



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra železničních staveb

**Porovnání statické zatěžovací zkoušky pro hodnocení
pražcového podloží vysokorychlostních železničních
trati dle francouzské, německé a české metodiky**

Comparison of static plate test for evaluation of
high-speed railway lines substructure according to
French, German and Czech methodology

Diplomová práce

2022

Autor práce:	Jiří Pospíšil
Vedoucí práce:	Leoš Horníček
Studijní program:	Stavební inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce a dopravní stavby

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Pospíšil</u>	Jméno: <u>Jiří</u>	Osobní číslo: <u>468375</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra železničních staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Porovnání statické zatěžovací zkoušky pro hodnocení pražcového podloží vysokorychlostních železničních tratí dle francouzské, německé a české metodiky</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Comparison of static plate test for evaluation of high-speed railway lines substructure according to French, German and Czech methodology</u>	
Pokyny pro vypracování: Diplomová práce bude členěna do části teoretické a praktické. Teoretická část bude zaměřena na popis předpokladů pro provedení statické zatěžovací zkoušky, její průběh a vyhodnocení podle francouzské, německé a české metodiky a jejich vzájemné porovnání. Praktická část bude zahrnovat provedení série porovnávacích statických zatěžovacích zkoušek v experimentálních podmínkách a na reálné stavbě železniční tratě. Zkoušky budou provedeny na vrstvách s různou zrnitostí kameniva, zejména 0-32 a 0-63 mm, s cílem stanovit vzájemné vztahy mezi zkušebními postupy vůči české metodice. Praktická část bude doplněna o vytvoření a verifikaci modelu průběhu statické zatěžovací zkoušky pomocí vhodného softwarového nástroje pro geotechnickou analýzu (doporučen Plaxis).	
Seznam doporučené literatury: ČSN 72 1006. Kontrola zhuštění zemin a sypanin, 2015. SŽ S4. Železniční spodek, 2021. NF P 94-117-1. Sols: reconnaissance et essais - Portance des plates-formes. Partie 1: Module sous chargement statique à la plaque (EV2), 2000. DIN 18134. Baugrund – Versuche und Versuchsgerate – Plattendruckversuch, 2012.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Leoš Horníček, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>22.9.2021</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>3.1.2022</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Porovnání statické zatěžovací zkoušky pro hodnocení pražcového podloží vysokorychlostních železničních tratí dle francouzské, německé a české metodiky** zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů a za odborného vedení diplomové práce Ing. Leoše Horníčka, Ph.D.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30. 12. 2021

Bc. Jiří Pospíšil

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu této práce, Leoši Horníčkoví, za jeho čas, úsilí, odborné zkušenosti i trpělivost, které mi vždy ochotně poskytoval v rámci všech konzultací, diskusí a revizí práce. Stejně tak si zaslouží poděkování i Jan Kos, který mi byl nápomocen při používání geotechnického softwarového nástroje.

Poděkování patří také ostatním zaměstnancům Katedry železničních staveb, kteří se se mnou účastnili porovnávacích experimentálních měření provedených v rámci projektu TA ČR s identifikačním číslem CK02000293 a názvem „Adaptace francouzské metody hodnocení konstrukce pražcového podloží pro vysokorychlostní železniční tratě do podmínek ČR“ řešeného Katedrou železničních staveb, a zaměstnancům kamenolomu ve Zbraslavi, stavební firmy Eurovia CS, a. s., a Správy železnic, s. o., díky kterým mi bylo porovnávací experimentální měření umožněno provést. Zvláštní poděkování bych pak chtěl věnovat Damieniu Mangeasovi ze společnosti EGIS Rail, který mi byl velmi nápomocen při zpřístupnění francouzských technických norem a jiných podkladů týkajících se konstrukce pražcového podloží vysokorychlostních železničních tratí ve Francii.

Anotace

Jedním z celosvětových problémů týkajících se nejen oboru železničního stavitelství je nejednotnost zkušebních postupů, kterými se prověřuje kvalita zhotoveného díla. V oboru železničního stavitelství je to například metodika provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky. Ta se v každé zemi provádí a vyhodnocuje podle místních technických předpisů a norem, což v mnoha případech znamená i odlišný rozměr kruhové zatěžovací desky. Pro záměr výstavby vysokorychlostních železničních tratí v České republice tedy nemohou být požadované hodnoty únosnosti konstrukce pražcového podloží vyjádřené pomocí výsledku statické zatěžovací zkoušky jednoduše převzaty ze zahraničního know-how.

Tato práce je ve své teoretické části zaměřena na podrobný popis provádění a vyhodnocení statické zatěžovací zkoušky dle francouzské, německé a české metodiky a na vzájemné porovnání jednotlivých zkušebních postupů. V teoretické části jsou také zmíněny další zkušební metody pro hodnocení konstrukce pražcového podloží používané u nás i v zahraničí. V rámci praktické části je potom za účelem stanovení vzájemných vztahů mezi výsledky zkoušek vůči statickým zatěžovacím zkouškám dle české metodiky provedena série čtyř porovnávacích experimentálních měření. Praktická část je dále doplněna o vytvoření a verifikaci modelu průběhu statické zatěžovací zkoušky metodou konečných prvků pomocí softwarového nástroje.

Klíčová slova

Statická zatěžovací zkouška, modul přetvárnosti, konstrukce pražcového podloží, míra zhutnění, vysokorychlostní železniční trať, experimentální měření, Plaxis, metoda konečných prvků.

Summary

One of the worldwide problems concerning not only the field of railway structures is the inconsistency of testing procedures, which evaluate the quality of the completed work. In the field of railway structures, it is, for example, the methodology of performing and evaluating the static plate test. In each country, it is performed and evaluated according to local technical regulations and standards, which in many cases also means a different size of the plate. Therefore, the required values of load-bearing capacity of the substructure expressed by the result of the static plate test cannot be simply taken from foreign know-how for the purpose of construction of high-speed railway lines in the Czech Republic.

This work is in its theoretical part focused on a detailed description of performing and evaluating the static plate test according to French, German and Czech methodology and on the mutual comparison of individual test procedures. Further test methods for evaluating the substructure used in the Czech Republic and abroad are also mentioned in the theoretical part. In the practical part, a series of four comparative experimental measurements is performed for the purpose of determination the mutual relations between the test results regarding the static plate tests according to the Czech methodology. The practical part is further supplemented by the creation and verification of a static plate test model by finite element method using a software tool.

Keywords

Static plate test, deformation modulus, railway substructure, degree of soil compaction, high-speed railway line, experimental measurement, Plaxis, finite element method.

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Statická zatěžovací zkouška	2
2.1	Provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky dle české metodiky ..	2
2.2	Provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky dle francouzské metodiky	4
2.3	Provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky dle německé metodiky	7
2.4	Porovnání metodik provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky...	9
3.	Jiné metody hodnocení konstrukce pražcového podloží	12
3.1	Výhody a nevýhody statické zatěžovací zkoušky	13
3.2	Dynamické zkoušky	14
3.3	Automated plate load testing	16
4.	Porovnávací experimentální měření	18
4.1	První měření v kamenolomu Zbraslav	19
4.2	Druhé měření v kamenolomu Zbraslav	23
4.3	Měření na trati v Soběslavi	28
4.4	Měření na trati v Uničově	33
4.5	Souhrn vyhodnocených výsledků statických zatěžovacích zkoušek	38
5.	Vyhodnocení porovnávacích experimentálních měření	41
5.1	Porovnání výsledků statických zatěžovacích zkoušek provedených na stejných materiálech	41
5.2	Obecná analýza výsledků statických zatěžovacích zkoušek	44
5.3	Závěr z vyhodnocení porovnávacích experimentálních měření	54
6.	Modelování statické zatěžovací zkoušky pomocí softwarového nástroje	57
6.1	Popis vlastností modelu	58
6.2	Specifikace okrajových podmínek	60
6.3	Optimalizace materiálových parametrů	63
6.4	Závěrečné shrnutí vlastností a parametrů vytvořeného modelu	66
7.	Závěr	75
	Literatura	77

Seznam příloh

Příloha 1 Protokoly z provedených statických zatěžovacích zkoušek

Příloha 2 Fotografie z porovnávacích experimentálních měření

Seznam použitých zkratk

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (v překladu Americká asociace státních dálničních a přepravních úředníků)
ČSN	Česká technická norma
DIN	Deutsche Industrie-Norme (v překladu německá průmyslová norma)
DK	drcené kamenivo
EN	Evropská norma
NF	norme française (v překladu francouzská norma)
PTŽS	pláň tělesa železničního spodku
SP	subpláň
SZZ	statická zatěžovací zkouška
SŽ	Správa železnic, státní organizace
ŠD	šterkodrt
ZP	zemní pláň
ZSH	zemina stmelená hydraulickým pojivem

1. Úvod

Statická zatěžovací zkouška (dále též SZZ) je v České republice historicky jednou z nejběžnějších metod pro **stanovení únosnosti** pláně tělesa železničního spodku (dále též PTŽS), konstrukčních a podkladních vrstev pražcového podloží, zemní pláně (dále též ZP) a subpláně (dále též SP). Hlavním výsledkem jejího vyhodnocení je modul přetvárnosti, jehož hodnota stanovená při geotechnickém průzkumu na různých úrovních konstrukce pražcového podloží je základním vstupem pro návrh a dimenzování konstrukčních a podkladních vrstev [1].

V České republice se aktuálně na základě usnesení vlády č. 389 z roku 2017, o Programu rozvoje rychlých železničních spojení v České republice, intenzivně pracuje na **přípravě výstavby vysokorychlostních železničních tratí**. Za tímto účelem došlo v letech 2019 až 2020 ke spolupráci Správy železnic, s. o. (dále též SŽ), s francouzskou společností Sociétés nationale des chemins de fer français (v překladu Národní společnost francouzských železnic), která má s projektováním, výstavbou, údržbou a provozem vysokorychlostních železničních tratí již přes 40 let zkušeností, k zpřístupnění francouzského know-how o vysokorychlostních železničních tratích a jeho přizpůsobení českým podmínkám [2]. S tím se však pojí některé sekundární problémy, jako je například SZZ, která se neprovádí a nevyhodnocuje ve všech zemích stejně, ale vždy podle místních technických předpisů, norem a zvyklostí, a proto nemohou být požadované hodnoty modulů přetvárnosti pro české vysokorychlostní železniční tratě jednoduše převzaty z francouzského know-how.

V rámci Programu rozvoje rychlých železničních spojení v České republice se také mezi Českou republikou a Německem připravuje společný přeshraniční úsek vysokorychlostní železniční tratě, který napojí českou vysokorychlostní železniční síť na vysokorychlostní železniční síť v západní Evropě [3]. Záměrem této práce je tedy **vzájemné porovnání metodik provádění a vyhodnocování SZZ podle českých, francouzských a německých technických předpisů, norem a zvyklostí**. Porovnání je provedeno jak z teoretického, tak z praktického hlediska s cílem stanovit vzájemné vztahy mezi zkušebními postupy vůči české metodice.

2. Statická zatěžovací zkouška

Principem SZZ je zatlačení kruhové zatěžovací desky o stanoveném průměru do podloží při předepsaném statickém zatížení. Na základě hodnot předepsaného statického zatížení a změřených hodnot deformace podloží lze následně stanovit deformační charakteristiky podloží. SZZ se tedy u železničních staveb používá zejména k ověření deformačních charakteristik PTŽS, konstrukčních a podkladních vrstev pražcového podloží, ZP, SP, technologických vrstev náspu, základových spár apod., případně jako nepřímá metoda pro stanovení míry zhutnění materiálů [1]. Tato práce je zaměřena zejména na hodnocení deformačních charakteristik PTŽS, konstrukčních a podkladních vrstev pražcového podloží, ZP a SP.

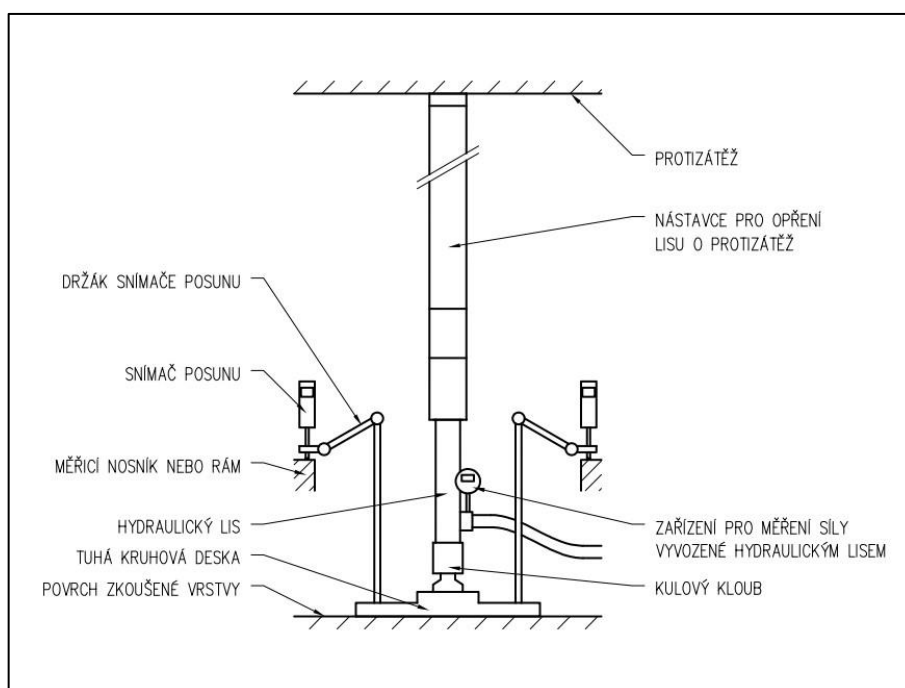
2.1 Provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky dle české metodiky

Provádění a vyhodnocování SZZ na železničních tratích v České republice vlastněných státem se řídí předpisem SŽ S4 [1], přílohou 5. Stejný postup uvádí také norma ČSN 72 1006 [4], příloha B. Používá se kruhová zatěžovací deska o průměru 300 mm, jejíž tuhost je definována normou ČSN 73 6190.

Kruhová zatěžovací deska se usadí na rovný a nenarušený povrch zkoušené vrstvy, případné nerovnosti mohou být vyrovnány tenkou vrstvou ze suchého stejnozrného písku zrnitosti v intervalu 0,1 až 1 mm nebo řídké sádrové kaše. V případě, že je zkoušená vrstva zmrzlá nebo rozbředlá, nebo v případě, že se přímo pod deskou vyskytují zrna větší než 100 mm, se SZZ neprovádí. Po usazení je kruhová zatěžovací deska v poloze rovnoběžné s povrchem zkoušené vrstvy.

Následně je kruhová zatěžovací deska vystrojena zatěžovacím zařízením – hydraulickým lisem a zařízením pro měření jím vyvozené síly, kulovým kloubem zajišťujícím centrické zatížení desky i při jejím nerovnoměrném zatlačení, protizátěží (železniční vůz, naložený nákladní automobil, tuhý rám) a nástavci různých délek pro opření lisu o protizátěž – a měřicím zařízením – snímačem posunu pro měření zatlačení desky v jejím středu a měřicím nosníkem nebo rámem. Snímač posunu pro měření zatlačení desky v jejím středu lze také nahradit třemi snímači posunu se stejnou přesností rozmístěnými rovnoměrně po obvodu desky a držáky snímačů

posunu. Hodnota zatlačení desky v jejím středu se pak stanoví jako aritmetický průměr z hodnot odečítaných na těchto třech snímačích. Sestava zatěžovacího a měřicího zařízení je schematicky zobrazena na obrázku 1. Podpěry protizátěže (například kola nákladního automobilu) musí být od okrajů kruhové zatěžovací desky vzdáleny minimálně 0,750 m, podpěry měřicího nosníku nebo rámu musí být od podpěr protizátěže vzdáleny také minimálně 0,750 m. Po vystrojení se zajistí plné dosednutí jednotlivých částí zatěžovacího zařízení krátkodobým předtížením (maximálně 10 sekund), které nesmí na zkoušenou vrstvu vyvodit větší tlak, než je 20 % největšího kontaktního napětí pod deskou. Po odlehčení a ustálení hodnot zatlačení desky se provede jejich odečtení na snímačích posunu (základní čtení), popřípadě se snímače posunu vynulují.



Obrázek 1: Sestava zatěžovacího a měřicího zařízení pro provádění SZZ

Zatížení probíhá **ve dvou cyklech po čtyřech zatěžovacích a čtyřech odtěžovacích stupních**. Největší kontaktní napětí pod deskou je 0,20 MPa, zatěžovací, resp. odtěžovací stupně jsou tedy 0,05, 0,10, 0,15 a 0,20 MPa, resp. 0,15, 0,10, 0,05 a 0,00 MPa. Na každém zatěžovacím stupni se zatížení udržuje bez kolísání až do ustálení zatlačení desky do podloží (změna hodnoty zatlačení desky během jedné minuty není vyšší než 0,02 mm). Po ustálení zatlačení desky do podloží se v každém zatěžovacím, resp. odtěžovacím stupni odečte hodnota zatlačení desky na snímačích posunu.

Po provedení zkoušky se hodnoty zatlačení desky v každém zatěžovacím, resp. odtěžovacím stupni vynesou do grafu v závislosti na kontaktním napětí pod deskou a vyhodnotí se **moduly přetvárnosti E_1 a E_2 včetně jejich vzájemného poměru E_2/E_1** dle následujících rovnic:

$$E_1 = \frac{1,5 \cdot p \cdot r}{y_1}$$
$$E_2 = \frac{1,5 \cdot p \cdot r}{y_2}$$

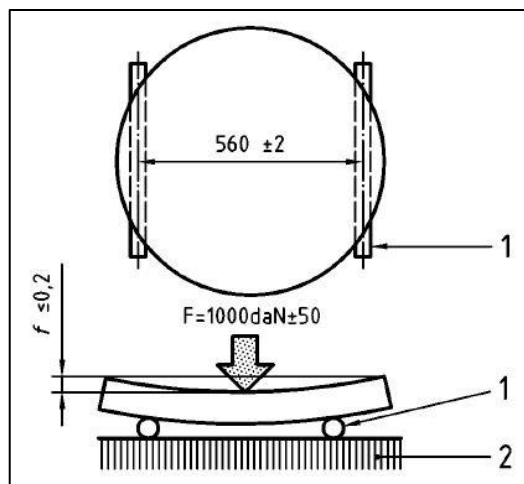
kde je:

- E_1 modul přetvárnosti z prvního zatěžovacího cyklu [MPa],
- E_2 modul přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu [MPa],
- p největší kontaktní napětí pod deskou (0,20) [MPa],
- r poloměr kruhové zatěžovací desky (150) [mm],
- y_1 rozdíl hodnot zatlačení desky před prvním zatěžovacím stupněm prvního cyklu a po ustálení čtvrtého zatěžovacího stupně prvního cyklu [mm],
- y_2 rozdíl hodnot zatlačení desky před prvním zatěžovacím stupněm druhého cyklu a po ustálení čtvrtého zatěžovacího stupně druhého cyklu [mm].

2.2 Provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky dle francouzské metodiky

Provádění a vyhodnocování SZZ ve Francii se řídí normou NF P 94-117-1 [5]. Nejsou v ní však uvedeny požadavky na rozmístění podpěr protizátěže a měřicího nosníku – ty uvádí norma NF P 94-117-3 [6], která řeší stanovení Westergaardova koeficientu (viz kapitola 3). Zároveň je však v této normě uvedeno, že se nevztahuje na konstrukce silničních ani železničních staveb, oproti odpozorované běžné praxi na dopravních stavbách ve Francii se ale tyto požadavky neliší. V dokumentu Mode opératoire CT-2 [7] je zmíněn výpočet modulu přetvárnosti z prvního zatěžovacího cyklu a výpočet poměru modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů nebo také další informace o provádění SZZ (viz níže). Používá se kruhová zatěžovací deska o průměru 600 ± 2 mm. Její tuhost je definována tak, že pod silou $10 \pm 0,5$ kN působící v jejím středu nepřesahuje při podepření dle obrázku 2 hodnota průhybu mezi středem a obvodem desky 0,2 mm. Odkazová čára 1 ukazuje na polotuhé ocelové válce o průměru 20 ± 1 mm, odkazová

čára 2 na objekt s tuhostí srovnatelnou s tuhostí betonového bloku s rozměry půdorysu přibližně 1 m na každé straně a výškou přibližně 0,5 m. Tolerance hladkosti povrchu horní strany desky je ± 1 mm.



Obrázek 2: Požadavek na tuhost kruhové desky o průměru 600 mm [5]

Před usazením kruhové zatěžovací desky se na zkoušenou vrstvu rozprostře tenká vrstva zrnitého materiálu frakce 0/2, a to i v případě, že ve zkoušené vrstvě nejsou žádné nerovnosti. Tím se zajistí dokonalý kontakt mezi zkoušenou vrstvou a zatěžovací deskou v celé její ploše.

Po usazení kruhové zatěžovací desky je na ni instalována reakční hmota tak, aby bod působení síly na reakční hmotě byl nad středem zatěžovací desky. Reakční hmota musí umožnit zatížení na desku nejméně 80 kN a veškeré její záchytné body na terénu musí být vzdáleny minimálně 0,900 m od okraje zatěžovací desky. Reakční hmotu může tedy obdobně jako u české metodiky tvořit hydraulický lis, kulový kloub, protizátěž a nástavce různých délek pro opření lisu o protizátěž. Společně s reakční hmotou je na kruhovou zatěžovací desku umístěno také zařízení pro měření zatížení působícího na desku (obdobně jako u české metodiky lze použít zařízení pro měření síly vyvozené hydraulickým lisem) a zařízení pro měření zatlačení desky. To musí umožnit měření zatlačení desky s přesností 0,02 mm a jeho měřicí rozsah musí být alespoň 10 mm. Obdobně jako u české metodiky může být tvořeno snímačem posunu pro měření zatlačení desky v jejím středu nebo třemi snímači posunu rozmístěnými rovnoměrně po obvodu desky a jejich držáky a měřicím nosníkem nebo rámem. Podpěry měřícího nosníku nebo rámu musí být vzdáleny minimálně 1,200 m od okraje desky. Následně se

zajistí plné dosednutí všech částí reakční hmoty vznesením zatížení $5 \pm 0,5$ kN na kruhovou zatěžovací desku po dobu 10 až 15 sekund. Po odtížení a ustálení hodnot zatlačení desky se vynulují, popřípadě zapnou zařízení pro měření zatlačení desky.

Zatížení desky probíhá **ve dvou cyklech, které nejsou rozděleny na jednotlivé stupně**. V prvním cyklu dochází k postupnému zvyšování síly působící na zatěžovací desku z 0 na $70,68 \pm 1,40$ kN po dobu minimálně 30 sekund. Tato síla vytváří pod kruhovou zatěžovací deskou kontaktní napětí 0,25 MPa a udržuje se až do ustálení zatlačení desky (změna hodnoty zatlačení desky se během 15 sekund změní o maximálně 0,02 mm). Po ustálení zatlačení desky se ze snímačů posunu odečte hodnota zatlačení desky e_1 a po dobu maximálně pět sekund se provede její odtížení na hodnotu 0 kN. Ze snímačů posunu se následně odečte hodnota zatlačení desky z_0 (opět až po jejich ustálení). Ve druhém cyklu dochází opět k postupnému zvyšování síly působící na zatěžovací desku stejnou rychlostí, ale tentokrát pouze z 0 na $56,54 \pm 1,10$ kN. Tato síla vytváří pod kruhovou zatěžovací deskou kontaktní napětí 0,20 MPa a opět se udržuje až do ustálení zatlačení desky. Po ustálení zatlačení desky se ze snímačů posunu odečte hodnota zatlačení desky z_1 a dojde k jejímu odtížení.

Po provedení zkoušky se dle následujících rovnic, které vycházejí z Boussinesqova vzorce, vyhodnotí **moduly EV_1 a EV_2 včetně jejich vzájemného poměru k** :

$$EV_1 = \frac{112,5}{e_1}$$

$$EV_2 = \frac{90}{z_2}$$

$$k = \frac{EV_2}{EV_1}$$

kde je:

EV_1 modul při statickém zatížení deskou prvního zatěžovacího cyklu [MPa],

EV_2 modul při statickém zatížení deskou druhého zatěžovacího cyklu [MPa],

e_1 zatlačení desky způsobené prvním zatěžovacím cyklem,

z_2 zatlačení desky způsobené druhým zatěžovacím cyklem, $z_2 = z_1 - z_0$ [mm].

2.3 Provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky dle německé metodiky

Provádění a vyhodnocování SZZ v Německu se řídí normou DIN 18134 [8]. Používá se kruhová zatěžovací deska o průměru 300 mm, v odůvodněných případech lze použít i desku o průměru 600 nebo 762 mm. Pro desku o průměru 300 mm platí, že má být vyrobena z oceli S235 J0 podle normy DIN EN 10025-1 a její tloušťka má být minimálně 25 mm.

Kruhová zatěžovací deska se usadí vodorovně na urovnaný povrch zkušební místo a musí plně a bez dutin dosedat. Nerovnosti pod deskou mohou být vyrovnány sádrovou kaší nebo tenkou vrstvou ze suchého stejnozrnného písku. Povrch zkoušené vrstvy nesmí být zmrzlý, rozbředlý nebo jinak poškozený. Pokud je povrch mechanicky porušený, musí se zkouška provádět až po opatrném odstranění porušené vrstvy. Objemová hmotnost zeminy musí zůstat v maximální míře zachována.

Následně je kruhová zatěžovací deska vystrojena (obdobně jako u české metodiky) zatěžovacím a měřicím zařízením. Přesnost snímačů posunu pro měření zatlačení desky je vyžadována 0,01 mm, požadovaná přesnost zařízení pro měření síly vyvozené mezi hydraulickým lisem a protizátěží je stanovena na 1 % nejvyššího zatížení při zkoušce. Podpěry protizátěže mají být od okrajů kruhové zatěžovací desky vzdáleny minimálně 0,750 m pro desku o průměru 300 mm, resp. 1,100 m pro desku o průměru 600 mm, resp. 1,300 m pro desku o průměru 762 mm. Podpěry měřicího nosníku nebo rámu mají být od středu kruhové zatěžovací desky vzdáleny minimálně 1,500 m. Po vystrojení se zajistí plné dosednutí jednotlivých částí zatěžovacího zařízení krátkodobým předtížením po dobu přibližně 30 sekund, které vyvodí kontaktní napětí pod deskou o velikosti 0,01 MPa v případě použití desky o průměru 300 nebo 600 mm, resp. 0,005 MPa v případě použití desky o průměru 762 mm. Následně se deska úplně odlehčí a po ustálení zatlačení desky se snímače posunu vynulují, popřípadě zapnou.

Zatížení probíhá **ve dvou cyklech po alespoň šesti zatěžovacích a alespoň třech odtěžovacích stupních**. Největší kontaktní napětí pod deskou v prvním cyklu při použití desky o průměru 300 mm, resp. 600 mm, resp. 762 mm je 0,50 MPa, resp. 0,25 MPa, resp. 0,20 MPa, ve druhém cyklu je největší kontaktní napětí pod deskou stejné jako v předposledním zatěžovacím stupni prvního cyklu. V případě, že zatlačení desky

v některém ze zatěžovacích stupňů prvního cyklu přesáhne hodnotu 5 mm, resp. 8 mm, resp. 13 mm, je za hodnotu největšího kontaktního napětí pod deskou považována hodnota dosažená právě v tomto zatěžovacím stupni. Zatěžovací stupně mají být tvořeny přibližně stejně velkými intervaly, odtěžovací stupně jsou 50, 25 a 0 % největšího kontaktního napětí pod deskou. Na každém zatěžovacím stupni se zatížení udržuje bez kolísání až do ustálení zatlačení desky do podloží (dvě minuty od dosažení hodnoty kontaktního napětí pod deskou v daném zatěžovacím, resp. odtěžovacím stupni). Po ustálení zatlačení desky do podloží se v každém zatěžovacím, resp. odtěžovacím stupni odečte hodnota zatlačení desky na snímačích posunu.

Po provedení zkoušky se metodou nejmenších čtverců pro každý z cyklů zatížení určí **koeficienty** a_0 , a_1 a a_2 tak, aby hodnota zatlačení desky a hodnota kontaktního napětí pod deskou v každém zatěžovacím stupni odpovídala rovnici (polynomu druhého stupně) odpovídající regresní křivce jednoho z cyklů zatížení, přičemž hodnoty, kdy je zatlačení desky nulové, jsou z výpočtu vypuštěny:

$$s = a_0 + a_1 \cdot \sigma + a_2 \cdot \sigma^2$$

kde je:

s zatlačení zatěžovací desky [mm],

σ kontaktní napětí pod deskou [MPa],

a_0, a_1, a_2 parametry regresní křivky daného zatěžovacího cyklu [mm, mm·MPa⁻¹, mm·MPa⁻²].

Moduly přetvárnosti každého ze zatěžovacích cyklů se pak spočítají podle následující rovnice:

$$E_V = \frac{1,5 \cdot r}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{max}}$$

kde je:

E_V modul přetvárnosti z daného zatěžovacího cyklu (E_{V1}, E_{V2}) [MPa],

σ_{max} maximální kontaktní napětí pod deskou v daném zatěžovacím cyklu [MPa],

r poloměr zatěžovací desky [mm],

a_1, a_2 parametry regresní křivky daného zatěžovacího cyklu [mm·MPa⁻¹, mm·MPa⁻²].

V porovnání s německou metodikou uvádí velmi podobný postup také norma ČSN 72 1006 [4], příloha A, kterou se řídí provádění a vyhodnocování **SZZ na pozemních**

komunikacích v České republice. Liší se jen v několika málo ohledech (dále upřesněno), které mají na výsledek zkoušky buď žádný, nebo jen nepatrný vliv. Oproti německé metodice je dle metodiky používané na pozemních komunikacích v České republice vyžadováno, aby se přímo pod deskou nevyskytovala zrna větší než čtvrtina průměru desky, a také je definována zrnitost stejnozrnitého písku v intervalu 0,1 až 1 mm (stejně jako u české metodiky) používaného pro vyrovnání nerovností pod deskou. Jsou stanoveny jiné požadavky na umístění podpěr měřicího nosníku – ty by měly být vzdáleny od okraje desky minimálně 0,750 m v případě desky o průměru 300 mm, resp. minimálně 1,100 m v případě desky o průměru 600 mm, resp. minimálně 1,300 m v případě desky o průměru 762 mm. U německé metodiky není hodnota kontaktního napětí pod deskou při krátkodobém předtížení pro všechny průměry zatěžovacích desek vždy stejná, u metodiky používané na pozemních komunikacích v České republice však je a činí 0,01 MPa. Jednotná pro všechny průměry desek je také hodnota zatlačení desky, při jejímž dosažení se má upravit hodnota největšího kontaktního napětí pod deskou v prvním zatěžovacím cyklu. Je stanovena na 7 mm. Spíše podružnou odlišností je pak jiná zvyklost v označování měřených a vyhodnocovaných veličin. Kontaktní napětí pod deskou se namísto symbolem σ označuje symbolem p (obdobně místo σ_{\max} se používá p_{\max}), zatlačení desky se namísto symbolem s označuje symbolem y a moduly přetvárnosti v jednotlivých zatěžovacích cyklech se namísto symbolem E_v (E_{v1} , E_{v2}) označují symbolem E_{def} ($E_{\text{def},1}$, $E_{\text{def},2}$). Tato práce se však metodikou používanou na pozemních komunikacích v České republice dále nezabývá.

2.4 Porovnání metodik provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky

Zatímco v České republice a v Německu se pro SZZ standardně používá kruhová zatěžovací deska o **průměru 300 mm**, ve Francii se jedná o **průměr 600 mm**. S tím souvisí také náročnost na urovnání desky do vodorovné polohy a na její přesné umístění do zkoušeného místa. Česká a německá metodika také pro urovnání desky připouští použití sádrové kaše, při provádění SZZ dle francouzské metodiky je možné použít pouze vyrovnávací vrstvu z písku, na jehož frakci je ovšem požadavek mírně benevolentnější než v případě české a německé metodiky. S rozměrem kruhové zatěžovací desky také

souvisí její hmotnost. Zatímco desku o průměru 300 mm zvládne bez problému umístit a urovnat, popřípadě přenést, jeden člověk, pro desku o průměru 600 mm je již vhodnější obsluha dvou lidí.

Kontaktní plocha kruhové zatěžovací desky o průměru 300 mm je 70 686 mm², desky o průměru 600 mm pak 282 743 mm², tedy čtyřikrát více. To je hlavní příčinou různorodosti požadavků na protizátěž použitou při provádění SZZ dle různých metodik. Při provádění SZZ dle české metodiky dochází při největším kontaktním napětí pod deskou 0,20 MPa k vyvození síly mezi protizátěží a hydraulickým lisem $F = 0,20 \cdot 70\,686 \text{ N} = 14,14 \text{ kN}$. U německé metodiky je největší kontaktní napětí pod deskou 0,50 MPa a síla vyvozená mezi protizátěží a hydraulickým lisem $F = 0,50 \cdot 70\,686 \text{ N} = 35,34 \text{ kN}$, u francouzské metodiky je největší kontaktní napětí 0,25 MPa a síla vyvozená mezi protizátěží a hydraulickým lisem $F = 0,25 \cdot 282\,743 \text{ N} = 70,68 \text{ kN}$ (což souhlasí s hodnotou síly uvedené v kapitole 2.2 a v normě [5]). Použitá protizátěž tedy musí být taková, aby zajistila bezpečný průběh SZZ a při provádění SZZ nedošlo k jejímu nadzvednutí (u francouzské metodiky je podle normy [5] vyžadována protizátěž dokonce 80 kN, viz kapitola 2.2). Zatímco tedy u české metodiky jako protizátěž dokáže spolehlivě posloužit například motorový univerzální vozík nebo nákladní automobil, u německé nebo francouzské metodiky se na takovou protizátěž nelze spolehnout. Zkušenost francouzských stavebních firem, která mi byla předána, když jsem se v létě roku 2021 účastnil pracovní stáže ve Francii, je taková, že pro provedení SZZ dle francouzské metodiky je zapotřebí alespoň čtyřnápravový nákladní automobil plně naložený vhodnou sypaninou.

Rozdílné postupy při provádění SZZ dle různých metodik mají vliv na **celkovou dobu provedení zkoušky**. Zatímco u české a německé metodiky je v každém zatěžovacím, resp. odtěžovacím stupni potřeba trpělivě vyčkat na ustálení hodnoty zatlačení desky, u francouzské metodiky zatížení, resp. odtížení desky po jednotlivých stupních neprobíhá. Provedení SZZ dle české či německé metodiky tedy zpravidla zabere 30 až 45 minut, SZZ dle francouzské metodiky se dá bez problému stihnout během 10 až 15 minut.

Patrně největší vliv na výsledek zkoušky v daném místě má **způsob jejího vyhodnocení**. U české metodiky se vyhodnocují moduly přetvárnosti z obou zatěžovacích cyklů, přičemž do výpočtu vstupují pouze hodnoty zatlačení desky

při největším a nejmenším kontaktním napětí pod deskou. To samé platí také pro francouzskou metodiku. U obou metodik se pro další analýzu konstrukce pražcového podloží také vyhodnocuje poměr modulů přetvárnosti jednotlivých zatěžovacích cyklů. U německé metodiky se rovněž vyhodnocují moduly přetvárnosti z obou zatěžovacích cyklů, ovšem do výpočtu vstupují také parametry a_1 a a_2 , které vystihují tvar regresních křivek jednotlivých zatěžovacích cyklů. Vyhodnocené moduly přetvárnosti tedy popisují průběh chování zkoušeného materiálu po celou dobu zatěžovacích cyklů.

Spíše podružným rozdílem je pak také zvyklost **označování výsledných modulů přetvárnosti** z jednotlivých zatěžovacích cyklů. U české metodiky se jednotlivé moduly přetvárnosti označují E_1 a E_2 , u francouzské je to EV_1 a EV_2 a u německé E_{V1} a E_{V2} . Tato skutečnost však nemá na průběh ani výsledek zkoušek žádný vliv a jedná se pouze o zvyklost, značení jednotlivých veličin může být samozřejmě dle vlastní vůle zaměněno.

Výše uvedené odlišnosti jednotlivých metodik provádění a vyhodnocování SZZ jsou přehledně uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Porovnání metodik provádění a vyhodnocování statické zatěžovací zkoušky

	Česká metodika	Francouzská metodika	Německá metodika
Průměr desky [mm]	300	600	300 ^a
Kontaktní plocha desky [mm ²]	70 686	282 743	70 686 ^b
Největší kontaktní napětí pod deskou [MPa]	0,20	0,25	0,50 ^c
Největší síla vyvozená mezi protizátěží a hydraulickým lisem [kN]	14,14	70,68 ^d	35,34 ^e
Přibližná délka trvání zkoušky	30 až 45 minut	10 až 15 minut	30 až 45 minut
Označení výsledných modulů přetvárnosti	E_1, E_2	EV_1, EV_2	E_{V1}, E_{V2}

^a V odůvodněných případech lze použít desku o průměru 600 mm nebo 762 mm.

^b V případě desky o průměru 600 mm je její kontaktní plocha 282 743 mm², v případě desky o průměru 762 mm je její kontaktní plocha 456 037 mm².

^c Při velkém zatlačení desky lze hodnotu největšího kontaktního napětí (a tedy i síly vyvozené mezi protizátěží a hydraulickým lisem) upravit.

^d Podle normy [5] je pro protizátěž vyžadována hodnota 80 kN.

^e V případě desky o průměru 600 mm je největší síla vyvozená mezi protizátěží a hydraulickým lisem 141,37 kN, v případě desky o průměru 762 mm je největší síla vyvozená mezi protizátěží a hydraulickým lisem 228,02 kN.

3. Jiné metody hodnocení konstrukce pražcového podloží

Podle předpisu SŽ S4 [1] lze metody zjišťování kvality tělesa železničního spodku (a tedy i metody hodnocení konstrukce pražcového podloží) rozdělit do tří základních skupin:

- metody pro stanovení deformačních charakteristik tělesa železničního spodku,
- metody pro stanovení míry zhutnění jednotlivých konstrukčních částí tělesa železničního spodku,
- metody pro klasifikaci zemin a materiálů a posouzení jejich vhodnosti.

Deformačními charakteristikami tělesa železničního spodku se de facto rozumí jeho únosnost, resp. odolnost proti vnějšímu zatížení. Jde o to, jakou reakci v podobě jeho deformace vyvolá jeho silové zatížení o předepsané hodnotě. Tato únosnost se vyjadřuje modulem přetvárnosti stanoveném na základě vyhodnocení SZZ, zároveň je v předpisu [1] stanoveno, že jedinou správnou metodou pro stanovení deformačních charakteristik tělesa železničního spodku na tratích SŽ je provedení SZZ a její vyhodnocení, ostatní zkoušky se považují pouze za orientační a připouští se pouze v odůvodněných případech.

Co se týče **metod pro stanovení míry zhutnění** jednotlivých konstrukčních částí tělesa železničního spodku, ty se podle normy ČSN 72 1006 [4] dále dělí na metody přímé a nepřímé. **Přímými metodami** se míra zhutnění stanovuje na základě poměru mezi zjištěným zhutněním příslušné vrstvy a maximálně dosažitelným zhutněním stejného materiálu v laboratoři. Prakticky se tedy u nestmelených materiálů jedná o stanovení parametru D nebo C , které využívají vlastností Proctorovy křivky (největší míry zhutnění lze dosáhnout při optimální hodnotě vlhkosti [9]), nebo stanovení indexu relativní ulehlosti I_D , který porovnává zjištěnou objemovou hmotnost příslušné vrstvy s minimální a maximální dosažitelnou objemovou hmotností zjištěnou v laboratoři. **Nepřímými metodami** stanovení míry zhutnění se rozumí takové metody, které využívají závislosti míry zhutnění na jiných fyzikálních vlastnostech než na objemové hmotnosti materiálu, a jsou využívány zejména tehdy, kdy jsou v polních podmínkách snadněji nebo i přesněji zjistitelné. Jejich výsledky jsou však závislé na dalších parametrech, jako například na typu a vlhkosti materiálu nebo tloušťce zkoušené vrstvy, a proto je

potřeba vždy zohlednit vhodnost použití příslušné metody v daných podmínkách. Mezi nepřímé metody stanovení míry zhutnění lze zařadit například právě SZZ, kdy se ke zhodnocení využívá výsledek poměru modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů, nebo různé dynamické zkoušky (viz další odstavce) [1], [4].

V případě **metod pro klasifikaci zemin a materiálů a posouzení jejich vhodnosti** se jedná o laboratorní stanovení jejich materiálových vlastností, jako například určení jejich vlhkosti, zrnitosti, obsahu jemných částic nebo konzistenčních mezí. Výsledky nadále slouží ke klasifikaci zeminy podle předpisu SŽ S4 [1], přílohy 10 nebo jiných technických předpisů či norem a k posouzení její vhodnosti na základě odborné literatury nebo zkušeností [1].

3.1 Výhody a nevýhody statické zatěžovací zkoušky

SZZ je historicky referenční zkouškou pro dimenzování konstrukce pražcového podloží. Hlavní její výhodou je, že **velikost zatížení podloží kruhové zatěžovací desky v průběhu zkoušky odpovídá reálnému zatížení** konstrukce pražcového podloží při průjezdu vlaku. Při jiných destruktivních zkouškách není takového zatížení zdaleka dosaženo [1], [10]. Z praktického hlediska však má SZZ několik nevýhod.

První její velkou nevýhodou v porovnání s ostatními metodami hodnocení konstrukce pražcového podloží je její **časová náročnost** (viz tabulka 1), a to i v případě francouzské metodiky. Při běžném tempu se počet zkoušek provedených během jedné hodiny pohybuje v řádu jednotek (konkrétní číslo závisí na metodice provádění SZZ), v případě např. dynamických zkoušek jsou to však řádově desítky provedených zkoušek [11].

Druhou velkou nevýhodou je **požadavek na poskytnutí protizátěže**. O ostatním zařízení se dá říct, že je snadno dostupné (a to i finančně), ale požadavkům na hmotnost a rozměry protizátěže pro SZZ vyhovují jen některé stavební stroje. V případě provedení série několika SZZ v rámci geotechnického průzkumu to pak v podstatě znamená jejich odstavení na několik hodin až dnů, což má dopad také na celkovou cenu za jejich pronájem.

V případě francouzské metodiky je nutné zmínit také třetí velkou nevýhodu, a tou je **rozměr zatěžovací desky**. Při použití desky o průměru 600 mm není možné provádět SZZ na stávajících tratích bez sejmutí kolejového roštu, protože vykopání sondy na úroveň

hlubších vrstev v mezipražcovém prostoru nemá vzhledem k obvyklým hodnotám rozdělení pražců smysl.

Tyto nevýhody vedly k tomu, že byly na základě SZZ vyvinuty jiné zkoušky, při kterých sice není v konstrukci pražcového podloží dosaženo zatížení odpovídajícího zatížení provozem, ale jsou v polních podmínkách snadno aplikovatelné, výše zmíněné problémy jsou u nich vyloučeny nebo alespoň omezeny a zároveň lze pomocí nich kvalitu konstrukce pražcového podloží v požadované míře spolehlivě zhodnotit [11].

3.2 Dynamické zkoušky

V České republice je další poměrně rozšířenou metodou hodnocení konstrukce pražcového podloží **rázová zatěžovací zkouška**. Je možné ji použít právě v obtížně přístupných místech, kde nelze přistavit protizátěž, nebo k rychlému stanovení orientačních hodnot deformačních charakteristik podloží. Na stavbách SŽ se pro ni používá výhradně rázové zařízení skupiny C – tzv. lehká dynamická deska. Na kruhovou zatěžovací desku o průměru 300 mm se senzorem pro snímání rázových kmitů se ve třech rázových cyklech nechá z předepsané výšky po vodící tyči dopadnout závaží o předepsané hmotnosti, čímž je na povrchu zkoušeného prostředí vyvozen rázový impulz. Sleduje se průběh a velikost rázového impulzu a svislá deformace povrchu zkoušeného prostředí pod středem desky, ze kterých se následně vyhodnotí tzv. rázový modul deformace M_{vd} . Vzhledem k neexistenci jasných korelačních vztahů mezi výsledky rázové a statické zatěžovací zkoušky však při jejím použití musí být vždy dopředu stanoven způsob hodnocení konstrukce pražcového podloží [1], [4], [12]. Pro ilustraci rázové zatěžovací zkoušky je přiložen obrázek 3.

Podobně vypadá také zkouška označovaná jako „**essai à la dynaplaque**“ (lze přeložit jako „zkouška dynamickou deskou“), která se používá ve Francii. Používá se kruhová zatěžovací deska o průměru 600 mm (obdobně jako u SZZ) a také předepsaná výška pádu závaží a jeho hmotnost je násobně vyšší, což vede k tomu, že se pro provedení zkoušky používá speciálně uzpůsobený nákladní automobil (viz obrázek 4). Pro vyhodnocení zkoušky existují dvě možnosti. První možností je měření poměru mezi výškou odrazu a počáteční výškou pádu závaží, což umožňuje na základě kalibrační křivky stanovit

modul E_{DYN1} , druhou možností je měření svislé deformace povrchu zkoušeného prostředí pod středem desky a nárazové síly, což umožňuje stanovit modul E_{DYN2} [11], [13].

Princip dynamické zkoušky v Německu je obdobný jako princip rázové zatěžovací zkoušky v České republice. Na základě průměrné velikosti svislé deformace povrchu zkoušeného prostředí pod středem kruhové zatěžovací desky o průměru 300 mm způsobené třemi pády břemene na desku se vyhodnotí modul $E_{vd,L}$ [14].



Obrázek 3: Rázová zatěžovací zkouška



Obrázek 4: Zkouška dynamickou deskou [11]

3.3 Automated plate load testing

Jako velmi zajímavou spatřuji moderní technologii hodnocení konstrukce pražcového podloží používanou ve Spojených státech amerických. Obdobně jako v evropských zemích tam byla v průběhu 20. století snaha o nalezení vztahů mezi výsledkem SZZ a výsledky jiných, rychlejších metod. Tyto empirické vzorce však vykazovaly značné nejistoty a ukázalo se, že mohou jen těžko reflektovat vliv místních geologických podmínek na výsledek zkoušek [15]. Na základě toho byl vyvinut moderní systém označovaný jako „Automated Plate Load Testing“, který se používá pro vyhodnocení více druhů hodnot charakterizujících deformační charakteristiky a míru zhutnění jednotlivých konstrukčních částí železničních staveb a staveb pozemních komunikací [15].

Principem tohoto systému je zjištění modulu pružnosti M_r , modulu reakce podloží k , modulu přetvárnosti E_v , popř. i dynamického modulu pro asfaltobetonové vrstvy, a to v rámci jediné zkoušky za použití speciálního přístroje (viz obrázek 5). Tento systém je automatizovaný. Úkolem operátora je zadání požadovaných podmínek zatížení (úrovně cyklického namáhání, trvání pulzu zatížení a doba prodlevy a počet cyklů), které jsou pak strojem kontrolovány, takže jeho pracovní výkonnost je značná a výsledky zkoušek lze vždy prezentovat jako výsledky bez ovlivnění lidským faktorem.

Pracovní výkonnost i jistota prezentace výsledků je ovšem na druhou stranu vykoupena finanční dostupností systému [15].



Obrázek 5: Automated Plate Load Testing [16]

Jako výsledek SZZ se v rámci systému Automated Plate Load Testing prezentuje tzv. modul reakce podloží k . Zkouška se řídí normou AASHTO T222 [17] a dochází při ní (obdobně jako u české metodiky) ke dvěma zatěžovacím a dvěma odtěžovacím cyklům. Rozdílem ale je, že kontaktní napětí pod deskou neklesá mezi prvním odtěžovacím a druhým zatěžovacím cyklem až na nulovou hodnotu [16], [17]. To má jistě pozitivní vliv na samotné provádění zkoušky. V případech, kdy se zkouška provádí samostatně, nikoliv v rámci systému Automated Plate Load Testing, totiž není nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby při úplném odtižení kruhové zatěžovací desky nedošlo k pádu nástavců, přes které se hydraulický lis opírá o protizátěž, a je možné tak věnovat plnou pozornost průběhu zkoušky.

4. Porovnávací experimentální měření

V rámci této práce byla provedena série čtyř porovnávacích experimentálních měření. Při každém měření bylo úspěšně provedeno šest SZZ na dvou různých materiálech, resp. ve dvou různých úrovních – na každém materiálu, resp. na každé úrovni jedna SZZ dle české, jedna dle francouzské a jedna dle německé metodiky. Protokoly z jednotlivých zkoušek je možné nalézt v příloze 1, příloha 2 pak obsahuje ilustrativní fotografie z jednotlivých experimentálních měření. SZZ jsem ve většině případů prováděl já, pro zbývající případy je pak v této kapitole vždy u konkrétní zkoušky uvedeno jméno osoby, která ji prováděla.

První dvě měření byla provedena v **experimentálních podmínkách** v kamenolomu Zbraslav. Pro tato měření byly vždy zhotoveny dvě zkušební vrstvy ze zvolených materiálů, na kterých byly zkoušky prováděny. Při prvním měření byly do jisté míry teprve čerpány zkušenosti s prováděním zkoušek při použití zde dostupné protizátěže, s hutněním vrstev, s celkovou organizací měření apod., takže byla s personálem kamenolomu později domluvena také realizace druhého měření v obdobných podmínkách. Pro druhé měření byl také stanoven záměr ponechat zkušební vrstvy po provedení zkoušek na místě s tím, že se měření po několika měsících znovu zopakuje a bude sledován vliv konsolidace materiálů na výsledky zkoušek. Vlivem nedorozumění a aktivity některých zaměstnanců kamenolomu však došlo po několika dnech k demolici zkušebních vrstev, takže bylo od tohoto záměru upuštěno.

Další dvě měření byla provedena na dvou **reálných stavbách železniční tratě** v České republice. Provedení porovnávacích experimentálních měření bylo vyjednáno na takových stavbách, kde byla konstrukce pražcového podloží tvořena vrstvami z kameniva různých frakcí, obdobně jako zkušební vrstvy v kamenolomu Zbraslav. V obou případech se jednalo o fázi výstavby, kdy byly na zemním tělese položeny veškeré podkladní i konstrukční vrstvy, PTŽS však byla stále odkrytá a konstrukce železničního svršku položena nebyla. Měření tedy byla provedena jednou v úrovni PTŽS a jednou v úrovni ZP, kdy došlo pro účely měření k odtěžení konstrukční vrstvy až na úroveň ZP, a to pouze v ploše nezbytně nutné pro provedení zkoušek.

4.1 První měření v kamenolomu Zbraslav

Dne 2. 6. 2021 byla provedena první série porovnávacích SZZ v experimentálních podmínkách. Měření proběhlo na zkušebních vrstvách ze štěrkodrtí frakcí 0/32 a 0/63 (dále též ŠD 0/32 a 0/63) zhotovených v jižní části zbraslavského kamenolomu v úrovni jeho zázemí. Kromě mě se měření zúčastnili také vedoucí práce Leoš Horníček a zaměstnanec Katedry železničních staveb Michal Válek. Na místě byl také přítomen Petr Jasanský ze SŽ.

4.1.1 Příjezd na místo

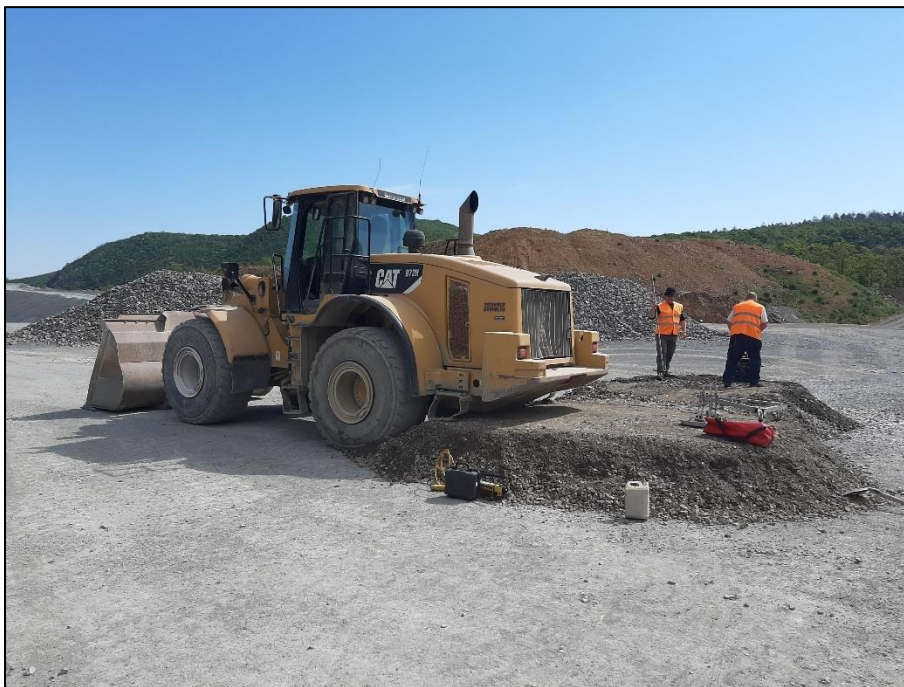
Přítomní účastníci přijeli na místo v cca 8:50 hodin, kde je uvítal personál kamenolomu, který je po cca 15 minutách doprovodil na místo měření. Následně byly na místo ve lžici nakladače dopraveny dvě hromady ŠD 0/32 a ŠD 0/63. Nakladač byl pak dále určený pro protizátěž zkoušek a byl po celou dobu měření k dispozici.

4.1.2 Příprava zkušebních vrstev

Jako první došlo k rozhrnutí hromady ŠD 0/32 lžící nakladače na souvislou vrstvu o průměrné tloušťce cca 450 mm. Ihned poté bylo zahájeno její hutnění vibrační deskou o hmotnosti 80 kg a přítlačné síle 16 kN a současně vyrovnávání jejího povrchu lopatami a kovovými hráběmi. Vrstva byla hutněna a vyrovnávána v čase 9:30 až 10:00.

V čase, kdy byla hutněna a vyrovnávána hromada z ŠD 0/32, byla zároveň lžící nakladače rozhrnována hromada z ŠD 0/63 na souvislou vrstvu o průměrné tloušťce rovněž cca 450 mm. Ta pak byla rovněž hutněna vibrační deskou a současně byl pomocí lopat a kovových hrábí vyrovnáván její povrch. Vrstva byla hutněna a vyrovnávána v čase 10:00 až 10:30.

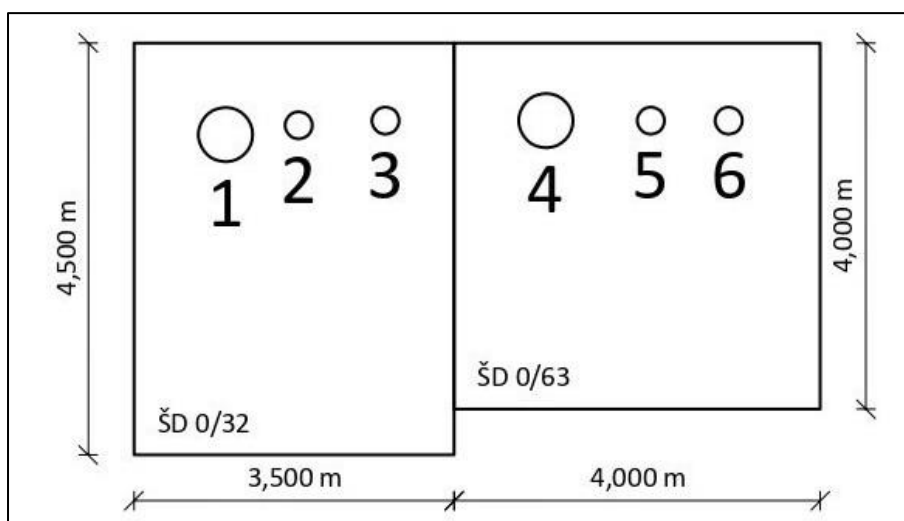
Obě zkušební vrstvy byly zhotoveny v ploše přibližně 15 až 20 m² a nacházely se ve vzájemné těsné blízkosti. Při provádění zkoušek tak musel být nakladač jakožto protizátěž postaven mimo zhotovené zkušební vrstvy a v případě potřeby byly před jeho přední kola usazeny dva balvany, aby nedošlo k jeho nežádoucímu pohybu. Viz obrázek 6.



Obrázek 6: Poloha protizátěže vůči zkušební vrstvě

4.1.3 Rozmístění kruhových zatěžovacích desek na zkušebních vrstvách

Na přiloženém schématu (obrázek 7) je zobrazeno přibližné rozmístění kruhových zatěžovacích desek při provádění SZZ.



Obrázek 7: Schéma rozmístění kruhových zatěžovacích desek na zkušebních vrstvách

4.1.4 Statické zatěžovací zkoušky na zkušební vrstvě z ŠD 0/32

Zkouška 1. Jako první byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 zahájena v 10:45 hodin za jasného počasí SZZ dle francouzské metodiky. Zkoušku prováděl Leoš Horníček,

v průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $EV_1 = 24,09$ MPa,
- $EV_2 = 73,17$ MPa,
- $k = 3,04$.

Zkouška 2. V 11:40 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 za skoro jasného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. Zkoušku prováděl Leoš Horníček, v průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_{V1} = 21,02$ MPa,
- $E_{V2} = 78,47$ MPa.

Zkouška 3. Ve 12:30 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 za polojasného počasí zahájena SZZ dle české metodiky. Zkoušku prováděl Leoš Horníček, v průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_1 = 52,12$ MPa,
- $E_2 = 91,84$ MPa,
- $E_2/E_1 = 1,76$.

4.1.5 Statické zatěžovací zkoušky na zkušební vrstvě z ŠD 0/63

Zkouška 4. Ve 13:15 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/63 za skoro jasného počasí zahájena SZZ dle francouzské metodiky. V průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $EV_1 = 12,68$ MPa,
- $EV_2 = 66,67$ MPa,
- $k = 5,26$.

Zkouška 5. Ve 14:00 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/63 za oblačného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. V průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_{V1} = 20,35$ MPa,
- $E_{V2} = 70,68$ MPa.

Zkouška 6. V 15:00 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/63 za oblačného počasí zahájena SZZ dle české metodiky. V průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_1 = 50,75$ MPa,
- $E_2 = 68,53$ MPa,
- $E_2/E_1 = 1,35$.

4.1.6 Stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti

Po provedení SZZ byly za účelem stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti jamkovou metodou [18] odebrány z obou zkoušených materiálů jejich vzorky. U obou materiálů byly vzorky odebrány z místa, kde byla prováděna SZZ dle francouzské metodiky (zkoušky 1 a 4), vzorky odebíral Michal Válek. U zkušební vrstvy z ŠD 0/32 činil objem odebraného vzorku 4190 cm^3 , u zkušební vrstvy z ŠD 0/63 pak 5500 cm^3 . Po odebrání vzorků zkoušených materiálů se přítomní účastníci rozloučili s personálem stavby a opustili místo měření.

Odebrané vzorky zkoušených materiálů byly následně dne 3. 6. 2021 zváženy a vloženy do sušárny. Dne 7. 6. 2021 pak byly vzorky ze sušárny vyjmuty, znovu zváženy a byla stanovena jejich vlhkost [19] a objemová hmotnost [18].

U vzorku zkušební vrstvy z ŠD 0/32 byla vlhkost a objemová hmotnost stanovena následovně:

- vlhkost: $n = 3,79 \%$,
- objemová hmotnost přirozeně vlhkého materiálu: $\rho = 2242,482 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- objemová hmotnost vysušeného materiálu: $\rho_d = 2160,501 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

U vzorku zkušební vrstvy z ŠD 0/63 byla vlhkost a objemová hmotnost stanovena následovně:

- vlhkost: $n = 2,66 \%$,
- objemová hmotnost přirozeně vlhkého materiálu: $\rho = 2133,673 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- objemová hmotnost vysušeného materiálu: $\rho_d = 2078,382 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.2 Druhé měření v kamenolomu Zbraslav

Dne 21. 10. 2021 byla provedena druhá série porovnávacích SZZ v experimentálních podmínkách. Měření proběhlo na zkušebních vrstvách z ŠD 0/32 a ŠD 0/63 zhotovených na etáži Kt 240 zbraslavského kamenolomu. Kromě mě se měření zúčastnili také zaměstnanci Katedry železničních staveb Vít Lojda, Pavel Voříšek a Michal Válek.

4.2.1 Příjezd na místo

Přítomní účastníci přijeli na místo v cca 7:45 hodin, v cca 8:05 je pak u expedice uvítal vedoucí kamenolomu, který je dále doprovodil na místo měření. Zde již byly připraveny dvě hromady ŠD 0/32 a ŠD 0/63. Na ŠD 0/63 bylo pouhým okem viditelné, že obsahuje hodně drobných zrn, celkové propady na sítu s velikostí oka 2 mm lze odhadovat na 70 %. Po dalších cca pěti minutách od našeho příjezdu přijel na místo i nakladač určený pro protizátěž zkoušek. Nakladač pak byl i s řidičem po celou dobu měření k dispozici.

4.2.2 Příprava zkušebních vrstev

Jako první došlo k rozhrnutí části hromady ŠD 0/32 lžící nakladače na souvislou vrstvu o průměrné tloušťce cca 250 mm. Ihned poté bylo zahájeno její hutnění vibrační deskou o hmotnosti 150 kg a přitlačné síle 25 kN a současně vyrovnávání jejího povrchu lopatami a kovovými hráběmi. První vrstva byla hutněna a vyrovnávána v časech 8:30 až 8:50 a 8:55 až 9:00.

V čase, kdy byla hutněna a vyrovnávána první vrstva ŠD 0/32, byla zároveň lžící nakladače rozhrnována část hromady ŠD 0/63 na souvislou vrstvu o průměrné tloušťce rovněž cca 250 mm. Ta pak byla rovněž hutněna vibrační deskou a současně byl pomocí lopat a kovových hrábí vyrovnáván její povrch. První vrstva byla hutněna a vyrovnávána v čase 9:00 až 9:15.

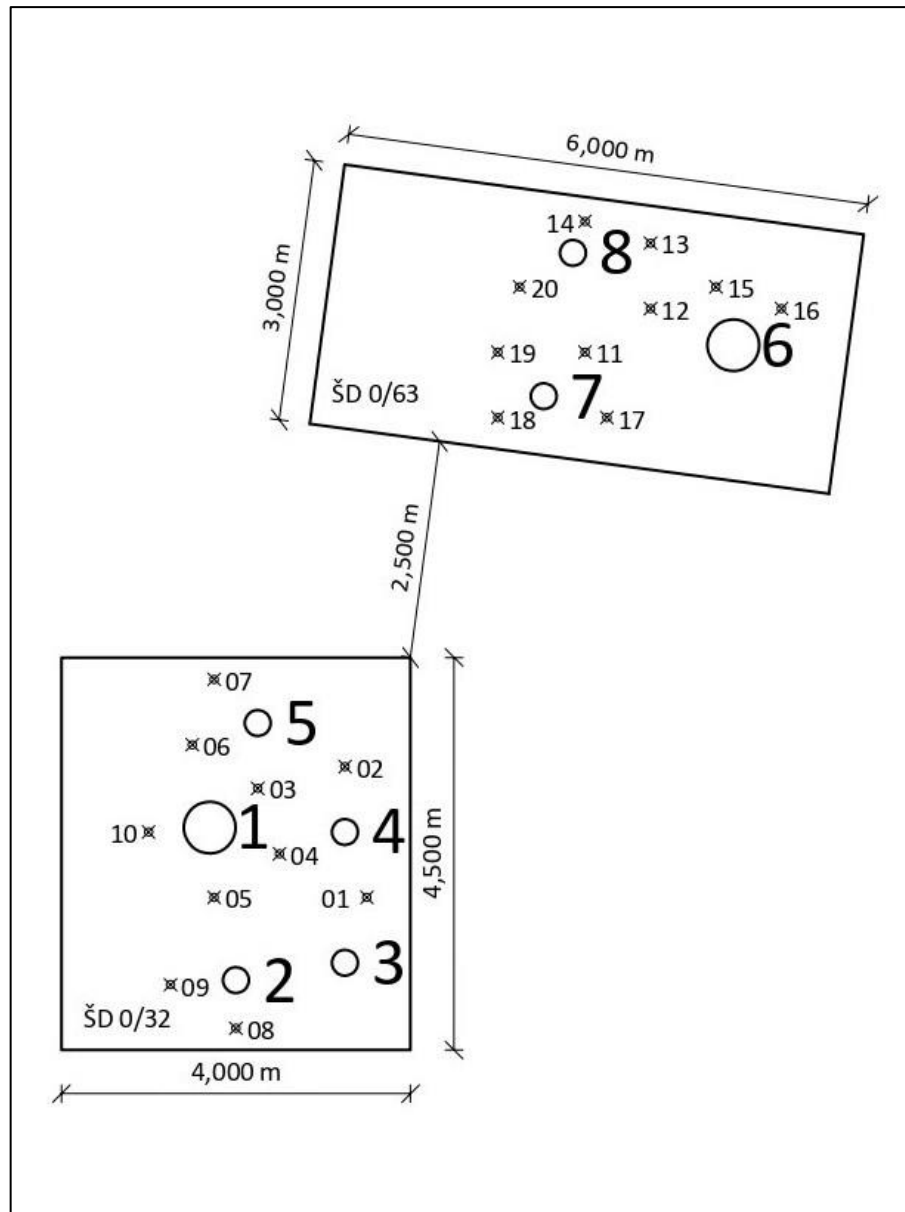
V čase, kdy byla hutněna a vyrovnávána první vrstva ŠD 0/63, byla zároveň na první vrstvě ŠD 0/32 pomocí nakladače rozprostírána druhá vrstva ŠD 0/32 o průměrné tloušťce rovněž cca 250 mm. Ta pak byla rovněž hutněna vibrační deskou a současně byl pomocí lopat a kovových hrábí vyrovnáván její povrch. Druhá vrstva byla hutněna a vyrovnávána v čase 9:15 až 9:30. Celková tloušťka zkušební vrstvy ŠD 0/32 tak po zhutnění činila cca 500 mm.

V čase, kdy byla hutněna a vyrovnávána druhá vrstva ŠD 0/32, byla zároveň na první vrstvě ŠD 0/63 pomocí nakladače rozprostírána druhá vrstva ŠD 0/63 o průměrné tloušťce rovněž cca 250 mm. Ta pak byla rovněž hutněna vibrační deskou a současně byl pomocí lopat a kovových hrábí vyrovnáván její povrch. Druhá vrstva byla hutněna a vyrovnávána v čase 9:30 až 9:55. Celková tloušťka zkušební vrstvy ŠD 0/63 tak po zhutnění činila rovněž cca 500 mm.

Po zhotovení obou zkušebních vrstev byl vedle nich na základě zkušenosti z červnového měření v kamenolomu pomocí nakladače zhotoven nájezd z rovněž přítomného materiálu frakce 0/1, aby se následně podvozek nakladače jakožto protizátěže mohl pro účely provádění zkoušek dostat do potřebné výšky. Ve stejném čase byl na vrstvách vymezen prostor pro provedení zkoušek – na povrchu zkušební vrstvy z ŠD 0/32 o rozměrech cca 4 krát 4,5 metru, na povrchu zkušební vrstvy z ŠD 0/63 o rozměrech 6 krát 3 metry. Oba prostory od sebe byly vzdáleny cca 2,5 metru.

4.2.3 Rozmístění kruhových zatěžovacích desek na zkušebních vrstvách

Na přiloženém schématu (obrázek 8) je zobrazeno přibližné rozmístění kruhových zatěžovacích desek při provádění SZZ a kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek. SZZ jsou označeny v jednočíslicovém formátu, kontrolní rázové zatěžovací zkoušky pak ve formátu dvoučíslicovém.



Obrázek 8: Schéma rozmístění kruhových zatěžovacích desek na zkušebních vrstvách

4.2.4 Statické zatěžovací zkoušky na zkušební vrstvě z ŠD 0/32

Zkouška 1. Jako první byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 zahájena v 10:30 hodin za polojasného počasí SZZ dle francouzské metodiky. V průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $EV_1 = 34,33$ MPa,
- $EV_2 = 77,14$ MPa,
- $k = 2,25$.

Zkouška 2. V 11:05 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 za polojasného počasí zahájena SZZ dle české metodiky. V průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_1 = 56,72$ MPa,
- $E_2 = 96,43$ MPa,
- $E_2/E_1 = 1,70$.

Zkouška 3. Ve 12:00 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 za polojasného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. Během zkoušky však došlo vlivem opření hydraulického lisu o protizátěž k jejímu nežádoucímu pohybu, proto musela být zkouška přerušena a prohlášena za neplatnou.

Zkouška 4. Ve 12:50 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 za polojasného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. Během zkoušky však znovu došlo vlivem opření hydraulického lisu o protizátěž k jejímu nežádoucímu pohybu, proto musela být zkouška přerušena a prohlášena za neplatnou.

Zkouška 5. Ve 13:30 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 za polojasného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. V průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_{V1} = 29,40$ MPa,
- $E_{V2} = 104,50$ MPa.

4.2.5 Statické zatěžovací zkoušky na zkušební vrstvě z ŠD 0/63

Zkouška 6. Ve 14:30 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/63 za polojasného počasí zahájena SZZ dle francouzské metodiky. V průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $EV_1 = 45,06$ MPa,
- $EV_2 = 97,12$ MPa,
- $k = 2,16$.

Zkouška 7. Ve 14:50 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/63 za polojasného počasí zahájena SZZ dle české metodiky. Zkoušku prováděl Pavel Voříšek, v průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_1 = 45,61$ MPa,
- $E_2 = 106,30$ MPa,
- $E_2/E_1 = 2,33$.

Zkouška 8. V 15:40 hodin byla na zkušební vrstvě z ŠD 0/63 za polojasného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. Zkoušku prováděl Pavel Voříšek, v průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_{V1} = 54,71$ MPa,
- $E_{V2} = 149,15$ MPa.

4.2.6 Kontrolní rázové zatěžovací zkoušky

Po provedení SZZ byly za účelem kontroly rovnoměrnosti zhutnění zkušebních vrstev a homogenity zkoušeného prostředí provedeny kontrolní rázové zatěžovací zkoušky [1]. Ty byly na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 prováděny ve stejném čase, jako byly prováděny SZZ na zkušební vrstvě z ŠD 0/63, na zkušební vrstvě z ŠD 0/63 pak byly kontrolní rázové zatěžovací zkoušky prováděny posléze. Zkoušky prováděl Pavel Voříšek společně s Vitem Lojdou. Vyhodnocené výsledky zkoušek, na jejichž základě lze považovat obě zkušební vrstvy za rovnoměrně zhutněné a zkoušené prostředí za homogenní, jsou zobrazeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Výsledky kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek

Číslo zkoušky	M_{vd} [MPa]	Číslo zkoušky	M_{vd} [MPa]	Číslo zkoušky	M_{vd} [MPa]	Číslo zkoušky	M_{vd} [MPa]
01	31,0	06	29,8	11	52,6	16	53,2
02	36,4	07	30,9	12	37,6	17	54,5
03	35,0	08	34,3	13	65,0	18	54,8
04	37,5	09	32,7	14	56,1	19	46,7
05	44,4	10	36,2	15	46,8	20	46,1

4.2.7 Stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti

Po provedení kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek byly za účelem stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti jamkovou metodou [18] odebrány z obou zkoušených materiálů jejich vzorky. U obou materiálů byly vzorky odebrány z místa, kde byla prováděna SZZ dle francouzské metodiky (zkoušky 1 a 6), vzorky odebíral Michal Válek.

U zkušební vrstvy z ŠD 0/32 činil objem odebraného vzorku 1770 cm^3 , u zkušební vrstvy z ŠD 0/63 pak 2940 cm^3 . Po odebrání vzorků zkoušených materiálů opustili přítomní účastníci místo měření.

Odebrané vzorky zkoušených materiálů byly následně dne 22. 10. 2021 zváženy a vloženy do sušárny. Dne 25. 10. 2021 pak byly vzorky ze sušárny vyjmuty, znovu zváženy a byla stanovena jejich vlhkost [19] a objemová hmotnost [18].

U vzorku zkušební vrstvy z ŠD 0/32 byla vlhkost a objemová hmotnost stanovena následovně:

- vlhkost: $n = 2,96 \%$,
- objemová hmotnost přirozeně vlhkého materiálu: $\rho = 2127,062 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- objemová hmotnost vysušeného materiálu: $\rho_d = 2065,876 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

U vzorku zkušební vrstvy z ŠD 0/63 byla vlhkost a objemová hmotnost stanovena následovně:

- vlhkost: $n = 3,06 \%$,
- objemová hmotnost přirozeně vlhkého materiálu: $\rho = 2115,714 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- objemová hmotnost vysušeného materiálu: $\rho_d = 2052,857 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.3 Měření na trati v Soběslavi

Dne 27. 10. 2021 byla provedena první série porovnávacích SZZ na reálné stavbě železniční tratě. Měření proběhlo na podkladní vrstvě z drceného kameniva frakce 0/125 (dále též DK 0/125) a na konstrukční vrstvě z ŠD 0/63 na přeložce modernizované koridorové trati č. 220 v úseku Soběslav – Doubí u Tábora. Kromě mě se měření zúčastnili také vedoucí práce Leoš Horníček a zaměstnanec Katedry železničních staveb Michal Válek. Na místě byl také přítomen Petr Břešťovský ze SŽ.

4.3.1 Příjezd na místo

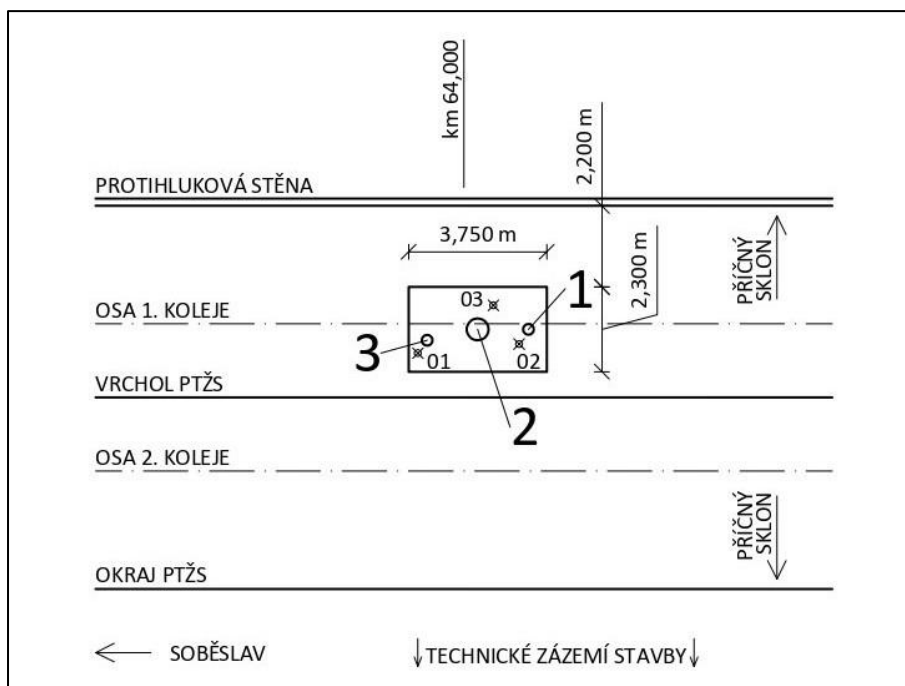
Přítomní účastníci přijeli na místo technického zázemí stavby v cca 7:30 hodin, kde je uvítali stavbyvedoucí úseku a mistr ze společnosti Eurovia CS, a. s. Po krátkém rozhovoru a školení bezpečnosti se následně společně odebrali na místo měření – cca šest metrů vysoký násep v přímém úseku přímo v oblasti technického zázemí stavby. V místě měření byla již položena a zhutněna podkladní vrstva z DK 0/125 a na ní konstrukční vrstva

z ŠD 0/63. Po příjezdu na místo měření byla pomocí kolového rypadla v ploše cca 8,25 m² z již zhotovené PTŽS pro účely měření odebrána konstrukční vrstva o tloušťce 440 mm až na úroveň ZP. Na obou položených vrstvách bylo patrné, že jsou velmi dobře zhutněny. Po dočištění ZP lopatou bylo pro započítání měření již potřeba počkat pouze na příjezd pásového rypadla určeného jako protizátěž pro provedení zkoušek. Pásové rypadlo pak bylo po celou dobu měření k dispozici. Vzhledem k rozměrům a charakteru protizátěže (oproti dřívějším situacím byla kola nahrazena pásy), k situaci provádění zkoušek a k variabilitě rozměrů a umístění použitého měřicího nosníku je ale nutné zmínit, že při provádění žádné ze SZZ nebylo možné v plném rozsahu splnit požadavky norem a předpisů na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku. Předpokládá se však, že z celkového pohledu zahrnujícího veškeré místní podmínky mohla mít tato skutečnost pouze nepatrný vliv na výsledky zkoušek.

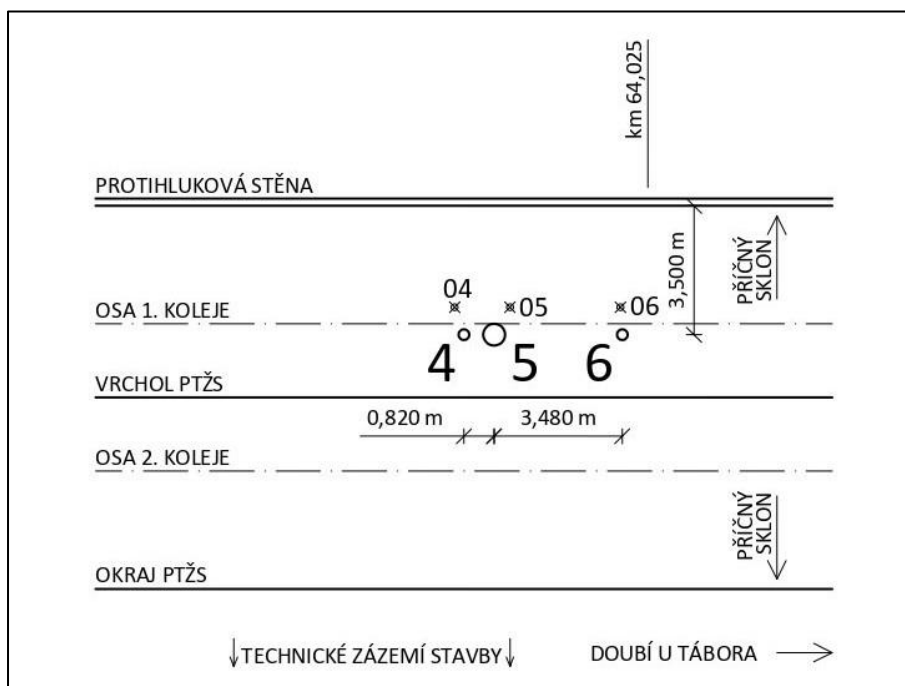
4.3.2 Rozmístění kruhových zatěžovacích desek na zkoušených vrstvách

Na přiložených schématech (obrázky 9 a 10) je zobrazena přibližná situace stavby a přibližné rozmístění kruhových zatěžovacích desek při provádění SZZ a kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek. SZZ jsou označeny v jednočíslicovém formátu, kontrolní zkoušky lehkou dynamickou deskou pak formátu ve dvoučíslicovém.

SZZ byly prováděny přibližně v úrovni osy první koleje (směr trati je shodný se směrem staničení: Soběslav – Doubí u Tábora). Zkoušky na úrovni ZP (na vrstvě z DK 0/125) byly prováděny zhruba v úrovni staničení km 64,000, zkoušky na úrovni PTŽS (na vrstvě z ŠD 0/63) byly prováděny zhruba v úrovni staničení km 64,020.



Obrázek 9: Schéma rozmístění kruhových zatěžovacích desek na ZP – vrstvě z DK 0/125



Obrázek 10: Schéma rozmístění kruhových zatěžovacích desek na PTŽS – vrstvě z ŠD 0/63

4.3.3 Statické zatěžovací zkoušky na ZP – vrstvě z DK 0/125

Zkouška 1. Jako první byla na ZP zahájena v 8:45 hodin za polojasného počasí SZZ dle české metodiky. V průběhu zkoušky se kromě nesplnění požadavků na vzájemnou

vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_1 = 114,41$ MPa,
- $E_2 = 198,53$ MPa,
- $E_2/E_1 = 1,74$.

Zkouška 2. V 9:50 hodin byla na ZP za polojasného počasí zahájena SZZ dle francouzské metodiky. V průběhu zkoušky se kromě nesplnění požadavků na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $EV_1 = 121,84$ MPa,
- $EV_2 = 162,65$ MPa,
- $k = 1,33$.

Zkouška 3. V 10:25 hodin byla na ZP za polojasného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. V průběhu zkoušky se kromě nesplnění požadavků na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_{V1} = 140,23$ MPa,
- $E_{V2} = 205,75$ MPa.

4.3.4 Statické zatěžovací zkoušky na PTŽS – vrstvě z ŠD 0/63

Zkouška 4. V 11:50 hodin byla na PTŽS za polojasného počasí zahájena SZZ dle české metodiky. V průběhu zkoušky se kromě nesplnění požadavků na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_1 = 78,95$ MPa,
- $E_2 = 143,62$ MPa,
- $E_2/E_1 = 1,82$.

Zkouška 5. Ve 13:00 hodin byla na PTŽS za polojasného počasí zahájena SZZ dle francouzské metodiky. V průběhu zkoušky se kromě nesplnění požadavků na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr

měřicího nosníku nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $EV_1 = 102,58$ MPa,
- $EV_2 = 142,11$ MPa,
- $k = 1,39$.

Zkouška 6. Ve 13:30 hodin byla na PTŽS za polojasného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. V průběhu zkoušky se kromě nesplnění požadavků na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_{V1} = 121,89$ MPa,
- $E_{V2} = 207,69$ MPa.

4.3.5 Kontrolní rázové zatěžovací zkoušky

Po provedení SZZ byly za účelem kontroly rovnoměrnosti zhutnění obou vrstev a homogenity zkoušeného prostředí provedeny kontrolní rázové zatěžovací zkoušky [1]. Na ZP je prováděl Michal Válek, na PTŽS Leoš Horníček. Vyhodnocené výsledky zkoušek, na jejichž základě lze považovat obě vrstvy za rovnoměrně zhutněné a zkoušené prostředí za homogenní, jsou zobrazeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Výsledky kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek

Číslo zkoušky	M_{vd} [MPa]	Číslo zkoušky	M_{vd} [MPa]
01	115,4	04	65,2
02	123,6	05	57,7
03	123,6	06	82,6

4.3.6 Stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti

Po provedení kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek byly za účelem stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti jamkovou metodou [18] odebrány z obou zkoušených materiálů jejich vzorky. U obou materiálů byly vzorky odebrány z místa, kde byla prováděna SZZ dle francouzské metodiky (zkoušky 2 a 5), vzorky odebíral Michal Válek. Na ZP činil objem odebraného vzorku 1150 cm^3 , na PTŽS pak 1950 cm^3 . Po odebrání

vzorků zkoušených materiálů se přítomní účastníci rozloučili s personálem stavby a opustili místo měření.

Odebrané vzorky zkoušených materiálů byly následně dne 1. 11. 2021 zváženy a vloženy do sušárny. Dne 2. 11. 2021 pak byly vzorky ze sušárny vyjmuty, znovu zváženy a byla stanovena jejich vlhkost [19] a objemová hmotnost [18].

U vzorku vrstvy z DK 0/125 tvořící ZP byla vlhkost a objemová hmotnost stanovena následovně:

- vlhkost: $n = 3,88 \%$,
- objemová hmotnost přirozeně vlhkého materiálu: $\rho = 2439,478 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- objemová hmotnost vysušeného materiálu: $\rho_d = 2348,348 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

U vzorku vrstvy z ŠD 0/63 tvořící PTŽS byla vlhkost a objemová hmotnost stanovena následovně:

- vlhkost: $n = 1,70 \%$,
- objemová hmotnost přirozeně vlhkého materiálu: $\rho = 2386,718 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- objemová hmotnost vysušeného materiálu: $\rho_d = 2346,718 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.4 Měření na trati v Uničově

Dne 9. 11. 2021 byla provedena druhá série porovnávacích SZZ na reálné stavbě železniční tratě. Měření proběhlo na podkladní vrstvě ze zeminy stmelené hydraulickým pojivem (dále též ZSH) ViaCalco C70 se 70% podílem Portlandského slínku a na konstrukční vrstvě z ŠD 0/32 na rekonstruované regionální trati č. 290 v úseku Uničov – Troubelice. Kromě mě se měření zúčastnili také zaměstnanci Katedry železničních staveb Pavel Voříšek a Michal Válek.

4.4.1 Příjezd na místo

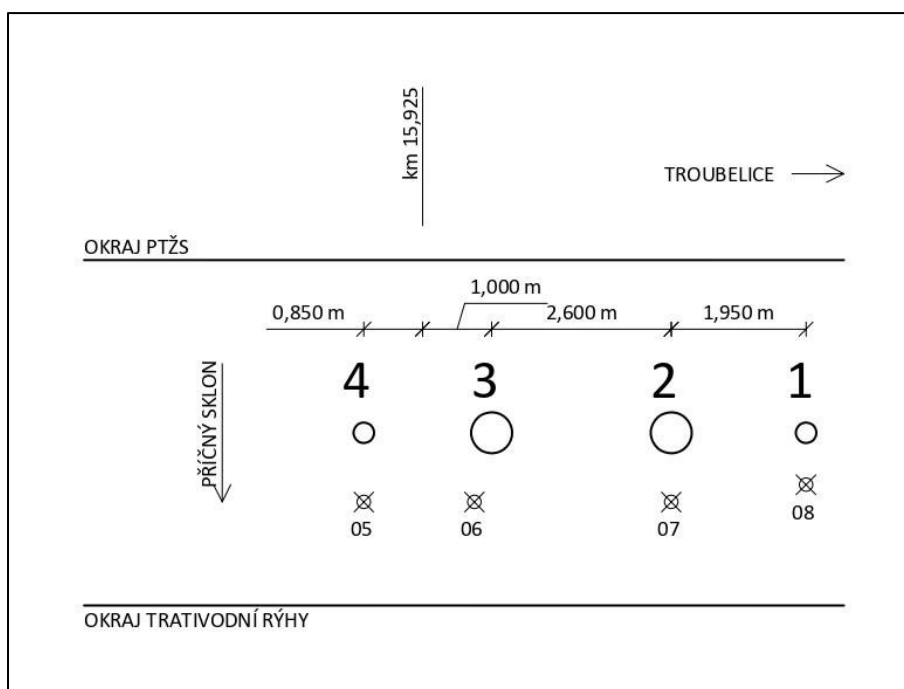
Přítomní účastníci přijeli na místo setkání (železniční stanice Uničov) v cca 7:20 hodin a telefonicky o tom informovali stavbyvedoucího ze společnosti Eurovia CS, a. s. Po dalších cca 10 minutách dorazil na místo i on a doprovodil je na místo měření, kde také proběhlo školení bezpečnosti – část trati přibližně v úrovni terénu vzdálená asi jeden kilometr od stanice Uničov. V místě měření byla již položena a zhutněna podkladní vrstva ze ZSH a na ní konstrukční vrstva z ŠD 0/32. Na místě měření bylo již

při našem příjezdu připraveno kolové rypadlo určené pro protizátěž zkoušek, které pak bylo po celou dobu měření i s řidičem k dispozici.

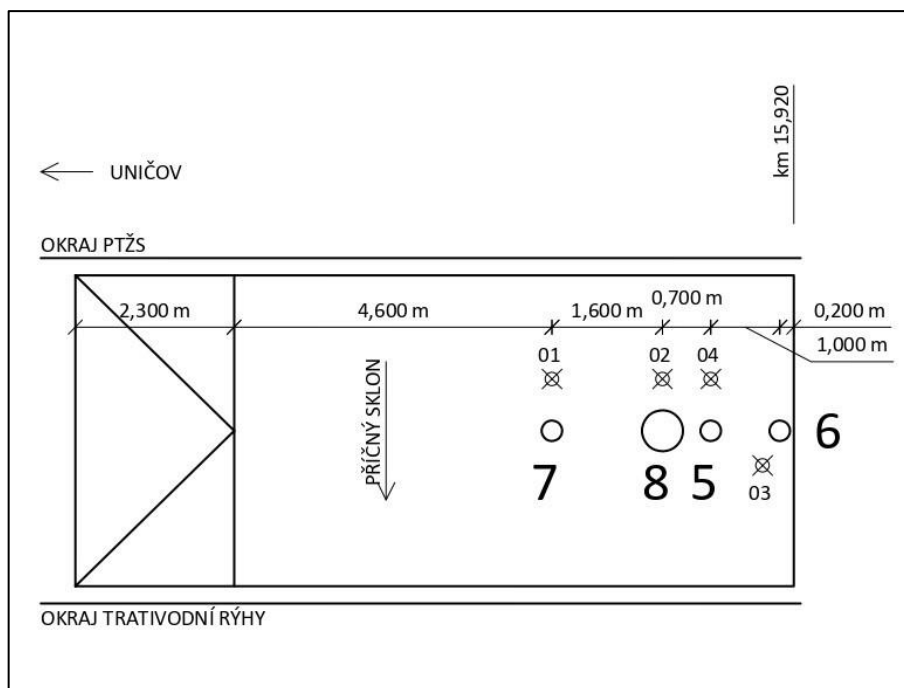
4.4.2 Rozmístění kruhových zatěžovacích desek na zkoušených vrstvách

Na přiložených schématech (obrázky 11 a 12) je zobrazena přibližná situace stavby a přibližné rozmístění kruhových zatěžovacích desek při provádění SZZ a kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek. SZZ jsou označeny v jednočíslicovém formátu, kontrolní rázové zatěžovací zkoušky pak ve formátu dvoučíslicovém.

SZZ byly prováděny přibližně v úrovni osy koleje. Zkoušky na úrovni ZP (na vrstvě ze ZSH) byly prováděny zhruba v úrovni staničení km 15,916 až 15,920, zkoušky na úrovni PTŽS (na vrstvě z ŠD 0/32) zhruba v úrovni staničení km 15,924 až 15,931.



Obrázek 11: Schéma rozmístění kruhových zatěžovacích desek na PTŽS – vrstvě z ŠD 0/32



Obrázek 12: Schéma rozmístění kruhových zatěžovacích desek na ZP – vrstvě ze ZSH

4.4.3 Statické zatěžovací zkoušky na PTŽS – vrstvě z ŠD 0/32

Zkouška 1. Jako první byla na PTŽS zahájena v 8:00 hodin za jasného počasí SZZ dle české metodiky. V průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_1 = 46,08 \text{ MPa}$,
- $E_2 = 117,39 \text{ MPa}$,
- $E_2/E_1 = 2,55$.

Zkouška 2. V 9:05 hodin byla na PTŽS za jasného počasí zahájena SZZ dle francouzské metodiky. V průběhu prvního zatěžovacího cyklu došlo k nadzvednutí a vodorovnému pohybu protizátěže, takže musela být zkouška přerušena a prohlášena za neplatnou. Po této zkušenosti panovaly obavy, zda je hmotnost přistavené protizátěže dostatečná, proto byl na stejném místě realizován pokus. Po odtižení desky bylo odebráno měřicí zařízení a došlo k jejímu opětovnému vystrojení zatěžovacím zařízením. Následně došlo k otočení kabiny rypadla do výhodnější polohy tak, aby motor, o kterém se předpokládalo, že má značný podíl na celkové hmotnosti protizátěže, byl co nejvíce situován v úrovni nad místem, kde se nástavce pro zapření opíraly o protizátěž, a došlo k zapření desky o protizátěž takovou silou, kterou se dosáhne kontaktního napětí

0,25 MPa pod deskou o průměru 600 mm. K opětovnému nadzvednutí protizátěže nedošlo, tedy byl výsledek pokusu prohlášen za pozitivní a byla zahájena zkouška 3.

Zkouška 3. V 9:25 hodin byla na PTŽS za jasného počasí zahájena SZZ dle francouzské metodiky. V průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $EV_1 = 38,88$ MPa,
- $EV_2 = 100,37$ MPa,
- $k = 2,58$.

Zkouška 4. V 9:55 hodin byla na PTŽS za jasného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. Zkoušku jsem prováděl já, v průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_{V1} = 25,91$ MPa,
- $E_{V2} = 114,84$ MPa.

4.4.4 Statické zatěžovací zkoušky na ZP – vrstvě ze ZSH

Zkouška 5. Po provedení zkoušek na PTŽS byla pomocí kolového rypadla v ploše cca 12 m² pro účely měření odebrána konstrukční vrstva z ŠD 0/32 o tloušťce 330 mm až na úroveň ZP, která byla následně dočištěna lopatou. Šířka lžice rypadla (a tedy i šířka plochy odebrání konstrukční vrstvy) přibližně odpovídala osové vzdálenosti kol rypadla na jedné nápravě, tedy při přistavení stála protizátěž svými koly částečně na PTŽS a částečně na ZP. Řidič rypadla nás však přesvědčil o tom, že je protizátěž určitě stabilní (i když to tak nevypadalo), takže byla v 11:05 hodin za jasného počasí beze srážek zahájena SZZ dle české metodiky. V průběhu prvního zatěžovacího cyklu došlo k pohybu protizátěže, takže musela být zkouška přerušena a prohlášena za neplatnou. Řidič rypadla byl tedy požádán o rozšíření a zároveň také prodloužení plochy odebrání konstrukční vrstvy tak, aby mohla protizátěž při všech následujících zkouškách stát všemi koly na ZP. Výsledná plocha odebrání konstrukční vrstvy po opětovném dočištění ZP lopatou tak, jak je znázorněna na obrázku 12, nakonec činila přibližně 36,5 m², k ní byl navíc připojen nájezd pro rypadlo o ploše asi 10 m².

Zkouška 6. V 11:55 hodin byla na ZP za jasného počasí zahájena SZZ dle české metodiky. Zkoušku prováděl společně se mnou Pavel Voříšek, v průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_1 = 192,86$ MPa,
- $E_2 = 264,71$ MPa,
- $E_2/E_1 = 1,37$.

Zkouška 7. Ve 12:55 hodin byla na ZP za polojasného počasí zahájena SZZ dle německé metodiky. Zkoušku prováděl Pavel Voříšek, v průběhu zkoušky se nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $E_{V1} = 196,42$ MPa,
- $E_{V2} = 168,54$ MPa.

Zkouška 8. Ve 13:55 hodin byla na ZP za polojasného počasí zahájena SZZ dle francouzské metodiky. Zkoušku prováděl společně se mnou Pavel Voříšek, v průběhu zkoušky nevyskytly žádné komplikace. Vyhodnocené výsledky zkoušky jsou následující:

- $EV_1 = 82,92$ MPa,
- $EV_2 = 92,47$ MPa,
- $k = 1,12$.

4.4.5 Kontrolní rázové zatěžovací zkoušky

Po provedení SZZ byly za účelem kontroly rovnoměrnosti zhutnění obou vrstev a homogenity zkoušeného prostředí provedeny kontrolní rázové zatěžovací zkoušky [1]. Zkoušky prováděl společně se mnou Pavel voříšek, vyhodnocené výsledky zkoušek jsou zobrazeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Výsledky kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek

Číslo zkoušky	M_{vd} [MPa]	Číslo zkoušky	M_{vd} [MPa]
01	86,3	05	54,8
02	147,8	06	66,5
03	108,7	07	70,9
04	111,4	08	67,5

Na základě výsledků kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek lze považovat konstrukční vrstvu z ŠD 0/32 za rovnoměrně zhutněnou (zkoušky 05 až 08), u podkladní vrstvy ze ZSH je naopak nutné pohlížet na vzájemné vztahy mezi jednotlivými výsledky SZZ s určitým odstupem.

4.4.6 Stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti

Po provedení kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek byly za účelem stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti jamkovou metodou [18] odebrány z obou zkoušených materiálů jejich vzorky. U obou materiálů byly vzorky odebrány z místa, kde byla prováděna SZZ dle francouzské metodiky (zkoušky 3 a 8), vzorky odebíral Michal Válek. Na PTŽS činil objem odebraného vzorku 1330 cm^3 , na ZP pak 970 cm^3 . Po odebrání vzorku ze ZP se přítomní účastníci rozloučili s personálem stavby a opustili místo měření.

Odebrané vzorky zkoušených materiálů byly následně dne 10. 11. 2021 zváženy a vloženy do sušárny. Dne 11. 11. 2021 pak byly vzorky ze sušárny vyjmuty, znovu zváženy a byla stanovena jejich vlhkost [19] a objemová hmotnost [18].

U vzorku vrstvy z ŠD 0/32 tvořící PTŽS byla vlhkost a objemová hmotnost stanovena následovně:

- vlhkost: $n = 3,68 \%$,
- objemová hmotnost přirozeně vlhkého materiálu: $\rho = 2440,752 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- objemová hmotnost vysušeného materiálu: $\rho_d = 2354,211 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

U vzorku vrstvy ze ZSH tvořící ZP byla vlhkost a objemová hmotnost stanovena následovně:

- vlhkost: $n = 19,50 \%$,
- objemová hmotnost přirozeně vlhkého materiálu: $\rho = 2030,412 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- objemová hmotnost vysušeného materiálu: $\rho_d = 1699,072 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.5 Souhrn vyhodnocených výsledků statických zatěžovacích zkoušek

V tabulce 5 jsou přehledně zobrazeny vyhodnocené výsledky SZZ provedených v experimentálních podmínkách a na reálných stavbách železničních tratí (viz kapitoly 4.1 až 4.4). Tabulka 6 pak obsahuje výsledky provedených kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek.

Tabulka 5: Souhrn výsledků provedených statických zatěžovacích zkoušek

Akce	Metodika	Modul přetvárnosti z prvního zatěžovacího cyklu [MPa] (E_1, EV_1, EV_1)	Modul přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu [MPa] (E_2, EV_2, EV_2)	Poměr modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů [-] ($E_2/E_1, k$)
První měření v kamenolomu Zbraslav	<i>Zkušební vrstva z ŠD 0/32</i>			
	Česká	52,12	91,84	1,76
	Francouzská	24,09	73,17	3,04
	Německá	21,02	78,47	-
	<i>Zkušební vrstva z ŠD 0/63</i>			
	Česká	50,75	68,53	1,35
	Francouzská	12,68	66,67	5,26
Druhé měření v kamenolomu Zbraslav	<i>Zkušební vrstva z ŠD 0/32</i>			
	Česká	56,72	96,43	1,70
	Francouzská	34,33	77,14	2,25
	Německá	29,40	104,50	-
	<i>Zkušební vrstva z ŠD 0/63</i>			
	Česká	45,61	106,33	2,33
	Francouzská	45,06	97,12	2,16
Měření na trati v Soběslavi ^f	<i>ZP – vrstva z DK 0/125</i>			
	Česká	114,41	198,53	1,74
	Francouzská	121,84	162,65	1,33
	Německá	140,23	205,75	-
	<i>PTŽS – vrstva z ŠD 0/63</i>			
	Česká	78,95	143,62	1,82
	Francouzská	102,58	142,11	1,39
Měření na trati v Uničově	<i>PTŽS – vrstva z ŠD 0/32</i>			
	Česká	46,08	117,39	2,55
	Francouzská	38,88	100,37	2,58
	Německá	25,91	114,84	-
	<i>ZP – vrstva ze ZSH^g</i>			
	Česká	192,86	264,71	1,37
	Francouzská	82,92	92,47	1,12
Německá	196,42	168,54	-	

^f Vzhledem k rozměrům a charakteru použité protizátěže nebylo možné při měření na trati v Soběslavi splnit požadavky na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku. Předpokládá se však, že z celkového pohledu zahrnujícího veškeré místní podmínky mohla mít tato skutečnost pouze nepatrný vliv na výsledky zkoušek.

^g Na základě výsledků kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek je nutné pohlížet na vzájemné vztahy mezi jednotlivými výsledky SZZ na této vrstvě s určitým odstupem.

Tabulka 6: Souhrn výsledků provedených kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek

Akce	Číslo zkoušky	Rázový modul deformace M_{vd} [MPa]	Číslo zkoušky	Rázový modul deformace M_{vd} [MPa]
První měření v kamenolomu Zbraslav	Zkušební vrstva z ŠD 0/32		Zkušební vrstva z ŠD 0/63	
	Kontrolní rázové zatěžovací zkoušky nebyly provedeny.			
Druhé měření v kamenolomu Zbraslav	Zkušební vrstva z ŠD 0/32		Zkušební vrstva z ŠD 0/63	
	01	31,0	11	52,6
	02	36,4	12	37,6
	03	35,0	13	65,0
	04	37,5	14	56,1
	05	44,4	15	46,8
	06	29,8	16	53,2
	07	30,9	17	54,5
	08	34,3	18	54,8
	09	32,7	19	46,7
	10	36,2	20	46,1
Měření na trati v Soběslavi	ZP – vrstva z DK 0/125		PTŽS – vrstva z ŠD 0/63	
	01	115,4	04	65,2
	02	123,6	05	57,7
	03	123,6	06	82,6
Měření na trati v Uničově	PTŽS – vrstva z ŠD 0/32		ZP – vrstva ze ZSH ^h	
	01	86,3	05	54,8
	02	147,8	06	66,5
	03	108,7	07	70,9
	04	111,4	08	67,5

^h Na základě výsledků kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek v této úrovni nelze považovat tuto vrstvu za rovnoměrně zhutněnou a prostředí za homogenní.

5. Vyhodnocení porovnávacích experimentálních měření

Tato kapitola obsahuje vzájemné porovnání výsledků SZZ provedených v rámci této práce. Porovnání je provedeno dvěma způsoby. Nejprve je zjištěna vzájemná korelace mezi výsledky zkoušek dle české a dle francouzské, resp. německé metodiky provedených na stejných materiálech (tedy na ŠD 0/32 a na ŠD 0/63, na kterých byly zkoušky provedeny vícekrát), v druhé fázi je pak přistoupeno k jejich obecnému vyhodnocení nezávisle na materiálu zkoušené vrstvy.

5.1 Porovnání výsledků statických zatěžovacích zkoušek provedených na stejných materiálech

Tabulka 7: Porovnání výsledků SZZ provedených na ŠD 0/32

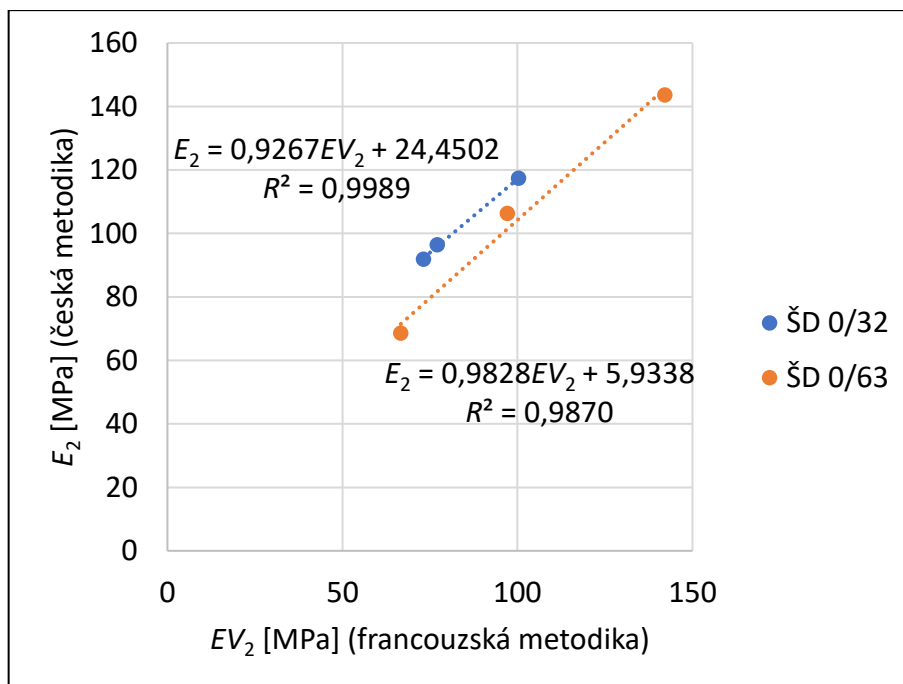
Akce	První měření v kamenolomu Zbraslav	Druhé měření v kamenolomu Zbraslav	Měření na trati v Uničově	Průměr	
Vlhkost [%]	3,79	2,96	3,68	3,48	
Objemová hmotnost vlhkého materiálu [kg·m ⁻³]	2242,482	2127,062	2440,752	2270,099	
Objemová hmotnost suchého materiálu [kg·m ⁻³]	2160,501	2065,876	2354,211	2193,529	
Česká metodika	E_1 [MPa]	52,12	56,72	46,08	51,64
	E_2 [MPa]	91,84	96,43	117,39	101,89
	E_2/E_1 [-]	1,76	1,70	2,55	2,00
Francouzská metodika	EV_1 [MPa]	24,09	34,33	38,88	32,44
	EV_2 [MPa]	73,17	77,14	100,37	83,56
	k [-]	3,04	2,25	2,58	2,62
Německá metodika	E_{V1} [MPa]	21,02	29,40	25,91	25,44
	E_{V2} [MPa]	78,47	104,50	114,84	99,27
Porovnání české a francouzské metodiky	E_1/EV_1 [MPa]	2,16	1,65	1,18	1,67
	E_2/EV_2 [MPa]	1,26	1,25	1,17	1,22
	$(E_2/E_1)/k$ [-]	0,58	0,76	0,99	0,77
Porovnání české a německé metodiky	E_1/E_{V1} [MPa]	2,48	1,93	1,78	2,06
	E_2/E_{V2} [MPa]	1,17	0,92	1,02	1,04

Tabulka 8: Porovnání výsledků SZZ provedených na ŠD 0/63

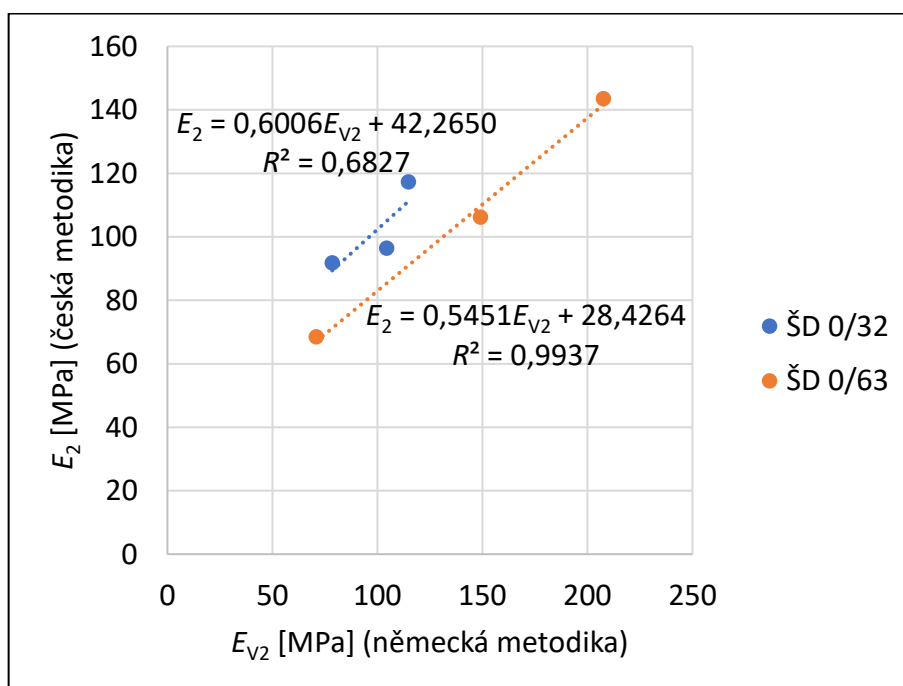
Akce		První měření v kamenolomu Zbraslav	Druhé měření v kamenolomu Zbraslav	Měření na trati v Soběslavi	Průměr
Vlhkost [%]		2,66	3,06	1,70	2,48
Objemová hmotnost vlhkého materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]		2133,673	2115,714	2386,718	2212,035
Objemová hmotnost suchého materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]		2078,382	2052,857	2346,718	2159,319
Česká metodika	E_1 [MPa]	50,75	45,61	78,95	58,44
	E_2 [MPa]	68,53	106,30	143,62	106,15
	E_2/E_1 [-]	1,35	2,33	1,82	1,83
Francouzská metodika	EV_1 [MPa]	12,68	45,06	102,58	53,44
	EV_2 [MPa]	66,67	97,12	142,11	101,96
	k [-]	5,26	2,16	1,39	2,93
Německá metodika	E_{V1} [MPa]	20,35	54,71	121,89	65,65
	E_{V2} [MPa]	70,86	149,15	207,69	142,57
Porovnání české a francouzské metodiky	E_1/E_{V1} [MPa]	4,00	1,01	0,77	1,93
	E_2/E_{V2} [MPa]	1,03	1,09	1,01	1,04
	$(E_2/E_1)/k$ [-]	0,26	1,08	1,31	0,88
Porovnání české a německé metodiky	E_1/E_{V1} [MPa]	2,49	0,83	0,65	1,32
	E_2/E_{V2} [MPa]	0,97	0,71	0,69	0,79

V tabulkách 7 a 8 lze u materiálů ŠD 0/32 a ŠD 0/63 pozorovat velmi dobrou shodu v porovnání hodnot modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu zkoušek dle české a francouzské metodiky. V obou případech vycházejí poměry E_2/E_{V2} velmi podobně s průměrem 1,22 pro ŠD 0/32 a 1,04 pro ŠD 0/63. To dokazují i hodnoty druhých mocnin korelačních koeficientů lineární závislosti [20] výsledků modulů přetvárnosti E_2 a EV_2 , které jsou 0,9989 pro ŠD 0/32 a 0,9870 pro ŠD 0/63 (viz obrázek 13).

Poměrně dobrou shodu lze pozorovat také v porovnání hodnot modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu zkoušek dle české a německé metodiky. Pro ŠD 0/32 je průměr poměrů E_2/E_{V2} 1,04 a druhá mocnina korelačního koeficientu lineární závislosti výsledků modulů přetvárnosti E_2 a EV_2 0,6827, pro ŠD 0/63 pak průměr poměrů E_2/E_{V2} 0,79 a druhá mocnina korelačního koeficientu lineární závislosti výsledků modulů přetvárnosti E_2 a EV_2 0,9937 (viz tabulky 7 a 8 a obrázek 14).



Obrázek 13: Graf závislosti modulů E_2 a EV_2 u ŠD 0/32 a ŠD 0/63



Obrázek 14: Graf závislosti modulů E_2 a EV_2 u ŠD 0/32 a ŠD 0/63

Již z tabulek 7 a 8 je rovněž zřejmé, že podobně významnou shodu nelze pozorovat v porovnání hodnot modulů přetvárnosti z prvního zatěžovacího cyklu, a to ani v případě porovnání výsledků SZZ dle české a dle francouzské metodiky, ani v případě porovnání výsledků SZZ dle české a dle německé metodiky. Z toho logicky vyplývá, že v případě porovnání výsledků SZZ dle české a dle francouzské metodiky nelze pozorovat

významnou shodu ani mezi poměry modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů E_2/E_1 a k . Tuto skutečnost lze zdůvodnit tím, že v prvním zatěžovacím cyklu dochází teprve k „dohutnění“ a konsolidaci zkoušeného podloží v místě provádění SZZ na stejnou hodnotu míry zhutnění a teprve v druhém zatěžovacím cyklu dochází k vlastnímu měření kvality a deformačních charakteristik podloží. Tato teorie je zmíněna již v kapitole 3, ve které se píše, že výsledek poměrů modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů se v případě SZZ dle české metodiky používá jako nepřímá metoda stanovení míry zhutnění [1], [4].

U obou materiálů lze na základě hodnot druhé mocniny korelačního koeficientu lineární závislosti pozorovat menší shodu mezi výsledky modulů přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu E_2 a E_{V2} (SZZ dle české a dle německé metodiky), než je tomu v případě porovnání modulů přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu E_2 a E_{V2} (SZZ dle české a dle francouzské metodiky). U SZZ dle německé metodiky má na rozdíl od SZZ dle české a dle francouzské metodiky vliv na výsledek modulu přetvárnosti také tvar křivky daného zatěžovacího cyklu a její regresní koeficienty a_1 a a_2 (viz kapitola 2.3), zatímco u SZZ dle české a dle francouzské metodiky rozhoduje pouze rozdíl mezi zatlačením desky na konci a na začátku zatěžovacího cyklu (viz kapitoly 2.1 a 2.2). Hodnota modulu přetvárnosti E_{V2} tedy vystihuje také veškeré nehomogenity a vliv rozmístění zrn různých velikostí ve zkoušeném prostředí, které nelze ani při nejlepším možném postupu pokládání a hutnění vrstev úplně eliminovat, a tak logicky vychází lepší shoda v porovnání výsledků SZZ dle české a dle francouzské metodiky.

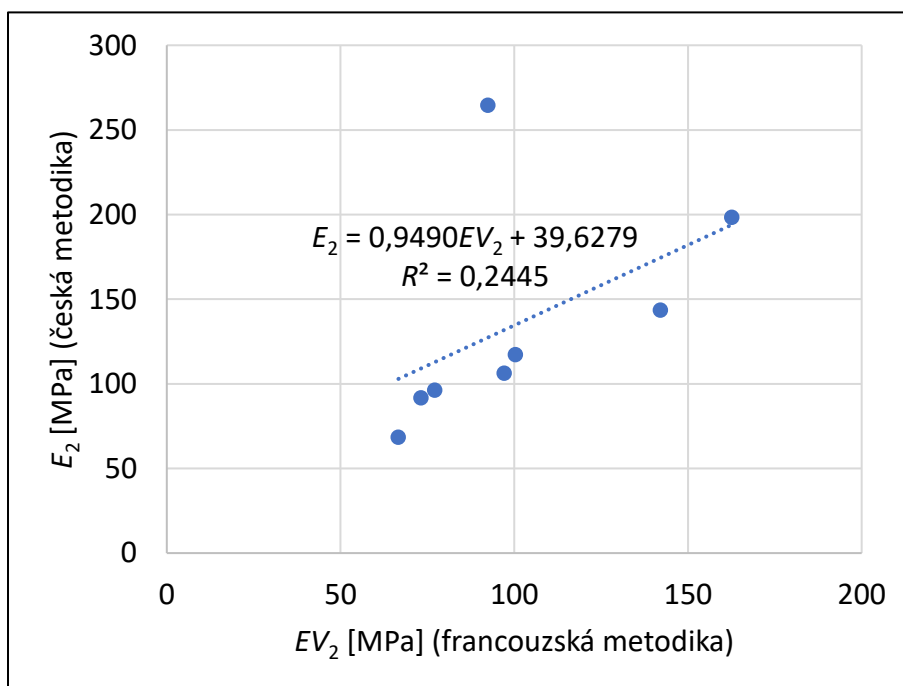
5.2 Obecná analýza výsledků statických zatěžovacích zkoušek

V této kapitole je statistický soubor rozšířen také o výsledky SZZ provedených na DK 0/125 a na ZSH. Všechny výsledky jsou tedy přehledně uvedeny v tabulce 9, a to včetně jejich vzájemného porovnání, obdobně jako výsledky v tabulkách 7 a 8.

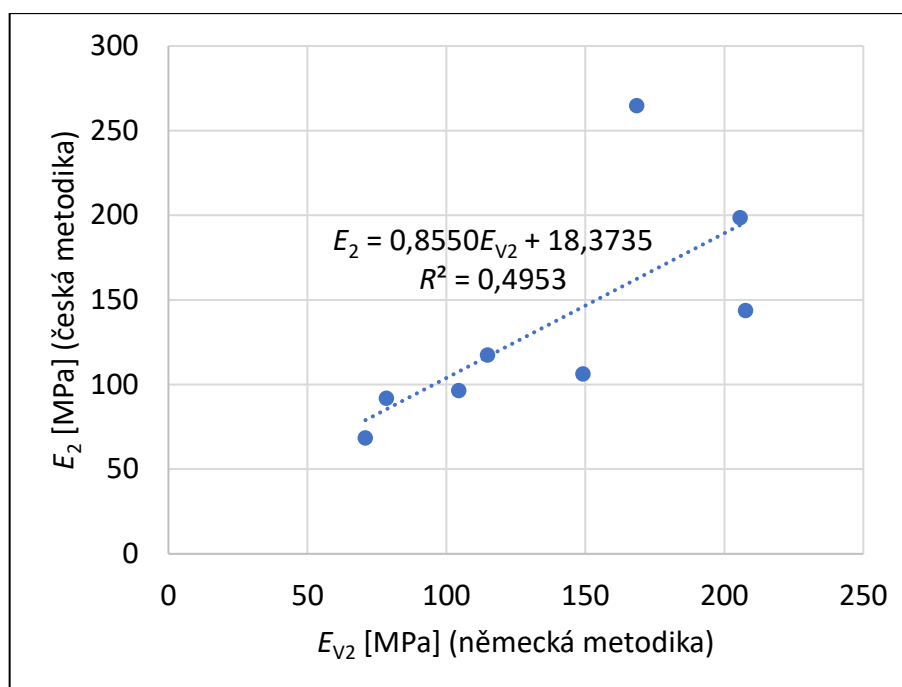
Tabulka 9: Porovnávací výsledky SZZ

Akce	První měření v kamenolomu Zbraslav		Druhé měření v kamenolomu Zbraslav		Měření na trati v Soběslavi		Měření na trati v Uničově		Průměr
	ŠD 0/32	ŠD 0/63	ŠD 0/32	ŠD 0/63	DK 0/125	ŠD 0/63	ŠD 0/32	ZSH	
Materiál	3,79	2,66	2,96	3,06	3,88	1,70	3,68	19,50	5,16
Vlhkost [%]									
Objemová hmotnost vlhkého materiálu [kg·m ⁻³]	2242,482	2133,673	2127,062	2115,714	2439,478	2386,718	2440,752	2030,412	2239,536
Objemová hmotnost suchého materiálu [kg·m ⁻³]	2160,501	2078,382	2065,876	2052,857	2348,348	2346,718	2354,211	1699,072	2138,246
Česká metodika	E_1 [MPa]	52,12	50,75	56,72	45,61	78,95	46,08	192,86	79,69
	E_2 [MPa]	91,84	68,53	96,43	106,30	143,62	117,39	264,71	135,92
	E_2/E_1 [-]	1,76	1,35	1,70	2,33	1,74	1,82	2,55	1,37
Francouzská metodika	EV_1 [MPa]	24,09	12,68	34,33	45,06	102,58	38,88	82,92	57,80
	EV_2 [MPa]	73,17	66,67	77,14	97,12	142,11	100,37	92,47	101,46
	k [-]	3,04	5,26	2,25	2,16	1,33	1,39	2,58	1,12
Německá metodika	Ev_1 [MPa]	21,02	20,35	29,40	54,71	121,89	25,91	196,42	76,24
	Ev_2 [MPa]	78,47	70,86	104,50	149,15	207,69	114,84	168,54	137,48
Porovnávací české a francouzské metodiky	E_1/EV_1 [MPa]	2,16	4,00	1,65	1,01	0,77	1,18	2,33	1,76
	E_2/EV_2 [MPa]	1,26	1,03	1,25	1,09	1,01	1,17	2,86	1,36
	$(E_2/E_1)/k$ [-]	0,58	0,26	0,76	1,08	1,31	0,99	1,23	0,94
Porovnávací české a německé metodiky	E_1/Ev_1 [MPa]	2,48	2,49	1,93	0,83	0,65	1,78	0,98	1,49
	E_2/Ev_2 [MPa]	1,17	0,97	0,92	0,71	0,69	1,02	1,57	1,00

V tabulce 9 lze obdobně jako v tabulkách 7 a 8 do jisté míry pozorovat vzájemnou shodu v porovnání hodnot modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu zkoušek dle české a francouzské metodiky. Z prezentovaných hodnot poměrů E_2/E_{V2} se však vymyká případ z měření na trati v Uničově, kdy byly SZZ prováděny na ZSH – při SZZ dle české metodiky byla zjištěna velmi vysoká hodnota $E_2 = 264,71$ MPa. V případě SZZ dle německé metodiky, kde se na výsledných hodnotách modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů podílí také tvary křivek daného zatěžovacího cyklu a jejich regresní koeficienty a_1 a a_2 , dokonce vyšla neobvykle hodnota $E_{V1} = 196,42$ MPa vyšší než hodnota $E_{V2} = 168,54$ MPa, a hodnota poměru E_2/E_{V2} se v případě ZSH rovněž odlišuje od případů ostatních materiálů. Na obrázcích 15 a 16 jsou zobrazeny závislosti hodnot modulu přetvárnosti E_{V2} , resp. E_{V2} na hodnotách modulu přetvárnosti E_2 . U výsledků zkoušek provedených na ZSH se jejich závislosti odchyľují od zdánlivého trendu, což negativně ovlivňuje také hodnoty druhých mocnin korelačních koeficientů jejich lineárních závislostí, které vycházejí velmi nízké – u závislosti E_2 a E_{V2} 0,2445, u závislosti E_2 a E_{V2} pak 0,4953.



Obrázek 15: Graf závislosti modulů E_2 a E_{V2}



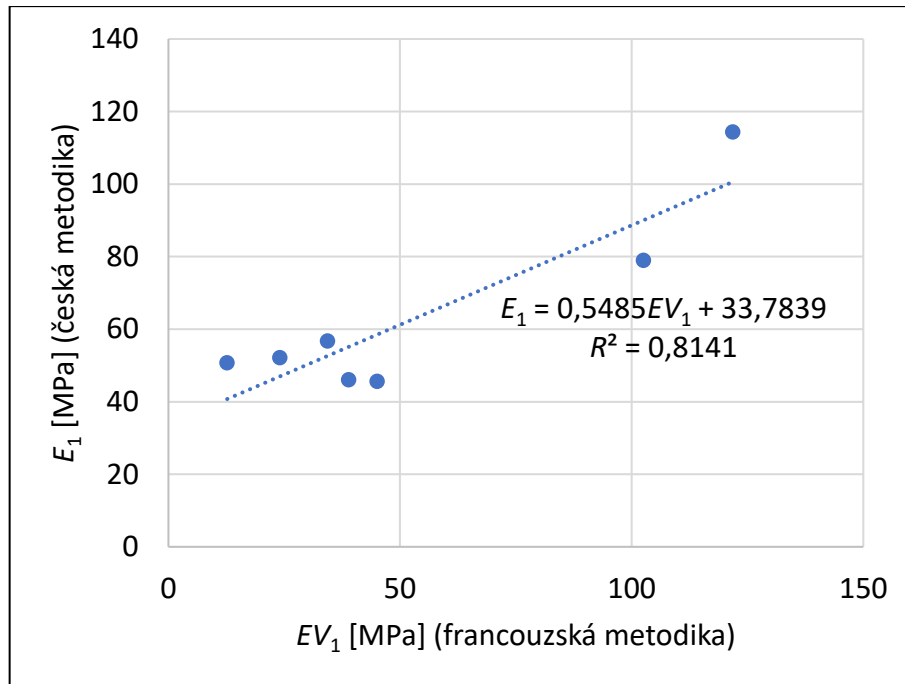
Obrázek 16: Graf závislosti modulů E_2 a E_{V2}

Pravděpodobně půjde o výjimečnou situaci, což potvrzují i výsledky kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek (viz kapitola 4.4.5). Při míchání zeminy s hydraulickým silničním pojivem ViaCalco C70 zemní frézou mohlo v materiálu dojít k vytvoření oblastí s vyšším podílem tohoto pojiva a k jeho ztuhnutí a ztvrdnutí, tedy k lokálním nárůstům únosnosti celého materiálu. Takovou situaci pak lze přirovnat k tomu, že např. SZZ dle české metodiky byla prováděna na úplně jiném podloží než SZZ dle francouzské nebo dle německé metodiky. Z toho důvodu jsou výsledky SZZ provedených na ZSH dále považovány za nerentabilní a **ze statistického souboru vyloučeny**.

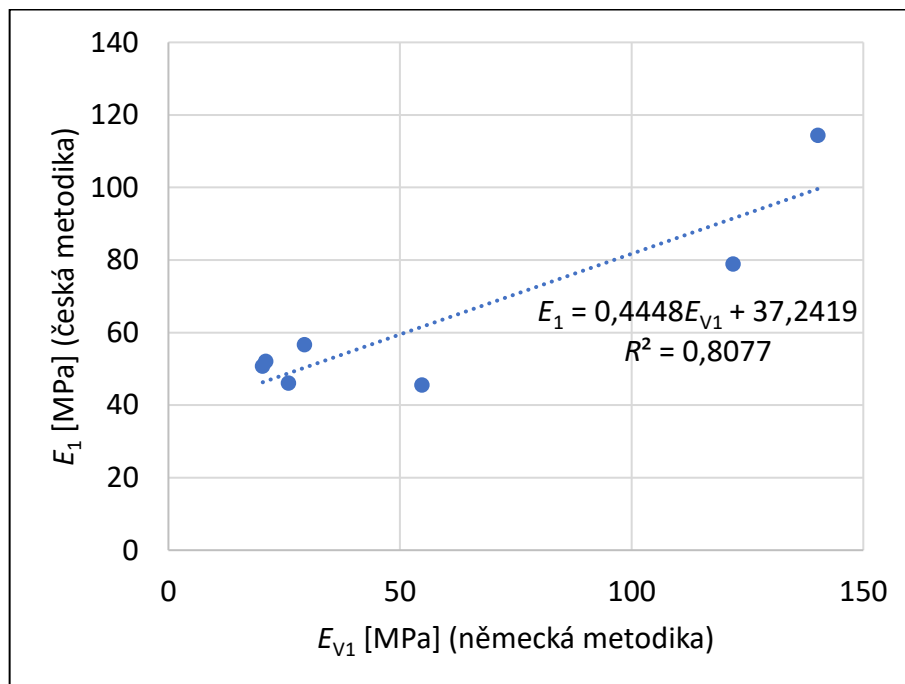
V tabulce 10 jsou znovu přehledně zobrazeny veškeré vyhodnocené výsledky SZZ provedených v rámci porovnávacích experimentálních měření, tentokrát však již nejsou brány v úvahu výsledky SZZ provedených na ZSH. Na obrázcích 17 až 21 jsou pak zobrazeny závislosti jednotlivých výsledků SZZ dle francouzské, resp. německé metodiky na výsledcích SZZ dle české metodiky.

Tabulka 10: Porovnáni výsledků SZZ provedených na ŠD 0/32, ŠD 0/63 a DK 0/125

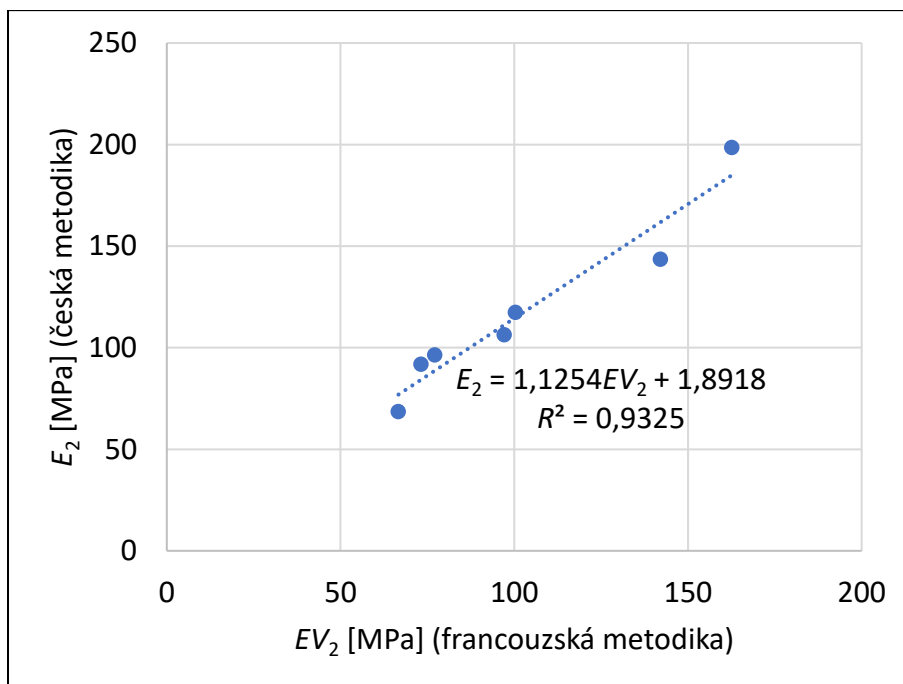
Akce	První měření v kamenolomu Zbraslav		Druhé měření v kamenolomu Zbraslav		Měření na trati v Soběslavi		Měření na trati v Uničově	Průměr	
	ŠD 0/32	ŠD 0/63	ŠD 0/32	ŠD 0/63	DK 0/125	ŠD 0/63			
Materiál	3,79	2,66	2,96	3,06	3,88	1,70	3,68	3,11	
Vlhkost [%]									
Objemová hmotnost vlhkého materiálu [kg·m ⁻³]	2242,482	2133,673	2127,062	2115,714	2439,478	2386,718	2440,752	2269,411	
Objemová hmotnost suchého materiálu [kg·m ⁻³]	2160,501	2078,382	2065,876	2052,857	2348,348	2346,718	2354,211	2200,985	
Česká metodika	E_1 [MPa]	52,12	50,75	56,72	45,61	114,41	78,95	46,08	63,52
	E_2 [MPa]	91,84	68,53	96,43	106,30	198,53	143,62	117,39	117,52
	E_2/E_1 [-]	1,76	1,35	1,70	2,33	1,74	1,82	2,55	1,89
Francouzská metodika	EV_1 [MPa]	24,09	12,68	34,33	45,06	121,84	102,58	38,88	54,21
	EV_2 [MPa]	73,17	66,67	77,14	97,12	162,65	142,11	100,37	102,75
	k [-]	3,04	5,26	2,25	2,16	1,33	1,39	2,58	2,57
Německá metodika	EV_1 [MPa]	21,02	20,35	29,40	54,71	140,23	121,89	25,91	59,07
	EV_2 [MPa]	78,47	70,86	104,50	149,15	205,75	207,69	114,84	133,04
Porovnáni české a francouzské metodiky	E_1/EV_1 [MPa]	2,16	4,00	1,65	1,01	0,94	0,77	1,18	1,67
	E_2/EV_2 [MPa]	1,26	1,03	1,25	1,09	1,22	1,01	1,17	1,15
	$(E_2/E_1)/k$ [-]	0,58	0,26	0,76	1,08	1,30	1,31	0,99	0,90
Porovnáni české a německé metodiky	E_1/EV_1 [MPa]	2,48	2,49	1,93	0,83	0,82	0,65	1,78	1,57
	E_2/EV_2 [MPa]	1,17	0,97	0,92	0,71	0,96	0,69	1,02	0,92



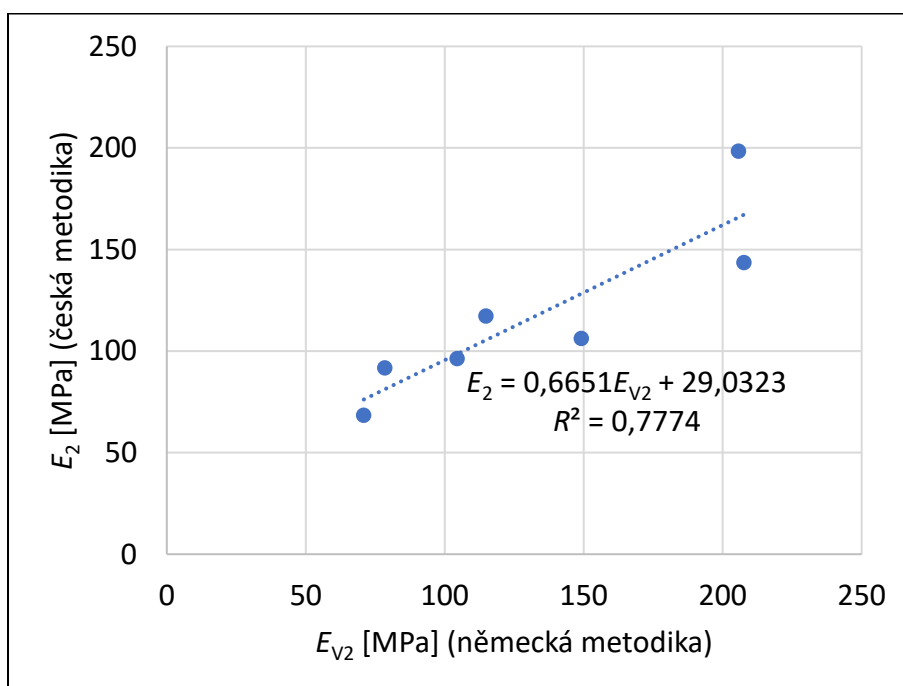
Obrázek 17: Graf závislosti modulů E_1 a EV_1 u ŠD 0/32, ŠD 0/63 a DK 0/125



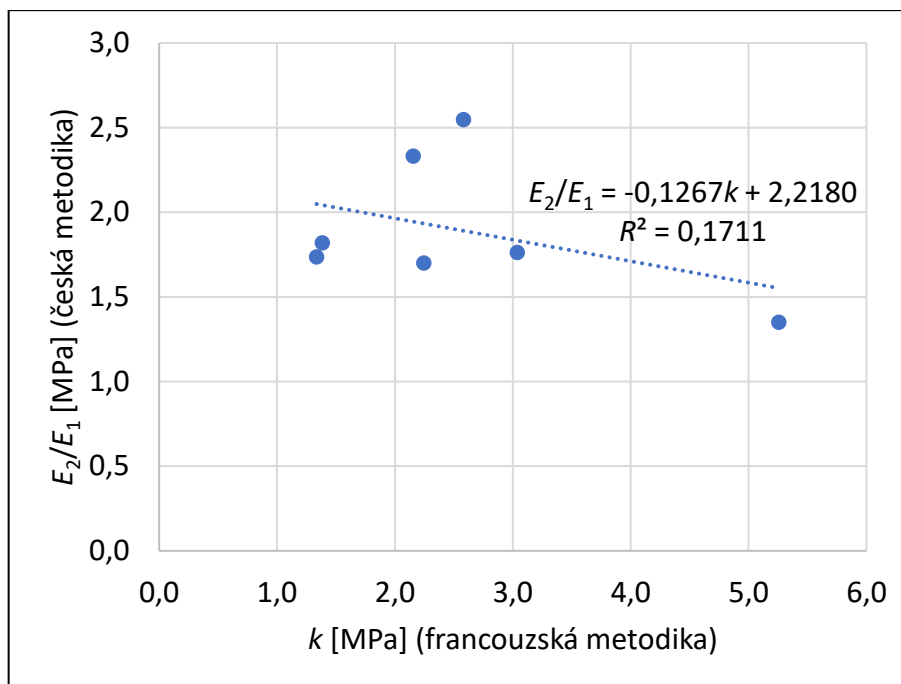
Obrázek 18: Graf závislosti modulů E_1 a E_{V1} u ŠD 0/32, ŠD 0/63 a DK 0/125



Obrázek 19: Graf závislosti modulů E_2 a EV_2 u ŠD 0/32, ŠD 0/63 a DK 0/125



Obrázek 20: Graf závislosti modulů E_2 a EV_2 u ŠD 0/32, ŠD 0/63 a DK 0/125



Obrázek 21: Graf závislosti poměrů modulů E_2/E_1 a k u ŠD 0/32, ŠD 0/63 a DK 0/125

Pokud porovnáme obrázek 15, resp. obrázek 16 s obrázkem 19, resp. obrázkem 20, lze jasně vidět, že vyloučení výsledků SZZ provedených na ZSH ze statistického souboru má pozitivní vliv na hodnoty druhých mocnin korelačních koeficientů lineární závislosti výsledků modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu. Ta se v případě porovnání SZZ dle české a německé metodiky zvyšuje z 0,4953 na 0,7774, v případě porovnání SZZ dle české a francouzské metodiky pak dokonce z 0,2445 na 0,9325.

Při porovnání SZZ dle české a francouzské metodiky lze obdobně jako při porovnání výsledků SZZ provedených na stejných materiálech (kapitola 5.1) také pozorovat, že hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu lineární závislosti výsledků modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu 0,9325 je vyšší než v případě výsledků modulu přetvárnosti z prvního zatěžovacího cyklu – 0,8141. Výsledky tedy znovu potvrzují teorii, že v prvním zatěžovacím cyklu dochází teprve k „dohutnění“ a konsolidaci zkoušeného podloží v místě provádění SZZ a teprve v druhém zatěžovacím cyklu dochází k vlastnímu měření kvality a deformačních charakteristik podloží. V případě porovnání SZZ dle české a německé metodiky však toto neplatí. Při porovnání výsledků modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu je hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu jejich lineární závislosti 0,7774 naopak nižší než hodnota 0,8077 při porovnání výsledků modulu přetvárnosti z prvního zatěžovacího cyklu. Pravděpodobně se zde projevuje vliv tvaru křivek jednotlivých zatěžovacích cyklů

na výsledek modulů přetvárnosti, které mohou být ovlivněny různými nehomogenitami a nepravidelnostmi rozmístění zrn ve zkoušeném prostředí. V příloze 1 lze vidět, že se u SZZ dle německé metodiky tvary křivek skutečně zkouška od zkoušky liší.

Na obrázku 21 je zobrazena závislost výsledků poměru modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů pro SZZ dle české a francouzské metodiky. Je patrné, že mezi jednotlivými výsledky nelze pozorovat významnou shodu. Druhá mocnina korelačního koeficientu lineární závislosti je 0,1711 a z rozmístění bodů v soustavě souřadnic je zřejmé, že ani pro jiný typ funkce spojnice trendu (např. polynomická nebo exponenciální) nebude hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu významně vyšší. To je logické. Už při výpočtu poměru modulu přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů dochází vlastně k porovnání dvou hodnot, jejichž závislost není stoprocentní (hodnota druhé mocniny korelačního koeficientu lineární závislosti je menší než jedna). Při dalším porovnání těchto hodnot se jejich závislost ještě snižuje. Pokud tedy porovnáme výsledné hodnoty modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů, nemá smysl porovnávat také jejich vzájemné poměry.

5.2.1 Vliv vlhkosti a objemové hmotnosti materiálů

Z porovnání hodnot uvedených v tabulce 10 lze dle očekávání pozorovat, že pokud je objemová hmotnost stejného materiálu významně vyšší, lze očekávat vyšší hodnoty výsledků modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů a nižší hodnoty jejich vzájemných poměrů (např. porovnání výsledků SZZ na ŠD 0/63 z druhého měření v kamenolomu Zbraslav a z měření na trati v Soběslavi), u menších rozdílů v objemových hmotnostech na to však nelze spoléhat (např. porovnání výsledků SZZ na ŠD 0/32 z prvního a z druhého měření v kamenolomu Zbraslav). Obdobná závislost platí také ve většině případů výsledků kontrolních rázových zatěžovacích zkoušek – při vyšších hodnotách rázového modulu deformace lze očekávat vyšší hodnoty modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů a menší hodnoty jejich vzájemných poměrů (viz tabulky 5 a 6). Závislost výsledků provedených SZZ na vlhkosti materiálu však bohužel pozorovat nelze, a to ani v případě porovnání výsledků zkoušek provedených dle stejné metodiky, ani v případě hledání vztahu mezi výsledky zkoušek provedených dle různých metodik.

Jako příklad uvedme obě porovnávací experimentální měření v kamenolomu Zbraslav (obdobné tloušťky zkušebních vrstev, obdobné podmínky měření). U prvního měření vychází pro ŠD 0/32 s vyšší vlhkostí 3,79 % nepatrně nižší hodnoty modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů a vyšší hodnoty jejich vzájemných poměrů než u druhého měření pro ŠD 0/32 s nižší vlhkostí 2,96 %, pro ŠD 0/63 je tomu však přesně naopak. Při prvním měření byla vlhkost materiálu 2,66 % nižší než při druhém měření (3,06 %), výsledky modulů přetvárnosti však vycházejí vyšší pro druhé měření, a to významně.

V případě porovnání modulů přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu E_2 a EV_2 vycházejí jejich poměry pro obě měření u obou materiálů téměř shodně a v případě porovnání modulů přetvárnosti z prvního zatěžovacího cyklu E_1 a EV_1 platí to stejné jako v předchozím odstavci. U ŠD 0/32 lze pro materiál s vyšší vlhkostí pozorovat vyšší hodnotu poměru E_1/EV_1 , pro ŠD 0/63 však opět platí závislost obrácená.

Jiné to není ani v případě porovnání výsledků SZZ dle české a německé metodiky. U ŠD 0/32 vychází pro vyšší vlhkost vyšší poměry E_1/EV_1 i E_2/EV_2 , u ŠD 0/63 však vychází pro vyšší vlhkost poměry E_1/EV_1 i E_2/EV_2 nižší.

Ačkoliv nelze z uvedených výsledků porovnávacích experimentálních měření stanovit žádný specifický závěr o vlivu vlhkosti na výsledky SZZ a jejich vzájemné vztahy, nelze ho zcela vyloučit. Porovnávací experimentální měření nebyla přeci jen na sledování vlivu vlhkosti zaměřena, ze statistického hlediska jich bylo provedeno velmi malé množství a zjištěné hodnoty vlhkosti se pohybují ve velmi malém rozptylu (od 2,66 % do 3,79 % pro měření v experimentálních podmínkách v kamenolomu Zbraslav, od 1,70 % do 3,68 % pro měření na dvou reálných stavbách železniční tratě v České republice). O vlivu vlhkosti materiálu zkoušené vrstvy na jeho zhutnitelnost nakonec vypovídá i Proctorova křivka [9]. Pro nalezení vztahu mezi vlhkostí materiálu, jeho objemovou hmotností v suchém a v přirozeně vlhkém stavu a mezi výsledky SZZ bude tedy lepší se tomuto problému věnovat v rámci další výzkumné činnosti, která bude na tuto problematiku lépe zaměřena.

5.3 Závěr z vyhodnocení porovnávacích experimentálních měření

I přesto, že bylo provedeno pouze osm trojic SZZ, lze pozorovat **významnou shodu v porovnání výsledných hodnot modulů přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu** E_2 , EV_2 a E_{V2} . Z prezentovaných výsledků se vymyká pouze porovnání zkoušek provedených na ZSH, což je pravděpodobně způsobeno nehomogenitou materiálu. Důležité je také si uvědomit, že ZSH je od ostatních zkoušených materiálů charakterově velmi odlišná a nejedná se pouze o přírodní zrnitý materiál, který neobsahuje žádné další příměsi. Pro další výzkumnou činnost je tedy vhodné zvážit možnost porovnávání výsledků SZZ zvláště pro různé typy materiálů a konstrukcí (např. zvláště pro ŠD a DK, pro zlepšené zeminy a stabilizace, pro asfaltový beton, pro konstrukce obsahující geosyntetika apod.).

V porovnání výsledných hodnot modulů přetvárnosti z prvního zatěžovacího cyklu E_1 , EV_1 a E_{V1} je již shoda výrazně menší a pro stanovení jejich vzájemného vztahu by bylo potřeba rozšířit statistický soubor o další výsledky provedených zkoušek. V případě SZZ dle francouzské a německé metodiky je hodnota největšího kontaktního napětí pod deskou v prvním zatěžovacím cyklu nižší než ve druhém (pro SZZ dle francouzské metodiky jsou to hodnoty 0,25 MPa a 0,20 MPa, pro SZZ dle německé metodiky potom hodnoty 0,50 MPa a 0,42 MPa). Logicky tedy vychází lepší shoda v porovnání hodnot modulů přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu – v prvním zatěžovacím cyklu dojde k „dohutnění“ a konsolidaci zkoušeného podloží v místě provádění SZZ na takovou úroveň, které není ani ve druhém zatěžovacím cyklu dosaženo, tedy je v případě SZZ dle francouzské a německé metodiky podloží kruhové zatěžovací desky pro druhý zatěžovací cyklus o to lépe připraveno.

Hlavním výsledkem SZZ je však hodnota modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu E_2 , resp. EV_2 , resp. E_{V2} , která vyjadřuje únosnost zkoušeného podloží. Hodnota modulu přetvárnosti z prvního zatěžovacího cyklu, resp. hodnota poměru modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů se používá pouze jako nepřímá metoda pro stanovení míry zhutnění (viz kapitola 3). Z toho důvodu tedy není potřeba jí věnovat takovou pozornost, jakou je potřeba věnovat hodnotě modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu.

Pro vzájemný vztah hodnot modulů přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu SZZ dle české a francouzské a SZZ dle české a německé metodiky byly stanoveny rovnice spojnice trendu, které jsou společně s druhými mocninami korelačních koeficientů lineární závislosti přehledně uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11: Rovnice spojnice trendu a druhé mocniny korelačních koeficientů lineární závislosti

Materiál	Rovnice spojnice trendu	Druhá mocnina korelačního koeficientu lineární závislosti
<i>Porovnání SZZ dle české a francouzské metodiky</i>		
ŠD 0/32	$E_2 = 0,9267EV_2 + 24,4502$	$R^2 = 0,9989$
ŠD 0/63	$E_2 = 0,9828EV_2 + 5,9338$	$R^2 = 0,9870$
ŠD 0/32, ŠD 0/63, DK 0/125	$E_2 = 1,1254EV_2 + 1,8918$	$R^2 = 0,9325$
<i>Porovnání SZZ dle české a německé metodiky</i>		
ŠD 0/32	$E_2 = 0,6006EV_2 + 42,2650$	$R^2 = 0,6827$
ŠD 0/63	$E_2 = 0,5451EV_2 + 28,4264$	$R^2 = 0,9937$
ŠD 0/32, ŠD 0/63, DK 0/125	$E_2 = 0,6651EV_2 + 29,0323$	$R^2 = 0,7774$

Uvedené rovnice lze dobře využít právě při vyjádření požadované hodnoty únosnosti (modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu) na ZP nebo PTŽS vysokorychlostních železničních tratí stanovené v zahraničních předpisech jako hodnotu únosnosti pro SZZ dle české metodiky. V tabulce 12 je uveden názorný příklad. Pokud by požadavek zahraničních předpisů na hodnotu modulu přetvárnosti EV_2 , resp. E_{V2} byl například 80 MPa, lze tuto hodnotu chápat jako zde uvedené hodnoty modulu přetvárnosti E_2 stanovené podle rovnic spojnice trendu uvedených v tabulce 11.

Tabulka 12: Příklad výpočtu požadované hodnoty modulu přetvárnosti E_2 na základě hodnot uvedených v zahraničních předpisech

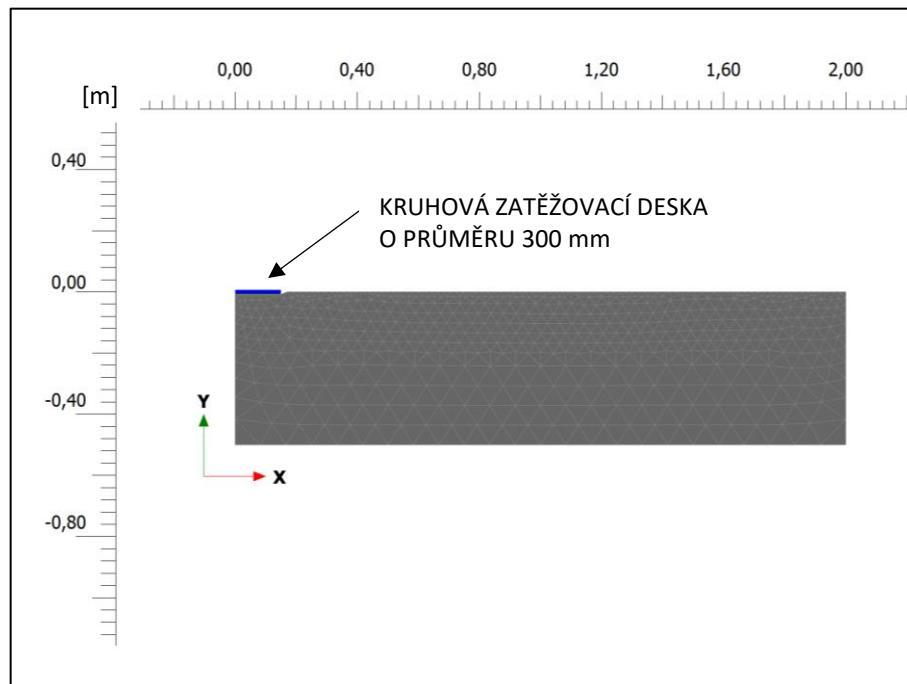
Materiál	Rovnice spojnice trendu	EV_2 , resp. E_{V2} [MPa]	E_2 [MPa]
<i>Porovnání SZZ dle české a francouzské metodiky</i>			
ŠD 0/32	$E_2 = 0,9267EV_2 + 24,4502$	80	98,59
ŠD 0/63	$E_2 = 0,9828EV_2 + 5,9338$	80	84,56
ŠD 0/32, ŠD 0/63, DK 0/125	$E_2 = 1,1254EV_2 + 1,8918$	80	91,92
<i>Porovnání SZZ dle české a německé metodiky</i>			
ŠD 0/32	$E_2 = 0,6006EV_2 + 42,2650$	80	90,31
ŠD 0/63	$E_2 = 0,5451EV_2 + 28,4264$	80	72,03
ŠD 0/32, ŠD 0/63, DK 0/125	$E_2 = 0,6651EV_2 + 29,0323$	80	82,24

Hodnoty modulu přetvárnosti E_2 vypočtené z uvedených rovnic je však nutné brát **pouze jako orientační**. Rovnice totiž vycházejí pouze ze sedmi trojic SZZ provedených pouze na třech typech materiálu, takže je bez předchozího ověření provedením dalších doplňujících sérií porovnávacích experimentálních měření nelze aplikovat pokaždé, ale spíše v případech, kdy požadované hodnoty modulů E_{V2} a E_{V2} alespoň přibližně odpovídají hodnotám naměřeným v rámci této práce a kdy je konstrukce pražcového podloží tvořena obdobnými materiály, jako na kterých byly SZZ v rámci této práce provedeny. Pokud však budou požadavky na únosnost konstrukce pražcového podloží vysokorychlostních železničních tratí v České republice nastaveny dostatečně konzervativně, lze i přesto na základě poměrně vysokých hodnot druhých mocnin korelačních koeficientů považovat uvedené rovnice za spolehlivé, tedy alespoň v případě porovnání SZZ dle české a francouzské metodiky.

6. Modelování statické zatěžovací zkoušky pomocí softwarového nástroje

Součástí této práce je také vytvoření a optimalizace modelu průběhu SZZ. Za tímto účelem byl využit program Plaxis 2D [21], který se dnes běžně používá v mnoha geotechnických disciplínách, jako je např. výpočet stability svahu, únosnosti a sedání základových konstrukcí nebo modelování proudění podzemní vody. Tento program využívá při výpočtech metodu konečných prvků, do kterých je diskretizováno modelované spojité geotechnické prostředí a které jsou reprezentovány trojúhelníkovou sítí. Pro každý z těchto prvků je pak hledaný výsledek aproximován ze zadaných okrajových podmínek a parametrů modelovaného prostředí pomocí iteračního procesu.

Ze samotného názvu programu se může zdát, že lze pomocí něj řešit pouze rovinné úlohy. Program Plaxis 2D ale nabízí také možnost zavést model jako **rotačně symetrický**. Osa y je pak brána jako rotační osa symetrie modelovaného prostředí, takže se vlastně jedná o symetrickou prostorovou úlohu (viz obrázek 22). Vzhledem ke kruhovému tvaru zatěžovací desky a k homogenitě idealizovaného prostředí je tedy tento model přímo vhodný pro modelování SZZ.



Obrázek 22: Rotačně symetrický model programu Plaxis 2D [21]

Nastavení pracovního prostředí dále pokračuje výběrem jednotek a nastavením různých konstant, jako je např. hodnota tíhového zrychlení, objemová tíha vody nebo ledu, měrná tepelná kapacita vody nebo ledu atd. V tomto kroku byly pro model SZZ ponechány základní hodnoty přednastavené výrobcem programu.

V této kapitole je tedy dále popsán vytvořený model SZZ a také postup jeho vytvoření, optimalizace a nastavení jeho okrajových podmínek včetně zdůvodnění a porovnání s jinými alternativami. Na závěr jsou pak shrnuty veškeré vlastnosti a parametry výsledného modelu, které byly optimalizovány pro skutečný průběh SZZ provedených na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 při druhém měření v kamenolomu Zbraslav. Tyto SZZ byly vybrány z toho důvodu, že se při přibližném optickém zhodnocení blíží jejich výsledky na obrázcích 17 až 21 uvedeným spojnicím trendu nejlépe.

6.1 Popis vlastností modelu

6.1.1 Popis vlastností modelu zemního prostředí

Pro nastavení parametrů modelovaného zemního prostředí je nejprve nutné zvolit typ materiálového modelu. Jako nejvhodnější se pro danou problematiku může jevit model „**hardening soil**“, u kterého lze na základě mnoha podrobných materiálových parametrů docela přesně určit průběh zatěžování. U tohoto modelu lze například určit přesnou funkci změny velikosti deformačního modulu zatěžované zeminy v závislosti na velikosti zatížení a deformace nebo velikost Poissonova čísla a součinitele bočního tlaku v klidu v závislosti na stupni překonsolidace zeminy. Variabilita možností nastavení těchto vstupních údajů je však pro obdobné výsledky velmi velká a žádný z nich nebyl ze vzorku ŠD 0/32 tvořícího zkušební vrstvu, pro kterou je model optimalizován, laboratorně určen, takže bylo od této možnosti upuštěno.

Další možností pro určení typu materiálového modelu je model „**Mohr-Coulomb**“. Tento model se chová lineárně pružnoplasticky a pokud nedojde k jeho zplastizování, dojde při jeho zatížení a opětovném odtížení k návratu do původního stavu. To však úplně nekoresponduje se skutečností odpovídající SZZ provedeným v rámci porovnávacího experimentálního měření. V příloze 1 lze pro každou z provedených zkoušek, při které nedochází v prvním zatěžovacím cyklu ke zplastizování zkoušeného

prostředíⁱ pozorovat, že zatlačení desky se po prvním odtěžovacím cyklu na nulovou hodnotu naopak nevrací. Tuto skutečnost však lze obejít tím, že jsou pro každý ze zatěžovacích, resp. odtěžovacích cyklů nastaveny jiné parametry deformačního modulu, popř. Poissonova čísla.

Jako materiálový model zemního prostředí byl tedy vybrán model „Mohr-Coulomb“, a to jako kompromis, který bude zároveň dobře vystihovat chování zkoušeného podloží a pro který bude zároveň možné optimalizovat jeho číselné parametry i bez znalosti jejich skutečných hodnot. Jediný číselný parametr, který nebyl optimalizován, ale byl nastaven na základě zkušeností s předchozím modelováním geotechnických konstrukcí, byla hodnota součinitele redukce tuhosti materiálu na zadaném rozhraní $R_{inter} = 0,667$. Takové rozhraní pak bylo zadáno v oblasti kontaktu kruhové zatěžovací desky s podložím.

6.1.2 Popis vlastností modelu kruhové zatěžovací desky

Pro kruhovou zatěžovací desku existuje v programu Plaxis 2D reálně jediná možnost, jak ji modelovat. Materiál, ze kterého jsou kruhové zatěžovací desky o obou průměrech vyrobeny, lze považovat za **izotropní** a při rozsahu jejich zatížení uvedeném v kapitole 2 také za **elastický**.

Tuhost obou desek pak byla nastavena tak, aby za předpokladu, že jsou desky vyrobeny z oceli, odpovídala jejich tloušťkám 50 mm. To se v případě desky o průměru 300 mm může zdát příliš, nicméně berme v úvahu, že na skutečnou desku je také pomocí dalšího materiálu připevněn kulový kloub zajišťující její centrické zatížení i při jejím nerovnoměrném zatlačení, což významně navyšuje její tuhost. Ani při redukci parametrů modelu kruhové zatěžovací desky tak, že by její tloušťka odpovídala poloviční hodnotě, však nedošlo ke znatelnému ovlivnění výsledků výpočtu, takže byly v obou případech za účelem zachování jednoduchosti modelu ponechány stejné hodnoty tuhostí desek.

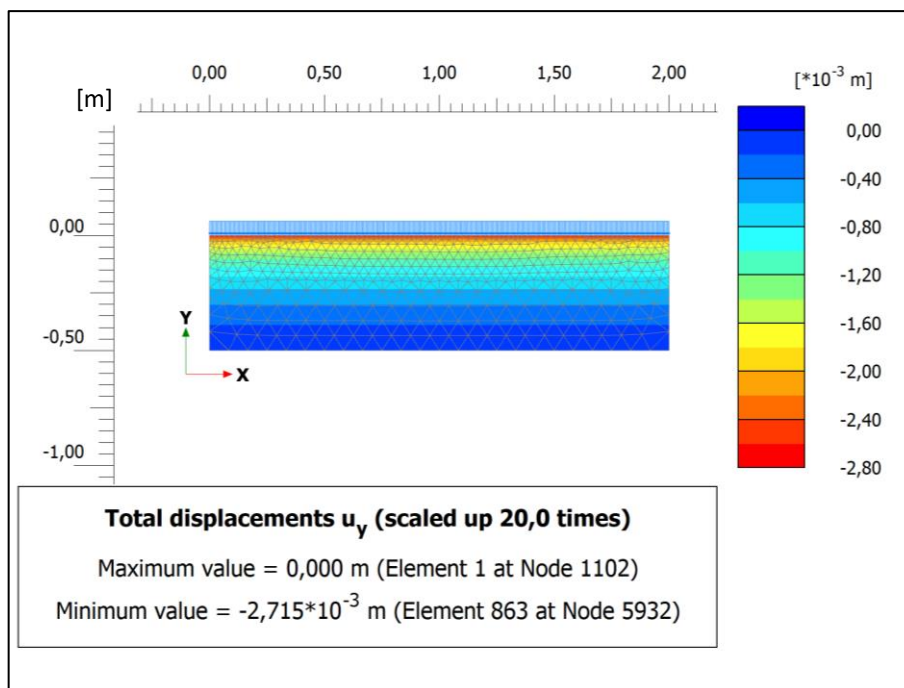
ⁱ Jedná se většinou o SZZ dle české metodiky, u SZZ dle německé metodiky lze naopak téměř vždy pozorovat výraznou změnu sklonu zatěžovací křivky v průběhu prvního zatěžovacího cyklu a u SZZ dle francouzské metodiky průběh zatěžovací křivky pozorovat vzhledem k nerozdělení zatěžovacích a odtěžovacích cyklů na jednotlivé stupně nelze.

6.2 Specifikace okrajových podmínek

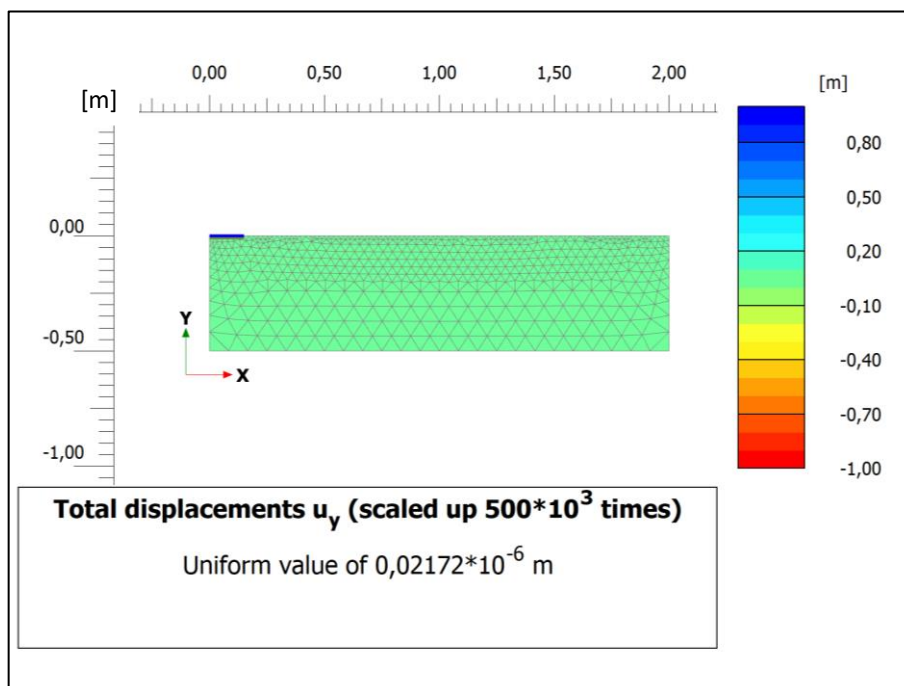
Jak je již zmíněno v kapitole 4.2.2, zkušební vrstva z ŠD 0/32, pro kterou je model SZZ optimalizován, měla celkovou tloušťku po zhutnění cca 500 mm. Aby se model výsledný model co nejvíce blížil reálné situaci při druhém měření v kamenolomu Zbraslav, byla tedy vrstva **modelována také v tloušťce 500 mm**.

Zkušební vrstva byla zhotovena na podloží tvořeném horninovým prostředím o neznámých kvalitativních parametrech. Protože se o horninovém prostředí předpokládá, že je jeho tuhost výrazně vyšší než tuhost materiálu zkušební vrstvy, není toto podloží v modelu nijak znázorněno, tedy je namodelováno jako **dokonale tuhé**. To jistě může vzbudit podezření, že je do výpočtu vnesena určitá chyba, nicméně vzhledem k neznalosti těchto parametrů a (obdobně jako u modelu „hardening-soil“) k velké variabilitě možností jejich nastavení v kombinaci s nastavením parametrů materiálu zkušební vrstvy bylo nakonec i přesto rozhodnuto o tomto postupu.

Důležitou součástí modelu je **znázornění předchozího zhutnění zkušební vrstvy**. Samotné zatěžování desky je rozděleno do fází, které odpovídají jednotlivým stupňům zatěžovacích a odtěžovacích cyklů (např. pro SZZ dle české metodiky tvoří samotné provedení zkoušky dohromady 16 fází – dva zatěžovací a dva odtěžovací cykly po čtyřech stupních). Těmto fázím však předchází ještě dvě fáze znázorňující zhutnění vrstvy. V první z nich je na vrstvu celoplošně vneseno zatížení o hodnotě $500 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ (obrázek 23), ve druhé je pak toto zatížení odstraněno a na zkušební vrstvu je položena kruhová zatěžovací deska (obrázek 24). To je velmi důležité, protože tím dochází k výraznému ovlivnění únosnosti materiálu zkušební vrstvy. Pokud by například toto zhutnění modelováno nebylo nebo by hodnota celoplošného zatížení byla příliš nízká, došlo by v průběhu SZZ k dosažení únosnosti materiálu a výpočet by se přerušil. Pokud by na druhou stranu byla hodnota celoplošného zatížení naopak příliš vysoká, došlo by tím ke zvýšení tuhosti materiálu zkušební vrstvy a model průběhu SZZ by neodpovídal skutečnosti. Velikost celoplošného zatížení tedy byla optimalizována na hodnotu $500 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, což koneckonců do jisté míry odpovídá také technologii hutnění – byla použita vibrační deska s maximální přitlačnou silou 250 kN (viz kapitola 4.2.2) a rozměry vibrační desky lze přibližně odhadovat na 1 krát 0,5 metru.



Obrázek 23: Fáze znázorňující stav při hutnění zkušební vrstvy [21]

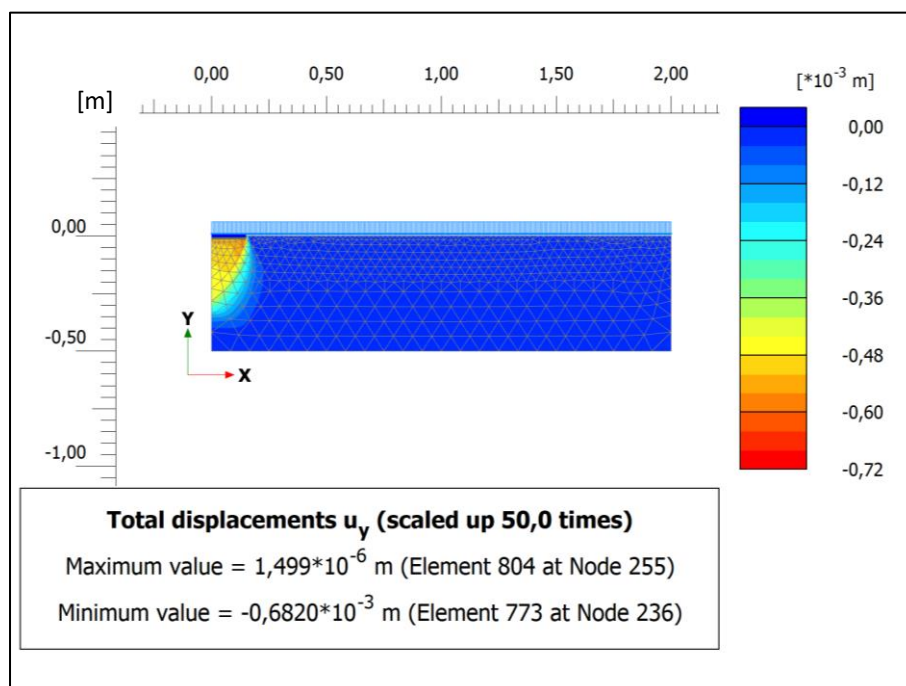


Obrázek 24: Fáze znázorňující stav po zhutnění zkušební vrstvy [21]

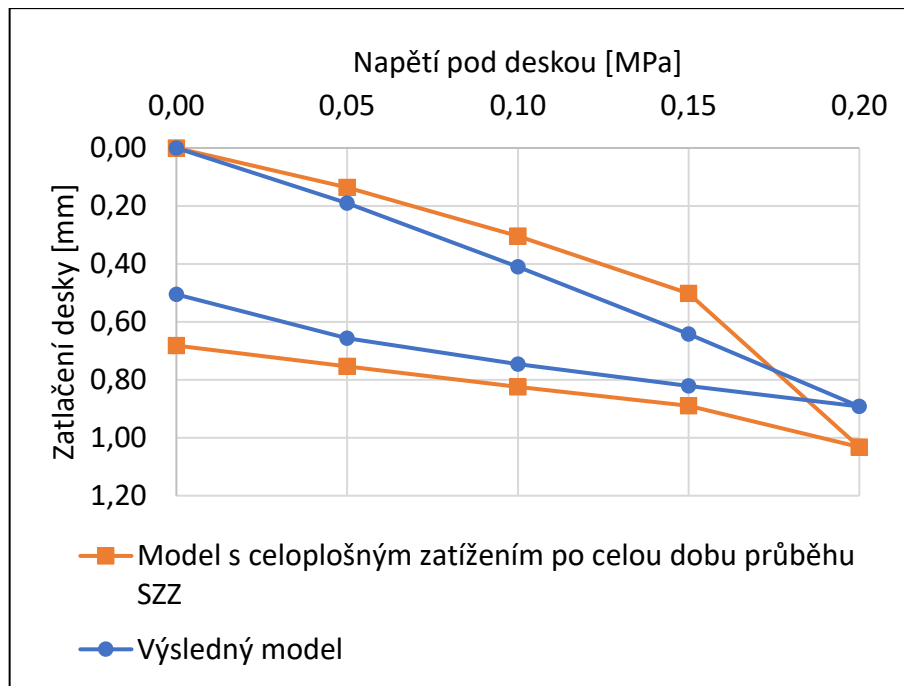
Na obrázcích 23 a 24 lze také vidět vlastnost materiálového modelu „Mohr-Coulomb“ zmíněnou již v kapitole 6.1.1, tedy že pokud jsou pro obě fáze uvažovány stejné materiálové parametry, dojde po zatížení a opětovném odtížení materiálu k jeho návratu do původního stavu (předpokládá se, že zbytková hodnota svislé deformace $0,02172 \cdot 10^{-6}$ m je způsobena chybou aproximačního výpočtu). Potvrzuje se tím tedy, že

při modelování SZZ pomocí tohoto materiálového modelu musí být skutečně pro různé zatěžovací a odtěžovací cykly uvažovány různé hodnoty materiálových parametrů.

Při vytváření a optimalizaci modelu byly **prověřovány také jiné varianty**, jak znázornit překonsolidaci materiálu zkušební vrstvy a existenci reziduálních vodorovných napětí po zhutnění. Pro materiálový model „Mohr-Coulomb“ jsou tyto možnosti velmi omezené. Prověřována byla například možnost ponechání nenulového celoplošného zatížení na povrchu zkušební vrstvy po celou dobu průběhu SZZ s tím, že zatížení desky bylo zase o tuto hodnotu patřičně navýšeno – viz obrázek 25. Tím se sice také zamezí předčasné ztrátě únosnosti materiálu a přerušení výpočtu, ale zároveň dochází k předčasnému plastizování zeminy už při velmi nízkých napětích. Na obrázku 26 je zobrazeno porovnání výsledného modelu průběhu prvního zatěžovacího a odtěžovacího cyklu SZZ dle české metodiky s modelem, kdy je pro znázornění překonsolidace materiálu na povrchu zkušební vrstvy ponecháno celoplošné zatížení po celou dobu průběhu SZZ. Celoplošné zatížení a následné odtížení povrchu zkušební vrstvy je tedy považováno za nejlepší možnost pro znázornění zhutnění při použití materiálového modelu „Mohr-Coulomb“, a to také proto, že nejlépe napodobuje reálnou situaci při druhém měření v kamenolomu Zbraslav.



Obrázek 25: Celoplošné zatížení povrchu vrstvy po celou dobu průběhu SZZ, fáze po dokončení prvního odtěžovacího cyklu [21]



Obrázek 26: Porovnání modelů průběhu prvního zatěžovacího a odtěžovacího cyklu SZZ dle české metodiky

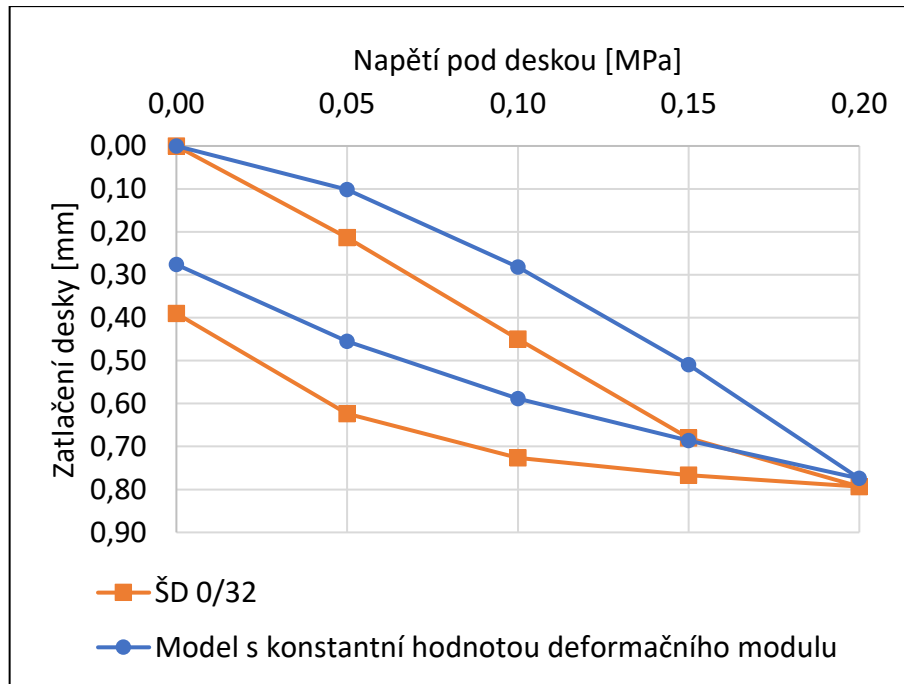
6.3 Optimalizace materiálových parametrů

Některé parametry materiálového modelu „Mohr-Coulomb“, jako je deformační modul E_{def} , Poissonovo číslo ν , soudržnost c , úhel vnitřního tření před zplastizováním ϕ a úhel vnitřního tření po zplastizování ψ , zásadně ovlivňují modelovaný průběh SZZ. Vzhledem k tomu, že se jedná o úlohu bez vlivu podzemní vody, ve všech případech se jedná o efektivní parametry. V prvním kroku optimalizace byly hodnoty těchto parametrů převzaty ze zrušené normy ČSN 73 1001 [22], přílohy 5, a následně byly postupně upravovány tak, aby se výsledný model co nejvíce blížil reálné situaci při druhém měření v kamenolomu Zbraslav. Materiál zkušební vrstvy (ŠD 0/32) byl přitom podle normy [22] považován za zeminu třídy G 3 (šterk s příměsí jemnozrné zeminy) s indexem ulehlosti $I_D = 0,67$ až $1,0$, což odpovídá požadavkům na křivku zrnitosti šterkodrtí do konstrukčních vrstev tělesa železničního spodku dle předpisu SŽ S4 [1], přílohy 14.

Jak již bylo naznačeno v předchozích částech kapitoly 6, byly vytvořeny **tři varianty modelu zemního prostředí** s názvy Gravel_1, Gravel_2 a Gravel_3, kdy varianta Gravel_1 byla přiřazena fázím odpovídajícím procesu hutnění zkušební vrstvy a prvního zatěžovacího cyklu, varianta Gravel_2 fázím odpovídajícím prvnímu odtěžovacímu cyklu

a v případě SZZ dle české metodiky také druhému odtěžovacímu cyklu a varianta Gravel_3 potom fázím odpovídajícím druhému zatěžovacímu cyklu. Pro všechny varianty byly nastaveny **stejně hodnoty c , ϕ a ψ** ovlivňující únosnost materiálu tak, aby do jisté míry odpovídaly hodnotám z normy [22] a zároveň aby modelovaný průběh SZZ odpovídal tomu skutečnému. Úhel vnitřního tření před zplastizováním ϕ byl tedy optimalizován na hodnotu 32° a úhel vnitřního tření po zplastizování ψ na hodnotu 24° . Pro soudržnost c uvádí norma v případě zeminy třídy G 3 nulovou hodnotu. Tím je ovšem u modelu významně ovlivněn moment ztráty únosnosti materiálu a přerušení výpočtu, a proto byla hodnota soudržnosti c nastavena na hodnotu 5 kPa. Při druhém měření v kamenolomu Zbraslav byla na materiálu zkušební vrstvy nenulová soudržnost stejně pouhým okem znatelná (zaklínění zrn, „svislost svahu“ okraje zkušební vrstvy na určitou nenulovou výšku [9]), je tedy patrné, že nenulová hodnota soudržnosti je reálné situaci bližší než nulová.

Kromě jednoduchého nastavení konstantní hodnoty deformačního modulu E_{def} nabízí program také možnost, že se jeho hodnota **s hloubkou zvětšuje**. Tomu více odpovídá také reálná situace – v příloze 1 lze nejen pro zkušební vrstvu z ŠD 0/32 při druhém měření v kamenolomu Zbraslav při provádění SZZ dle české a německé metodiky pozorovat postupné zmenšování přírůstku hodnoty zatlačení desky s nárůstem kontaktního napětí pod deskou. Pokud bychom uvažovali pouze s konstantní hodnotou deformačního modulu, přírůstek hodnoty zatlačení desky by se s nárůstem kontaktního napětí pod deskou naopak zvětšoval (viz obrázek 27) – zatížení by se s větší hodnotou projevovalo i ve větších hloubkách, tedy by postupně docházelo také k deformacím hlubších vrstev a celkový nárůst deformací by byl vyšší. Pro materiálový model „Mohr-Coulomb“ je tedy vhodné uvažovat zvětšování hodnoty deformačního modulu s hloubkou.



Obrázek 27: Porovnání modelů průběhu prvního zatěžovacího a odtěžovacího cyklu SZZ dle české metodiky

Pro jednotlivé varianty modelu zemního prostředí tedy byly nastaveny následující hodnoty deformačního modulu:

- Gravel_1: $E_{def} = 10$ MPa s přírůstkem $500 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ do hloubky,
- Gravel_2: $E_{def} = 120$ MPa bez přírůstku do hloubky,
- Gravel_3: $E_{def} = 10$ MPa s přírůstkem $1200 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ do hloubky.

Uvedené hodnoty se mohou na první pohled zdát poněkud podivné. Hodnota deformačního modulu $E_{def} = 10$ MPa totiž podle normy [22] odpovídá spíše jemnozrnným zeminám, nicméně berme v úvahu, že při hodnotě přírůstku $500 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ do hloubky je vlastně v hloubce 0,1 metru hodnota deformačního modulu rovna 60 MPa, což již odpovídá zeminám třídy G 4 (šterk hlinitý). Pokud by byla počáteční hodnota deformačního modulu zvětšena a její přírůstek do hloubky naopak zmenšen, zatěžovací křivka modelu by se více prohýbala na opačnou stranu a odchylovala by se tak od zatěžovací křivky vystihující reálnou situaci.

Pro odtěžovací cykly je nastavena konstantní hodnota deformačního modulu bez přírůstku do hloubky. Tím je dobře znázorněna skutečnost, že po odtížení zůstává zemina překonsolidovaná a odtížení probíhá do jisté míry lineárně. Při druhém zatížení naopak opět dochází k nárůstu deformačního modulu s hloubkou, tentokrát dokonce k mnohem většímu než v prvním zatěžovacím cyklu, což lépe odpovídá reálné situaci.

Poissonovo číslo bylo pro všechny tři varianty nastaveno shodně na hodnotu $\nu = 0,25$. Mohlo by být sice nastaveno pro každou variantu odlišně, přeci jen také ovlivňuje průběh velikosti zatlačení desky v závislosti na kontaktním napětí pod deskou, nicméně rozdílnost sklonů zatěžovacích, resp. odtěžovacích křivek je již modelována pomocí rozdílných hodnot deformačního modulu a hodnota $\nu = 0,25$ odpovídá podle normy [22] zeminám třídy G 3.

6.4 Závěrečné shrnutí vlastností a parametrů vytvořeného modelu

Pro průběh SZZ byl tedy použit materiálový model „**Mohr-Coulomb**“ s tím, že jsou pro každý ze zatěžovacích, resp. odtěžovacích cyklů uvažovány **jiné parametry zemního prostředí**. Pro první zatěžovací cyklus byla vytvořena varianta s názvem Gravel_1, pro první i druhý odtěžovací cyklus varianta s názvem Gravel_2 a pro druhý zatěžovací cyklus varianta s názvem Gravel_3. Jejich parametry jsou společně s dalšími hodnotami majícími významný vliv na výsledek výpočtu přehledně uvedeny v tabulce 13.

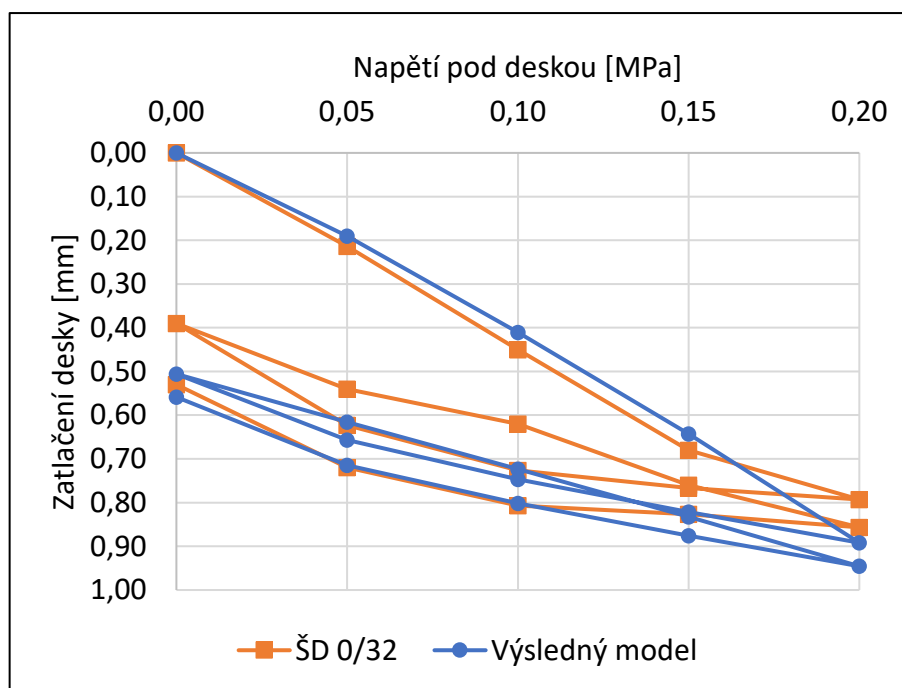
Tabulka 13: Parametry variant materiálových modelů

Varianta materiálového modelu	Gravel_1	Gravel_2	Gravel_3
Deformační modul E_{def} [MPa]	10	120	10
Přírůstek deformačního modulu do hloubky [MPa·m ⁻¹]	500	0	1200
Poissonovo číslo ν [-]	0,25		
Soudržnost c [kPa]	5		
Úhel vnitřního tření před zplastizováním ϕ [°]	32		
Úhel vnitřního tření po zplastizování ψ [°]	24		
Součinitel redukce tuhosti materiálu na zadaném rozhraní R_{inter} [-]	0,667		
Velikost celoplošného zatížení znázorňujícího hutnění zkušební vrstvy [kN·m ⁻²]	500		

V tabulkách 14, 15 a 16 jsou pak uvedeny průběhy velikosti zatlačení desky v závislosti na kontaktním napětí pod deskou spočítané programem. Tyto hodnoty jsou v porovnání s reálnými hodnotami odpovídajícími SZZ provedeným na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 při druhém měření v kamenolomu Zbraslav zobrazeny na obrázcích 28, 29 a 30. V tabulce 17 je pak uvedeno porovnání vyhodnocených výsledků SZZ dle české, francouzské i německé metodiky.

Tabulka 14: Výsledný model průběhu SZZ dle české metodiky

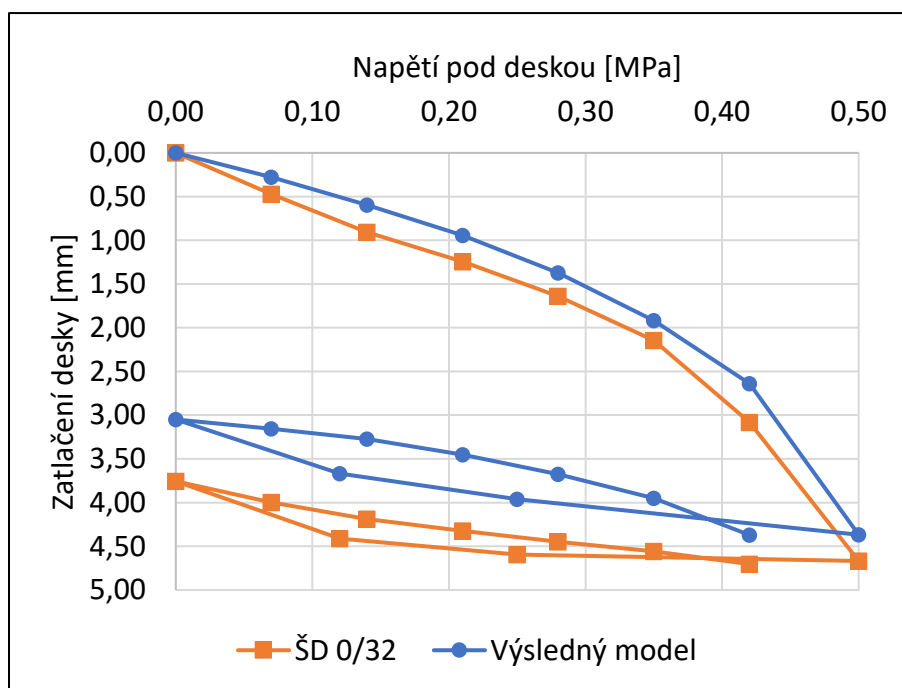
Kontaktní napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]
0,00	0,00
0,05	0,19
0,10	0,41
0,15	0,64
0,20	0,89
0,15	0,82
0,10	0,75
0,05	0,66
0,00	0,51
0,05	0,62
0,10	0,72
0,15	0,83
0,20	0,95
0,15	0,88
0,10	0,80
0,05	0,71
0,00	0,56



Obrázek 28: Porovnání výsledného modelu průběhu SZZ dle české metodiky s reálnou situací

Tabulka 15: Výsledný model průběhu SZZ dle německé metodiky

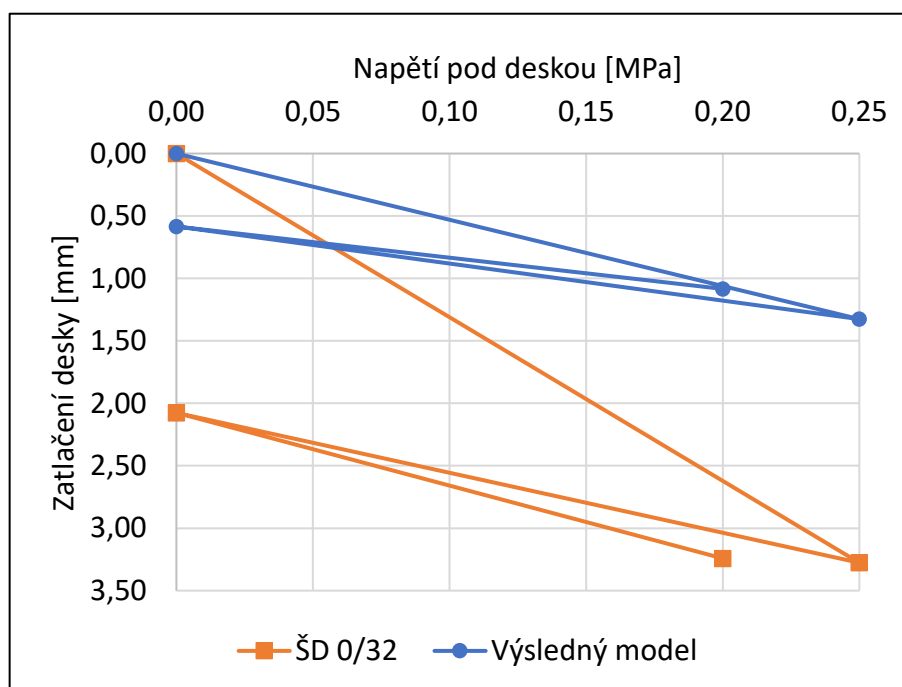
Kontaktní napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]
0,00	0,00
0,07	0,28
0,14	0,60
0,21	0,94
0,28	1,37
0,35	1,92
0,42	2,64
0,50	4,37
0,25	3,96
0,12	3,67
0,00	3,05
0,07	3,16
0,14	3,27
0,21	3,45
0,28	3,67
0,35	3,95
0,42	4,37



Obrázek 29: Porovnání výsledného modelu průběhu SZZ dle německé metodiky s reálnou situací

Tabulka 16: Výsledný model průběhu SZZ dle francouzské metodiky

Kontaktní napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]
0,00	0,00
0,25	1,33
0,00	0,58
0,20	1,08



Obrázek 30: Porovnání výsledného modelu průběhu SZZ dle francouzské metodiky s reálnou situací

Tabulka 17: Porovnání výsledků výsledného modelu SZZ s reálnou situací

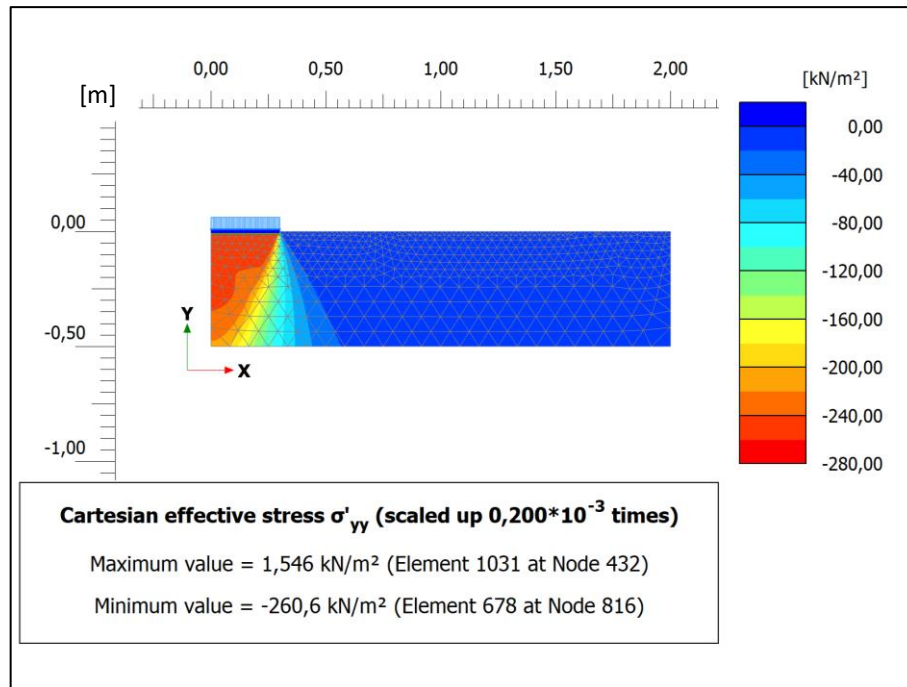
Výsledek SZZ	ŠD 0/32	Výsledný model
<i>SZZ dle české metodiky</i>		
E_1 [MPa]	56,72	50,45
E_2 [MPa]	96,43	102,30
E_2/E_1 [-]	1,70	2,03
<i>SZZ dle německé metodiky</i>		
E_{v1} [MPa]	29,40	30,57
E_{v2} [MPa]	104,50	74,11
<i>SZZ dle francouzské metodiky</i>		
EV_1 [MPa]	34,33	84,84
EV_2 [MPa]	77,14	179,71
k [-]	2,25	2,12

Z obrázků 28 a 29 je patrné, že jsou parametry jednotlivých variant modelu zemního prostředí nastaveny tak, aby výsledný model průběhu SZZ dle české a německé

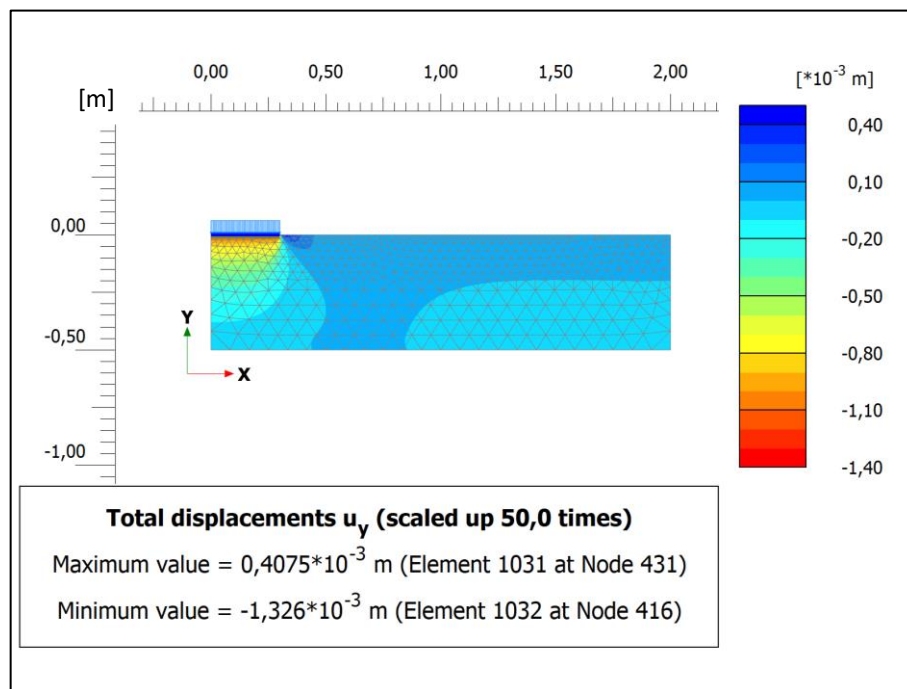
metodiky přibližně odpovídal reálné situaci. U SZZ dle české metodiky se relativně dobře shodují i výsledky modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů (viz tabulka 17). Jak je zmíněno již v kapitole 5.2, poměr modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů E_2/E_1 vlastně porovnává dvě různé hodnoty, které se neshodují absolutně. Je tedy logické, že je shoda v porovnání hodnot tohoto poměru ještě menší.

U SZZ dle německé metodiky, kdy má vliv na hodnotu modulu přetvárnosti z daného zatěžovacího cyklu také tvar zatěžovací křivky a její regresní koeficienty a_1 a a_2 , se již výrazně liší hodnota modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu. To je dáno tím, že byl při optimalizaci materiálových parametrů hledán takový kompromis, aby průběh druhého zatěžovacího cyklu co nejvíce odpovídal jak reálné SZZ dle německé, tak reálné SZZ dle české metodiky. U SZZ dle české metodiky nemá tvar zatěžovací křivky a její regresní koeficienty a_1 a a_2 na výsledek modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu E_2 vliv, logicky zde tedy vychází lepší shoda mezi výsledným modelem a reálnou situací než u SZZ dle německé metodiky.

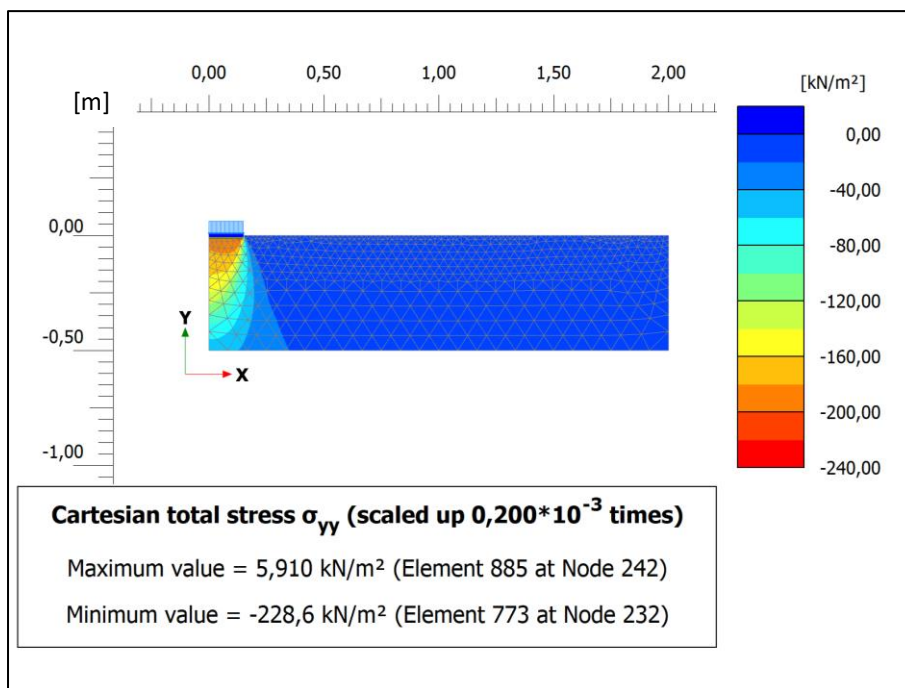
Z obrázku 30 je patrné, že výsledný **model průběhu SZZ dle francouzské metodiky** vykazuje oproti skutečnému průběhu SZZ provedené na zkušební vrstvě významnou odlišnost. Odlišné jsou také hodnoty modulů přetvárnosti z jednotlivých zatěžovacích cyklů a jejich vzájemného poměru k (viz tabulka 17). To je pravděpodobně způsobeno tím, že při použití kruhové zatěžovací desky o průměru 600 mm se účinky zatížení projevují ve větších hloubkách, než ve kterých je podloží modelováno. Na obrázku 31 je zobrazeno rozdělení efektivních napětí σ_y v podloží desky po dokončení prvního zatěžovacího cyklu, na obrázku 32 potom rozdělení svislých deformací u_y . Pro porovnání jsou prezentovány i obrázky 33 a 34, které zobrazují obdobné veličiny, ale pro SZZ dle české metodiky, tedy kruhovou zatěžovací desku o průměru 300 mm.



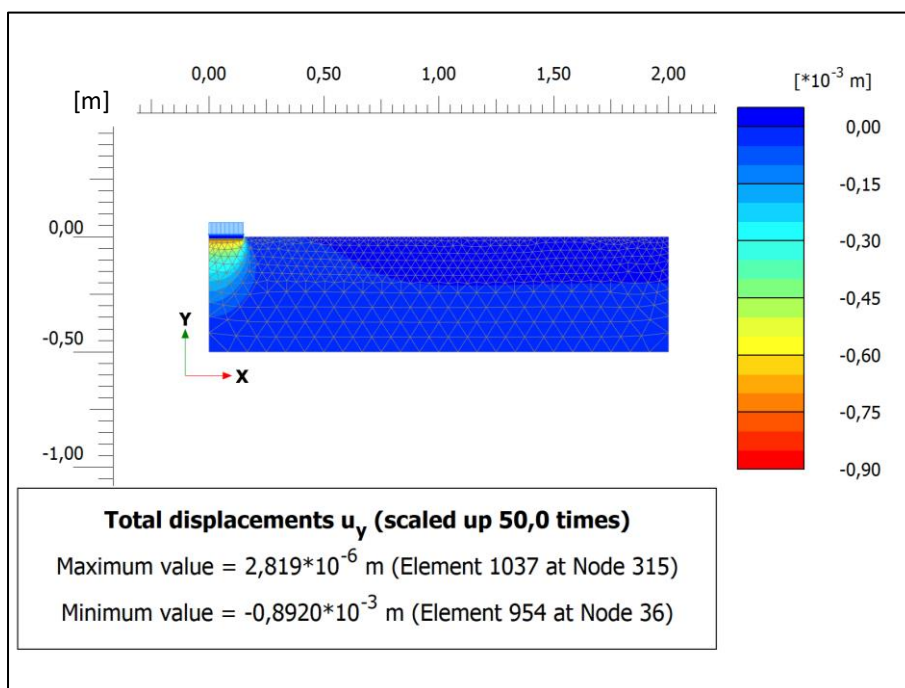
Obrázek 31: Rozdělení svislých efektivních napětí σ_y v podloží desky po dokončení prvního zatěžovacího cyklu (SZZ dle francouzské metodiky) [21]



Obrázek 32: Rozdělení svislých deformací u_y v podloží desky po dokončení prvního zatěžovacího cyklu (SZZ dle francouzské metodiky) [21]



Obrázek 33: Rozdělení svislých efektivních napětí σ_y v podloží desky po dokončení prvního zatěžovacího cyklu (SZZ dle české metodiky) [21]



Obrázek 34: Rozdělení svislých deformací u_y v podloží desky po dokončení prvního zatěžovacího cyklu (SZZ dle české metodiky) [21]

Lze pozorovat, že i pro nenulové hodnoty efektivního napětí na rozhraní mezi zkušební vrstvou a jejím podložím jsou v této oblasti nulové svislé deformace. Tím se potvrzuje, že namodelování horninového podloží jako dokonale tuhého vnáší do výpočtu jistou chybu, a zvolený koncept modelu zde naráží na svoje limity. Zároveň si však

na obrázku 30 můžeme všimnout, že **tuhost modelu zemního prostředí vychází mnohem vyšší**, než ve skutečnosti je, tzn. že pro větší přiblížení modelu průběhu SZZ dle francouzské metodiky by musel být deformační modul horninového prostředí nastaven na mnohem menší hodnotu než deformační modul materiálu zkušební vrstvy, což je nepravděpodobné a podle normy [22] by to odpovídalo například horninám třídy R 6 s malou střední hustotou diskontinuit (vzdálenost diskontinuit je 600 mm až 2000 mm) nebo horninám třídy R 3 s extrémně velkou střední hustotou diskontinuit (vzdálenost diskontinuit je menší než 20 mm). Velké hodnoty střední hustoty diskontinuit lze vyloučit na základě optického zhodnocení masivu při návštěvě kamenolomu a zařídění horniny jako méně kvalitního materiálu lze vyloučit na základě skutečnosti, že se z masivu vyrábí drcené kamenivo, které splňuje patřičné kvalitativní požadavky.

Další možností je také **snížení tuhosti materiálu zkušební vrstvy**. Tím by ale došlo také k významnému ovlivnění modelů průběhu SZZ dle české a dle německé metodiky, které by pak neodpovídaly skutečnosti.

V rámci této práce tedy nebylo dosaženo jednoznačného závěru, jak by měl model průběhu SZZ vypadat, aby odpovídal skutečnosti pro SZZ dle české, německé i francouzské metodiky. **I přesto, že byly prověřeny veškeré možnosti číselných parametrů modelu i jeho okrajových podmínek, model průběhu SZZ dle francouzské metodiky se od reálné situace zásadně liší.** Je tedy pravděpodobné, že v rámci provedení a vyhodnocení SZZ dle francouzské metodiky dochází k odhalení dalších vlastností zkoušeného podloží, které nedokáže materiálův model „Mohr-Coulomb“ vystihnout (např. rozdělení zrn kameniva).

Problém s optimalizací modelu průběhu SZZ dle francouzské metodiky je však také způsoben tím, že **nejsou jednotlivé zatěžovací a odtěžovací cykly rozděleny do zatěžovacích, resp. odtěžovacích stupňů**, tedy lze těžko průběh zatěžovacího, resp. odtěžovacího cyklu porovnat s reálnou situací. Pro vytvoření lepšího modelu průběhu SZZ dle francouzské metodiky tedy bude vhodné v rámci další výzkumné činnosti porovnávat model se skutečným průběhem SZZ, která bude provedena na zkušební vrstvě o dostatečné tloušťce (což ovšem není technologicky zrovna jednoduché), a také zajistit měření hodnoty zatlačení desky v závislosti na kontaktním napětí pod deskou spojitě po celou dobu provádění SZZ. Z obrázku 33 lze odhadovat,

že se účinky zatížení kruhové zatěžovací desky o průměru 300 mm projevují až do hloubky 600 mm, což je dvojnásobek průměru desky. Pro kruhovou zatěžovací desku o průměru 600 mm lze tedy odhadovat, že se účinky zatížení desky projevují až do hloubky 1200 mm, což souhlasí také se zkušeností francouzských stavebních firem, která mi byla předána, když jsem se v létě roku 2021 účastnil pracovní stáže ve Francii. Pro vytvoření lepšího modelu průběhu SZZ dle francouzské metodiky je tedy vhodné, aby tloušťka zkušební vrstvy, na které bude provedena skutečná SZZ, pro jejíž průběh pak bude model optimalizován, byla alespoň 1200 mm.

7. Závěr

V České republice se aktuálně intenzivně pracuje na přípravě výstavby vysokorychlostních železničních tratí podle převzatého francouzského know-how [2]. Zároveň se připravuje společný přeshraniční úsek vysokorychlostní železniční tratě s Německem, který napojí českou vysokorychlostní železniční síť na vysokorychlostní železniční síť v západní Evropě [3]. Pro úspěšnou interpretaci francouzského a německého know-how o konstrukci pražcového podloží vysokorychlostních železničních tratí v českých podmínkách je však potřeba upravit požadované hodnoty únosnosti konstrukce pražcového podloží uváděné ve francouzských, resp. německých technických normách a předpisech na základě vzájemného vztahu mezi výsledky SZZ provedených a vyhodnocených dle české a francouzské, resp. české a německé metodiky.

V rámci této práce byla provedena **rešerše českých, francouzských a německých technických předpisů a norem** týkajících se zkušebních metod pro hodnocení konstrukce pražcového podloží, na jejímž základě byly podrobně popsány a porovnány postupy provádění a vyhodnocování SZZ dle jednotlivých metodik. Doplněna je také informace o dalších metodách pro hodnocení konstrukce pražcového podloží.

Dále byla provedena **série čtyř porovnávacích experimentálních měření**, při které bylo úspěšně provedeno 24 SZZ, z jejichž výsledků byly na základě pravděpodobné nehomogenity zkoušeného podloží výsledky tří SZZ ze statistického souboru vyloučeny. I přesto, že pro stanovení jednoznačných závěrů nebylo ze statistického hlediska provedeno dostatečné množství porovnávacích zkoušek, objevily se jasné závislosti mezi výsledky modulů přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu. Na základě toho bylo **nastíněno, jakým způsobem je možné požadované hodnoty únosnosti konstrukce pražcového podloží uvedené ve francouzských a německých technických normách a předpisech interpretovat jako hodnoty modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu SZZ dle české metodiky E_2** .

Důležité je ovšem zmínit, že SZZ byly provedeny na takových materiálech, že jejich výsledky tvoří určitý uzavřený interval. V rámci porovnávacích experimentálních měření byla jako nejmenší hodnota modulu přetvárnosti z druhého zatěžovacího cyklu SZZ dle české metodiky E_2 vyhodnocena hodnota 66,67 MPa. Materiály s nižší únosností

však nebyly v rámci této práce prověřovány a nižší hodnoty výsledků SZZ ve statistickém souboru zcela chybí. Pro další výzkum a ověření nalezených korelačních vztahů je tedy potřeba statistický soubor významně rozšířit i o další výsledky zkoušek, a to zejména těch, které budou provedeny na materiálech s nižší únosností^j. Doporučeno je také provedení dalších experimentálních měření na dalších materiálech, které se běžně používají v konstrukci pražcového podloží – např. zlepšené zeminy a stabilizace nebo asfaltový beton. Vynechány by neměly být ani konstrukce obsahující geosyntetika.

V rámci této práce byl také **vytvářen a optimalizován model průběhu SZZ** dle všech tří metodik. Je patrné, že materiálový model „Mohr-Coulomb“ není pro znázornění chování zemního prostředí v podloží kruhové zatěžovací desky ideální, nicméně i přesto ho dokáže za určitých podmínek (důležité je zejména znázornění předchozího zhutnění zkušební vrstvy) **dobře vystihnout** a při neznalosti podrobných číselných parametrů materiálu v podloží desky **je reálné model zoptimalizovat**. Pro další pokrok v této oblasti však může být vhodnější zjištění podrobných číselných parametrů materiálu a použití jiného typu materiálového modelu.

V rámci modelování bylo dosaženo dobré shody mezi modelem průběhu SZZ dle české a německé metodiky a skutečnými průběhy SZZ provedených na zkušební vrstvě z ŠD 0/32 při druhém měření v kamenolomu Zbraslav. Model průběhu SZZ dle francouzské metodiky se však od skutečného průběhu SZZ poněkud odlišuje, což je pravděpodobně způsobeno použitím desky o průměru 600 mm, kdy se účinky zatížení desky projevují i v hloubkách, ve kterých nemohlo být prostředí na základě neznalosti skutečných okrajových podmínek namodelováno. Důležité je ale také zmínit, že skutečný průběh SZZ dle francouzské metodiky nelze vzhledem ke zjišťování hodnot zatlačení desky pouze na začátku a konci jednotlivých zatěžovacích, resp. odtěžovacích cyklů znát. Pro snazší optimalizaci modelu je tedy vhodné také přizpůsobit samotné provádění zkoušky, pro kterou má být model optimalizován, tak, aby po jejím vyhodnocení byly známy veškeré potřebné informace, i když nejsou normou vyžadovány.

^j Ačkoliv jsou požadované hodnoty únosnosti konstrukce pražcového podloží vysokorychlostních železničních tratí vyšší než v případě konvenčních tratí, lze předpokládat, že budou vysokorychlostní železniční tratě trasovány i oblastmi s výskytem méně kvalitních materiálů a SZZ budou v rámci geotechnického průzkumu prováděny i na méně únosném podloží. Proto je nutné, aby byly vzájemné vztahy mezi výsledky SZZ dle jednotlivých metodik prověřeny i pro materiály s nižší únosností.

Literatura

- [1] SŽ S4. *Železniční spodek*. Praha: Správa železnic, s. o., 2021.
- [2] SŽ PO-16/2020-GŘ. *Manuál pro projektování vysokorychlostních tratí ve stupni dokumentace pro vydání územního rozhodnutí*. Praha: Správa železnic, s. o., 2021.
- [3] VRT Praha – Ústí nad Labem – Drážďany [online]. Správa železnic, s. o., 2021. [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/vrt/praha-usti-nad-labem-drazdany>
- [4] ČSN 72 1006. *Kontrola zhutnění zemin a sypanin*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [5] NF P 94-117-1. *Portance des plates-formes. Partie 1: Module sous chargement statique à la plaque (EV2)*. Saint-Denis: Association Française de Normalisation, 2000.
- [6] NF P 94-117-3. *Portance des plates-formes. Partie 3: Coefficient de réaction de WESTERGAARD sous chargement statique d'une plaque*. Saint-Denis: Association Française de Normalisation, 2008.
- [7] Mode opératoire CT-2. *Essai à la plaque*. Paříž: Dunod, 1973.
- [8] DIN 18134. *Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch*. Berlín: Deutsches Institut für Normung, e. V., 2012.
- [9] VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. 3. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01437-1.
- [10] KREJČÍŘÍKOVÁ, Hana, LIDMILA, Martin. *Železniční stavby 1*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2015. ISBN 978-80-01-04693-7.
- [11] Kolektiv autorů instituce Cerema. *Méthodologie de mesure de la portance des plates-formes*. Bron: Le centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, 2018. ISBN 978-2-37180-151-6.
- [12] ČSN 73 6192. *Rázové zatěžovací zkoušky vozovek a podloží*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [13] NF P 94-117-2. *Portance des plates-formes. Partie 2: Module sous chargement dynamique*. Saint-Denis: Association Française de Normalisation, 2004.

- [14] TP BF-StB, Teil B 8.3. *Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgesetzgerät*. Kolín nad Rýnem: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., 2012. ISBN 978-3-86446-036-4.
- [15] KELSEY, Chris. Geostructural Characterization of Foundation Materials Using Automated Plate Load Testing. In: *Geosynthetica* [online]. Geosynthetica, 2020. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.geosynthetica.com/aplt-geostructural-characterization-foundations/>
- [16] TAMRAKAR, Prajwol, WAYNE, Mark, FOUNTAIN, Garrett, WHITE, David, VENNAPUSA, Pavana. Measurement of modulus of subgrade reaction for geogrid stabilized roadways. In: *Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Volume 1*. [přijato k publikování]. CRC Press/Balkema, 2022, pp. 162 – 171. ISBN 978-1-032-12044-7.
- [17] AASHTO T222. *Standard Method of Test for Nonrepetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [18] ČSN 72 1010. *Stanovení objemové hmotnosti zemin. Laboratorní a polní metody*. Praha: Vydavatelství norem, 1991.
- [19] ČSN EN ISO 17892-1. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [20] JARUŠKOVÁ, Daniela. *Pravděpodobnost a matematická statistika*. 3. vydání. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2015. ISBN 978-80-01-04829-0.
- [21] BENTLEY SYSTEMS, INC. *Plaxis 2D* [software]. Verze 2019.0, září 2018. [přístup 19. 12. 2018]. Dostupné z: <https://www.bentley.com/en/products/product-line/geotechnical-engineering-software/plaxis-2d> [Požadavky na systém: procesor Dual Core CPU, operační systém Windows 8 Professional 64-bit, Windows 10 Pro 64-bit, volné místo na disku 4 GB, operační paměť 4 GB]
- [22] ČSN 73 1001. *Základová půda pod plošnými základy*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1987.

Příloha 1 – Protokoly z provedených statických zatěžovacích zkoušek

STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle české metodiky

Zkušební předpis:	SŽ S4, příloha 5, ČSN 72 1006, příloha B	Akce:	První měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky:	3	Počasi:	polojasno, 24 °C
Datum:	02.06.2021	Čas:	12:30
Místo:	kamenolom Zbraslav	Kolej č.:	- (úroveň zázemí)
Hloubka:	-	Staničení:	-
Podloží:	zkušební vrstva	Materiál:	ŠD 0/32

Průměr desky: 300 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)

Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Leoš Horníček

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,18	0,15	0,20	0,18
0,10	0,41	0,36	0,55	0,44
0,15	0,61	0,54	0,86	0,67
0,20	0,79	0,69	1,11	0,86
0,15	0,76	0,67	1,10	0,84
0,10	0,72	0,63	1,05	0,80
0,05	0,64	0,56	0,97	0,72
0,00	0,40	0,36	0,70	0,49
0,05	0,57	0,49	0,87	0,64
0,10	0,68	0,58	0,99	0,75
0,15	0,79	0,68	1,11	0,86
0,20	0,90	0,77	1,26	0,98
0,15	0,90	0,78	1,26	0,98
0,10	0,84	0,73	1,21	0,93
0,05	0,74	0,64	1,10	0,83
0,00	0,47	0,42	0,81	0,57

Vyhodnocení zkoušky:

$$y_1 = 0,86 \text{ mm}$$

$$y_2 = 0,49 \text{ mm}$$

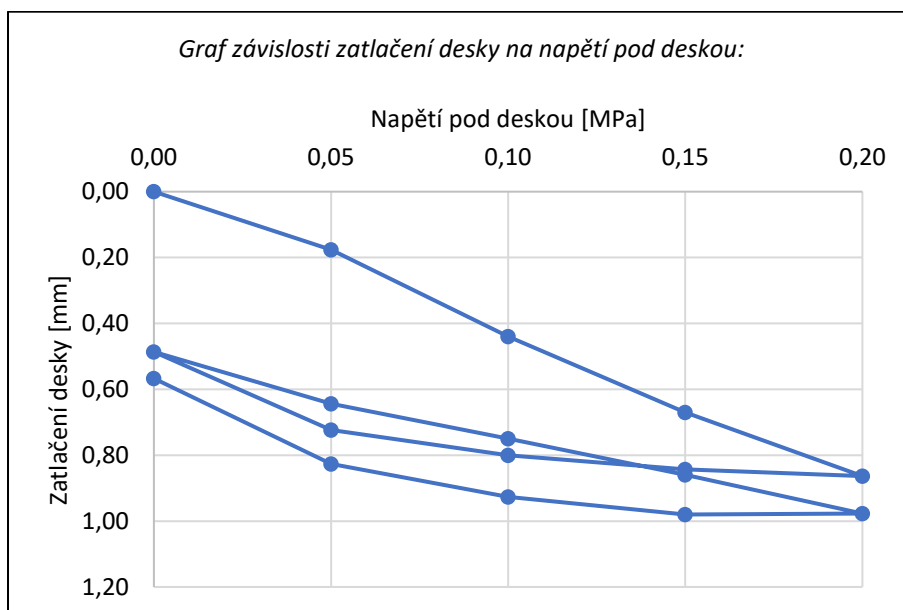
$$E_1 = 52,12 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 91,84 \text{ MPa}$$

$$E_2/E_1 = 1,76$$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle francouzské metodiky

<i>Zkušební předpis:</i>	NF P 94-117-1, Mode opératoire CT-2	<i>Akce:</i>	První měření v kamenolomu Zbraslav
<i>Č. zkoušky:</i>	1	<i>Počasí:</i>	jasno, 23 °C
<i>Datum:</i>	02.06.2021	<i>Čas:</i>	10:45
<i>Místo:</i>	kamenolom Zbraslav	<i>Kolej č.:</i>	- (úroveň zázemí)
<i>Hloubka:</i>	-	<i>Staničení:</i>	-
<i>Podloží:</i>	zkušební vrstva	<i>Materiál:</i>	ŠD 0/32

Průměr desky: 600 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Leoš Horníček

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	6,45	3,62	3,94	4,67
0,00	5,32	2,68	2,86	3,62
0,20	6,74	3,73	4,08	4,85

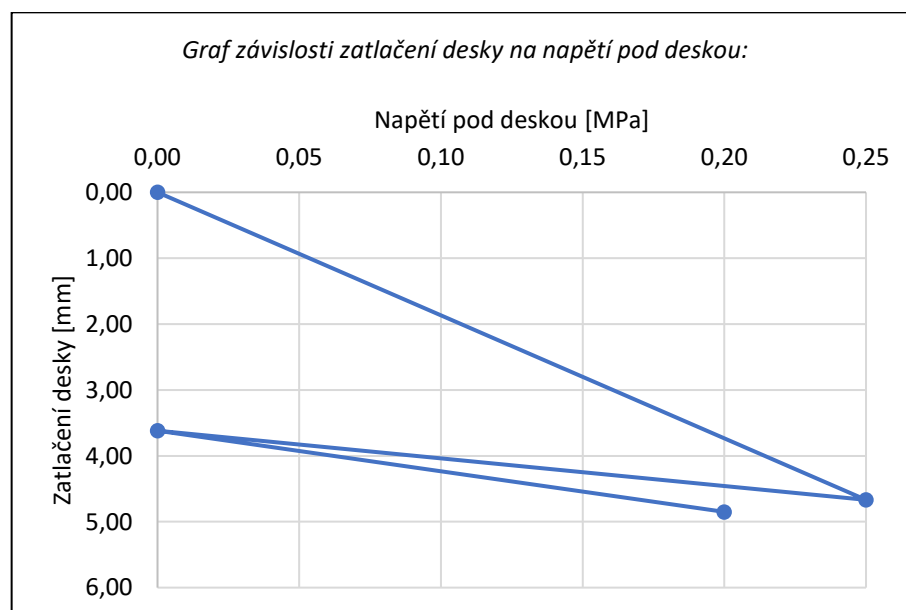
Vyhodnocení zkoušky:

$$e_1 = 4,67 \text{ mm}$$
$$z_2 = 1,23 \text{ mm}$$

$$EV_1 = 24,09 \text{ MPa}$$
$$EV_2 = 73,17 \text{ MPa}$$
$$k = 3,04$$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle německé metodiky

Zkušební předpis:	DIN 18134	Akce:	První měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky:	2	Počasí:	skoro jasno, 23 °C
Datum:	02.06.2021	Čas:	11:40
Místo:	kamenolom Zbraslav	Kolej č.:	- (úroveň zázemí)
Hloubka:	-	Staničení:	-
Podloží:	zkušební vrstva	Materiál:	ŠD 0/32

Průměr desky: 300 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Leoš Horníček

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,43	0,44	0,30	0,39
0,14	0,80	0,76	0,58	0,71
0,21	1,24	1,10	0,90	1,08
0,28	1,83	1,56	1,33	1,57
0,35	2,72	2,22	2,01	2,32
0,42	4,63	3,56	3,48	3,89
0,50	8,39	6,22	6,33	6,98
0,25	8,36	6,21	6,30	6,96
0,12	8,10	6,02	6,11	6,74
0,00	7,19	5,28	5,25	5,91
0,07	7,58	5,60	5,63	6,27
0,14	7,83	5,78	5,82	6,48
0,21	8,03	5,92	5,97	6,64
0,28	8,22	6,05	6,12	6,80
0,35	8,45	6,19	6,27	6,97
0,42	8,76	6,40	6,46	7,21

Vyhodnocení zkoušky:

Parametry regresních křivek:

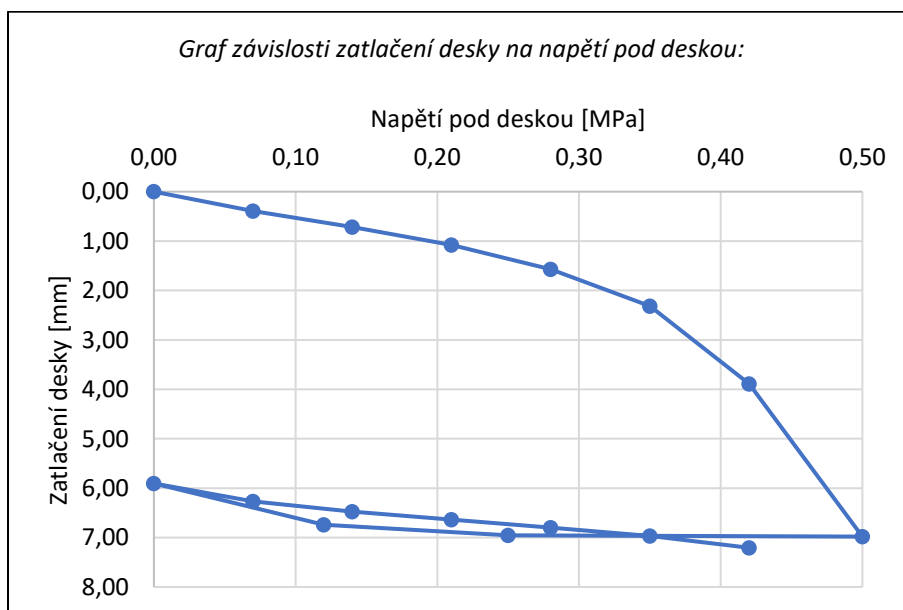
Cyklus	a_1	a_2	a_0
1.	-12,348	46,109	1,312
2.	3,697	-1,976	5,959

$E_{v1} = 21,02 \text{ MPa}$

$E_{v2} = 78,47 \text{ MPa}$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle české metodiky

Zkušební předpis:	SŽ S4, příloha 5, ČSN 72 1006, příloha B	Akce:	První měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky:	6	Počasí:	oblačno, 26 °C
Datum:	02.06.2021	Čas:	15:00
Místo:	kamenolom Zbraslav	Kolej č.:	- (úroveň zázemí)
Hloubka:	-	Staničení:	-
Podloží:	zkušební vrstva	Materiál:	ŠD 0/63

Průměr desky: 300 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,13	0,15	0,09	0,12
0,10	0,33	0,46	0,30	0,36
0,15	0,54	0,77	0,50	0,60
0,20	0,81	1,11	0,74	0,89
0,15	0,75	1,05	0,67	0,82
0,10	0,70	0,98	0,59	0,76
0,05	0,60	0,88	0,50	0,66
0,00	0,29	0,55	0,16	0,33
0,05	0,51	0,78	0,39	0,56
0,10	0,64	0,93	0,54	0,70
0,15	0,76	1,07	0,68	0,84
0,20	0,92	1,23	0,82	0,99
0,15	0,88	1,19	0,77	0,95
0,10	0,78	1,08	0,66	0,84
0,05	0,68	0,98	0,55	0,74
0,00	0,39	0,67	0,24	0,43

Vyhodnocení zkoušky:

$$y_1 = 0,89 \text{ mm}$$

$$y_2 = 0,66 \text{ mm}$$

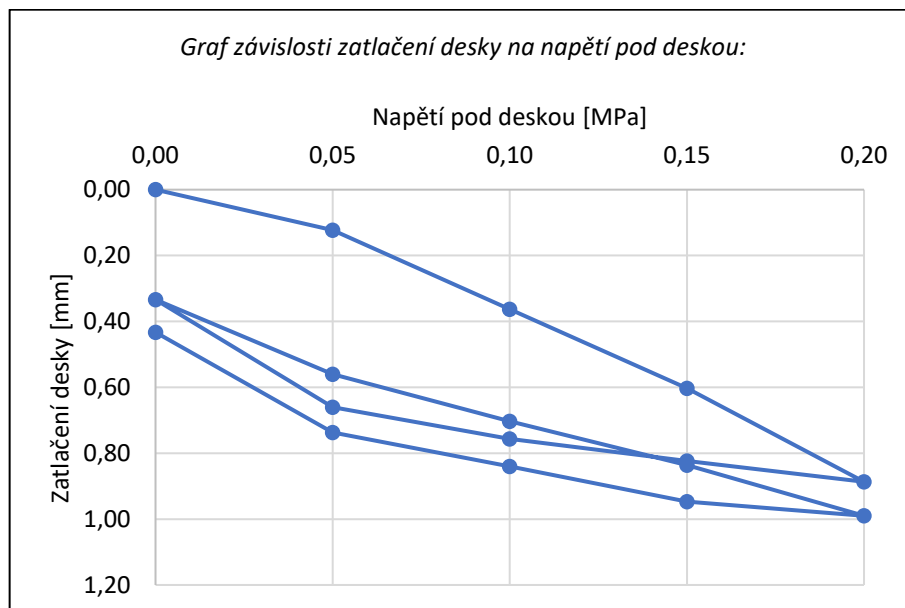
$$E_1 = 50,75 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 68,53 \text{ MPa}$$

$$E_2/E_1 = 1,35$$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle francouzské metodiky

Zkušební předpis:	NF P 94-117-1, Mode opératoire CT-2	Akce:	První měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky:	4	Počasi:	skoro jasno, 25 °C
Datum:	02.06.2021	Čas:	13:15
Místo:	kamenolom Zbraslav	Kolej č.:	- (úroveň zázemí)
Hloubka:	-	Staničení:	-
Podloží:	zkušební vrstva	Materiál:	ŠD 0/63

Průměr desky: 600 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	8,96	6,92	10,74	8,87
0,00	7,85	5,83	9,64	7,77
0,20	9,24	7,11	11,02	9,12

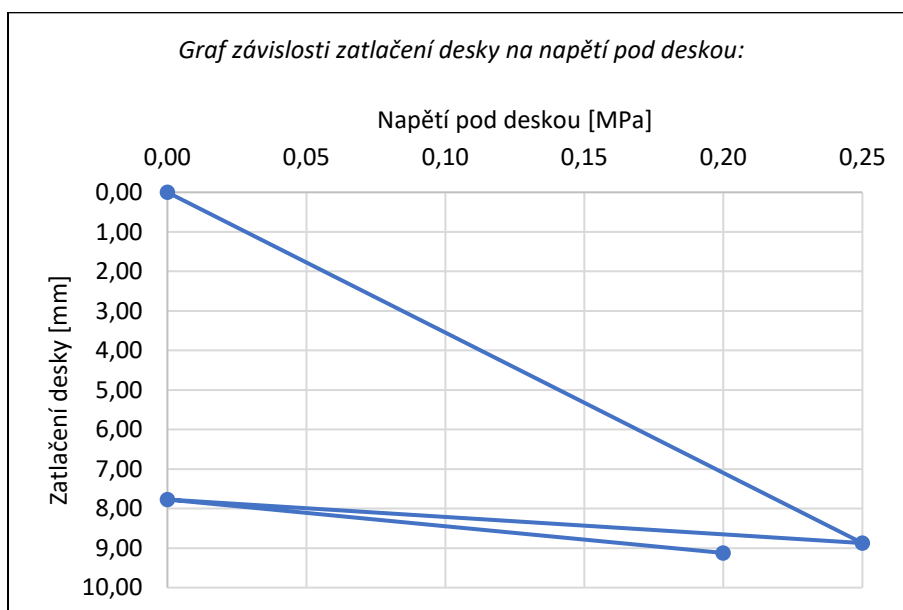
Vyhodnocení zkoušky:

$e_1 = 8,87$ mm
 $z_2 = 1,35$ mm

$EV_1 = 12,68$ MPa
 $EV_2 = 66,67$ MPa
 $k = 5,26$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle německé metodiky

Zkušební předpis:	DIN 18134	Akce:	První měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky:	5	Počasí:	oblačno, 26 °C
Datum:	02.06.2021	Čas:	14:00
Místo:	kamenolom Zbraslav	Kolej č.:	- (úroveň zázemí)
Hloubka:	-	Staničení:	-
Podloží:	zkušební vrstva	Materiál:	ŠD 0/63

Průměr desky: 300 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,33	0,40	0,35	0,36
0,14	0,66	0,79	0,67	0,71
0,21	1,00	1,19	0,98	1,06
0,28	1,52	1,81	1,43	1,59
0,35	2,37	2,77	2,14	2,43
0,42	3,95	4,45	3,56	3,99
0,50	7,13	7,48	6,56	7,06
0,25	7,07	7,48	6,49	7,01
0,12	6,79	7,28	6,21	6,76
0,00	6,09	6,60	5,44	6,04
0,07	6,44	6,92	5,79	6,38
0,14	6,70	7,11	6,08	6,63
0,21	6,90	7,33	6,28	6,84
0,28	7,03	7,45	6,42	6,97
0,35	7,26	7,66	6,67	7,20
0,42	7,54	7,91	6,94	7,46

Vyhodnocení zkoušky:

Parametry regresních křivek:

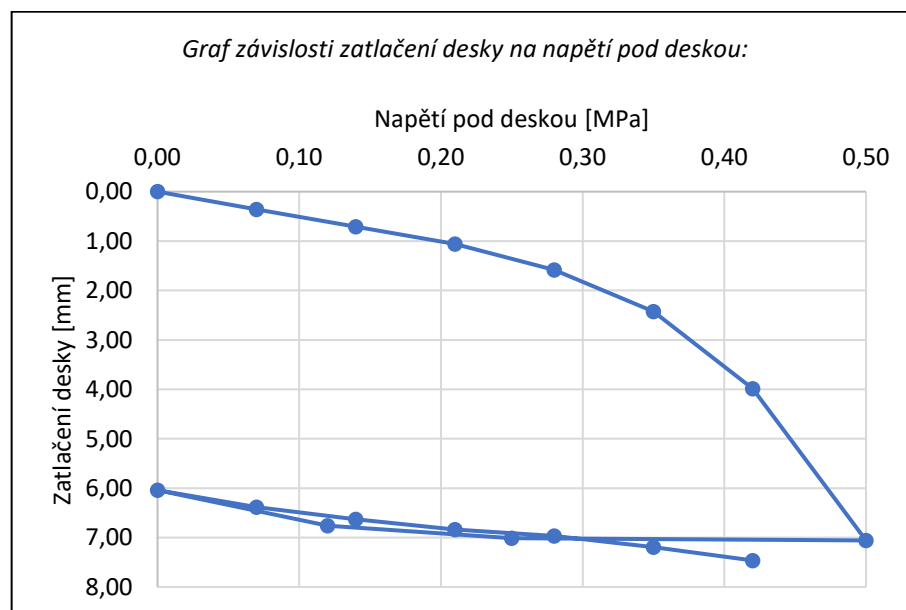
Cyklus	a_1	a_2	a_0
1.	-11,867	45,841	1,237
2.	3,791	-1,466	6,086

$$E_{v1} = 20,35 \text{ MPa}$$

$$E_{v2} = 70,86 \text{ MPa}$$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle české metodiky

Zkušební předpis: SŽ S4, příloha 5, ČSN 72 1006, příloha B	Akce: Druhé měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky: 2	Počasí: polojasno, 17 °C
Datum: 21.10.2021	Čas: 11:05
Místo: kamenolom Zbraslav	Kolej č.: - (etáž Kt 240)
Hloubka: -	Staničení: -
Podloží: zkušební vrstva	Materiál: ŠD 0/32

Průměr desky: 300 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)

Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,18	0,15	0,31	0,21
0,10	0,36	0,36	0,63	0,45
0,15	0,53	0,57	0,94	0,68
0,20	0,61	0,64	1,13	0,79
0,15	0,58	0,61	1,11	0,77
0,10	0,54	0,57	1,07	0,73
0,05	0,45	0,47	0,95	0,62
0,00	0,23	0,25	0,69	0,39
0,05	0,38	0,40	0,84	0,54
0,10	0,44	0,48	0,94	0,62
0,15	0,56	0,62	1,10	0,76
0,20	0,65	0,71	1,21	0,86
0,15	0,64	0,69	1,15	0,83
0,10	0,60	0,66	1,16	0,81
0,05	0,53	0,57	1,06	0,72
0,00	0,37	0,39	0,83	0,53

Vyhodnocení zkoušky:

$$y_1 = 0,79 \text{ mm}$$

$$y_2 = 0,47 \text{ mm}$$

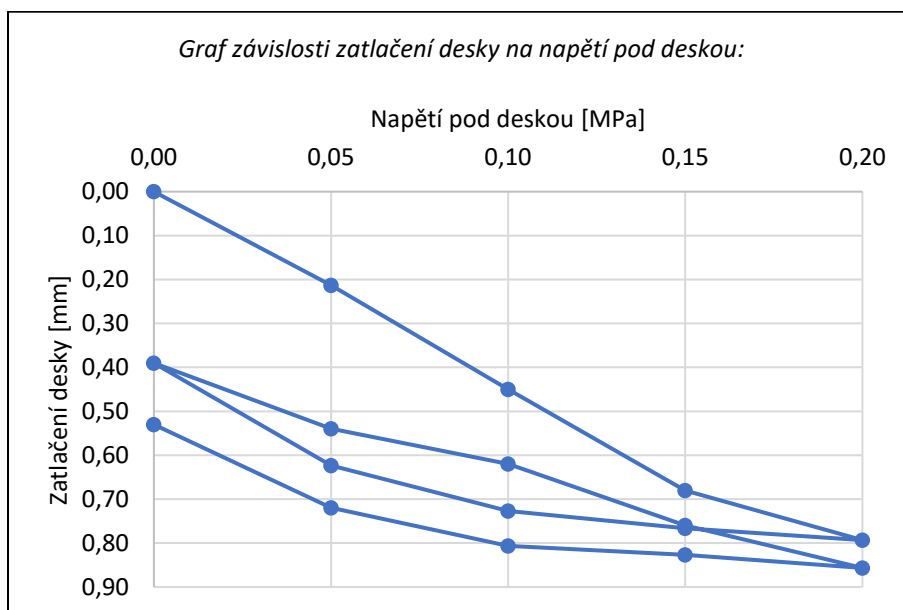
$$E_1 = 56,72 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 96,43 \text{ MPa}$$

$$E_2/E_1 = 1,70$$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle francouzské metodiky

Zkušební předpis: NF P 94-117-1, Mode opératoire CT-2
Č. zkoušky: 1
Datum: 21.10.2021
Místo: kamenolom Zbraslav
Hloubka: -
Podloží: zkušební vrstva

Akce: Druhé měření v kamenolomu Zbraslav
Počasí: polojasno, 16 °C
Čas: 10:30
Kolej č.: - (etáž Kt 240)
Staničení: -
Materiál: ŠD 0/32

Průměr desky: 600 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	3,14	3,23	3,46	3,28
0,00	2,08	1,98	2,17	2,08
0,20	3,09	3,22	3,42	3,24

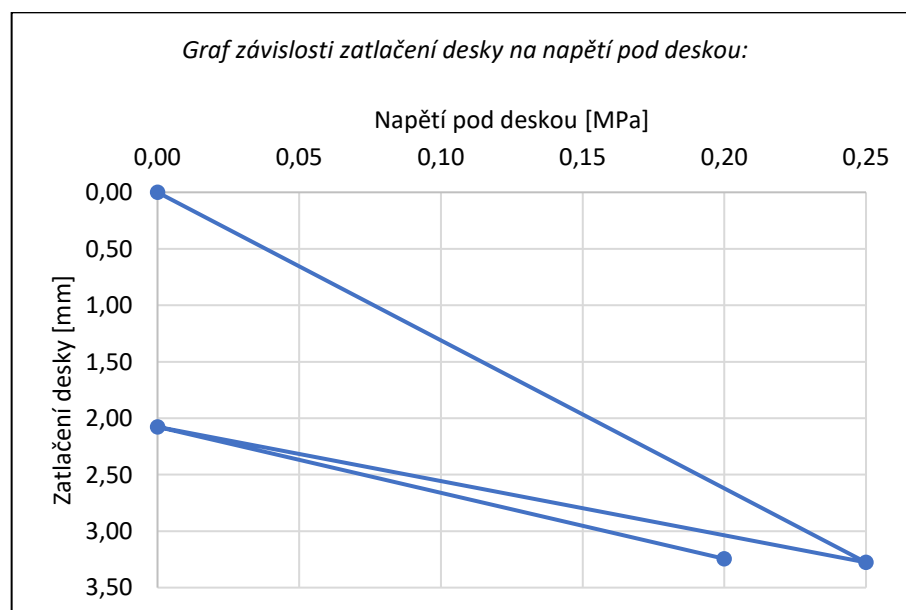
Vyhodnocení zkoušky:

$$e_1 = 3,28 \text{ mm}$$
$$z_2 = 1,17 \text{ mm}$$

$$EV_1 = 34,33 \text{ MPa}$$
$$EV_2 = 77,14 \text{ MPa}$$
$$k = 2,25$$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle německé metodiky

Zkušební předpis:	DIN 18134	Akce:	Druhé měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky:	5	Počasí:	polojasno, 19 °C
Datum:	21.10.2021	Čas:	13:30
Místo:	kamenolom Zbraslav	Kolej č.:	- (etáž Kt 240)
Hloubka:	-	Staničení:	-
Podloží:	zkušební vrstva	Materiál:	ŠD 0/32

Průměr desky: 300 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,59	0,37	0,45	0,47
0,14	1,05	0,80	0,87	0,91
0,21	1,40	1,14	1,19	1,24
0,28	1,80	1,54	1,58	1,64
0,35	2,36	2,06	2,02	2,15
0,42	3,40	3,04	2,81	3,08
0,50	5,17	4,72	4,11	4,67
0,25	5,15	4,63	4,00	4,59
0,12	4,99	4,44	3,81	4,41
0,00	4,31	3,78	3,18	3,76
0,07	4,57	4,01	3,41	4,00
0,14	4,75	4,21	3,60	4,19
0,21	4,88	4,35	3,74	4,32
0,28	5,00	4,48	3,86	4,45
0,35	5,11	4,60	3,96	4,56
0,42	5,27	4,74	4,10	4,70

Vyhodnocení zkoušky:

Parametry regresních křivek:

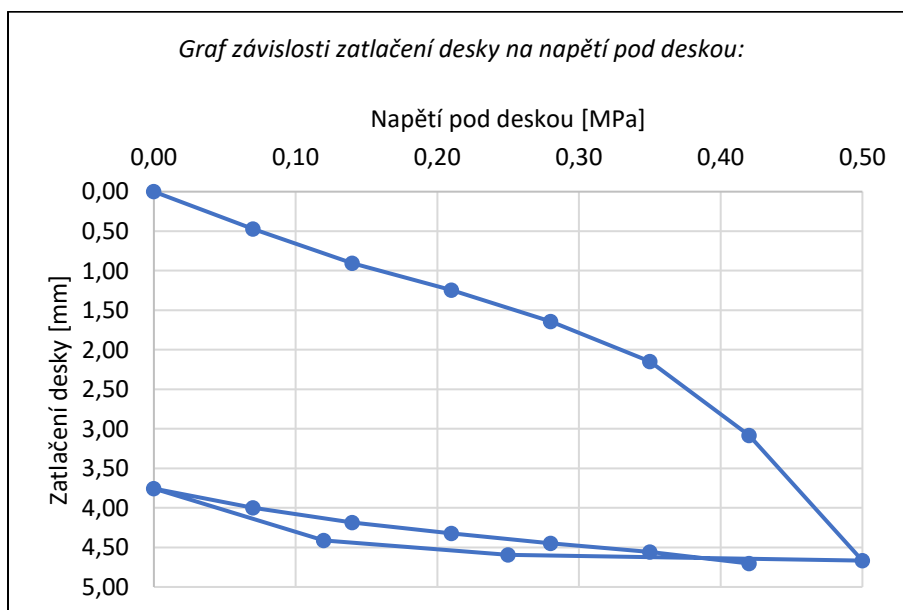
Cyklus	a_1	a_2	a_0
1.	-2,323	19,950	0,693
2.	3,065	-2,170	3,776

$E_{v1} = 29,40 \text{ MPa}$

$E_{v2} = 104,50 \text{ MPa}$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle české metodiky

Zkušební předpis:	SŽ S4, příloha 5, ČSN 72 1006, příloha B	Akce:	Druhé měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky:	7	Počasí:	polojasno, 16 °C
Datum:	21.10.2021	Čas:	14:50
Místo:	kamenolom Zbraslav	Kolej č.:	- (etáž Kt 240)
Hloubka:	-	Staničení:	-
Podloží:	zkušební vrstva	Materiál:	ŠD 0/63

Průměr desky: 300 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Pavel Voříšek

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,28	0,11	0,20	0,20
0,10	0,68	0,30	0,48	0,49
0,15	0,98	0,48	0,71	0,72
0,20	1,32	0,73	0,91	0,99
0,15	1,32	0,73	0,91	0,99
0,10	1,31	0,68	0,86	0,95
0,05	1,23	0,58	0,77	0,86
0,00	0,99	0,35	0,52	0,62
0,05	1,09	0,44	0,64	0,72
0,10	1,19	0,55	0,76	0,83
0,15	1,30	0,68	0,88	0,95
0,20	1,41	0,77	0,95	1,04
0,15	1,42	0,77	0,95	1,05
0,10	1,38	0,72	0,90	1,00
0,05	1,31	0,62	0,82	0,92
0,00	1,08	0,42	0,56	0,69

Vyhodnocení zkoušky:

$$y_1 = 0,99 \text{ mm}$$

$$y_2 = 0,42 \text{ mm}$$

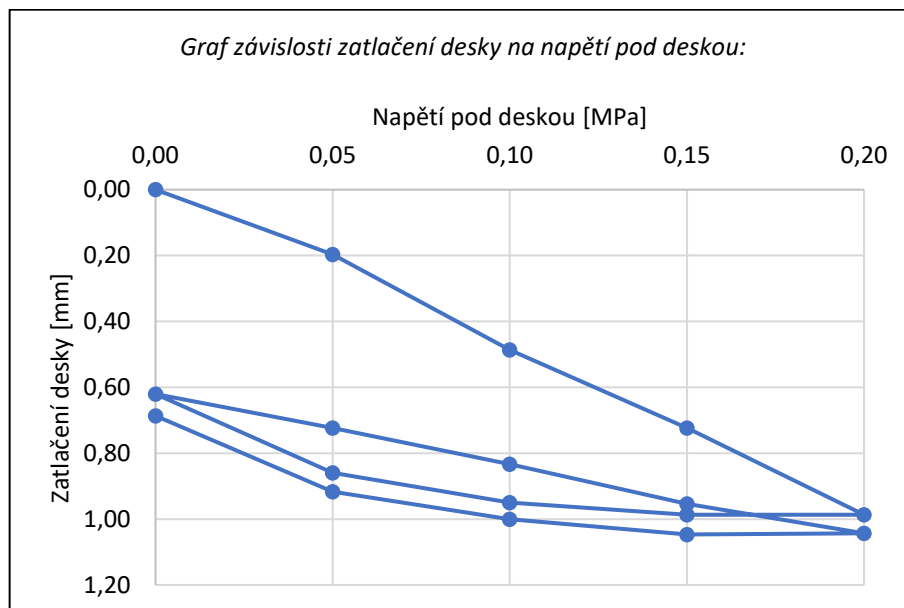
$$E_1 = 45,61 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 106,30 \text{ MPa}$$

$$E_2/E_1 = 2,33$$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle francouzské metodiky

Zkušební předpis:	NF P 94-117-1, Mode opératoire CT-2	Akce:	Druhé měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky:	6	Počasí:	polojasno, 16 °C
Datum:	21.10.2021	Čas:	14:30
Místo:	kamenolom Zbraslav	Kolej č.:	- (etáž Kt 240)
Hloubka:	-	Staničení:	-
Podloží:	zkušební vrstva	Materiál:	ŠD 0/63

Průměr desky: 600 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	3,06	2,24	2,19	2,50
0,00	1,87	1,43	1,29	1,53
0,20	3,06	2,19	2,12	2,46

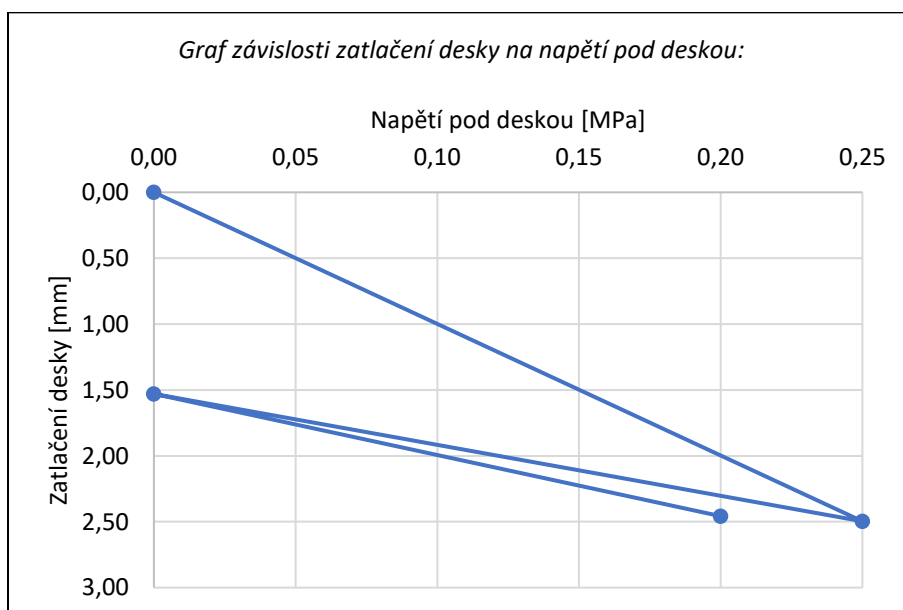
Vyhodnocení zkoušky:

$e_1 = 2,50$ mm
 $z_2 = 0,93$ mm

$EV_1 = 45,06$ MPa
 $EV_2 = 97,12$ MPa
 $k = 2,16$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle německé metodiky

Zkušební předpis:	DIN 18134	Akce:	Druhé měření v kamenolomu Zbraslav
Č. zkoušky:	8	Počasi:	polojasno, 15 °C
Datum:	21.10.2021	Čas:	15:40
Místo:	kamenolom Zbraslav	Kolej č.:	- (etáž Kt 240)
Hloubka:	-	Staničení:	-
Podloží:	zkušební vrstva	Materiál:	ŠD 0/63

Průměr desky: 300 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Pavel Voříšek

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,40	0,54	0,27	0,40
0,14	0,72	0,95	0,57	0,75
0,21	0,97	1,25	0,80	1,01
0,28	1,17	1,51	1,03	1,24
0,35	1,39	1,78	1,30	1,49
0,42	1,68	2,22	1,63	1,84
0,50	2,11	2,82	2,15	2,36
0,25	2,11	2,77	2,08	2,32
0,12	2,01	2,62	1,95	2,19
0,00	1,55	2,23	1,52	1,77
0,07	1,73	2,41	1,69	1,94
0,14	1,85	2,55	1,82	2,07
0,21	1,94	2,65	1,92	2,17
0,28	2,02	2,74	2,01	2,26
0,35	2,10	2,82	2,10	2,34
0,42	2,17	2,92	2,19	2,43

Vyhodnocení zkoušky:

Parametry regresních křivek:

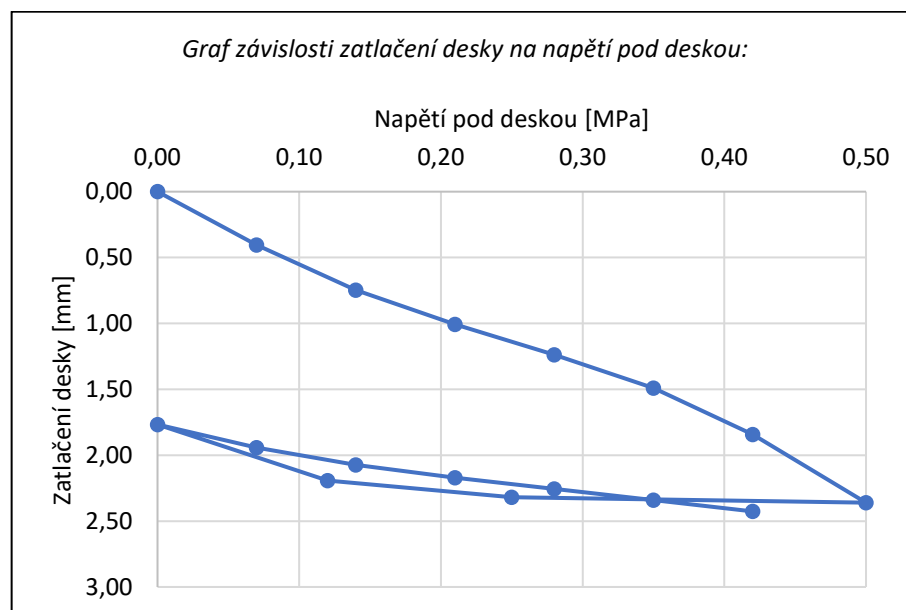
Cyklus	a_1	a_2	a_0
1.	2,718	2,789	0,256
2.	2,226	-1,709	1,781

$E_{v1} = 54,71 \text{ MPa}$

$E_{v2} = 149,15 \text{ MPa}$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle české metodiky

Zkušební předpis: SŽ S4, příloha 5, ČSN 72 1006, příloha B
 Č. zkoušky: 1
 Datum: 27.10.2021
 Místo: přeložka trati č. 220
 Hloubka: 440 mm pod PTŽS
 Podloží: podkladní vrstva

Akce: Měření na trati v Soběslavi
 Počasí: polojasno, 5 °C
 Čas: 08:45
 Kolej č.: 1
 Staničení: km 64,000
 Materiál: DK 0/125

Průměr desky: 300 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,04	0,12	0,04	0,07
0,10	0,16	0,26	0,15	0,19
0,15	0,28	0,37	0,26	0,30
0,20	0,37	0,47	0,34	0,39
0,15	0,38	0,47	0,35	0,40
0,10	0,37	0,45	0,35	0,39
0,05	0,31	0,36	0,29	0,32
0,00	0,21	0,19	0,17	0,19
0,05	0,22	0,24	0,18	0,21
0,10	0,28	0,34	0,25	0,29
0,15	0,35	0,42	0,32	0,36
0,20	0,41	0,48	0,36	0,42
0,15	0,41	0,48	0,37	0,42
0,10	0,40	0,47	0,37	0,41
0,05	0,36	0,40	0,33	0,36
0,00	0,25	0,21	0,21	0,22

Vyhodnocení zkoušky:

$$y_1 = 0,39 \text{ mm}$$

$$y_2 = 0,23 \text{ mm}$$

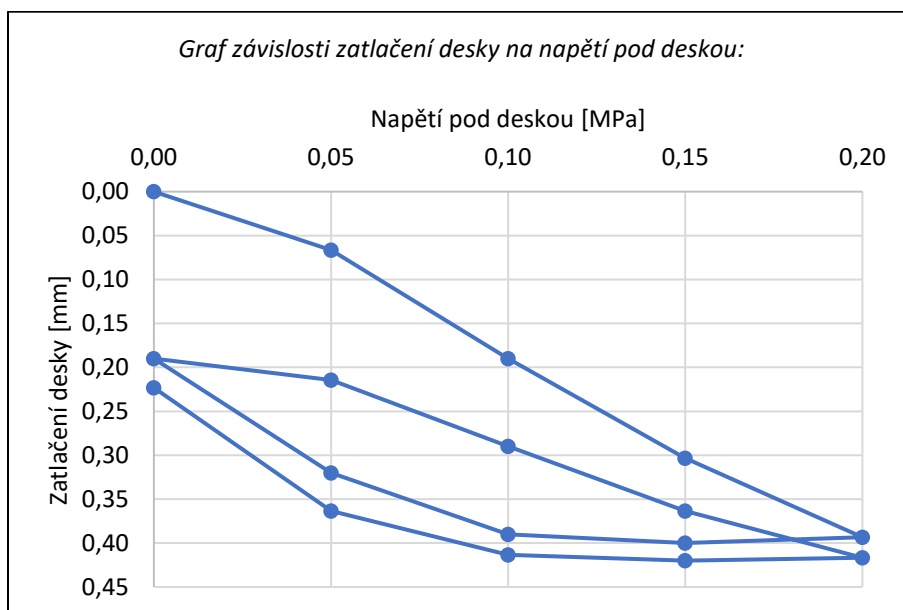
$$E_1 = 114,41 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 198,53 \text{ MPa}$$

$$E_2/E_1 = 1,74$$

Poznámky:

Nesplněny požadavky na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku.



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle francouzské metodiky

Zkušební předpis:	NF P 94-117-1, Mode opératoire CT-2	Akce:	Měření na trati v Soběslavi
Č. zkoušky:	2	Počasí:	polojasno, 6 °C
Datum:	27.10.2021	Čas:	09:50
Místo:	přeložka trati č. 220	Kolej č.:	1
Hloubka:	440 mm pod PTŽS	Staničení:	km 64,000
Podloží:	podkladní vrstva	Materiál:	DK 0/125

Průměr desky: 600 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	1,07	0,73	0,97	0,92
0,00	0,35	0,28	0,14	0,26
0,20	1,02	0,70	0,71	0,81

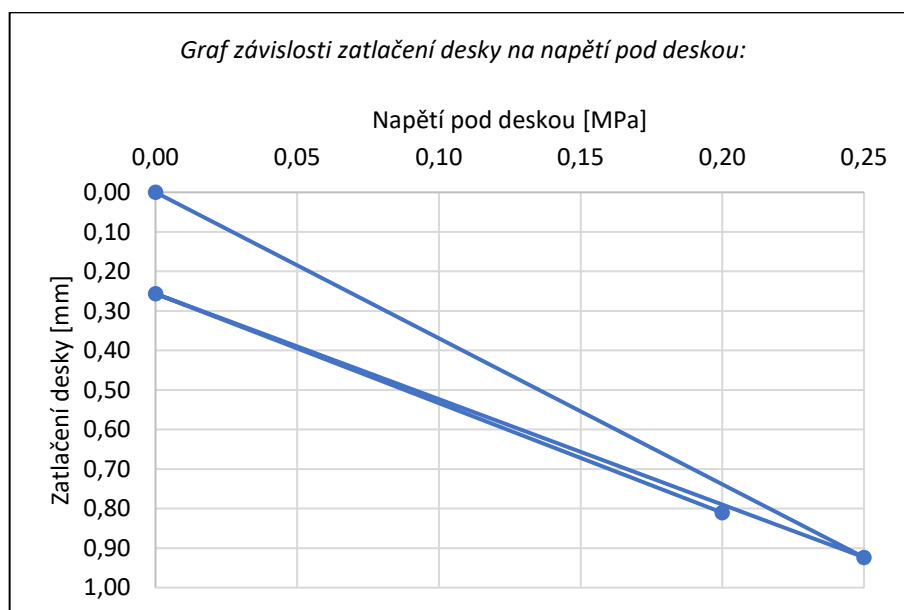
Vyhodnocení zkoušky:

$e_1 = 0,92 \text{ mm}$
 $z_2 = 0,55 \text{ mm}$

$EV_1 = 121,84 \text{ MPa}$
 $EV_2 = 162,65 \text{ MPa}$
 $k = 1,33$

Poznámky:

Nesplněny požadavky na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku.



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle německé metodiky

Zkušební předpis: DIN 18134 Akce: Měření na trati v Soběslavi
 Č. zkoušky: 3 Počasí: polojasno, 9 °C
 Datum: 27.10.2021 Čas: 10:25
 Místo: přeložka trati č. 220 Kolej č.: 1
 Hloubka: 440 mm pod PTŽS Staničení: km 64,000
 Podloží: podkladní vrstva Materiál: DK 0/125

Průměr desky: 300 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261),
 č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,16	0,15	0,21	0,17
0,14	0,30	0,27	0,37	0,31
0,21	0,42	0,39	0,50	0,44
0,28	0,54	0,48	0,61	0,54
0,35	0,65	0,57	0,71	0,64
0,42	0,76	0,66	0,82	0,75
0,50	0,86	0,73	0,91	0,83
0,25	0,81	0,70	0,86	0,79
0,12	0,70	0,59	0,76	0,68
0,00	0,35	0,28	0,47	0,37
0,07	0,46	0,36	0,55	0,46
0,14	0,56	0,45	0,63	0,55
0,21	0,66	0,54	0,71	0,64
0,28	0,73	0,60	0,77	0,70
0,35	0,80	0,66	0,84	0,77
0,42	0,87	0,71	0,89	0,82

Vyhodnocení zkoušky:

Parametry regresních křivek:

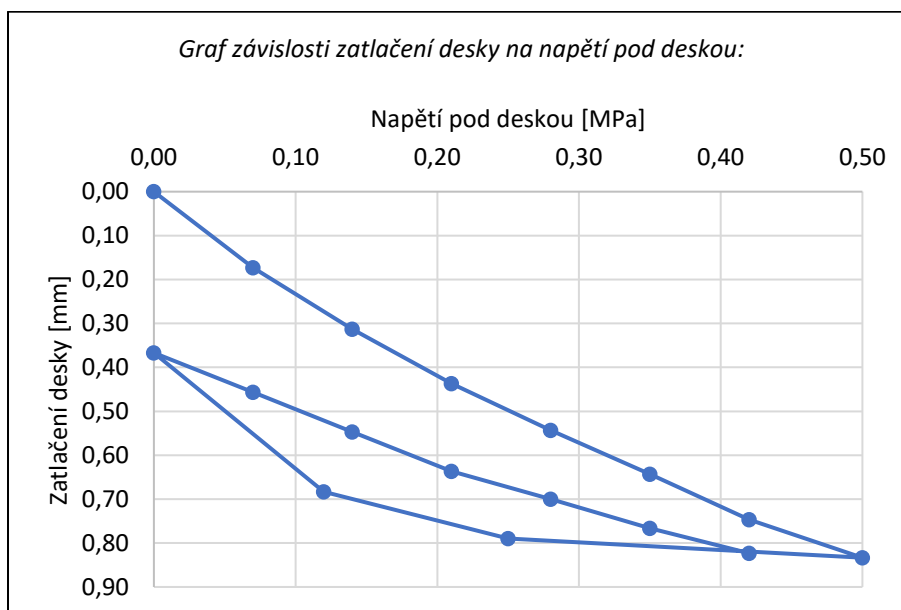
Cyklus	a_1	a_2	a_0
1.	2,133	-1,057	0,032
2.	1,437	-0,818	0,364

$$E_{v1} = 140,23 \text{ MPa}$$

$$E_{v2} = 205,75 \text{ MPa}$$

Poznámky:

Nesplněny požadavky na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku.



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle české metodiky

Zkušební předpis:	SŽ S4, příloha 5, ČSN 72 1006, příloha B	Akce:	Měření na trati v Soběslavi
Č. zkoušky:	4	Počasí:	skoro jasno, 13 °C
Datum:	27.10.2021	Čas:	11:50
Místo:	přeložka trati č. 220	Kolej č.:	1
Hloubka:	úroveň PTŽS	Staničení:	km 64,020
Podloží:	konstrukční vrstva	Materiál:	ŠD 0/63

Průměr desky: 300 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)

Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,13	0,14	0,16	0,14
0,10	0,28	0,29	0,33	0,30
0,15	0,42	0,42	0,47	0,44
0,20	0,55	0,55	0,61	0,57
0,15	0,52	0,50	0,57	0,53
0,10	0,49	0,46	0,54	0,50
0,05	0,42	0,38	0,46	0,42
0,00	0,26	0,19	0,27	0,24
0,05	0,34	0,30	0,38	0,34
0,10	0,42	0,39	0,46	0,42
0,15	0,47	0,45	0,52	0,48
0,20	0,54	0,53	0,59	0,55
0,15	0,53	0,52	0,59	0,55
0,10	0,51	0,47	0,55	0,51
0,05	0,45	0,40	0,49	0,45
0,00	0,30	0,22	0,31	0,28

Vyhodnocení zkoušky:

$$y_1 = 0,57 \text{ mm}$$

$$y_2 = 0,31 \text{ mm}$$

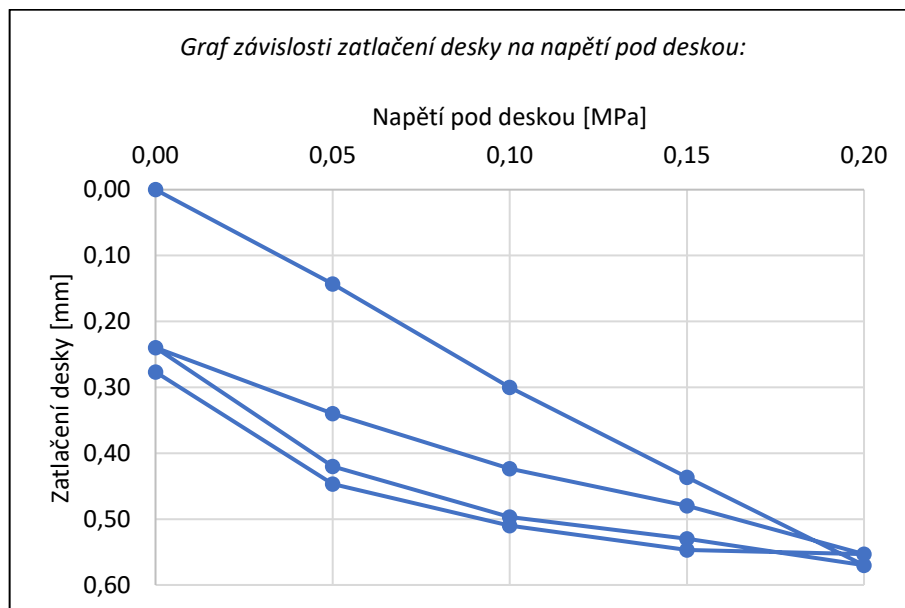
$$E_1 = 78,95 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 143,62 \text{ MPa}$$

$$E_2/E_1 = 1,82$$

Poznámky:

Nesplněny požadavky na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku.



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle francouzské metodiky

Zkušební předpis: NF P 94-117-1, Mode opératoire CT-2
 Č. zkoušky: 5
 Datum: 27.10.2021
 Místo: přeložka trati č. 220
 Hloubka: úroveň PTŽS
 Podloží: konstrukční vrstva

Akce: Měření na trati v Soběslavi
 Počasí: skoro jasno, 14 °C
 Čas: 13:00
 Kolej č.: 1
 Staničení: km 64,020
 Materiál: ŠD 0/63

Průměr desky: 600 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	1,28	0,97	1,04	1,10
0,00	0,40	0,34	0,36	0,37
0,20	1,17	0,88	0,95	1,00

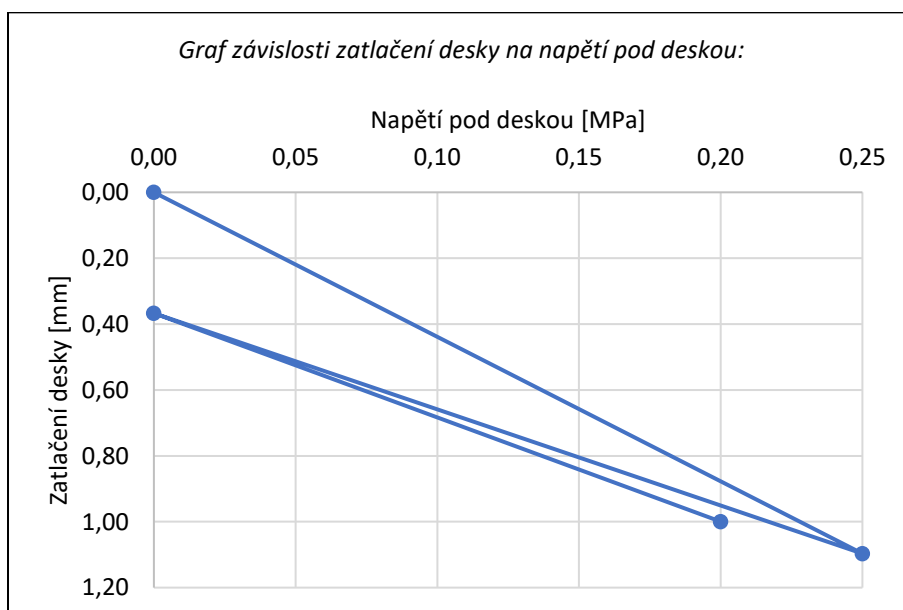
Vyhodnocení zkoušky:

$e_1 = 1,10$ mm
 $z_2 = 0,63$ mm

$EV_1 = 102,58$ MPa
 $EV_2 = 142,11$ MPa
 $k = 1,39$

Poznámky:

Nesplněny požadavky na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku.



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle německé metodiky

Zkušební předpis:	DIN 18134	Akce:	Měření na trati v Soběslavi
Č. zkoušky:	6	Počasí:	skoro jasno, 18 °C
Datum:	27.10.2021	Čas:	13:30
Místo:	přeložka trati č. 220	Kolej č.:	1
Hloubka:	úroveň PTŽS	Staničení:	km 64,020
Podloží:	konstrukční vrstva	Materiál:	ŠD 0/63
Průměr desky:	300 mm		
Měřicí zařízení:	úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)		
Zatěžovací zařízení:	zatěžovací souprava v. č. P329b1201c		
Zkoušku provedl:	Jiří Pospíšil		

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,23	0,21	0,22	0,22
0,14	0,42	0,40	0,40	0,41
0,21	0,56	0,54	0,55	0,55
0,28	0,68	0,68	0,67	0,68
0,35	0,77	0,79	0,79	0,78
0,42	0,85	0,89	0,88	0,87
0,50	0,93	1,00	0,98	0,97
0,25	0,88	0,91	0,88	0,89
0,12	0,81	0,82	0,78	0,80
0,00	0,51	0,51	0,40	0,47
0,07	0,60	0,63	0,55	0,59
0,14	0,69	0,73	0,66	0,69
0,21	0,77	0,80	0,76	0,78
0,28	0,82	0,85	0,82	0,83
0,35	0,87	0,91	0,88	0,89
0,42	0,92	0,96	0,94	0,94

Vyhodnocení zkoušky:

Parametry regresních křivek:

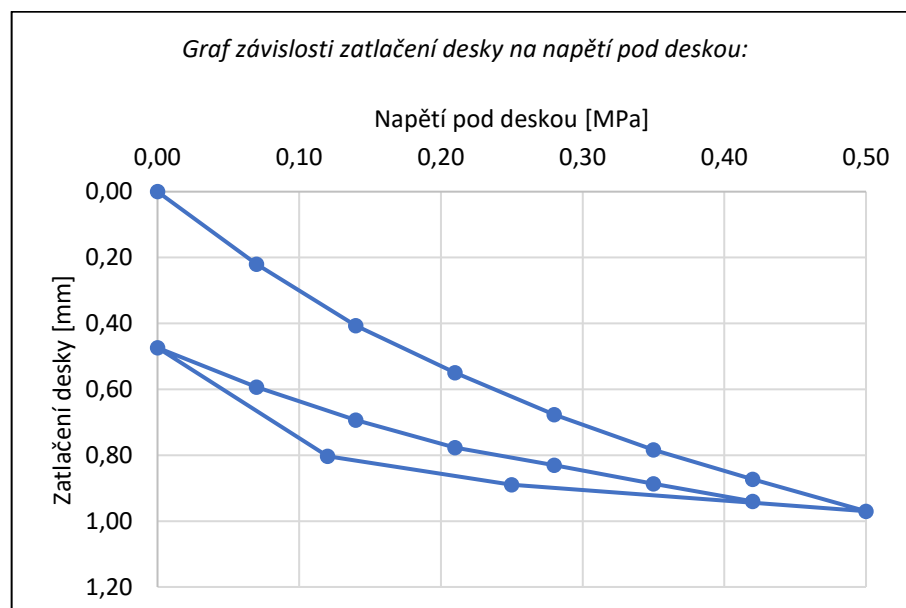
Cyklus	a_1	a_2	a_0
1.	2,813	-1,934	0,041
2.	1,706	-1,482	0,478

$$E_{v1} = 121,89 \text{ MPa}$$

$$E_{v2} = 207,69 \text{ MPa}$$

Poznámky:

Nesplněny požadavky na vzájemnou vzdálenost kruhové zatěžovací desky, podpěr protizátěže a podpěr měřicího nosníku.



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle české metodiky

Zkušební předpis: SŽ S4, příloha 5, ČSN 72 1006, příloha B
 Č. zkoušky: 1
 Datum: 9.11.2021
 Místo: trať č. 290
 Hloubka: úroveň PTŽS
 Podloží: konstrukční vrstva

Akce: Měření na trati v Uničově
 Počasí: jasno, 3 °C
 Čas: 8:00
 Kolej č.: 1
 Staničení: km 15,931
 Materiál: ŠD 0/32

Průměr desky: 300 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,18	0,12	0,16	0,15
0,10	0,52	0,37	0,45	0,45
0,15	0,85	0,61	0,72	0,73
0,20	1,15	0,84	0,94	0,98
0,15	1,15	0,84	0,95	0,98
0,10	1,10	0,79	0,91	0,93
0,05	1,03	0,72	0,85	0,87
0,00	0,84	0,54	0,66	0,68
0,05	0,94	0,63	0,75	0,77
0,10	1,05	0,73	0,85	0,88
0,15	1,14	0,81	0,93	0,96
0,20	1,26	0,90	1,03	1,06
0,15	1,27	0,90	1,03	1,07
0,10	1,23	0,87	1,00	1,03
0,05	1,15	0,80	0,94	0,96
0,00	0,96	0,62	0,75	0,78

Vyhodnocení zkoušky:

$$y_1 = 0,98 \text{ mm}$$

$$y_2 = 0,38 \text{ mm}$$

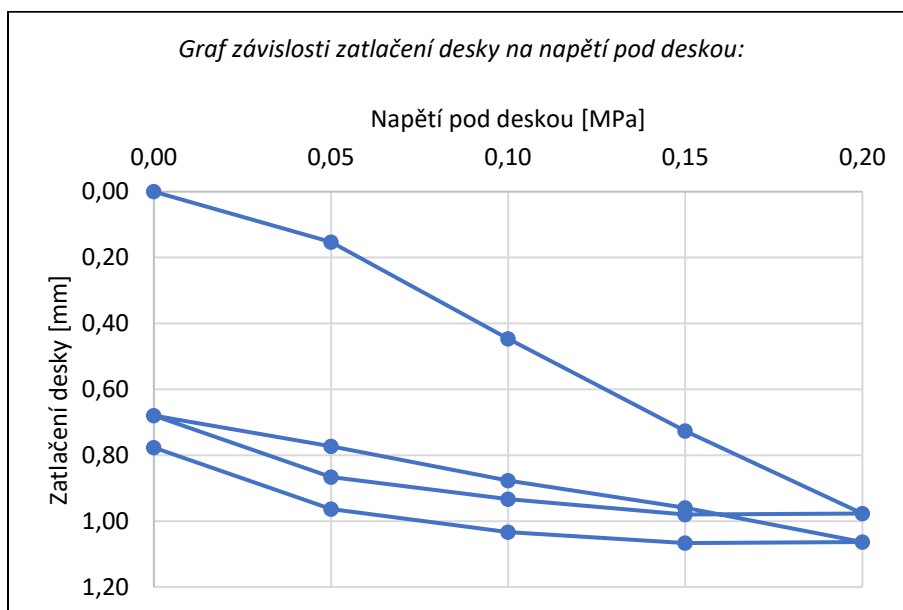
$$E_1 = 46,08 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 117,39 \text{ MPa}$$

$$E_2/E_1 = 2,55$$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle francouzské metodiky

Zkušební předpis:	NF P 94-117-1, Mode opératoire CT-2	Akce:	Měření na trati v Uničově
Č. zkoušky:	3	Počasí:	jasno, 7 °C
Datum:	9.11.2021	Čas:	9:25
Místo:	trať č. 290	Kolej č.:	1
Hloubka:	úroveň PTŽS	Staničení:	km 15,926
Podloží:	konstrukční vrstva	Materiál:	ŠD 0/32

Průměr desky: 600 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
 Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
 Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	2,86	3,18	2,64	2,89
0,00	1,92	2,39	1,67	1,99
0,20	2,85	3,20	2,62	2,89

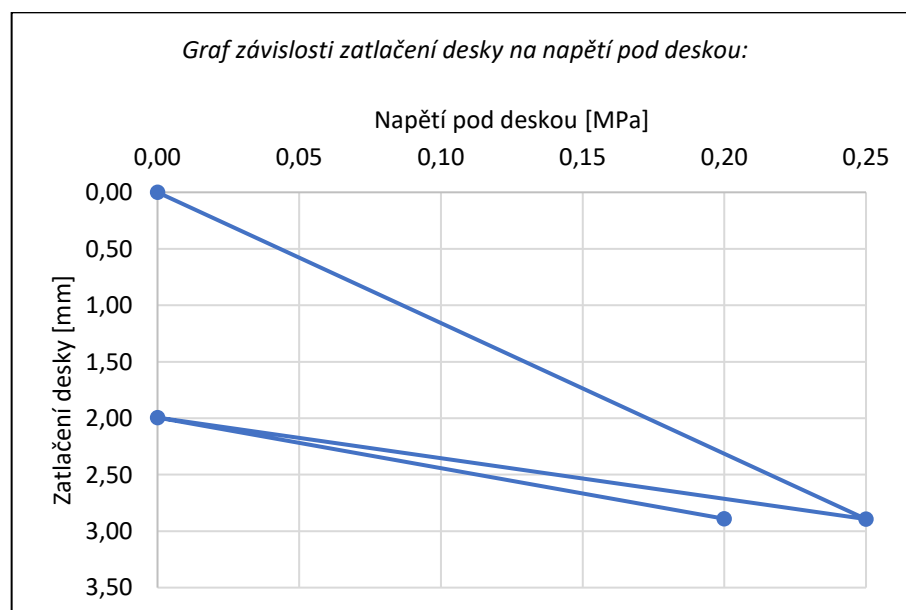
Vyhodnocení zkoušky:

$e_1 = 2,89$ mm
 $z_2 = 0,90$ mm

$EV_1 = 38,88$ MPa
 $EV_2 = 100,37$ MPa
 $k = 2,58$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle německé metodiky

Zkušební předpis:	DIN 18134	Akce:	Měření na trati v Uničově
Č. zkoušky:	4	Počasí:	jasno, 8 °C
Datum:	9.11.2021	Čas:	9:55
Místo:	trať č. 290	Kolej č.:	1
Hloubka:	úroveň PTŽS	Staničení:	km 15,924
Podloží:	konstrukční vrstva	Materiál:	ŠD 0/32

Průměr desky: 300 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)
Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,71	0,72	0,50	0,64
0,14	1,56	1,38	1,09	1,34
0,21	2,36	1,94	1,64	1,98
0,28	3,08	2,48	2,19	2,58
0,35	3,73	2,97	2,73	3,14
0,42	4,34	3,46	3,26	3,69
0,50	5,03	4,03	3,90	4,32
0,25	4,94	3,91	3,79	4,21
0,12	4,78	3,75	3,63	4,05
0,00	4,27	3,27	3,19	3,58
0,07	4,49	3,47	3,38	3,78
0,14	4,64	3,61	3,51	3,92
0,21	4,77	3,74	3,62	4,04
0,28	4,90	3,86	3,75	4,17
0,35	5,04	3,98	3,85	4,29
0,42	5,19	4,12	3,99	4,43

Vyhodnocení zkoušky:

Parametry regresních křivek:

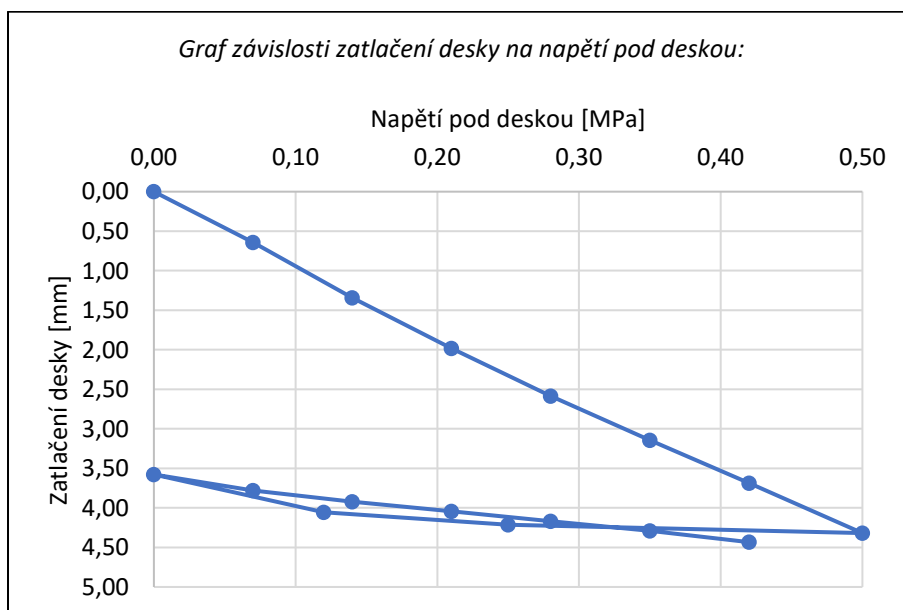
Cyklus	a_1	a_2	a_0
1.	10,180	-2,994	-0,039
2.	2,361	-0,956	3,596

$E_{v1} = 25,91 \text{ MPa}$

$E_{v2} = 114,84 \text{ MPa}$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle české metodiky

Zkušební předpis:	SŽ S4, příloha 5, ČSN 72 1006, příloha B	Akce:	Měření na trati v Uničově
Č. zkoušky:	6	Počasí:	jasno, 10 °C
Datum:	9.11.2021	Čas:	11:55
Místo:	trať č. 290	Kolej č.:	1
Hloubka:	330 mm pod PTŽS	Staničení:	km 15,920
Podloží:	podkladní vrstva	Materiál:	ZSH

Průměr desky: 300 mm
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)

Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c
Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil, Pavel Voříšek

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,06	0,05	0,03	0,05
0,10	0,12	0,11	0,09	0,11
0,15	0,20	0,18	0,16	0,18
0,20	0,26	0,23	0,21	0,23
0,15	0,26	0,23	0,21	0,23
0,10	0,24	0,21	0,21	0,22
0,05	0,18	0,15	0,16	0,16
0,00	0,12	0,08	0,11	0,10
0,05	0,15	0,10	0,11	0,12
0,10	0,21	0,16	0,16	0,18
0,15	0,25	0,21	0,20	0,22
0,20	0,30	0,27	0,25	0,27
0,15	0,30	0,26	0,26	0,27
0,10	0,27	0,22	0,25	0,25
0,05	0,23	0,18	0,21	0,21
0,00	0,15	0,11	0,14	0,13

Vyhodnocení zkoušky:

$$y_1 = 0,23 \text{ mm}$$

$$y_2 = 0,17 \text{ mm}$$

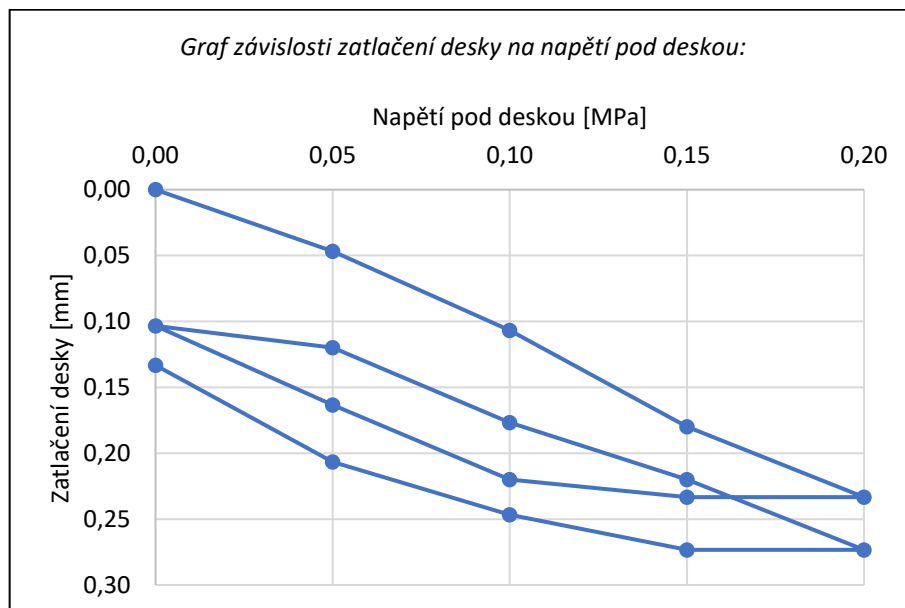
$$E_1 = 192,86 \text{ MPa}$$

$$E_2 = 264,71 \text{ MPa}$$

$$E_2/E_1 = 1,37$$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA dle francouzské metodiky

Zkušební předpis:	NF P 94-117-1, Mode opératoire CT-2	Akce:	Měření na trati v Uničově
Č. zkoušky:	8	Počasí:	polojasno, 12 °C
Datum:	9.11.2021	Čas:	13:55
Místo:	trať č. 290	Kolej č.:	1
Hloubka:	330 mm pod PTŽS	Staničení:	km 15,918
Podloží:	podkladní vrstva	Materiál:	ZSH

Průměr desky: 600 mm
 Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)

Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c

Zkoušku provedl: Jiří Pospíšil, Pavel Voříšek

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	1,34	1,56	1,17	1,36
0,00	0,28	0,28	0,20	0,25
0,20	1,23	1,44	1,01	1,23

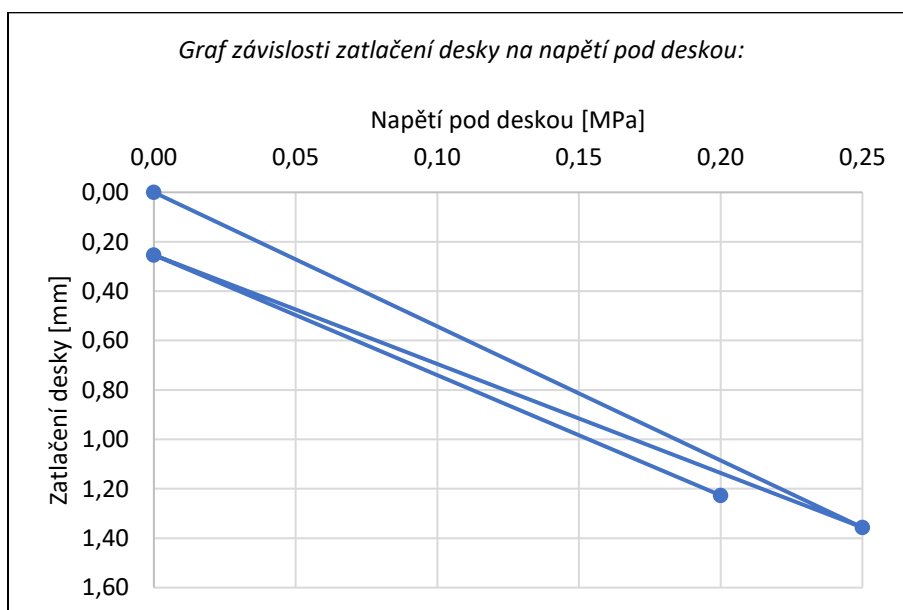
Vyhodnocení zkoušky:

$e_1 = 1,36$ mm
 $z_2 = 0,97$ mm

$EV_1 = 82,92$ MPa
 $EV_2 = 92,47$ MPa
 $k = 1,12$

Poznámky:

-



STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA

dle německé metodiky

Zkušební předpis:	DIN 18134	Akce:	Měření na trati v Uničově
Č. zkoušky:	7	Počasí:	polojasno, 13 °C
Datum:	9.11.2021	Čas:	12:55
Místo:	trať č. 290	Kolej č.:	1
Hloubka:	330 mm pod PTŽS	Staničení:	km 15,916
Podloží:	podkladní vrstva	Materiál:	ZSH
Průměr desky: 300 mm			
Měřicí zařízení: úchylkoměry Mitutoyo č. 13 (v. č. 09010961), č. 14 (v. č. 08107261), č. 15 (v. č. 09018006)			
Zatěžovací zařízení: zatěžovací souprava v. č. P329b1201c			
Zkoušku provedl: Pavel Voříšek			

Naměřené hodnoty:

Napětí pod deskou [MPa]	Zatlačení desky [mm]			
	č. 13	č. 14	č. 15	Průměr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,08	0,05	0,03	0,05
0,14	0,19	0,12	0,12	0,14
0,21	0,26	0,17	0,19	0,21
0,28	0,34	0,22	0,26	0,27
0,35	0,42	0,27	0,33	0,34
0,42	0,56	0,38	0,46	0,47
0,50	0,71	0,50	0,60	0,60
0,25	0,52	0,35	0,42	0,43
0,12	0,42	0,27	0,33	0,34
0,00	0,14	0,07	0,15	0,12
0,07	0,24	0,12	0,18	0,18
0,14	0,38	0,23	0,29	0,30
0,21	0,47	0,31	0,38	0,39
0,28	0,58	0,39	0,48	0,48
0,35	0,68	0,48	0,57	0,58
0,42	0,78	0,56	0,66	0,67

Vyhodnocení zkoušky:

Parametry regresních křivek:

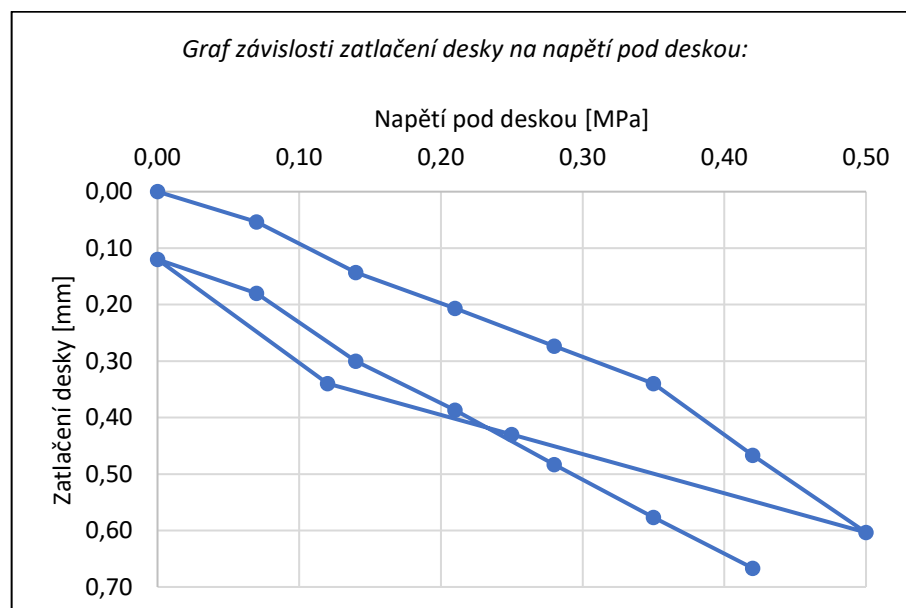
Cyklus	a_1	a_2	a_0
1.	0,573	1,145	0,023
2.	1,298	0,089	0,109

$$E_{v1} = 196,42 \text{ MPa}$$

$$E_{v2} = 168,54 \text{ MPa}$$

Poznámky:

-



Příloha 2 – Fotografie z porovnávacích experimentálních měření



První měření v kamenolomu Zbraslav, příprava zkušební vrstvy z ŠD 0/32



První měření v kamenolomu Zbraslav, zkouška 2



První měření v kamenolomu Zbraslav, zkouška 4



První měření v kamenolomu Zbraslav, stanovení objemu odebraného vzorku ŠD 0/32



Druhé měření v kamenolomu Zbraslav, příprava zkušebních vrstev



Druhé měření v kamenolomu Zbraslav, zkouška 1



Druhé měření v kamenolomu Zbraslav, zkouška 2



Druhé měření v kamenolomu Zbraslav, zkouška 6



Měření na trati v Soběslavi, odebrání konstrukční vrstvy z ŠD 0/63 na úroveň ZP



Měření na trati v Soběslavi, příprava zkoušky 2



Měření na trati v Soběslavi, příprava zkoušky 3



Měření na trati v Soběslavi, zkouška 4



Měření na trati v Uničově, zkouška 1



Měření na trati v Uničově, příprava zkoušky 4



Měření na trati v Uničově, zkouška 7



Měření na trati v Uničově, kontrolní rázové zatěžovací zkoušky na úrovni ZP