

**UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2012

Bc. Luboš NETOLICKÝ

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Analýza chování tělesa železničního spodku

Bc. Luboš Netolický

Diplomová práce

2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš Netolický**
Osobní číslo: **D10648**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura: Dopravní cesta**
Název tématu: **Analýza chování tělesa železničního spodku**
Zadávající katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Z hlediska dlouhodobé stability provozované železniční infrastruktury je nutné navrhovat konstrukci železničního svršku i spodku na dostatečně stabilním a homogenním podloží. Důležité je zajistit požadovanou únosnost pražcového podloží a zvolit optimální skladbu konstrukčních vrstev. Pro analýzu chování tělesa železničního spodku jsou využita data, která byla získána při experimentálním měření, které bylo provedeno Katedrou dopravního stavitelství.

Vypracování:

1. Současný stav řešené problematiky
2. Provedení a vyhodnocení laboratorních zkoušek odebraných vzorků
3. Analýza chování tělesa železničního spodku
4. Vyhodnocení naměřených dat
5. Schéma širších vztahů, příčný řez, základní geometrie
6. Zhodnocení a diskuze

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Předpis ČD S4 Železniční spodek. 1997 (účinnost od 1. 7. 1998).

ČSN 72 1006 Kontrola zhutnění zemin a sypanin. Český normalizační institut, 1998.

Technické kvalitativní podmínky staveb ČD, Kapitola 7 - Kolejové lože. Praha 2000.

Provozně technická dokumentace PKVT v 2.0 (účinnost od 1. 1. 2003).

Moravčík, M. - Moravčík, M.: Mechanika železničních tratí ? 1. díl. 1. vyd. Žilina: Edis, 2002. ISBN 80-7100-983-0.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce:

30. listopadu 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

25. května 2012



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 2. dubna 2012

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 30.11. 2012

.....
Luboš Netolický

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat zejména panu Ing. Aleši Šmejdovi Ph.D. za odborné rady, ochotu a velmi vstřícný přístup k vedení mé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Katedře dopravního stavitelství za poskytnutí dat z experimentálního měření v ŽST Stéblová, Katedře mechaniky a částí strojů za umožnění přístupu do jejich počítačové učebny, panu doc. Ing. Petru Paščenkovi, Ph.D. za konzultace o modelování v programu SolidWorks.

V Pardubicích dne 30.11. 2012

Anotace

Diplomová práce se zabývá chováním tělesa železničního spodku. Zejména pak teplotním a mechanickým chováním. Popisuje návrhovou metodu dle SŽDC S4. Porovnává moduly přetvárnosti používané v ČR, Německu a Švýcarsku. Pro konkrétní případ železniční trati sestavuje model teplotního a mechanického chování tělesa železničního spodku. Vypočítané hodnoty pak porovnává s experimentálně naměřenými hodnotami v daném místě.

Klíčová slova

Železniční spodek, návrh železničního spodku, model teplotního chování tělesa železničního spodku, model mechanického chování železničního spodku, experimentální měření.

Anotation

The diploma thesis deals with the behavior of railway substructure. In particular, the thermal and mechanical behavior. Describes the design method by SŽDC S4. Compares the modulus used in the Czech Republic, Germany and Switzerland. For the particular case railway compiles thermal behavior of railway substructure-model and mechanical behavior of railway substructure-model. Then compares the calculated values with measured values in a given location.

Keywords

Railway substructure, railway substructure design, model of thermal behavior railway substructure, model of mechanical behavior railway substructure, the experimental measurements.

OBSAH:

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| VYMEZENÍ OBSAHU A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE | 11 |
| 1. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY | 12 |
| 1.1. Technické a normové požadavky na železniční spodek | 12 |
| 1.2. Způsob navrhování podle SŽDC S4 | 12 |
| 1.2.1. <i>Návrh konstrukčních vrstev železničního spodku dle modulů přetvárnosti</i> .. | 12 |
| 1.2.2. <i>Požadavky na ochranu zemní pláň před nepříznivými účinky mrazu</i> | 16 |
| 1.3. Porovnání návrhových hodnot ČD s DB AG a SBB | 19 |
| 2. PROVEDENÍ A VYHODNOCENÍ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK | |
| ODEBRANÝCH VZORKŮ | 20 |
| 2.1. Odběr vzorků | 20 |
| 2.2. Zatřídění podle zrnitosti – zkouška zrnitosti ČSN CEN ISO/TS 17892-4 | 20 |
| 2.2.1. <i>Zkouška prosévání</i> | 20 |
| 2.2.2. <i>Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic pomocí pyknometru</i> | 22 |
| 2.2.3. <i>Hustoměrná zkouška</i> | 23 |
| 2.3. Stanovení zhutnitelnosti zemin ČSN 72 1015 | 29 |
| 2.4. Stanovení smykové pevnosti ČSN CEN ISO/TS 17892-10 | 31 |
| 2.5. Stanovení propustnosti za proměnného spádu ČSN CEN ISO/TS 17892-11 ... | 34 |
| 2.6. Shrnutí výsledků laboratorních zkoušek | 35 |
| 2.7. Statická zatěžovací zkouška ČSN 72 1006/B | 36 |
| 2.8. Technické specifikace použitých přístrojů | 38 |
| 3. SCHÉMA ŠIRŠÍCH VZTAHŮ, PŘÍČNÝ ŘEZ, ZÁKLADNÍ GEOMETRIE | 42 |
| 3.1. Popis lokality | 42 |
| 3.2. Schéma širších vztahů | 43 |
| 3.3. Metodiky měření | 44 |
| 3.3.1. <i>Metodika měření tlaků</i> | 44 |
| 3.3.2. <i>Metodika měření teploty</i> | 46 |
| 4. ANALÝZA CHOVÁNÍ TĚLESA ŽELEZNIČNÍHO SPODKU | 49 |
| 4.1. Zpracování vstupních dat | 49 |
| 4.1.1. <i>Teplotní hodnoty</i> | 49 |
| 4.1.2. <i>Tlakové hodnoty</i> | 52 |
| 4.2. Sestavení modelu teplotního chování | 53 |
| 4.2.1. <i>Předpoklady:</i> | 53 |
| 4.2.2. <i>Chování tělesa železničního spodku</i> | 53 |
| 4.2.3. <i>Sestavení modelu</i> | 54 |
| 4.2.4. <i>Upřesnění materiálových konstant</i> | 55 |
| 4.2.5. <i>Stanovení okrajových podmínek</i> | 63 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.2.6. | <i>Výpočet</i> | 65 |
| 4.2.7. | <i>Vypočtené hodnoty</i> | 65 |
| 4.3. | Sestavení modelu mechanického chování | 66 |
| 4.3.1. | <i>Sestavení modelu</i> | 66 |
| 4.3.2. | <i>Výpočet</i> | 66 |
| 4.3.3. | <i>Vypočítané hodnoty napětí</i> | 67 |
| 4.4. | Porovnání numericky získaných dat s experimentálně naměřenými daty | 69 |
| 4.4.1. | <i>Porovnání teplot</i> | 69 |
| 4.4.2. | <i>Porovnání tlaků</i> | 70 |
| 5. | ZHODNOCENÍ, DISKUZE, ZÁVĚR | 71 |
| | Seznam použité literatury | 74 |
| | Seznam tabulek | 76 |
| | Seznam obrázků | 77 |
| | PŘÍLOHA 1. - Upřesnění hodnot měrné tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti | |
| | - Grafy | 80 |

ÚVOD

Tato diplomová práce je zaměřena na zkoumání tělesa železničního spodku. Popisuje návrhovou metodu v ČR a porovnává její návrhové hodnoty s DB AG a SBB. Vytváří numerický model teplotního a mechanického chování tělesa železničního spodku. Tento model je schopen vygenerovat data, které jsou v této práci porovnávány se skutečnými experimentálně naměřenými hodnotami. Pro účel porovnání dat byla využita experimentálně naměřená teplotní data a také data z experimentálního měření zemních tlaků Katedry dopravního stavitelství Univerzity Pardubice v ŽST Stéblová. Pro sestavení tohoto modelu bylo třeba znát základní geotechnické vlastnosti zemin v železničním spodku v místě uložení snímačů. Na základě tohoto požadavku byl proveden odběr vzorků a na těchto odebraných vzorcích byly provedeny laboratorní zkoušky.

VYMEZENÍ OBSAHU A CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

- Odebrání vzorků zemin v místě experimentálního měření
- Zjišťování základních geotechnických vlastností pomocí laboratorních zkoušek
- Vyhodnocení experimentálně naměřených dat a dat poskytnutých Katedrou dopravního stavitelství
- Sestavení numerického modelu teplotního chování tělesa železničního spodku a modelu mechanického chování tělesa železničního spodku
- Porovnání numericky vypočtených hodnot a experimentálně naměřených hodnot
- Zhodnocení, diskuze

1. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

1.1. Technické a normové požadavky na železniční spodek

Navrhováním konstrukčních vrstev železničního spodku se zabývá předpis SŽDC S4. Zejména příloha 4. - Požadavky na únosnost a míru zhutnění tělesa železničního spodku příloha 5. – Zjišťování modulu přetvárnosti; příloha 6. - Navrhování konstrukčních vrstev tělesa železničního spodku podle modulu přetvárnosti, a příloha 7. - Navrhování ochrany zemní pláně před nepříznivými účinky mrazu. Tento předpis je platný od 21.2.2008. Dále se problematikou konstrukčních vrstev zabývají Technické kvalitativní podmínky staveb českých drah, Kapitola 7 – Kolejové lože. Tento předpis se zabývá podmínkami pro zřízení kolejového lože pro tratě normálního rozchodu.

1.2. Způsob navrhování podle SŽDC S4

Konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku se navrhují podle únosnosti zemní pláně a požadované únosnosti na pláni tělesa železničního spodku. Tyto údaje jsou přímo závislé na nejvyšší předepsané rychlosti v daném úseku trati. Metodika návrhu železničního spodku podle modulů přetvárnosti platí pro nápravovou sílu do 22,5t.

Navržené konstrukční vrstvy též musí splňovat požadavky na ochranu zemní pláně před nepříznivými účinky mrazu.

Veškeré údaje o navrhování jsou z předpisu SŽDC S4 /1./

1.2.1. Návrh konstrukčních vrstev železničního spodku dle modulů přetvárnosti

Funkcí konstrukce tělesa železničního spodku je, aby i za nejnepříznivějších klimatických a hydrologických podmínek zajišťovat dostatečně únosný podklad pro železniční svršek. Proto je železniční spodek navrhován jako vícevrstvý systém. Jeho smyslem je dosáhnout na pláni tělesa železničního spodku požadovaný modul přetvárnosti.

Je důležité podotknout, že tato metodika postrádá smysl v případě, kdy je požadovaný modul přetvárnosti pláně železničního spodku nižší, než modul přetvárnosti zemní pláně.

Metodika navrhování konstrukčních vrstev tělesa železničního spodku, jako vícevrstvého systému, je založena na takové volbě materiálů a tloušťky jejich vrstev o různém modulu přetvárnosti, při níž výsledný ekvivalentní modul přetvárnosti celé konstrukce v úrovni pláně tělesa železničního spodku je větší nebo roven požadovanému minimálnímu modulu přetvárnosti E_{pl} podle tab. 1. Dále musí být při návrhu konstrukčních vrstev splněna podmínka, že modul přetvárnosti zemní pláně E_0 dosahuje hodnot uvedených v tab 1.

Rozhodujícími parametry pro návrh tělesa železničního spodku jsou:

- *druh trati, koleje, předepsaná rychlost*
- *hodnota modulu přetvárnosti zemní pláň*
- *volba typu konstrukce pražcového podloží*

tab. 1 Požadované hodnoty modulů přetvárnosti

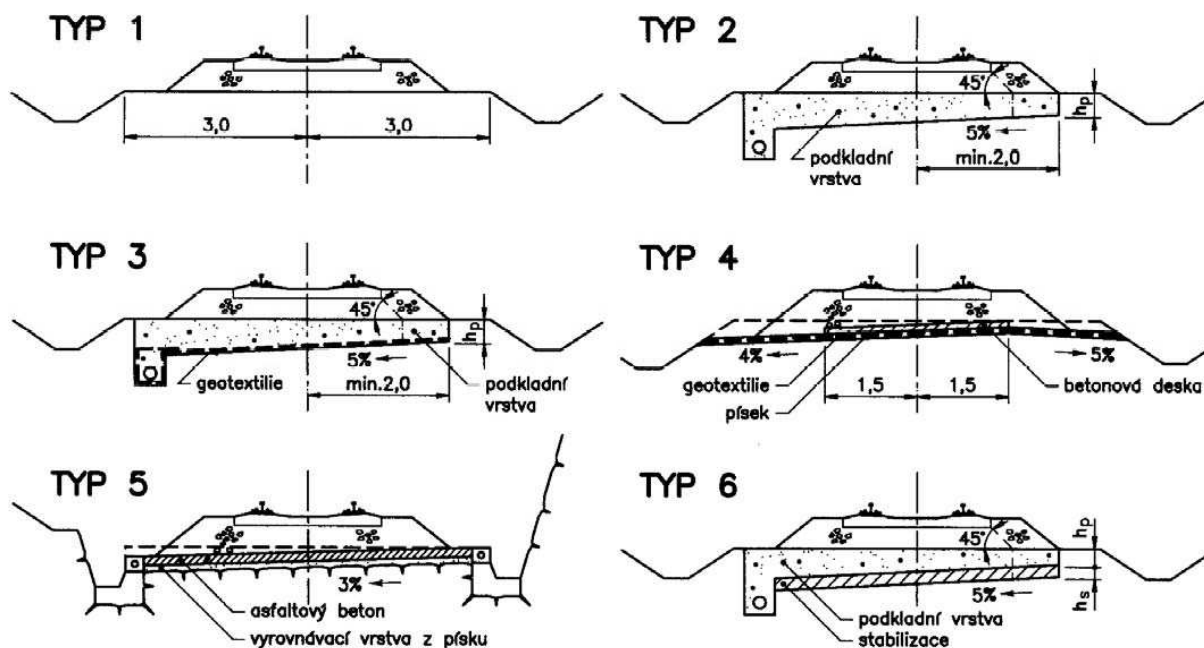
| Druh trati | Minimální požadované hodnoty modulu přetvárnosti | |
|---|--|---|
| | Na zemní pláni E _o [MPa] | Na pláni tělesa železničního spodku E _{pl} [MPa] |
| NOVOSTAVBY | | |
| Pro rychlost větší než 160 km/h | 60 | 100 |
| Pro rychlost nižší než 160 km/h | 40 | 80 |
| STÁVAJÍCÍ TRATĚ | | |
| Hlavní traťové a hlavní staniční koleje | | |
| Celostátních pro rychlost 120 až 160 km/h | 30 | 50 |
| Celostátních koridorových pro rychlost menší než 120 km/h | 20 | 50 |
| Celostátních ostatních pro rychlost menší než 120 km/h | 20 | 40 |
| Regionálních | 15 | 30 |
| Předjízdne koleje ve stanicích na tratích | | |
| Celostátních | 20 | 40 |
| Regionálních | 15 | 30 |
| Ostatní koleje ve stanicích na tratích | | |
| Celostátních | 15 | 30 |
| Regionálních | 15 | 20 |

Hodnota modulu přetvárnosti zemní pláň E_o se zjistí statickou zatěžovací zkouškou v rámci geotechnického průzkumu. Ovšem aby bylo při návrhu dosaženo nejnepříznivějšího klimatického stavu, kdy lze předpokládat snížení hodnoty modulu přetvárnosti zemní pláň, využíváme tzv. Redukovaný modul přetvárnosti zemní pláň E_{or}, který se vypočte ze vztahu:

$$E_{or} = E_o \cdot z$$

kde z je hodnota opravného součinitele. Hodnoty opravného součinitele z jsou stanoveny v tabulce v předpise SŽDC S4, příloha 6. Závisí na druhu zeminy a indexu konzistence. Obecně platí, že čím víc je zemina tužší a pevnější, tím nižší opravný součinitel je – tím více modul přetvárnosti redukuje. Hodnoty se pohybují v rozmezí od 0,3 – 1,0.

Na tratích ŠŽDC se používá šest *typů pražcového podloží*. Jsou vyobrazeny na obrázku č. 1.



obr. 1 Typy pražcového podloží dle SŽDC S4

Typ pražcového podloží se určí podle následující tabulky:

tab. 2 Orientační volba typu pražcového podloží

| Únosnost zemní pláně E_{gr} [MPa] | Druh zeminy zemní pláně | Konstrukce pražcového podloží | Požadovaná únosnost na pláni tělesa železničního spodku E_{pl} [MPa] |
|--|---------------------------------------|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Zemní pláň je totožná s plání tělesa železničního spodku; požadovaná únosnost - viz sloupec 4. | nesoudržná propustná nenamrzavá | typ 1 | 20 ¹⁾ 30 ^{2), 3), 5)} 40 ^{4), 6)} |
| ≥ 15 ^{1), 2), 3), 5)} ≥ 20 ^{4), 6), 7)} ≥ 30 ⁸⁾ ≥ 40 ⁹⁾ ≥ 60 ¹⁰⁾ | soudržná nesoudržná | typ 2 typ 3 (geotextilie, geomembrána) | 50 ^{7), 8)} 80 ⁹⁾ 100 ¹⁰⁾ |
| $\wedge 15$ ^{1), 2), 3), 5)} $\wedge 20$ ^{4), 6), 7)} $\wedge 30$ ⁸⁾ $\wedge 40$ ⁹⁾ $\wedge 60$ ¹⁰⁾ | soudržná | typ 3 ¹¹⁾ (výztužná geosyntetika) | |
| | | typ 6 | |
| | | výměna neúnosné zeminy | |
| | | typ 4 ¹²⁾ | --- |
| -- | snadno zvětrávající hornina | typ 5 | |

pozn.: typ 4. se nepoužívá, protože se v praxi neosvědčil, typ 5. se nedimenzuje.

Posouzení konstrukčních vrstev:

Ekvivalentní moduly přetvárnosti se určí dle obr. 2

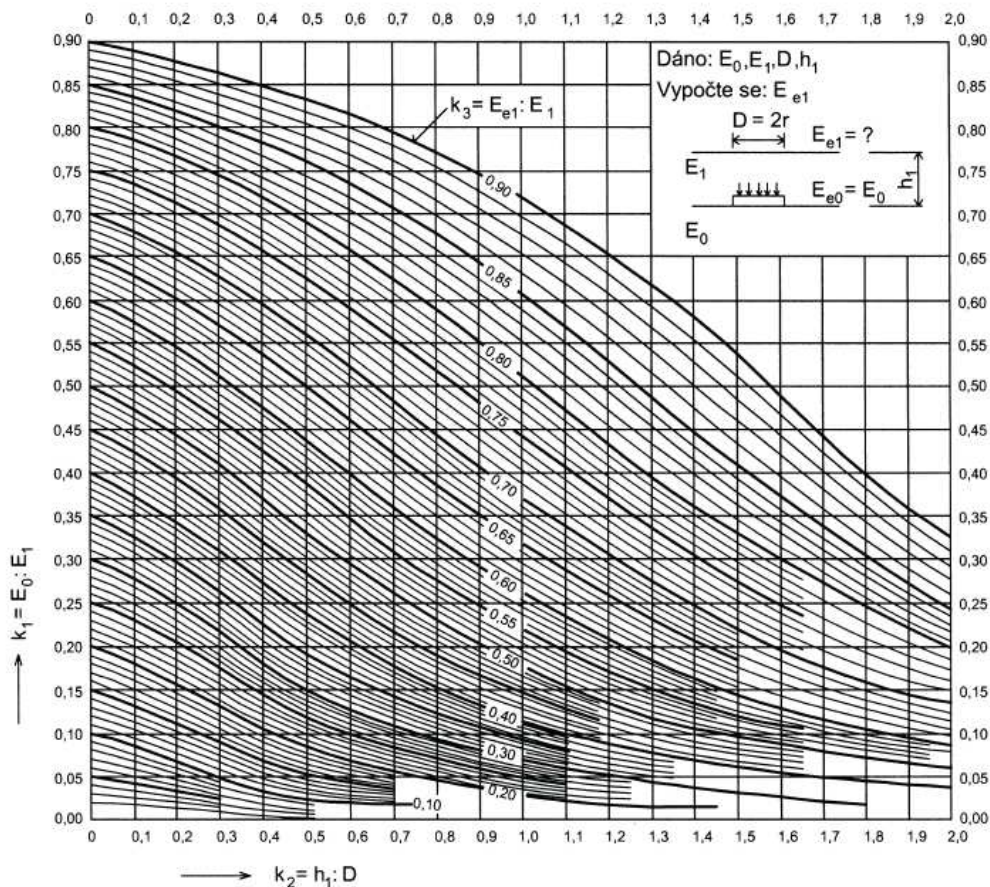


obr. 2 Určení ekvivalentních modulů přetvárnosti

Ekvivalentní modul přetvárnosti i-té vrstvy se určí ze vztahu:

$$E_{e,i} = k_{3,i} \cdot E_i$$

Hodnota $k_{3,i}$ se určí z normogramu (obr.3) pomocí následujících známých hodnot: Redukovaný modul přetvárnosti zemního tělesa E_{or} ; Požadovaný minimální modul přetvárnosti na pláni železničního spodku E_{pl} ; Moduly přetvárnosti materiálů jednotlivých vrstev E_1, E_2 ; Mocnosti jednotlivých vrstev h_1, h_2



obr. 3 Nomogram pro určení ekvivalentního modulu přetvárnosti ze vztahu $E_{e1} : E_1$

1.2.2. Požadavky na ochranu zemní pláně před nepříznivými účinky mrazu

Ochrana zemní pláně před nepříznivými účinky mrazu je zabezpečena tehdy, jestliže tloušťka promrznuté zeminy zemní pláně stanovená v závislosti na namrzavosti zeminy, vodním režimu a druhu tratě, nepřesahuje hodnoty uvedené v tab. 3.

Jedná se o porovnání celkové hloubky promrznutí a povolené hloubky promrznutí:

$$h_{pr} \leq h_k + h_{sp} + h_{z,dov}$$

Kde: h_{pr} ... hloubka promrznutí od nivelety koleje [mm]

h_k ... tloušťka kolejového lože včetně výšky pražce [mm]

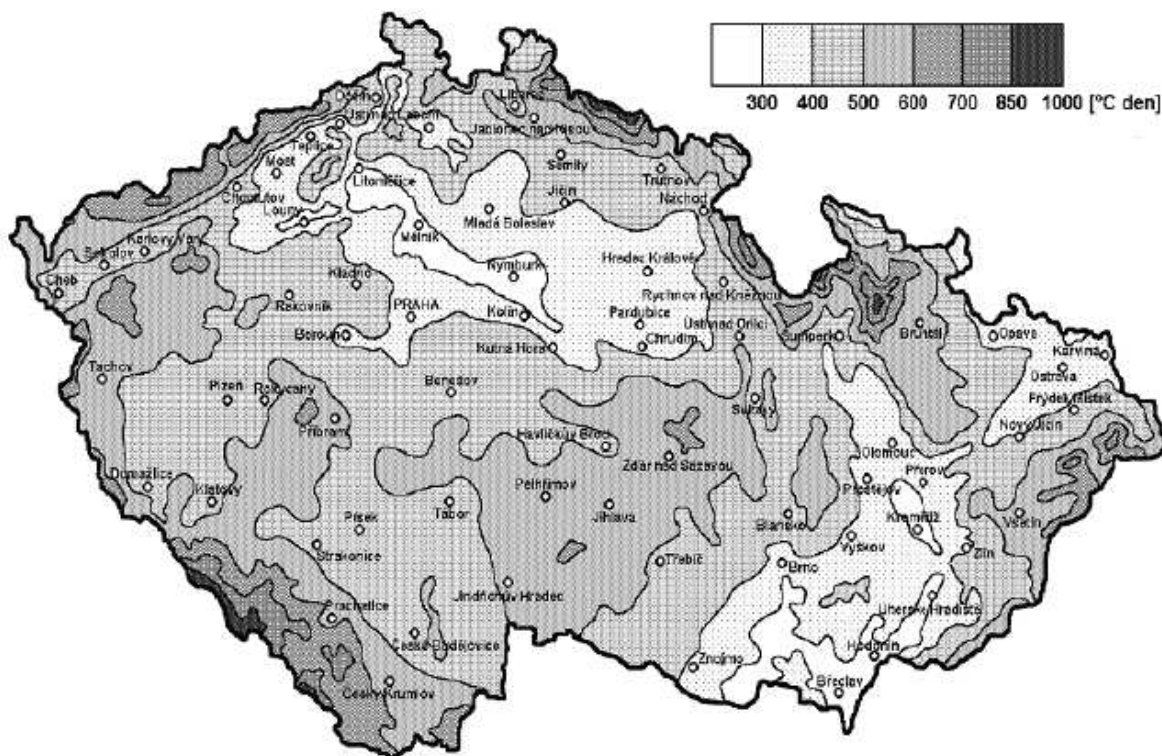
h_{sp} ... tloušťka náhradní podkladní vrstvy ze šterkopísku [mm]

h_{zdov} ... dovolená hloubka promrznutí

Pro posouzení je tedy nutno určit:

Klimatické podmínky v daném místě

Jsou charakterizovány indexem mrazu I_{mn} [°C*den]. Tato hodnota závisí na zeměpisné poloze a nadmořské výšce. Určuje se z mapy charakteristických hodnot indexu mrazu (obr. 4)



obr. 4 Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu I_{mn} [°C.den]

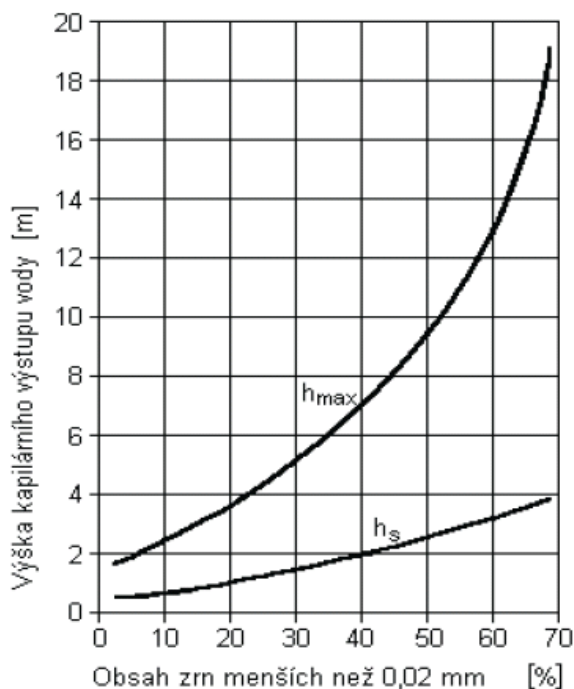
Namrzavost zeminy zemního tělesa

Rozlišují se zeminy nenamrzavé, mírně namrzavé, namrzavé, nebezpečně a vysoce namrzavé. Určení namrzavosti zemin lze provést jednoduše z křivky zrnitosti.

Vodní režim zemního tělesa

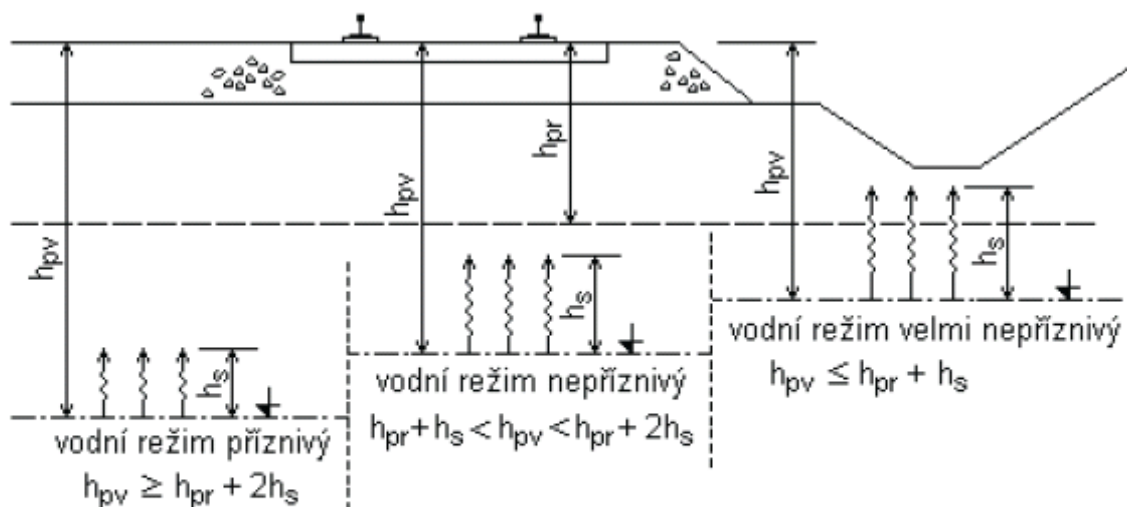
Existuje vodní režim příznivý, nepříznivý a velmi nepříznivý. Je dán polohou hladiny podzemní vody h_{vp} [m], která se určuje sondami na konci vlhkých období v roce. Dále výškou kapilárního výstupu vody v saturované zemině h_s [m], která se určí z grafu (graf 1) v závislosti na obsahu zrn menších než 0,02 mm. Pak závisí na hloubce promrzání pražcového podloží h_{pr} [m]. Ta se určí ze vztahu: $h_{pr} = 0,045 \cdot \sqrt{I_{mn}}$

graf 1 - Výška kapilárního výstupu vody v sat. zemině



h_{max} - maximální výška kapilárního výstupu vody
 h_s - výška kapilárního výstupu vody při 100 % saturaci zeminy

Druh vodního režimu se potom určí ze vztahů v následujícím obrázku (obr. 4)



Vysvětlivky k obr. 2:

h_{pv} - vzdálenost úrovně hladiny podzemní vody od nivelety koleje

h_{pr} - hloubka promrzání

h_s - Výška kapilárního výstupu vody

----- hladina podzemní vody

obr. 5 Příklad stanovení vodního režimu zemní pláně

Hodnoty dovolené hloubky promrznutí zeminy zemního tělesa $h_{z,dov}$

tab. 3 Hodnoty přípustného promrznutí zemin zemní pláně

| Vodní režim | Dovolené tloušťky promrznutí zemin zemní pláně $h_{z,dov}$ [m] | | | | | |
|------------------|--|------|------|--|------|------|
| | Zeminy vysocenamrzavé, zemin nebezpečně namrzavé | | | Zeminy namrzavé, zemin mírně namrzavé | | |
| | Druh trati | | | | | |
| | A | B | C | A | B | C |
| Příznivý | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,50 | 0,60 | 0,70 |
| Nepříznivý | 0,15 | 0,30 | 0,40 | 0,40 | 0,50 | 0,60 |
| Velmi nepříznivý | 0,00 | 0,15 | 0,30 | 0,30 | 0,40 | 0,50 |

1.3. Porovnání návrhových hodnot ČD s DB AG a SBB

Porovnání hodnot modulů přetvárnosti má pouze orientační charakter, protože modul přetvárnosti u DB a SBB se určuje odlišným způsobem než je tomu u nás. Zjišťuje se sice také statickou zatěžovací zkouškou deskou o průměru 300mm z druhé zatěžovací větve, ale základní odlišnosti jsou v aplikaci měrných tlaků, které se liší, a v metodice vyhodnocení zkoušky.

Porovnávány jsou hodnoty modulů přetvárnosti pro rekonstrukce stávajících tratí /13./:

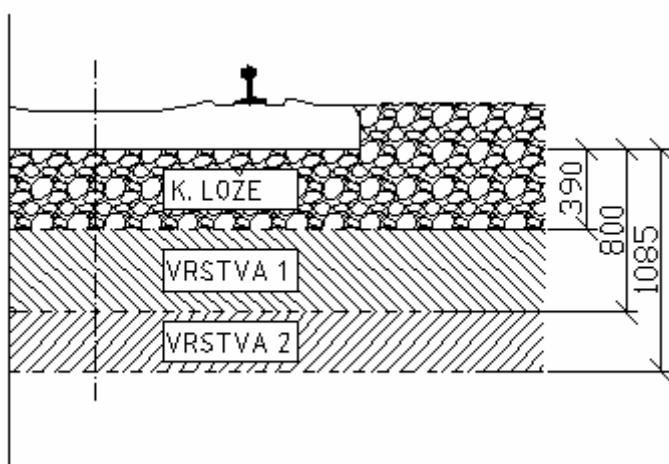
tab. 4 Porovnání modulu přetvárnosti

| Druh trati | Modul přetvárnosti [MPa] | |
|---|--------------------------|---------------------------|
| | Zemní pláni | Pláni železničního spodku |
| ČD | | |
| Celostátní pro rychlost 120 – 160 km/h | 30 | 50 |
| Celostátní koridorové pro rychlost < 120 km/h | 20 | 50 |
| DB AG | | |
| Pro rychlost $v > 160$ km/h | 45 | 80 |
| Pro rychlost $v < 160$ km/h | 20 | 45 |
| SBB | | |
| 1. skupina (hlavní koleje) | 15 | 70 |
| 2. skupina (vedlejší koleje) | 15 | 50 |

2. PROVEDENÍ A VYHODNOCENÍ LABORATORNÍCH ZKOUŠEK ODEBRANÝCH VZORKŮ

2.1. Odběr vzorků

Aby bylo možné porovnat numericky získané výsledky se skutečně naměřenými hodnotami, byly v místě měření, tj. v ŽST Stéblová na trati Pardubice – Jaroměř, byli dne 14.11.2012 odebrány 2 vzorky zemin železničního spodku. VZOREK 1 byl odebrán z VRSTVY 1 (viz obr. 6) a VZOREK 2 z VRSTVY 2. Vzorky byly odebrány v ose koleje v prostoru mezi pražci.



obr. 6 Schéma vrstev pražcového podloží

2.2. Zatřídění podle zrnitosti – zkouška zrnitosti ČSN CEN ISO/TS 17892-4

2.2.1. Zkouška prosévání

Frakce propadlá daným sítím byla vypočítána ze vztahu:

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

kde f_n ... procento zeminy propadlé sítím

m_1 ... hmotnost zeminy propadlé sítím s nejmenším otvorem

m_2, m_n ... hmotnost zeminy propadlé sítí po sobě jdoucími až do zvolené velikosti síta

m ... celková hmotnost vysušeného vzorku

VÝSLEDKY:

tab. 5 Výsledky zkoušky prosévání pro VZOREK 1:

| PRŮMĚR ZRNA [mm] | MNOŽSTVÍ VE VZORKU [%] | % |
|------------------|------------------------|-------|
| 6,3 | 8,98 | 91,02 |
| 5,6 | 0,03 | 90,99 |
| 4,5 | 1,69 | 89,31 |
| 3,55 | 1,95 | 87,36 |
| 2,5 | 2,75 | 84,60 |
| 2 | 1,61 | 82,99 |
| 1,6 | 1,77 | 81,22 |
| 0,5 | 10,14 | 71,08 |
| 0,25 | 30,29 | 40,79 |
| 0,063 | 26,65 | 14,14 |

tab. 6 Výsledky zkoušky prosévání pro VZOREK 2:

| PRŮMĚR ZRNA [mm] | MNOŽSTVÍ VE VZORKU [%] | % |
|------------------|------------------------|-------|
| 6,3 | 1,32 | 98,68 |
| 5,6 | 0,04 | 98,64 |
| 4,5 | 0,56 | 98,07 |
| 3,55 | 0,72 | 97,35 |
| 2,5 | 0,79 | 96,56 |
| 2 | 0,71 | 95,85 |
| 1,6 | 0,81 | 95,04 |
| 0,5 | 8,63 | 86,41 |
| 0,25 | 48,13 | 38,29 |
| 0,063 | 19,21 | 19,08 |

2.2.2. Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic pomocí pyknometru

Zdánlivá hustota pevných částic byla vypočítána ze vztahu:

$$\rho_s = \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \cdot \rho_w$$

kde: m_0 ... hmotnost prázdného pyknometru

m_1 ... hmotnost pyknometru s kapalinou

m_2 ... hmotnost pyknometru se suchým vzorkem

m_3 ... hmotnost pyknometru se saturovaným vzorkem doplněným kapalinou

m_4 ... hmotnost suchého vzorku

ρ_w ... hustota vody při dané teplotě (t)

VÝSLEDKY:

tab. 7 Výsledky zkoušky určení hustoty pro VZOREK 1:

| | |
|----------|----------------------------------|
| m_0 | 33,75 g |
| m_1 | 135,62 g |
| m_2 | 51,76 g |
| m_3 | 146,59 g |
| m_4 | 18,01 g |
| | |
| t | 22,5 °C |
| | |
| ρ_w | 0,998135 g/cm ³ |
| | |
| ρ_s | 2553,468 kg/m³ |

tab. 8 Výsledky zkoušky určení hustoty pro VZOREK 2:

| | |
|----------|----------------------------------|
| m_0 | 32,7 g |
| m_1 | 135,35 g |
| m_2 | 50,4 g |
| m_3 | 146,1 g |
| m_4 | 17,7 g |
| | |
| t | 22,5 °C |
| | |
| ρ_w | 0,998135 g/cm ³ |
| | |
| ρ_s | 2542,013 g/cm³ |

2.2.3. Hustoměrná zkouška

Pro zjištění obsahu jednotlivých frakcí jemných částic je nutné nejprve určit náhradní průměr zrna ze vztahu:

$$d_i = 0,005531 \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot H_r}{(\rho_s - 1) \cdot t}}$$

kde: η ... dynamická viskozita vody (tab. 5)

H_r ... efektivní hloubka hustoměru (pro používaný hustoměr: $H_r = 225,4 - 4,7 \cdot H_{op}$)

ρ_s ... zdánlivá hustota pevných částic

t ... čas

tab. 9 Dynamická viskozita vody

| T_v [°C] | [mPa*s] |
|------------|---------|
| 10 | 1,304 |
| 15 | 1,137 |
| 20 | 1,002 |
| 25 | 0,891 |
| 30 | 0,798 |
| 19 | 1,029 |
| 19,5 | 1,016 |

Dále byl určen hmotnostní podíl frakce menší než náhradní průměr zrna ze vztahu:

$$K = \frac{100 \cdot \rho_s}{m \cdot (\rho_s - 1)} \cdot R_d$$

kde: ρ_s ... zdánlivá hustota pevných částic

R_d ... Opravené čtení hustoměru

m ... hmotnost sušiny

VÝSLEDKY:

tab. 10 Výsledky hustoměrné zkoušky pro VZOREK 1 vztažené na hmotnost zkoumaného vzorku

| | | | |
|-------|-------|-------------------------------|-----------|
| m [g] | 40,42 | ρ_s [g/cm ³] | 2,5534675 |
|-------|-------|-------------------------------|-----------|

| T [°C] | t[s] | odečet | Hop | di [mm] | Hr [mm] | K [%] |
|--------|------|--------|------|---------|---------|-------|
| 19 | 15 | 17,6 | 17,4 | 0,0139 | 143,62 | 70,76 |
| 19 | 30 | 16,4 | 16,2 | 0,0100 | 149,26 | 65,88 |
| 19 | 60 | 15,8 | 15,6 | 0,0072 | 152,08 | 63,44 |
| 19 | 120 | 14 | 13,8 | 0,0052 | 160,54 | 56,12 |
| 19 | 300 | 11,6 | 11,4 | 0,0034 | 171,82 | 46,36 |
| 19,5 | 600 | 9,4 | 9,3 | 0,0025 | 181,69 | 37,82 |
| 19,5 | 900 | 3,2 | 3,1 | 0,0022 | 210,83 | 12,61 |

tab. 11 Výsledky hustoměrné zkoušky pro VZOREK 2 vztažené na hmotnost zkoumaného vzorku

| | | | |
|-------|-------|-------------------------------|-----------|
| m [g] | 46,13 | ρ_s [g/cm ³] | 2,5420129 |
|-------|-------|-------------------------------|-----------|

| T [°C] | t[s] | odečet | Hop | di [mm] | Hr [mm] | K [%] |
|--------|------|--------|------|---------|---------|-------|
| 19 | 15 | 17 | 16,8 | 0,0141 | 146,44 | 60,04 |
| 19 | 30 | 16,2 | 16 | 0,0101 | 150,2 | 57,18 |
| 19 | 60 | 15,2 | 15 | 0,0073 | 154,9 | 53,60 |
| 19 | 120 | 14,8 | 14,6 | 0,0052 | 156,78 | 52,17 |
| 19 | 300 | 12,8 | 12,6 | 0,0034 | 166,18 | 45,03 |
| 19,5 | 600 | 6,2 | 6,1 | 0,0026 | 196,73 | 21,80 |
| 19,5 | 900 | 3,4 | 3,3 | 0,0022 | 209,89 | 11,79 |

tab. 12 Výsledky hustoměrné zkoušky pro VZOREK 1 vztažené na celkovou hmotnost vzorku

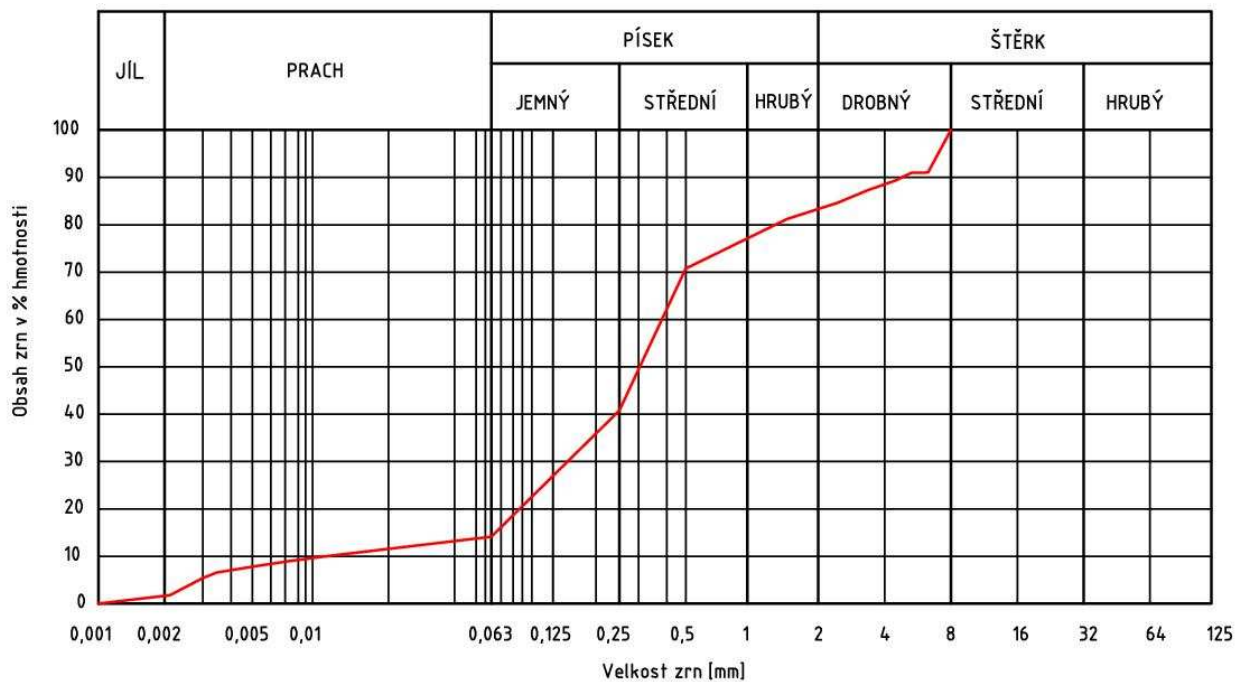
| PRŮMĚR ZRNA [mm] | MNOŽSTVÍ VE VZORKU [%] | % |
|------------------|------------------------|-------|
| 0,0139 | 70,76 | 10,00 |
| 0,0100 | 65,88 | 9,31 |
| 0,0072 | 63,44 | 8,97 |
| 0,0052 | 56,12 | 7,93 |
| 0,0034 | 46,36 | 6,55 |
| 0,0025 | 37,82 | 5,35 |
| 0,0022 | 12,61 | 1,78 |

tab. 13 Výsledky hustoměrné zkoušky pro VZOREK 2 vztažené na celkovou hmotnost vzorku

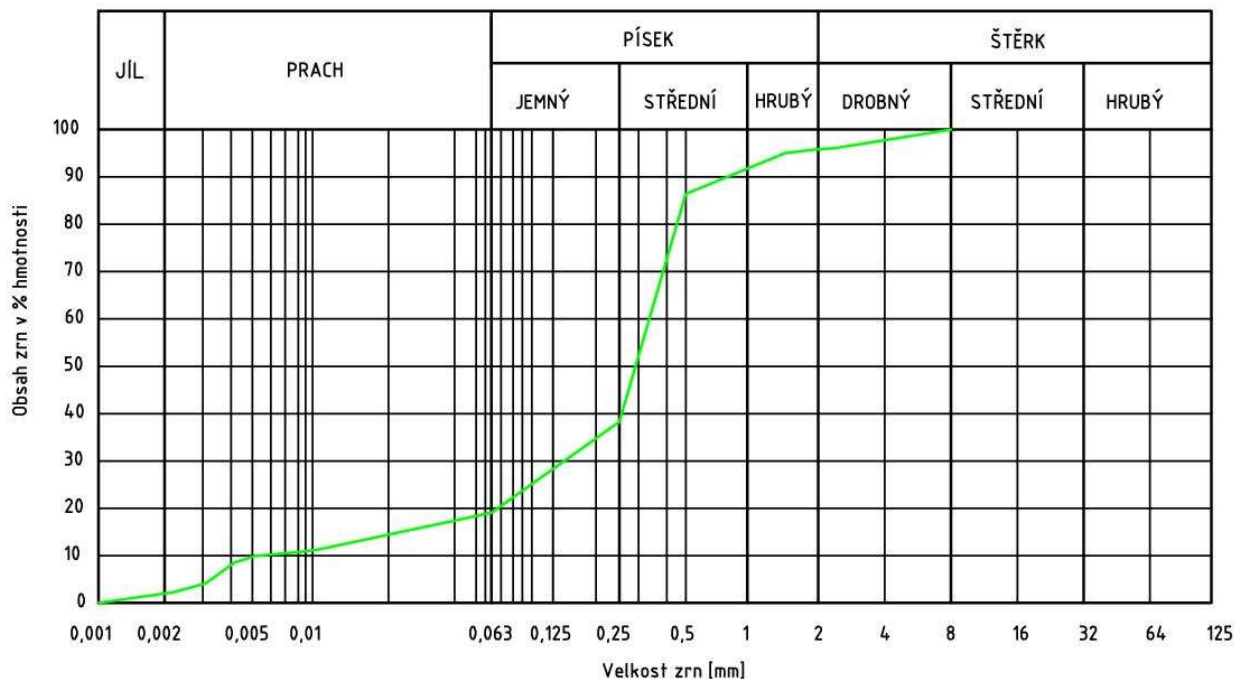
| PRŮMĚR ZRNA [mm] | MNOŽSTVÍ VE VZORKU [%] | % |
|------------------|------------------------|-------|
| 0,0141 | 60,04 | 11,45 |
| 0,0101 | 57,18 | 10,91 |
| 0,0073 | 53,60 | 10,23 |
| 0,0052 | 52,17 | 9,95 |
| 0,0034 | 45,03 | 8,59 |
| 0,0026 | 21,80 | 4,16 |
| 0,0022 | 11,79 | 2,25 |

graf 2 - Křivky zrnitosti

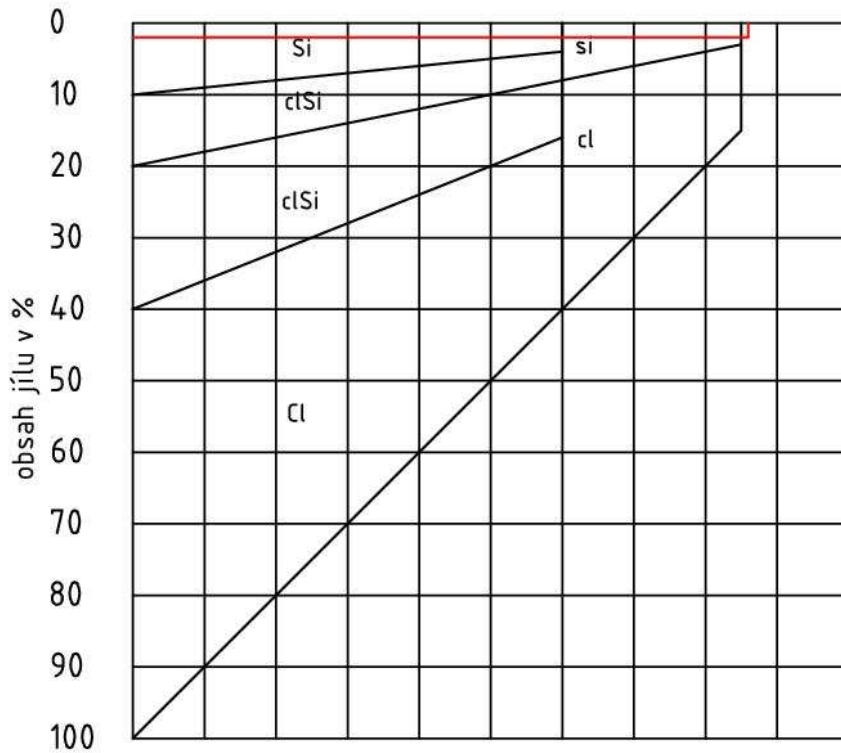
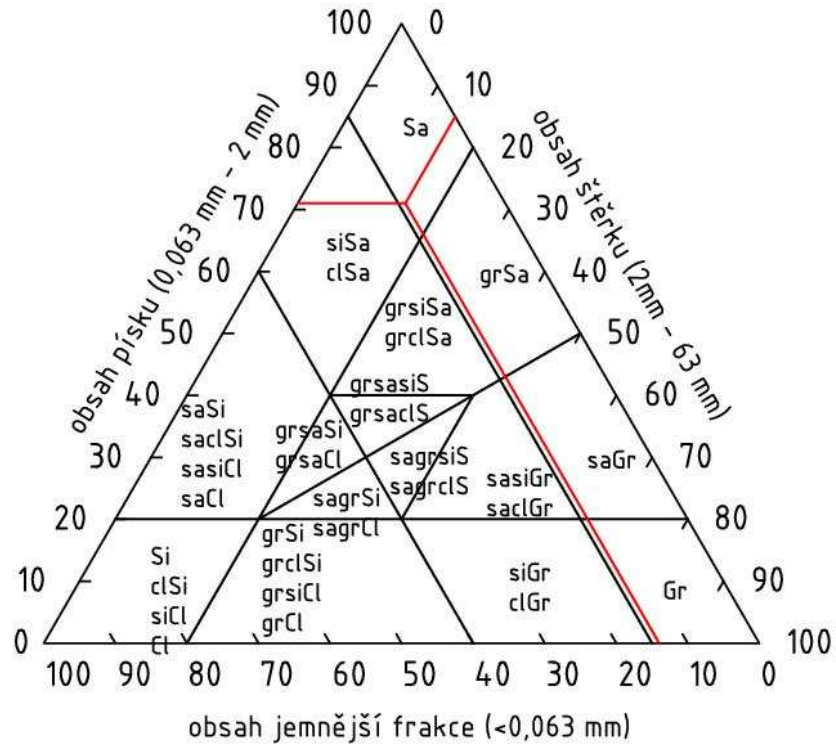
KŘIVKA ZRNITOSTI KAMENIVA - VZOREK 1



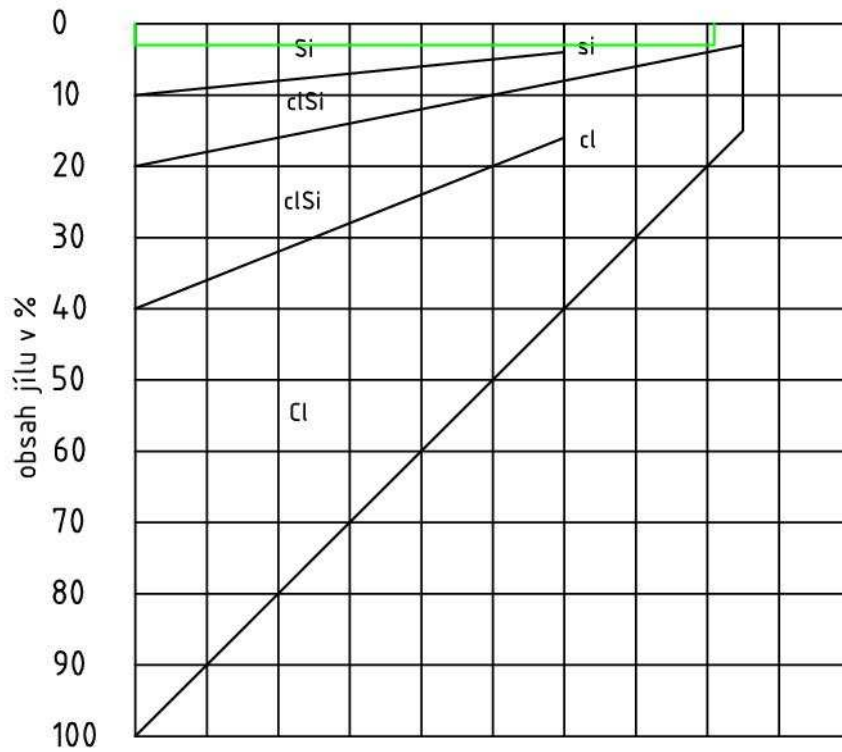
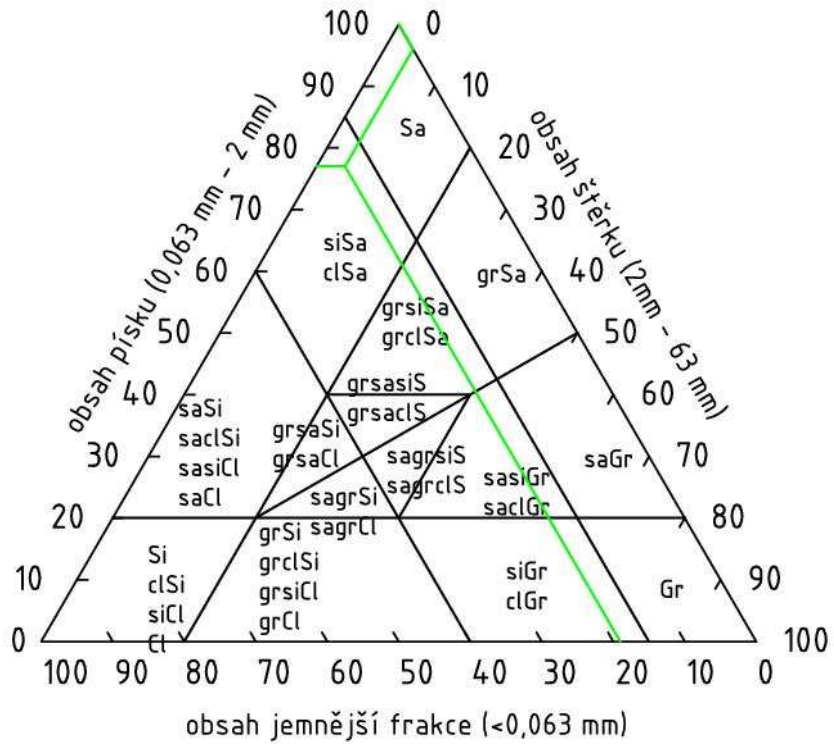
KŘIVKA ZRNITOSTI KAMENIVA - VZOREK 2



graf 3 - Zatřídění dle zrnitosti pro VZOREK 1



graf 4 - Zatřídění dle zrnitosti pro VZOREK 2



2.3. Stanovení zhutnitelnosti zemin ČSN 72 1015

Tato zkouška se řídí předpisem ČSN 72 1015 Laboratorní stanovení zhutnitelnosti zemin. Pro každý vzorek byla zkouška provedena 5krát, tudíž bylo zjištěno pro každý vzorek 5 bodů Proctorova grafu. Každý ze vzorků byl hutněn stejným nástrojem a stejným počtem úderů.

Rozměry hmoždíře:

$\varnothing = 15,25$ cm ... průměr hmoždíře

H = 11,65 cm ... výška hmoždíře

V = 2127,921 cm³ ... objem hmoždíře

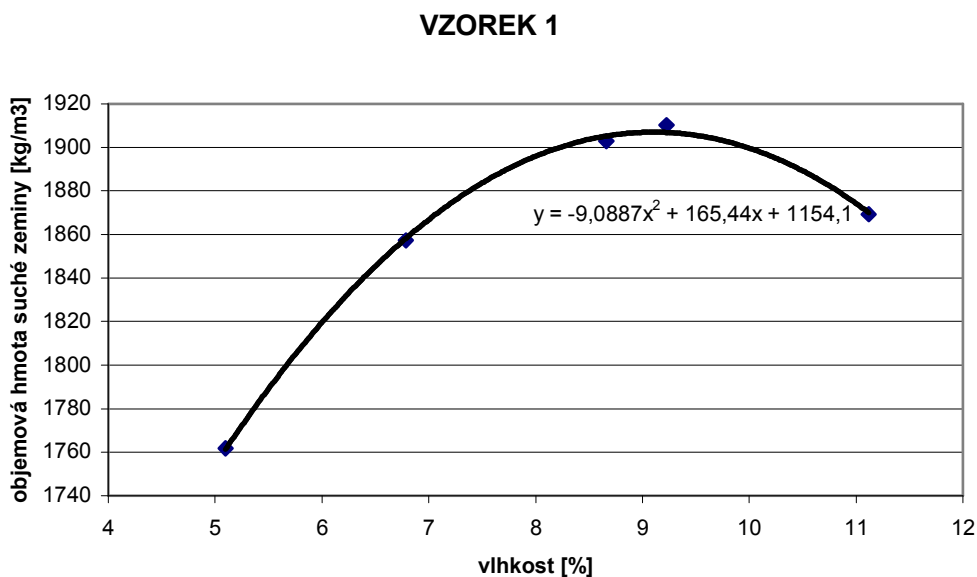
m = 2660 g ... hmotnost hmoždíře

VÝSLEDKY:

tab. 14 Výsledky zkoušky zhutnitelnosti pro VZOREK 1

| VZOREK Č.: | I 1 | I 2 | I 3 | I 4 | I 5 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Hmotnost hmoždíře se zeminou | 6600 | 6880 | 7040 | 7080 | 7100 |
| Hmotnost vlhké zeminy | 3940 | 4220 | 4400 | 4420 | 4440 |
| Objemová hmotnost vlhké zeminy | 1852 | 1983 | 2068 | 2077 | 2087 |
| Miska + vzorek | 449,13 | 476,26 | 475,07 | 442,06 | 479,97 |
| Miska + suchý vzorek | 433,01 | 453,39 | 446,56 | 410,08 | 449,9 |
| Hmotnost misky | 116,74 | 116,21 | 117,31 | 122,42 | 124,03 |
| Hmotnost suchého vzorku | 316,27 | 337,18 | 329,25 | 287,66 | 325,87 |
| Hmotnost vody | 16,12 | 22,87 | 28,51 | 31,98 | 30,07 |
| Vlhkost zeminy | 5,09691 | 6,78273 | 8,65907 | 11,1173 | 9,22761 |
| Objemová hmotnost suché zeminy | 1761,78 | 1857,19 | 1902,97 | 1869,33 | 1910,27 |

graf 5 - Výsledky zkoušky zhutnitelnosti pro VZOREK 1



Rovnice křivky, proložené získanými Proctorovými body grafu je:

$$y = -9,0887x^2 + 165,44x + 1154,1$$

Z této rovnice pomocí první derivace získáme hodnotu vlhkosti x pro maximální hodnotu objemové hmotnosti:

$$0 = -18,177x + 165,44$$

$$x = \frac{165,44}{18,177} = 9,102\%$$

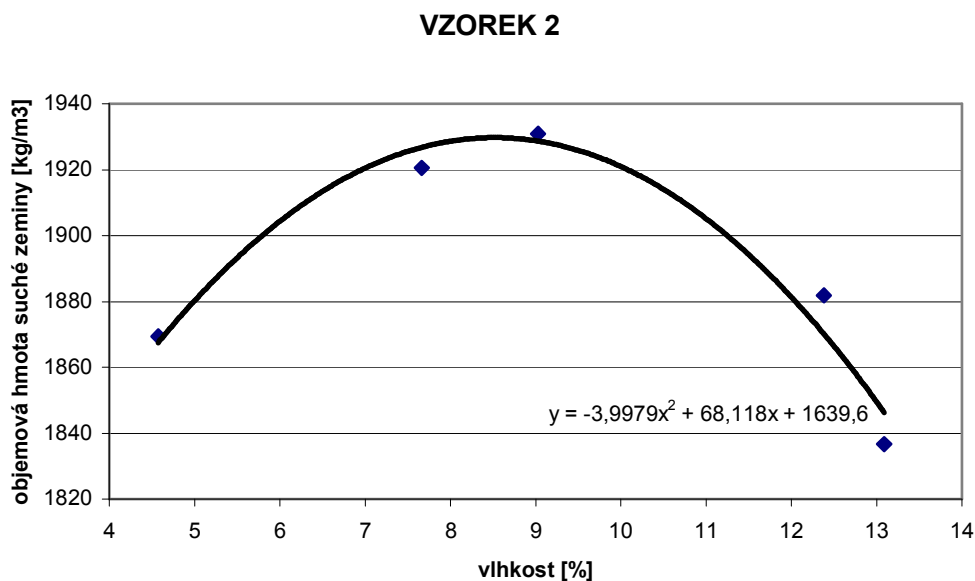
Po dosazení do základní rovnice regrese získáme hodnotu maximální objemové hmotnosti pro danou vlhkost:

$$y = -9,0887 \cdot 9,102^2 + 165,44 \cdot 9,102 + 1154,1 = 1906,969 \text{ kg/m}^3$$

tab. 15 Výsledky zkoušky zhutnitelnosti pro VZOREK 2

| VZOREK Č.: | II1 | II2 | II3 | II4 | II5 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Hmotnost hmoždíře se zeminou | 6820 | 7060 | 7140 | 7160 | 7080 |
| Hmotnost vlhké zeminy | 4160 | 4400 | 4480 | 4500 | 4420 |
| Objemová hmotnost vlhké zeminy | 1955 | 2068 | 2105 | 2115 | 2077 |
| Miska + vzorek | 501,85 | 435,85 | 463,03 | 447,8 | 400,57 |
| Miska + suchý vzorek | 484,95 | 413,34 | 434,87 | 411,28 | 367,02 |
| Hmotnost misky | 115,44 | 119,67 | 123,02 | 116,23 | 110,69 |
| Hmotnost suchého vzorku | 369,51 | 293,67 | 311,85 | 295,05 | 256,33 |
| Hmotnost vody | 16,9 | 22,51 | 28,16 | 36,52 | 33,55 |
| Vlhkost zeminy | 4,57362 | 7,66507 | 9,02998 | 12,3776 | 13,0886 |
| Objemová hmotnost suché zeminy | 1869,46 | 1920,54 | 1930,97 | 1881,82 | 1836,74 |

graf 6 - Výsledky zkoušky zhutnitelnosti pro VZOREK 2



Stejným postupem jako v předchozím případě vypočítáme hodnotu maximální objemové hmotnosti pro danou vlhkost:

$$y = -3,9979x^2 + 68,118x + 1639,6$$

$$0 = -7,996x + 68,118$$

$$x = \frac{68,118}{7,996} = 8,519\%$$

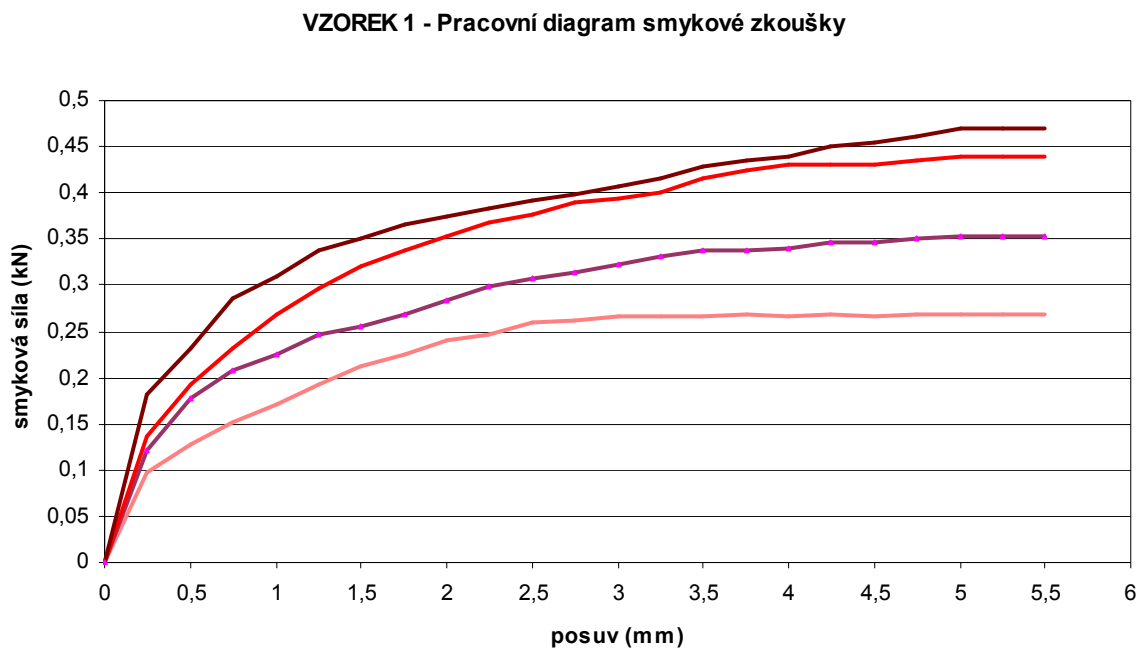
$$y = -3,9979 \cdot 8,519^2 + 68,118 \cdot 8,519 + 1639,6 = 1929,756 \text{ kg/m}^3$$

2.4. Stanovení smykové pevnosti ČSN CEN ISO/TS 17892-10

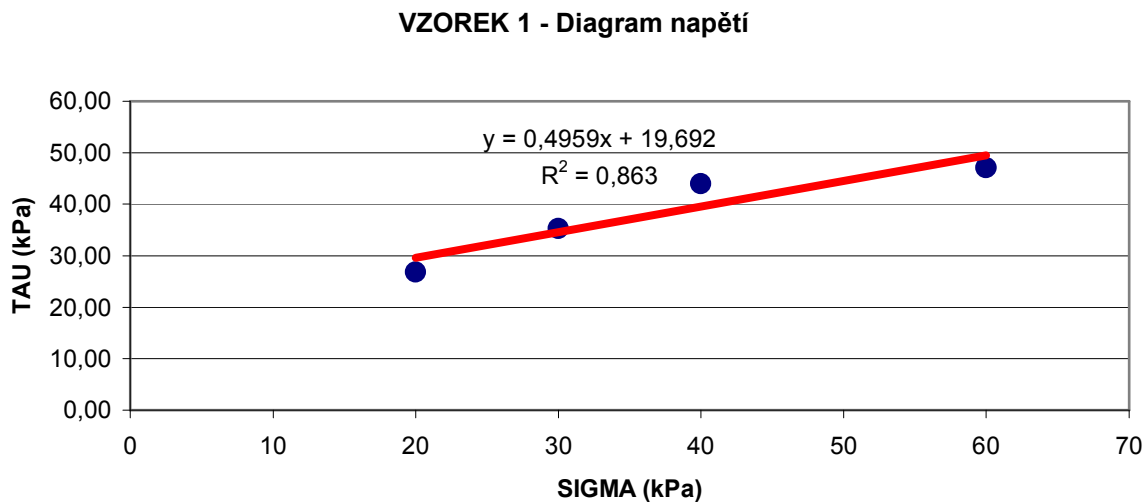
tab. 16 Naměřené hodnoty při smykové zkoušce VZOREK 1

| VOD. SÍLA [kg] | 20 | 30 | 40 | 50 |
|-------------------|----------|-------|-------|-------|
| POSUV [mm] | tau [kN] | | | |
| 0,25 | 0,097 | 0,121 | 0,136 | 0,181 |
| 0,5 | 0,127 | 0,178 | 0,193 | 0,232 |
| 0,75 | 0,151 | 0,208 | 0,232 | 0,286 |
| 1 | 0,172 | 0,226 | 0,268 | 0,311 |
| 1,25 | 0,193 | 0,247 | 0,295 | 0,338 |
| 1,5 | 0,211 | 0,256 | 0,320 | 0,350 |
| 1,75 | 0,226 | 0,268 | 0,338 | 0,365 |
| 2 | 0,241 | 0,283 | 0,353 | 0,374 |
| 2,25 | 0,247 | 0,299 | 0,368 | 0,383 |
| 2,5 | 0,259 | 0,308 | 0,377 | 0,392 |
| 2,75 | 0,262 | 0,314 | 0,389 | 0,398 |
| 3 | 0,265 | 0,323 | 0,395 | 0,407 |
| 3,25 | 0,265 | 0,332 | 0,401 | 0,416 |
| 3,5 | 0,265 | 0,338 | 0,416 | 0,428 |
| 3,75 | 0,268 | 0,338 | 0,425 | 0,434 |
| 4 | 0,265 | 0,341 | 0,431 | 0,440 |
| 4,25 | 0,268 | 0,347 | 0,431 | 0,449 |
| 4,5 | 0,265 | 0,347 | 0,431 | 0,455 |
| 4,75 | 0,268 | 0,350 | 0,434 | 0,461 |
| 5 | 0,268 | 0,353 | 0,440 | 0,470 |
| 5,25 | 0,268 | 0,353 | 0,440 | 0,470 |
| 5,5 | 0,268 | 0,353 | 0,440 | 0,470 |

graf 7 - Pracovní diagram smykové zkoušky pro VZOREK 1



graf 8 - Znázornění smykových napětí v závislosti na vodorovných napětí VZOREK 1

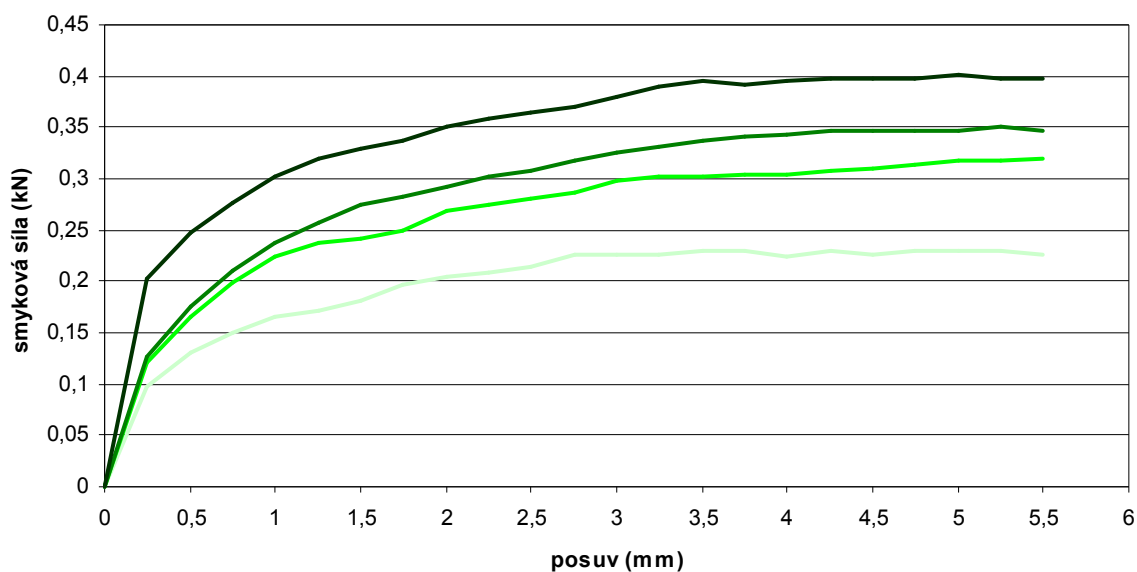


tab. 17 Naměřené hodnoty při smykové zkoušce VZOREK 2

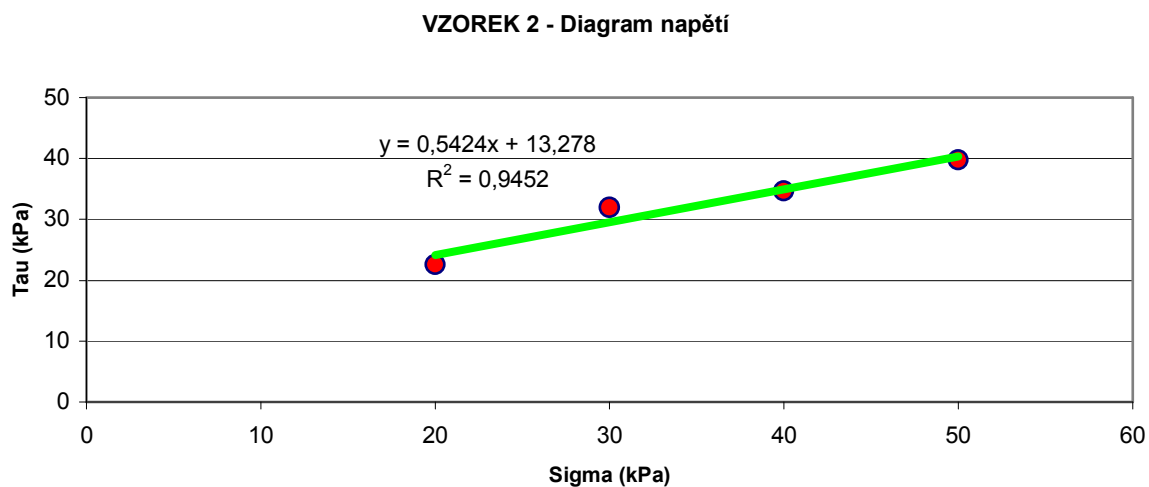
| VOD. SÍLA [kg] | 20 | 30 | 40 | 50 |
|----------------|----------|-------|-------|-------|
| POSUV [mm] | tau [kN] | | | |
| 0,25 | 0,097 | 0,121 | 0,127 | 0,202 |
| 0,5 | 0,130 | 0,166 | 0,175 | 0,247 |
| 0,75 | 0,149 | 0,199 | 0,211 | 0,277 |
| 1 | 0,018 | 0,223 | 0,238 | 0,302 |
| 1,25 | 0,241 | 0,238 | 0,256 | 0,320 |
| 1,5 | 0,181 | 0,241 | 0,274 | 0,329 |
| 1,75 | 0,196 | 0,250 | 0,283 | 0,338 |
| 2 | 0,205 | 0,268 | 0,292 | 0,350 |
| 2,25 | 0,208 | 0,274 | 0,302 | 0,359 |
| 2,5 | 0,214 | 0,280 | 0,308 | 0,365 |
| 2,75 | 0,226 | 0,286 | 0,317 | 0,371 |
| 3 | 0,226 | 0,299 | 0,326 | 0,380 |
| 3,25 | 0,226 | 0,302 | 0,332 | 0,389 |
| 3,5 | 0,229 | 0,302 | 0,338 | 0,395 |
| 3,75 | 0,229 | 0,305 | 0,341 | 0,392 |
| 4 | 0,223 | 0,305 | 0,344 | 0,395 |
| 4,25 | 0,229 | 0,308 | 0,347 | 0,398 |
| 4,5 | 0,226 | 0,311 | 0,347 | 0,398 |
| 4,75 | 0,229 | 0,314 | 0,347 | 0,398 |
| 5 | 0,229 | 0,317 | 0,347 | 0,401 |
| 5,25 | 0,229 | 0,317 | 0,350 | 0,398 |
| 5,5 | 0,226 | 0,320 | 0,347 | 0,398 |

graf 9 - Pracovní diagram smykové zkoušky pro VZOREK 2

VZOREK 2 - Pracovní diagram smykové zkoušky



graf 10 - Znáznornění smykových napětí v závislosti na vodorovných napětí VZOREK 2



2.5. Stanovení propustnosti za proměnného spádu ČSN CEN ISO/TS 17892-11

Koeficient propustnosti se vypočte ze vztahu:

$$k = \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

kde: a ... je průřezová plocha piezometrické trubice

l ... výška zkušební vzorku během zkoušky

A ... průřezová plocha vzorku

t ... časový interval mezi měřeními

VÝSLEDKY:

tab. 18 Společné hodnoty

| | |
|--|----------|
| Výška vzorku l [m] | 0,116 |
| Průřezová plocha A [m ²] | 0,008171 |
| Výška hladiny od výpustku h ₁ [m] | 1,400 |
| Plocha trubice a [m ²] | 0,000201 |
| Objem válce se zeminou [dm ³] | 0,942 |
| Množství proteklé vody [dm ³] | 0,066 |

tab. 19 Naměřené hodnoty a hodnoty koef. K při zkoušce propustnosti pro VZOREK 1

| i | t [s] | H [mm] | K_i [m/s] |
|---------|-------|--------|-------------|
| 1 | 10 | 120 | 2,59E-05 |
| 2 | 20 | 230 | 2,60E-05 |
| 3 | 30 | 330 | 2,59E-05 |
| 4 | 40 | 420 | 2,58E-05 |
| 5 | 50 | 510 | 2,62E-05 |
| K [m/s] | | | 2,60E-05 |

tab. 20 Naměřené hodnoty a hodnoty koef. K při zkoušce propustnosti pro VZOREK 2

| i | t [s] | H [mm] | K_i [m/s] |
|---------|-------|--------|-------------|
| 1 | 10 | 80 | 1,70E-05 |
| 2 | 20 | 170 | 1,87E-05 |
| 3 | 30 | 245 | 1,86E-05 |
| 4 | 40 | 320 | 1,88E-05 |
| 5 | 50 | 390 | 1,89E-05 |
| K [m/s] | | | 1,84E-05 |

2.6. Shrnutí výsledků laboratorních zkoušek

tab. 21 Shrnutí výsledků

| Zkouška | VZOREK 1 | VZOREK 2 |
|--|---------------------|---------------------|
| Druh zeminy | siSa – prach. Písek | siSa – prach. Písek |
| Optimální vlhkost [%] | 9,102 | 8,519 |
| Maximální objemová hmotnost [kg/m ³] | 1906,969 | 1929,765 |
| Soudržnost | 19,692 | 13,278 |
| Úhel vnitřního tření | 26,38 | 28,48 |
| Filtrační součinitel | 2,60E-05 | 1,84E-05 |

2.7. Statická zatěžovací zkouška ČSN 72 1006/B

Zkouška byla provedena dne 14.11.2011. Nejprve byla odstraněna vrstva kolejového šterku do úrovně 390mm pod úložnou plochou pražce. Na této vrstvě byla provedena zkouška č.1. Dále byla odstraněna první písčité vrstva až do úrovně 800mm pod úložnou plochou pražce, kde byla uskutečněna zkouška č.2. Nakonec byla odstraněna druhá písčité vrstva do úrovně 1085mm pod úložnou plochou pražce. Na této úrovni byla provedena zkouška č.3.

Při odtěžování jednotlivých vrstev bylo dbáno na to, aby se zkoušená vrstva nepoškodila a tím nebyl ovlivněn výsledek zkoušky.

Zkouška byla provedena zařízením ECM-Static, v.č.114 firmou SUDOP Pardubice s.r.o. Jako protizávaží byl použit MPV 22.2.



obr. 7 Měřicí rám



obr. 8 Umístění zatěžovací desky při zkoušce č. 2



obr. 9 Kompletace měřícího zařízení



obr. 10 Umístění proti zátěže



obr. 11 MPV 22.2

VÝSLEDKY:

tab. 22 Výsledky statické zatěžovací zkoušky

| Č. | Rozhraní | Popis vrstvy | Eo [Mpa] |
|----|------------------------|------------------------------------|----------|
| 1 | ŠTĚRK. LOŽE – VRSTVA 1 | 390 mm pod úložnou plochou pražce | 56,0 |
| 2 | VRSTVA 1 – VRSTVA 2 | 800 mm pod úložnou plochou pražce | 47,7 |
| 3 | VRSTVA 2 – ZEMNÍ PLÁŇ | 1085 mm pod úložnou plochou pražce | 41,6 |

2.8. Technické specifikace použitých přístrojů

Váha KERN 20de60

Rozsah měření: 0,02kg – 60kg

Přesnost: 0,02kg



obr. 12 Váha KERN 20de60

Váha KERN EW600-2M

Rozsah měření: 0,5g – 600g

Přesnost: 0,01g



obr. 13 Váha KERN EW600-2M

Analytický síťovací přístroj RETSCH

Pohyb při síťování: odhazovací pohyb s točivým momentem

Amplituda: analogové, 0 - 3 mm

Zobrazení času: analogové, 1 - 60 min



obr. 14 Analytický síťovací přístroj RETSCH

Smykový krabicový přístroj ELE 262112

Rozměry zařízení 325x1075x845 mm

Max. rozměr vzorku 100x100 mm

Max. zatížení vzorku 1000 kg

Max. smyková síla 5,0 kN

Hmotnost zařízení 70 kg

Rychlost smýkání 0,00001 - 9,99999 mm/min



obr. 15 Smykový krabicový přístroj ELE 262112

Pěch a hmoždíř pro Proctorovu zkoušku zhutnění zemin

Hmotnost pěchu: 4,5 kg
Průměr hmoždíře: 152,5 mm
Výška hmoždíře: 116,5 mm
Hmotnost hmoždíře: 2660 g



obr. 16 Pěch a hmoždíř

Laboratorní sušárna BTM VENTICEL 111

Rozměry: 530x540x390 mm
Objem komory: 111 ltr
Teplotní rozsah: 10 °C - 250 °C
Hmotnost: 87 kg



obr. 17 Laboratorní sušárna BTM VENTICEL 111

Propustoměr MATEST S248

| | |
|-----------------|--------------------------|
| Rozměry: | 1050x900x2000mm |
| Druh zkoušky: | konstantní/proměnný spád |
| Průměr válce: | 101,6 mm |
| Výška válce: | 116,5 mm |
| Průměr trubice: | 16,0 mm |
| Hmotnost: | 75,0 kg |



obr. 18 Propustoměr MATEST s248

3. SCHÉMA ŠIRŠÍCH VZTAHŮ, PŘÍČNÝ ŘEZ, ZÁKLADNÍ GEOMETRIE

3.1. Popis lokality

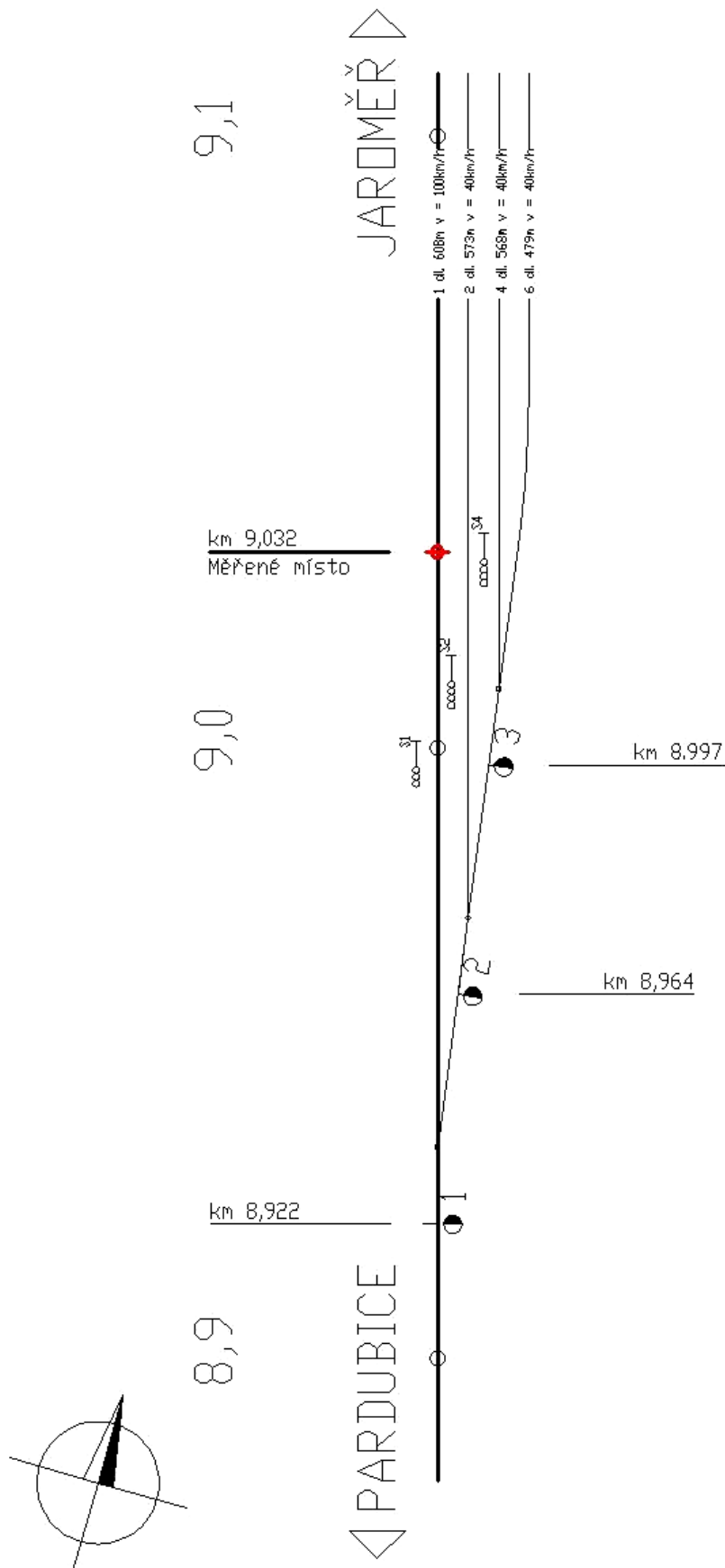
Měřicí zařízení jsou situována na hlavní staniční koleji č.1 v ŽST Stéblová na celostátní trati Pardubice hl. n. – Jaroměř v místě se staničením 9,032 km. Trať v daném místě má nulový sklon, směrově je trať v přímé. Maximální traťová rychlost je 100km/h. Dovolená třída traťového zatížení je D4.

Železniční svršek je tvořen bezстыkovou kolejí, kolejnicemi R65 a betonovými pražci SB 8P. Trať je elektrifikovaná – trakční vedení 3kV DC.

tab. 23 Popis lokality - souhrn

| | |
|--------------------------|---|
| Trať | Pardubice hl. n. – Jaroměř |
| Max. traťová rychlost | 100 km/h |
| Třída traťového zatížení | D4 |
| Svršek | Bezстыková kolej, pražec SB 8P, kolejnice R65 |
| Elektrifikace | 3kV DC |
| Druh koleje | Hlavní staniční kolej |
| Sklonové poměry | 0° |
| Směrové poměry | přímá |

3.2. Schéma širších vztahů



3.3. Metodiky měření

3.3.1. Metodika měření tlaků

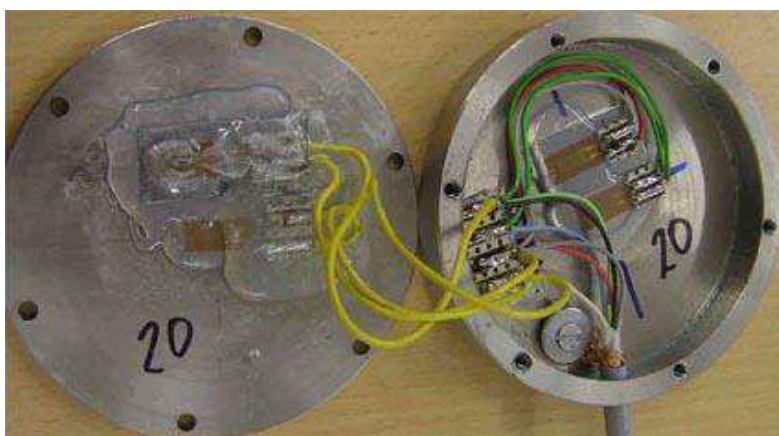
Metoda je založena na sledování reakcí odporových tensometrických snímačů na napětí v materiálu tělesa železničního spodku, které je vyvoláno přitížením od statických a dynamických účinků průjezdu konkrétního železničního vozidla.

Měřicí řetězec

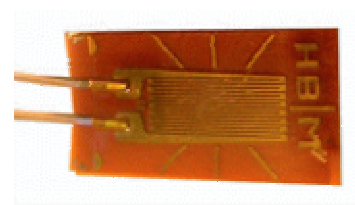
Zapojení měřicího řetězce: tensometrický snímač tlakové síly – měřící ústředna (A/D převodník) – osobní počítač pro záznam a zpracování měřených dat. Při měření tenzometry dochází jen k malým změnám odporů (od 10^{-4} do 10^{-2}), proto se nepoužívá přímé metody měření odporu, ale metody srovnávací. Proto je zapojení tensometrů provedeno jako plný Wheatstonův můstek, to znamená, že v každém snímači jsou dva měřící a dva kompenzační tensometry.

Snímače tlaku

Tlakové tenzometrické snímače se skládají ze dvou částí. Spodní i horní části snímače byly vyrobeny z nerezové kruhové oceli Ø 80 mm. Obě části jsou šroubově spojené. Do spoje je též vloženo gumové těsnění. Tím je vnitřní prostor hermeticky uzavřen. Použité tensometry jsou typu 6/120LY11 od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (Resistance: 120 Ω, k-faktor: 2,05 %, Citlivost: -0,1 %).



obr. 19 – Snímač tlaku – zapojení



obr. 20 Tensometr 6/120LY11 HBM

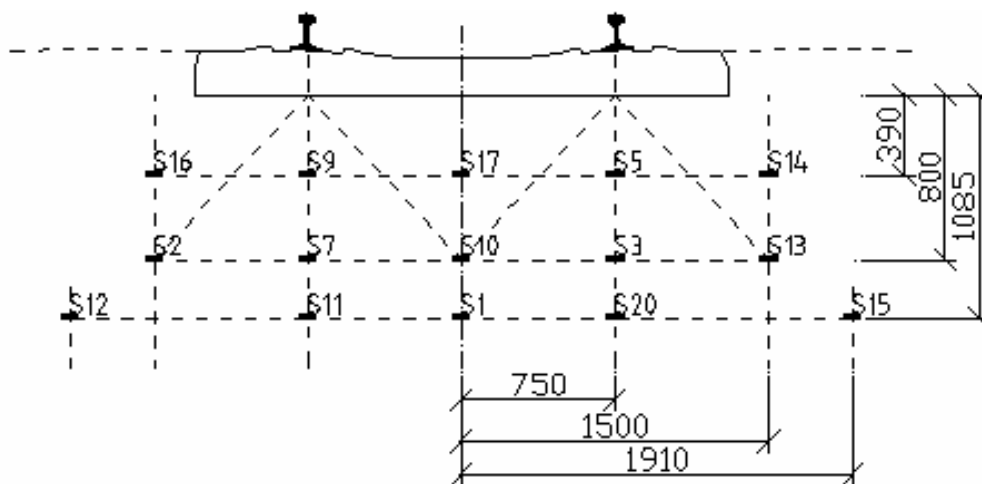
Před konečnou instalací snímačů do konstrukčních vrstev tělesa železničního spodku bylo nutné provést kalibraci jednotlivých snímačů a ověřit jejich funkčnost. Cejchování snímačů bylo provedeno v laboratoři Katedry dopravního stavitelství.

Umístění snímačů tlaku

Do tělesa železničního spodku bylo umístěno celkem 15 snímačů zatížení ve třech vrstvách. Toto umístění bylo zvoleno na základě teorie šíření zemních tlaků v zeminách a také podle uspořádání konstrukčních vrstev. Jednotlivé odporové snímače jsou umístěny dle obr. 22. Každý snímač byl osazen do lože a z vrchu zasypán křemičitým pískem PR30/31 tak, aby bylo navozené stejné prostředí, jako při kalibraci snímačů v laboratoři.



obr. 21 Osazování snímačů tlaku



obr. 22 Umístění snímačů tlaku

Měřicí stanice

Použitá měřicí stanice je typu DCM Plus od firmy HBM.



obr. 23 DCM plus HBM

3.3.2. *Metodika měření teploty*

Metoda je založena na sledování změn teplot v materiálu tělesa železničního spodku v jednotlivých jeho úrovních.

Měřicí řetězec

Při měření je používána měřicí ústředna Dlog2 a na ní napojené jednotlivé teplotní odporové snímače.

Snímače teploty

Teplotní měření tělesa železničního spodku je provedeno pomocí odporových snímačů teploty. Princip měření spočívá ve změně elektrického odporu platinového čidla v závislosti na teplotě. Toto teplotní čidlo CT002A bylo osazeno do ochranného pouzdra z nerezové oceli.



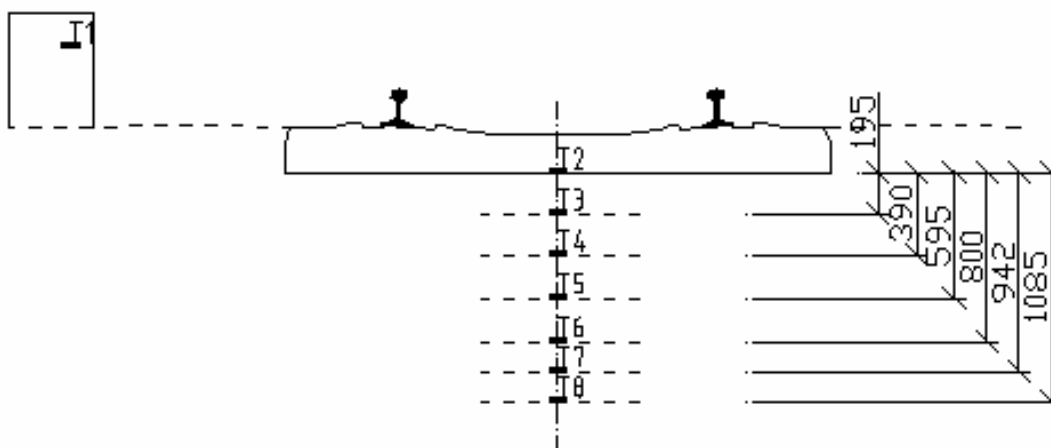
obr. 24 Snímač teploty

Umístění snímačů teploty

Snímače teploty jsou umístěny vždy na rozhraní konstrukčních vrstev a uprostřed mocnosti jednotlivých vrstev. Jsou uloženy do zásypu z křemičitého písku PR30/31. Zemina v okolí snímačů byla zhutněna ručním pěchem. Snímač T1 je zabudován ve stanovišti měřící ústředny a je určen pro měření okolní teploty. Snímačů teploty bylo umístěno celkem 8 v jednom sloupci dle obr. 26.



obr. 25 Ukládání snímačů



obr. 26 Umístění snímačů teploty

Měřicí stanice

Jedná se o 24 bitový A/D převodník s malou spotřebou proudu. Deska má dvanáct analogových vstupů. Tato ústředna je schopna v pravidelných intervalech zaznamenávat a převádět aktuální hodnoty odporu jednotlivých snímačů, resp. teploty v jednotlivých vrstvách. Zařízení je napájeno litiovým článkem 3,6 V s kapacitou 2 Ah. Toto napětí je rovněž jedním analogovým vstupem měřeno. Naměřená data je pak možno přenést pomocí USB portu pro další zpracování.



obr. 27 Měřicí stanice Dlog2

4. ANALÝZA CHOVÁNÍ TĚLESA ŽELEZNIČNÍHO SPODKU

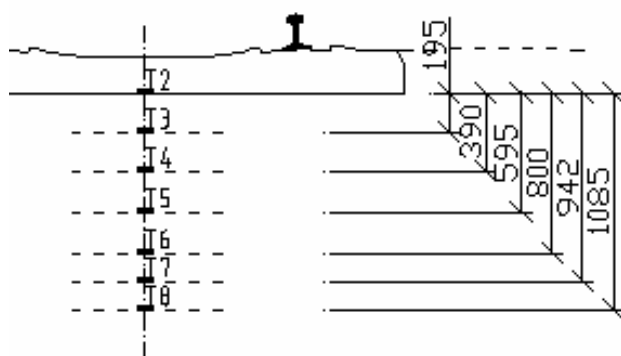
4.1. Zpracování vstupních dat

Vstupní data pocházejí z experimentálního měření, které provedla Katedra dopravního stavitelství university Pardubice v ŽST Stěblová. Jedná se o hodnoty teploty v jednotlivých vrstvách a hodnoty tlaků při průjezdu v jednotlivých tenzometrických snímačích.

4.1.1. Teplotní hodnoty

Teploty byly snímány z jednotlivých tenzometrických snímačů T1-T8 v hodinových intervalech 24 hodin denně po dobu 1 roku. Výstupem tohoto měření je několik textových souborů se záznamem hodnot času, dne a teplot zaznamenaných jednotlivými snímači. Z celého úseku dat bylo vyjmuto zimní období s celkově nejnižšími teplotami pro další zpracování. Tento úsek dat byl převeden do programu Microsoft Excel za účelem jednoduššího zpracování. Z převedeného souboru se dále vytvářely datové soubory, které se vkládaly jako vstupní hodnoty teplot do programu SolidWorks.

Pro zpřehlednění je zde znovu uveden obr. 28 s uložením snímačů teplot s popisem zpracovávaných teplot. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v následujících grafech. Každá z měřených hodnot v konstrukci je zobrazena spolu s okolní teplotou v měřeném období.



T1 ... okolní teplota

T2 ... teplota šterkového lože v úložné ploše pražce

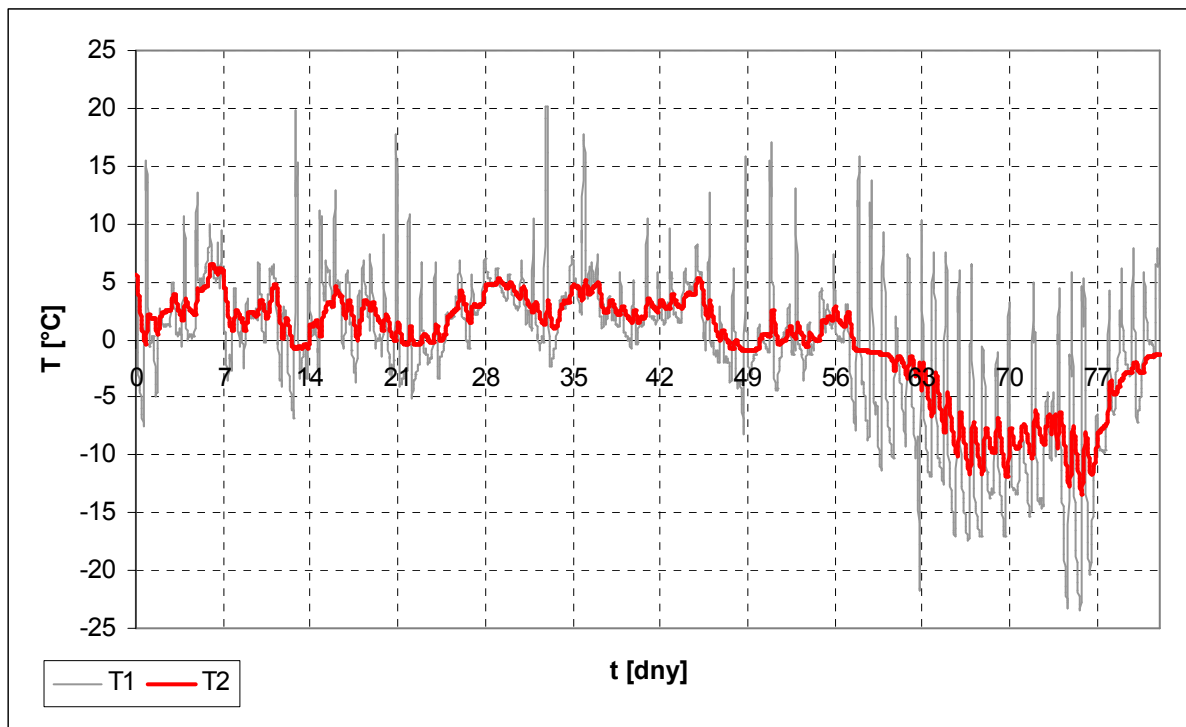
T4 ... rozhraní šterkové lože – vrstva 1

T6 ... rozhraní vrstva 1 – vrstva 2

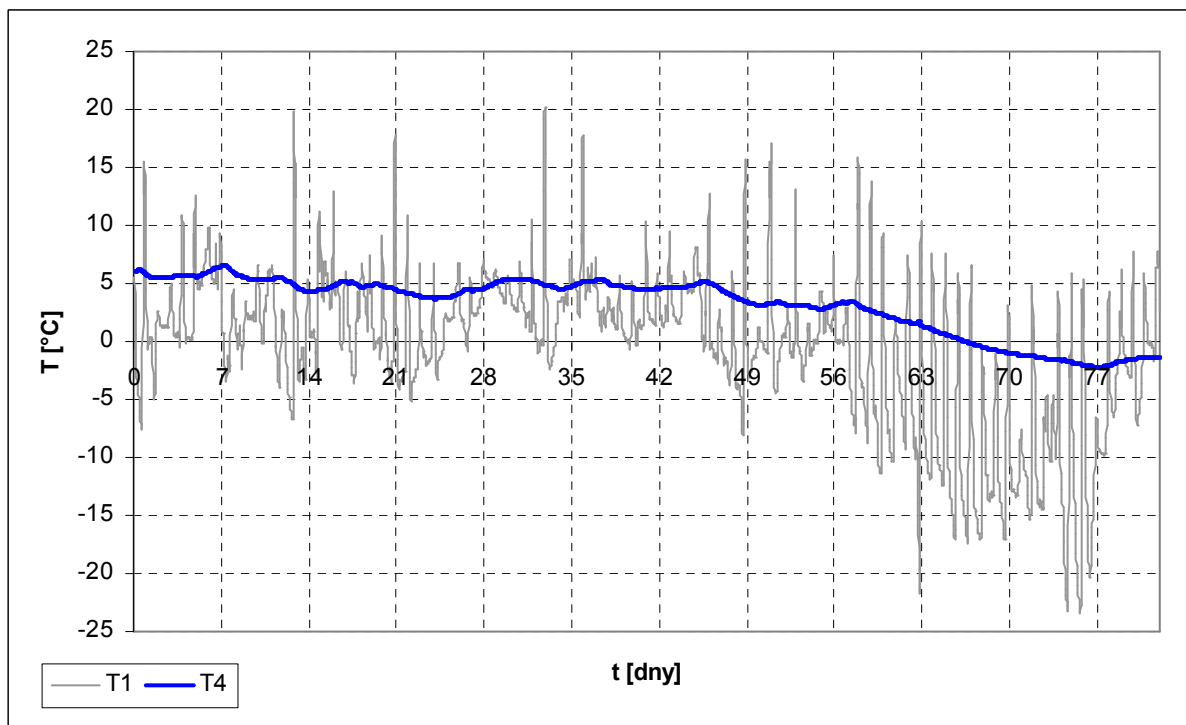
T8 ... rozhraní vrstva 2 – zemní pláň

obr. 28 Znárodnění zkoumaných míst

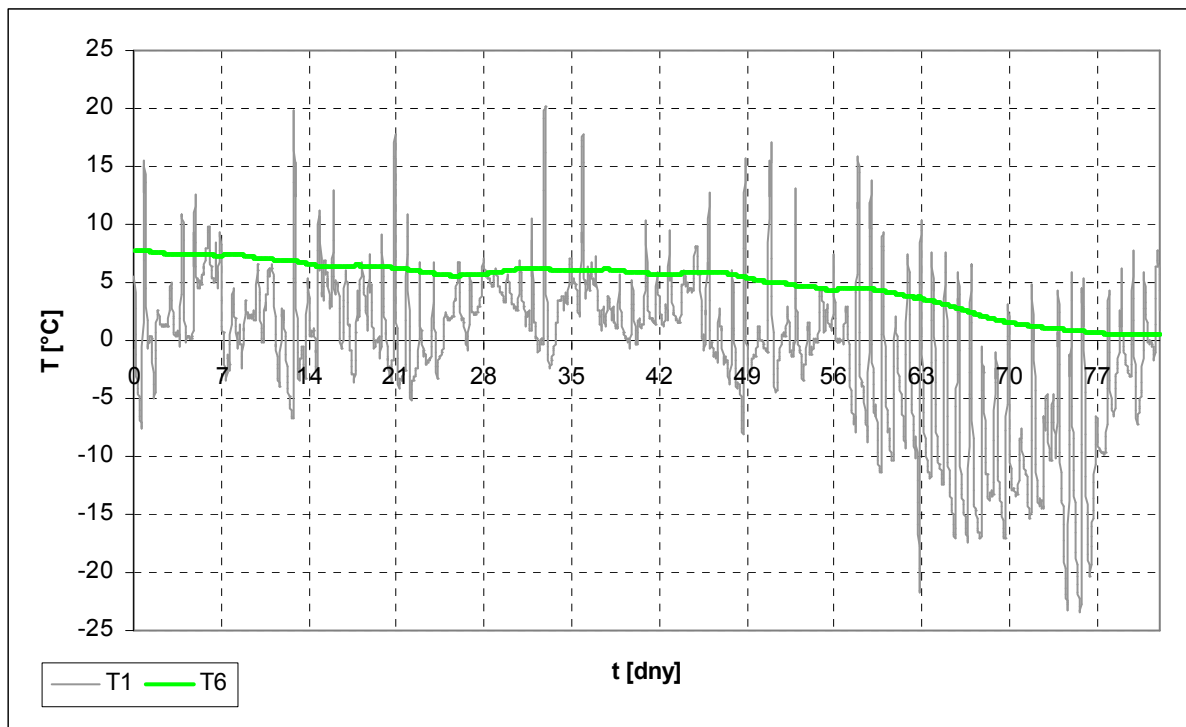
graf 11 - Průběh teplot T1 a T2 (210mm pod povrchem) v období od 28.11.2011 do 5.2.2012



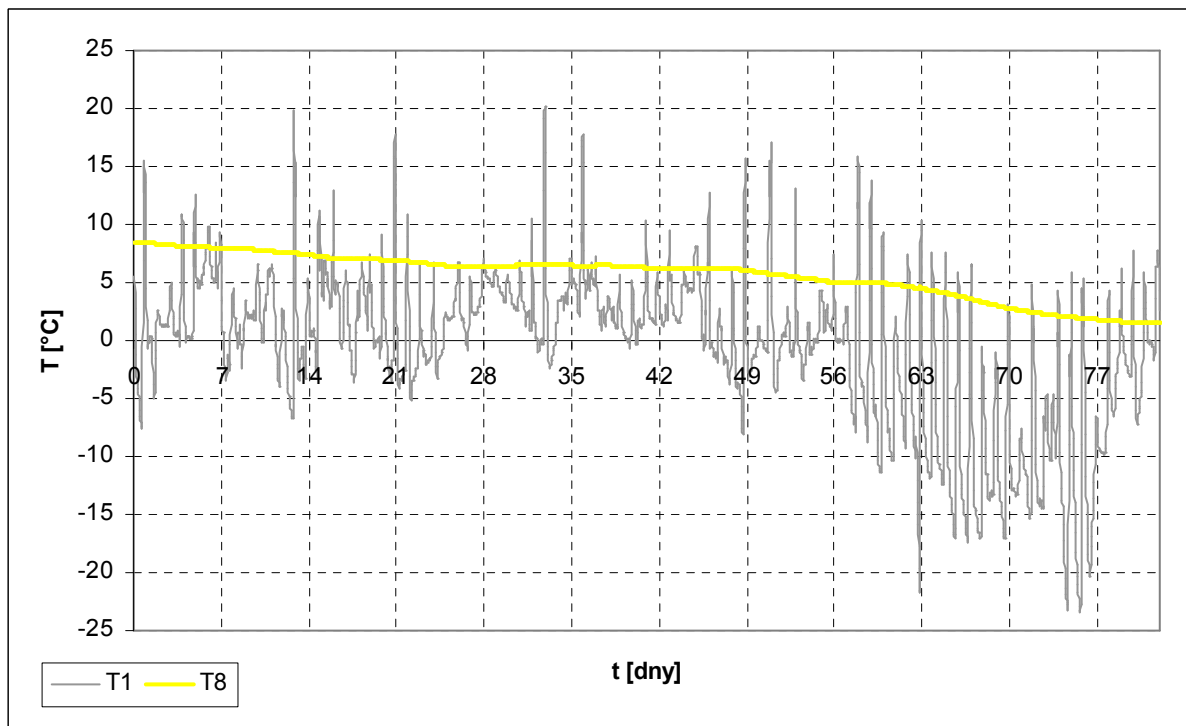
graf 12 - Průběh teplot T1 a T4 (500mm pod povrchem) v období od 28.11.2011 do 5.2.2012



graf 13 - Průběh teplot T1 a T6 (1010mm pod povrchem) v období od 28.11.2011 do 5.2.2012



graf 14 - Průběh teplot T1 a T8 (1295mm pod povrchem) v období od 28.11.2011 do 5.2.2012



4.1.2. Tlakové hodnoty

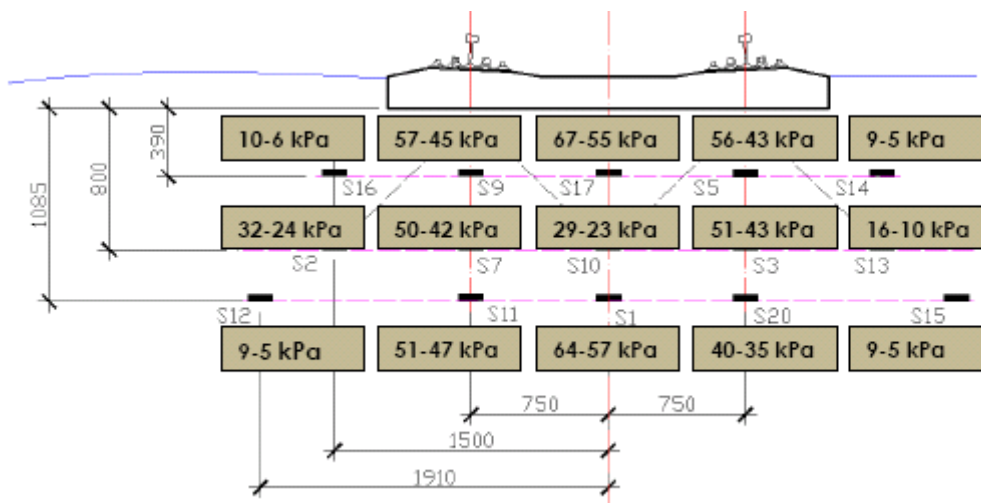
Následující hodnoty jsou převzaty z experimentálního měření, které bylo provedeno Katedrou dopravního stavitelství Univerzity Pardubice v roce 2011.

Výsledky tenzometrického měření tlaků jsou vypracovány pro soupravu složenou z hnacího vozidla ř. 163 a taženého vozidla Bdmtee²⁸¹. Nápravové síly, které vyvodí daná souprava jsou shrnuty v následující tabulce:

tab. 24 Nápravové síly

| Vozidlo | Nápravová síla | Síla na jednu kolejnici |
|--------------------------|----------------|-------------------------|
| Ř. 163 | 207,236 kN | 103,618 kN |
| Ř. Bdmtee ²⁸¹ | 110,362 kN | 55,181 kN |

Vyhodnocení odezvy tenzometrických snímačů je shrnuto v následujícím obrázku:



obr. 29 Hodnoty naměřených tlaků v jednotlivých místech /20./

4.2. Sestavení modelu teplotního chování

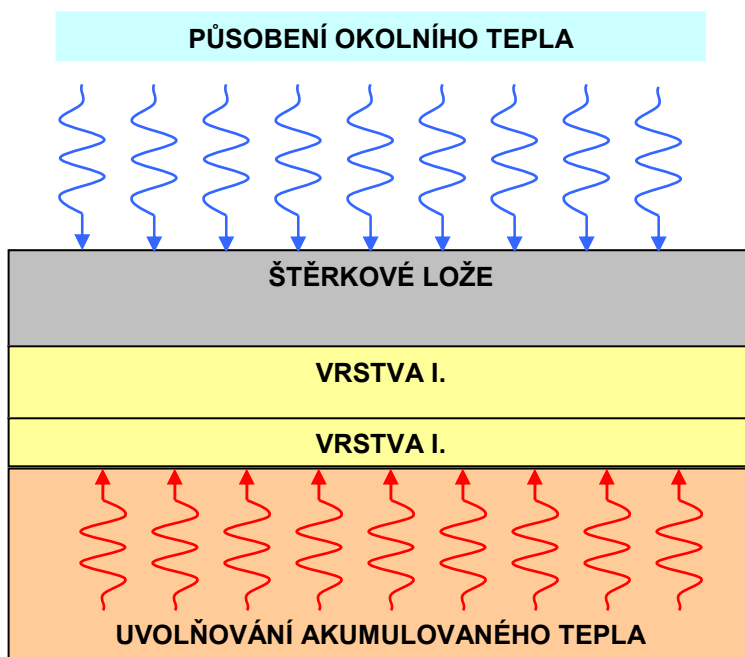
4.2.1. *Předpoklady:*

- potenciál povrchového tepla v podstatě závisí na energii slunečního záření a na energii radioaktivních procesů rozpadu zemského jádra a zemského pláště. Kvůli poměrně malým tepelným proudům z nitra země je podíl solárně vyzařující energie rozhodující pro teplotu v povrchových vrstvách přibližně do hloubky 100 m /16./
- úroveň teploty do hloubky 15 m pod horním okrajem terénu je ovlivněna sezónními teplotními vlivy /16./
- v hloubce 3m pod povrchem země jsou meziroční změny teplot minimální /4./
- energii radioaktivních procesů rozpadu zemského jádra a zemského pláště model neuvažuje
- model je směřován k analýze TŽS v zimním období. Ohřev povrchu zemského v modelu vlivem slunečního záření je reprezentován pouze prouděním tepla okolního vzduchu
- protože se nedá odhadnout výskyt sněhové pokrývky a protože sněhová pokrývky v postatě chrání zemní těleso před promrzáním od holomrazů, neuvažuje se.
- trať má v celé délce stejné mocnosti jednotlivých vrstev a po celé zkoumané délce trati působí stejné teploty okolí

4.2.2. *Chování tělesa železničního spodku*

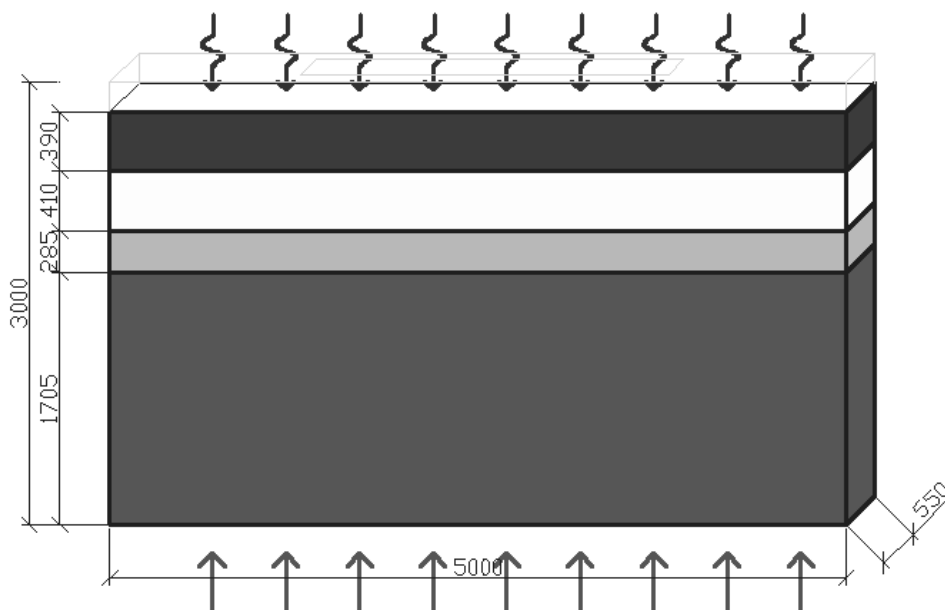
Na těleso železničního spodku působí teplota vzduchu. TŽS má samo o sobě schopnost akumulovat toto získané teplo. Tuto vlastnost vyjadřuje měrná tepelná kapacita c [$J/(kg \cdot K)$]. Veškeré teplo se zde však neukládá, ale část ho prochází do nižších vrstev. Proudění tepla materiálem vstupuje do modelu jako součinitel vodivosti λ [$W/(m \cdot K)$]. Toto prošlé teplo dále akumuluje zemina pod konstrukcí železničního spodku, která při vysokých okolních teplotách teplo přijímá, při nízkých teplo uvolňuje. I toto teplo je v modelu zohledněno.

4.2.3. Sestavení modelu



obr. 30 Schema teplotního modelu

Podle třetího předpokladu je možno rozdělit trať na jednotlivé segmenty, které na sebe kontinuálně navazují. Segment tedy bude široký 5m (osová vzdálenost kolejí ve stanici) a dlouhý 0,55m (osová vzdálenost prahů). Výšky konstrukčních vrstev jsou uvedeny na obr. Jednotlivé konstrukční vrstvy jsou spolu pevně propojeny.



obr. 31 Rozměry modelu teplotního chování

Pro numerické vyjádření nestacionární úlohy vedení tepla je nutno znát tyto materiálové charakteristiky:

c ... měrná tepelná kapacita [J/(kg*K)]

λ ... součinitel tepelné vodivosti [W/(m*K)]

ρ ... objemová hmotnost [kg/m³]

Přesné hodnoty těchto charakteristik, vyjma objemové hmotnosti, jsou neznámé. Objemové hmotnosti písků ve vrstvě 1,2 byly zjištěny laboratorně. Neznámé hodnoty materiálových charakteristik je možno převzít z katalogu a tabulek stavebních materiálů. Ovšem tyto tabulkové hodnoty (měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti) jsou pouze orientační a musí být upřesněny.

4.2.4. Upřesnění materiálových konstant

Při hledání hodnot měrné tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti bylo nalezeno několik různých hodnot. Pro správnost modelu teplotního chování bylo nutné tyto hodnoty upřesnit. Dá se předpokládat, že tyto hodnoty budou pro vrstvy TŽS podobné, protože materiály v jednotlivých vrstvách mají stejný charakter (prachovitý písek), téměř stejnou objemovou hmotnost a podobnou vlhkost.

ŘEŠENÍ:

Z experimentálně naměřených dat byl odebrán časový úsek teplotních dat pro jednotlivé rozhraní vrstev a pro jejich střed mocnosti. Z těchto hodnot byly sestaveny závislosti jednotlivých teplot na čase. Tato teplota se poté nechala působit na jednoduché modely konstrukčních vrstev vytvořených v programu SolidWorks. Vždy tak, aby teploty působily na stejném rozhraní. Po proběhnutí výpočtu se pomocí sondy odebrala data ze středu mocnosti modelové vrstvy v závislosti na čase a ta se poté pomocí programu Microsoft Excel graficky porovnávala. Aby bylo možné na základě vypočtených dat měnit hodnoty jednotlivých veličin, je potřeba určit, co jednotlivé hledané veličiny představují a jaké změny nastanou při jejich snížení, resp. zvýšení.

Měrná tepelná kapacita - je množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 teplotní stupeň. Čím nižší tepelná kapacita – tím rychlejší prohřátí, respektive prochlazení materiálu.

Součinitel tepelné vodivosti – Udává míru schopnosti látek vést teplo. Čím nižší součinitel, tím pomalejší pohyb tepla.

POSTUP:

- Výběr úseku dat, zpracování teplot
- Nastavení známých hodnot (objemová hmotnost) a okrajových podmínek (teplota působící na spodní plochu a teplota působící na horní plochu vrstvy) do modelu
- Určení zkoumaných hodnot (měrné tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti)
- Spuštění výpočtu – po proběhnutí vyhodnocení a porovnání dat z numerické sondy s experimentálními daty v Excelu
- Opakování výpočtu s určenými hodnotami měrné tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti
- Vyhodnocení

ZPRACOVÁNÍ:

Materiál: prachovitý písek

$$\rho = 1929 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 800 - 950 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

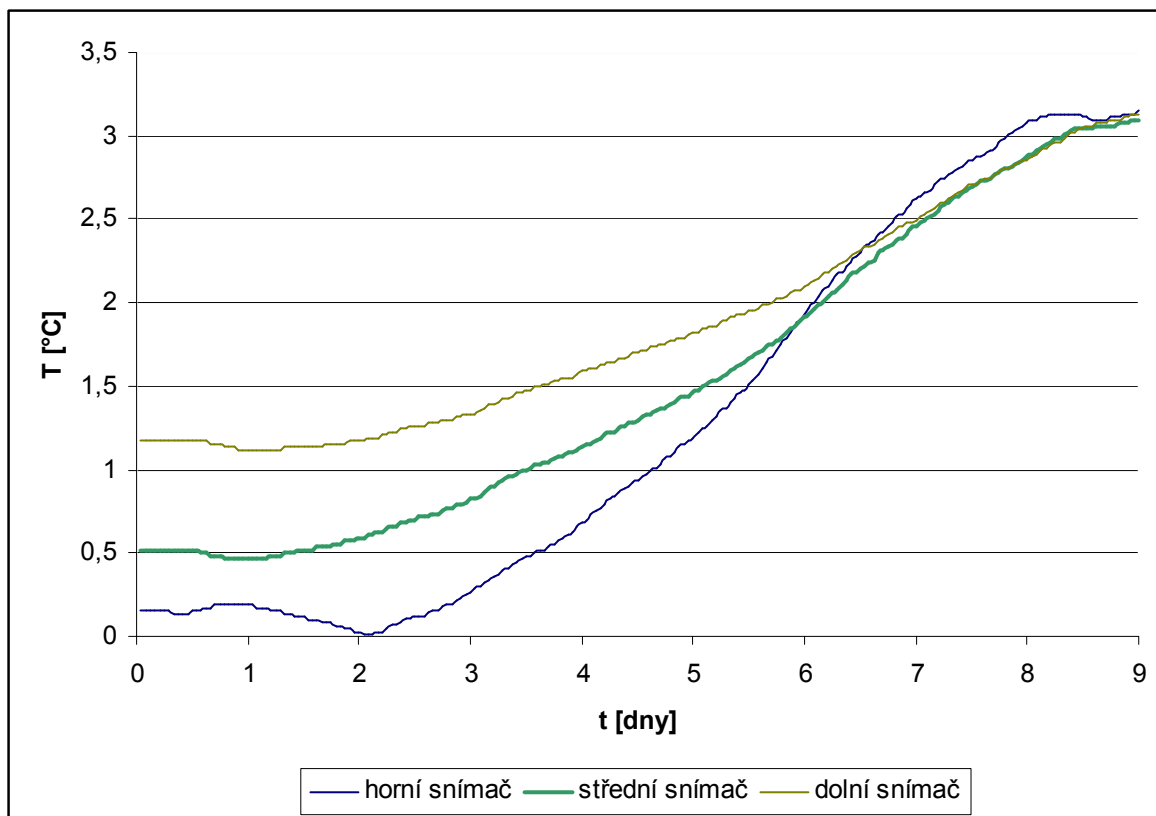
$$\lambda = 0,5 - 0,95 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Uvedené orientační hodnoty c a λ jsou pro křemičité písky.

- **Výběr úseku dat**

Z numericky získaných dat byl vybrán náhodně úsek osmi dnů. Z těchto dat byla vyjmuta teplota ze snímačů T6-8, která by měla korespondovat s teplotami vrchní plochy, středu a spodní plochy zkoumané vrstvy. Tyto hodnoty z jednotlivých snímačů byly vyjádřeny v závislosti na čase a uloženy do datových souborů.

graf 15 - Zobrazení teplot působících na spodní vrstvu TŽS



- Nastavení hodnot**

Jednoduchý obdélníkový model vrstvy o rozměrech 5000x550x285 mm byl vytvořen z deseti desek o rozměrech 5000x550x28,5 - aby bylo možné lépe vystihnout rozložení počáteční teploty - každá tato deska dostala přidělenou svou počáteční teplotu:

tab. 25 Počáteční teploty

| Umístění | T [°C] |
|-----------------|--------|
| Nejvyšší poloha | 0,152 |
| | 0,244 |
| | 0,336 |
| | 0,427 |
| | 0,519 |
| | 0,650 |
| | 0,781 |
| | 0,912 |
| | 1,043 |
| Nejnižší poloha | 1,172 |

Doprostřed mocnosti modelu je umístěna sonda k odběru dat.

Na spodní a vrchní plochu se nechají působit výše vygenerované v čase se měnící teploty.

- Určení hledaných hodnot**

Hodnoty byly zkoumány v těchto sestavách

tab. 26 Průběh pokusů

| Pokus č. | c | la |
|----------|-----|------|
| 1 | 800 | 0,5 |
| 2 | 800 | 0,65 |
| 3 | 800 | 0,95 |
| 4 | 950 | 0,5 |
| 5 | 950 | 0,65 |
| 6 | 950 | 0,95 |

Pro každý pokus byla zpracována jedna varianta, pro pravděpodobné hodnoty pak varianta další, která má za úkol pomoci při rozhodování o správných hodnotách.

- **Výpočet**

Síť modelu byla vytvořena tertaerdickými prvky. Maximální délka hrany prvku je 80mm. Výpočet byl složen ze dvou simulací. První (ustálený stav) má za úkol modelu předat počáteční teploty. Druhá (přechodový děj) již vypočítává průběhy teplot v jednotlivých uzlech modelu. Obsahuje 192 kroků.

- **Porovnání hodnot**

Okrajovými podmínkami se úplně nepodařilo vystihnout rozložení teplot v tělese, takže je z grafů patrné, že musí dojít k vyrovnání těchto teplot, což trvá z pravidla dva dny. Závěrem došlo k porovnání grafických výstupů a k vyhodnocení nejbližších hodnot. Grafický výstup vybraných hodnot je umístěn v grafu 16. Ostatní posuzované grafy jsou umístěny v příloze č. 1 – Upřesnění hodnot měrné tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti – Grafy

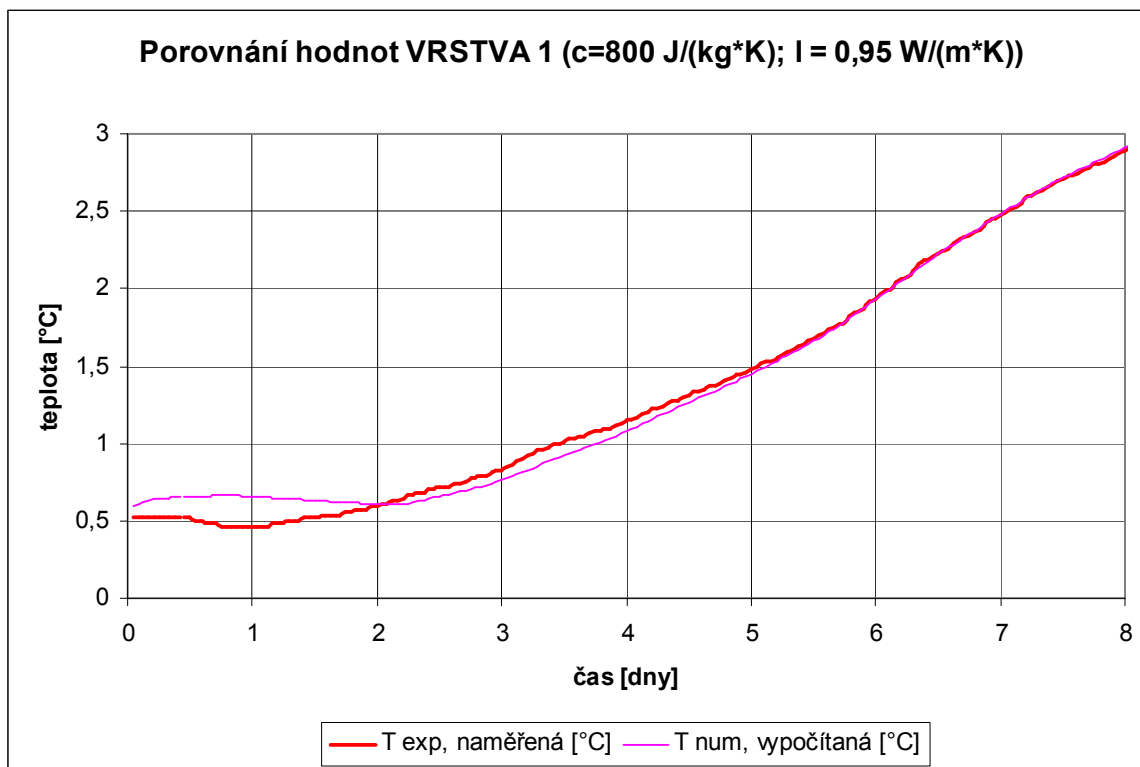
- **Vyhodnocení**

Výsledky:

Měrná tepelná kapacita: $c = 800 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

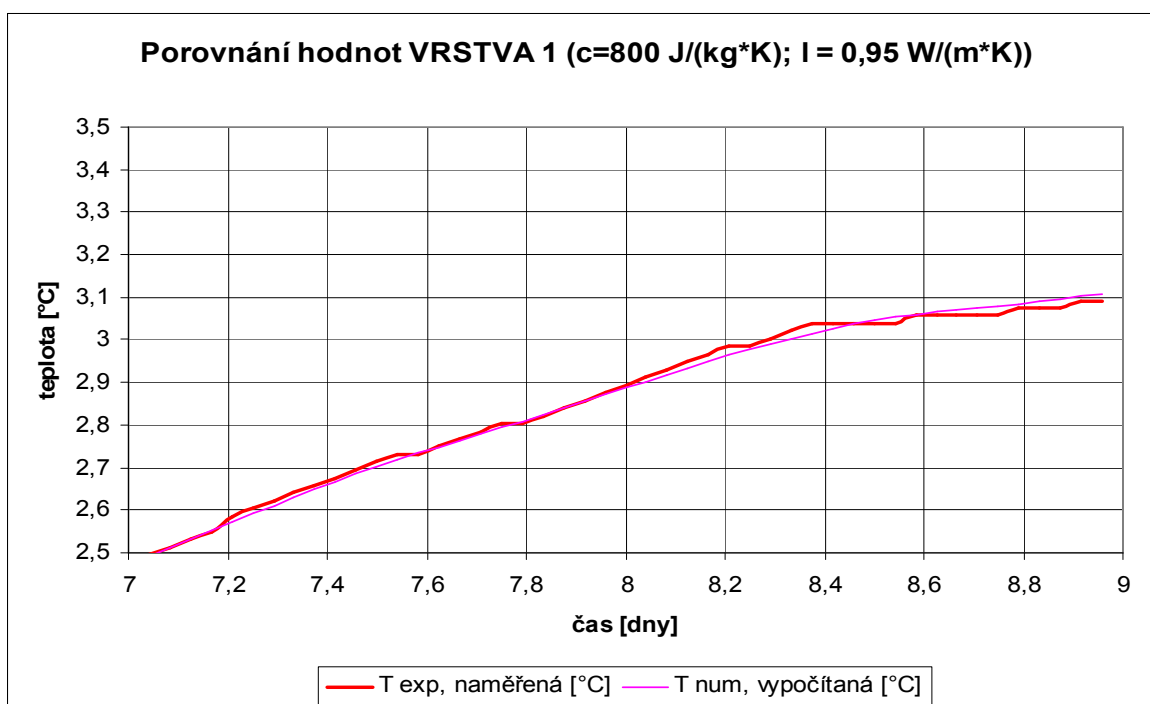
Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda = 0,95 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

graf 16 - Porovnání experimentálně naměřených hodnot s numericky vypočítanými pro siSa



Jako výsledek byl po pečlivém zkoumání a zvážení zvolen výsledek přímého pokusu č.3. Hodnoty z numerického výpočtu v nich mají velmi podobné průběhy, jako experimentálně zjištěné hodnoty a také nejlépe reagují na změny teplot. Tato úvaha byla ověřena prodloužením časového úseku:

graf 17 - Přesnější porovnání experimentálně naměřených hodnot s numericky vypočítanými pro siSa



Materiál: Štěrk 32/63

$$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$$

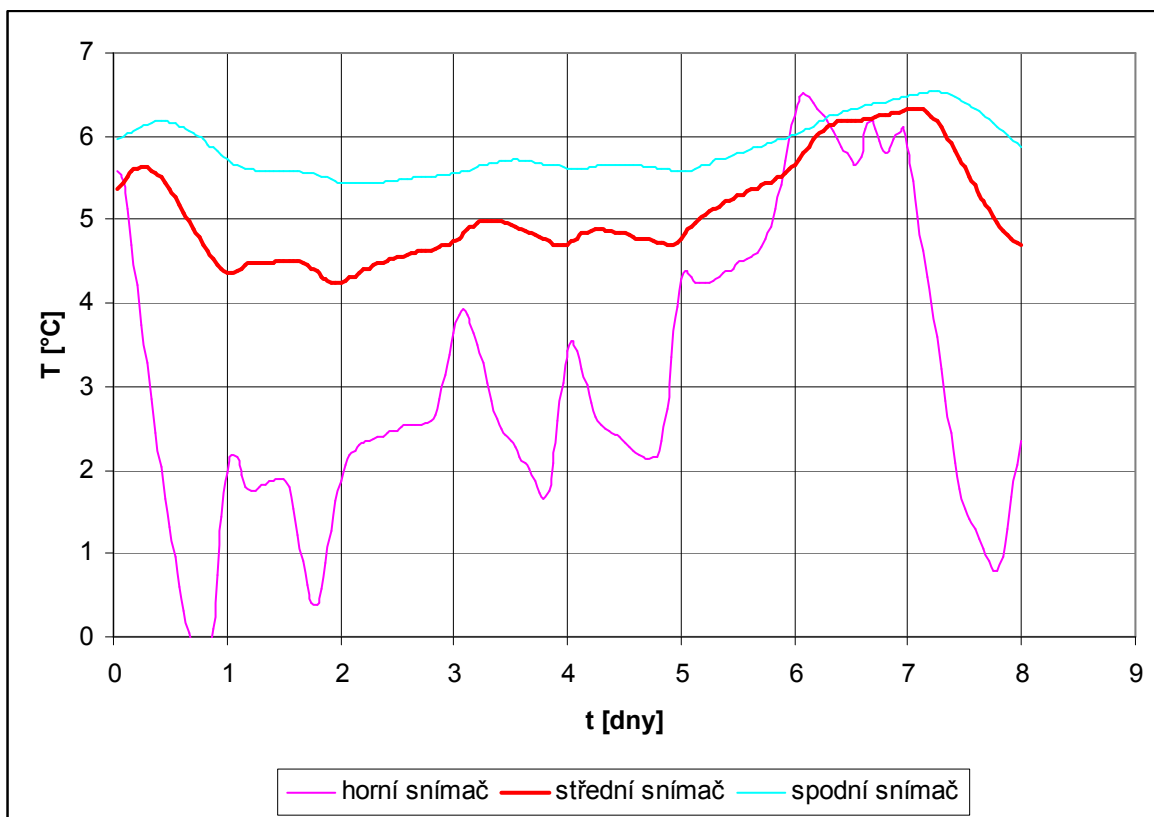
$$c = 500 - 750 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\lambda = 0,4 - 0,7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Uvedené orientační hodnoty c a λ jsou pro různé štěrky.

- Výběr úseku dat

graf 18 - Zobrazení teplot působících na spodní vrstvu TŽS



- **Nastavení hodnot**

Jednoduchý obdélníkový model vrstvy o rozměrech 5000x550x500 mm byl vytvořen z deseti desek o rozměrech 5000x550x50. Na model bylo působeno teplotami ze snímače T1 na horní plochu a T4 na dolní plochu.

tab. 27 Počáteční teploty

| Umístění | T [°C] |
|-----------------|--------|
| Nejvyšší poloha | 5,595 |
| | 5,541 |
| | 5,487 |
| | 5,432 |
| | 5,378 |
| | 5,378 |
| | 5,527 |
| | 5,677 |
| | 5,826 |
| Nejnižší poloha | 5,976 |

- **Určení hledaných hodnot**

Hodnoty byly zkoumány v těchto sestavách

tab. 28 Průběh pokusů

| Pokus č. | c | la |
|----------|-----|------|
| 1 | 500 | 0,6 |
| 2 | 500 | 0,7 |
| 3 | 550 | 0,5 |
| 4 | 550 | 0,7 |
| 5 | 600 | 0,65 |
| 6 | 650 | 0,7 |

- **Vyhodnocení**

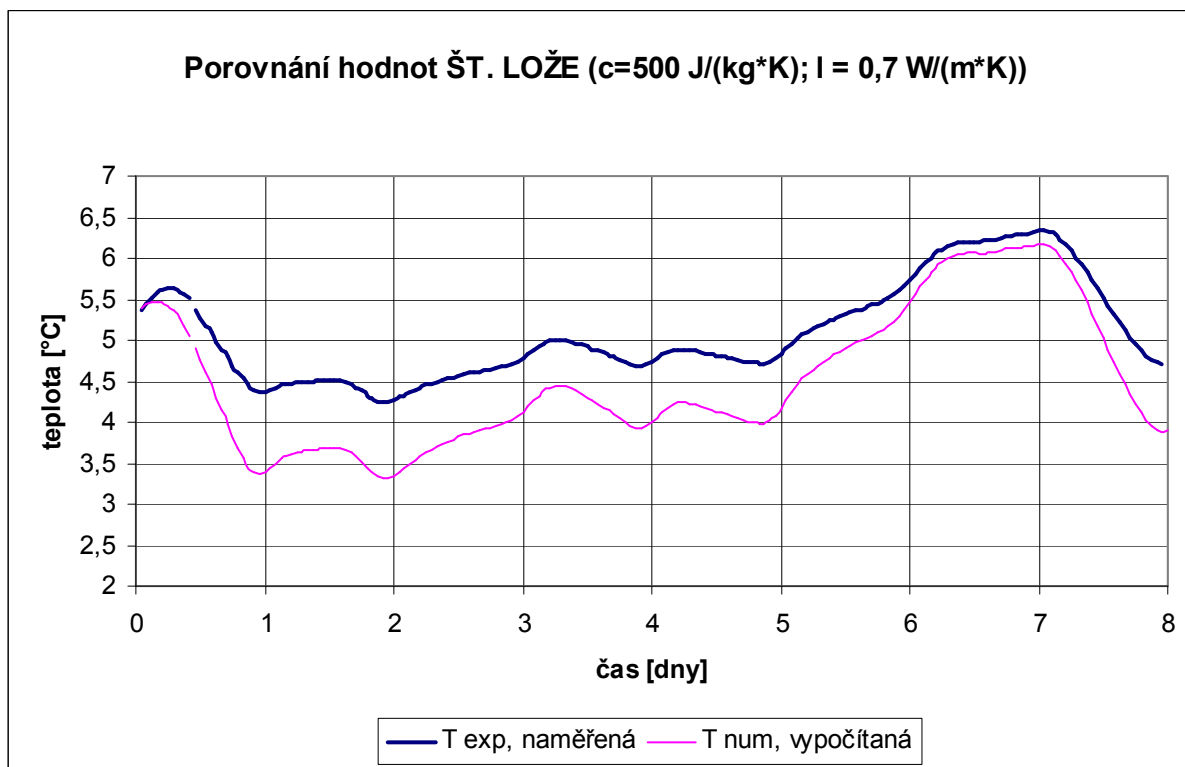
Jako výsledek byl zvolen výsledek přímého pokusu č.2, i když se jedná pouze o hrubé přiblížení. Tepelné materiálové charakteristiky šterkového lože jsou také ovlivněny srážkami a prouděním vzduchu v pórech. Z těchto důvodů není možné určit přesné materiálové konstanty. Je zřejmé, že tento nemodelovatelný stav ve vrchní konstrukční vrstvě vnese nepřesnost do celkových výsledků.

Výsledky:

Měrná tepelná kapacita: $c = 600 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda = 0,65 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

graf 19 - Porovnání experimentálně naměřených hodnot s numericky vypočítanými pro štěrk 32/63



tab. 29 Výsledné hodnoty upřesněných veličin

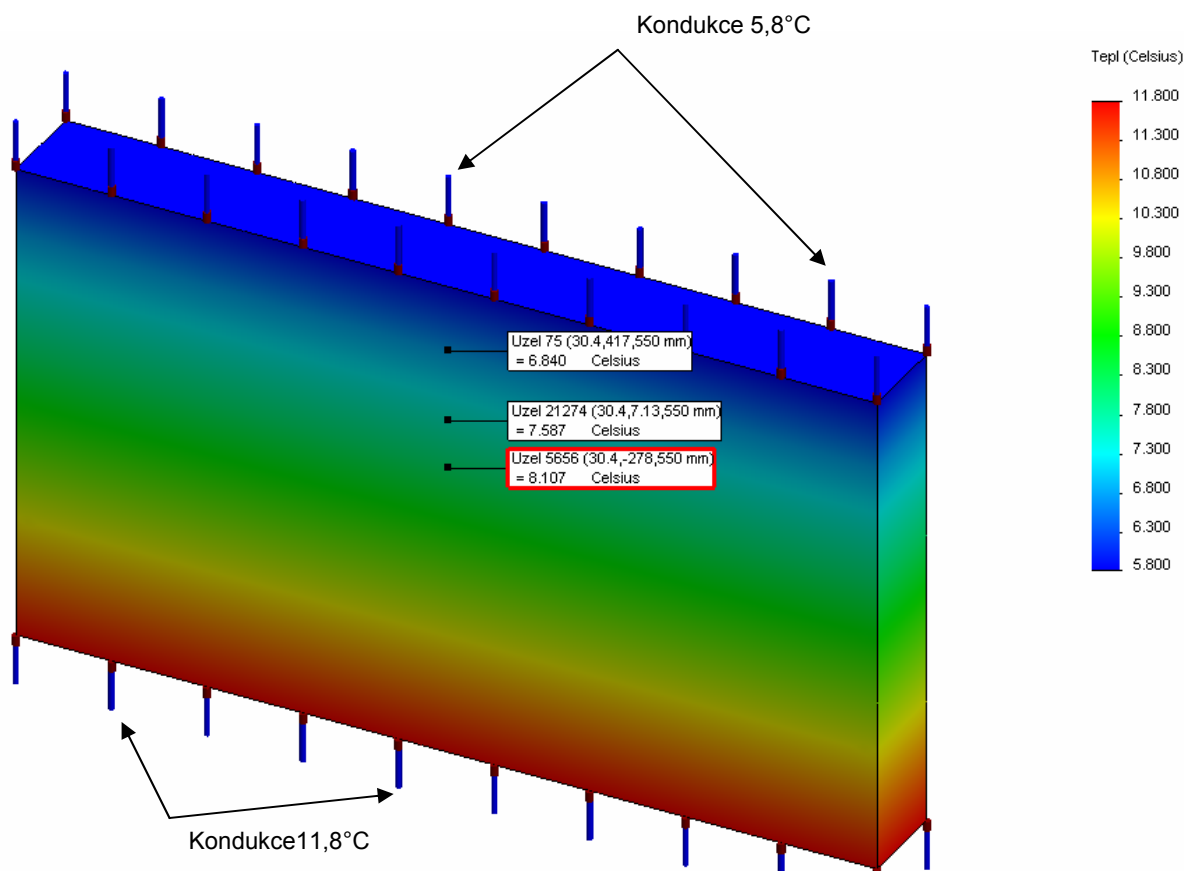
| Materiál | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)] | Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)] |
|------------------|--|-----------------------------------|--|
| Štěrk 32/64 | 2600 | 500 | 0,7 |
| Prachový písek 1 | 1907 | 800 | 0,95 |
| Prachový písek 2 | 1929 | 800 | 0,95 |

4.2.5. Stanovení okrajových podmínek

Okrajové podmínky této úlohy se definují, jako působení okolních teplot na zkoumaný model. S přihlédnutím k předpokladům jsou definovány tyto okrajové podmínky:

a) v čase $t=0$ musí mít každá z vrstev přidělenou počáteční teplotu

Zadáním teplot do jednotlivých vrstev se zdaleka nevystihne rozložení teploty v materiálu. Proto byla zvolena varianta zadání okrajových podmínek působením tepla na spodní a horní plochu modelu. Po odzkoušení různých dvojic působících teplot se jako nejpodobnější zvolila následující.



obr. 32 Rozložení počátečních teplot v modelu

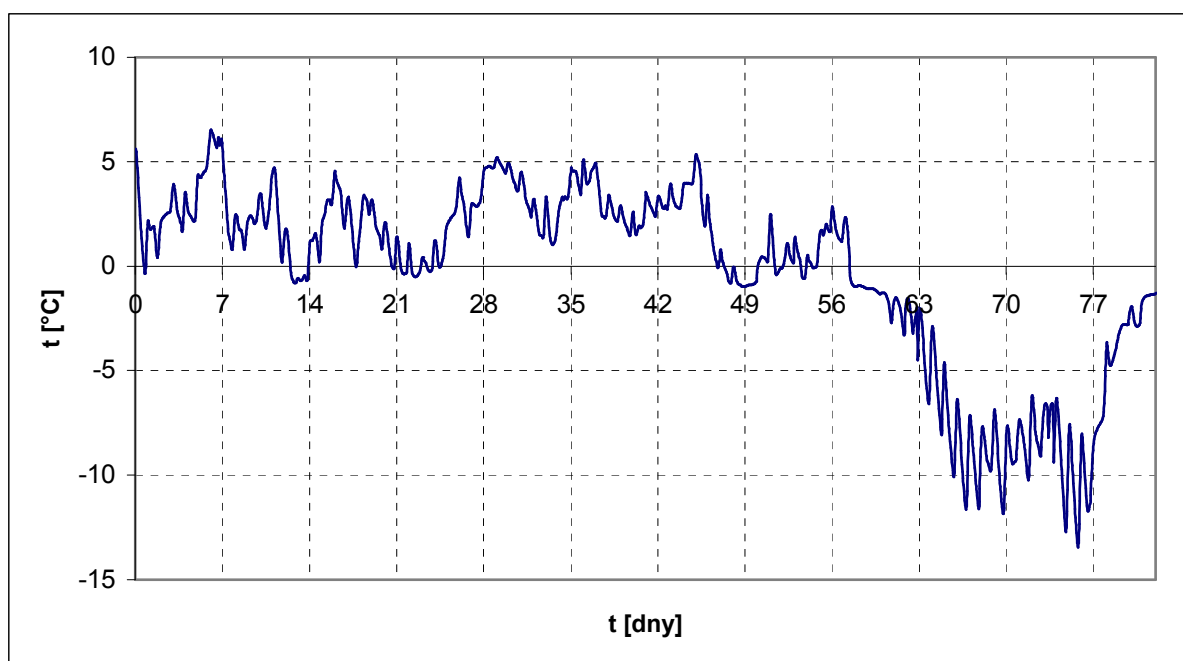
Takto rozložené teplo v modelu ale stále přesně neodpovídá skutečnosti. Rozložení teplot se ustálí až po určitém čase působení skutečných teplot.

b) na TŽS působí prostřednictvím plochy ve výšce úložné plochy pražce teplota

Je zadávána teplota ze snímače T2, tzn. v úložné ploše pražce. Působení této teploty na TŽS vystihuje nejlépe konvekce, protože mezery mezi jednotlivými zrny ve šterkovém loži umožňují proudění vzduchu. Přenos tepla konvekcí je charakterizován teplotou vzduchu T [K] a součinitelem prostupu tepla konvekcí α [$W/(m^2 \cdot K)$].

Teplota se do modelu dosadí jako časově proměnná funkce s hodinovým krokem. Součinitel přestupu tepla se může v čase měnit také (v závislosti na větrných a dešťových podmínkách). Protože tyto hodnoty nejsou k dispozici, je hodnota odhadnuta na $\alpha = 5 W/(m^2 \cdot K)$.

graf 20 - Teplota, kterou model využívá jako výchozí okolní teplotu (naměřeno v období 5.12.2011 – 18.2.2012)



c) na TŽS prostřednictvím spodní plochy působí teplota zemského povrchu.

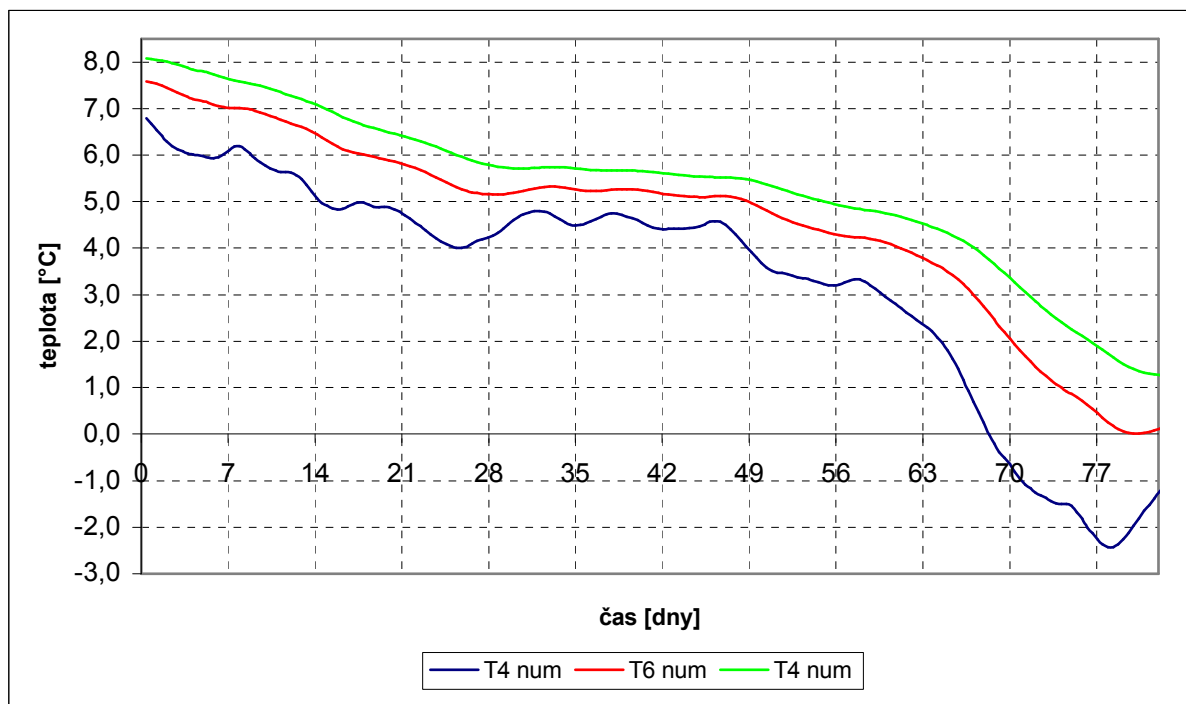
způsob zavedení této teploty – pod konstrukci TŽS byl vložen blok zeminy, který má za úkol akumulovat teplo prošlé TŽS. Tento blok sahá do hloubky 3m pod povrch, kde již změny teplot půdy nabývají velmi malých hodnot. Podle ČSN EN ISO 10211-1 je teplota v zemině 3m pod úrovní terénu rovna dlouhodobé průměrné teplotě vzduchu. Počáteční teplota tohoto bloku je nastavena tak, že na jeho spodní plochu působí teplota, která vyvede v modelu takový průběh, že na rozhraních jednotlivých vrstev modelu jsou přibližně takové teploty, které zhruba odpovídají experimentálně zjištěným teplotám v daném místě modelu. Při výpočtu pak působí na spodní plochu bloku stálá teplota $8,57^{\circ}C$, což je průměrná roční teplota v dané lokalitě.

4.2.6. Výpočet

| | | |
|------------------------------------|---------|------------|
| Délka trvání: | 7088400 | 82,042 dní |
| Krok výpočtu: | 3600s | |
| Počet kroků: | 1969 | |
| Počáteční teplota na zemní pláni: | 7,48 °C | |
| Poč. teplota spodku zemního bloku: | 11,5 °C | |
| Stálá teplota ve 3m hloubky: | 8,75 °C | |

4.2.7. Vypočtené hodnoty

graf 21 – Numericky vypočítané teploty



4.3. Sestavení modelu mechanického chování

4.3.1. Sestavení modelu

Model mechanického chování byl sestaven pomocí programu GEO 5 – MKP.

Pro modelování tlaků ve vrstvách tělesa železničního spodku byl zvolen Mohr–Coulombův model chování zemin.

Model je tvořen dvourozměrně. Program automaticky uvažuje délku modelovaného bloku 1m. Další rozměry jsou: šířka modelového prostředí = 10m, hloubka modelového prostředí = 5m. Výšky jednotlivých vrstev jsou stejné jako ve skutečnosti, resp. jako u modelu teplotního chování (obr.32)

Síť modelu byla vygenerována tříuzlovými trojúhelníkovými prvky. Délka hrany prvku byla nastavena na 0,3m. V místě úložné plochy pražce byla síť zhuštěna do vzdálenosti 1m tak, aby délka hrany prvku byla 0,1m. Počet vygenerovaných uzlů 4387, počet prvků 2628. Okrajové podmínky jsou nastaveny standardně.

Zatížení je do výpočtu vneseno působením dvojice osamělých sil na pražec, který je v modelu reprezentován tuhým tělesem. Velikost jedné síly je 103,618 kN. Tato hodnota vychází z nápravových sil, které vyvodí hnací vozidlo ř. 163.

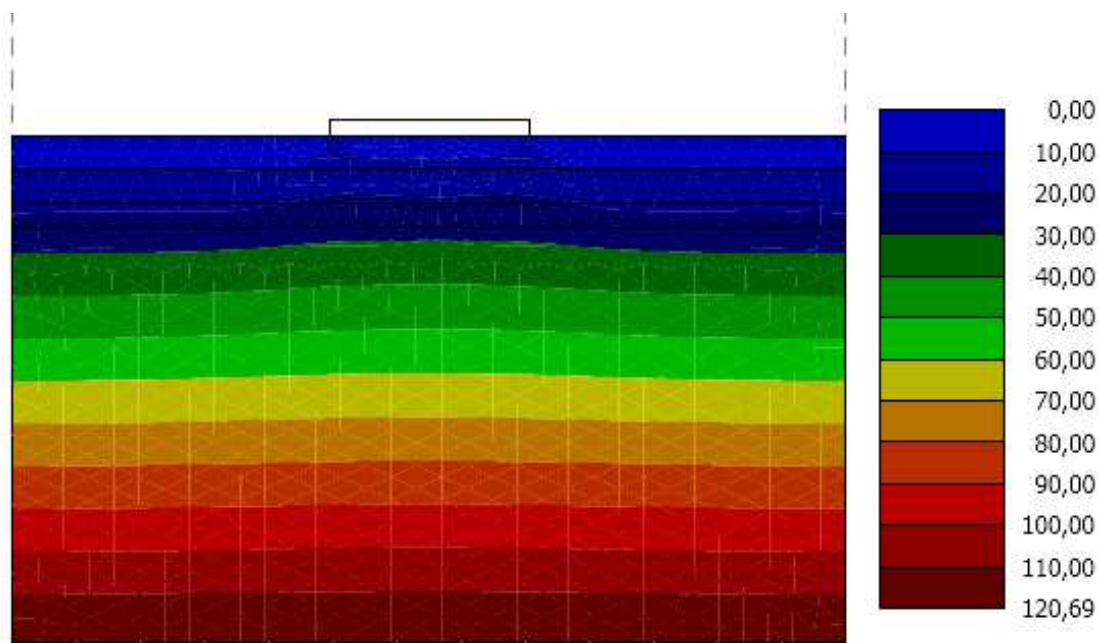
4.3.2. Výpočet

Výpočet je rozdělen do dvou fází. V první fázi se počítají zemní tlaky pro nezatížený model. Tedy tlaky vzniklé od vlastní tíhy. Druhá fáze výpočtu uvažuje model zatížený. Toto rozdělení bylo nutno provést kvůli možnosti porovnání vypočítaných hodnot tlaků s experimentálně naměřenými hodnotami. Experimentálně naměřené hodnoty ukazují pouze tlaky vzniklé od zatížení provozem.

4.3.3. Vypočítané hodnoty napětí

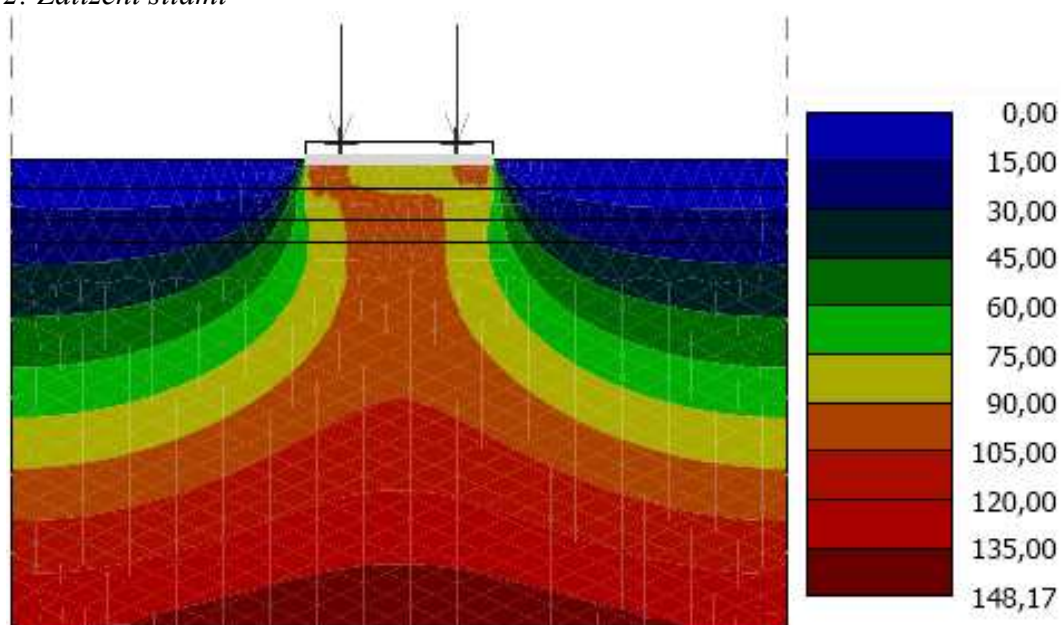
Výstupní hodnoty k porovnání jsou rozdílem fáze2 a fáze1.

Fáze 1: Tlaky v zemině od vlastní tíhy konstrukce



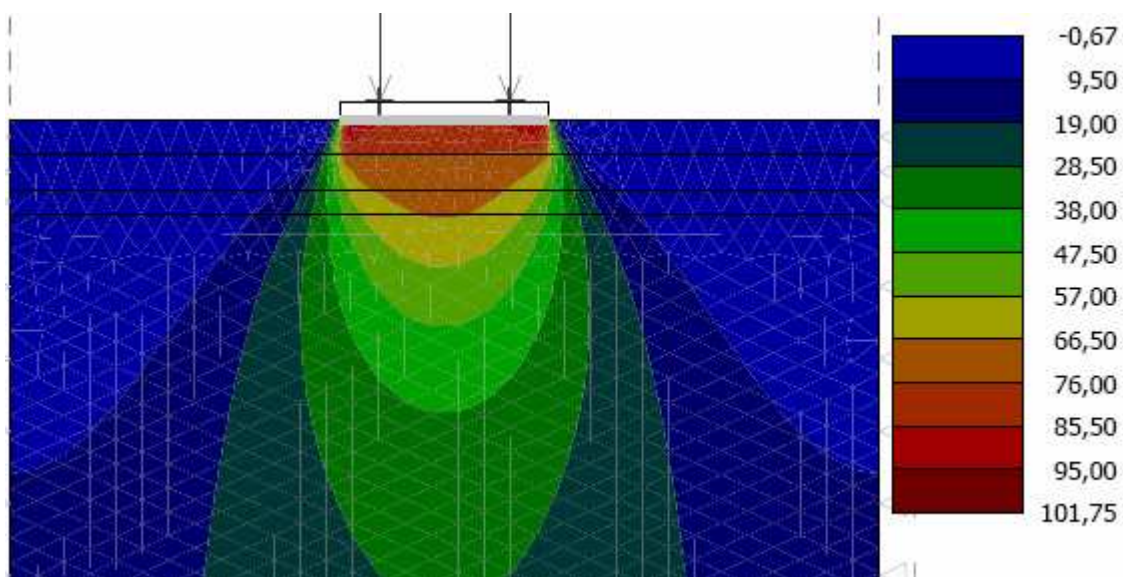
obr. 33 Znázornění zemních tlaků od vlastní tíhy materiálů [kPa]

Fáze 2: Zatížení silami



obr. 34 Znázornění zemních tlaků po zatížení silami [kPa]

Rozdíl Fáze 2 a Fáze 1:



obr. 35 Znáznornění výsledných hodnot zemních tlaků [kPa]

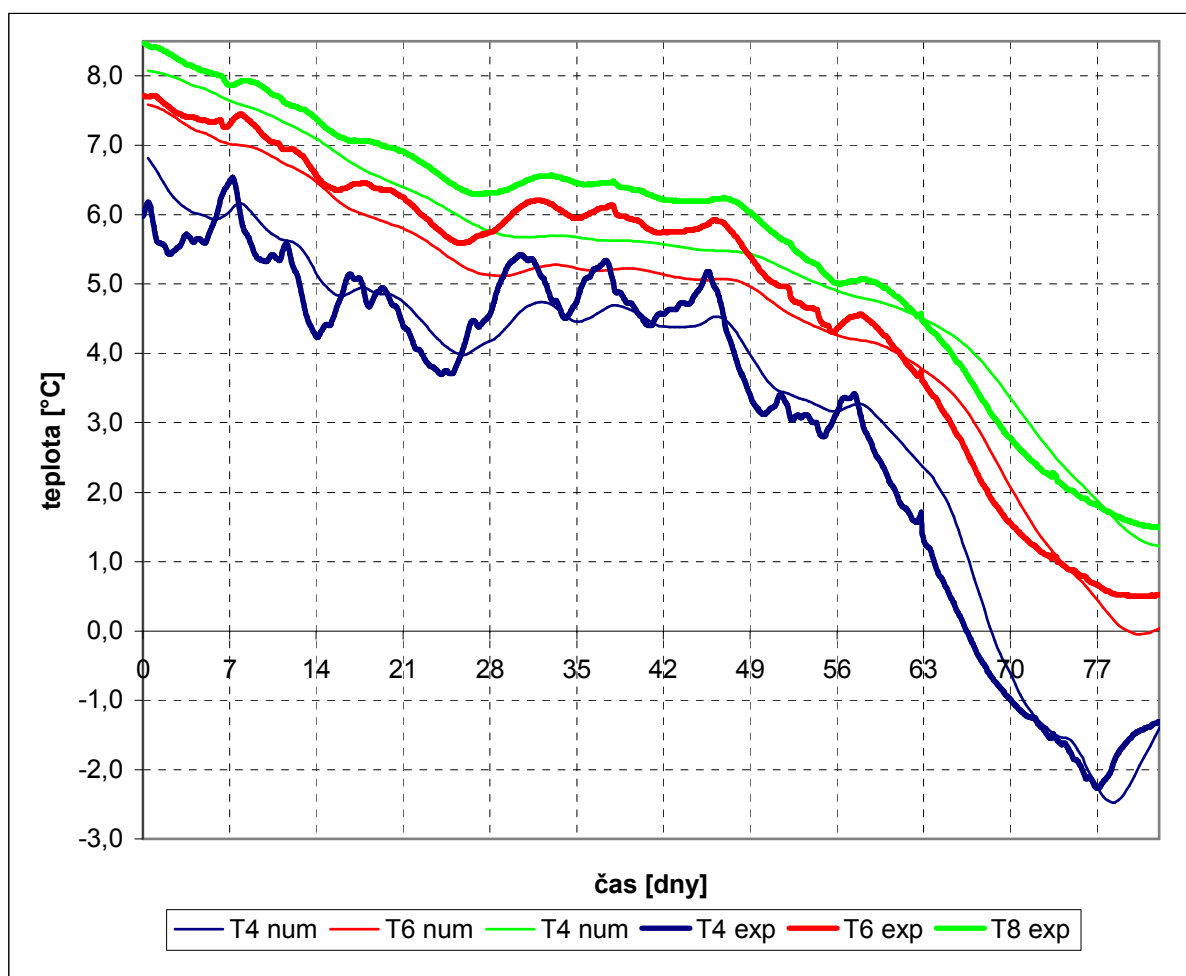
V tomto posledním výstupu byl vytvořen rastr pro zobrazení hodnot, který odpovídal rozmístění tenzometrických snímačů. Takto získané hodnoty se přepsaly do obr. 36, kde byly porovnány s rozmezím experimentálně naměřených tlaků.

4.4. Porovnání numericky získaných dat s experimentálně naměřenými daty

4.4.1. Porovnání teplot

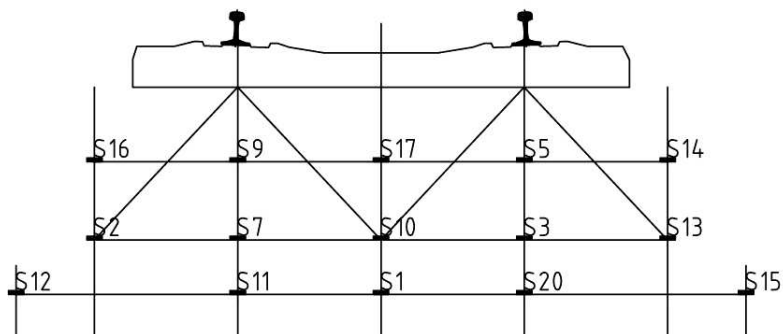
Srovnání hodnot je zobrazeno v následujícím grafu.

graf 22 – Porovnání skutečných teplot s teplotami vypočítanými

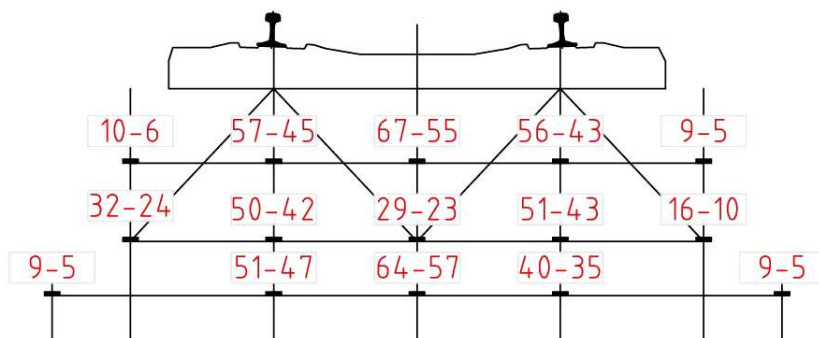


4.4.2. Porovnání tlaků

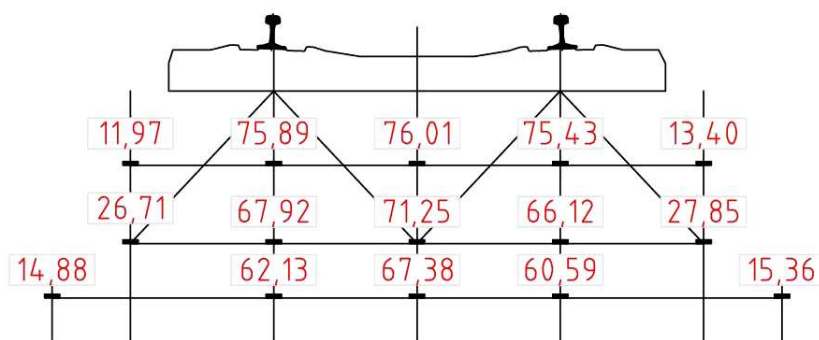
OZNAČENÍ SNÍMAČŮ



EXPERIMENTÁLNĚ NAMĚŘENÉ ZEMNÍCH TLAKŮ



NUMERICKY VYPOČÍTANÉ HODNOTY ZEMNÍCH TLAKŮ



obr. 36 Porovnání experimentálně naměřených hodnot zemních tlaků s hodnotami numericky vypočítanými [kPa]

5. ZHODNOCENÍ, DISKUZE, ZÁVĚR

Diplomová práce započala odběrem vzorků zeminy a instalací snímačů teploty v železniční stanici Stéblová. Při této příležitosti byla provedena statická zatěžovací zkouška jednotlivých rozhraní železničního spodku.

V práci je uveden způsob navrhování konstrukce železničního spodku dle SŽDC S4. Tato kapitola je zaměřena na navrhování konstrukčních vrstev podle modulu přetvárnosti a ochranu tělesa železničního spodku proti nepříznivým účinkům mrazu.

Následovala laboratorní část, která měla za cíl stanovit vstupní hodnoty pro modelování. Zkouškami byly zjišťovány materiálové charakteristiky odebraných vzorků. Vzorky zemin byly zatříděny, byl stanoven koeficient propustnosti, maximální objemová hmotnost, smykovou zkouškou byly zjištěny úhel vnitřního tření zemin a soudržnost. Tyto zkoušky byly provedeny v laboratoři KDS s pomocí přístrojů, které jsou v práci specifikovány.

Po instalaci snímačů probíhal nepravidelně sběr teplotních dat. Následně byl proveden převod textových souborů do programu Microsoft Excel. Z takto upravených dat byl vybrán časový úsek. S ohledem na způsob navrhování dle SŽDC S4 byl vybrán nejchladnější časový úsek v roce. Tyto hodnoty teplot byly pro rozhraní jednotlivých vrstev spolu s okolní teplotou graficky zpracovány. Slouží jako vstup pro model teplotního chování a také pro porovnání vypočítaných hodnot.

Hodnoty experimentálně naměřených zemních tlaků byly převzaty z vyhodnocení experimentálního měření v ŽST Stéblová, provedeného Katedrou dopravního stavitelství Univerzity Pardubice. V těchto hodnotách jsou zachyceny pouze účinky od projíždějících vozů bez hodnot tlaků vzniklých vlastní tíhou zeminy.

Vytvoření teplotního modelu v programu SolidWorks. Pro sestavení modelu teplotního chování bylo nutno zjistit další materiálové konstanty, které při laboratorních zkouškách nebyly zjištěny. Jedná se o součinitel tepelné vodivosti a měrnou tepelnou kapacitu zemin. Hrubý odhad těchto hodnot byl proveden nalezením hodnot pro podobné materiály v tabulkách a jiných zdrojích. Z těchto hodnot bylo stanoveno rozmezí, ve kterém by se hodnoty měly nacházet. Upřesnění těchto hodnot bylo provedeno zjednodušeným numerickým modelem. Zjednodušený model reprezentuje jednu konstrukční vrstvu. Na tuto

vrstvy se nechaly působit prostřednictvím horní a spodní plochy experimentálně naměřené teploty – teplota na rozhraní vrstvy v modelu je stejná jako teplota na stejném rozhraní ve skutečnosti v určitém časovém úseku. Výsledkem byly hodnoty teploty ve středu mocnosti této vrstvy, které se graficky porovnály s experimentálně naměřenými teplotami ve stejné úrovni. Takto byly odzkoušeny různé hodnoty součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity. Hodnoty, pro které nastala nejlepší shoda, byly uznány jako vstupní hodnoty pro celkový model teplotního chování. Toto bylo provedeno pro prachovitý písek a kolejový štěrk 32/63.

Po zjištění těchto hodnot byl sestaven model teplotního chování. Bylo nutné stanovit teploty působící na model – okrajové podmínky.

Nejprve byly stanoveny počáteční teploty tak, aby co nejlépe vystihovaly skutečný stav na počátku časového období.

Druh přenosu teploty okolí byl stanoven jako konvekce a nejprve byl reprezentován okolní teplotou T1, která působila na horní plochu železničního svršku. Tento způsob se neosvědčil. Model s tímto vstupem nepracoval správně, zřejmě proto, že experimentálně změřená teplota okolí byla zkreslena zahříváním obalu, ve které byl umístěn snímač okolní teploty, od slunečního záření. Proto byl tento vstup nahrazen teplotou ze snímače T2 a působení bylo posunuto k úložné ploše pražce.

Po rozboru teplotního chování zemin na povrchu Země byla podle ČSN EN ISO 10211-1 zavedena do hloubky 3m pod povrch teplota, odpovídající dlouhodobé průměrné teplotě.

Výstupem z modelu je graf teplot na jednotlivých rozhraních v závislosti na čase.

Model mechanického chování byl sestaven v programu GEO 5 MKP. Veškeré hodnoty potřebné pro model mechanického chování byly zadány, byla nastavena jednotlivá rozhraní. Pražec je v modelu reprezentován jako tuhý nosník. Na něj působí dvě síly, které v součtu dávají hodnotu nápravové síly, odpovídající hnacímu vozidlu ř. 163

Aby byl získán výstup tlaků, který je možno porovnat s experimentálně naměřenými hodnotami, musel být výpočet rozdělen do dvou fází. Výsledky těchto fází od sebe byly odečteny tak, aby celkovým výsledkem bylo zobrazení zemních tlaků bez účinku vlastní tíhy zeminy.

Výstupem je obraz průběhu zemních tlaků a hodnoty tlaků v místech, kde jsou ve skutečnosti umístěny tenzometrické snímače.

Na závěr bylo provedeno porovnání vypočítaných a naměřených hodnot.

Pro teplotní hodnoty byl zvolen způsob zobrazení vypočítaných a skutečně naměřených hodnot společně graficky. Z grafu je zřejmá podobnost numericky vypočítaných s experimentálně naměřenými daty. Rozdíly mezi těmito hodnotami mohou být způsobeny tím, že nelze přesně vystihnout způsob působení teploty na TŽS. Dále také tím, že měrná tepelná kapacita a součinitel teplotní vodivosti nejsou určeny zcela přesně. Protože vlivem srážek dochází ke změnám vlhkosti materiálů TŽS, tedy i ke změnám měrné tepelné kapacity a součinitele teplotní vodivosti.

Pro porovnání zemních tlaků byl vytvořen příčný řez trati a v místech umístění tenzometrických snímačů byly vypsány experimentálně zjištěné hodnoty a numericky vypočítané hodnoty zemních tlaků. I zde naměřené a vypočítané hodnoty nabývají podobných hodnot. Rozdíly těchto hodnot mohou vzniknout tím, že rozmezí experimentálně zjištěných tlaků bylo získáno měřením, kdy vlaky měřeným místem projížděly různou rychlostí. Numericky vypočítané tlaky zachycují statický stav, tedy stav, kdy vozidlo na měřeném místě stojí. Také proto, že hodnoty modulů pružnosti vrstev jsou zadány pomocí zatřídění zemin v programu GEO 5 MKP. Nemusí tudíž přesně odpovídat skutečnosti.

Prací bylo prokázáno, že je možné namodelovat chování železničního spodku. A to jak z hlediska teplotního, tak i z hlediska zemních tlaků. Model teplotního chování lze využít (v závislosti na okolní teplotě a skladbě železničního tělesa) k určení hloubky promrznání konstrukce. Model mechanického chování dokáže (v závislosti na skladbě vrstev žel. tělesa a nápravové síle) stanovit např. maximální tlak na zemní pláš nebo pláš železničního spodku.

Seznam použité literatury

1. SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY, státní organizace. *SŽDC S4: Železniční spodek*. Praha, 2008, 28 s.
2. JURY, William A., Wilford R. GARDNER a Walter H. GARDNER. *Soil Physics*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1991. ISBN 0-471-83108-5.
3. KOLÁŘ, Vladimír, Ivan NĚMEC a Viktor KANICKÝ. *FEM: Principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: Computer Press, 1997. ISBN 80-7226-021-9.
4. ČSN EN ISO 10211. *Tepelné mosty ve stavebních konstrukcích - Tepelné toky a povrchové teploty - Podrobné výpočty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
5. ČSN CEN ISO/TS 17892-4. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 4: Stanovení zrnitosti zemin*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
6. ČSN CEN ISO/TS 17892-4. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 10: Krabicová smyková zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
7. ČSN CEN ISO/TS 17892-4. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin: Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
8. ČSN EN 13286-2. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy: Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
9. ČSN 72 1006. *Stanovení zhutnitelnosti zemin a sypanin*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
10. Retsch: Analytický síťovací stroj 200 control. [online]. 2006 [cit. 2012-9-1]. Dostupné z: <http://www.retsch.cz/cz/produkty/sitovani/analyticke-sitovaci-stroje/as-200-control/>
11. HEJZLAR, Radko. *Sdílení tepla. Druhé*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993, 186 s.
12. KUBÁT, Bohumil, a kol. *Železniční stavby: Projektování. První*. Praha: ŠEL, spol. s.r.o., 1998.
13. NEJEZCHLEB, Mojmir. *Konstrukční vrstvy tělesa železničního spodku modernizovaných tratí* [online]. 2000 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: <http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/1007.pdf>

14. ŠIMEK, Jiří, Ján JESENÁK, Jaroslav EICHLER a Ivan VANÍČEK. *Mechanika zemin*. První. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00428-4.
15. Geoterm.cz: Sluneční energie. [online]. 2008 [cit. 2012-12-04]. Dostupné z: <http://www.geoterm.cz/geotermalni-zdroje/sluneni-zaeni>
16. ČERMÁK, Vladimír, Jan ŠAFANDA, Milan KREŠL a Petr DĚDEČEK. *Geotermika mapuje klimatické změny*. Praha: Geofyzikální ústav AVČR, 2005.
17. Geocore: Geotermika. GEOCORE S.R.O. [online]. 2008 [cit. 2012-10-04]. Dostupné z: <http://www.geocore.cz/geotermie/2.html>
18. SOLIDWORKS. *Nápověda Solidworks* [online]. 1995 [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Fundamentals/Material_Properties.htm?id=90642a7fc6b54e198c1046b57b566452#Pg0
19. TZB. Katalog stavebních materiálů [online]. 2001 [cit. 2012-10-11]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000086_katalog.html
20. KATEDRA DOPRAVNÍHO STAVITELSTVÍ, DFJP, Univerzita Pardubice. *Průběžná zpráva*. Pardubice, 2011

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| tab. 1 Požadované hodnoty modulů přetvárnosti..... | 13 |
| tab. 2 Orientační volba typu pražcového podloží..... | 14 |
| tab. 3 Hodnoty přípustného promrznutí zemin zemní pláně | 18 |
| tab. 4 Porovnání modulu přetvárnosti | 19 |
| tab. 5 Výsledky zkoušky prosévání pro VZOREK 1: | 21 |
| tab. 6 Výsledky zkoušky prosévání pro VZOREK 2: | 21 |
| tab. 7 Výsledky zkoušky určení hustoty pro VZOREK 1: | 22 |
| tab. 8 Výsledky zkoušky určení hustoty pro VZOREK 2: | 22 |
| tab. 9 Dynamická viskozita vody | 23 |
| tab. 10 Výsledky hustoměrné zkoušky pro VZOREK 1 vztažené na hmotnost zkoumaného vzorku | 24 |
| tab. 11 Výsledky hustoměrné zkoušky pro VZOREK 2 vztažené na hmotnost zkoumaného vzorku | 24 |
| tab. 12 Výsledky hustoměrné zkoušky pro VZOREK 1 vztažené na celkovou hmotnost vzorku | 25 |
| tab. 13 Výsledky hustoměrné zkoušky pro VZOREK 2 vztažené na celkovou hmotnost vzorku | 25 |
| tab. 14 Výsledky zkoušky zhutnitelnosti pro VZOREK 1 | 29 |
| tab. 15 Výsledky zkoušky zhutnitelnosti pro VZOREK 2 | 30 |
| tab. 16 Naměřené hodnoty při smykové zkoušce VZOREK 1 | 31 |
| tab. 17 Naměřené hodnoty při smykové zkoušce VZOREK 2..... | 33 |
| tab. 18 Společné hodnoty | 34 |
| tab. 19 Naměřené hodnoty a hodnoty koef. K při zkoušce propustnosti pro VZOREK 1 | 35 |
| tab. 20 Naměřené hodnoty a hodnoty koef. K při zkoušce propustnosti pro VZOREK 2 | 35 |
| tab. 21 Shrnutí výsledků | 35 |
| tab. 22 Výsledky statické zatěžovací zkoušky | 37 |
| tab. 23 Popis lokality - souhrn | 42 |
| tab. 24 Nápravové síly | 52 |
| tab. 25 Počáteční teploty..... | 57 |
| tab. 26 Průběh pokusů | 58 |
| tab. 27 Počáteční teploty..... | 61 |
| tab. 28 Průběh pokusů | 61 |
| tab. 29 Výsledné hodnoty upřesněných veličin..... | 62 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| obr. 1 Typy pražcového podloží dle SŽDC S4..... | 14 |
| obr. 2 Určení ekvivalentních modulů přetvárnosti | 15 |
| obr. 3 Nomogram pro určení ekvivalentního modulu přetvárnosti ze vztahu $E_{e1} : E_1$ | 15 |
| obr. 4 Mapa charakteristických hodnot indexu mrazu I_{mn} [°C.den]..... | 16 |
| obr. 5 Příklad stanovení vodního režimu zemní pláň | 18 |
| obr. 6 Schéma vrstev pražcového podloží..... | 20 |
| obr. 7 Měřicí rám | 36 |
| obr. 8 Umístění zatěžovací desky při zkoušce č. 2..... | 36 |
| obr. 9 Kompletace měřícího zařízení..... | 37 |
| obr. 10 Umístění proti zátěže obr. 11 MPV 22.2..... | 37 |
| obr. 12 Váha KERN 20de60..... | 38 |
| obr. 13 Váha KERN EW600-2M | 38 |
| obr. 14 Analytický síťovací přístroj RETSCH..... | 39 |
| obr. 15 Smykový krabicový přístroj ELE 262112..... | 39 |
| obr. 16 Pěch a hmoždíř..... | 40 |
| obr. 17 Laboratorní sušárna BTM VENTICEL 111..... | 40 |
| obr. 18 Propustoměr MATEST s248..... | 41 |
| obr. 19 – Snímač tlaku – zapojení obr. 20 Tensometr 6/120LY11 HBM | 44 |
| obr. 21 Osazování snímačů tlaku..... | 45 |
| obr. 22 Umístění snímačů tlaku..... | 45 |
| obr. 23 DCM plus HBM | 46 |
| obr. 24 Snímač teploty..... | 47 |
| obr. 25 Ukládání snímačů..... | 47 |
| obr. 26 Umístění snímačů teploty..... | 48 |
| obr. 27 Měřicí stanice Dlog2 | 48 |
| obr. 28 Znázornění zkoumaných míst | 49 |
| obr. 29 Hodnoty naměřených tlaků v jednotlivých místech /20./..... | 52 |
| obr. 31 Rozměry modelu teplotního chování | 54 |
| obr. 32 Rozložení počátečních teplot v modelu | 63 |
| obr. 33 Znázornění zemních tlaků od vlastní tíhy materiálů [kPa] | 67 |
| obr. 34 Znázornění zemních tlaků po zatížení silami [kPa] | 67 |
| obr. 35 Znázornění výsledných hodnot zemních tlaků [kPa]..... | 68 |
| obr. 36 Porovnání experimentálně naměřených hodnot zemních tlaků s hodnotami numericky vypočítanými [kPa] | 70 |

Seznam grafů

| | |
|--|----|
| graf 1 - Výška kapilárního výstupu vody v sat. zemině | 17 |
| graf 2 - Křivky zrnitosti | 26 |
| graf 3 - Zatřídění dle zrnitosti pro VZOREK 1 | 27 |
| graf 4 - Zatřídění dle zrnitosti pro VZOREK 2 | 28 |
| graf 5 - Výsledky zkoušky zhutnitelnosti pro VZOREK 1 | 29 |
| graf 6 - Výsledky zkoušky zhutnitelnosti pro VZOREK 2 | 30 |
| graf 7 - Pracovní diagram smykové zkoušky pro VZOREK 1 | 32 |
| graf 8 - Znázornění smykových napětí v závislosti na vodorovných napětí VZOREK 1 | 32 |
| graf 9 - Pracovní diagram smykové zkoušky pro VZOREK 2 | 33 |
| graf 10 - Znázornění smykových napětí v závislosti na vodorovných napětí VZOREK 2 | 34 |
| graf 11 - Průběh teplot T1 a T2 (210mm pod povrchem) v období od 28.11.2011 do 5.2.2012 | 50 |
| graf 12 - Průběh teplot T1 a T4 (500mm pod povrchem) v období od 28.11.2011 do 5.2.2012 | 50 |
| graf 13 - Průběh teplot T1 a T6 (1010mm pod povrchem) v období od 28.11.2011 do 5.2.2012 | 51 |
| graf 14 - Průběh teplot T1 a T8 (1295mm pod povrchem) v období od 28.11.2011 do 5.2.2012 | 51 |
| graf 15 - Zobrazení teplot působících na spodní vrstvu TŽS | 57 |
| graf 16 - Porovnání experimentálně naměřených hodnot s numericky vypočítanými pro siSa | 59 |
| graf 17 - Přesnější porovnání experimentálně naměřených hodnot s numericky vypočítanými pro siSa | 59 |
| graf 18 - Zobrazení teplot působících na spodní vrstvu TŽS | 60 |
| graf 19 - Porovnání experimentálně naměřených hodnot s numericky vypočítanými pro šterk 32/63 | 62 |
| graf 20 - Teplota, kterou model využívá jako výchozí okolní teplotu (naměřeno v období 5.12.2011 – 18.2.2012) | 64 |
| graf 21 – Numericky vypočítané teploty | 65 |
| graf 22 – Porovnání skutečných teplot s teplotami vypočítanými | 69 |

PŘÍLOHA 1. - Upřesnění hodnot měrné tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti - Grafy

Obsah:

Graf 1. – Prachovitý písek $c = 800\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,5\text{W}/(\text{m.K})$

Graf 2. – Prachovitý písek $c = 800\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,65\text{W}/(\text{m.K})$

Graf 3. – Prachovitý písek $c = 800\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,95\text{W}/(\text{m.K})$

Graf 4. – Prachovitý písek $c = 950\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,5\text{W}/(\text{m.K})$

Graf 5. – Prachovitý písek $c = 950\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,65\text{W}/(\text{m.K})$

Graf 6. – Prachovitý písek $c = 950\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,95\text{W}/(\text{m.K})$

Graf 7. – Štěrk 32/63 $c = 500\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,6\text{W}/(\text{m.K})$

Graf 8. – Štěrk 32/63 $c = 500\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,7\text{W}/(\text{m.K})$

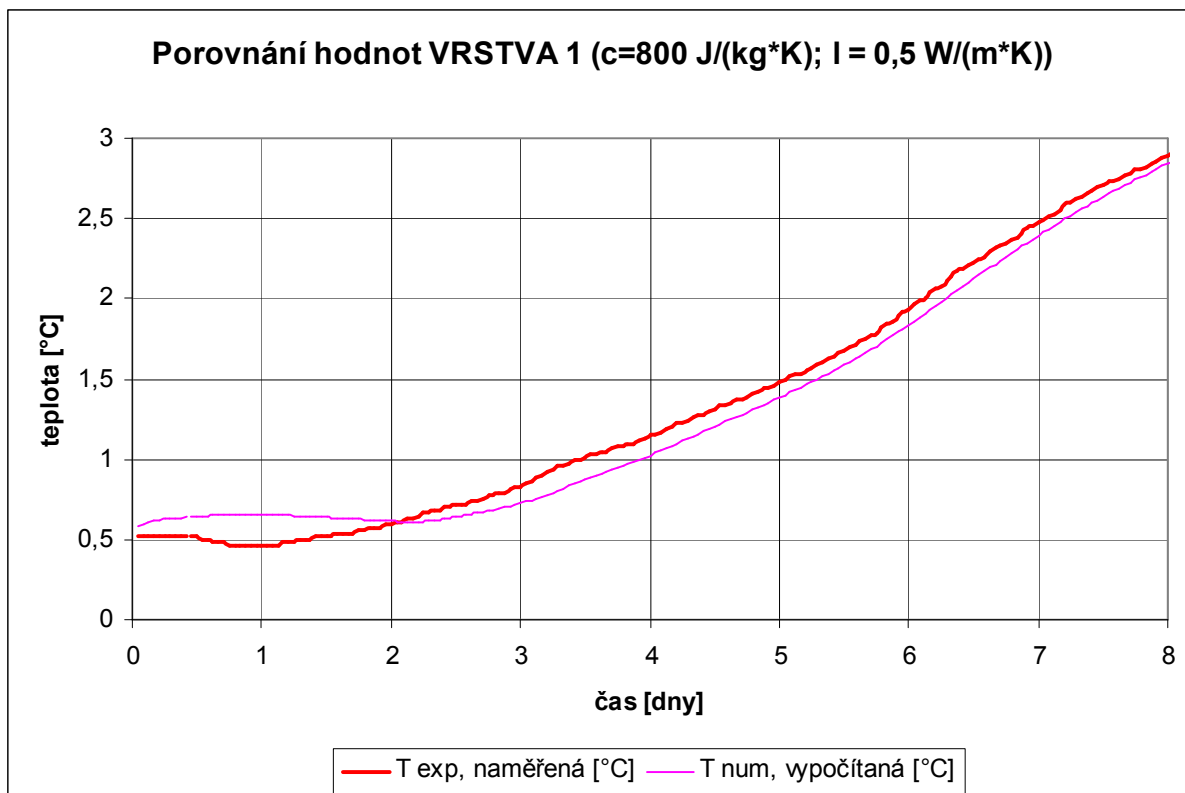
Graf 9. – Štěrk 32/63 $c = 550\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,5\text{W}/(\text{m.K})$

Graf 10. – Štěrk 32/63 $c = 550\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,7\text{W}/(\text{m.K})$

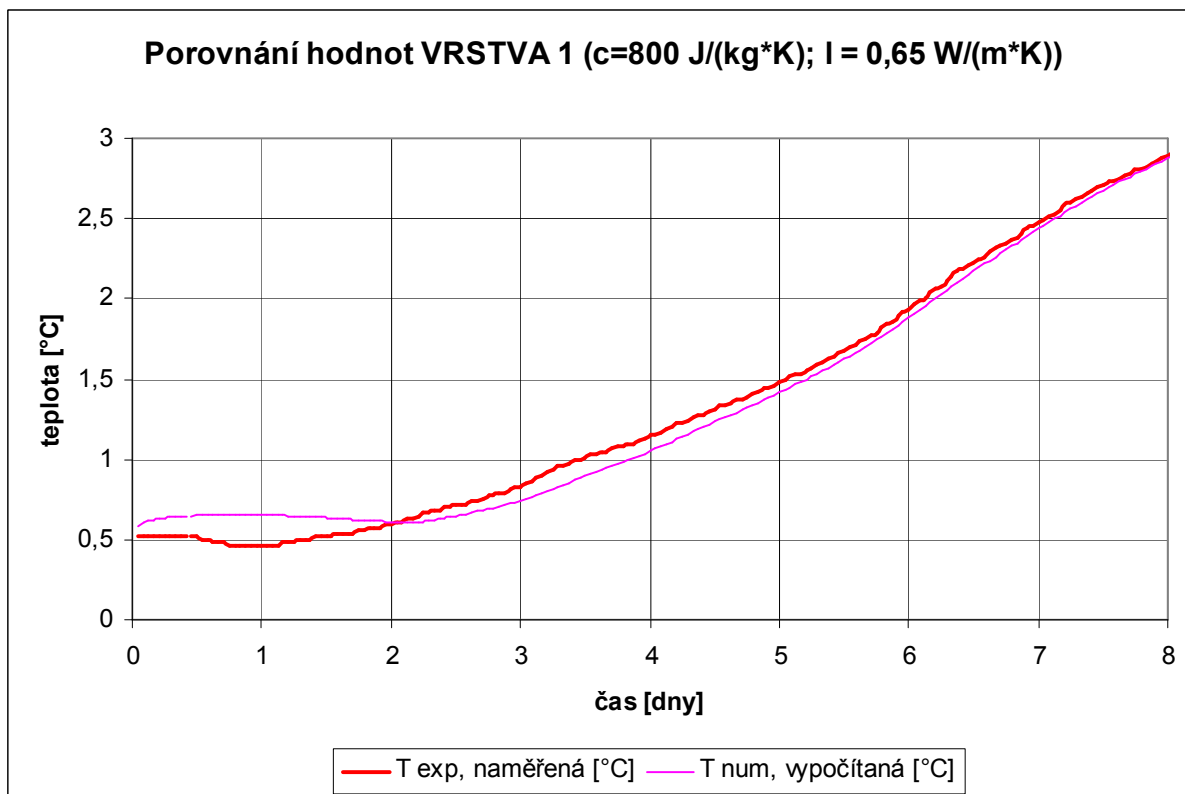
Graf 11. – Štěrk 32/63 $c = 600\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,65\text{W}/(\text{m.K})$

Graf 12. – Štěrk 32/63 $c = 650\text{J}/(\text{kg.K})$; $\lambda = 0,7\text{W}/(\text{m.K})$

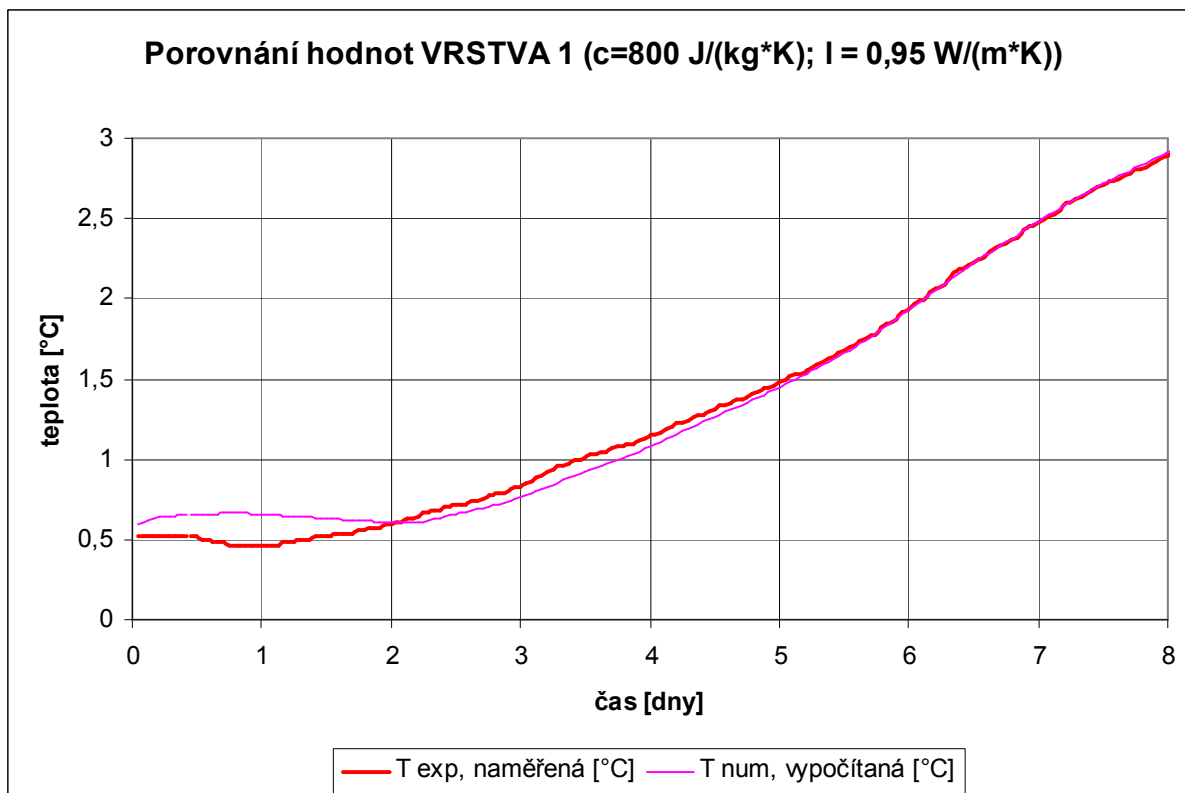
POKUS Č. 1:



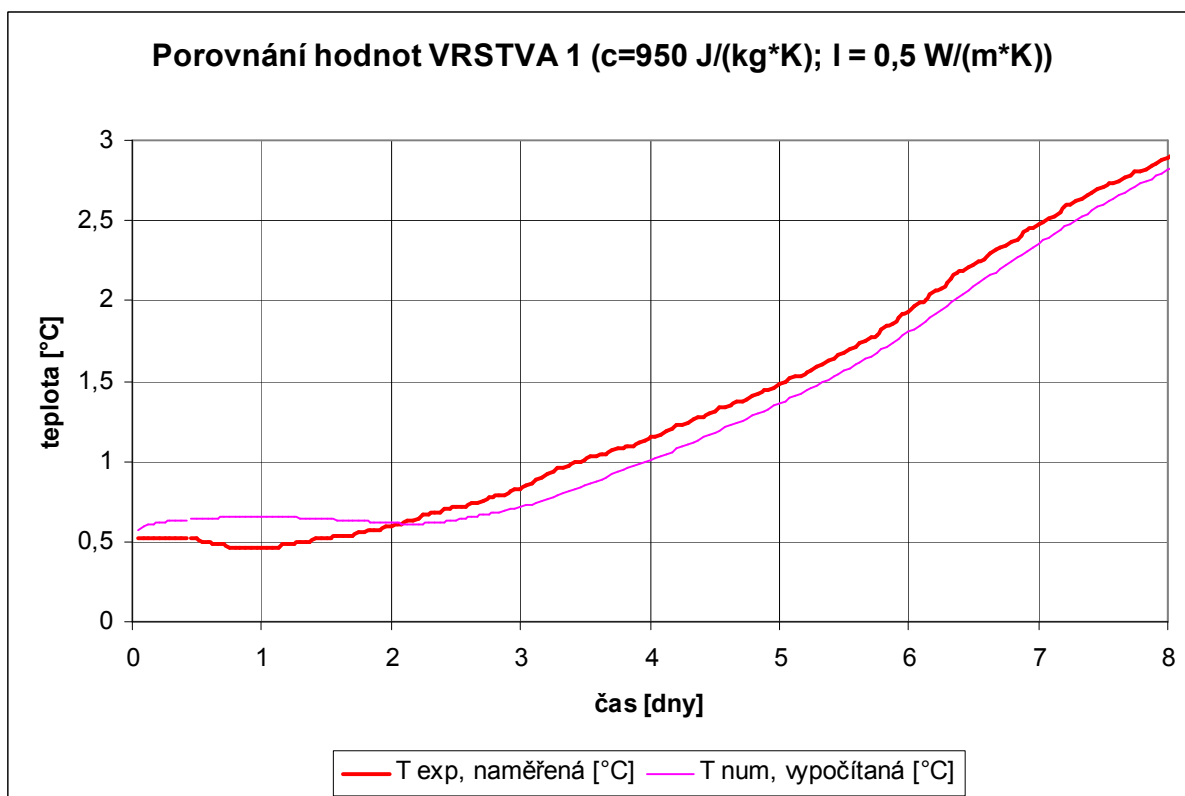
POKUS Č. 2



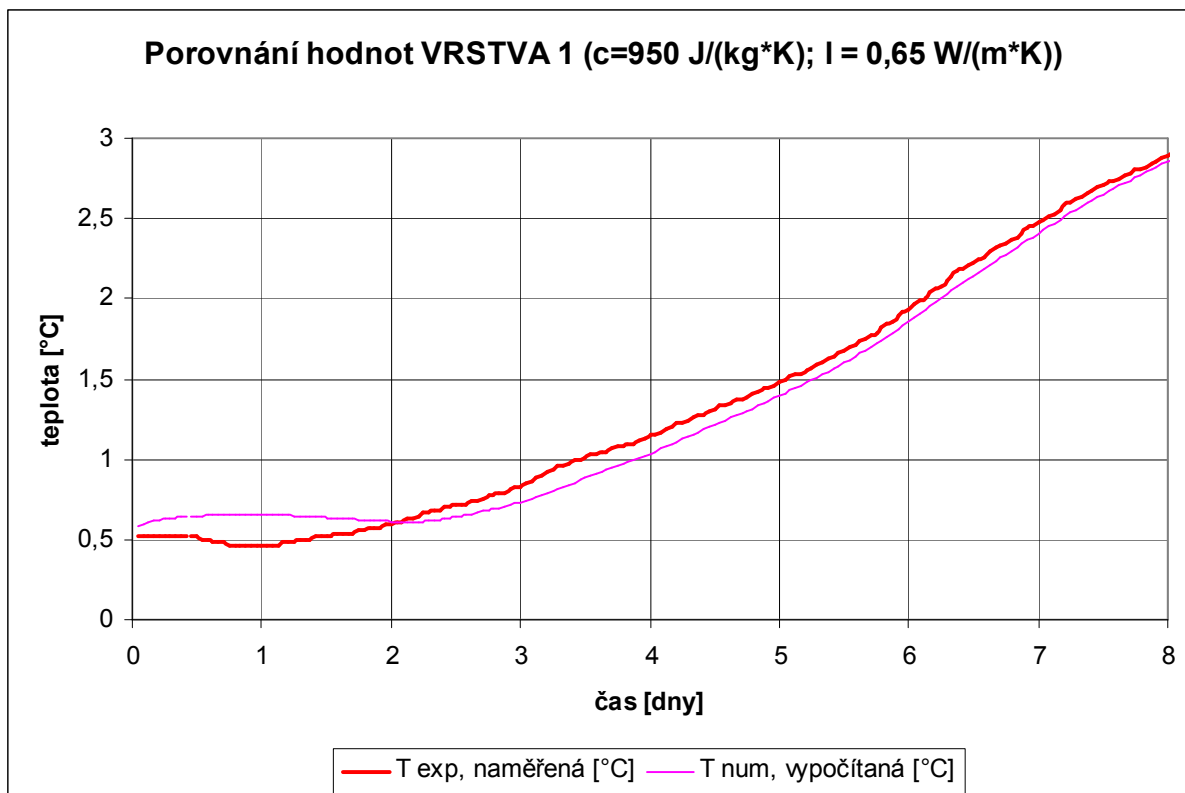
POKUS Č. 3



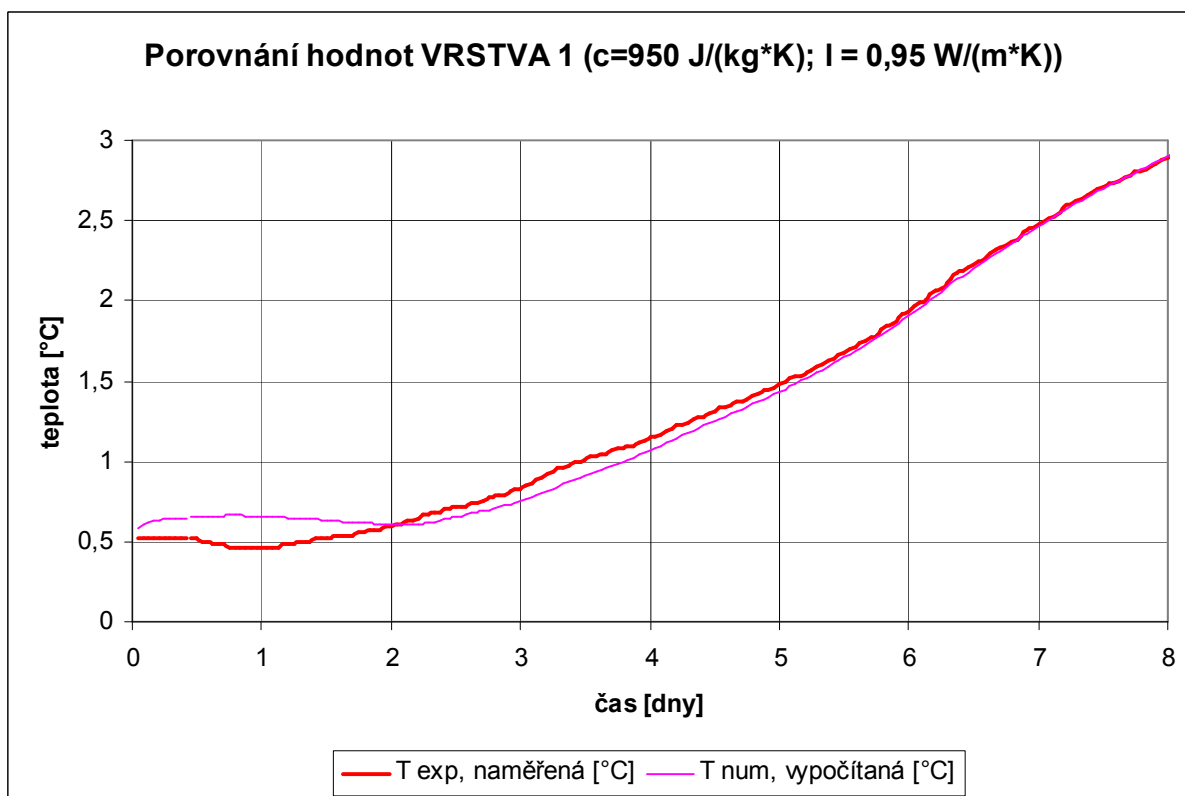
POKUS Č. 4



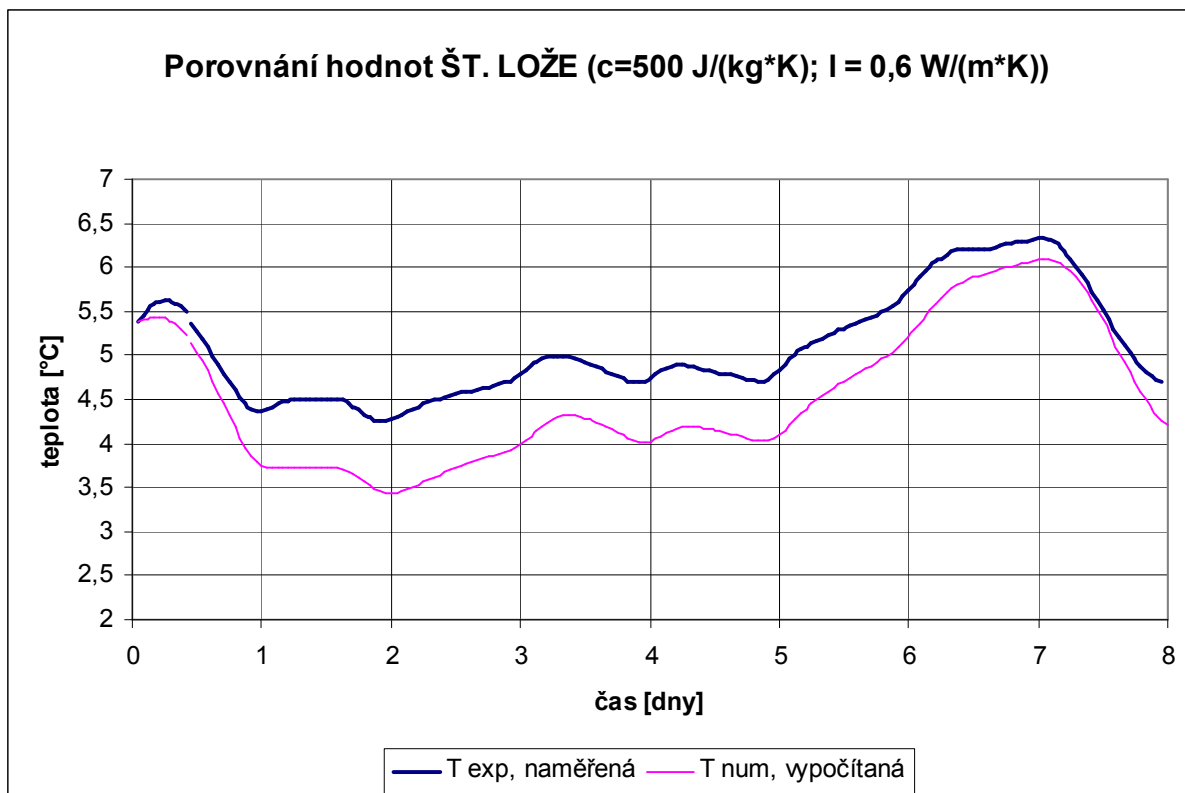
POKUS Č. 5



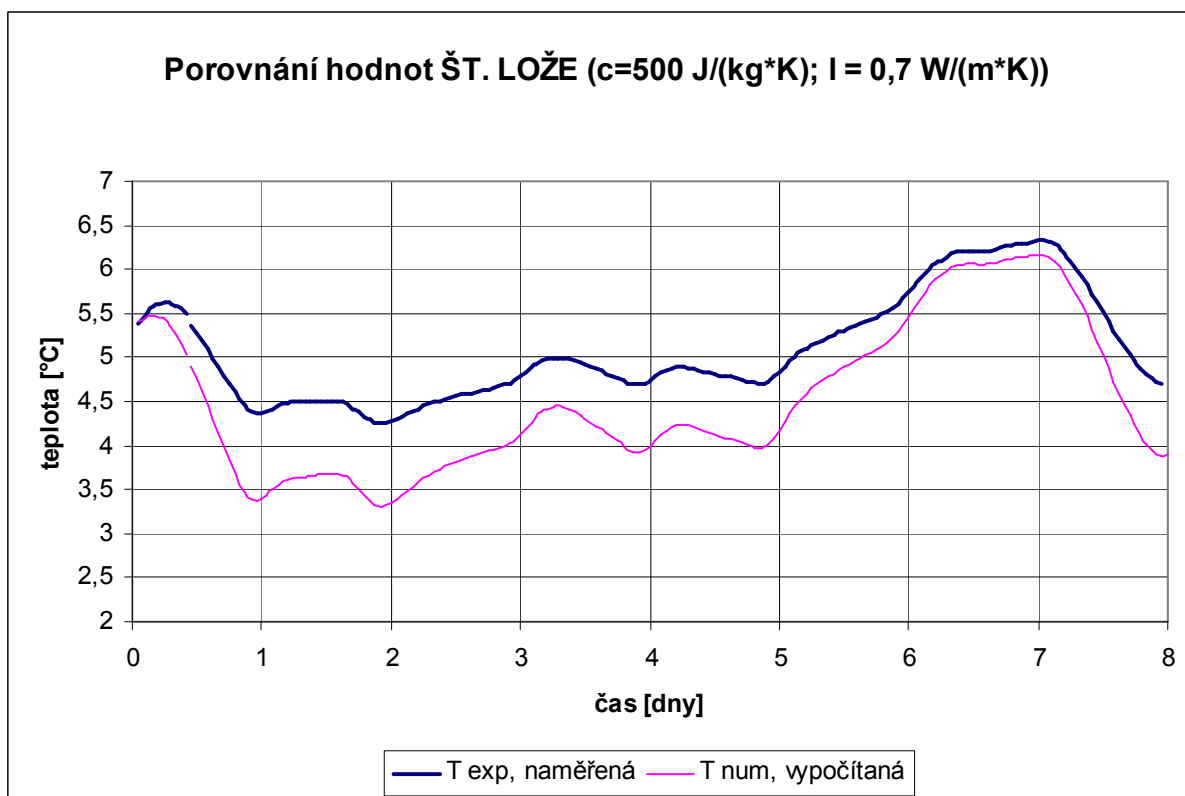
POKUS Č. 6



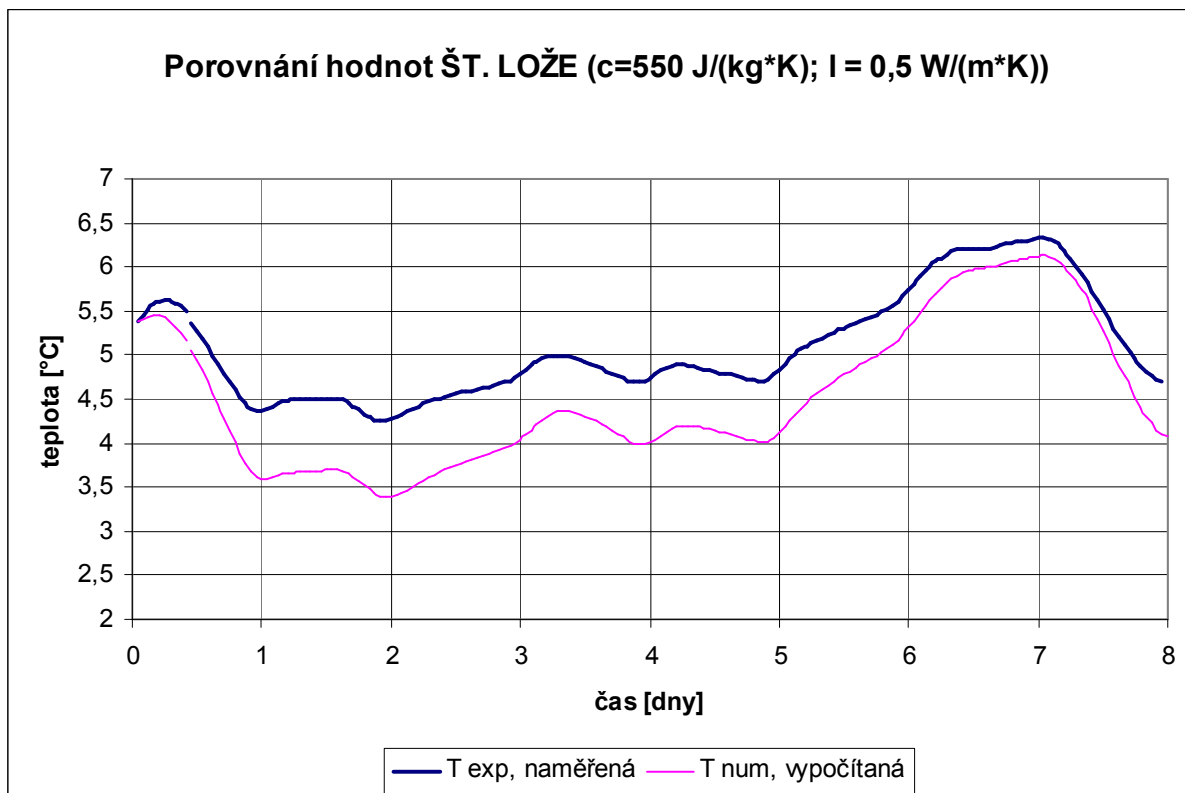
POKUS Č. 1



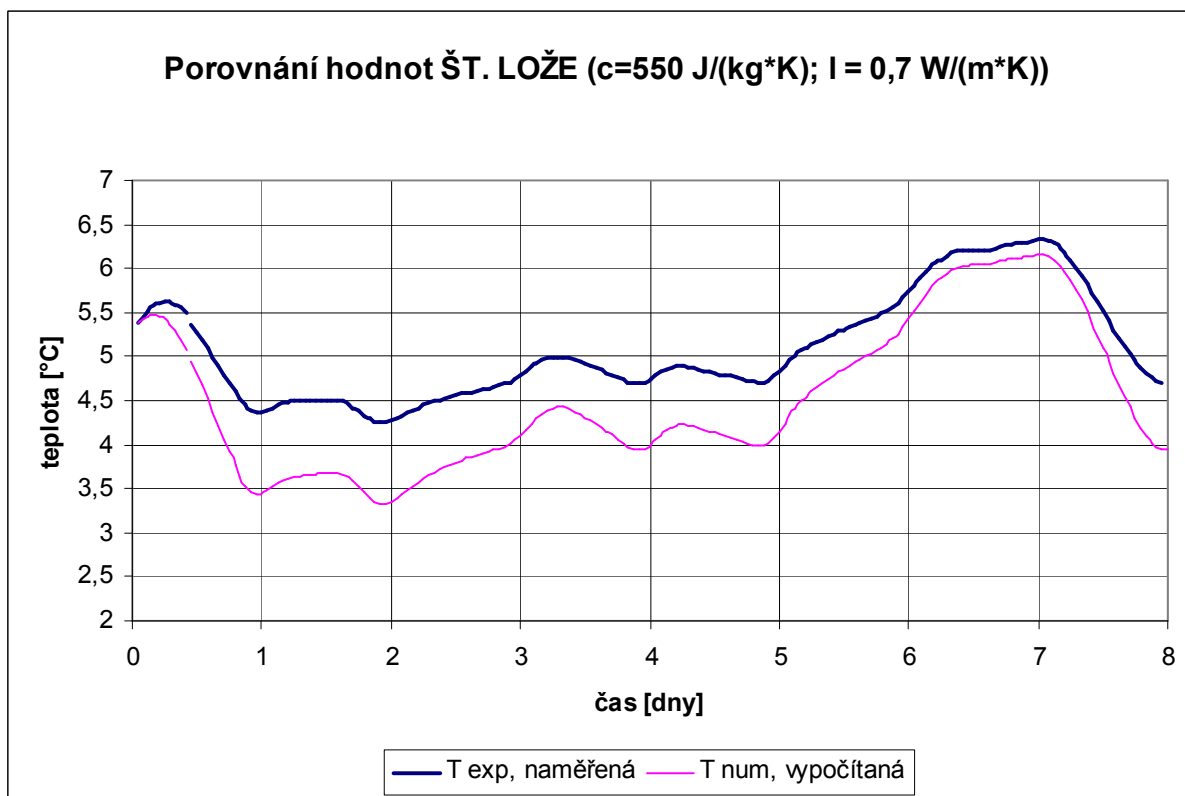
POKUS Č. 2



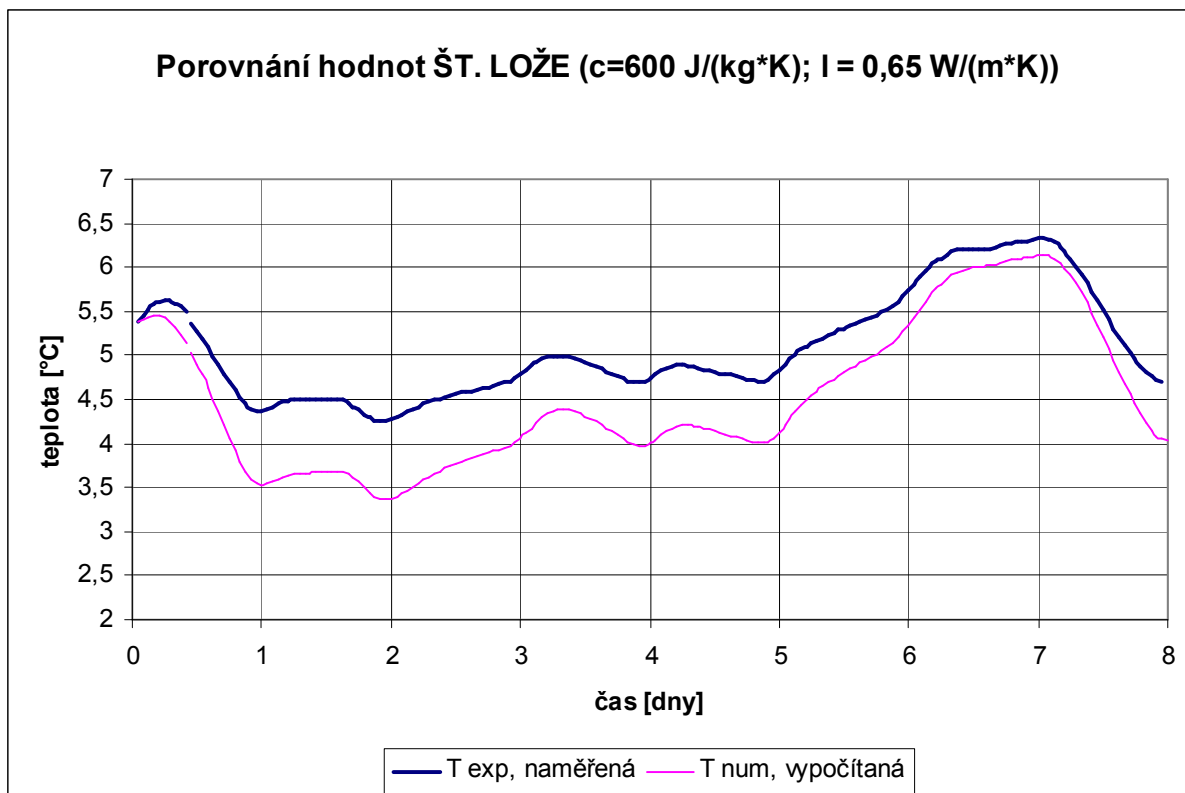
POKUS Č. 3



POKUS Č. 4



POKUS Č. 5



POKUS Č. 6

