vršek je usazen zatěžovací rám.

Průběh zkoušky se dá rozdělit do několika fází, během kterých se mění teplota i velikost přitížení vzorku:

- Rozmrzáni s přitížením – vzorek je ve stálém vodo-tepelném režimu, kde hladina vody přibližně odpovídá výšce horní hrany tělesa. Závaží umístěné na zatěžovací rám odpovídá napětí 20 kPa. Obě zařízení s chladicí kapalinou jsou nastaveny na 3 °C. Vzorek se takto ponechá na dobu 24 hodin, během kterých se rozmrazí, usadí a nasytí vodou. Tato fáze může být ukončena i předčasně bude-li indikovaná stálá výška vzorku po dobu 4 hodin
- Mrazový zdvih bez přitížení – zatížení na vzorku tvoří pouze zatěžovací rám, který odpovídá napětí 2 kPa. Hladina vody je snížena do poloviny výšky vzorku. Teplota horní chladicí desky je nastavena na -3 °C a dolní desky na 1 °C. Změna teploty a mrazový zdvih ve vzorku se zaznamenává každých 30 minut po dobu minimálně 24 hodin. Chlazení vzorku přestává, pokud se výška ustálila na dobu delší než 4 hodin
- Přejídné rozmrazání – vzorek je přitížen závažím odpovídající napětí 20 kPa, které se ponechá při dalším zmrazení vzorku. Horní chladicí deska je nastavena na teplotu $-0,5$ °C a dolní deska na teplotu 15 °C. Pokles mrazového zdvihu se zaznamenává po 30min intervalu a končí při ustálení výšky na dobu delší než 4 hodiny, nicméně pokud vzorek nedosáhne přibližně své výšky před prvním

rozmrzáním, tato fáze rozmrzání pokračuje dále. V tomto případě je zapotřebí zkontrolovat těsnění buňky a nasazení gumové membrány, jestli nedošlo k narušení izolace od okolí

- Mrazový zdvih s přitížením – provádí se za stejných podmínek jako předchozí zmrazování vzorku, tentokrát s přitížením 20 *kPa*
- Přechodné rozmrzání – stejné podmínky jako předchozí rozmrzání, tentokrát s přitížením 40 *kPa*
- Mrazový zdvih s přitížením - provádí se za stejných podmínek jako předchozí zmrazování vzorku, tentokrát s přitížením 40 *kPa*

Po zaznamenání dat se vzorek vyjme z gumové membrány, přeměří se konečná výška i šířka vzorku. Detailně se přeměří a zaznamenají všechny ledové útvary – ledové čočky, a určí se vlhkost zkoušeného vzorku.

2.5.4.4 Vyhodnocení zkoušky

Naměřená data se zpracují, vyhodnotí a jejich průběh v závislosti na čase se následně vynese graficky.

- Mrazový zdvih (h); [*mm*] – zaznamenává změnu výšky tělesa během celého průběhu zkoušky. Je určena jako rozdíl aktuální výšky k počáteční výšce tělesa před zkouškou
- Výška nezmrzlé části vzorku (Z_S); [*mm*] – je stanovena jako výška od spodní hrany vzorku po umístění 0 °C izotermy z naměřeného teplotního profilu, určeného interpolací po cyklu měření
- Hloubka průniku mrazu (Z_j); [*mm*] – je stanovena jako hloubka k 0°C izotermy a určí se jako součet výšky zkoušeného vzorku (H), mrazového zdvihu (h) a rozdílu nezmrzlé části vzorku (Z_S)
- Poměr mrazového zdvihu (h/Z_j); [%] – vyjadřuje relativní podíl mrazového zdvihu (h) a hloubky průniku mrazu (Z_j) stanovena jejich poměrem
- Rychlost mrazového zdvihu ($\Delta h/\Delta t$); [*mm/den*] – vyjadřuje přírůstek mrazového zdvihu (Δh) za daný časový interval

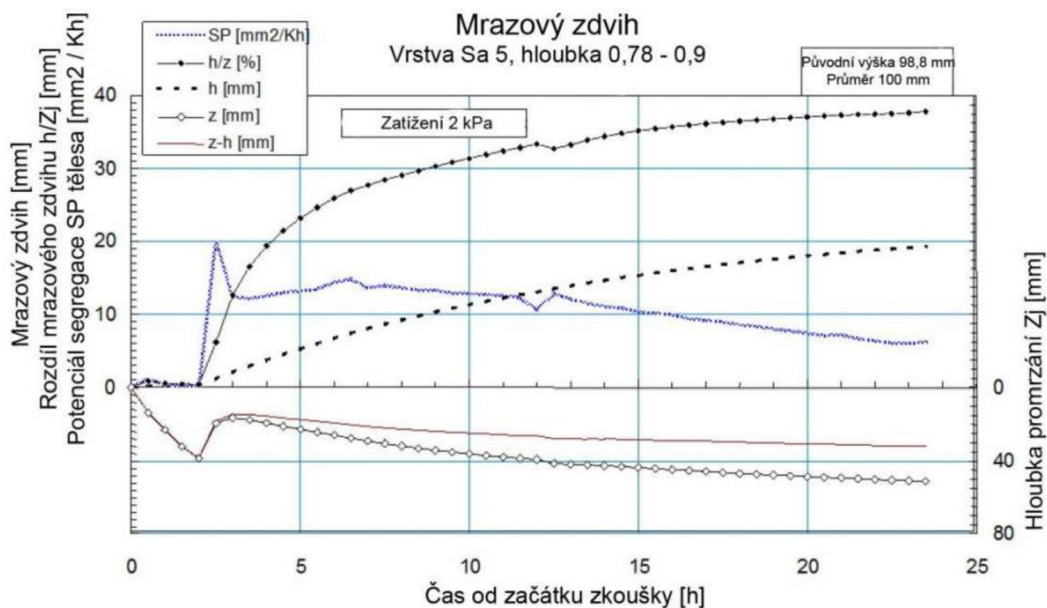
- Teplotní gradient ($gradT$); [$^{\circ}C/m$] – je teplotní rozdíl mezi $0^{\circ}C$ a horní částí izotermy vzorku k hloubce průniku mrazu (Z_j)

$$gradT = 1000 * \frac{0 - T_{kansi}}{Z_j}$$

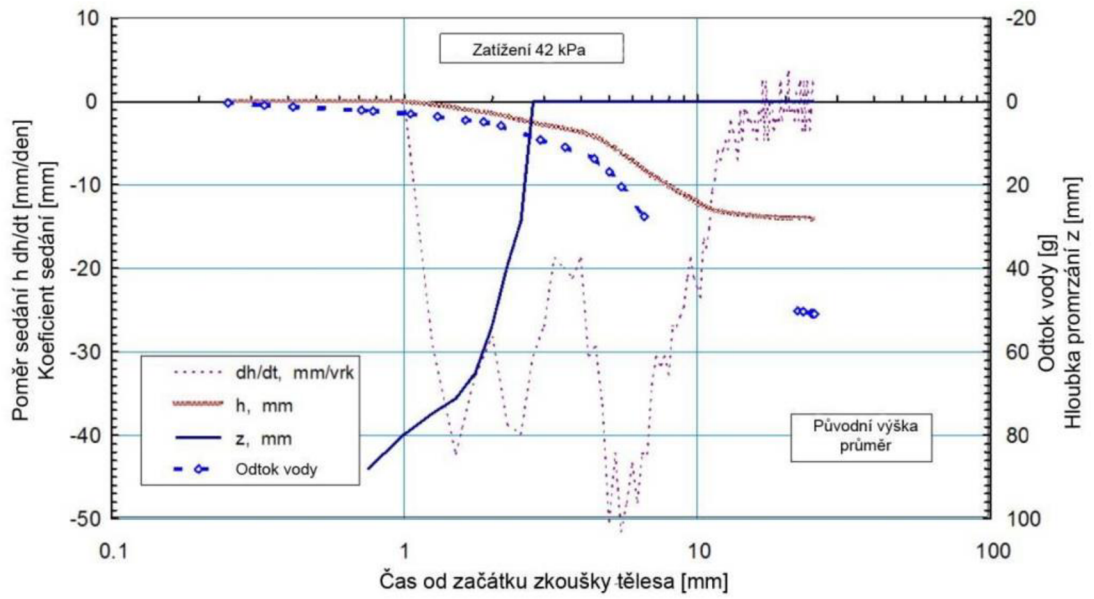
- Potencionál segregace (SP); [mm^2/Kh] - je poměr mezi rychlostí mrazového zdvihu (Δh) a skutečného teplotního gradientu nad zmrzlou částí vzorku

$$SP = \frac{1000}{24} * \frac{\Delta h / \Delta t}{gradT}$$

- Koeficient konsolidace během rozmrzání (c_{vt}) – je určen z hodnot během fázi rozmrzání a používá se k posouzení pórových tlaků v zemině během rozmrzání a doby konsolidace po rozmrzání [14]



Graf 2-1 Grafické znázornění průběhu přechodného rozmrzání ve Finsku [14]



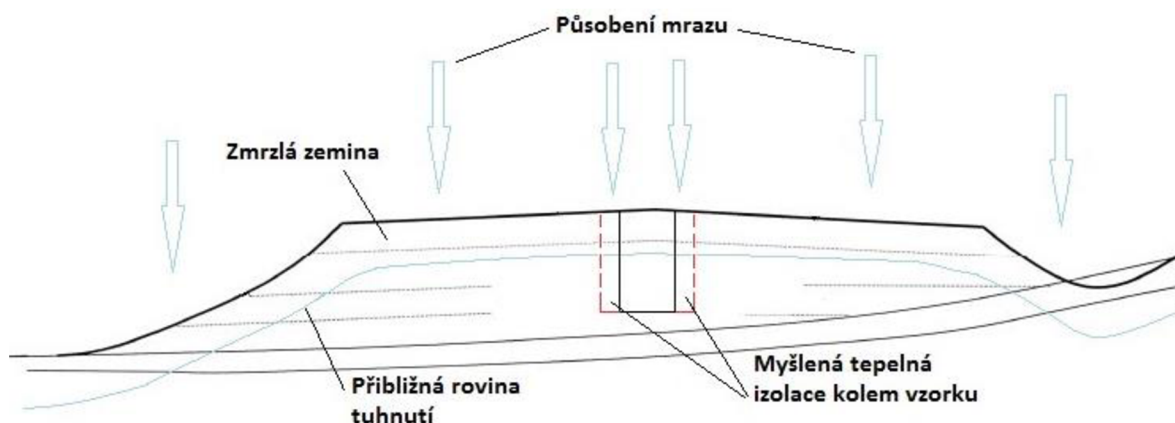
Graf 2-2 Grafické znázornění průběhu přechodného rozmrazání ve Finsku [14]

3 Praktická část

Při měření míry namrzavosti přímou metodou dle ČSN 72 1191 je doporučeno, před chladicí fází, horizontálně dělené pouzdro obalit pěnovou tepelně izolační látkou. Praktická část se zabývá právě tímto normovaným doporučením, zdali přítomnost izolace ovlivní průběh nebo výsledek přímé metody zkoušení namrzavosti a způsobí-li nějakou změnu při tvoření ledových čoček a vrstviček. Zkoušky byly provedeny v prostorách laboratoří ústavu pozemních komunikací fakulty stavební v Brně. Záznamy zkoušek s naměřenými hodnotami a protokoly jsou uvedeny v příloze této práce.

3.1 Tepelná izolace

Izolace v této zkoušce má za účel nahradit u zkušební tělesa přítomnost tepelného spolupůsobení zemního tělesa. Její přítomnost není v normě uvedena jako nezbytná, neboť nikdy nemůžeme předem určit, v jaké míře bude mráz působit na celou konstrukci. Při převedení zkoušky do reálné situace si můžeme vytvořit určitou závislost mezi silou mrazu, velikostí konstrukce pozemní stavby a materiálem, který byl na stavbu použit. Pomyslný zkušební vzorek umístíme do středu zemního tělesa. Za použití stejného materiálu a působení stejně silného mrazu tedy vyplývají dvě možnosti.



Obr. 2-13 Princip ověření použití tepelné izolace v praktické části vychází z izolační schopnosti velkého množství ztuhlé země do technologické vrstvy násypu [15]

Buďto je zemní těleso natolik robustní a mráz prostoupí jen do určité hloubky, čili v tomto případě uprostřed násypu zůstane nezmrzlý prostor, který izoluje pomyslný

vzorek uprostřed tělesa. Nebo mráz prostoupí celým tělesem a vzorek je vystavován, kromě mrazu na povrchu, i nízké teplotě z okolní ochlazené zeminy, kterou v laboratoři nahrazuje teplota lednice.

3.2 Průběh zkoušky

3.2.1 Příprava vzorku

Pro tyto zkoušky byla zvolena typická sprašová hlína a to z důvodu běžného výskytu na našem území a jejího častého využití právě jako vrstvy a podloží vozovky v přirozené nebo upravené podobě.

Materiál se nacházel ve tvrdém vysušeném stavu a pro další zpracování bylo nutno přidat vlhkosti přibližně 15 %. Po zpracování byl materiál ponechán, aby voda prostoupila i k zrnům menší velikosti.



Obr. 3-14 Zemina v suchém a navlhčeném stavu [15]

Následně byly z připraveného materiálu vytvořeny 4 zkušební vzorky o rozměrech přibližně 115 x 100 mm. Každý vzorek byl zhutněn pomocí standardní Proctorovy zkoušky v souladu s ČSN EN 13286-2 ve třech vrstvách po 25 úderech.



Obr. 3-15 Příklad přístroje pro metodu Proctor standard [15]

3.2.2 Průběh zkoušky

Během zkoušky míry namrzavosti byli dodrženy všechny podmínky a postupy uvedené v normě ČSN 72 1191 podrobně uvedené v kapitole 2.4.2.

3.2.2.1 První zkouška bez použití izolace

První zkouška probíhala bez použití tepelné izolace ve stálém vodo-tepelném režimu.



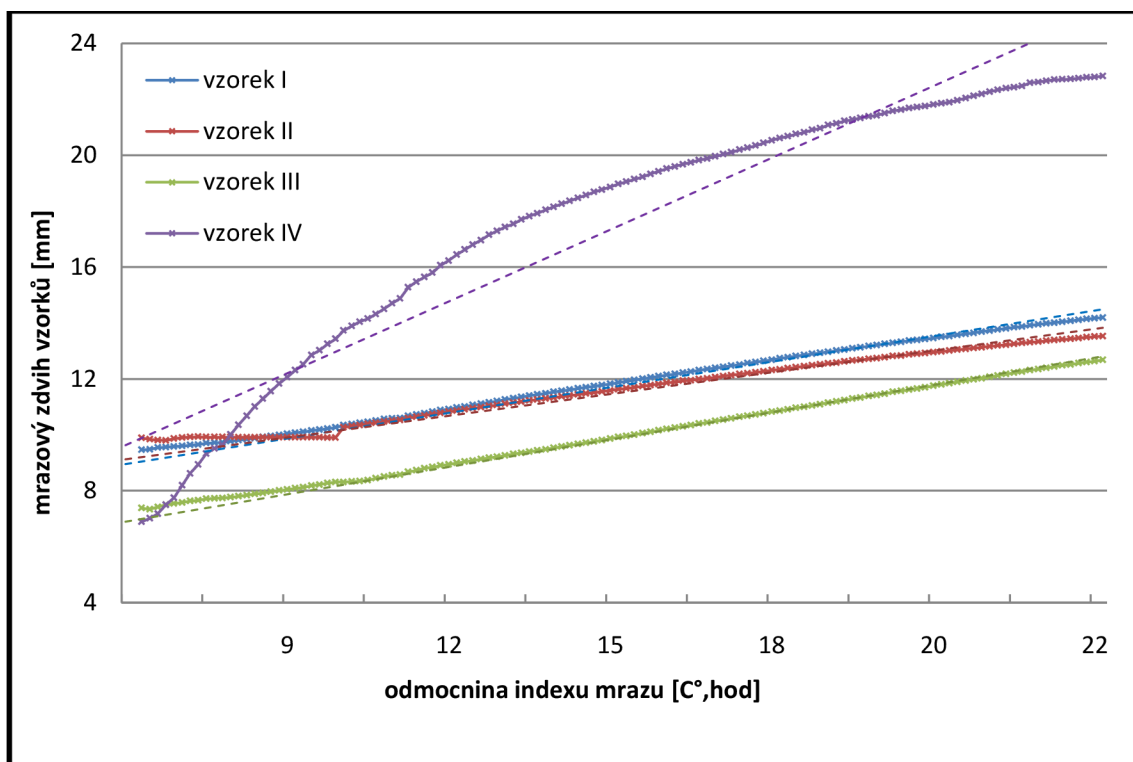
Obr. 3-16 První zkouška – lednice se vzorky a zkušební buňka bez izolace [15]

3.2.2.2 Vyhodnocení první zkoušky

Tab. 3-6 Výsledné hodnoty první zkoušky [15]

	vzorek I	vzorek II	vzorek III	vzorek IV
počáteční hodnota zdvihu [mm]	9,46	9,89	7,38	6,89
konečná hodnota zdvihu [mm]	14,19	13,53	12,68	22,83
mrazový zdvih během zkoušení [mm]	4,73	3,64	5,30	15,94
průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,30	0,24	0,34	0,78*
celkový průměr β	0,29			

*pozn. Vzorek IV nevyhověl na povolenou odchylku měření dle normy ČSN 72 1191, proto není zahrnut ve výsledku



Graf 3-3 Grafické znázornění mrazových zdvihů z první zkoušky [15]

Výsledná hodnota $\beta = 0,29$ zkoušeného vzorku bez použití tepelné izolace klasifikuje podle normy ČSN 72 1191 zeminu jako mírně namrzavou až namrzavou.



Obr. 3-17 Vzorek po průběhu zkoušky a detail oblasti vzniku ledové čočky [15]



Obr. 3-18 Detail tvaru ledové čočky [15]

3.2.2.3 Druhá zkouška s použitím tepelné izolace

Druhá zkouška proběhla již s použitím tepelné izolace kolem zkušební buňky ve formě dvouvrstvé karimatky, která obecně chrání před vlhkem a chladem, za stálého vodotepelného režimu.



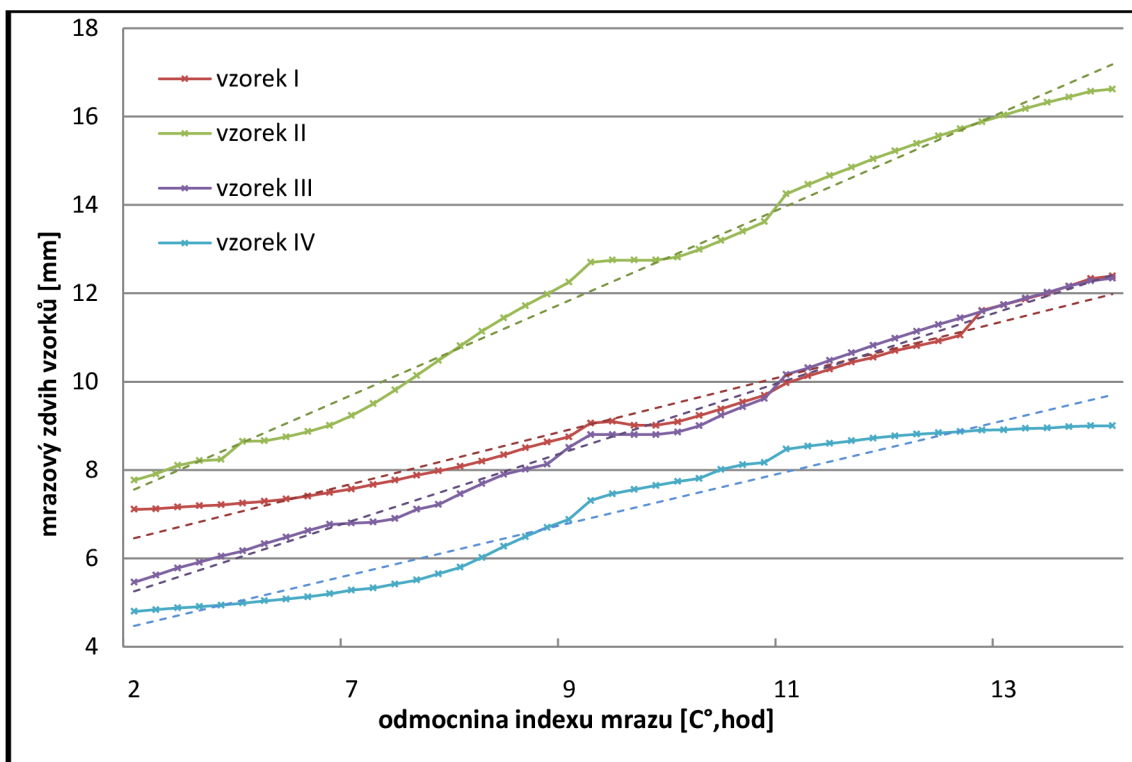
Obr. 3-19 Druhá zkouška – lednice se vzorky a zkušební buňka s izolací [15]

3.2.2.4 Vyhodnocení zkoušky

Tab. 3-7 Výsledné hodnoty druhé zkoušky [15]

	vzorek I	vzorek II	vzorek III	vzorek IV
počáteční hodnota zdvihu [mm]	7,11	7,77	5,46	4,80
konečná hodnota zdvihu [mm]	12,39	16,62	12,34	9,00
mrazový zdvih během zkoušení [mm]	5,28	8,85	6,88	4,20
průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,61	0,90	0,72	0,43
celkový průměr β	0,67			

pozn. Zkouška neproběhla po normově předepsanou dobu 120 hodin viz. protokol zkouška č. 2



Graf 3-4 Grafické znázornění mrazových zdvihů z druhé zkoušky [15]

3.2.3 Porovnání výsledků zkoušek

Průběh první zkoušky i její vyhodnocení proběhlo podle předepsaných postupů uvedených v normě ČSN 72 1191, akorát bez použití tepelné izolace kolem zkoušených vzorků. Z vyhodnocení konečného součinitele β musel být vyřazen vzorek č. 4, neboť nesplňoval povolenou 10% odchylku uvedenou v normě, od konečného výsledku. Konečná hodnota $\beta = 0,29$ klasifikovala zeminu jako mírně namrzavou až namrzavou.

Druhá zkouška měla probíhat taktéž podle předepsaných postupů uvedených v normě ČSN 72 1191 tentokrát s použitím tepelné izolace kolem zkušebních vzorků, kterou představovala dvouvrstvá karimatka. Nicméně výsledek zkoušky nemůže být uveden jako plnohodnotný, neboť nebyla dodržena předepsaná doba průběhu zkoušky uvedená v normě. Zaznamenané hodnoty zkoušky jsou za dobu 46 hodin a určují konečnou hodnotu $\beta = 0,67$, což klasifikuje zeminu do kategorie namrzavých zemin. V tomto případě je výsledek určen z hodnot všech čtyř zkušebních těles a odchylka není zohledněna.

Vzhledem k neplnohodnotné druhé zkoušce jsem se rozhodl porovnat obě zkoušky dvěma způsoby:

- Porovnání pouze laboratorně naměřených hodnot, tedy za dobu 46 hodin
- Na základně předpokladu lineárního vztahu, mezi naměřeným zdvihem zkoušeného vzorku a odmocninou indexu mrazu uvedeného v normě ČSN 72 1191, vypočítat možný konečný zdvih odpovídající hodnotě po 120 hodinách měření

3.2.3.1 Porovnání naměřených hodnot

Tab. 3-8 Zkouška č. 1 po 46 hodinách měření [15]

	vzorek I	vzorek II	vzorek III	vzorek IV
průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,20	0,16	0,20	1,01*
celkový průměr β	0,19			

*pozn. Vzorek č. 4 není zahrnut v celkové průměrné hodnotě β

Tab. 3-9 Zkouška č. 2 po 46 hodinách [15]

	vzorek I	vzorek II	vzorek III	vzorek IV
průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,61	0,90	0,72	0,43
celkový průměr β	0,67			

3.2.3.2 Porovnání vypočtené konečné hodnoty s reálnou

Tab. 3-6 Výsledné hodnoty první zkoušky [15]

	vzorek I	vzorek II	vzorek III	vzorek IV
počáteční hodnota zdvihu [mm]	9,46	9,89	7,38	6,89
konečná hodnota zdvihu [mm]	14,19	13,53	12,68	22,83
mrazový zdvih během zkoušení [mm]	4,73	3,64	5,30	15,94
průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,30	0,24	0,34	0,78*
celkový průměr β	0,29			

*pozn. Vzorek IV nevyhověl na povolenou odchylku měření dle normy ČSN 72 1191, proto není zahrnut ve výsledku

Tab. 3-10 Dopočtené hodnoty druhé zkoušky [15]

	vzorek I	vzorek II	vzorek III	vzorek IV
počáteční hodnota zdvihu [mm]	7,11	7,77	5,46	4,80
hodnota naměřeného zdvihu - po 46 hodinách [mm]	12,39	16,62	12,34	9,00
předpokládaná konečná hodnota naměřeného zdvihu - po 120 hodinách [mm]	20,88	30,86	23,41	15,76
mrazový zdvih během zkoušení [mm]	13,77	23,09	17,95	10,96
průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,87	1,42	1,11	0,67
celkový průměr β	1,13			

4 Závěr

Teoretická část

V rámci teoretické části bylo cílem shrnout používané metody měření namrzavosti zemin v ČR i v zahraničí. Klimatické podmínky jsou v návaznosti na geografickou polohu států odlišné, jednotlivé oblasti se potýkají s jinými účinky klimatu, a proto se každý stát zabývá měřením míry namrzavosti individuálně. Nicméně principy některých metod si jsou velice podobné. Přímá metoda zkoušení míry namrzavosti v České republice vychází z principu závislost mezi velikostí zdvihu a odmocninou indexu mrazu plně syceného vzorku po dobu 17 hodin při teplotě 1 až 4 °C, který je následně vystaven se svrchu mrazem po dobu dalších 120 hodin při teplotě kolem -4 °C. Z tohoto principu zkoušení míry namrzavosti vychází i metoda používaná ve Francii, která se liší v době saturování a působení mrazu a v teplotě, které je vzorek vystavován. Kromě Francie vychází z podobného principu i metoda B používaná v Německu, nicméně tato metoda není používána jako primární.

Metoda A v Německu vychází ze snahy ochladit vzorek v jeho středu, tak aby byla redukována dle potřeby, v závislosti na typu zkoušené zeminy, v izotermě dosažena teplota 0 °C v předepsaný čas. Výsledkem je poté celková hodnota mrazového zdvihu. V sousedním Rakousku jsou na tom podobně, kde je míra namrzavosti zeminy určena podle výsledného mrazu, nicméně za zmínku stojí Rakouská nepřímá metoda, která se stanovuje na základě minerálního kritéria, kde důležitou roli hraje procentuální zastoupení aktivních a neaktivních minerálů.

Nejseverněji položená země, o které se zmiňuji výše, používá metodu, která se od ostatních liší značným způsobem. Ve Finsku zjišťují míru namrzavosti zemin a materiálu pomocí cyklického zmrazování a rozmrazování, při kterém dochází ke změně velikosti zatížení, což přináší výsledky chování vzorku nejen během zmrazování, ale i částečného rozmrznutí, na základě kterého lze stanovit i míru ztráty únosnosti v období přesycené zeminy vodou.

Praktická část

Cílem praktické části bylo posoudit odizolování zkušebních vzorků při zkoušení namrzavosti přímou metodou podle ČSN 72 1191. Jako zkušební materiál byla zvolena typická sprašová hlína z důvodu běžného výskytu na našem území a jejího častého využití.

První zkouška míry namrzavosti na vzorku bez použití tepelné izolace byla vyhodnocena podle normy ČSN 72 1191 jako mírně namrzavá až namrzavá. Při určování výsledného součinitele β byl vyřazen vzorek IV, neboť nevyhověl na povolenou odchylku měření, uvedenou v normě ČSN 72 1191.

Druhá zkouška míry namrzavosti proběhla s použitím izolace kolem zkoušeného vzorku. Jako tepelně izolační materiál byla použita dvouvrstvá karimatka. Nicméně výsledky měření nemohou být brány jako plnohodnotné, neboť byly zaznamenány pouze hodnoty do 46hodiny z normových 120 hodin. Z tohoto důvodu jsem nemohl porovnat obě zkoušky přímo podle výsledných naměřených hodnot z laboratoře, proto jsem se rozhodl pro dva odlišné typy porovnání.

První spočívá v porovnání pouze naměřených hodnot obou zkoušek, čili do 46hodiny. Druhý způsob porovnání spočívá na základně předpokladu lineárního vztahu, mezi naměřeným zdvihem zkoušeného vzorku a odmocninou indexu mrazu uvedeného v normě ČSN 72 1191, podle kterého jsem dopočítal možnou hodnotu konečného mrazového zdvihu.

Tab. 4-1 Celkové porovnání výsledků z praktické části [15]

		souč. β vzorku I	souč. β vzorku II	souč. β vzorku III	souč. β vzorku IV
		průměrný součinitel β vzorků			
zkouška č. 1 - bez tepelné izolace	naměřené hodnoty po 46 hodinách	0,20	0,16	0,20	1,01
		0,19			
	konečné naměřené hodnoty po 120 hodinách	0,30	0,24	0,34	0,78
		0,29			
zkouška č. 2 - s tepelnou izolací	naměřené hodnoty po 46 hodinách	0,61	0,90	0,72	0,43
		0,67			
	konečné dopočtené hodnoty po 120 hodinách	0,87	1,42	1,11	0,67
		1,13			

Výsledek

I když byla obě měření prováděna na stejném materiálu, tak se výsledky od sebe značně liší. Markantní rozdíl mezi zkouškami je patrný už i po 46 hodinách, kdy hodnota součinitele β u vzorku s tepelnou izolací jasně klasifikuje zeminu jako namrzavou a následné dopočtené hodnoty to jen potvrzují.

Odpověď na otázku zda-li hraje roli přítomnost tepelné izolace během zkoušky je ano, přítomnost izolace má vliv na výsledek zkoušení míry namrzavosti a hodnoty z praktické části tuto odpověď jednoznačně podporují. Nicméně musí být poukázáno i na faktory, které tuto odpověď vyvracejí. První je skutečnost, že byla provedena pouze jedna celková zkouška, kde navíc výsledek zkoušky č. 2 je brán jako neplnohodnotný z důvodu nedodržení normových předpisů o délce jejího trvání. Dále mohla nastat neúmyslná chyba, i přes provádění zkoušky na čtyřech zkušebních tělesech, při jakékoliv manipulaci se vzorky, ať už při hutnění, saturování nebo chlazení, která mohla výsledek ovlivnit.

Doporučení

Provést obě zkoušky znovu, nejlépe několikrát, a tak aby byly postupy dodrženy přesně v souladu s normou ČSN 72 1191, a tím byly i jejich výsledky plnohodnotné. Navíc doporučuji provedení obou zkoušek i na jiných typech zemin, aby přítomnost tepelné izolace při zkoušení namrzavosti byla prověřena i z tohoto ohledu.

5 Seznamy

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Schéma postupného vzniku mrazového zdvihu [4]

Obr. 2-2 Schéma zemního tělesa při vzniku mrazového zdvihu [6]

Obr. 2-3 Schéma zemního tělesa při ztrátě únosnosti [6]

Obr. 2-4 Nomogram Scheibleho kritéria zrnitosti [7]

Obr. 2-5 Schéma zkušební buňky [8]

Obr. 2-6 Vzorový graf pro vyhodnocení míry namrzavosti přímou metodou [8]

Obr. 2-7 Třístupňový model pro posouzení nenamrzavosti zemin v Rakousku [11]

Obr. 2-8 Schéma zkušební buňky v Rakousku [11]

Obr. 2-9 Zkušební zařízení a zkušební buňka používaná v Německu [12]

Obr. 2-10 Grafické znázornění průběhu zkoušky míry namrzavosti v Německu [12]

Obr. 2-11 Schéma zkušebního zařízení ve Francii [13]

Obr. 2-12 Schéma zkušebního zařízení ve Finsku [14]

Obr. 2-13 Princip ověření použití tepelné izolace v praktické části vychází z izolační schopnosti velkého množství zhutněné zeminy do technologické vrstvy násypu [15]

Obr. 3-14 Zemina v suchém a navlhčeném stavu [15]

Obr. 3-15 Přístroj pro metodu Proctor standard [15]

Obr. 3-16 První zkouška – lednice se vzorky a zkušební buňka bez izolace [15]

Obr. 3-17 Vzorek po průběhu zkoušky a detail oblasti vzniku ledové čočky [15]

Obr. 3-18 Detail tvaru ledové čočky [15]

Obr. 3-19 Druhá zkouška – lednice se vzorky a zkušební buňka s izolací [15]

Tab. 4-1 Celkové porovnání výsledků z praktické části [15]

Seznam Tabulek

Tab. 2-1 Rozdělení zeminy podle mrazové citlivosti [4]

Tab. 2-2 Stanovení míry namrzavosti podle součinitele β [8]

Tab. 2-3 Porovnání výsledků míry namrzavosti obou metod [9]

Tab. 2-4 Zjednodušená klasifikace podle míry namrzavosti v Německu [12]

Tab. 2-5 Stanovení míry namrzavosti podle hodnoty SG_X [13]

Tab. 3-6 Výsledné hodnoty první zkoušky [15]

Tab. 3-7 Výsledné hodnoty druhé zkoušky [15]

Tab. 3-8 Zkouška č. 1 po 46 hodinách měření [15]

Tab. 3-9 Zkouška č. 2 po 46 hodinách [15]

Tab. 3-10 Dopočtené hodnoty druhé zkoušky [15]

Seznam grafů

Graf 2-1 Grafické znázornění průběhu přechodného rozmrazání ve Finsku [14]

Graf 2-2 Grafické znázornění průběhu přechodného rozmrazání ve Finsku [14]

Graf 3-3 Grafické znázornění mrazových zdvihů z první zkoušky [15]

Graf 3-4 Grafické znázornění mrazových zdvihů z druhé zkoušky [15]

Seznam zkratek

č.	číslo
tzv.	takzvaný
např.	například
apod.	a podobně
ČSN	česká státní technická norma
EN	evropská technická norma
DIN	německá státní technická norma
ÖNORM	rakouská státní technická norma
CBR	zkratka zkoušky Kalifornského poměru únosnosti
GW	štěrk dobře zrněný
GP	štěrk špatně zrněný
G-F	štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy
GM	štěrk hlinitý
GC	štěrk jílovitý
SW	písek dobře zrněný
SP	písek špatně zrněný
S-F	písek s příměsí jemnozrnné zeminy
SM	písek hlinitý
SC	písek jílovitý
MG	hlína šterkovitá

CG	jíl štěrkovitý
MS	hlína písčítá
CS	jíl písčítý
ML	hlína s nízkou plasticitou
MI	hlína se střední plasticitou
CL	jíl s nízkou plasticitou
CI	jíl se střední plasticitou
MH	hlína s vysokou plasticitou
MV	hlína s velmi vysokou plasticitou
ME	hlína s extrémně vysokou plasticitou
CH	jíl s vysokou plasticitou
CV	jíl s velmi vysokou plasticitou
CE	jíl s extrémně vysokou plasticitou

6 Podklady a použitá literatura

- [1] VARAUS, Michal: BM02-Pozemní komunikace II; Téma 11 text – Údržba a poruchy netuhých vozovek, VUT v Brně, fakulta stavební, Brno 2009
- [2] HÝZL, Petr: BM02-Pozemní komunikace II; Zkoušení asfaltových poživ, VUT v Brně, fakulta stavební, Brno 2008
- [3] VARAUS, Michal: BM02-Pozemní komunikace II; Namrzavost a zlepšování zemin, VUT v Brně, fakulta stavební, Brno 2011
- [4] FM 5-410, Movement of Water Through Soils – Chapter 7 [online], [cit. 2013-04-18], dostupné z: http://www.itc.nl/~rossiter/Docs/FM5-410/FM5-410_Ch7.pdf
- [5] BOHÁČ, Jan: Mechanika zemin I; 3 – Voda v zemině, Faculty of Science, Charles University, Praha 2012, [online], [cit. 2013-04-18], dostupné z: http://labmz1.natur.cuni.cz/~bhc/s/mz1/mz1_3_www.pdf
- [6] Transport Québec – Québec Pavement Story [online], [cit. 2013-04-18], dostupné z: http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises_en/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/chaussees_climat_quebecois#ouvrages
- [7] WEIGLOVÁ, Kamila: BF02-Mechanika zemin, skriptum Modul BF02-M01, Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 34 s.
- [8] ČSN 72 1191, Zkoušení míry namrzavosti zemin, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012
- [9] STEHLÍK, Dušan: Namrzavost zemin v podloží pozemních komunikací, VUT v Brně, fakulta stavební, Brno 2009
- [10] ČSN 72 1191, Zkoušení míry namrzavosti zemin, Praha: Úřad pro normalizaci a měření, metrologii a státní zkušebnictví, 1989
- [11] PFELIER, Andreas: Austrian Test Method „Frostheave-Test“; CEN TC 227, Working Group 4, Task Group 5 - Frost susceptibility, 2008

- [12] BLUME, Urshula: Assessment of the frost susceptibility and frost resistance of soils, aggregates and unbound mixtures according the German guidelines for streetbuilding; CEN / TC 227 / WG 4 / TG 5: Frost Susceptibility , 2008
- [13] MAUDIUT, Caroline: The French frost heave test, from the procedure to its application in French pavement design; CEN TC 227, Working Group 4, Task Group 5 - Frost susceptibility, 2008
- [14] ONNINEN, Heikki: Method Description- TPPT-R07, Frost heave test, Thaw compression test; CEN TC 227, Working Group 4, Task Group 5 - Frost susceptibility, 2008
- [15] PUDA, Adam: Vlastní pořízené fotografie, vlastní vytvořené schémata, obrázky a grafy

7 Přílohy

Protokoly zkoušek

STANOVENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI DLE ČSN 72 1191 zkouška č. 1

Provedl:	Puda Adam
Místo:	Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně
Datum:	15. 5. 2013
Vzorek:	Sprašová hlína
Počet zk. vzorků:	4
Tepelná izolace:	ne
Doba saturace:	24 hodin
Doba ochlazování:	120 hodin

Naměřené hodnoty:

čas	ΔI_m	$\sqrt{I_m}$	mrazové zdvihy				součinitel namrzavosti β			
			h_0	h_1	h_2	h_3	β_0	β_1	β_2	β_3
1	4	2,00	9,46	9,89	7,38	6,89	0,02	-0,06	-0,05	0,14
2	8	2,83	9,48	9,84	7,34	7,01	0,09	-0,05	0,13	0,27
3	12	3,46	9,54	9,81	7,42	7,18	0,04	-0,02	0,15	0,60
4	16	4,00	9,56	9,80	7,50	7,50	0,04	0,13	0,08	0,53
5	20	4,47	9,58	9,86	7,54	7,75	0,05	0,09	0,09	1,03
6	24	4,90	9,60	9,90	7,58	8,19	0,08	0,05	0,13	1,10
7	28	5,29	9,63	9,92	7,63	8,62	0,05	0,03	0,08	0,88
8	32	5,66	9,65	9,93	7,66	8,94	0,15	-0,03	0,15	1,14
9	36	6,00	9,70	9,92	7,71	9,33	0,03	0,00	0,06	0,55
10	40	6,32	9,71	9,92	7,73	9,51	0,06	0,00	0,03	0,39
11	44	6,63	9,73	9,92	7,74	9,63	0,14	0,00	0,10	1,29
12	48	6,93	9,77	9,92	7,77	10,01	0,14	-0,04	0,11	1,24
13	52	7,21	9,81	9,91	7,80	10,36	0,11	0,00	0,15	1,18
14	56	7,48	9,84	9,91	7,84	10,68	0,15	0,00	0,15	1,26
15	60	7,75	9,88	9,91	7,88	11,01	0,16	0,00	0,16	1,10

16	64	8,00	9,92	9,91	7,92	11,29	0,16	0,00	0,16	1,10
17	68	8,25	9,96	9,91	7,96	11,56	0,13	0,00	0,21	1,13
18	72	8,49	9,99	9,91	8,01	11,83	0,17	0,00	0,13	0,99
19	76	8,72	10,03	9,91	8,04	12,06	0,18	0,00	0,22	1,10
20	80	8,94	10,07	9,91	8,09	12,31	0,14	0,00	0,14	0,95
21	84	9,17	10,10	9,91	8,12	12,52	0,23	0,00	0,28	1,53
22	88	9,38	10,15	9,91	8,18	12,85	0,14	0,00	0,19	0,81
23	92	9,59	10,18	9,91	8,22	13,02	0,19	-0,05	0,24	1,11
24	96	9,80	10,22	9,90	8,27	13,25	0,20	0,00	0,20	0,89
25	100	10,00	10,26	9,90	8,31	13,43	0,40	1,87	0,00	1,51
26	104	10,20	10,34	10,27	8,31	13,73	0,21	0,21	0,10	0,82
27	108	10,39	10,38	10,31	8,33	13,89	0,21	0,21	0,05	0,79
28	112	10,58	10,42	10,35	8,34	14,04	0,21	0,21	0,21	0,59
29	116	10,77	10,46	10,39	8,38	14,15	0,27	0,22	0,33	0,92
30	120	10,95	10,51	10,43	8,44	14,32	0,28	0,22	0,33	0,99
31	124	11,14	10,56	10,47	8,50	14,50	0,11	0,17	0,28	1,12
32	128	11,31	10,58	10,50	8,55	14,70	0,11	0,17	0,11	1,03
33	132	11,49	10,60	10,53	8,57	14,88	0,46	0,41	0,58	2,26
34	136	11,66	10,68	10,60	8,67	15,27	0,23	0,23	0,35	1,17
35	140	11,83	10,72	10,64	8,73	15,47	0,30	0,30	0,42	1,01
36	144	12,00	10,77	10,69	8,80	15,64	0,30	0,24	0,24	0,97
37	148	12,17	10,82	10,73	8,84	15,80	0,37	0,31	0,37	1,59
38	152	12,33	10,88	10,78	8,90	16,06	0,25	0,25	0,25	1,05
39	156	12,49	10,92	10,82	8,94	16,23	0,31	0,25	0,31	1,32
40	160	12,65	10,97	10,86	8,99	16,44	0,25	0,32	0,32	1,15
41	164	12,81	11,01	10,91	9,04	16,62	0,32	0,26	0,26	1,16
42	168	12,96	11,06	10,95	9,08	16,80	0,33	0,26	0,33	1,04
43	172	13,11	11,11	10,99	9,13	16,96	0,33	0,26	0,33	1,25
44	176	13,27	11,16	11,03	9,18	17,15	0,27	0,20	0,20	0,93
45	180	13,42	11,20	11,06	9,21	17,29	0,40	0,34	0,34	0,94
46	184	13,56	11,26	11,11	9,26	17,43	0,27	0,20	0,34	0,75
47	188	13,71	11,30	11,14	9,31	17,54	0,34	0,28	0,28	1,10
48	192	13,86	11,35	11,18	9,35	17,70	0,35	0,28	0,35	0,84
49	196	14,00	11,40	11,22	9,40	17,82	0,28	0,28	0,28	0,70
50	200	14,14	11,44	11,26	9,44	17,92	0,28	0,21	0,28	0,85
51	204	14,28	11,48	11,29	9,48	18,04	0,36	0,29	0,36	0,79
52	208	14,42	11,53	11,33	9,53	18,15	0,29	0,29	0,36	0,80
53	212	14,56	11,57	11,37	9,58	18,26	0,29	0,22	0,29	0,73
54	216	14,70	11,61	11,40	9,62	18,36	0,37	0,30	0,37	0,81
55	220	14,83	11,66	11,44	9,67	18,47	0,30	0,30	0,30	0,74
56	224	14,97	11,70	11,48	9,71	18,57	0,30	0,23	0,38	0,83
57	228	15,10	11,74	11,51	9,76	18,68	0,30	0,30	0,38	0,68
58	232	15,23	11,78	11,55	9,81	18,77	0,31	0,23	0,38	0,69
59	236	15,36	11,82	11,58	9,86	18,86	0,39	0,39	0,46	0,85

60	240	15,49	11,87	11,63	9,92	18,97	0,31	0,23	0,23	0,62
61	244	15,62	11,91	11,66	9,95	19,05	0,39	0,31	0,39	0,71
62	248	15,75	11,96	11,70	10,00	19,14	0,32	0,32	0,47	0,63
63	252	15,87	12,00	11,74	10,06	19,22	0,40	0,32	0,32	0,88
64	256	16,00	12,05	11,78	10,10	19,33	0,32	0,24	0,48	0,72
65	260	16,12	12,09	11,81	10,16	19,42	0,40	0,40	0,40	0,81
66	264	16,25	12,14	11,86	10,21	19,52	0,24	0,16	0,33	0,57
67	268	16,37	12,17	11,88	10,25	19,59	0,41	0,41	0,41	0,66
68	272	16,49	12,22	11,93	10,30	19,67	0,33	0,17	0,33	0,58
69	276	16,61	12,26	11,95	10,34	19,74	0,42	0,33	0,50	0,67
70	280	16,73	12,31	11,99	10,40	19,82	0,34	0,25	0,34	0,50
71	284	16,85	12,35	12,02	10,44	19,88	0,34	0,34	0,42	0,59
72	288	16,97	12,39	12,06	10,49	19,95	0,34	0,34	0,43	0,68
73	292	17,09	12,43	12,10	10,54	20,03	0,34	0,26	0,34	0,60
74	296	17,20	12,47	12,13	10,58	20,10	0,35	0,35	0,52	0,78
75	300	17,32	12,51	12,17	10,64	20,19	0,43	0,26	0,35	0,61
76	304	17,44	12,56	12,20	10,68	20,26	0,35	0,26	0,35	0,70
77	308	17,55	12,60	12,23	10,72	20,34	0,35	0,35	0,44	0,79
78	312	17,66	12,64	12,27	10,77	20,43	0,35	0,35	0,44	0,89
79	316	17,78	12,68	12,31	10,82	20,53	0,45	0,27	0,36	0,71
80	320	17,89	12,73	12,34	10,86	20,61	0,36	0,36	0,45	0,54
81	324	18,00	12,77	12,38	10,91	20,67	0,36	0,27	0,45	0,72
82	328	18,11	12,81	12,41	10,96	20,75	0,36	0,36	0,36	0,54
83	332	18,22	12,85	12,45	11,00	20,81	0,37	0,27	0,37	0,82
84	336	18,33	12,89	12,48	11,04	20,90	0,37	0,37	0,46	0,55
85	340	18,44	12,93	12,52	11,09	20,96	0,37	0,28	0,55	1,11
86	344	18,55	12,97	12,55	11,15	21,08	0,37	0,28	0,37	0,47
87	348	18,65	13,01	12,58	11,19	21,13	0,37	0,37	0,47	0,84
88	352	18,76	13,05	12,62	11,24	21,22	0,38	0,28	0,47	0,47
89	356	18,87	13,09	12,65	11,29	21,27	0,38	0,28	0,38	0,57
90	360	18,97	13,13	12,68	11,33	21,33	0,38	0,29	0,48	0,48
91	364	19,08	13,17	12,71	11,38	21,38	0,38	0,29	0,38	0,38
92	368	19,18	13,21	12,74	11,42	21,42	0,38	0,29	0,48	0,77
93	372	19,29	13,25	12,77	11,47	21,50	0,29	0,39	0,58	0,77
94	376	19,39	13,28	12,81	11,53	21,58	0,39	0,19	0,39	0,39
95	380	19,49	13,32	12,83	11,57	21,62	0,39	0,39	0,39	0,59
96	384	19,60	13,36	12,87	11,61	21,68	0,29	0,20	0,39	0,39
97	388	19,70	13,39	12,89	11,65	21,72	0,30	0,30	0,49	0,30
98	392	19,80	13,42	12,92	11,70	21,75	0,40	0,30	0,50	0,60
99	396	19,90	13,46	12,95	11,75	21,81	0,40	0,30	0,50	0,40
100	400	20,00	13,50	12,98	11,80	21,85	0,30	0,30	0,40	0,40
101	404	20,10	13,53	13,01	11,84	21,89	0,40	0,30	0,50	0,71
102	408	20,20	13,57	13,04	11,89	21,96	0,40	0,30	0,51	0,81
103	412	20,30	13,61	13,07	11,94	22,04	0,31	0,31	0,41	0,81

104	416	20,40	13,64	13,10	11,98	22,12	0,51	0,31	0,41	0,72
105	420	20,49	13,69	13,13	12,02	22,19	0,31	0,31	0,51	0,82
106	424	20,59	13,72	13,16	12,07	22,27	0,41	0,31	0,52	0,62
107	428	20,69	13,76	13,19	12,12	22,33	0,41	0,31	0,52	0,62
108	432	20,78	13,80	13,22	12,17	22,39	0,42	0,31	0,52	0,42
109	436	20,88	13,84	13,25	12,22	22,43	0,31	0,31	0,42	0,42
110	440	20,98	13,87	13,28	12,26	22,47	0,42	0,32	0,53	1,26
111	444	21,07	13,91	13,31	12,31	22,59	0,42	0,21	0,42	0,21
112	448	21,17	13,95	13,33	12,35	22,61	0,32	0,32	0,42	0,53
113	452	21,26	13,98	13,36	12,39	22,66	0,32	0,32	0,53	0,43
114	456	21,35	14,01	13,39	12,44	22,70	0,32	0,21	0,43	0,11
115	460	21,45	14,04	13,41	12,48	22,71	0,32	0,21	0,32	0,11
116	464	21,54	14,07	13,43	12,51	22,72	0,43	0,32	0,54	0,32
117	468	21,63	14,11	13,46	12,56	22,75	0,33	0,33	0,43	0,33
118	472	21,73	14,14	13,49	12,60	22,78	0,33	0,22	0,33	0,11
119	476	21,82	14,17	13,51	12,63	22,79	0,22	0,22	0,55	0,44
120	480	21,91	14,19	13,53	12,68	22,83	0,65	0,62	0,58	1,04

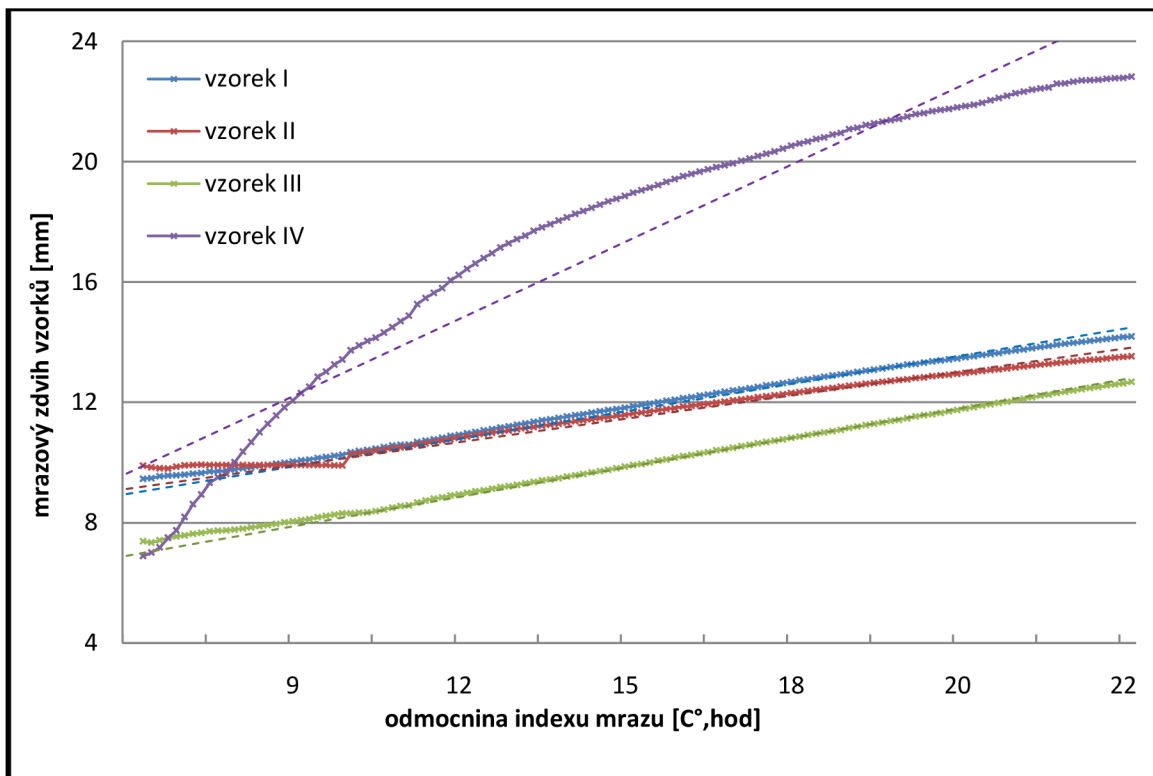
Vyhodnocení:

Tabulka výsledných hodnot po 120 hodinách měření

	vzorek I	vzorek II	vzorek III	vzorek IV
počáteční hodnota zdvihu [mm]	9,46	9,89	7,38	6,89
konečná hodnota zdvihu [mm]	14,19	13,53	12,68	22,83
mrazový zdvih během zkoušení [mm]	4,73	3,64	5,30	15,94
průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,30	0,24	0,34	0,78*
celkový průměr β	0,29			

*pozn. Vzorek IV nevyhověl na povolenou odchylku měření, uvedenou v normě ČSN 72 1191, proto není zahrnut ve výsledku

Grafické znázornění průběhu zkoušky



Vyhodnocení:

Výsledná hodnota $\beta = 0,29$ zkoušeného vzorku bez použití tepelné izolace klasifikuje podle normy ČSN 72 1191 zeminu jako mírně namrzavou až namrzavou.

STANOVENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI DLE ČSN 72 1191 zkouška č. 2

Provedl:	Puda Adam
Místo:	Laboratoř ústavu pozemních komunikací, VUT v Brně
Datum:	21. 5. 2013
Vzorek:	Sprašová hlína
Počet zk. vzorků:	4
Tepelná izolace:	ano
Doba saturace:	24 hodin
Doba ochlazování:	46 hodin

Naměřené hodnoty:

čas	ΔI_m	$\sqrt{I_m}$	mrazové zdvihy				součinitel namrzavosti β			
			h_0	h_1	h_2	h_3	β_0	β_1	β_2	β_3
1	4	2,00	7,11	7,77	5,46	4,80	0,01	0,17	0,19	0,05
2	8	2,83	7,12	7,91	5,62	4,84	0,06	0,30	0,25	0,06
3	12	3,46	7,16	8,10	5,78	4,88	0,06	0,21	0,24	0,06
4	16	4,00	7,19	8,21	5,91	4,91	0,04	0,06	0,30	0,06
5	20	4,47	7,21	8,24	6,05	4,94	0,09	0,96	0,28	0,12
6	24	4,90	7,25	8,65	6,17	4,99	0,10	0,03	0,41	0,13
7	28	5,29	7,29	8,66	6,33	5,04	0,14	0,25	0,41	0,11
8	32	5,66	7,34	8,75	6,48	5,08	0,20	0,35	0,44	0,15
9	36	6,00	7,41	8,87	6,63	5,13	0,25	0,43	0,43	0,22
10	40	6,32	7,49	9,01	6,77	5,20	0,26	0,71	0,10	0,26
11	44	6,63	7,57	9,23	6,80	5,28	0,34	0,92	0,07	0,17
12	48	6,93	7,67	9,50	6,82	5,33	0,35	1,10	0,28	0,32
13	52	7,21	7,77	9,81	6,90	5,42	0,40	1,21	0,77	0,33
14	56	7,48	7,88	10,14	7,11	5,51	0,38	1,29	0,42	0,53
15	60	7,75	7,98	10,48	7,22	5,65	0,39	1,30	0,94	0,59
16	64	8,00	8,08	10,81	7,46	5,80	0,49	1,34	0,93	0,89
17	68	8,25	8,20	11,14	7,69	6,02	0,59	1,25	0,88	1,05
18	72	8,49	8,34	11,44	7,90	6,27	0,69	1,20	0,52	0,95
19	76	8,72	8,50	11,72	8,02	6,49	0,57	1,15	0,49	0,93
20	80	8,94	8,63	11,98	8,13	6,70	0,54	1,22	1,72	0,81

21	84	9,17	8,75	12,25	8,51	6,88	1,44	2,09	1,34	1,99
22	88	9,38	9,06	12,70	8,80	7,31	0,19	0,24	0,00	0,71
23	92	9,59	9,10	12,75	8,80	7,46	-0,44	0,00	0,00	0,48
24	96	9,80	9,01	12,75	8,80	7,56	0,00	0,00	0,00	0,45
25	100	10,00	9,01	12,75	8,80	7,65	0,40	0,35	0,30	0,45
26	104	10,20	9,09	12,82	8,86	7,74	0,72	0,88	0,72	0,36
27	108	10,39	9,23	12,99	9,00	7,81	0,79	1,05	1,26	1,05
28	112	10,58	9,38	13,19	9,24	8,01	0,85	1,12	1,01	0,59
29	116	10,77	9,54	13,40	9,43	8,12	0,81	1,19	1,03	0,27
30	120	10,95	9,69	13,62	9,62	8,17	1,55	3,48	2,98	1,66
31	124	11,14	9,97	14,25	10,16	8,47	0,90	1,18	0,84	0,39
32	128	11,31	10,13	14,46	10,31	8,54	0,86	1,14	0,97	0,34
33	132	11,49	10,28	14,66	10,48	8,60	0,93	1,10	0,98	0,35
34	136	11,66	10,44	14,85	10,65	8,66	0,65	1,12	1,00	0,35
35	140	11,83	10,55	15,04	10,82	8,72	0,89	1,07	0,95	0,30
36	144	12,00	10,70	15,22	10,98	8,77	0,66	1,03	0,97	0,24
37	148	12,17	10,81	15,39	11,14	8,81	0,67	1,04	0,92	0,18
38	152	12,33	10,92	15,56	11,29	8,84	0,81	0,99	0,93	0,19
39	156	12,49	11,05	15,72	11,44	8,87	3,52	1,01	0,94	0,19
40	160	12,65	11,61	15,88	11,59	8,90	0,83	0,95	0,95	0,06
41	164	12,81	11,74	16,03	11,74	8,91	0,84	0,97	0,97	0,19
42	168	12,96	11,87	16,18	11,89	8,94	0,85	0,91	0,85	0,07
43	172	13,11	12,00	16,32	12,02	8,95	1,06	0,79	0,92	0,20
44	176	13,27	12,16	16,44	12,16	8,98	1,13	0,87	0,80	0,13
45	180	13,42	12,33	16,57	12,28	9,00	0,40	0,34	0,40	0,00
46	184	13,56	12,39	16,62	12,34	9,00	0,91	1,23	0,91	0,66

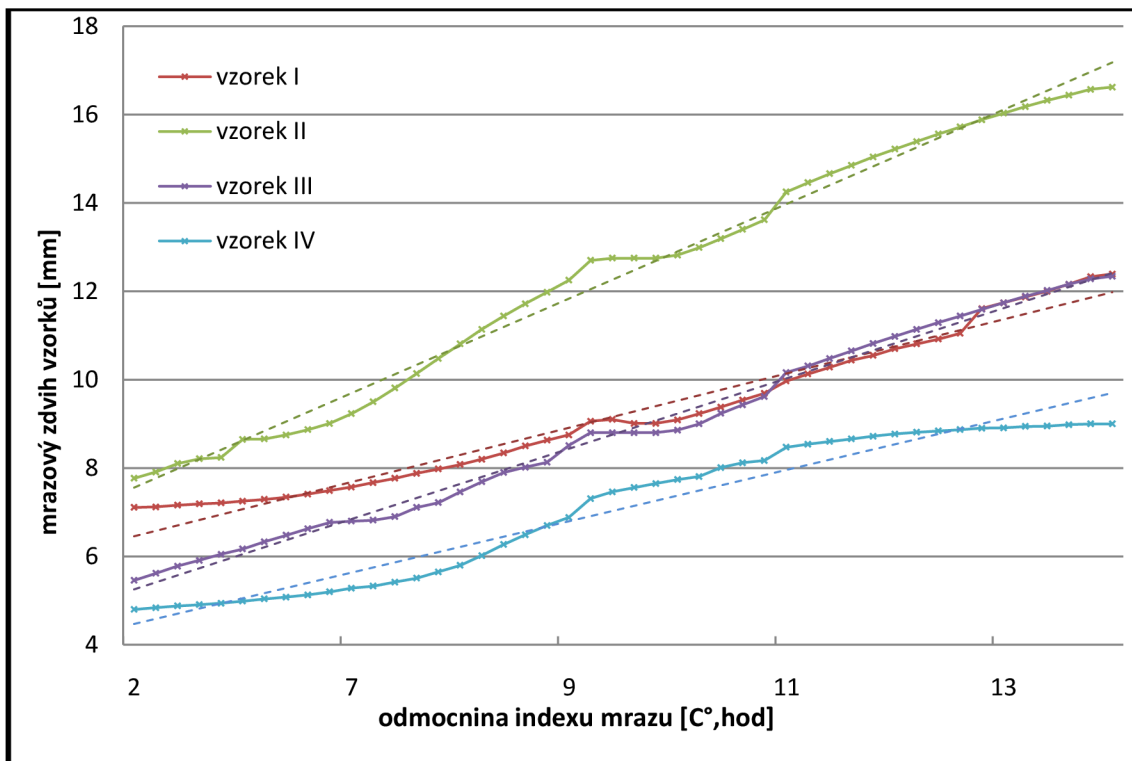
Vyhodnocení:

Tabulka výsledných hodnot po 46 hodinách* měření

	vzorek I	vzorek II	vzorek III	vzorek IV
počáteční hodnota zdvihu [mm]	7,11	7,77	5,46	4,80
konečná hodnota zdvihu [mm]	12,39	16,62	12,34	9,00
mrazový zdvih během zkoušení [mm]	5,28	8,85	6,88	4,20
průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,61	0,90	0,72	0,43
celkový průměr β	0,67			

*pozn. Zkouška neproběhla po normově předepsanou dobu 120 hodin

Grafické znázornění průběhu zkoušky

**Vyhodnocení:**

Výsledná hodnota $\beta = 0,67$ zkoušeného vzorku s použitím tepelné izolace klasifikuje podle normy ČSN 72 1191 zeminu jako namrzavou. Doba průběhu zkoušky však byla zkrácena ze 120 hodin na 46 hodin, proto nelze brát zkoušku jako plnohodnotnou a tím pádem výslednou hodnotu β jako konečnou.

STANOVENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI DLE ČSN 72 1191 zkouška č. 2 – hodnoty dpočítané

Provedl: Puda Adam

Postup výpočtu:

Určení konečné hodnoty mrazového zdvihu vychází z lineárního průběhu růstu za čas, kdy vycházím z poslední zaznamenané hodnoty (46 hodina zkoušky) a pomocí podobnosti trojúhelníku dpočtu výsledný zdvih (120 hodina zkoušky). Nárůst mezi 46

a 120 hodinu rovnoměrně rozdělím a z těchto hodnot poté mohu dopočítat potřebný součinitel β .

Naměřené a dopočtené hodnoty:

čas	ΔI_m	$\sqrt{I_m}$	mrazové zdvihy				součinitel namrzavosti β			
			h_0	h_1	h_2	h_3	β_0	β_1	β_2	β_3
1	4	2,00	7,11	7,77	5,46	4,80	0,01	0,17	0,19	0,05
2	8	2,83	7,12	7,91	5,62	4,84	0,06	0,30	0,25	0,06
3	12	3,46	7,16	8,10	5,78	4,88	0,06	0,21	0,24	0,06
4	16	4,00	7,19	8,21	5,91	4,91	0,04	0,06	0,30	0,06
5	20	4,47	7,21	8,24	6,05	4,94	0,09	0,96	0,28	0,12
6	24	4,90	7,25	8,65	6,17	4,99	0,10	0,03	0,41	0,13
7	28	5,29	7,29	8,66	6,33	5,04	0,14	0,25	0,41	0,11
8	32	5,66	7,34	8,75	6,48	5,08	0,20	0,35	0,44	0,15
9	36	6,00	7,41	8,87	6,63	5,13	0,25	0,43	0,43	0,22
10	40	6,32	7,49	9,01	6,77	5,20	0,26	0,71	0,10	0,26
11	44	6,63	7,57	9,23	6,80	5,28	0,34	0,92	0,07	0,17
12	48	6,93	7,67	9,50	6,82	5,33	0,35	1,10	0,28	0,32
13	52	7,21	7,77	9,81	6,90	5,42	0,40	1,21	0,77	0,33
14	56	7,48	7,88	10,14	7,11	5,51	0,38	1,29	0,42	0,53
15	60	7,75	7,98	10,48	7,22	5,65	0,39	1,30	0,94	0,59
16	64	8,00	8,08	10,81	7,46	5,80	0,49	1,34	0,93	0,89
17	68	8,25	8,20	11,14	7,69	6,02	0,59	1,25	0,88	1,05
18	72	8,49	8,34	11,44	7,90	6,27	0,69	1,20	0,52	0,95
19	76	8,72	8,50	11,72	8,02	6,49	0,57	1,15	0,49	0,93
20	80	8,94	8,63	11,98	8,13	6,70	0,54	1,22	1,72	0,81
21	84	9,17	8,75	12,25	8,51	6,88	1,44	2,09	1,34	1,99
22	88	9,38	9,06	12,70	8,80	7,31	0,19	0,24	0,00	0,71
23	92	9,59	9,10	12,75	8,80	7,46	-0,44	0,00	0,00	0,48
24	96	9,80	9,01	12,75	8,80	7,56	0,00	0,00	0,00	0,45
25	100	10,00	9,01	12,75	8,80	7,65	0,40	0,35	0,30	0,45
26	104	10,20	9,09	12,82	8,86	7,74	0,72	0,88	0,72	0,36
27	108	10,39	9,23	12,99	9,00	7,81	0,79	1,05	1,26	1,05
28	112	10,58	9,38	13,19	9,24	8,01	0,85	1,12	1,01	0,59
29	116	10,77	9,54	13,40	9,43	8,12	0,81	1,19	1,03	0,27
30	120	10,95	9,69	13,62	9,62	8,17	1,55	3,48	2,98	1,66
31	124	11,14	9,97	14,25	10,16	8,47	0,90	1,18	0,84	0,39
32	128	11,31	10,13	14,46	10,31	8,54	0,86	1,14	0,97	0,34
33	132	11,49	10,28	14,66	10,48	8,60	0,93	1,10	0,98	0,35
34	136	11,66	10,44	14,85	10,65	8,66	0,65	1,12	1,00	0,35
35	140	11,83	10,55	15,04	10,82	8,72	0,89	1,07	0,95	0,30
36	144	12,00	10,70	15,22	10,98	8,77	0,66	1,03	0,97	0,24

37	148	12,17	10,81	15,39	11,14	8,81	0,67	1,04	0,92	0,18
38	152	12,33	10,92	15,56	11,29	8,84	0,81	0,99	0,93	0,19
39	156	12,49	11,05	15,72	11,44	8,87	3,52	1,01	0,94	0,19
40	160	12,65	11,61	15,88	11,59	8,90	0,83	0,95	0,95	0,06
41	164	12,81	11,74	16,03	11,74	8,91	0,84	0,97	0,97	0,19
42	168	12,96	11,87	16,18	11,89	8,94	0,85	0,91	0,85	0,07
43	172	13,11	12,00	16,32	12,02	8,95	1,06	0,79	0,92	0,20
44	176	13,27	12,16	16,44	12,16	8,98	1,13	0,87	0,80	0,13
45	180	13,42	12,33	16,57	12,28	9,00	0,40	0,34	0,40	0,00
46	184	13,56	12,39	16,62	12,34	9,00	0,78	1,31	1,02	0,62
47	188	13,71	12,50	16,81	12,49	9,09	0,79	1,33	1,03	0,63
48	192	13,86	12,62	17,00	12,64	9,18	0,80	1,34	1,04	0,64
49	196	14,00	12,73	17,20	12,79	9,27	0,81	1,35	1,05	0,64
50	200	14,14	12,85	17,39	12,94	9,37	0,82	1,37	1,06	0,65
51	204	14,28	12,96	17,58	13,09	9,46	0,82	1,38	1,07	0,66
52	208	14,42	13,08	17,77	13,24	9,55	0,83	1,39	1,08	0,66
53	212	14,56	13,19	17,97	13,39	9,64	0,84	1,41	1,09	0,67
54	216	14,70	13,31	18,16	13,54	9,73	0,85	1,42	1,10	0,67
55	220	14,83	13,42	18,35	13,69	9,82	0,85	1,43	1,11	0,68
56	224	14,97	13,54	18,54	13,84	9,91	0,86	1,45	1,12	0,69
57	228	15,10	13,65	18,74	13,99	10,00	0,87	1,46	1,13	0,69
58	232	15,23	13,77	18,93	14,14	10,10	0,88	1,47	1,14	0,70
59	236	15,36	13,88	19,12	14,28	10,19	0,88	1,48	1,15	0,70
60	240	15,49	14,00	19,31	14,43	10,28	0,89	1,50	1,16	0,71
61	244	15,62	14,11	19,51	14,58	10,37	0,90	1,51	1,17	0,72
62	248	15,75	14,23	19,70	14,73	10,46	0,91	1,52	1,18	0,72
63	252	15,87	14,34	19,89	14,88	10,55	0,91	1,53	1,19	0,73
64	256	16,00	14,46	20,08	15,03	10,64	0,92	1,55	1,20	0,73
65	260	16,12	14,57	20,28	15,18	10,74	0,93	1,56	1,21	0,74
66	264	16,25	14,68	20,47	15,33	10,83	0,94	1,57	1,22	0,74
67	268	16,37	14,80	20,66	15,48	10,92	0,94	1,58	1,23	0,75
68	272	16,49	14,91	20,85	15,63	11,01	0,95	1,59	1,24	0,76
69	276	16,61	15,03	21,05	15,78	11,10	0,96	1,60	1,25	0,76
70	280	16,73	15,14	21,24	15,93	11,19	0,96	1,62	1,26	0,77
71	284	16,85	15,26	21,43	16,08	11,28	0,97	1,63	1,26	0,77
72	288	16,97	15,37	21,62	16,23	11,38	0,98	1,64	1,27	0,78
73	292	17,09	15,49	21,82	16,38	11,47	0,98	1,65	1,28	0,78
74	296	17,20	15,60	22,01	16,53	11,56	0,99	1,66	1,29	0,79
75	300	17,32	15,72	22,20	16,68	11,65	1,00	1,67	1,30	0,79
76	304	17,44	15,83	22,39	16,83	11,74	1,00	1,68	1,31	0,80
77	308	17,55	15,95	22,59	16,98	11,83	1,01	1,69	1,32	0,80
78	312	17,66	16,06	22,78	17,13	11,92	1,02	1,70	1,33	0,81
79	316	17,78	16,18	22,97	17,28	12,01	1,02	1,72	1,33	0,81
80	320	17,89	16,29	23,16	17,43	12,11	1,03	1,73	1,34	0,82

81	324	18,00	16,41	23,36	17,58	12,20	1,04	1,74	1,35	0,82
82	328	18,11	16,52	23,55	17,73	12,29	1,04	1,75	1,36	0,83
83	332	18,22	16,64	23,74	17,88	12,38	1,05	1,76	1,37	0,83
84	336	18,33	16,75	23,93	18,02	12,47	1,05	1,77	1,38	0,84
85	340	18,44	16,86	24,12	18,17	12,56	1,06	1,78	1,38	0,84
86	344	18,55	16,98	24,32	18,32	12,65	1,07	1,79	1,39	0,85
87	348	18,65	17,09	24,51	18,47	12,75	1,07	1,80	1,40	0,85
88	352	18,76	17,21	24,70	18,62	12,84	1,08	1,81	1,41	0,86
89	356	18,87	17,32	24,89	18,77	12,93	1,09	1,82	1,42	0,86
90	360	18,97	17,44	25,09	18,92	13,02	1,09	1,83	1,42	0,87
91	364	19,08	17,55	25,28	19,07	13,11	1,10	1,84	1,43	0,87
92	368	19,18	17,67	25,47	19,22	13,20	1,10	1,85	1,44	0,88
93	372	19,29	17,78	25,66	19,37	13,29	1,11	1,86	1,45	0,88
94	376	19,39	17,90	25,86	19,52	13,38	1,12	1,87	1,45	0,89
95	380	19,49	18,01	26,05	19,67	13,48	1,12	1,88	1,46	0,89
96	384	19,60	18,13	26,24	19,82	13,57	1,13	1,89	1,47	0,90
97	388	19,70	18,24	26,43	19,97	13,66	1,13	1,90	1,48	0,90
98	392	19,80	18,36	26,63	20,12	13,75	1,14	1,91	1,48	0,91
99	396	19,90	18,47	26,82	20,27	13,84	1,14	1,92	1,49	0,91
100	400	20,00	18,59	27,01	20,42	13,93	1,15	1,93	1,50	0,92
101	404	20,10	18,70	27,20	20,57	14,02	1,16	1,94	1,51	0,92
102	408	20,20	18,81	27,40	20,72	14,12	1,16	1,95	1,51	0,92
103	412	20,30	18,93	27,59	20,87	14,21	1,17	1,96	1,52	0,93
104	416	20,40	19,04	27,78	21,02	14,30	1,17	1,97	1,53	0,93
105	420	20,49	19,16	27,97	21,17	14,39	1,18	1,98	1,54	0,94
106	424	20,59	19,27	28,17	21,32	14,48	1,18	1,99	1,54	0,94
107	428	20,69	19,39	28,36	21,47	14,57	1,19	2,00	1,55	0,95
108	432	20,78	19,50	28,55	21,61	14,66	1,20	2,00	1,56	0,95
109	436	20,88	19,62	28,74	21,76	14,76	1,20	2,01	1,57	0,96
110	440	20,98	19,73	28,94	21,91	14,85	1,21	2,02	1,57	0,96
111	444	21,07	19,85	29,13	22,06	14,94	1,21	2,03	1,58	0,96
112	448	21,17	19,96	29,32	22,21	15,03	1,22	2,04	1,59	0,97
113	452	21,26	20,08	29,51	22,36	15,12	1,22	2,05	1,59	0,97
114	456	21,35	20,19	29,71	22,51	15,21	1,23	2,06	1,60	0,98
115	460	21,45	20,31	29,90	22,66	15,30	1,23	2,07	1,61	0,98
116	464	21,54	20,42	30,09	22,81	15,39	1,24	2,08	1,61	0,99
117	468	21,63	20,54	30,28	22,96	15,49	1,24	2,09	1,62	0,99
118	472	21,73	20,65	30,48	23,11	15,58	1,25	2,09	1,63	0,99
119	476	21,82	20,77	30,67	23,26	15,67	1,25	2,10	1,64	1,00
120	480	21,91	20,88	30,86	23,41	15,76	0,95	1,41	1,07	0,72

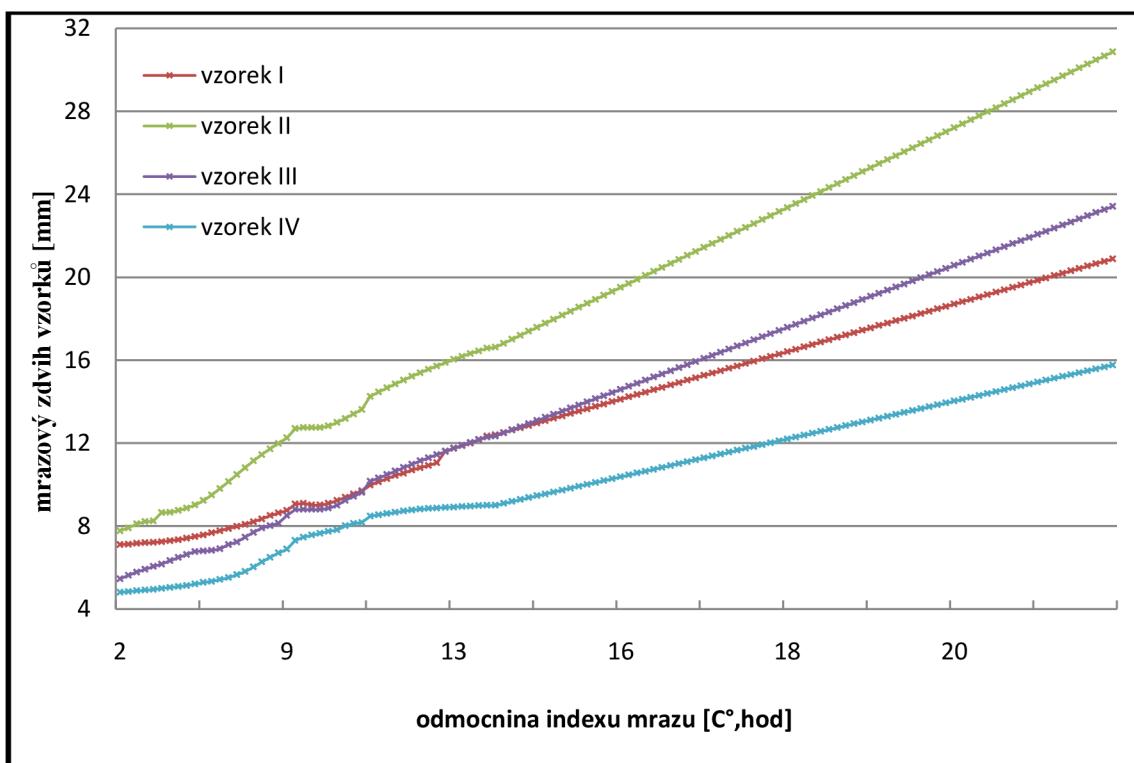
pozn. Od časové hodnoty 47 (barevně odlišeno) jsou mrazové zdvihy a součinitele β dopočítané

Vyhodnocení:

Tabulka výsledných hodnot po dopočtených 120 hodinách

	vzorek I	vzorek II	vzorek III	vzorek IV
počáteční hodnota zdvihu [mm]	7,11	7,77	5,46	4,80
hodnota naměřeného zdvihu - po 46 hodinách [mm]	12,39	16,62	12,34	9,00
předpokládaná konečná hodnota naměřeného zdvihu - po 120 hodinách [mm]	20,88	30,86	23,41	15,76
mrazový zdvih během zkoušení [mm]	13,77	23,09	17,95	10,96
průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,87	1,42	1,11	0,67
celkový průměr β	1,13			

Grafické znázornění průběhu zkoušky

**Vyhodnocení:**

Dopočítaná konečná hodnota $\beta = 1,13$ zkoušeného vzorku s použitím tepelné izolace klasifikuje podle normy ČSN 72 1191 zeminu jako namrzavou.