



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

TUHOST ZEMIN V OBORU MALÝCH PŘETVOŘENÍ A ZPŮSOBY JEJÍHO MĚŘENÍ

SMALL STRAIN STIFFNESS OF SOILS AND METHODS OF ITS MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jaroslav Havlíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JURAJ CHALMOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jaroslav Havlíček
Název	Tuhost zemin v oboru malých přetvoření a způsoby jejího měření
Vedoucí práce	Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- BENZ, T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences. PhD thesis, 2006.
- BENZ, T., VERMEER, P. A., SCHWAB, R. A small strain overlay model. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech, 2008, vol. 42, no. 4, p. 541-576.
- MAŠÍN, D. Modelling of soils behavior with hypoplasticity. Springer, 2019.
- SIMPSON, B. Retaining structures: displacement and design. Géotechnique, 1992, vol. 42, no. 4, p. 541-576.
- LEE, J. S., SANTAMARINA, J. C. Bender elements: Performance and signal interpretation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, vol. 131, no. 9, p. 1063-1070.

Další podklady budou předány na základě konzultací v průběhu samotného řešení bakalářské práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce je sumarizace základních poznatků o nárůstu tuhosti zemin v oboru malých až velmi malých přetvoření z inženýrského hlediska. Práce je předběžně rozčleněna do tří celků. V první části bude popsána fyzikální podstata závislosti tuhosti na přetvoření. V druhém bloku budou přiblíženy laboratorní metody pro měření tohoto aspektu chování zemin. Ve třetí části budou sumarizovány dostupné způsoby (materiálové modely), kterými lze závislost tuhosti na přetvoření zahrnout do praktických geotechnických výpočtů.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Práce je tvořena teoretickou a praktickou částí. V první části je popsáno chování zemin v oboru malých a velmi malých přetvoření a jeho fyzikální podstata. Následně jsou definovány jednotlivé parametry zeminy, které mají vliv na hodnotu počátečního smykového modulu a na tvar diagramu poklesu tuhosti s rostoucím smykovým přetvořením. V poslední kapitole teoretické části jsou uvedeny jednotlivé metody pro měření tuhosti zemin v oboru malých a velmi malých přetvoření v laboratoři i v podmínkách in-situ s podrobnějším popisem vyhodnocení měření tuhosti zemin pomocí bender elementů. V praktické části bylo provedeno zprovoznění zařízení pro měření tuhosti zemin pomocí bender elementů. Nejprve je popsáno použité laboratorní vybavení a poté jsou uvedeny vlastnosti zkoušené zeminy. Hlavní částí je měření a vyhodnocení vlivu jednotlivých softwarových a hardwarových nastavení přístroje a vlivu efektivního napětí zeminy na měřenou hodnotu počátečního smykového modulu, který je následně porovnán s předpoklady empirických vzorců z odborné literatury.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tuhost zemin při velmi malých přetvořeních, smykový modul, bender elementy, laboratorní měření, měření frekvence, geotechnika

ABSTRACT

This thesis consists of theoretical and practical part. Firstly, the soil behaviour at small-strain range and its physical nature are described. Subsequently, the individual soil parameters affecting the value of small-strain shear modulus and the shape of the stiffness reduction curve with increasing shear strain are described. The individual methods of measuring the small-strain stiffness in the laboratory and in-situ with a more detailed explanation of the evaluation of measurements using bender elements are given in the last chapter of the theoretical part.

In the practical part, a device for measuring small-strain stiffness using bender elements was put into operation. The used laboratory equipment is described first and then the parameters of tested soil are given. The main chapter is measurement and evaluation of the impact of software and hardware settings and the influence of effective stress of soil on the small-strain shear modulus that is compared with predictions of empirical expressions from the literature.

KEYWORDS

Small-strain stiffness of soils, shear modulus, bender elements, laboratory measurements, frequency measurements, geotechnical engineering

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jaroslav Havlíček *Tuhost zemin v oboru malých přetvoření a způsoby jejího měření.* Brno, 2020. 79 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Tuhost zemin v oboru malých přetvoření a způsoby jejího měření* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 5. 6. 2020

Jaroslav Havlíček
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Tuhost zemin v oboru malých přetvoření a způsoby jejího měření* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 6. 2020

Jaroslav Havlíček
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Jurajovi Chalmovskému, Ph.D. za cenné rady a připomínky při řešení zkoumané problematiky a při práci v laboratoři. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlovi Koudelovi za pomoc s prací v laboratoři. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat rodině a přátelům za podporu při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	ZÁVISLOST TUHOSTI ZEMIN NA PŘETVOŘENÍ	11
2.1	Fyzikální podstata tuhosti při velmi malých přetvořeních.....	13
2.2	Parametry ovlivňující tuhost zemin při malých a velmi malých přetvořeních .	16
2.2.1	Číslo pórovitosti.....	16
2.2.2	Střední efektivní napětí	17
2.2.3	Index plasticity	18
2.2.4	Parametr OCR.....	18
2.2.5	Diageneze sedimentárních zemin	18
2.2.6	Historie zatěžování.....	19
2.2.7	Vliv rychlosti zatěžování	20
2.2.8	Další jevy ovlivňující tuhost zemin při malých a velmi malých přetvořeních .	20
2.3	Empirické vztahy pro výpočet G_0	21
3	ZPŮSOBY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ TUHOSTI V OBORU MALÝCH A VELMI MALÝCH PŘETVOŘENÍ.....	22
3.1	Způsoby měření tuhosti v oboru malých a velmi malých přetvoření	22
3.1.1	Laboratorní zkoušky	22
3.1.2	Polní zkoušky (in-situ).....	24
3.2	Vyhodnocení tuhosti zemin při měření pomocí bender elementů	28
3.2.1	Způsoby analýzy přijatého signálu	29
3.2.2	Near-field effect.....	32
4	VLASTNÍ MĚŘENÍ	33
4.1	Popis laboratorního vybavení	33
4.1.1	Triaxiální komora.....	33
4.1.2	Bender elementy a jejich ovládací prvky.....	35
4.2	Popis analyzované zeminy.....	39
4.3	Zkušební plán.....	39
4.3.1	Charakteristiky vzorku při jednotlivých osazeních.....	40
4.4	Výsledky měření	42
4.4.1	První osazení vzorku.....	42

4.4.2	První osazení vzorku – diskuse.....	46
4.4.3	Druhé osazení vzorku	48
4.4.4	Druhé osazení vzorku – diskuse	53
4.4.5	Třetí osazení vzorku.....	55
4.4.6	Třetí osazení vzorku – diskuse.....	62
5	ZÁVĚR	69
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
7	PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	76
8	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	77
9	SEZNAM TABULEK	79

1 ÚVOD

Hlavním cílem této práce je zprovoznění specializovaného laboratorního vybavení ústavu Geotechniky VUT v Brně pro měření tuhosti zemin v oboru velmi malých přetvoření a ověření relevantnosti naměřených hodnot smykového modulu při velmi malých přetvořeních vybrané nesoudržné zeminy z geotechnického hlediska. Tímto vybavením jsou tzv. bender elementy a veličiny, jejichž měření tyto přístroje umožňují, mají velký potenciál pro optimalizaci konstrukcí v praktických aplikacích. V případě různých konstrukcí zakládání staveb totiž často dochází v zeminách pouze k malým přetvořením, při kterých je tuhost zemin vyšší než při přetvořeních, které je možné měřit v běžně používaných laboratorních přístrojích bez speciálního vybavení. Vyšší uvažovaná tuhost zeminy přitom vede k predikci menších deformací zemního prostředí, a tedy k možnosti navržení subtilnější konstrukce při dodržení stanoveného mezního stavu použitelnosti.

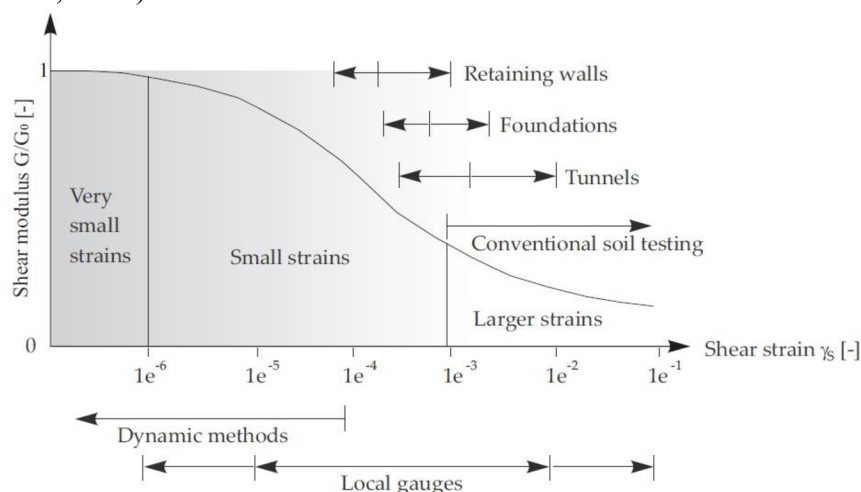
Dalším cílem práce je zjištění a shrnutí základních informací o tématu tuhosti zemin v oboru velmi malých přetvoření, a to zejména o fyzikální podstatě jevu, různých způsobech měření tuhosti zemin v tomto oboru přetvoření, problematice měření tuhosti zemin pomocí bender elementů a způsobech vyhodnocení naměřených dat.

2 ZÁVISLOST TUHOSTI ZEMIN NA PŘETVOŘENÍ

Zeminy při zatěžování vykazují značně nelineární chování, a to jak v případě závislosti napětí na přetvoření, tak i v případě závislosti tuhosti na přetvoření, která vykazuje charakteristický tvar S v případě logaritmické osy přetvoření, jako v příkladě na obr. 2-1 (BENZ a další, 2009).

V závislosti tuhosti zeminy na přetvoření lze rozlišit tři odlišné oblasti podle přetvoření. Tuhost zemín, která se popisuje pomocí smykového modulu G nebo pomocí Youngova modulu pružnosti E , dosahuje nejvyšších hodnot při velmi malých přetvořeních, za která jsou obvykle považována přetvoření menší než 10^{-6} . V této oblasti se zeminy chovají téměř lineárně a pružně (LADE, 2016).

Přetvoření v intervalu přibližně 10^{-6} až 10^{-3} se nazývají malá přetvoření. Poslední oblast přetvoření větších než 10^{-3} představuje hodnoty přetvoření, které je možné měřit v běžných přístrojích, jako je triaxiální nebo edometrický přístroj, bez dalšího speciálního vybavení. Tuhost v této oblasti je ale již výrazně menší než při velmi malých přetvořeních (BENZ a další, 2009).



Obr. 2-1 Smykový modul zemín v závislosti na smykovém přetvoření. Převzato z (Bentley Systems, Inc., 2019).

Maximální hodnota smykového modulu (G_0) se nazývá počáteční smykový modul a maximální hodnota Youngova modulu pružnosti (E_0) se nazývá počáteční modul pružnosti. Tyto dvě hodnoty jsou vzájemně provázány pomocí Poissonova součinitele příčné deformace ν následovně:

$$G_0 = \frac{E_0}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2-1)$$

K popsání tvaru křivky závislosti tuhosti zemin na přetvoření potřebujeme ještě jeden parametr, kterým je obvykle referenční přetvoření $\gamma_{0,7}$, což je smykové přetvoření, při kterém hodnota smykového modulu G klesne na 70% počáteční hodnoty G_0 . Závislost tuhosti na přetvoření je pak matematicky popsána následujícím vztahem podle Ramberg & Osgood (1943):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha * \left| \frac{\tau}{\tau_y} \right|^\kappa}, \quad (2-2)$$

kde τ je aktuální smykové napětí, τ_y je referenční smykové napětí podle Ramberg & Osgood (viz obr. 2-2), α a κ jsou regresní koeficienty. Jiným vztahem popisujícím chování zemin při malých přetvořeních je vztah podle Hardin & Drnevich (1972):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left| \frac{\gamma_s}{\gamma_r} \right|}, \quad (2-3)$$

kde γ_s je aktuální střední smykové přetvoření a γ_r je referenční smykové přetvoření podle Hardin & Drnevich (viz obr. 2-2).

Rozdíl mezi těmito vztahy spočívá v tom, že vztah podle Ramberg & Osgood je závislý na poměru smykových napětí a vztah podle Hardin & Drnevich vychází z poměru smykových přetvoření. Oba tyto vztahy vykazují dobrou shodu při aproximaci výsledků měření, ale vztah podle Hardin & Drnevich je pro praktické použití výhodnější, protože pro jeho vyčíslení potřebujeme pouze dva parametry G_0 a γ_r . Vztah podle Ramberg & Osgood naopak vyžaduje stanovení čtyř parametrů G_0 , α , τ_y a κ . (BENZ a další, 2009)

Referenční smykové přetvoření γ_r v rovnici (2-3) je definované vztahem:

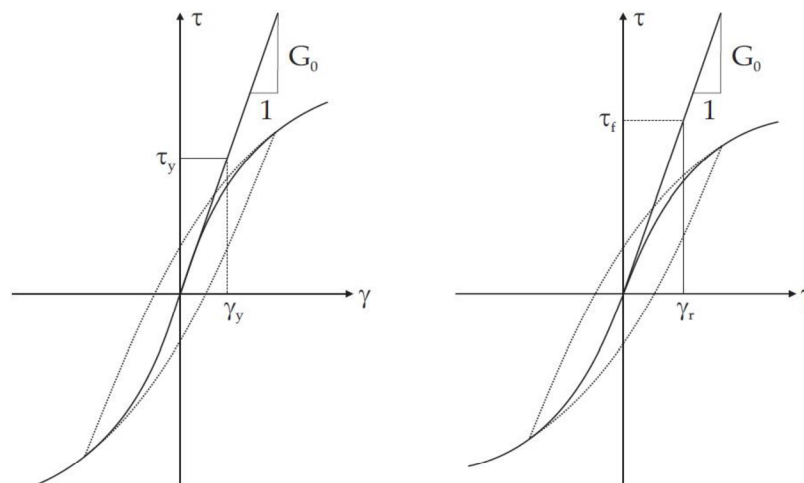
$$\gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_0} \quad (2-4)$$

kde τ_{max} je smykové napětí při porušení a podle Hardin & Drnevich (1972) dále platí:

$$\gamma_{0,7} = \frac{3}{7} * \gamma_r \quad (2-5)$$

a lze tedy psát vztah popisující závislost tuhosti zemin na přetvoření ve tvaru:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{3}{7} \frac{\gamma_s}{\gamma_{0,7}}} \quad (2-6)$$



Obr. 2-2 Materiálové modely popisující chování zemin při malých přetvořeních. Vlevo je model chování zeminy podle Ramberg & Osgood (1943) s vyznačeným referenčním smykovým napětím τ_y . Vpravo je model pole Hardin & Drnevich (1972) s vyznačeným referenčním smykovým přetvořením γ_r ($\tau_f = \tau_{max}$). Převzato od (BENZ a další, 2009).

Smykové přetvoření γ_s je obecně definováno:

$$\gamma_s = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (2-7)$$

V případě triaxiálních podmínek je ε_1 vertikální přetvoření a horizontální přetvoření v obou směrech ε_2 a ε_3 jsou shodná, takže lze rovnici (2-7) upravit na tvar:

$$\gamma_s = |\varepsilon_1 - \varepsilon_3| \quad (2-8)$$

2.1 Fyzikální podstata tuhosti při velmi malých přetvořeních

Zemina je systém tvořený třemi fázemi: plynná fáze (vzduch), kapalná fáze (voda) a pevná fáze (skelet). Pevná fáze je tvořena zrny různé velikosti, tvaru a mineralogického původu. Mechanické vlastnosti zemin závisí na vzájemném působení a poměru těchto tří fází případně i na dalších vnějších vlivech, jako je teplota či napětí (BENZ, 2006).

Písky jsou typicky tvořeny jednotlivými kompaktními zrny. Mezi zrny mohou vznikat tzv. Bornovy odpudivé síly, které brání vzájemnému pronikání zrn, a také vazebné síly mezi atomy jednotlivých zrn (BENZ, 2006).

Obě tyto síly vyžadují vzájemný kontakt molekul jednotlivých zrn. K tomu je ale nutné, aby se mezi dotykovými plochami zrn nevyskytovaly žádné molekuly vody ani jiných látek a vytlačení poslední vrstvy molekul vody z těchto ploch vyžaduje tlak až 400 MPa. To může nastat pouze u malých dotykových ploch mezi velkými, hodně zatíženými zrny

písku. Velký vliv má také stmelení, což je proces usazování uhličitanů a křemičitanů na povrch zrn. Stmelení vede i k vyplňování mezer mezi jednotlivými zrny a následně ke zvýšení vazebných sil mezi zrny. Protože se vazebné síly podílí na tření mezi zrny, tak stmelení vede ke zvýšení tuhosti zeminy (TERZAGHI a další, 1996).

Jílovité zeminy jsou na rozdíl od písků tvořeny shluky jílovitých minerálů, jejichž tvar i vlastnosti závisí na mineralogickém složení. Kromě sil vznikajících u písků mohou mezi jílovitými minerály vznikat i iontové vazby, hydratační vazby, vodíkové můstky i kapilární jevy (BENZ, 2006).

I přes odlišnosti v mikrostruktuře se však písky a jílovité zeminy z hlediska tuhosti při velmi malých přetvořeních chovají podobně a jsou modelovány jako systémy tvořené zrny (BENZ, 2006).

Princip zvýšené tuhosti zemin při velmi malých přetvořeních

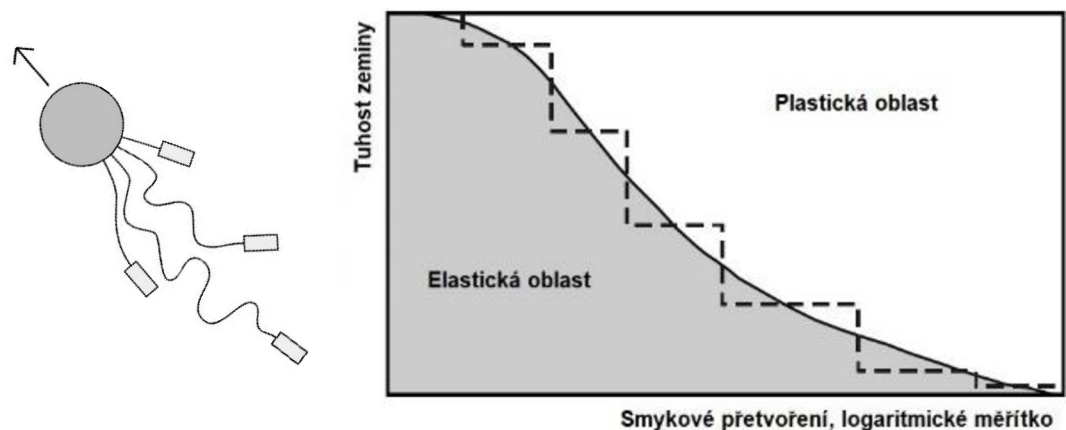
Tuhost vzorku zeminy jako celku je úměrná součtu tuhostí kontaktů mezi jednotlivými zrny. Za předpokladu, že platí Coulombův zákon tření, lze vysvětlit zvýšenou tuhost při velmi malých přetvořeních takto:

Při nulovém přetvoření jsou zrna vzájemně vázána pomocí sil působících na dotykových plochách. Při velmi malých přetvořeních se vzájemná poloha většiny zrn nemění kvůli určité pružnosti jejich vzájemných vazeb. S rostoucím přetvořením ale narůstá počet částic, u kterých dojde k vzájemnému prokluzu a kvůli tomu klesá i tuhost zeminy jako celku (BENZ a další, 2009).

V kontaktních plochách mezi zrny vznikají při zatížení tangenciální a normálové síly. Při přetvoření vzorku dochází k přeskupení těchto kontaktních sil. S rostoucím přetvořením se ve vzorku začínají objevovat oblasti s jedním převládajícím směrem působení kontaktních tangenciálních sil. Tento jev vede k větším deformacím a porušení vazeb mezi zrny, a tedy i k poklesu tuhosti zeminy jako celku. Pro velmi malá přetvoření je typické, že se ještě neobjevuje převládající směr působení kontaktních sil, vzájemné vazby mezi zrny nejsou porušeny a tuhost zeminy zůstává vysoká (BENZ, 2006).

Přeskupení kontaktních sil, tedy změna vzájemného poměru tangenciálních a normálových sil, závisí na způsobu zatěžování. Za předpokladu, že jsou zrna dokonale tuhá, dochází při izotropním zatěžování pouze k objemovým přetvořením, při kterých se pouze zvětšují velikosti kontaktních sil, ale nemění se jejich vzájemný poměr a nemůže tedy docházet k poklesu tuhosti vzorku. K výraznému přeskupení kontaktních sil dochází při anizotropním zatěžování, při kterém vzniká ve vzorku deviátor napětí, a to vede ke smykovým přetvořením. Ve skutečnosti ale nejsou zrna zcela tuhá, a navíc se mohou porušit, takže i při izotropním zatěžování dochází k jistému přeskupení kontaktních sil, avšak v menší míře než u anizotropního zatěžování (BENZ a další, 2009).

Chování zemin při velmi malých přetvořeních také pomocí analogie popisuje tzv. „*Simpson's brick model*“, který představil Simpson (1992): V tomto modelu se vyskytuje člověk reprezentující bod v poli napětí spojený provázekem s kostkami, z nichž každá představuje určitou část zrn zeminy (viz obr. 2-3). Plastické přetvoření je zobrazeno pohybem kostek a pružné přetvoření je představováno rozdílem pohybu člověka a odpovídajících pohybů kostek. Diagram závislosti tuhosti zeminy na smykovém přetvoření lze následně modelovat pomocí skoků. Při velmi malých přetvořeních se celý vzorek chová pružně a žádné kostky v modelu se tedy nehýbou. Při určitém přetvoření se začne pohybovat první kostka a začnou tak vznikat plastické deformace. To se projeví v diagramu jako skokový pokles tuhosti. S rostoucím přetvořením se postupně hýbe více kostek a narůstají plastické deformace a dále klesá tuhost zeminy. Délka jednotlivých stupňů odpovídá přetvoření, které je nutné pro napnutí dalšího provázku a výška stupně odpovídá podílu zrn představovanému danou kostkou. S rostoucím počtem kostek se tedy graf blíží teoretické křivce.



Obr. 2-3 Simpson's brick model. Vlevo člověk pohybující kostkami, vytvořeno podle (SIMPSON, 1992). Vpravo diagram závislosti tuhosti zeminy na přetvoření, převzato z (CLARKE a další, 2013) a upraveno.

2.2 Parametry ovlivňující tuhost zemin při malých a velmi malých přetvořeních

Modul tuhosti při velmi malých přetvořeních je možné kromě laboratorních a in-situ zkoušek zeminy získat i výpočtem z aproximačních vztahů na základě jiných parametrů zeminy. Mnohé aproximační vztahy vycházejí z obecného vztahu podle Hardina (1978):

$$G_0 = A * f(e) * OCR^k * \left(\frac{p'}{p_{ref}}\right)^m, \quad (2-9)$$

kde A , k a m jsou koeficienty volené podle doporučení pro různé zeminy, $f(e)$ je funkce vyjadřující závislost na čísle pórovitosti, OCR je parametr vyjadřující stupeň překonsolidace, p' je střední efektivní napětí a p_{ref} je referenční napětí, za které je obvykle volena hodnota atmosférického tlaku, tedy 100 kPa (BENZ, 2006).

Kromě parametrů ovlivňujících hodnotu počátečního smykového modulu G_0 a vyskytujících se v rovnici (2-9) existují i další jevy, které se projevují změnou parametru $\gamma_{0,7}$ a ovlivňují tedy tvar křivky závislosti smykového modulu G na smykovém přetvoření γ . Jednotlivým vlivům na tuhost zemin při malých a velmi malých přetvořeních se věnují podrobně následující kapitoly.

2.2.1 Číslo pórovitosti

Číslo pórovitosti e má významný vliv na tuhost zemin při velmi malých přetvořeních. Vztah mezi tuhostí zemin a číslem pórovitosti je popsán pomocí funkce $f(e)$, jejíž tvar se liší dle autora a typu zeminy, pro který je doporučena (BENZ, 2006).

Vztahy se vyskytují např. v podobě podle Hardin & Richart (1963):

$$f(e) = \frac{(a_H - e)^2}{1 + e}, \quad (2-10)$$

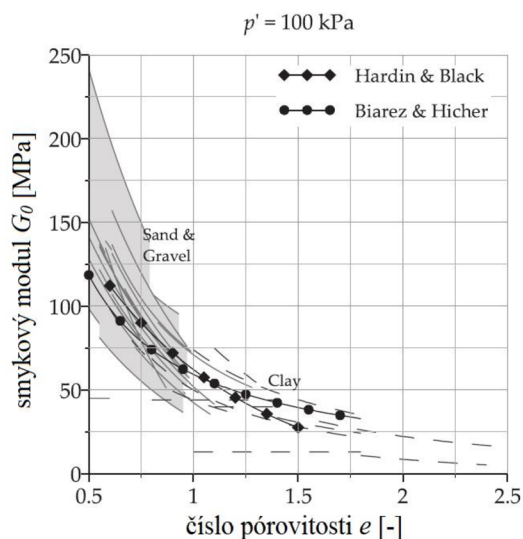
kde a_H je koeficient volený podle doporučení v literatuře a druhu zeminy. Pro písky s oblémi zrny se podle Benz (2006) používá hodnota $a_H = 2,17$, pro písky s ostrohrannými zrny a pro jemnozrné zeminy se používá hodnota $a_H = 2,97$.

Další varianta funkce čísla pórovitosti je podle Jamiolkowski a kol. (1991):

$$f(e) = e^{-a_J}, \quad (2-11)$$

kde a_J je opět koeficient podle doporučení v literatuře, který může nabývat značně odlišných hodnot, a to podle přehledu v práci (PANUŠKA, 2018) přibližně od 0,2 do 4,2.

Doporučené vztahy a koeficienty pro jednotlivé zeminy shrnul Benz (2006) a vhodnosti jednotlivých vztahů se podrobně věnuje i Panuška (2018). Závislost tuhosti zemin na čísle pórovitosti podle různých parametrů a vztahů je zobrazena na obr. 2-4.



Obr. 2-4 Závislost tuhosti zemin na čísle pórovitosti pro různé parametry A , k a m rovnice (2-9) včetně odvozených závislostí podle Hardin & Black (viz rovnice 2-13) a podle Biarez & Hicher viz rovnice (2-14). Převzato z (BENZ a další, 2009)

2.2.2 Střední efektivní napětí

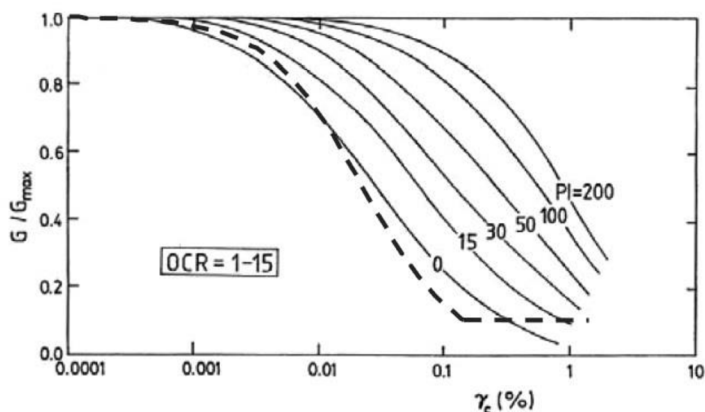
Souvislost mezi středním efektivním napětím p' a smykovým modulem při velmi malých přetvořeních popsal Hardin & Richart (1963) vztahem:

$$G_0 \propto (p')^m, \quad (2-12)$$

kde m je regresní koeficient, který definuje tvar křivky závislosti smykového modulu G_0 na středním efektivním napětí. Pro nesoudržné zeminy se hodnota m pohybuje přibližně od 0,45 do 0,55. Pro soudržné zeminy koeficient m nabývá hodnot přibližně od 0,7 do 1,0 (BENZ, 2006).

2.2.3 Index plasticity

Index plasticity má vliv na tvar křivky závislosti smykového modulu na smykovém přetvoření. S rostoucím indexem plasticity se zvětšuje i $\gamma_{0,7}$, tedy smykové přetvoření při 70 procentech hodnoty G_0 . Podle Benz (2006) se ukazuje, že původní graf podle Vucetic & Dobry (1991) na obr. 2-5 je nepřesný pro vyšší indexy plasticity a měl by být používán pouze pro $PI < 30$.



Obr. 2-5 Vliv indexu plasticity na křivku závislosti smykového modulu na smykovém přetvoření. Graf poprvé sestavený autory Vucetic & Dobry (1991) ukazuje tvary křivky poklesu smykového modulu pro různé hodnoty indexu plasticity. Převzato z (BRINKGREVE a další, 2007).

2.2.4 Parametr OCR

Parametr OCR („*over-consolidation ratio*“) je definovaný jako poměr nejvyššího napětí, které se ve zkoumaném vzorku vyskytlo v minulosti a napětí, které ve vzorku působí nyní. Vliv parametru OCR souvisí s plasticitou zeminy a má tedy jen malý vliv na tuhost u nesoudržných zemín, ale výrazně se projevuje u soudržných zemín, kde zvyšuje smykový modul G_0 . Exponent k v rovnici (2-9) nabývá hodnot od 0 pro nesoudržné zeminy až pro 0,5 po jíly s vysokou plasticitou (BENZ, 2006).

2.2.5 Diagenese sedimentárních zemín

Podle Geologické encyklopedie České geologické služby (PETRÁNEK, 2020) je diagenese „souhrn pochodů měnících minerální složení, strukturu i texturu sedimentu v období počínajícím jeho uložením a končícím buď jeho metamorfózou nebo zvětráváním v povrchových podmínkách. Nejzjevnějším projevem diagenese je zpevnění horniny původně sypké, k čemuž přispívá souběžně probíhající kompakce a stmelení. Kompakce je stlačení sedimentu tíhou nadložních vrstev a vede ke snížení pórovitosti

a obsahu vody. Stmelení (méně vhodně cementace) spočívá ve vzájemném spojení částic sedimentu minerálními substancemi vylučovanými z cirkulujících roztoků. Dalšími diagenetickými pochody jsou oxidace a krystalizace, rekrystalizace, vznik novotvořených minerálů aj.“

Diagenetické pochody mění mikrostrukturu zemin a vazby mezi částicemi v čase, což vede ke změně tuhosti zeminy. Z diagenetických procesů má velký význam kompakce a stmelení, které mohou výrazně zvýšit tuhost zemin při velmi malých přetvořeních. Efekt způsobený diagenezí ale může být ztracen při změně stavu napjatosti. Neporušené vzorky se tak při malých přetvořeních chovají odlišně než porušené vzorky. To se projeví odlišnými výsledky mezi laboratorními zkouškami a zkouškami in-situ (BENZ, 2006).

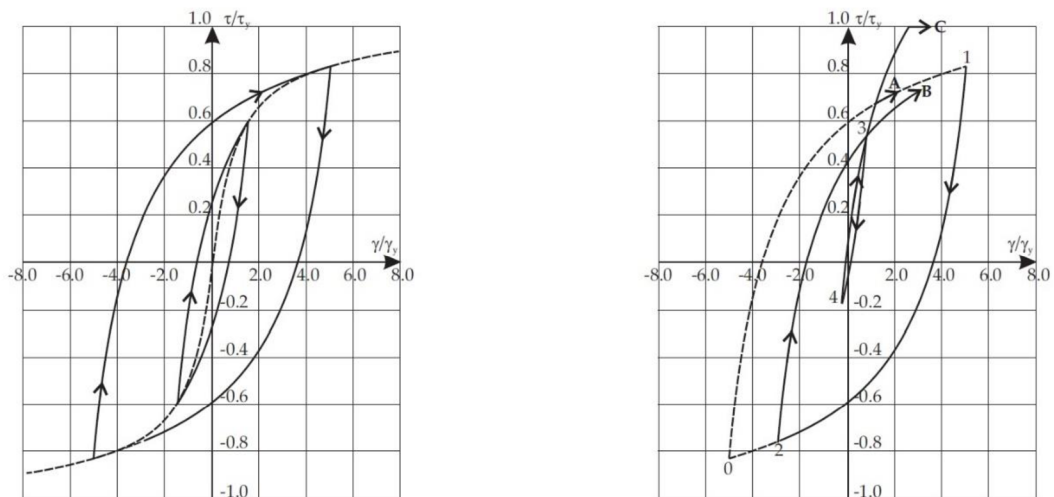
2.2.6 Historie zatěžování

Masing (1926) popsal hysterezní chování materiálu pro případ mosazi těmito pravidly:

- 1) Smykový modul při odtížení je roven počátečnímu tečnému modulu křivky prvotního zatěžování.
- 2) Tvar křivky odtížení a křivky opětovného přitížení je podobný křivce prvotního zatěžování, ale jejich měřítko je dvojnásobné.

Druhé pravidlo lze přepsat následovně: $\gamma_{0,7}$ při opětovném přitěžování je rovné dvojnásobku $\gamma_{0,7}$ při prvotním zatěžování (BENZ, 2006).

Tato pravidla lze použít i pro popis chování zeminy, pokud je zatěžována symetricky. Pokud je však zemina zatěžována nepravidelně, tak může současná křivka přitížení nebo odtížení protnout některou předchozí (viz obr. 2-6). Existují proto různá rozšíření původních dvou pravidel, která porovnal Pyke (1979) a jsou zobrazena na obr. 2-6 v pravé části.



Obr. 2-6 Chování zemin při symetrickém zatěžování (vlevo) a při nepravidelném zatěžování (vpravo). Převzato z (BENZ a další, 2009).

2.2.7 Vliv rychlosti zatěžování

Existuje vztah mezi nárůstem smykového modulu G_0 a rychlostí zatěžování, respektive rychlostí změny smykového přetvoření. S rostoucí rychlostí zatěžování se zvětšuje smykový modul, ale s rostoucí amplitudou smykového přetvoření se naopak tento efekt zmenšuje (BENZ, 2006).

Vliv rychlosti zatěžování se zvětšuje s rostoucí plasticitou zemin a neprojevuje se tedy u nesoudržných zemin (BENZ, 2006).

2.2.8 Další jevy ovlivňující tuhost zemin při malých a velmi malých přetvořeních

Křivka zrnitosti a střední průměr zrn mají u šterků vliv na tuhost při velmi malých přetvoření (BENZ, 2006).

U nesoudržných zemin je smykový modul G_0 stejný u suchého i plně nasyceného vzorku, ale v případě soudržných zemin s vlhkostí blízko meze tekutosti může modul G_0 klesnout na minimální hodnotu, dle typu soudržné zeminy až na 500 kPa (BENZ, 2006).

2.3 Empirické vztahy pro výpočet G_0

Pro odhad hodnoty G_0 u různých zemín lze použít vztah podle Hardin & Black (1969):

$$G_0 = 33 * \frac{(2,97-e)^2}{1+e} * \left(\frac{p'}{p_{ref}}\right)^{0,5} [MPa] , \quad (2-13)$$

jednodušší vztah pro modul pružnosti E_0 podle Biarez & Hicher (1994):

$$E_0 = \frac{140}{e} * \left(\frac{p'}{p_{ref}}\right)^{0,5} [MPa] , \quad (2-14)$$

který lze pomocí Poissonova čísla (viz rovnice 2-1) přepočítat na smykový modul G_0 nebo lze použít obecný vzorec podle Hardin & Black (viz rovnice 2-9) a dosadit vhodné parametry podle doporučení z literatury, jako například z tabulky od Benz (2006).

3 ZPŮSOBY MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ TUHOSTI V OBORU MALÝCH A VELMI MALÝCH PŘETVOŘENÍ

3.1 Způsoby měření tuhosti v oboru malých a velmi malých přetvoření

Měření tuhosti zemin v oboru malých a velmi malých přetvoření můžeme provádět v laboratořích nebo polními zkouškami přímo na staveništi (in-situ).

3.1.1 Laboratorní zkoušky

Laboratorní zkoušky se používají díky možnosti testovat vzorek za různých podmínek, za plně kontrolovaných okrajových podmínek a také díky možnosti opakovatelnosti zkoušek. Největším problémem je, že v laboratorních zkouškách malý neporušený vzorek reprezentuje rozsáhlé a složité podloží (PANUŠKA, 2018).

Triaxiální zkoušky s lokálními měřiči přetvoření

Při běžné triaxiální zkoušce je osové přetvoření vzorku měřeno na základě změny vzdálenosti horní a dolní podstavy vzorku. Pro měření velmi malých přetvoření je ale tato metoda nedostačující, protože obě podstavy vzorku nejsou s ohledem na ruční osazení a manipulaci se vzorkem přesně rovnoběžné ani rovné, což se projeví v nedokonalém kontaktu mezi podstavami a zeminou. Při zatěžování takto měřené deformace narůstají rychleji, protože dochází k dosednutí podstav na zeminu, ale zároveň dojde k překročení oblasti velmi malých přetvoření. Řešením je osazení vzorku lokálními měřiči přetvoření, které eliminují vliv nepřesností v kontaktech mezi podstavami a vzorkem a jsou také nezávislé na ostatních prvcích konstrukce zkušební komory. Dostatečné rozlišení pro měření velmi malých přetvoření mají například měřiče LVDT (*Local Variable Differential Transformers*), „*Digital Displacement Transducers*“ nebo „*Hall Effect Transducers*“. Hlavní nevýhodou použití lokálních měřičů přetvoření je vyšší cena a náročnost zkoušky (BENZ, 2006).

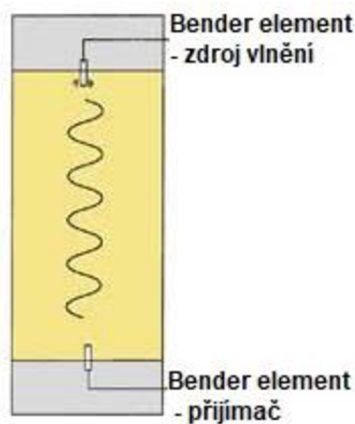
Pohled na vzorek zeminy osazeného měřiči LVDT je na obr. 3-1.



Obr. 3-1 Vzorek zeminy osazený snímači LVDT. Převzato z (GDS Instruments, 2020).

Bender elementy

Měření pomocí bender elementů probíhá v triaxiální komoře. Horní a dolní podstavy jsou osazeny speciálními tenkými piezoelektrickými prvky – bender elementy, z nichž jeden plní funkci vysílače vlnění a druhý je přijímač (viz obr. 3-2). Jde o nepřímé měření tuhosti vzorku, která se počítá na základě vztahu využívající rychlost šíření mechanického vlnění vzorkem a objemovou hmotnost. Výhodou oproti lokálním měřičům přetvoření je nižší cena zkoušky a jednodušší osazení vzorku (BENZ, 2006). Nevýhodou je, že pomocí bender elementů lze měřit pouze hodnotu počátečního smykového modulu G_0 , ale nelze měřit hodnoty smykového modulu při vyšších hodnotách přetvoření, a tedy ani parametr $\gamma_{0,7}$ definující tvar křivky poklesu tuhosti zemin. Detailněji se bender elementům věnuje kapitola 3.2.



Obr. 3-2 Schéma měření tuhosti zemin pomocí bender elementů. Převzato z (SNELLING a další, 2013) a upraveno.

Resonant column a torsional shear test

Zkouška „*Resonant column*“ probíhá uvnitř triaxiální komory a vzorek zeminy tvaru válce je během ní namáhán cyklickým kroucením vyvolaným pohybem jedné z podstav. Princip zkoušky spočívá v postupné změně frekvence kroucení, dokud není dosaženo rezonanční frekvence vzorku, ze které lze spočítat tuhost zemin při malých a velmi malých přetvořeních (WICHTMANN a další, 2001). Schéma zkoušky je na obr. 3-3.

„*Torsional shear test*“ je podobný zkoušce „*Resonant column*“ a základní rozdíl spočívá v odlišných frekvencích a amplitudách při zatěžování (BENZ, 2006).

Obě zkoušky se také používají ve variantě s dutým válcovým vzorkem, který umožňuje namáhat vzorek při zkoušce odlišným tlakem na vnějším plášti a uvnitř dutiny, což se projeví natačením hlavních os napjatosti (BENZ, 2006).



Obr. 3-3 Schéma zkoušky „*Resonant column*“. Převzato z (NGI, 2020) a upraveno.

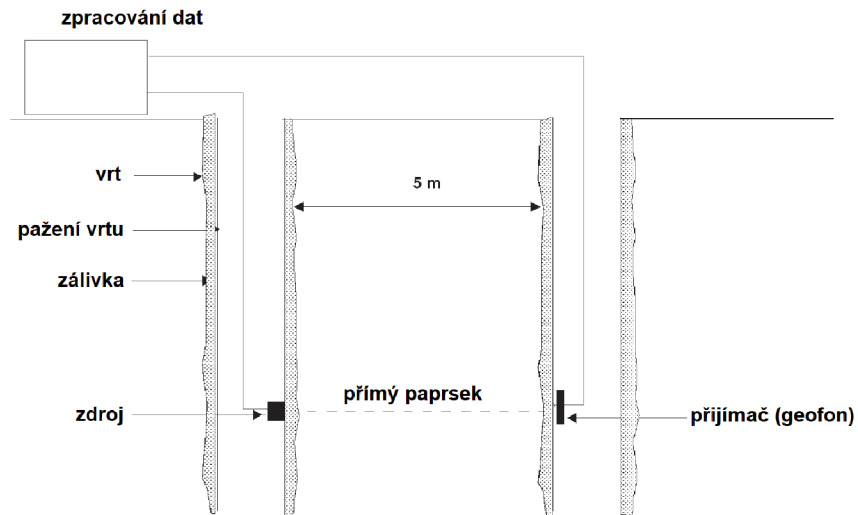
3.1.2 Polní zkoušky (in-situ)

Na rozdíl od laboratorních zkoušek poskytují polní zkoušky informace o zeminách v přirozených podmínkách a ve velkém měřítku, takže měření může zaznamenat vliv různých poruch v měřeném profilu (BENZ, 2006). Mezi polní zkoušky patří například:

Cross hole seismic

Tato metoda vyžaduje minimálně dva vrty (viz schéma na obr. 3-4). V jednom se umístí do cílové hloubky vysílač signálu a do druhého vrtu se umístí buď jeden přijímač do stejné hloubky nebo v případě varianty zkoušky zvané „*Cross hole tomography*“ se umístí do druhého vrtu řetězec přijímačů v různých hloubkách. Následně se měří rychlost šíření

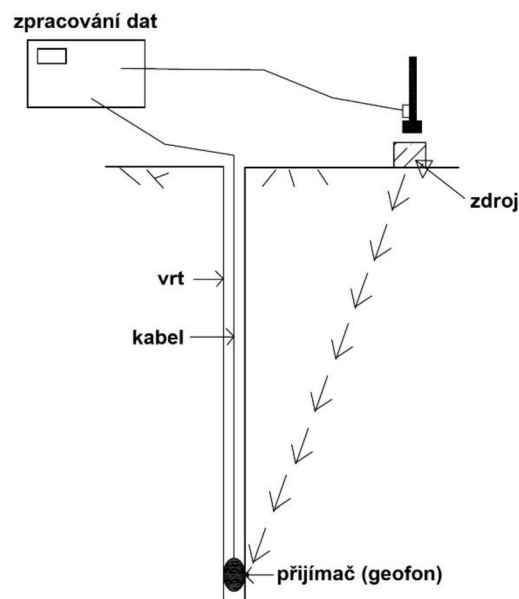
signálu v dané vrstvě nebo v případě řetězce přijímačů ve více vrstvách zároveň a tato rychlost se přepočítá na tuhost podobně jako u bender elementů. Jde o jednu z nejpřesnějších metod, ale problémem této metody je obtížné stanovení objemové hmotnosti zeminy, náročné stanovení přesné vzdálenosti vysílače a přijímače a také vysoké náklady na vytvoření vrtů (BENZ, 2006).



Obr. 3-4 Schéma zkoušky "Cross hole seismic". Převzato z (WADHWA a další, 2009) a upraveno.

Down hole seismic

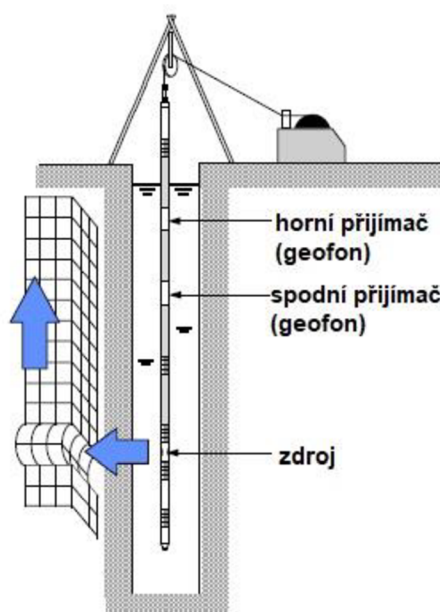
Na rozdíl od metody „Cross hole seismic“ je potřeba pouze jeden vrt, ve kterém je umístěn přijímač nebo řetězec přijímačů, a zdroj vlnění je umístěn na povrchu (BENZ, 2006). Schéma zkoušky je na obr. 3-5.



Obr. 3-5 Schéma zkoušky „Down hole seismic“. Převzato z (Subsurface Engineering Sdn Bhd, 2020) a upraveno.

Suspension logging

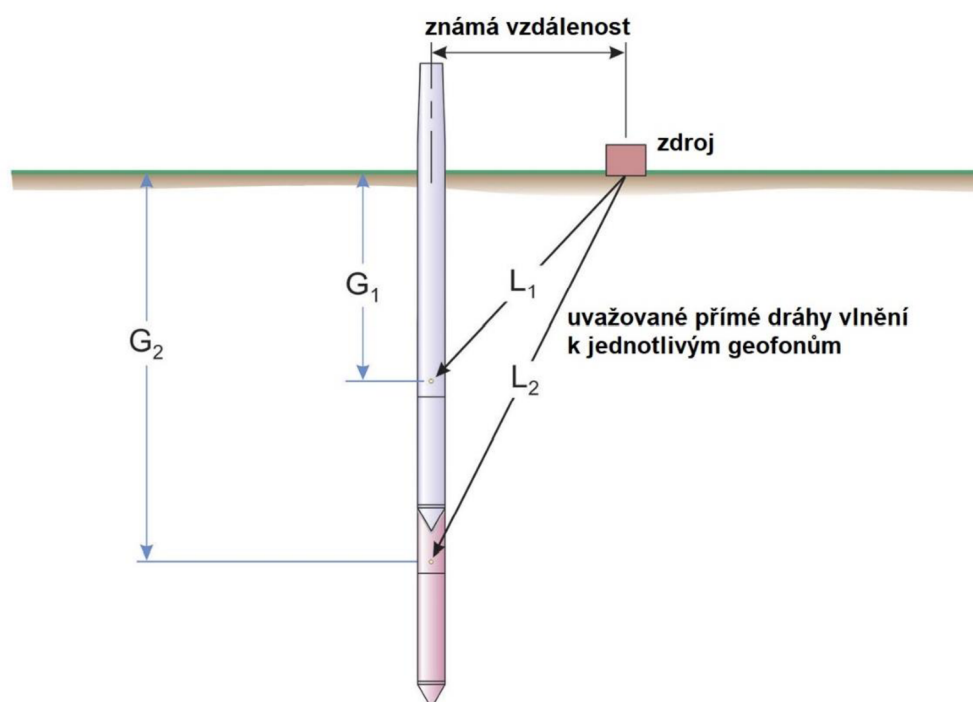
V případě této metody jsou vysílač i přijímač umístěny v jednom vrtu v různých hloubkách a jsou odděleny pouze několikametrovou vrstvou pažící suspenze (schéma viz obr. 3-6). Tato metoda je zaměřena hlavně na vlny šířící se podél stěn vrtu (BENZ, 2006).



Obr. 3-6 Schéma zkoušky "Suspension logging". Převzato z (GEOVision, Inc., 2016) a upraveno.

Seismic cone a Seismic flat dilatometer

Tyto metody představují kombinaci metody „Down hole seismic“ se statickou penetrační zkouškou („Seismic cone“), respektive dilatometrickou zkouškou („Seismic flat dilatometer“). Nad dilatometrem případně hrotem statické penetrační zkoušky jsou umístěny nad sebou dva geofony ve známé vzdálenosti. Následně se na povrchu vyvolá vlnění a zjišťuje se doba mezi prvním příjmem signálu u jednotlivých geofonů, ze které se spočítá rychlost šíření vlnění v okolním prostředí (PANUŠKA, 2018). Schéma zkoušky „Seismic cone“ je na obr. 3-7.



Obr. 3-7 Schéma zkoušky "Seismic cone". Převzato z (ConeTec, 2020) a upraveno.

Měření pomocí povrchových vln

Tradičními metodami jsou metoda odražených vln a metoda lomených vln. V moderní geotechnice se používají metody SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*) a MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), které jsou založeny na měření rychlosti šíření Rayleighových povrchových vln od zdroje vlnění ke geofonům (viz obr. 3-8). Na základě předpokladu, že rychlost příčného vlnění se rovná přibližně 90 % až 95 % rychlosti Rayleighových vln, se následně spočítá smykový modul G_0 . V případě SASW se používají dva geofony a u MASW se používá řada 12 nebo 24 geofonů (PANUŠKA, 2018).



Obr. 3-8 Schéma měření pomocí metody MASW. Převzato z (GeoSiam Geophysical Services Co., Ltd., 2020) a upraveno.

3.2 Vyhodnocení tuhosti zemin při měření pomocí bender elementů

Bender elementy jsou piezoelektrické prvky, což znamená, že při průchodu elektrického proudu se tyto prvky mechanicky deformují, a naopak při mechanickém deformování v nich vzniká elektrický proud. Pokud je elektrický proud časově proměnný, tak mohou fungovat jako zdroje a přijímače vlnění. Bender elementy jsou tvořeny dvěma piezokeramickými destičkami, mezi kterými je vodivá kovová vrstva. Další elektrody jsou umístěny na vnějších stranách piezokeramických destiček. Rozlišují se dva typy bender elementů. Prvním jsou sériové bender elementy, u kterých jsou směry polarizace piezokeramických destiček opačné a připojují se pomocí vnějších elektrod. Druhým typem jsou paralelní bender elementy, u kterých jsou směry polarizace destiček shodné a připojují se pomocí vnějších i vnitřních elektrod. Paralelní typ poskytuje při stejném napětí dvojnásobné deformace elementu než sériový typ a výrobci proto často doporučují používat sériový typ jako přijímač a paralelní typ jako vysílač vln (LEE a další, 2005).

Za předpokladu lineárně pružného prostředí lze zapsat souvislost mezi tuhostí zeminy a rychlostí šíření příčného vlnění (BENZ, 2006):

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \Rightarrow G = \rho * v_s^2 \quad (3-1)$$

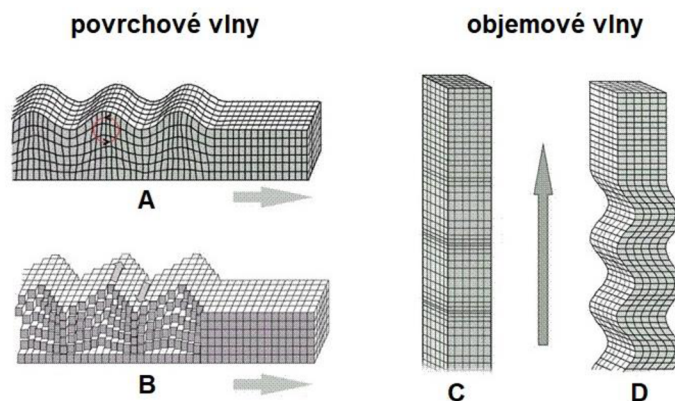
a pro rychlost šíření podélného vlnění platí (BENZ, 2006):

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}} \Rightarrow G = \frac{\rho * v_p^2 - \lambda}{2}, \quad (3-2)$$

kde λ je Lamého konstanta, pro kterou platí:

$$\lambda = \frac{\nu * E}{(1+\nu) * (1-2*\nu)}, \quad (3-3)$$

kde E je Youngův modul pružnosti a ν je Poissonovo číslo (BENZ, 2006).



Obr. 3-9 Způsoby šíření vlnění. Vlevo povrchové vlny: A – Rayleighovy vlny, B – Loveho vlny. Vpravo objemové vlny: C – podélné vlny, D – příčné vlny. Převzato z (Aldebaran Group for Astrophysics, 2020) a upraveno.

Bender element funguje jako kmitající konzolový nosník vložený do vzorku zeminy. Při deformování bender elementu vzniká ve vzorku podélné i příčné vlnění zároveň (rozdíl viz obr. 3-9). Příčné vlnění vzniká v místě pohybujícího se konce (hrotu) bender elementu a podélné vlnění vzniká na jeho bočních plochách. Rychlost šíření příčné vlny se počítá ze dvou měřených veličin. První veličinou je vzdálenost konců bender elementů. Druhou je doba mezi vysláním signálu z jednoho bender elementu a jeho přijetím druhým bender elementem. Obvykle je měřena rychlost šíření příčného vlnění, které je v přijatém signálu méně tlumené a tedy výraznější. Na rozdíl od měření vzdálenosti, je měření doby šíření signálu problematické a existuje více metod, jak ji určit (LEE a další, 2005). Tyto metody jsou popsány v následující kapitole.

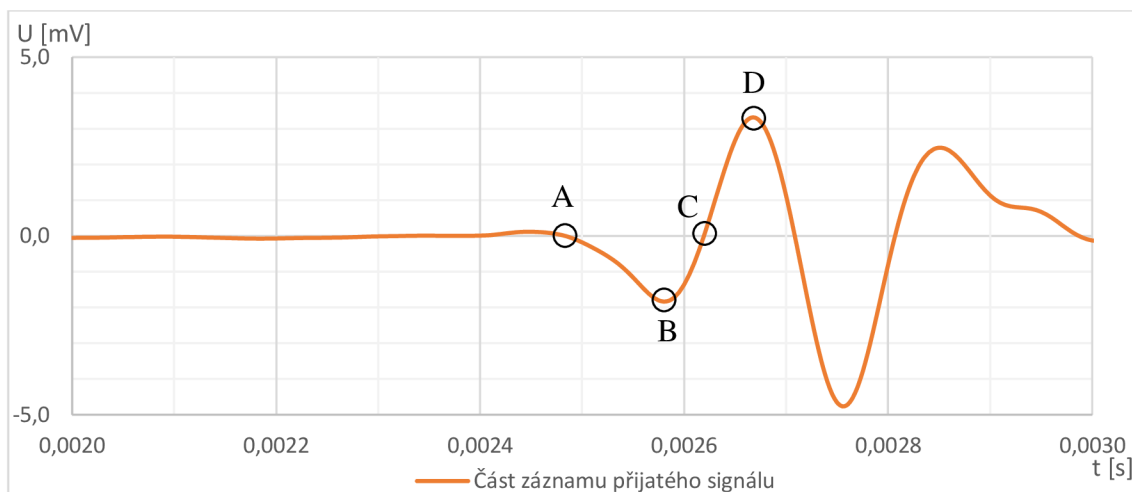
3.2.1 Způsoby analýzy přijatého signálu

Přímé měření doby šíření signálu z časového záznamu

Při této metodě se zvolí bod na záznamu přijatého signálu a změří se časový úsek mezi tímto bodem a odpovídajícím bodem vyslaného signálu.

Výhodou této metody je její jednoduchost a rychlost. Přijatý signál je ale ovlivněn svým průchodem vzorkem, dalšími způsoby šíření vlnění, jako je podélné vlnění a povrchové vlny (viz obr. 3-9), odrazy vlnění od pláště válcového vzorku i od protilehlých podstav, takže tvar přijatého signálu je složitý, obsahuje více vrcholů a není vždy jednoznačné, která část časového záznamu vlnění je první přijatou příčnou vlnou. První méně výrazné výchylky jsou často záznamy přijetí podélných vln, které se šíří rychleji než příčné vlny a vztah mezi nimi a tuhostí zemin je odlišný než u příčných vln (LEE a další, 2005).

Problém této metody spočívá také v tom, jaký bod přijaté vlny zvolit jako okamžik přijetí vlny, viz obr. 3-10. Je to okamžik prvního poklesu výchylky (A), první minimum (B), nulová výchylka po prvním poklesu (C) nebo první vrchol vlny (D)? Jednotlivá doporučení pro výběr okamžiku se liší podle tvaru vyslaného signálu, použitých přístrojů a druhu zeminy (LEE a další, 2005).



Obr. 3-10 Možné body uvažované jako okamžik přijetí signálu. Vytvořeno dle (LEE a další, 2005).

Nevýhodou této metody je i nespojitý časový záznam. Například jako vrchol vlny uvažujeme bod záznamu s nevyšší zaznamenanou výchylkou, ale skutečný vrchol mohl nastat v jiném okamžiku, než ve kterém byla zaznamenaná data. Přesnost výsledného smykového modulu G_0 tedy závisí na frekvenci záznamu dat a následná chyba měření může dosahovat jednotek MPa (ZAPATA-MEDINA a další, 2015).

Variantou přímého měření doby šíření signálu je metoda „Peak to peak“. Postup odečtení doby šíření signálu z časového záznamu je stejný, ale u této metody jsou jednoznačně určeny body na vyslané a přijaté vlně. Za předpokladu, že přijatá vlna se podobá vyslané vlně, se měří doba mezi vrcholem vyslaného signálu a prvním výrazným vrcholem přijatého signálu. Problémem zůstává určení prvního vrcholu u složitého přijatého signálu, pokud není dostatečně výrazný a zůstává i omezení přesnosti kvůli rozlišení časového záznamu (LADE, 2016).

Další variantou je přímé měření doby mezi prvním a druhým přijetím signálu. Druhý přijatý signál vzniká tak, že se první signál odrazí nejprve od podstavy vzorku s přijímacím bender elementem, poté se odrazí od podstavy vzorku s vysílacím bender elementem a následně je opět zaznamenaný přijímacím bender elementem. Výhoda této metody spočívá v tom, že omezuje nejistoty v měření doby šíření signálu i chybu měření vzdálenosti, protože nyní je měřena pouze vzdálenost podstav, které jsou viditelné i po osazení vzorku na rozdíl od měření vzdálenosti hrotů bender elementů, které jsou skryty uvnitř vzorku. Problematické ale může být určení druhého přijetí signálu, pokud není dostatečně výrazný (LEE a další, 2005).

Metoda Cross Corelation

Tato metoda spočívá v posuzování podobnosti vyslaného a přijatého signálu. Tyto naměřené signály se vůči sobě posouvají o hodnotu t a posuzuje se koeficient korelace cc_{xy} , který se počítá podle vzorce:

$$cc_{xy}(t) = \lim_{T_R \rightarrow \infty} \frac{1}{T_R} \int_{T_R} X(T) * Y(T + t) dt, \quad (3-4)$$

kde T_R je časový záznam, $X(T)$ je přijatý signál, $Y(T+t)$ je vyslaný signál posunutý o hodnotu t , což je časový posun. Základním předpokladem metody je, že časový posun je roven době šíření signálu. Hledaná doba šíření signálu odpovídá hodnotě t , při které je koeficient korelace největší. V případě, že frekvence přijatého signálu se výrazněji liší od frekvence vyslaného signálu, může mít funkce koeficientu korelace více vrcholů a nelze tedy jednoznačně určit časový posun (ZAPATA-MEDINA a další, 2015).

Další varianta metody „*Cross corelation*“ pracuje se signálem převedeným na frekvenční spektrum pomocí rychlé Fourierovy transformace. Výstupem je poté fázový posun, při kterém je koeficient korelace cc_{xy} největší a z něj se opět spočítá rychlost šíření vlnění (LADE, 2016).

Metoda Signal matching

Principem této metody je, že pomocí teoretických vzorců se simuluje průchod vlny vzorkem zeminy a porovnává se výsledný vypočtený signál se skutečně naměřeným signálem. Postupně se mění jednotlivé neznámé parametry modelu, včetně rychlosti šíření vlnění, a výpočet se opakuje, dokud se vypočtený signál dostatečně nepodobá skutečně přijatému signálu. Hledaná rychlost šíření vlnění je následně převzata z poslední iterace teoretických výpočtů (LEE a další, 2005).

3.2.2 Near-field effect

Jde o jev, který nastává v případě, že vlnová délka signálu je velká v porovnání se vzdáleností zdroje a přijímače vlnění. Tento efekt je způsoben skutečností, že od zdroje (bender elementu) se vlnění šíří několika různými způsoby a v oblasti „near-field“ (tedy oblasti blízkého pole) dochází ke zkreslení přijatého signálu a následnému nadhodnocení nebo podhodnocení doby mezi vysláním vlny a jejím přijetím. Pro popis poměru vzdálenosti bender elementů a vlnové délky se zavádí tzv. normalizovaná vzdálenost n , pro kterou platí:

$$n = \frac{d}{\lambda}, \quad (3-5)$$

vlnová délka se spočítá podle vzorce:

$$\lambda = v_s * T = \frac{v_s}{f}, \quad (3-6)$$

kde d je vzdálenost zdroje a přijímače signálu, v_s je rychlost příčného vlnění, T je perioda vlnění a f je jeho frekvence (ARROYO a další, 2003).

Z prvního odstavce je zřejmé, že „near-field effect“ můžeme omezit buď zvětšením vzdálenosti bender elementů nebo zmenšením vlnové délky signálu. Změna vzdálenosti zdroje a přijímače signálu je v laboratorních podmínkách nevhodná, protože vlnovou délku získáme z rychlosti šíření vlnění až po měření na vzorku osazeném v triaxiální komoře a případné vyjmutí a opětovné osazení by bylo zdlouhavé a u měření neporušeného vzorku prakticky nemožné (ARROYO a další, 2003).

Zbývá tedy omezení „near-field effect“ změnou vlnové délky vlnění vyslaného ze zdroje, a to zvětšením jeho frekvence, která nemá vliv na rychlost šíření vlny a neovlivní tedy měření tuhosti (ARROYO a další, 2003).

Podle (BODET a další, 2009) a (ROY a další, 2017) se doporučuje, aby normalizovaná vzdálenost byla větší než 2,0. Podle (ARROYO a další, 2003) by měla být $n > 1,6$. Z rovnic (3-5) a (3-6) je možné vyjádřit vztah pro minimální frekvenci:

$$f_{min} = \frac{v_s}{\frac{1}{n} * d}, \quad (3-7)$$

kde v_s je rychlost šíření příčné vlny, n je normalizovaná vzdálenost a d je vzdálenost zdroje a přijímače signálu.

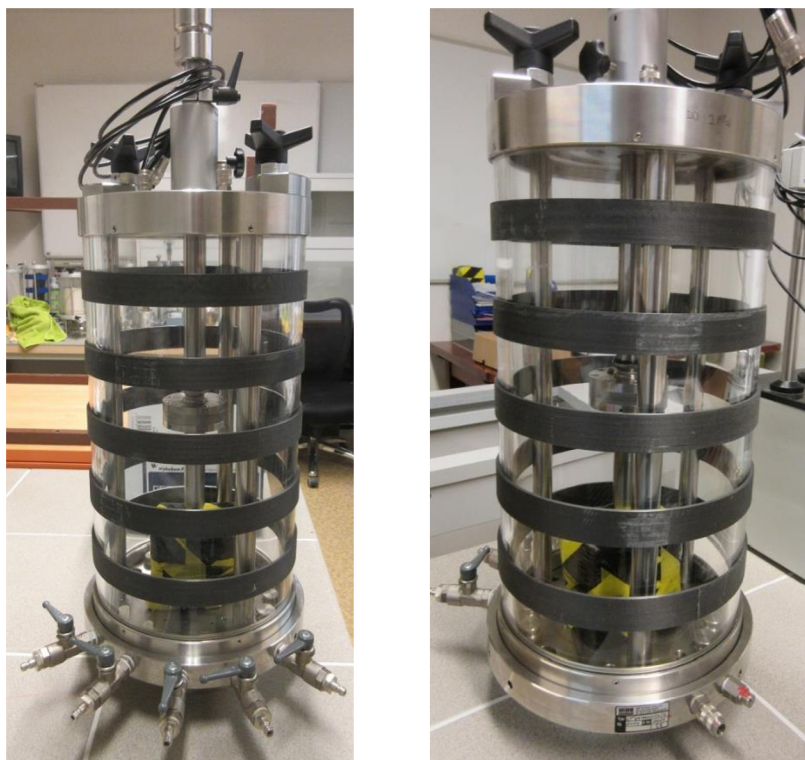
4 VLASTNÍ MĚŘENÍ

4.1 Popis laboratorního vybavení

Laboratorní vybavení pro měření tuhosti zeminy pomocí bender elementů se skládá ze dvou hlavních částí. První je triaxiální komora s osazeným vzorkem napojená na pumpy a druhou částí jsou bender elementy a jejich ovládací prvky.

4.1.1 Triaxiální komora

Triaxiální komora je tvořena dvěma podstavami, tyčemi podpírajícími horní podstavu a snímatelným skleněným pláštěm. Po uzavření komory skleněným pláštěm je triaxiální komora vodotěsná a je možné uvnitř po naplnění vodou zvyšovat tlak a zatěžovat tak vzorek zeminy. Použitá triaxiální komora je zobrazena na obr. 4-1.



Obr. 4-1 Pohledy na uzavřenou triaxiální komoru. Na těchto fotografiích se uvnitř komory nenachází vzorek ani podstavy vzorku s bender elementy. Na levé straně je pohled na přední stranu, vpravo je pohled na zadní stranu.

Horní podstavou komory prochází zatěžovací tyč, která umožňuje axiálně zatěžovat vzorek uvnitř komory. Na zatěžovací tyči je také osazený siloměr, který může být instalovaný buď uvnitř komory mezi dvěma částmi zatěžovací tyče nebo vně komory

mezi zatěžovací tyčí a rámem hydraulického lisu vyvozujícího zatížení. Výhodou vnitřního siloměru je, že měření není na rozdíl od vnějšího siloměru ovlivněno třením mezi zatěžovací tyčí a vodotěsným průchodem skrz horní podstavu. Nevýhodou je vyšší cena vnitřního siloměru a speciální zatěžovací tyče s prostupem pro datový kabel od siloměru. V rámci této práce byla použita triaxiální komora s vnitřním siloměrem. Horní podstava komory je dále opatřena prostupy s rychlospojkami, které slouží pro odvzdušnění komory při jejím plnění vodou a při jejím vypouštění naopak pro přisávání vzduchu.

Všechny ostatní prostupy dovnitř komory jsou vedeny skrz spodní podstavu komory (viz obr. 4-1). První dva uzávěry zleva na přední straně komory jsou propojeny se spojkami uvnitř komory, ke kterým se připojují hadičky pro sycení horní podstavy vzorku. Prostřední uzávěr je propojen s dolní podstavou vzorku a slouží k jeho sycení. Dvojice uzávěrů vpravo ústí dovnitř komory a slouží tak k plnění a vypouštění komory a k řízení tlaku uvnitř komory. Na zadní straně podstavy se nachází rychlospojka propojená se spodní podstavou vzorku, která se osazuje měřičem pórového tlaku. Na zadní straně je ještě jeden otvor, který je permanentně zaslepen a nevyužívá se. Spodní podstava komory je ještě ve vertikálním směru vybavena několika zaslepenými prostupy, kterými mohou být vedeny další hadice či kabely dle požadavků prováděné zkoušky. V případě zkoušky s bender elementy jsou tyto prostupy využity pro vedení datových kabelů od horního a spodního piezoelektrického snímače.

Na spodní podstavu komory je následně připevněna spodní kovová podstava stejného průměru jako má zkoušený vzorek (detail viz obr. 4-2). Kontaktní plocha mezi podstavami musí být dokonale utěsněna, protože přes ní prochází okruh sycení vzorku od středního uzávěru podstavy a nesmí docházet k průsakům vody mezi okruhem sycení vzorku a komorou, což by zkreslilo a znehodnotilo měření. Na spodní podstavě vzorku je umístěna drenážní destička, která zajišťuje, že bude vzorek sycen v celé ploše podstavy, a nikoliv pouze lokálně v místě sytícího otvoru v podstavě. Na drenážní destičce je ještě filtrační papír pro zamezení pronikání jemných částic ze vzorku do drenážní destičky. Následuje zkoušený vzorek zeminy a na jeho horní části se opět nachází postupně filtrační papír, drenážní destička a horní podstava vzorku, která je pomocí hadic sycení propojena se spojkami na spodní podstavě komory. Na horní podstavu pak prostřednictvím kulové

plochy dosedá zatěžovací tyč. Celý vzorek zeminy je obalen membránou, která vodotěsně odděluje prostor komory od vnitřního sytícího okruhu vzorku.

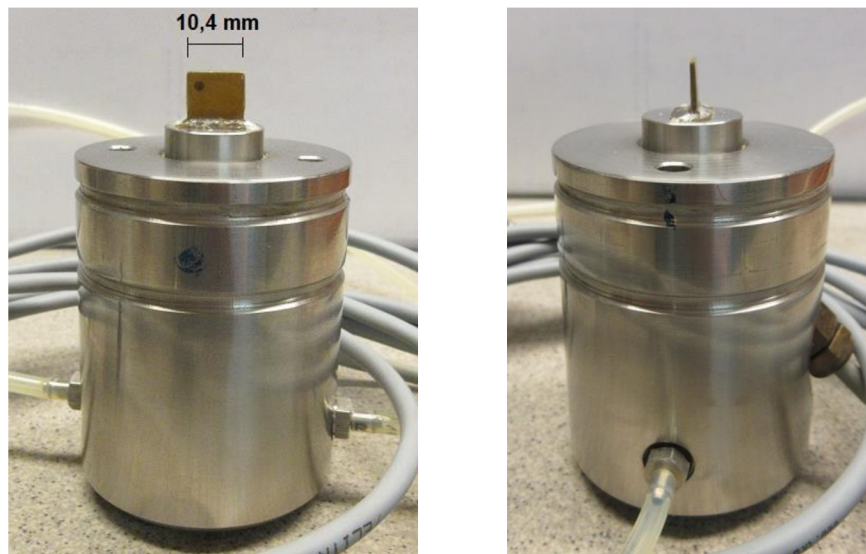


Obr. 4-2 Pohled na vzorek osazený v otevřené triaxiální komoře. Fotografie byla pořízena před vyjmutím vzorku z komory.

4.1.2 Bender elementy a jejich ovládací prvky

Bender elementy jsou připojeny k přístroji sloužícímu jako generátor signálu a osciloskop (dále jen osciloskop) a ten komunikuje s počítačem.

Použité bender elementy značky *Wille Geotechnik®* jsou přímo integrované do horní a dolní podstavy vzorku (viz obr. 4-3) a z tohoto důvodu musí být použity i speciální drenážní destičky ve tvaru mezikruží. Výška použitých bender elementů je 9,3 mm, šířka je 10,4 mm a tloušťka 1,4 mm.



Obr. 4-3 Pohledy na horní podstavu vzorku osazenou bender elementem bez drenážních destiček. Na levém pohledu dole jsou vidět vývody hadiček pro syčení vzorku. Na pravém pohledu je na pravé straně podstavy vidět vývod datového kabelu bender elementu.

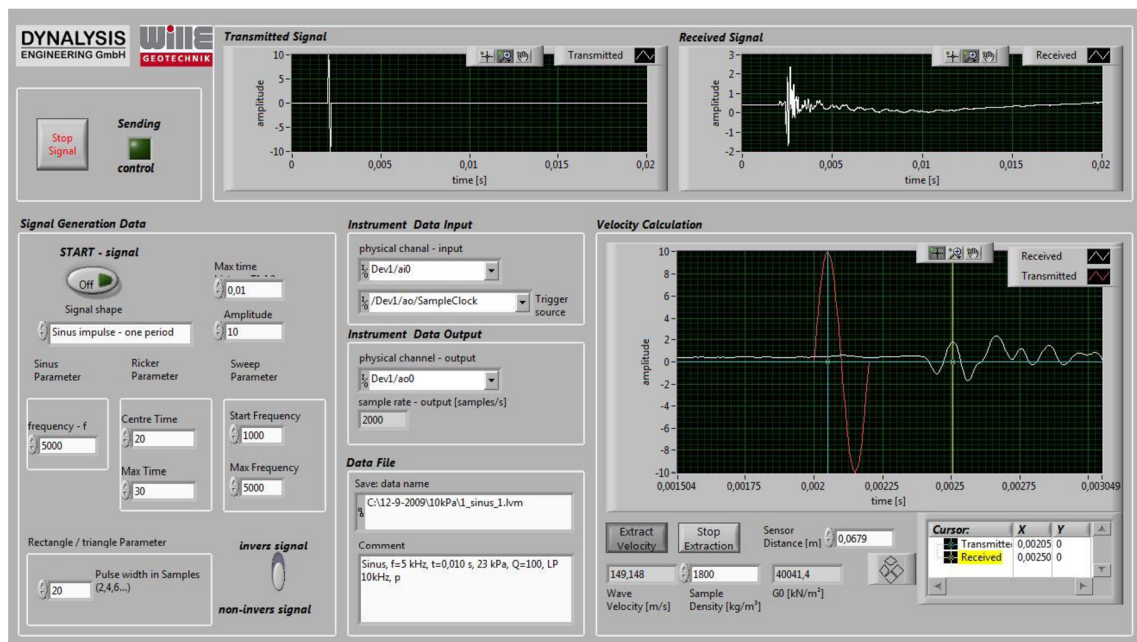
Měření probíhá tak, že podle instrukcí počítače je z osciloskopu vyslán elektrický signál (dále jen vyslaný signál) do prvního bender elementu, který jej transformuje na mechanické vlnění procházející vzorkem zeminy. To je následně druhým bender elementem převedeno opět na elektrický signál (dále jen přijatý signál), který je zpracován osciloskopem a odeslán do počítače.

Osciloskop je částečně ovládán počítačem prostřednictvím počítačového programu *Bender Data Control*, dodaného výrobcem bender elementů, a částečně pomocí mechanických ovladačů na samotném přístroji. Pomocí počítače se nastavuje frekvence a tvar vyslaného signálu. Pomocí mechanických ovladačů osciloskopu se nastavují parametry zpracování signálu přijatého druhým bender elementem.

Ovládací software

Prostředí ovládacího programu je tvořeno jedním oknem rozděleným do několika oblastí ohraničených bílou čarou (viz obr. 4-4). První oblast vlevo nahoře slouží k vytvoření souboru pro záznam dat a následně k ukončení ukládání dat do tohoto souboru. Oblast „*Signal Generation Data*“ slouží k nastavení tvaru signálu a k jeho vyslání do vzorku. To se aktivuje tlačítkem „*Off*“ a při každém vyslání se přijatá data uloží do jednoho souboru hned za předchozí měření. Jsou zde pole pro výběr tvaru signálu, jeho amplitudy, parametru „*Max time*“ a dále pole nastavení pro jednotlivé tvary signálu, jako je například

frekvence pro signál tvaru jedné vlny sinus. Tři oblasti vpravo od oblasti „Signal Generation Data“ slouží k nastavení zařízení pro vstup a výstup dat a k přidání popisků jednotlivých měření ukládaných do souboru. V oblasti nahoře jsou zobrazeny časové záznamy vyslaného a přijatého signálu, které je možné přibližovat a prohlížet. Poslední oblast vpravo dole slouží k výpočtu smykového modulu G_0 . V časovém záznamu se manuálně pomocí posuvníků nastaví okamžik na vyslané vlně a odpovídající okamžik na přijatém signálu. Program po zadání vzdálenosti bender elementů a objemové hmotnosti zeminy spočítá rychlost šíření vlnění a smykový modul G_0 .



Obr. 4-4: Prostředí programu Bender Data Control.

Další vlastností záznamu vlnění je vzorkovací frekvence, tedy frekvence ukládání dat, která je důležitá pro přesnost přímého měření doby šíření signálu z časového záznamu vlnění (viz kapitola 3.2.1). Vzorkovací frekvence má být podle doporučení výrobce minimálně dvojnásobná oproti zvolené frekvenci signálu vyslaného do vzorku. U používané verze programu je vzorkovací frekvence nastavená na 200 kHz a není možné ji měnit. Převrácenou hodnotou frekvence je perioda, která udává, po jakém časovém intervalu jsou zaznamenány aktuální hodnoty výchylky signálu. Nastavené vzorkovací frekvenci 200 kHz odpovídá perioda záznamu 0,000005 s.

Osciloskop

Prvním parametrem nastavovaným na osciloskopu (viz obr. 4-5) je zisk, který slouží k zesílení přijatého signálu, během zpracování přijatého signálu v osciloskopu, což se projeví zvětšením amplitudy vlnění při zobrazení v počítači. Dalšími parametry jsou dva frekvenční filtry, které slouží k potlačení složek přijatého signálu o frekvencích, které nemají význam pro měření a pouze by jej rušily.



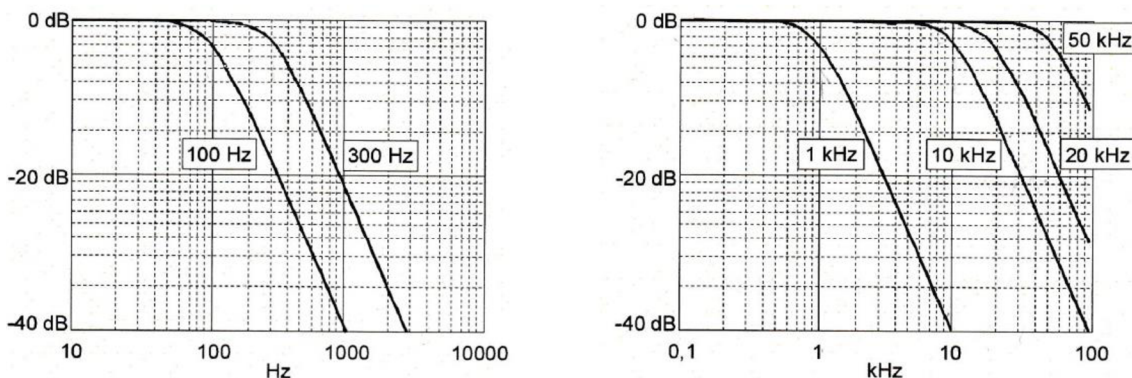
Obr. 4-5 Ovládací panel osciloskopu. Otočné ovladače zleva jsou postupně LowPass filtr, HighPass filtr, a následují konektory pro spojení s bender elementy.

Prvním frekvenčním filtrem je LowPass filtr (dále jen LP filtr), který potlačuje složky signálu o vysokých frekvencích. Ve skutečnosti dochází k nerovnoměrnému tlumení celého spektra frekvencí podle funkce závislosti snížení výkonu vlnění, vyjádřeného pomocí dB, na frekvenci vlny (viz obr. 4-6). Mechanickým ovladačem se nastavuje frekvence, jejíž výkon je během zpracování snížen o 3 dB, což se rovná přibližně 50 %. Vlny o větší frekvenci jsou tlumeny více a vlny o nižší frekvenci méně. Podle doporučení výrobce má být nastavení takové, že frekvence signálu vyslaného do vzorku bude tlumena o 10 %. To u použitého přístroje znamená, že má frekvence signálu vyslaného do vzorku odpovídat přibližně 70% frekvence tlumené o 3 dB. Frekvence nastavená na ovladači (f_{3dB}) se tedy spočítá podle vztahu:

$$f_{3dB} = \frac{f_s}{0,7}, \quad (4-1)$$

kde f_s je frekvence vyslaného signálu. U použitého přístroje je možné volit hodnoty f_{3dB} rovné 0,1 kHz, 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz a 50 kHz. Podle rovnice (4-1) lze tedy odvodit, že např. nastavení LP filtru 10 kHz odpovídá frekvenci vyslaného vlnění 7 kHz.

Druhým frekvenčním filtrem je HighPass filtr, který naopak potlačuje složky signálu o nízkých frekvencích. Tento nástroj funguje podobně jako LowPass filtr, ale frekvence nižší než nastavené, jsou tlumené více než vyšší frekvence. Během měření byl tento filtr nastavený na hodnotu „0.1 Hz ACC“, což znamená, že byl vypnutý.



Obr. 4-6 Vliv nastavení LP filtru. Grafy závislosti tlumení výkonu vlny na frekvenci vlny pro jednotlivá nastavení LP filtru. Převzato z návodu pro použití od výrobce osciloskopu, firmy Wille Geotechnik®.

4.2 Popis analyzované zeminy

Zemina použitá během zkoušek byla převzata z předchozích zkoušek a byly tedy již k dispozici její materiálové vlastnosti, které nebyly v rámci této práce měřeny.

Jde o písek eolitického původu tvořený oblými zrny, který pochází z lokality Plavecký Štvrtok na západě Slovenska. Hustota pevných částic je $\rho_s = 2642 \text{ kg/m}^3$. V rámci předchozích zkoušek byl také proveden rozbor zrnitosti, dle kterého tento písek neobsahuje jemnozrnnou frakci, tedy částice průměru menšího než 0,063 mm. Z rozboru zrnitosti byly také určeny hodnoty d_n , kde n značí hmotnostní procentuální podíl zrn průměru menšího než d_n : $d_{60} = 0,488 \text{ mm}$, $d_{50} = 0,435 \text{ mm}$, $d_{30} = 0,287 \text{ mm}$ a $d_{10} = 0,177 \text{ mm}$ (PANUŠKA, 2018).

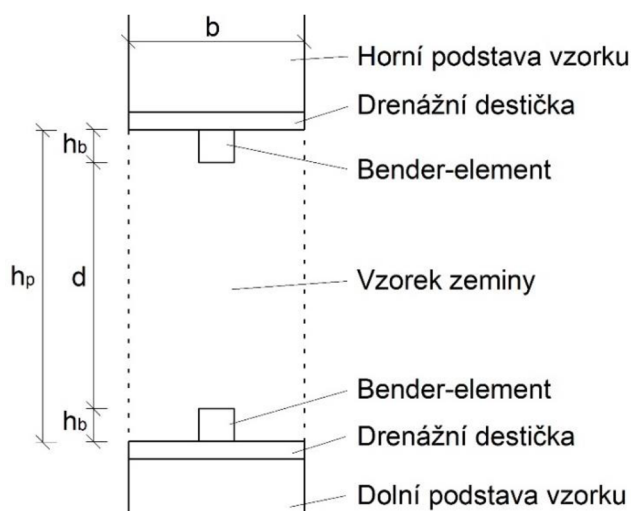
4.3 Zkušební plán

- 1) První osazení vzorku.
- 2) Seznámení se s přístrojovým vybavením.
- 3) Ověření vlivu jednotlivých parametrů vyslané vlny a ovladačů osciloskopu.
- 4) Měření smykového modulu G_0 při různých hodnotách komorového tlaku.
- 5) Aplikování aproximačních a empirických vzorců na naměřené hodnoty.

4.3.1 Charakteristiky vzorku při jednotlivých osazeních

V rámci této práce byl vzorek zeminy třikrát opakovaně osazen do triaxiální komory s bender elementy a po určité době opětovně vyjmut. V této kapitole jsou uvedeny parametry osazeného vzorku potřebné pro určení smykového modulu G_0 pomocí bender elementů v jednotlivých případech osazení. Schéma osazeného vzorku je na obr. 4-7.

Při měření byly použity podstavy průměru $b = 50$ mm a bender elementy s výškou $h_b = 9,3$ mm.



Obr. 4-7 Schéma vzorku osazeného mezi bender elementy s příslušnými rozměry.

První osazení vzorku

Během prvního osazování byl vzorek suchý a celková hmotnost vzorku je tedy totožná s hmotností vysušeného vzorku.

hmotnost zeminy s nádobou: $m_1 = 489,77$ g

hmotnost přebytečné zeminy s nádobou: $m_2 = 165,64$ g

hmotnost vzorku: $m_d = m_1 - m_2 = 489,77 - 165,64$ g = 324,13 g

vzdálenost drenážních destiček: $h_p = 88,6$ mm

vzdálenost hrotů bender elementů: $d = h_p - 2 \cdot h_b = 88,6 - 2 \cdot 9,3$ mm = 70,0 mm

objem osazeného vzorku: $V = h_p \cdot \pi \cdot b^2 / 4 = 88,6 \cdot \pi \cdot 50^2 / 4$ mm³ \approx
173 966 mm³

objemová hmotnost osazeného vzorku: $\rho_d = m_d / V = 0,32413 / 0,000173966$ kg/m³ \approx
1863 kg/m³

číslo pórovitosti: $e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d = (2642 - 1863) / 1863 \approx$ 0,42

Druhé osazení vzorku

Během druhého osazování byl vzorek suchý a celková hmotnost vzorku je tedy totožná s hmotností vysušeného vzorku.

hmotnost zeminy s nádobou:	$m_1 = 349,12 \text{ g}$
hmotnost zbylé zeminy s nádobou:	$m_2 = 31,40 \text{ g}$
hmotnost vzorku:	$m_d = m_1 - m_2 = 349,12 - 31,40 \text{ g} = 317,72 \text{ g}$
vzdálenost drenážních destiček:	$h_p = 86,6 \text{ mm}$
vzdálenost hrotů bender elementů:	$d = h_p - 2 \cdot h_b = 86,6 - 2 \cdot 9,3 \text{ mm} = \underline{68,0 \text{ mm}}$
objem osazeného vzorku:	$V = h_p \cdot \pi \cdot b^2 / 4 = 86,6 \cdot \pi \cdot 50^2 / 4 \text{ mm}^3 \approx$ $170\,039 \text{ mm}^3$
objemová hmotnost osazeného vzorku:	$\rho_d = m_d / V = 0,31772 / 0,000170039 \text{ kg/m}^3 \approx$ $\underline{1868 \text{ kg/m}^3}$
číslo pórovitosti:	$e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d = (2642 - 1863) / 1863 \approx \underline{0,41}$

Třetí osazení vzorku

Při třetím osazování měl vzorek nenulovou vlhkost, která byla určena až po následném vyjmutí vzorku.

V době krátce po osazení vzorku došlo v tomto případě k jeho mírné deformaci a při jeho vyjímání po provedených měřeních byl změřen průměr vzorku v místě rozšíření $b_1 = 55,6 \text{ mm}$. Pro výpočet objemu vzorku byla použita průměrná hodnota z této hodnoty a dvou hodnot v místě podstav $b_0 = 50,0 \text{ mm}$.

Výpočet vlhkosti vzorku:

hmotnost nádoby:	$m_n = 307,38 \text{ g}$
hmotnost vlhké zeminy s nádobou:	$m_w = 635,60 \text{ g}$
hmotnost suché zeminy s nádobou:	$m_d = 618,92 \text{ g}$
vlhkost zeminy:	$w = (m_w - m_d) / (m_d - m_n) = (635,60 - 618,92) /$ $(618,92 - 307,38) = 0,0535 \Rightarrow \underline{5,35 \%}$

Výpočet parametrů zeminy pro měření tuhosti G_0 :

hmotnost zeminy s nádobou:	$m_1 = 446,21 \text{ g}$
hmotnost zbylé zeminy s nádobou:	$m_2 = 117,99 \text{ g}$
hmotnost osazené vlhké zeminy:	$m_w = m_1 - m_2 = 446,21 - 117,99 \text{ g} = 328,22 \text{ g}$
hmotnost osazené suché zeminy:	$m_d = m_w / (1+w) = 328,22 / (1+0,0535) \text{ g} =$ $311,55 \text{ g}$
střední průměr vzorku:	$b = (2*b_0 + b_1) / 3 = (2*50,0 + 55,6) / 3 \text{ mm} =$ <u>$51,9 \text{ mm}$</u>
vzdálenost drenážních destiček:	$h_p = 86,5 \text{ mm}$
vzdálenost hrotů bender elementů:	$d = h_p - 2*h_b = 86,5 - 2*9,3 \text{ mm} =$ <u>$67,9 \text{ mm}$</u>
objem osazeného vzorku:	$V = h_p * \pi * b^2 / 4 = 86,5 * \pi * 51,9^2 / 4 \text{ mm}^3 \approx$ $182\,996 \text{ mm}^3$
objemová hmotnost osazeného vzorku:	$\rho_d = m_d / V = 0,31155 / 0,000182996 \text{ kg/m}^3 \approx$ <u>1702 kg/m^3</u>
číslo pórovitosti:	$e = (\rho_s - \rho_d) / \rho_d = (2642 - 1702) / 1702 \approx$ <u>$0,55$</u>

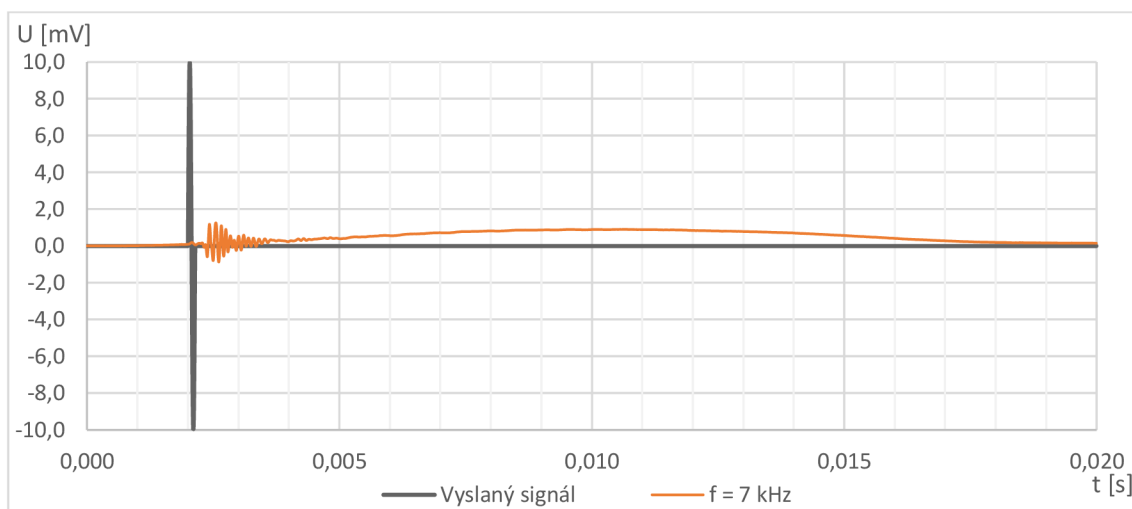
4.4 Výsledky měření

4.4.1 První osazení vzorku

Prvním úkolem bylo seznámení se s laboratorním vybavením pro triaxiální zkoušky a osazení vzorku zeminy do triaxiální komory s bender elementy. Následně bylo nutné se seznámit s významem a funkcí jednotlivých ovládacích prvků osciloskopu a programu *Bender Data Control* za pomoci návodu od výrobce. Výstupem této části je popis laboratorního vybavení v kapitole 4.1.

Byly také provedeny první pokusy o vyslání a přijetí signálu s cílem zjistit, zda bender elementy fungují a přijatý signál má předpokládaný tvar, tedy několik po sobě následujících vln tvaru sinusoidy, které mohou mít různou amplitudu a frekvenci. U prvních naměřených přijatých signálů předpokládaného tvaru byly změřeny hodnoty smykového modulu G_0 pomocí programu *Bender Data Control*. Při zvolené frekvenci vyslaného signálu 10 kHz byla naměřena hodnota $G_0 = 57,0 \text{ MPa}$ a při frekvenci 7 kHz

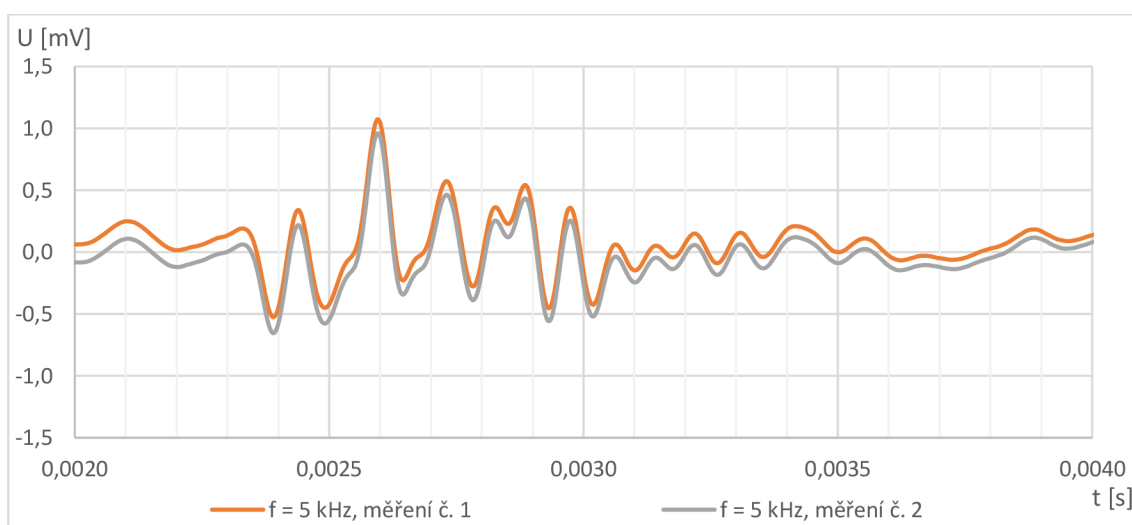
byla naměřena hodnota $G_0 = 58,5$ MPa. V grafu na obr. 4-8 je zobrazený příklad kompletního časového záznamu vyslané vlny a odpovídajícího přijatého signálu.



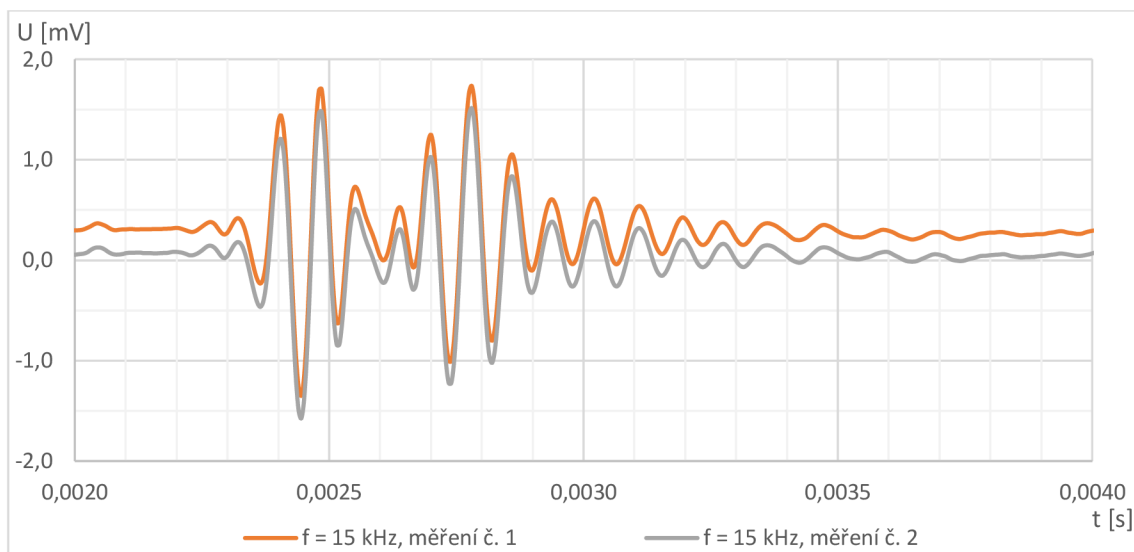
Obr. 4-8 Příklad kompletního časového záznamu signálu. Černá křivka je vyslaný signál o frekvenci 7 kHz, oranžová křivka je přijatý signál. U záznamů na dalších obrázcích je zobrazený pouze zkrácený záznam s významnými částmi.

Ověření opakovatelnosti měření

V další fázi bylo zjišťováno, zda se při opakovaném vyslání signálu do vzorku mění přijatý signál a případně i rychlost šíření vlnění. Měření bylo provedeno při více frekvencích od 0,5 kHz po 15 kHz a při různě nastaveném LP filtru. V grafech na obr. 4-9 a obr. 3-10 jsou uvedeny příklady vždy pro opakované vyslání signálu za stejných podmínek a nastavení přístrojů.



Obr. 4-9 Dvě po sobě následující vyslání signálu do vzorku o frekvenci 5 kHz a LP filtru nastaveném na 10 kHz.

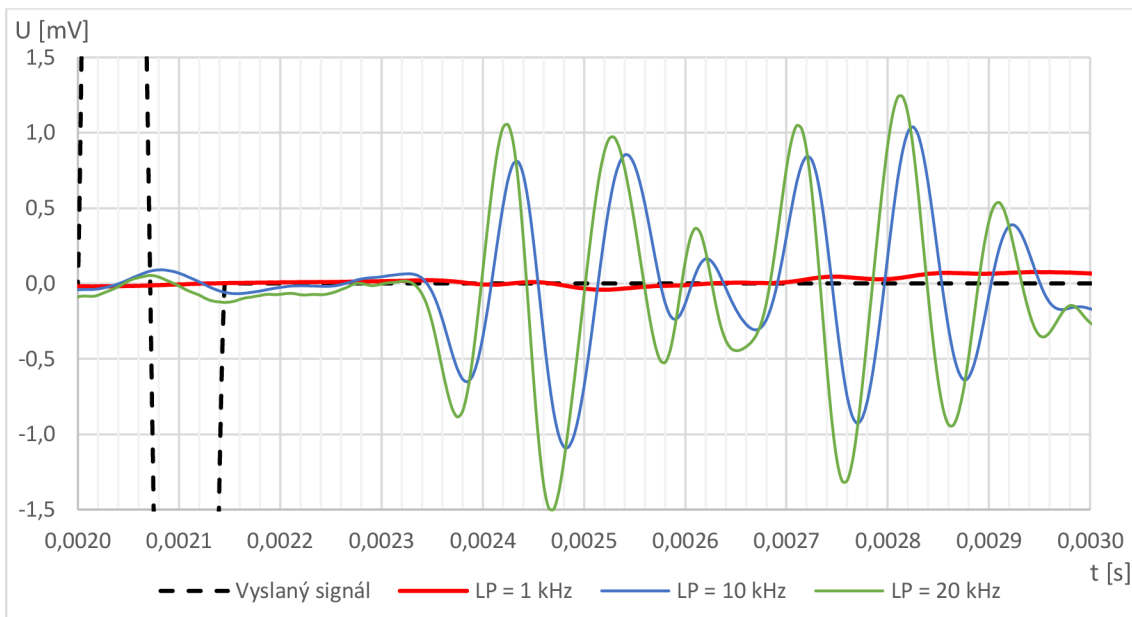


Obr. 4-10 Dvě po sobě následující vyslání signálu do vzorku o frekvenci 15 kHz a LP filtru nastaveném na 20 kHz.

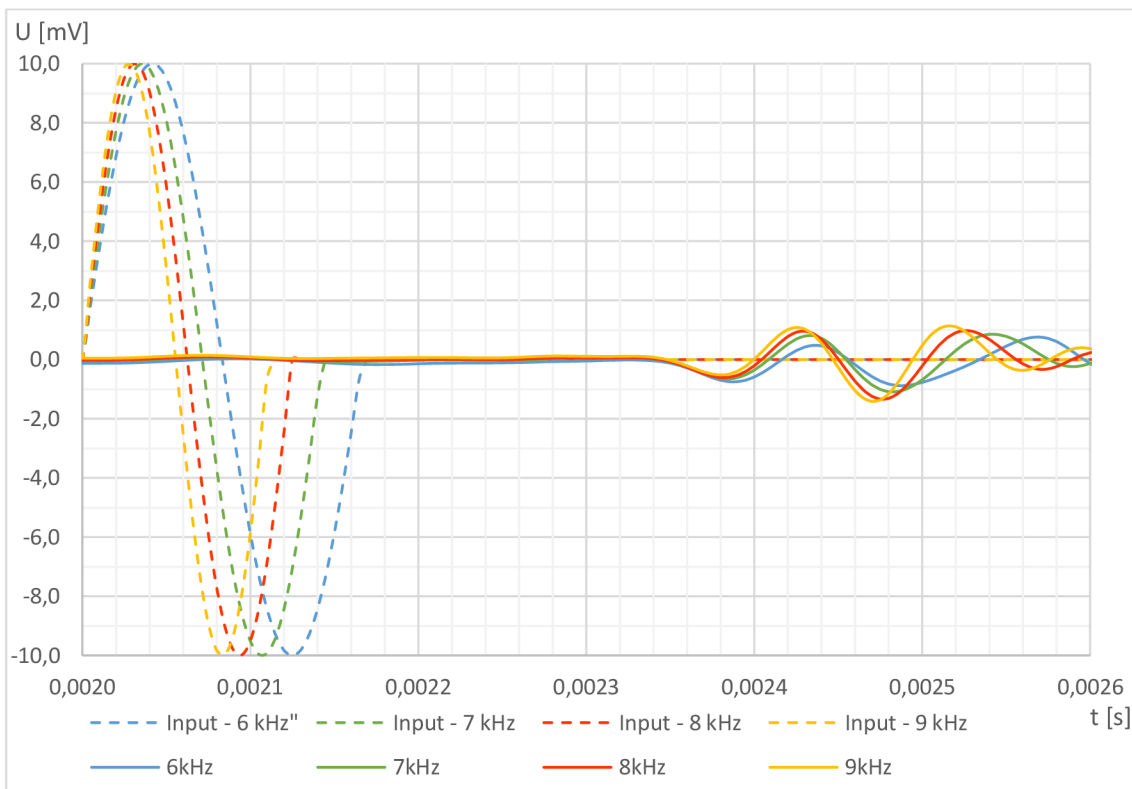
Měření za různých podmínek

Po ověření předchozích předpokladů bylo provedeno měření při různých frekvencích od 0,5 kHz do 15 kHz. Měření při jednotlivých nastavených frekvencích byla provedena opakovaně a při několika různých hodnotách LP filtru s cílem posoudit vliv zvolené frekvence a nastaveného LP filtru na výslednou tuhost zeminy G_0 .

S ohledem na možnosti programu *Bender Data Control* a skutečnost, že byl dostupný pouze na počítači v laboratoři, byl souběžně s měřením v laboratoři vytvářen nástroj na hromadné zpracování a zobrazení naměřených dat v aplikaci *MS Excel*. Posouzení vlivu nastavení LP filtru (obr. 4-11) a frekvence (obr. 4-12) na smykovou tuhost zeminy G_0 bylo prozatím posouzeno pouze vizuálně zobrazením více přijatých signálů v jednom grafu a numerické vyhodnocení dat naměřených v této fázi bylo provedeno až společně s dalšími naměřenými daty.

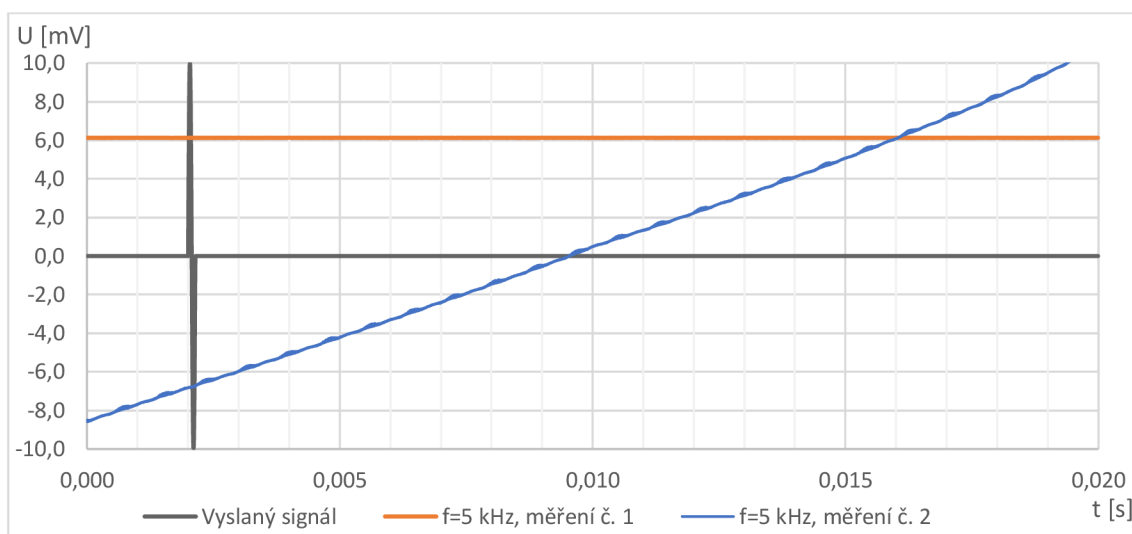


Obr. 4-11 Porovnání přijatých signálů pro různě nastavený LP filtr. Frekvence vyslaného signálu je 7 kHz. Černá čárkovaná křivka je vyslaný signál s amplitudou 10 mV, barevné křivky jsou přijaté signály při různých hodnotách LP filtru.



Obr. 4-12 Vizuální porovnání záznamů o několika různých frekvencích. Plné křivky jsou přijaté signály a čárkované křivky odpovídající barvy jsou příslušné vyslané signály.

Po naměření hodnot byl vzorek ponechán v triaxiální komoře při nízkém přetlaku 10 kPa. Při dalším pokusu o vyslání signálu do vzorku po 3 týdnech však v časovém záznamu přijatého vlnění nebyl patrný odpovídající signál tvaru sinusoidy a při opakovaném vyslání vlnění do vzorku se přijatý signál výrazně měnil (viz obr. 4-13). Byly provedeny pokusy se změnami frekvence vlnění, nastavením LP filtru, zvýšením komorového tlaku v triaxiální komoře a přenastavením dalších ovladačů osciloskopu, ale nic nevedlo k naměření signálu příslušného tvaru. Následně byla triaxiální komora rozebrána, vzorek zeminy byl vyjmut a opět osazen do triaxiální komory.



Obr. 4-13 Příklady přijatých vlnění bez odpovídajícího signálu při prvním osazení vzorku. Černá křivka je vyslaný signál o frekvenci 5 kHz, barevné křivky jsou přijaté signály při různých opakovaných vysláních signálu do vzorku. Obě přijatá vlnění vykazují při přiblížení grafu fluktuace, ale bez náznaku tvaru odpovídajícího vyslanému signálu.

4.4.2 První osazení vzorku – diskuse

V případě programu *Bender Data Control* se pomocí posuvníku ručně nastavují body časového záznamu uvažované pro výpočet doby šíření signálu a v případě přesného označení těchto bodů na záznamu vyslaného a přijatého signálu je nutné zobrazení zdlouhavě přibližovat. Z toho důvodu byla naměřená data uložena a byl vytvářen nástroj v aplikaci *MS Excel* pro hromadné zpracování naměřených dat, který automaticky v časovém záznamu signálů vyhledá odpovídající body. S výjimkou prvních pokusů o měření hodnoty smykového modulu G_0 byla tedy naměřená data prozatím posouzena pouze vizuálně po zobrazení záznamů v jednom grafu.

Protože šlo o první pokus o měření, tak komorový tlak v okolí vzorku nebyl prozatím udržován počítačem na přesné hodnotě a po dosažení hodnoty 20 kPa mohl mírně poklesnout. První naměřené hodnoty smykového modulu G_0 , které byly vyhodnoceny pomocí programu *Bender Data Control*, byly porovnány s predikcí podle rovnice (2-13). Při konstantním čísle pórovitosti $e = 0,42$ vychází pro hodnoty komorového tlaku 10 kPa až 20 kPa smykový modul $G_0 = 48$ MPa až 67 MPa. Bylo tedy konstatováno, že naměřené hodnoty $G_0 = 57,0$ MPa a $G_0 = 58,5$ MPa přibližně odpovídají predikci dle rovnice (2-13).

Z grafů na obr. 4-9 a obr. 4-10 je patrné, že při opakovaném vyslání vlnění do vzorku za stejných podmínek a nastavení přístrojů zůstává časový průběh přijatého signálu téměř neměnný. Dochází pouze k tomu, že se zaznamenaný signál posouvá ve směru svislé osy. Protože frekvence vyslaného vlnění, a tedy i okamžik vrcholu vyslané vlny zůstávají stejné a ve směru časové osy se neposouvá ani okamžik přijetí signálu, tak zůstává doba šíření signálu i z ní počítaný smykový modul G_0 konstantní.

Změna nastavení LP filtru způsobuje v souladu s návodem výrobce zařízení časový posun zpracovaného signálu. Z porovnání v grafu na obr. 4-11 je zřejmé, že s rostoucím LP filtrem dochází k posunu zobrazeného přijatého signálu na časové ose blíže vyslanému signálu, což při vyhodnocení vede ke zkrácení doby šíření signálu, a tedy i ke zvýšení smykového modulu G_0 . V návodu výrobce zařízení se nachází doporučení pro nastavení LP filtru podle zvolené frekvence vyslaného signálu (viz rovnice 4-1), podle kterého má být pro frekvenci vyslaného signálu 7 kHz, zobrazené v grafu na obr. 4-11, použito nastavení LP filtru 10 kHz.

Vliv frekvence byl prozatím posouzen pouze vizuálně. Při porovnání záznamů při různých frekvencích vyslaného signálu je zřejmé, že s rostoucí frekvencí se vrchol vyslaného signálu posouvá na časové ose doleva, ale zároveň se posouvá v čase doleva i vrchol přijatého signálu. Oba body, z nichž se měří doba šíření vlnění ve vzorku zeminy, se posouvají stejným směrem a tato skutečnost tedy nevylučuje předpoklad z kapitoly 3.2.2, podle kterého smykový modul nezávisí na frekvenci vyslaného vlnění. Přesné numerické vyhodnocení ale bude provedeno až později po vytvoření nástroje v *MS Excel*.

4.4.3 Druhé osazení vzorku

Po druhém osazení vzorku bylo nejprve ověřeno správné fungování zařízení vysláním vlnění do vzorku a následném přijetí signálu odpovídajícího tvaru. Následně bylo poprvé provedeno měření při zvýšeném komorovém tlaku, a sice při 10 kPa, 50 kPa a 75 kPa. Měření při jednotlivých velikostech komorového tlaku byla zároveň provedena při více frekvencích vyslaného signálu.

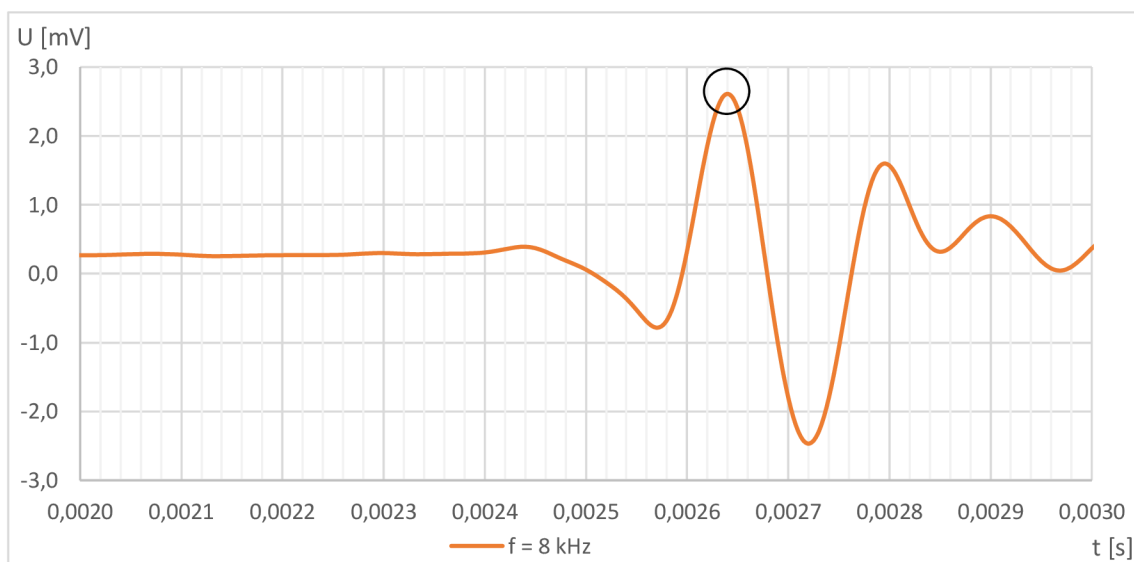
V tabulkách tab. 4-1 až tab. 4-3 jsou vypsány výsledky měření pro jednotlivé frekvence vyslaného signálu při LP filtru 10 kPa a za tabulkami následují grafy na obr. 4-14 až obr. 4-16 s příklady přijatého signálu pro jednotlivé komorové tlaky a s vyznačenými body přijatého signálu uvažovanými pro výpočet doby šíření signálu. Pro výpočet rychlosti šíření signálu bylo použito přímé měření doby šíření signálu z časového záznamu metodou „*Peak to peak*“ spočívající v odečtení časového rozdílu mezi vrcholem odeslané vlny a prvním výrazným vrcholem přijatého vlnění (viz kapitola 3.2.1). V prvním sloupci tabulky je vždy zvolená frekvence vyslaného signálu, v druhém je odečtená doba šíření signálu, ve třetím je rychlost šíření signálu a v posledním je smyková tuhost zeminy G_0 vypočítaná podle rovnice (3-1) s použitím objemové hmotnosti vzorku (viz kapitola 4.3.1).

V případě komorového tlaku 50 kPa se u frekvencí vyslaného signálu 1 kHz a 2 kHz nepodařilo jednoznačně určit první výrazný vrchol.

Vzhledem k tomu, že šlo o první pokus o měření při různých komorových tlacích, tak prozatím nebylo v případě komorového tlaku 75 kPa provedeno měření při všech frekvencích vyslaného vlnění, jako u nižších hodnot komorového tlaku, ale pouze u několika vybraných (viz tab. 4-3).

Tab. 4-1 Měření tuhosti zeminy G_0 při komorovém tlaku 10 kPa a LP filtru nastaveném na 10 kPa.

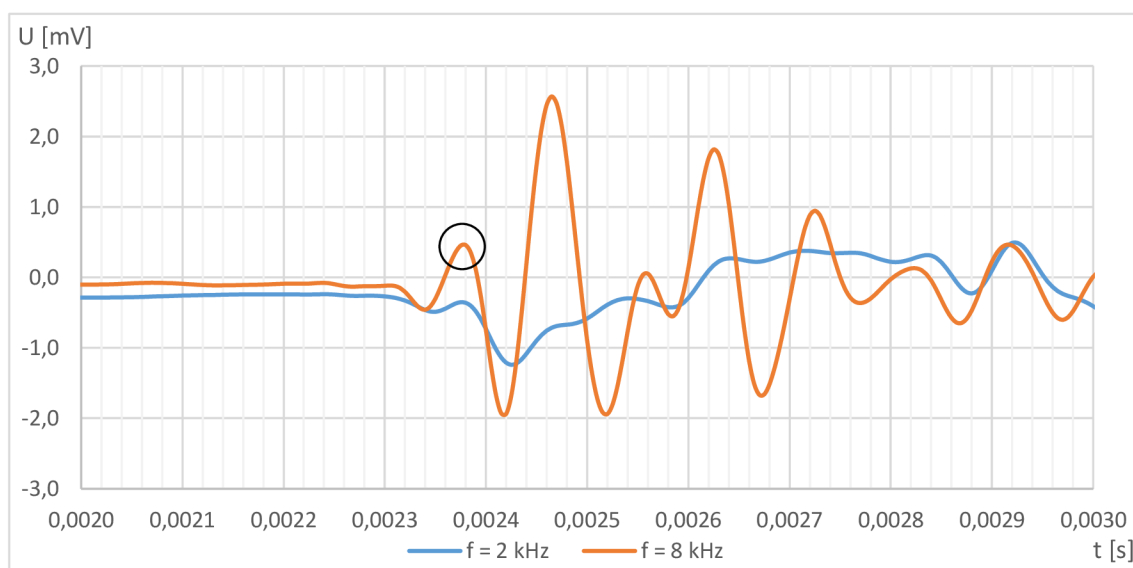
f [kHz]	Δt [s]	v [m/s]	G_0 [MPa]
1	0,000425	160,0	47,834
2	0,000575	118,3	26,132
3	0,000615	110,6	22,844
4	0,000625	108,8	22,118
5	0,000620	109,7	22,477
6	0,000615	110,6	22,844
7	0,000610	111,5	23,220
8	0,000610	111,5	23,220
9	0,000605	112,4	23,605
10	0,000605	112,4	23,605
11	0,000600	113,3	24,000
12	0,000605	112,4	23,605
13	0,000600	113,3	24,000
14	0,000600	113,3	24,000
15	0,000600	113,3	24,000
16	0,000600	113,3	24,000
17	0,000595	114,3	24,405
18	0,000595	114,3	24,405



Obr. 4-14 Přijatý signál při komorovém tlaku 10 kPa a frekvenci vyslaného signálu 8 kHz. Kroužkem je označen vrchol uvažovaný pro výpočet doby šíření vlnění.

Tab. 4-2 Měření tuhosti zeminy G_0 při komorovém tlaku 50 kPa a LP filtru nastaveném na 10 kPa.

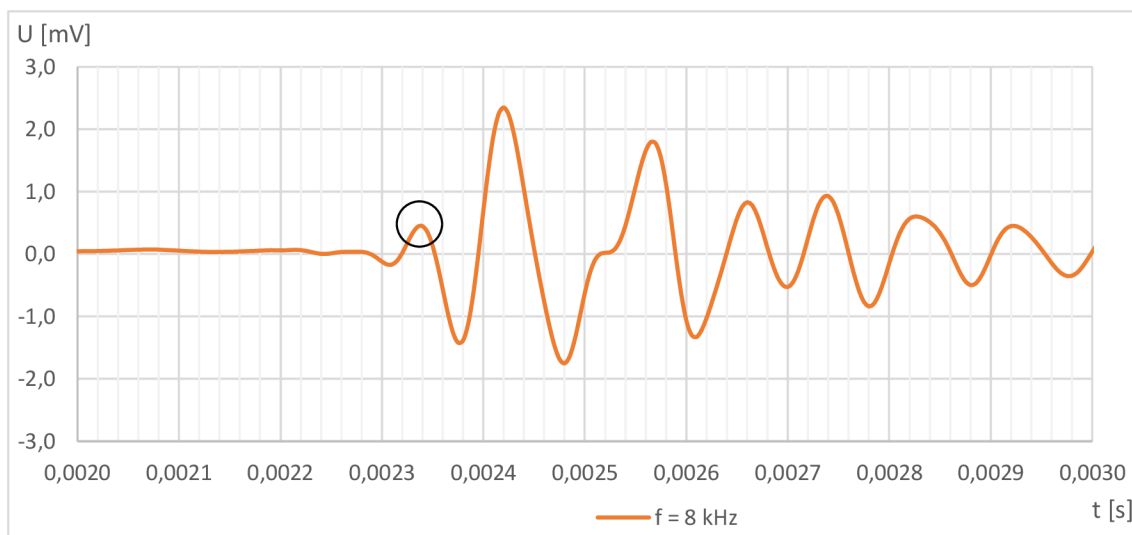
f [kHz]	Δt [s]	v [m/s]	G_0 [MPa]
1	-	-	-
2	-	-	-
3	0,000295	230,5	99,282
4	0,000320	212,5	84,375
5	0,000325	209,2	81,799
6	0,000340	200,0	74,741
7	0,000340	200,0	74,741
8	0,000350	194,3	70,531
9	0,000345	197,1	72,590
10	0,000350	194,3	70,531
11	0,000345	197,1	72,590
12	0,000350	194,3	70,531
13	0,000350	194,3	70,531
14	0,000350	194,3	70,531
15	0,000355	191,5	68,558
16	0,000350	194,3	70,531
17	0,000350	194,3	70,531



Obr. 4-15 Přijatý signál při komorovém tlaku 50 kPa a frekvenci vyslaného signálu 8 kHz (oranžová křivka). Kroužkem je označen vrchol uvažovaný pro výpočet doby šíření vlnění. Modrá křivka představuje příklad přijatého signálu odpovídajícího vyslanému signálu frekvence 2 kHz bez výrazného vrcholu, který by odpovídal okamžiku přijetí vlny.

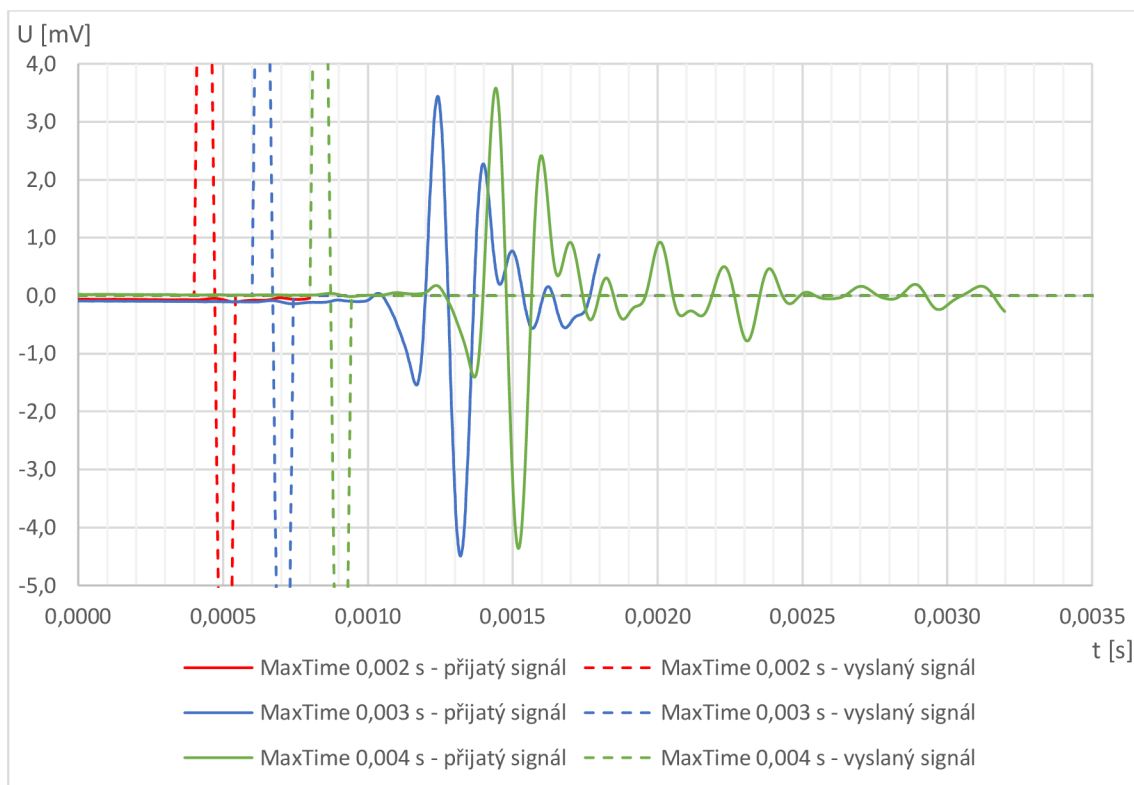
Tab. 4-3 Měření tuhosti zeminy G_0 při komorovém tlaku 75 kPa a LP filtru nastaveném na 10 kPa.

f [kHz]	Δt [s]	v [m/s]	G_0 [MPa]
5	0,000290	234,5	102,735
6	0,000300	226,7	96,000
8	0,000310	219,4	89,907
9	0,000310	219,4	89,907
10	0,000315	215,9	87,075



Obr. 4-16 Přijatý signál při komorovém tlaku 75 kPa a frekvenci vyslaného signálu 8 kHz. Kroužkem je označen vrchol uvažovaný pro výpočet doby šíření vlnění.

Během druhého osazení vzorku bylo také provedeno měření při různých hodnotách parametru „Max time“ nastavovaného v aplikaci *Bender Data Control* a to při několika různých frekvencích vyslaného signálu, protože vliv tohoto parametru při zobrazení přijatého signálu v této aplikaci se zdálo být matoucí. Na obr. 4-17 jsou vykresleny příklady měření při třech různých hodnotách parametru „Max time“ při frekvenci vyslaného signálu 7 kHz. Kompletní výsledky měření při hodnotách parametru „Max time“ od 0,002 s do 0,01 s jsou pro frekvenci vyslaného signálu 7 kHz v tab. 4-4 a pro frekvenci vyslaného signálu 11 kHz v tab. 4-5.



Obr. 4-17 Příklady měření při různých hodnotách parametru „Max time“. Frekvence vyslaného signálu byla vždy 7 kHz, amplituda vyslaného signálu byla 10 mV.

Tab. 4-4 Vliv parametru "Max time" při frekvenci vyslaného signálu 7 kHz.

Max time [s]	Δt [s]	v [m/s]	G_0 [MPa]
0,002	0,000261	260,5	126,833
0,003	0,000605	112,4	23,605
0,004	0,000606	112,2	23,527
0,005	0,000608	111,8	23,373
0,006	0,000606	112,2	23,527
0,007	0,000609	111,7	23,296
0,008	0,000608	111,8	23,373
0,009	0,000607	112,0	23,450
0,010	0,000610	111,5	23,220

Tab. 4-5 Vliv parametru "Max time" při frekvenci vyslaného signálu 11 kHz.

Max time [s]	Δt [s]	v [m/s]	G_0 [MPa]
0,002	0,000261	260,5	126,833
0,003	0,000595	114,3	24,405
0,003	0,000595	114,3	24,405
0,004	0,000596	114,1	24,323
0,005	0,000597	113,9	24,242
0,006	0,000597	113,9	24,242
0,007	0,000599	113,5	24,080
0,008	0,000596	114,1	24,323
0,009	0,000599	113,5	24,080
0,010	0,000600	113,3	24,000

Po ukončení měření na podruhé osazeném vzorku byl v triaxiální komoře ponechán komorový tlak 11 kPa a měření v laboratoři mělo pokračovat po několika týdnech.

Další pokus o měření byl proveden po 5 týdnech, ale opakovala se situace z prvního osazení vzorku a v časovém záznamu přijatého signálu nebylo možné identifikovat žádné úseky odpovídající vyslanému vlnění. Byly provedeny pokusy se zvýšením komorového tlaku a se změnami frekvence vyslaného signálu, LP filtru, zisku a bylo také provedeno nasycení vzorku vodou, ale nikdy nebyl přijat odpovídající signál. Vzorek byl tedy vyjmut z triaxiální komory a následně byl znovu osazen.

4.4.4 Druhé osazení vzorku – diskuse

V tab. 4-1 je možné pozorovat postupné ustalování hodnoty smykového modulu G_0 s rostoucí frekvencí vyslaného signálu. Nejpozději od frekvence 9 kHz zůstává doba šíření signálu téměř konstantní s výjimkou některých frekvencí, při kterých se doba šíření signálu liší o hodnotu jedné periody záznamu měření. Tato odchylka může být způsobena zkreslením během ukládání dat, protože například místo skutečného vrcholu přijaté nebo vyslané vlny mohl být zaznamenán bod ležící o část periody záznamu před nebo za skutečným vrcholem a informace o přesné poloze vrcholu zaznamenaná nebyla. Hodnoty smykového modulu G_0 se již od frekvence vyslaného signálu 3 kHz lišily pouze o jednotky MPa v porovnání s ustálenou hodnotou.

V případě malých frekvencí vyslaného signálu, v tomto případě menších než 3 kHz, je však obtížné identifikovat v přijatém signálu výrazný vrchol odpovídající vyslanému signálu a při měření za komorového tlaku 50 kPa se odpovídající bod přijetí signálu nepodařilo určit.

V tab. 4-2 je patrný stejný trend jako v tab. 4-1 a přibližně od frekvence 8 kHz výše zůstává smykový modul G_0 téměř konstantní s výjimkou několika frekvencí, při kterých se liší doba šíření signálu o hodnotu jedné periody záznamu měření. Zároveň se již od frekvence vyslaného signálu 6 kHz vypočítaná smyková pevnost liší pouze o jednotky MPa.

V případě komorového tlaku 75 kPa nebyly naměřeny hodnoty smykového modulu G_0 při tak širokém spektru frekvencí vyslaného signálu, ale přesto je v naměřených datech v tab. 4-3 patrné postupné ustálení od frekvence 8 kHz.

Z měření provedených při druhém osazení vzorku tedy vyplývá, že od určité frekvence vyslaného signálu se naměřená doba šíření signálu ustálí a smykový modul G_0 již nezávisí na zvolené frekvenci vyslaného signálu. Již při několika nižších frekvencích před ustálením doby šíření signálu se hodnota smykového modulu liší od konečné hodnoty pouze o několik jednotek MPa.

Z naměřených dat během všech tří úrovní komorového tlaku také vyplývá, že s rostoucím komorovým tlakem se zvyšuje i hodnota smykového modulu G_0 . Tato skutečnost je plně v souladu s rovnicí (2-12), která popisuje závislost mezi středním efektivním napětím a smykovým modulem G_0 . Protože byl vzorek zatěžován pouze komorovým tlakem σ_3 bez zatěžování deviátorem napětí, tak platí $\sigma_1 = \sigma_3$ a střední efektivní napětí se tedy rovná komorovému tlaku σ_3 .

Na obr. 4-17 je zřetelně vidět, že s rostoucí hodnotou parametru „*Max time*“ se zvětšuje délka přijatého signálu a zároveň se vyslaný i přijatý signál posouvají na časové ose doprava. Z kompletních výsledků v tab. 4-4 a tab. 4-5 ale vyplývá, že kromě hodnoty parametru „*Max time*“ 0,002 s, při které nebyl zaznamenán ani první výrazný vrchol přijatého signálu, se vypočtená doba šíření signálu liší pouze v jednotkách miliontin sekundy, tedy často méně, než je perioda záznamu signálu. Lze tedy říct, že pokud není

záznam při určité hodnotě parametru „*Max time*“ příliš krátký, tak tento parametr nemá vliv na výsledek měření. Měření vlivu parametru „*Max time*“ byla provedena i při jiných frekvencích vyslaného signálu, než 7 kHz a 11 kHz, ale trend výsledků byl stále stejný. Proto jsou v této práci zobrazeny pouze příklady pro vybrané frekvence. Při ostatních měřeních pomocí bender elementů byla používána přednastavená hodnota parametru „*Max time*“ 0,010 s, při které je záznam nejdelší.

4.4.5 Třetí osazení vzorku

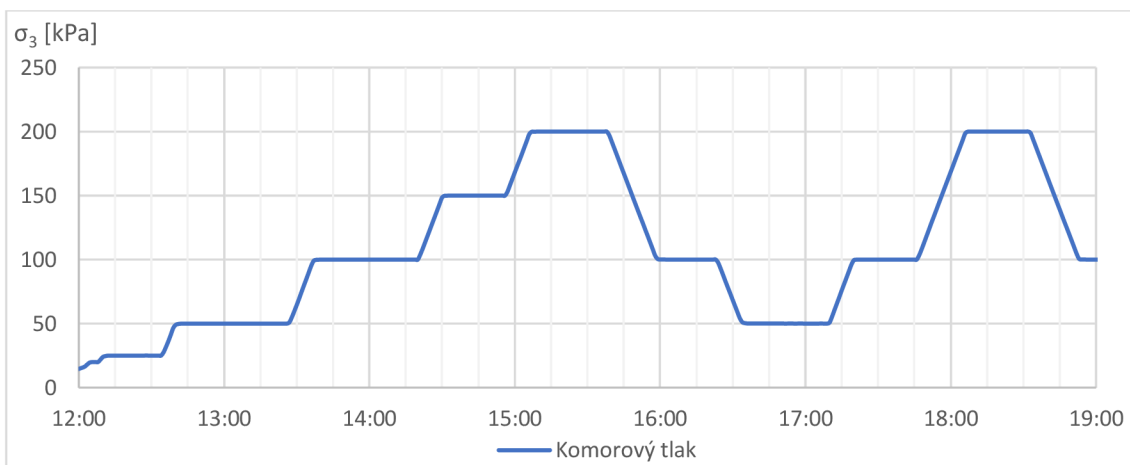
Protože byl vzorek během druhého osazení nasycen, tak před třetím osazením byla zemina vysoušena a vzorek byl následně osazený s určitou nízkou vlhkostí, která byla přesně určena až po vyjmutí vzorku a následném vysušení do ustálené hmotnosti.

Při třetím osazení vzorku bylo provedeno systematické měření smykové tuhosti zeminy při různých hodnotách komorového tlaku. Časový záznam komorového tlaku je uveden v grafu na obr. 4-18 v detailu pro první den měření.

Měření při různých hodnotách komorového tlaku

Měření probíhala tak, že po dosažení cílové hodnoty komorového tlaku bylo vysláno vlnění do vzorku vždy několikrát o frekvenci 5 kHz a 7 kHz. Každé měření bylo provedeno při nastavení LP filtru 10 kHz i 20 kHz a také při více hodnotách nastavení zisku. Měření bylo prováděno nejméně třikrát vždy po deseti minutách na každé úrovni komorového tlaku. Časový záznam přijatého signálu byl mezi jednotlivými měřeními předběžně vyhodnocován v programu *Bender Data Control* a v případě podezření na neustálení hodnoty smykového modulu bylo provedeno měření více než třikrát na jedné úrovni komorového tlaku. Po ukončení měření na jedné úrovni komorového tlaku byl pomocí počítačem řízených pump komorový tlak změněn rychlostí 5 kPa/min a po dosažení cílové hodnoty bylo provedeno první měření na další úrovni.

Měření probíhalo ve dvou fázích. V první fázi během prvního dne probíhala měření tak, jak je popsáno výše a komorový tlak byl volen v následujícím pořadí: 10 – 25 – 50 – 100 – 150 – 200 – 100 – 50 – 100 – 200 – 100 kPa. Pouze na počáteční úrovni komorového tlaku 10 kPa bylo provedeno měření pouze jednou při daných frekvencích vyslaného signálu a nastaveních LP filtru.



Obr. 4-18 Časový záznam komorového tlaku σ_3 během prvního dne měření (22.1.2020).

V druhé fázi byl po dobu 16 dnů pomocí počítače udržován komorový tlak 100 kPa a průběžně byla prováděna měření. Poslední den byl komorový tlak snížen na 50 kPa, při kterém byla provedena sada měření a následně byl komorový tlak snížen na 10 kPa, vzorek byl vyjmut z triaxiální komory a byl vysušen kvůli zjištění vlhkosti.

Hodnoty smykového modulu G_0 naměřené během první a druhé fáze jsou uvedené v následujících tabulkách. Tab. 4-6 obsahuje hodnoty naměřené při frekvenci vyslané vlny 5 kHz a LP filtru nastaveném na 10 kHz. Tab. 4-7 obsahuje hodnoty naměřené při frekvenci vyslané vlny 7 kHz a LP filtru 10 kHz.

Tab. 4-6 Měření smykového modulu G_0 při různých hodnotách komorového tlaku, frekvenci vyslaného signálu 5 kHz a LP filtru nastaveném na 10 kHz.

datum	čas	σ_3 [kPa]	Δt [s]	v [m/s]	G_0 [MPa]
22.01.2020	11:55	10	0,000600	113,2	21,8
22.01.2020	12:12	25	0,000465	146,0	36,3
22.01.2020	12:22	25	0,000460	147,6	37,1
22.01.2020	12:32	25	0,000455	149,2	37,9
22.01.2020	12:43	50	0,000375	181,1	55,8
22.01.2020	12:53	50	0,000370	183,5	57,3
22.01.2020	13:23	50	0,000370	183,5	57,3
22.01.2020	13:40	100	0,000305	222,6	84,4
22.01.2020	13:50	100	0,000300	226,3	87,2
22.01.2020	14:00	100	0,000300	226,3	87,2
22.01.2020	14:17	100	0,000300	226,3	87,2
22.01.2020	14:32	150	0,000270	251,5	107,7
22.01.2020	14:42	150	0,000275	246,9	103,8
22.01.2020	14:52	150	0,000270	251,5	107,7
22.01.2020	15:08	200	0,000250	271,6	125,6
22.01.2020	15:19	200	0,000250	271,6	125,6
22.01.2020	15:28	200	0,000245	277,1	130,8
22.01.2020	16:00	100	0,000310	219,0	81,7
22.01.2020	16:10	100	0,000305	222,6	84,4
22.01.2020	16:20	100	0,000305	222,6	84,4
22.01.2020	16:36	50	0,000390	174,1	51,6
22.01.2020	16:46	50	0,000385	176,4	53,0
22.01.2020	16:56	50	0,000380	178,7	54,4
22.01.2020	17:06	50	0,000380	178,7	54,4
22.01.2020	17:22	100	0,000310	219,0	81,7
22.01.2020	17:32	100	0,000310	219,0	81,7
22.01.2020	17:42	100	0,000305	222,6	84,4
22.01.2020	18:08	200	0,000250	271,6	125,6
22.01.2020	18:18	200	0,000250	271,6	125,6
22.01.2020	18:30	200	0,000245	277,1	130,8
23.01.2020	09:14	100	0,000295	230,2	90,2
27.01.2020	14:24	100	0,000295	230,2	90,2
30.01.2020	09:21	100	0,000290	234,1	93,3
03.02.2020	17:15	100	0,000285	238,2	96,6
07.02.2020	09:13	100	0,000285	238,2	96,6
07.02.2020	10:23	50	0,000345	196,8	65,9
07.02.2020	10:41	50	0,000345	196,8	65,9

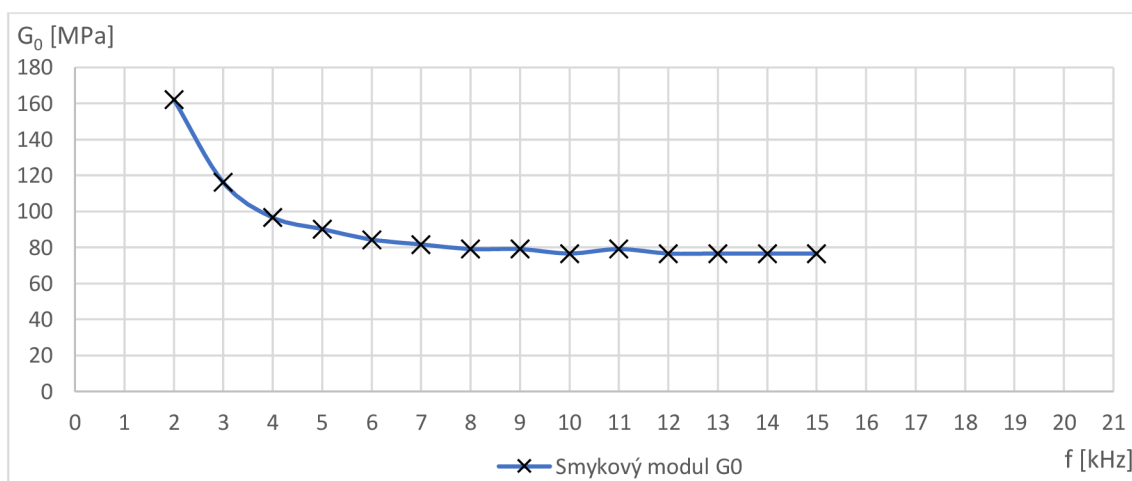
Tab. 4-7 Měření smykového modulu G_0 při různých hodnotách komorového tlaku, frekvenci vyslaného signálu 7 kHz a LP filtru nastaveném na 10 kHz.

datum	čas	σ_3 [kPa]	Δt [s]	v [m/s]	G_0 [MPa]
22.01.2020	11:55	10	0,000595	114,1	22,2
22.01.2020	12:12	25	0,000470	144,5	35,5
22.01.2020	12:22	25	0,000465	146,0	36,3
22.01.2020	12:32	25	0,000460	147,6	37,1
22.01.2020	12:43	50	0,000390	174,1	51,6
22.01.2020	12:53	50	0,000390	174,1	51,6
22.01.2020	13:03	50	0,000385	176,4	53,0
22.01.2020	13:40	100	0,000320	212,2	76,7
22.01.2020	13:50	100	0,000320	212,2	76,7
22.01.2020	14:00	100	0,000320	212,2	76,7
22.01.2020	14:17	100	0,000320	212,2	76,7
22.01.2020	14:32	150	0,000290	234,1	93,3
22.01.2020	14:42	150	0,000285	238,2	96,6
22.01.2020	14:52	150	0,000285	238,2	96,6
22.01.2020	15:08	200	0,000265	256,2	111,8
22.01.2020	15:19	200	0,000265	256,2	111,8
22.01.2020	15:28	200	0,000265	256,2	111,8
22.01.2020	16:00	100	0,000325	208,9	74,3
22.01.2020	16:10	100	0,000325	208,9	74,3
22.01.2020	16:20	100	0,000320	212,2	76,7
22.01.2020	16:36	50	0,000400	169,8	49,1
22.01.2020	16:46	50	0,000400	169,8	49,1
22.01.2020	16:56	50	0,000395	171,9	50,3
22.01.2020	17:06	50	0,000395	171,9	50,3
22.01.2020	17:22	100	0,000325	208,9	74,3
22.01.2020	17:32	100	0,000325	208,9	74,3
22.01.2020	17:42	100	0,000325	208,9	74,3
22.01.2020	18:08	200	0,000265	256,2	111,8
22.01.2020	18:18	200	0,000265	256,2	111,8
22.01.2020	18:30	200	0,000265	256,2	111,8
23.01.2020	09:14	100	0,000310	219,0	81,7
27.01.2020	14:24	100	0,000310	219,0	81,7
30.01.2020	09:21	100	0,000305	222,6	84,4
03.02.2020	17:15	100	0,000300	226,3	87,2
07.02.2020	09:13	100	0,000300	226,3	87,2
07.02.2020	10:23	50	0,000365	186,0	58,9
07.02.2020	10:41	50	0,000365	186,0	58,9

Během měření na úrovni komorového tlaku 50 kPa v časech měření 13:03, 13:13 a 13:23 byly naměřeny odpovídající přijaté signály pouze u některých nastavení LP filtru a frekvencí vlnění vyslaných do vzorku. Signály odpovídajícího tvaru byly naměřeny v čase 13:03 pro frekvenci vyslaného signálu 7 kHz a LP filtr nastavený na 10 kHz a 20 kHz, ale pouze při některých pokusech o vyslání vlnění. V čase 13:13 byly naměřeny odpovídající signály pouze pro frekvenci vyslaného signálu 7 kHz a LP filtr nastavený na 20 kHz. V čase 13:23 byl naměřen odpovídající signál pouze při frekvenci 5 kHz a LP filtru 10 kHz a při frekvenci 7 kHz a LP filtru 20 kHz. Při ostatních nastaveních nebylo možné v přijatém signálu identifikovat část odpovídající vyslané vlně.

Ověření vlivu frekvence vyslaného signálu

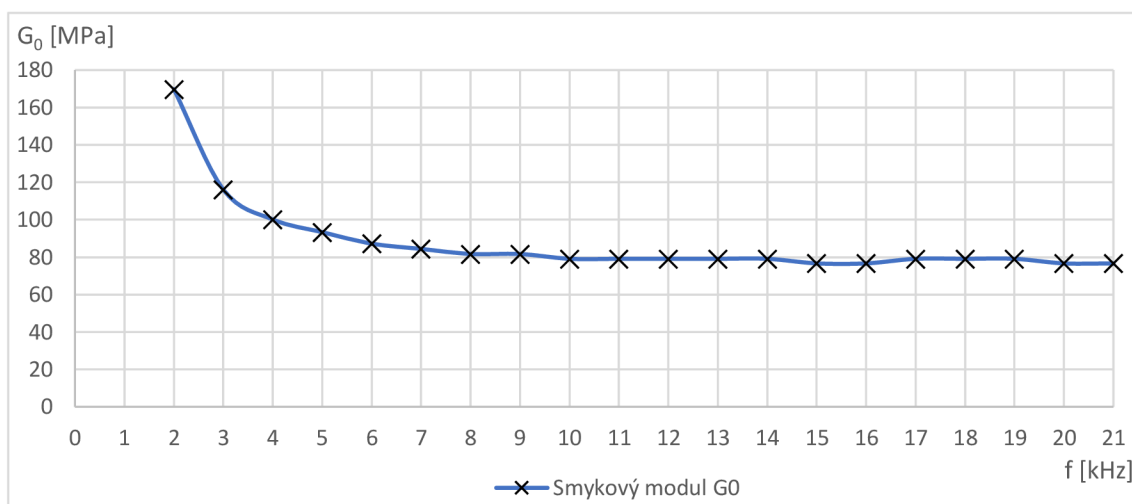
Během dlouhodobého měření na úrovni komorového tlaku 100 kPa bylo také dvakrát provedeno měření při různých frekvencích vyslaného signálu. Pomocí nástroje vytvářeného v aplikaci *MS Excel* byly vyhodnoceny doby šíření signálu pro jednotlivé frekvence, vypočteny hodnoty modulu pružnosti G_0 a následně sestaveny grafy závislosti modulu pružnosti G_0 na zvolené frekvenci vyslaného vlnění. Za grafem na obr. 4-19 sestaveném z dat naměřených dne 27.1.2020 je tab. 4-8 s vypočtenými hodnotami G_0 . Po grafu na obr. 4-20 sestaveném z dat naměřených 30.1.2020 následuje tab. 4-9 s vypočtenými hodnotami G_0 .



Obr. 4-19 Závislost smykového modulu G_0 na frekvenci vyslaného signálu ze dne 27.1.2020. LP filtr byl nastavený na 10 kHz a komorový tlak byl 100 kPa.

Tab. 4-8 Smykový modul G_0 při různých frekvencích vyslaného vlnění ze dne 27.1.2020. Komorový tlak byl 100 kPa a LP filtr 10 kHz.

f [kHz]	Δt [s]	v [m/s]	G_0 [MPa]
1	-	-	-
2	0,000220	308,6	162,2
3	0,000260	261,2	116,1
4	0,000285	238,2	96,6
5	0,000295	230,2	90,2
6	0,000305	222,6	84,4
7	0,000310	219,0	81,7
8	0,000315	215,6	79,1
9	0,000315	215,6	79,1
10	0,000320	212,2	76,7
11	0,000315	215,6	79,1
12	0,000320	212,2	76,7
13	0,000320	212,2	76,7
14	0,000320	212,2	76,7
15	0,000320	212,2	76,7

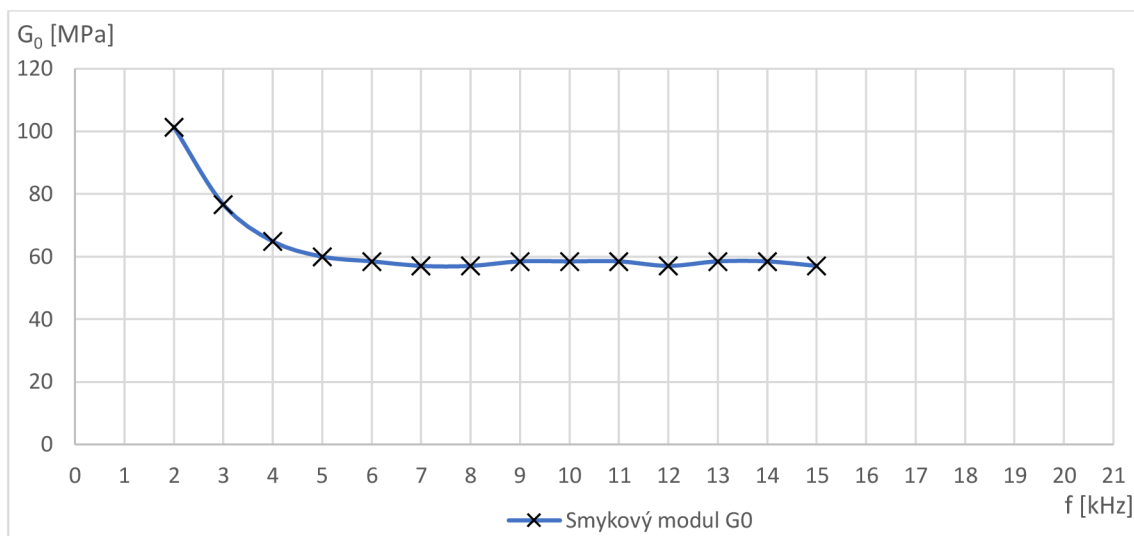


Obr. 4-20 Závislost smykového modulu G_0 na frekvenci vyslaného signálu ze dne 30.1.2020. LP filtr byl nastavený na 10 kHz a komorový tlak byl 100 kPa.

Tab. 4-9 Smykový modul G_0 při různých frekvencích vyslaného vlnění ze dne 30.1.2020. Komorový tlak byl 100 kPa a LP filtr 10 kHz.

f [kHz]	Δt [s]	v [m/s]	G_0 [MPa]
1	-	-	-
2	0,000215	315,8	169,8
3	0,000260	261,2	116,1
4	0,000280	242,5	100,1
5	0,000290	234,1	93,3
6	0,000300	226,3	87,2
7	0,000305	222,6	84,4
8	0,000310	219,0	81,7
9	0,000310	219,0	81,7
10	0,000315	215,6	79,1
11	0,000315	215,6	79,1
12	0,000315	215,6	79,1
13	0,000315	215,6	79,1
14	0,000315	215,6	79,1
15	0,000320	212,2	76,7
16	0,000320	212,2	76,7
17	0,000315	215,6	79,1
18	0,000315	215,6	79,1
19	0,000315	215,6	79,1
20	0,000320	212,2	76,7
21	0,000320	212,2	76,7

Vzhledem k tomu, že byl již vytvořený nástroj v aplikaci *MS Excel* na hromadné zpracování dat, tak byl nyní vyhodnocen i vliv frekvence vyslaného signálu naměřený při prvním osazení vzorku. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v grafu závislosti smykového modulu G_0 na zvolené frekvenci vyslaného vlnění (viz obr. 4-21) a také v tab. 4-10.



Obr. 4-21 Závislost smykového modulu G_0 na frekvenci vyslaného signálu sestavený dle dat z prvního osazení vzorku zeminy. LP filtr byl nastavený na 10 kHz a komorový tlak byl 10 kPa.

Tab. 4-10 Smykový modul G_0 při různých frekvencích vyslaného vlnění, měřeno při prvním osazení vzorku. Komorový tlak byl 10 kPa a LP filtr byl nastavený na 10 kHz.

f [kHz]	Δt [s]	v [m/s]	G [MPa]
1	-	-	-
2	0,000300	233,2	101,4
3	0,000345	202,8	76,7
4	0,000375	186,6	64,9
5	0,000390	179,4	60,0
6	0,000395	177,1	58,5
7	0,000400	174,9	57,0
8	0,000400	174,9	57,0
9	0,000395	177,1	58,5
10	0,000395	177,1	58,5
11	0,000395	177,1	58,5
12	0,000400	174,9	57,0
13	0,000395	177,1	58,5
14	0,000395	177,1	58,5
15	0,000400	174,9	57,0

4.4.6 Třetí osazení vzorku – diskuse

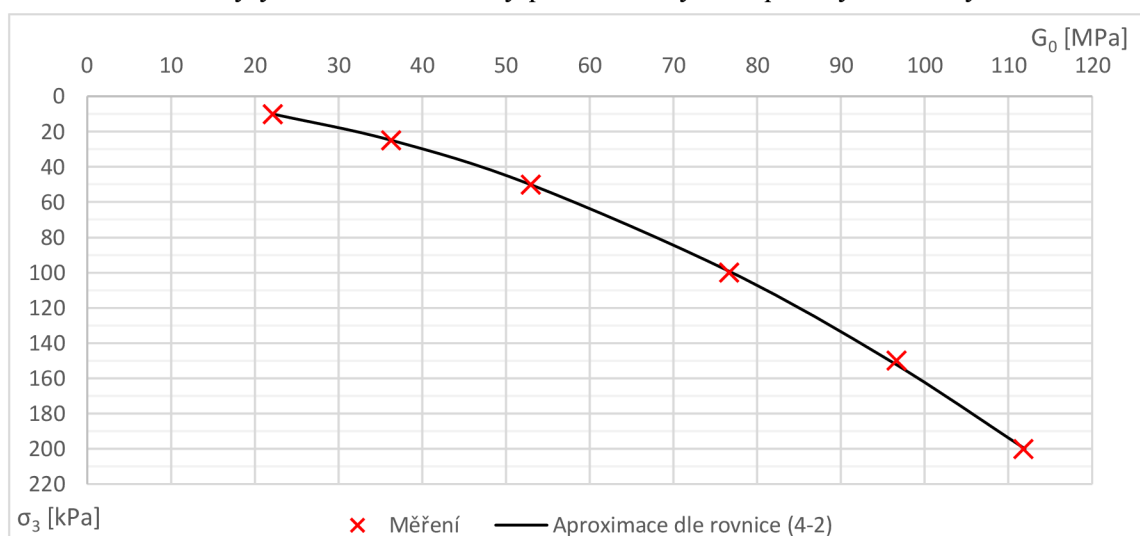
Během ověřování vlivu frekvence vyslaného signálu na smykový modul G_0 bylo u obou měření s výsledky zobrazenými v grafech na obr. 4-19 a obr. 4-20 zjištěno postupné ustálení doby šíření signálu s rostoucí frekvencí, což je v souladu se závěry v kapitole 4.4.4. Po dodatečném studiu odborné literatury byla zjištěna příčina tohoto jevu.

Důvodem zdánlivě odlišné doby šíření signálu vzorkem zeminy při malých frekvencích je takzvaný „*near-field effect*“ popsáný v kapitole 3.2.2. Po dosazení rychlosti šíření signálu vzorkem a příslušné vzdálenosti hrotů bender elementů do rovnice (3-7) a při použití konzervativní hodnoty normalizované vzdálenosti $n = 2$ získáme doporučené minimální frekvence vyslaného signálu. V případě měření provedených 27.1.2020 a 30.1.2020 je doporučená minimální frekvence vyslaného signálu 6,3 kHz.

Trend ustálení hodnoty smykového modulu G_0 při vyšších frekvencích vyslaného signálu se opakuje i v grafu na obr. 4-21 sestaveném z dat naměřených při prvním osazením vzorku. V tomto případě vychází hodnota doporučené minimální frekvence vyslaného signálu 5,2 kHz.

Měření při různých hodnotách komorového tlaku bylo provedeno při frekvencích vyslaného signálu 5 kHz a 7 kHz. S ohledem na závěry předchozích odstavců jsou v následující diskusi uvažovány pouze výsledky naměřené při frekvenci vyslaného signálu 7 kHz, protože při této frekvenci je měření již jen málo ovlivněné jevem „*near-field effect*“.

Na základě dat naměřených při různých hodnotách komorového tlaku, při frekvenci vyslaného signálu 7 kHz a LP filtru nastaveném na 10 kHz byl sestaven graf na obr. 4-22 zobrazující závislosti smykového modulu G_0 na středním efektivním napětí, které se v případě zatěžování bez deviátoru napětí v triaxiálních podmínkách rovná komorovému tlaku. Následně byly naměřené hodnoty porovnávány s empirickými vztahy.



Obr. 4-22 Závislost smykového modulu G_0 na komorovém tlaku. Červenými body jsou vyznačeny naměřené hodnoty a černá křivka představuje aproximaci pomocí rovnice (4-2).

Prvním krokem bylo určení parametru m v rovnici (2-9). Během měření při různých hodnotách komorového tlaku docházelo pouze ke změnám komorového tlaku, parametr A a číslo pórovitosti se tedy neměnily a při prvotním zatěžování je $OCR = 1$. Rovnici (2-9) lze tedy upravit na tvar:

$$G_0 = G_{0,ref} * \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)^m, \quad (4-2)$$

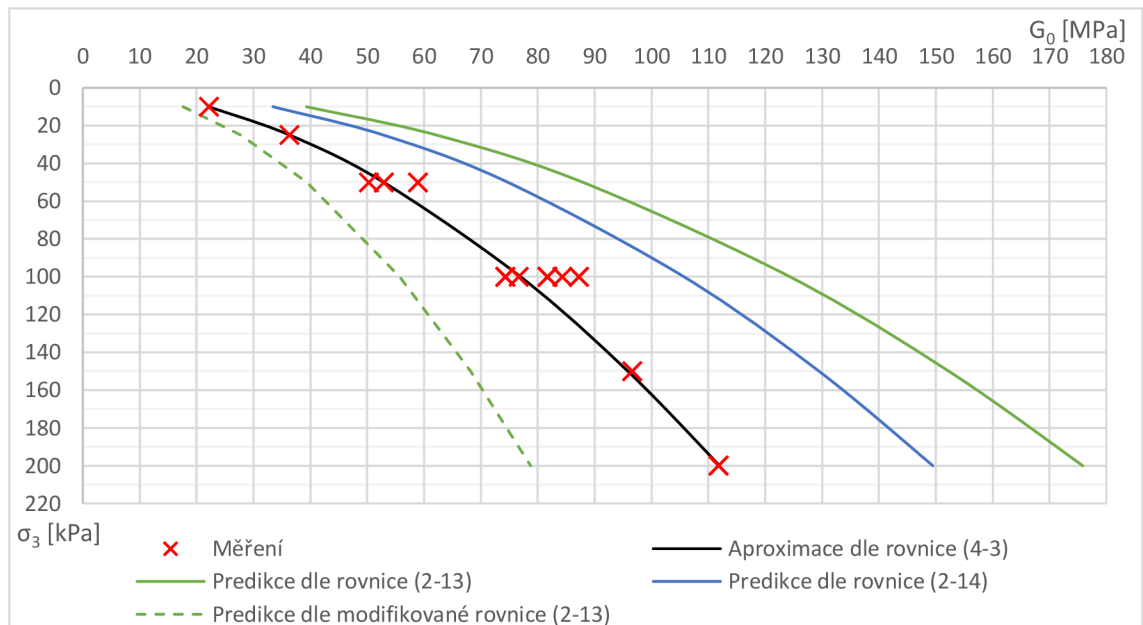
kde, G_0 je hodnota počátečního smykového modulu při středním efektivním napětí p' a $G_{0,ref}$ je hodnota počátečního smykového modulu při referenčním středním napětí p_{ref} . Jako referenční střední napětí byla použita hodnota 100 kPa a pomocí regresní analýzy v aplikaci *MS Excel* byly následně určeny hodnoty parametrů $G_{0,ref} = 76,96$ MPa a $m = 0,541$. Pro určení parametru m byla analyzována pouze data z prvotního zatěžování vzorku do hodnoty komorového tlaku 200 kPa a hodnota parametru m je plně v souladu s obvyklými hodnotami pro nesoudržné zeminy uvedenými v kapitole 2.2.2, tedy s intervalem 0,45 až 0,55. Průběh závislosti smykového modulu G_0 na komorovém tlaku podle rovnice (4-2) je zobrazen v grafu na obr. 4-22.

Následně byla provedena aproximace pomocí rovnice (2-9) v závislosti na čísle pórovitosti. Hodnota parametru m , který definuje tvar křivky závislosti smykového modulu na komorovém tlaku, byla převzata z předchozího odstavce, a protože byla aproximace prováděna na datech z prvotního zatěžování do hodnoty komorového tlaku 200 kPa, tak je $OCR = 1$. Funkce vyjadřující vliv čísla pórovitosti $f(e)$ byla zvolena podle rovnice (2-10), a protože jde o písek s oblými zrny, tak byla použita hodnota $a_H = 2,17$ (viz kapitola 2.2.1). Jediným neznámým koeficientem tedy zůstává A . Pomocí regresní analýzy v aplikaci *MS Excel* byla následně určena hodnota $A = 45,5$. Rovnice (2-9) popisující závislost smykového modulu G_0 na komorovém tlaku σ_3 má tedy konkrétní tvar:

$$G_0 = 45,5 * \frac{(2,17-e)^2}{1+e} * \left(\frac{\sigma_3}{100} \right)^{0,541} [MPa], \quad (4-3)$$

kde σ_3 se zadává v kPa.

Bylo také provedeno srovnání se vzorci pro odhad smykového modulu G_0 podle rovnic (2-13) a (2-14), které je zobrazené v grafu na obr. 4-23. Jde o obecné empirické vzorce sloužící pro základní odhad hodnoty smykového modulu G_0 pro různé zeminy pouze na základě čísla pórovitosti. V tomto případě vedly oba empirické vzorce k nadhodnocení smykového modulu oproti naměřeným hodnotám. V případě rovnice (2-13) byla navržena jednoduchá úprava náhradou parametru $a_H = 2,97$ za hodnotu $a_H = 2,17$ dle (BENZ, 2006), protože jde o písek se zaoblenými zrny a stanovení této hodnoty nevyžaduje na rozdíl od parametrů A a m dodatečné laboratorní zkoušky. Tato úprava vedla ke konzervativnímu odhadu hodnot smykového modulu G_0 a zároveň jsou tyto odhadnuté hodnoty blíže těm naměřeným.



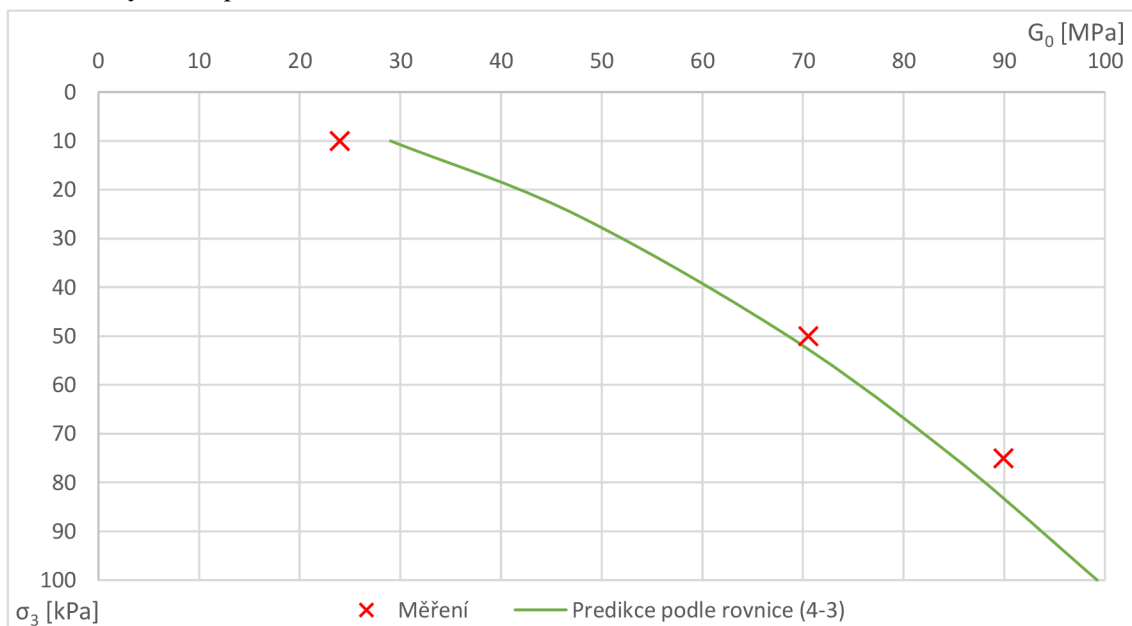
Obr. 4-23 Porovnání jednotlivých empirických vzorců vyjadřujících závislost smykového modulu G_0 na středním efektivním napětí. Červené body značí naměřené hodnoty. Černá křivka představuje rovnici (4-3), plná zelená křivka představuje rovnici (2-13), přerušovaná zelená křivka je modifikace rovnice (2-13) s $a_H = 2,17$ a modrá křivka odpovídá rovnici (2-14).

V grafu na obr. 4-23 jsou také zobrazeny hodnoty naměřené během dalšího zatěžování a odtěžování vzorku následujícím po prvotním zatížení (viz obr. 4-18). Při pohledu do tab. 4-7 je vidět, že během prvního cyklu odlehčení byly naměřené hodnoty smykového modulu G_0 při úrovních komorového tlaku 100 kPa a 50 kPa nižší než hodnoty naměřené během prvotního zatěžování. Při porovnání odpovídajících dob šíření signálu Δt se ale ukazuje, že se hodnoty liší pouze o jednu nebo dvě hodnoty periody ukládání dat a zmíněný pokles tedy může být zapříčiněn pouze ztrátou kontinuálního signálu mezi jednotlivými uloženými body záznamu. Při opětovném přitížení byly naměřeny při

komorovém tlaku 200 kPa stejné hodnoty jako při prvotním zatížení. Při posledním odlehčení na komorový tlak 100 kPa byly naměřeny hodnoty smykového modulu G_0 mírně vyšší než při prvotním zatěžování a při následných měření během 16 dnů je navíc patrný postupný nárůst naměřeného smykového modulu G_0 .

Posouzení výsledků měření z druhého osazení vzorku

Následně byla původní rovnice (2-9) včetně parametrů učených na základě měření při třetím osazení vzorku (tedy rovnice 4-3) aplikována na výsledky měření při druhém osazení vzorku. Porovnání jsou zobrazená v grafu na obr. 4-24 a také v tab. 4-11. V případě predikce byla také za použití rovnice (3-1) dopočítána z rychlosti šíření signálu odpovídající hodnota doby šíření signálu vzorkem. Predikce a měření se výrazněji odlišují při hodnotě komorového tlaku 10 kPa, ale při hodnotách komorového tlaku 50 kPa a 75 kPa se při porovnání dob šíření signálu liší predikce a měření nejvýše o hodnoty dvou period ukládání dat.



Obr. 4-24 Porovnání výsledků měření při druhém osazení vzorku s teoretickým vztahem určeným dle měření při třetím osazení vzorku. Červené body jsou naměřené hodnoty. Zelená křivka je predikce podle rovnice (4-3).

Tab. 4-11 Porovnání výsledků měření při druhém osazení vzorku s predikcí podle rovnice (4-3) určené dle měření při třetím osazení vzorku.

σ_3 [kPa]	měření		predikce	
	Δt [s]	G [MPa]	Δt [s]	G [MPa]
10	0,000600	24,0	0,000546	29,0
50	0,000350	70,5	0,000355	68,5
75	0,000310	89,9	0,000319	85,1

Nakonec byly naměřené hodnoty smykového modulu G_0 porovnány (viz tab. 4-13) s měřením, které provedl na stejné zemině Panuška (2018) na STU v Bratislavě. Během měření v této práci nebylo možné měřit deformace vzorku uvnitř triaxiální komory a není tedy známé číslo pórovitosti při jednotlivých úrovních komorového tlaku kromě počáteční hodnoty. Během třetího osazení vzorku bylo počáteční číslo pórovitosti 0,55 (viz kapitola 4.3.1). Panuška prováděl měření několikrát při počátečních číslech pórovitosti přibližně 0,60, 0,51 a 0,47 (viz tab. 4-12).

Tab. 4-12 Výsledky měření smykového modulu G_0 na totožné zemině od Panušky (2018).

σ_3 [kPa]	e [-]	G_0 [MPa]
50	0,596	64,59
100	0,593	89,05
150	0,591	110,44
200	0,590	128,84
50	0,512	91,35
100	0,509	125,34
150	0,508	153,96
200	0,506	179,75
50	0,472	81,23
100	0,469	112,80
150	0,467	146,35
200	0,467	181,87

Tab. 4-13 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami od Panušky (2018).

σ_3 [kPa]	e [-]	G_0 [MPa]	ΔG_0 [MPa]	ΔG_0 [%]
50	0,550	53,0	-11,64	-18,0
100	-	76,7	-12,40	-13,9
150	-	96,6	-13,81	-12,5
200	-	111,8	-17,07	-13,2

ΔG_0 v tab. 4-13 je rozdíl mezi měřením v této práci a hodnotami od Panušky s číslem pórovitosti přibližně 0,59. Protože číslo pórovitosti při třetím osazení vzorku bylo nižší než v případě první skupiny měření od Panušky, tak by naměřené hodnoty G_0 v této práci měly být mírně vyšší. Z porovnání je ale patrné, že jsou naopak přibližně o 12 až 17 MPa nižší než u Panušky. Tento rozdíl může být způsoben možnými odlišnostmi v postupu práce či v nastavení přístroje, jako je LP filtr. Z obr. 4-23 je také vidět, že při dlouhodobém udržování tlaku 100 kPa v triaxiální komoře se naměřené hodnoty přiblížily těm naměřeným od Panušky (2018). Nejasný je také trend vývoje hodnot smykového modulu G_0 v závislosti na čísle pórovitosti v práci (PANUŠKA, 2018), protože podle grafu na obr. 2-4 by měl s klesajícím číslem pórovitosti smykový modul G_0 růst, ale v této práci je hodnota modulu G_0 při středním čísle pórovitosti vyšší než hodnota při nejmenším čísle pórovitosti.

5 ZÁVĚR

Prvním významným výsledkem je zjištění, že při opakovaném vyslání vlnění do vzorku za stejných podmínek a nastavení přístrojů je přijatý signál téměř neměnný a opakování vyslání vlnění tedy vede ke stejné hodnotě naměřeného smykového modulu G_0 .

Další řešenou problematikou byl vliv nastavení frekvenčního filtru zvaného „LP filtr“. Podle doporučení výrobce použitých bender elementů má být nastavená hodnota LP filtru rovna zvolené frekvenci vlnění vyslaného do vzorku vydělené číslem 0,7. Při zvýšení hodnoty LP filtru dochází k posunu záznamu přijatého signálu doleva na časové ose, což vede při zachování okamžiku vyslání vlnění do vzorku ke zkrácení odečtené doby šíření vlnění, a tedy ke zvýšení vypočítané hodnoty smykového modulu G_0 . Nižší nastavení LP filtru ale vede k většímu tlumení frekvence vlnění a tedy k menší rozlišitelnosti okamžiku přijetí vlnění. Je tedy vhodné používat doporučení výrobce a v případě, že bude vypočtená hodnota uprostřed mezi možnostmi nastavení LP filtru, je vhodnější se přiklonit k nižší možné hodnotě poskytující konzervativní hodnotu smykového modulu G_0 .

Pozornost byla také věnována nastavení parametru „*Max time*“ v aplikaci *Bender Data Controll*. Ukázalo se, že tento parametr lze nastavovat v rozmezí hodnot přibližně od 0,002 s do 0,010 s a projevuje se pouze zkrácením délky záznamu přijatého vlnění a stejným posunem přijatého i vyslaného signálu podle časové osy. To znamená, že kromě případů, kdy je záznam tak krátký, že zde není okamžik přijetí vlnění, nemá tento parametr vliv na naměřenou hodnotu smykového modulu G_0 .

Významným tématem byl vliv zvolené frekvence vyslaného signálu. Ukázalo se, že s rostoucí frekvencí dochází postupně k ustálení vypočtené hodnoty smykového modulu G_0 . Při nízkých frekvencích je často obtížné určit okamžik přijetí vlnění na záznamu a naměřené hodnoty se mohou i násobně lišit od ustálené hodnoty při vyšších frekvencích. Později bylo zjištěno, že zkreslení měření při nízkých frekvencích je způsobeno jevem zvaným „*Near field effect*“ a pro jeho omezení bylo v literatuře nalezeno doporučení pro minimální hodnotu frekvence vyslaného signálu (viz kapitola 3.2.2).

V průběhu provádění zkoušek se opakovaně vyskytla situace, kdy při ponechání osazeného vzorku zeminy v triaxiální komoře po delší dobu při nízkém tlaku (jednotky kPa) nebyl po vyslání vlnění do vzorku přijat odpovídající signál a následně musel být vzorek vyjmut a znovu osazen. Při třetím osazení vzorku byl tlak v komoře udržován po dobu 16 dnů na hodnotě 100 kPa a tento problém již nenastal. Plyne z toho tedy doporučení zachovat v komoře určitou vyšší úroveň komorového tlaku.

Na závěr bylo provedeno měření závislosti smykového modulu G_0 na středním efektivním napětí, které se za daných podmínek rovnalo tlaku uvnitř triaxiální komory. Naměřené hodnoty byly aproximovány teoretickou funkcí podle rovnice (4-2) a byla určena hodnota referenčního smykového modulu $G_{0,ref} = 76,96$ MPa a hodnota exponentu $m = 0,541$. Ukázalo se, že naměřené hodnoty se pouze málo odlišují od této teoretické funkce a hodnota exponentu m je v souladu s hodnotami obvyklými pro nesoudržné zeminy. Dále byly naměřené hodnoty porovnány s predikcemi několika dalších funkcí, které však nebyly vázány na druh osazené zeminy a vykazovaly proto výrazné odchylky od naměřených hodnot. V posledním kroku byly hodnoty porovnány s měřením provedeným na stejné zemině na STU v Bratislavě a ukázalo se, že hodnoty naměřené v této práci jsou přibližně o 15% nižší než v případě hodnot naměřených v Bratislavě.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Aldebaran Group for Astrophysics, [2020]. *DOPPLERŮV JEV – KE ČTENÍ*. [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/lab/doppler/2_cteni_2.php

ARROYO, Marcos, David Muir WOOD a Paul D. GREENING, 2003. Source near-field effects and pulse tests in soil samples. *Géotechnique*. [online]. roč. 53, č. 3, s. 337-345 [cit. 2020-02-06]. ISSN 0016-8505. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.3.337>

Bentley Systems, Inc, 2019. *Plaxis 2D Connect Edition V20: Material Models Manual*. [online]. [cit. 31.5.2020]. Dostupné z: https://www.plaxis.com/?plaxis_download=2D-3-Material-Models.pdf

BENZ, Thomas, 2006. *Small strain stiffness of soils and its numerical consequences*. [online]. Stuttgart [cit. 2019-07-20]. Dizertační práce. Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik.

BENZ, Thomas, Radu SCHWAB a Pieter VERMEER, 2009. Small-strain stiffness in geotechnical analyses. *Bautechnik*. [online]. Berlín: Ernst & Sohn, roč. 86, č. S1, s. 16–27 [cit. 2019-07-20]. ISSN 1437-0999. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/bate.200910038>

BIAREZ, Jean a Pierre-Yves HICHER, 1994. *Elementary Mechanics of Soil Behaviour*. Rotterdam: Balkema. ISBN 9789054101567

BODET, Ludovic, Odile ABRAHAM a Dominique CLORENNEC, 2009. Near-offset effects on Rayleigh-wave dispersion measurements: Physical modeling. *Journal of Applied Geophysics*. [online]. roč. 68, č. 1, s. 95-103 [cit. 2020-02-11]. ISSN 0926-9851. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.012>

BRINKGREVE, Ronald B. J., M. H. KAPPERT a Paul BONNIER, 2007. *Hysteretic damping in a small-strain stiffness model*. [online]. Rhodes, Řecko: Numerical Models in Geomechanics: Proceedings of the Tenth International Symposium on Numerical Models in Geomechanics (NUMOG X), s. 737-742 [cit. 2020-06-01]. ISBN 978-0-415-44027-1. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267411874_Hysteretic_damping_in_a_small-strain_stiffness_model

CLARKE, Sam a Charles C. HIRD, 2013. Modelling Viscous Effects during and after Construction in London Clay. *Geotechnical Engineering*. [online]. roč. 44, č. 2, s. 48-54 [cit. 2020-06-01]. ISSN 0046-5828. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273888377_Modelling_Viscous_Effects_during_and_after_Construction_in_London_Clay

ConeTec. *Seismic CPTu*, [2020]. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.conetec.com/services/cone-penetration-testing/scptu>

GDS Instruments, 2020. *GDS LVDT LOCAL STRAIN TRANSDUCERS*. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.gdsinstruments.com/gds-products/gds-lvdt-local-strain-transducers>

GeoSiam Geophysical Services Co., Ltd, 2020. *MASW Survey*. [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <http://geosiamservices.com/services/ground-services/seismic-survey/masw-survey/>

GEOVision, Inc, 2016. *PS Suspension Logging*. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.geovision.com/suspension.php>

HARDIN, Bobby O., 1978. *The Nature of Stress-Strain Behavior for Soils*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. ASCE Specialty Conference.

HARDIN, Bobby O. a William L. BLACK, 1969. Closure to: Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. [online]. ASCE, roč. 95, č. 6, s. 1531-1537 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/304015201_Closure_to_Vibration_Modulus_of_Normally_Consolidated_Clay

HARDIN, Bobby O. a Vincent P. DRNEVICH, 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal of the Soil Mechanics Foundations Division*. roč. 98, č. SM7, s. 667-692.

HARDIN, Bobby O. a F. E. RICHART, 1963. Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE, roč. 89, č. SM1, s. 33-65.

JAMIOLKOWSKI, Michele, Serge LEROUEIL a D.C.F. LOPRESTI, 1991. *Theme lecture: Design parameters from theory to practice*. [online] Yokohama: GEO-COAST '91, s. 877-917 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/313474639_Theme_lecture_Design_parameters_from_theory_to_practice

LADE, Poul V., 2016. *Triaxial testing of soils*. [online]. Chichester, West Sussex, England: Wiley Blackwell, s. 335–341, [cit. 2019-04-27]. ISBN 978-1-119-10662-3. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=JJm7CwAAQBAJ&lpg=PR3&ots=W9cJvYZuMw&lr&hl=cs&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>

LEE, Jong-Sub a J. Carlos SANTAMARINA, 2005. Bender Elements: Performance and Signal Interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. [online]. ASCE, roč. 131, č. 9, s. 1063-1070 [cit. 2019-10-17]. ISSN 1943-5606. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:9(1063)

MASING, George, 1926. *Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing*. Proceedings of the 2nd International Congress of Applied Mechanics. Zürich, s. 332-335.

NGI, [2020]. *Resonant column test*. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.ngi.no/download/file/4607>

PANUŠKA, Jakub, 2018. *Elastic properties of natural sands with fines measured by bender / extender elements*. Bratislava. Dizertační práce. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Katedra geotechniky.

PETRÁNEK, Jan, [2020]. *Diagenese*. On-line Geologická encyklopedie. [online]. Brno: Česká geologická služba [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?diagenese>

PYKE, Robert, 1979. Non linear soil models for irregular cyclic loadings. *Journal Geotechnical Engineering Division*. [online]. ASCE, roč. 105, č. GT6, s. 715-726 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/246961187_Non_linear_soil_models_for_irregular_cyclic_loadings

RAMBERG, Walter a William R. OSGOOD, 1943. *Description of stress-strain curves by three parameters*. [online]. Washington D.C.: National Advisory Committee for Aeronautics. Dostupné z: <http://www.apesolutions.com/spd/public/NACA-TN902.pdf>

ROY, Narayan a Ravi S. JAKKA, 2017. Near-field effects on site characterization using MASW technique. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. [online]. č. 97, s. 289-303 [cit. 2020-02-06]. ISSN 0267-7261. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.02.011>.

SIMPSON, Brian, 1992. Retaining structures—displacement and design. Thirty-second Rankine Lecture. *Géotechnique*. [online]. roč. 42, č. 4, s. 541-576 [cit. 2020-04-17]. ISSN 0016-8505. Dostupné z: <https://doi.org/10.1680/geot.1992.42.4.541>

SNELLING, Carl a Sean REES, 2013. Bender Element Test Analysis Software Development for Laboratories. *theGeotechnica*. [online]. Banbury: Equipe Group., č. 18, [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://www.gdsinstruments.com/__assets__/pagepdf/0000-1/theGeotechnica_February_2013.pdf

Subsurface Engineering Sdn Bhd, [2020]. *Downhole Seismic*. [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/subsurfacesb/geophysics/seismic-resistivity-surveys/downhole-seismic>

TERZAGHI, Karl, Ralph B. PECK a Gholamreza MESRI, 1996. *Soil mechanics in engineering practice*. 3. vyd. [online]. New York: Wiley, s. 10-15 [cit. 2020-02-23]. ISBN 0-471-08658-4. Dostupné z: https://www.academia.edu/10099373/_Karl-Terzaghi-Ralph-B-Peck-Gholamreza-Mesri_Soil-Mechanics-in-Engineering-Practice-3rd-Edition_Engineersdaily_com_

VUCETIC, Mladen a Ricardo DOBRY, 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. [online]. ASCE, roč. 117, č. 1, s. 89-107. ISSN 1943-5606. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))

WADHWA, R. S. aj., 2009. Deciphering of Weak Zones Using Cross-hole Seismic Tomography. *Jour. Indian Geophys. Union*. [online]. roč. 13, č. 1, s. 9-16 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/255571651_Deciphering_of_Weak_Zones_Using_Cross-hole_Seismic_Tomography

WICHTMANN, Torsten, Thorsten SONNTAG a Theodor TRIANTAFYLLIDIS, 2001. Über das Erinnerungsvermögen von Sand unter zyklischer Belastung. *Bautechnik*. [online]. Berlín: Ernst & Sohn, roč. 78, č. 12, s. 852-865 [cit. 2020-04-19]. ISSN 1437-0999. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/bate.200105950>

ZAPATA-MEDINA, David Guillermo, Taesik KIM a Carlos Alberto VEGA-POSADA, 2015. *Analysis of Bender Element signals during triaxial testing*. [online]. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, č. 76, s. 107-113 [cit. 2020-02-11]. ISSN 2422-2844. Dostupné z: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a13>

7 PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

- e – číslo pórovitosti
- G_0 – počáteční smykový modul
- n – normalizovaná vzdálenost charakterizující „near-field effect“
- OCR – „over-consolidation ratio“, parametr vyjadřující stupeň překonsolidace zeminy
- PI – index plasticity
- U – výchylka vlnění vyjádřená pomocí napětí
- $\gamma_{0,7}$ – referenční smykové přetvoření charakterizující pokles smykového modulu G
- ρ – objemová hmotnost
- σ_1 – vertikální složka napětí v triaxiálních podmínkách
- σ_3 – horizontální složka napětí v triaxiálních podmínkách = komorový tlak

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Smykový modul zemin v závislosti na smykovém přetvoření	11
Obr. 2-2 Materiálové modely popisující chování zemin při malých přetvořeních	13
Obr. 2-3 Simpson's brick model.....	15
Obr. 2-4 Závislost tuhosti zemin na čísle pórovitosti	17
Obr. 2-5 Vliv indexu plasticity na křivku závislosti G_0 na smykovém přetvoření	18
Obr. 2-6 Chování zemin při symetrickém zatěžování	20
Obr. 3-1 Vzorek zeminy osazený snímači LVDT	23
Obr. 3-2 Schéma měření tuhosti zemin pomocí bender elementů	23
Obr. 3-3 Schéma zkoušky "Resonant column"	24
Obr. 3-4 Schéma zkoušky "Cross hole seismic"	25
Obr. 3-5 Schéma zkoušky „Down hole seismic“	25
Obr. 3-6 Schéma zkoušky "Suspension logging"	26
Obr. 3-7 Schéma zkoušky "Seismic cone“	27
Obr. 3-8 Schéma měření pomocí metody MASW	27
Obr. 3-9 Způsoby šíření vlnění	28
Obr. 3-10 Možné body uvažované jako okamžik přijetí signálu	30
Obr. 4-1 Pohledy na uzavřenou triaxiální komoru	33
Obr. 4-2 Pohled na vzorek osazený v otevřené triaxiální komoře	35
Obr. 4-3 Pohledy na horní podstavu vzorku osazenou bender elementem	36
Obr. 4-4: Prostředí programu Bender Data Control	37
Obr. 4-5 Ovládací panel osciloskopu	38
Obr. 4-6 Vliv nastavení LP filtru	39
Obr. 4-7 Schéma vzorku osazeného mezi bender elementy s příslušnými rozměry.....	40
Obr. 4-8 Příklad kompletního časového záznamu signálu.....	43
Obr. 4-9 Dvě po sobě následující vyslání signálu do vzorku o frekvenci 5 kHz.....	43
Obr. 4-10 Dvě po sobě následující vyslání signálu do vzorku o frekvenci 15 kHz.....	44
Obr. 4-11 Porovnání přijatých signálů pro různě nastavený LP filtr	45
Obr. 4-12 Vizualní porovnání záznamů o několika různých frekvencích	45
Obr. 4-13 Příklady přijatých vlnění bez odpovídajícího signálu	46
Obr. 4-14 Přijatý signál při σ_3 10 kPa a frekvenci vyslaného signálu 8 kHz.....	49

Obr. 4-15 Přijatý signál při σ_3 50 kPa a frekvenci vyslaného signálu 8 kHz.....	50
Obr. 4-16 Přijatý signál při σ_3 75 kPa a frekvenci vyslaného signálu 8 kHz.....	51
Obr. 4-17 Příklady měření při různých hodnotách parametru „Max time“	52
Obr. 4-18 Časový záznam σ_3 během prvního dne měření (22.1.2020).....	56
Obr. 4-19 Závislost G_0 na frekvenci vyslaného signálu ze dne 27.1.2020	59
Obr. 4-20 Závislost G_0 na frekvenci vyslaného signálu ze dne 30.1.2020	60
Obr. 4-21 Závislost G_0 na frekvenci vyslaného signálu z prvního osazení vzorku	62
Obr. 4-22 Závislost G_0 na komorovém tlaku	63
Obr. 4-23 Porovnání jednotlivých empirických vzorců.....	65
Obr. 4-24 Porovnání výsledků měření z druhého osazení vzorku s teor. vztahem.....	66

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Měření tuhosti zeminy G_0 při komorovém tlaku 10 kPa.....	49
Tab. 4-2 Měření tuhosti zeminy G_0 při komorovém tlaku 50 kPa.....	50
Tab. 4-3 Měření tuhosti zeminy G_0 při komorovém tlaku 75 kPa.....	51
Tab. 4-4 Vliv parametru " <i>Max time</i> " při frekvenci vyslaného signálu 7 kHz.....	52
Tab. 4-5 Vliv parametru " <i>Max time</i> " při frekvenci vyslaného signálu 11 kHz.....	53
Tab. 4-6 Měření smykového modulu G_0 při různých hodnotách σ_3 a frekvenci 5 kHz..	57
Tab. 4-7 Měření smykového modulu G_0 při různých hodnotách σ_3 a frekvenci 7 kHz..	58
Tab. 4-8 Smykový modul G_0 při různých frekvencích ze dne 27.1.2020.....	60
Tab. 4-9 Smykový modul G_0 při různých frekvencích ze dne 30.1.2020.....	61
Tab. 4-10 Smykový modul G_0 při různých frekvencích při prvním osazení vzorku	62
Tab. 4-11 Porovnání výsledků měření při druhém osazení vzorku s predikcí.....	67
Tab. 4-12 Výsledky měření G_0 na totožné zemině od Panušky (2018)	67
Tab. 4-13 Porovnání naměřených hodnot s hodnotami od Panušky (2018).....	67