



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

MĚŘENÍ TUHOSTI V OBORU VELMI MALÝCH PŘETVOŘENÍ PŘI EDOMETRICKÉ ZKOUŠCE A PODROBNÁ INTERPRETACE PŘÍCHOZÍHO SIGNÁLU

MEASUREMENT OF STIFFNESS AT SMALL STRAINS DURING OEDOMETER TEST AND
DETAILED INTERPRETATION OF OUTPUT WAVES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslav Havlíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JURAJ CHALMOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav geotechniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jaroslav Havlíček
Název	Měření tuhosti v oboru velmi malých přetvoření při edometrické zkoušce a podrobná interpretace příchozího signálu
Vedoucí práce	Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

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

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

PODKLADY A LITERATURA

- Patel, A.; Singh, D. N.; Singh, K. K. Performance Analysis of Piezo-ceramic Elements in Soils. Geotechnical and Geological Engineering, 2010.
- Orazi, M. et al. Small-strain Stiffness Values for a Reconstituted Soil from Southern Italy. Geotechnical and Geological Engineering, 2018.
- Amorosi, A.; Rampello, S.; Viggiani, G. M. B. Small-strain stiffness of reconstituted clay compressed along constant triaxial effective stress ratio paths. Géotechnique, 1997.
- Benz, T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences. PhD thesis, 2006.
- Lee, J. S., Santamarina, J. C. Bender elements: Performance and signal interpretation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004.
- Kim, T. Analysis of Bender Element signals during triaxial testing. Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 2015.
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C.; Fahey, M. A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods, Geotechnical Testing Journal, 2009.

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

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce je rozčleněna do dvou základních celků. V první části práce bude navržena a otestována modifikace sestavy zkoušky jednoosé stlačitelnosti, která umožní měření tuhosti v oboru velmi malých přetvoření pomocí piezo-keramických snímačů. Ověřovací zkoušky navrhované modifikace budou provedeny na rekonstituovaných vzorcích a následně se předpokládá realizace zkoušek na neporušených vzorcích. Druhá část diplomové práce je zaměřena na podrobnou interpretaci příchozího signálu s cílem spolehlivě stanovit rychlost šíření S-vln vzorkem. K tomuto účelu budou využity data z první etapy práce.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ 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 diplomové práce

ABSTRAKT

Práce se skládá z teoretické a praktické části. První část obsahuje teoretický úvod jevu zvýšené tuhosti zemin při velmi malých přetvořeních a možnosti jeho praktických aplikací. Dále jsou zde popsány dostupné metody vyhodnocení měření počátečního smykového modulu zemin. Zvýšená pozornost je věnována metodě vyhodnocení měření ve frekvenční oblasti pomocí Fourierovy transformace. V poslední kapitole teoretické části je uveden navržený algoritmus pro automatizované vyhodnocení měření ve frekvenční oblasti.

Praktická část se zabývá měřením a vyhodnocením počátečního smykového modulu pro brněnské jíly v závislosti na svislém napětí zeminy v edometrickém přístroji. V této části je nejprve představen přípravek umožňující rozšíření edometrické zkoušky o senzory pro měření počátečního smykového modulu, který byl v rámci této práce navržen. Dále je popsán plán zkoušek včetně popisu jednotlivých vzorků zeminy. V této práci bylo testováno několik typů vzorků zeminy odebraných z jedné lokality. Poté jsou uvedeny výsledky jednotlivých zkoušek vyhodnocených vybranou metodou. Na příkladech je také provedeno porovnání s výsledky vyhodnocení stejných dat dalšími metodami. V závěru je provedeno porovnání výsledků jednotlivých zkoušek vzájemně pro všechny typy vzorků i s informacemi z dostupné odborné literatury.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tuhost zemin při velmi malých přetvořeních, počáteční smykový modul, edometrická zkouška, bender elementy, spektrální analýza, rekonstituované vzorky, vzorky z jádrových vývrtů, neporušené vzorky, geotechnika

ABSTRACT

This thesis has a theoretical and a practical part. The first part contains theoretical introduction to the phenomenon of increased stiffness at very small strains and possibilities of its practical applications. The available methods for evaluating initial shear modulus tests are described below. Increased attention is paid to the method of evaluation of test data in the frequency domain using the Fourier transform. The last chapter in this part describes an algorithm designed for automatic evaluation of measurements in the frequency domain.

The practical part deals with measurement and evaluation of initial shear modulus for Brno clay as a function of vertical stress in oedometer test. Firstly, a device is presented that allows the extension of the oedometer test with sensors for measuring initial shear modulus of soil. This device was designed for the test in this thesis. Subsequently, the test plan is described including description of all soil samples. In this thesis, several types of soil samples from a single site were tested. Next, the results of the individual tests are evaluated by the selected methods. Examples are used for showing the differences in evaluation of the same data by other methods. At the end, the results of the individual tests for all sample types are compared with each other and with data from literature.

KEYWORDS

Small strain stiffness of soils, initial shear modulus, oedometer test, bender elements, spectral analysis, reconstituted soil samples, core samples, undisturbed soil samples, geotechnical engineering

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jaroslav Havlíček *Měření tuhosti v oboru velmi malých přetvoření při edometrické zkoušce a podrobná interpretace příchozího signálu*. Brno, 2022. 90 s. Diplomová 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 diplomové práce s názvem *Měření tuhosti v oboru velmi malých přetvoření při edometrické zkoušce a podrobná interpretace příchozího signálu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2022

Bc. Jaroslav Havlíček
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Měření tuhosti v oboru velmi malých přetvoření při edometrické zkoušce a podrobná interpretace příchozího signálu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2022

Bc. Jaroslav Havlíček
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Jurajovi Chalmovskému, Ph.D. za cenné rady a připomínky při řešení dané problematiky a při práci v laboratoři. Poděkování za podporu během vypracování této závěrečné práce náleží také mé rodině a přátelům.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	TUHOST ZEMIN V OBORU VELMI MALÝCH PŘETVOŘENÍ	12
2.1	Podstata jevu a důvody pro jeho měření	13
2.1.1	Praktický význam hodnoty G_0	14
2.2	Zahrnutí piezokeramických snímačů do laboratorních zkoušek.....	15
2.2.1	Piezokeramické snímače při edometrické zkoušce	17
2.3	Hlavní faktory ovlivňující hodnotu G_0 a korelační vztahy	19
3	ANALÝZA SIGNÁLU	23
3.1	Dostupné metody	23
3.2	Metoda Visual Picking.....	24
3.3	Analýza signálu pomocí rychlé Fourierovy transformace a křížového spektra..	25
3.3.1	Teoretický princip a varianty Fourierovy transformace	26
3.3.2	Určení rychlosti šíření signálu pomocí FFT	29
3.3.3	Automatizované vyhodnocení sklonu fázového spektra skutečných signálů	31
4	PŘÍPRAVEK PRO MĚŘENÍ G_0 ZA EDOMETRICKÝCH PODMÍNEK	34
4.1	Popis přípravku	35
5	PLÁN LABORATORNÍCH ZKOUŠEK A PŘÍPRAVA VZORKŮ	38
5.1	Rekonstituované vzorky.....	41
5.1.1	První zkouška rekonstituovaného vzorku	43
5.1.2	Druhá zkouška rekonstituovaného vzorku.....	45
5.2	Vzorky z jádrových vývrtů	47
5.2.1	První zkouška vzorku z jádrového vývrtu.....	48
5.2.2	Druhá zkouška vzorku z jádrového vývrtu	49
5.3	Neporušené vzorky	50
5.3.1	První zkouška neporušeného vzorku.....	51

5.3.2	Druhá zkouška neporušeného vzorku	53
6	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A INTERPRETACE VÝSLEDKŮ.....	55
6.1	Vyhodnocení smykového modulu G_0	55
6.1.1	Vzdálenost použitá pro určení rychlosti šíření signálu	55
6.1.2	Korekce osově deformace pro vyhodnocení G_0	58
6.1.3	Korekce vlivu LP filtru	58
6.2	Stanovené moduly G_0 pro jednotlivé vzorky a diskuze	63
6.2.1	Rekonstituované vzorky.....	63
6.2.2	Vzorky z jádrového vývrtu	65
6.2.3	Neporušené vzorky	65
6.3	Porovnání s metodou <i>Visual Picking</i>	67
6.4	Měření s vyslaným signálem tvaru linear sweep	68
6.5	Vyhodnocení pomocí navrženého algoritmu	69
6.6	Porovnání výsledků pro jednotlivé typy vzorků	70
6.6.1	Aproximace výsledků matematickým vztahem	72
6.6.2	Měření modulu G_0 pro brněnský jíl v dostupné literatuře	75
6.7	Vyhodnocení jednoosé stlačitelnosti.....	77
7	ZÁVĚR	80
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	82
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	88
10	SEZNAM TABULEK.....	90

1 ÚVOD

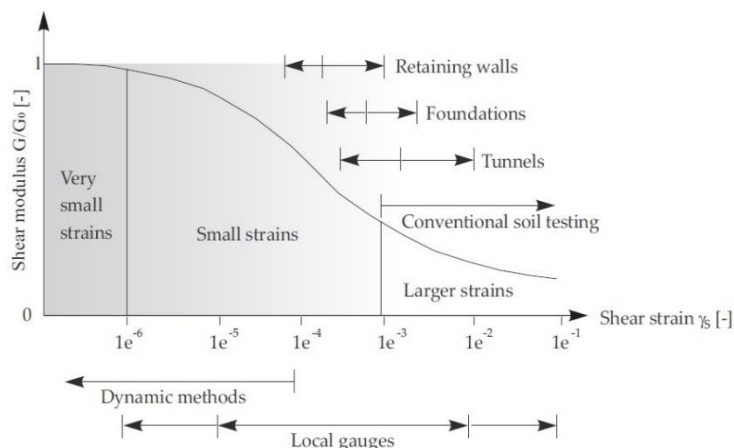
Pro zeminy je typické výrazné zvýšení smykového modulu při velmi malých přetvořeních, kdy chování zeminy popisuje počáteční smykový modul G_0 . Uplatnění této hodnoty spočívá v numerickém modelování geotechnických konstrukcí. Zahrnutí modulu G_0 do výpočtů může vést v závislosti na zemním prostředí a typu a rozměrech geotechnické konstrukce k výraznému zpřesnění numerických výpočtů, čehož lze následně využít pro návrh efektivnějších a levnějších konstrukcí. Typicky velký vliv má zvýšená smyková tuhost u pažících konstrukcí.

Hlavním cílem této práce je laboratorní stanovení počátečního smykového modulu G_0 brněnského jílu pro různé úrovně napětí zeminy za edometrických podmínek. Plánováno je provedení měření na různých typech vzorků zemin, kterými jsou rekonstituované vzorky, vzorky z jádrových vývrtů a neporušené vzorky. Tyto vzorky se odlišují finanční a technologickou náročností při jejich odběru a také mírou narušení původního stavu zeminy. Pro měření hodnot modulu G_0 jsou použity snímače zvané bender elementy. Kvůli rozšíření edometrické zkoušky o možnost měření modulu G_0 bylo nutné navrhnout a vyrobit přípravky umožňující zatěžování podstav vzorku s osazenými bender elementy.

Předmětem práce je dále porovnání různých tvarů signálu použitých pro měření i různých metod vyhodnocení modulu G_0 z hodnot naměřených pomocí bender elementů. Cílem práce je také navržení algoritmu umožňujícího automatizované vyhodnocení naměřených dat.

2 TUHOST ZEMIN V OBORU VELMI MALÝCH PŘETVOŘENÍ

U zemin je pracovní diagram značně nelineární a s rostoucím smykovým přetvořením výrazně klesá smykový modul. Pokles smykového modulu G v závislosti na smykovém přetvoření γ_s má při logaritmické ose smykového přetvoření charakteristický tvar S, jak je vidět na obr. 2-1. Při nejmenších smykových přetvořeních se zemina chová téměř dokonale pružně a lineárně. Tato velmi malá přetvoření jsou omezena horními hodnotami lišícími se dle literatury v rozsahu od 1×10^{-6} (Plaxis bv, 2015) až 1×10^{-5} (Benz, 2009). Smykový modul při těchto velmi malých přetvořeních je nutné měřit pomocí speciálních přístrojů, protože běžné laboratorní zkoušky umožňují měřit tuhost zemin pouze při přetvořeních větších než přibližně 1×10^{-3} (Benz, 2006).



Obr. 2-1 Závislost smykového modulu, resp. jeho poměru k počáteční hodnotě G_0 , na smykovém přetvoření γ_s , převzato z. (Bentley Systems, Inc., 2019).

Závislost smykového modulu zeminy na smykovém přetvoření je kromě počátečního smykového modulu G_0 určena ještě referenčním smykovým přetvořením $\gamma_{0,7}$, které vyjadřuje smykové přetvoření, při kterém poklesne hodnota smykového modulu na 70% hodnoty G_0 . Referenční smykové přetvoření tak popisuje rychlost poklesu smykového modulu s narůstajícím přetvořením. Tuto závislost pak popsal Hardin (1972) vztahem:

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

Existují i vztahy od jiných autorů, které však obvykle vyžadují určení více vstupních parametrů (Benz, 2009).

Tato práce se zabývá pouze určením hodnoty G_0 bez stanovení parametru $\gamma_{0,7}$.

2.1 Podstata jevu a důvody pro jeho měření

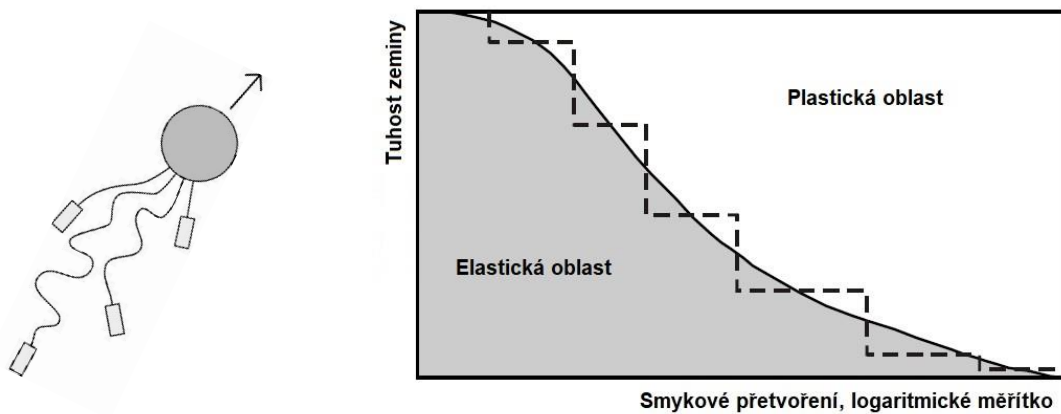
Příčiny zvýšené tuhosti zemin při velmi malých přetvořeních souvisejí s mikroskopickou strukturou zemin. Je obecně známo, že zeminy se skládají ze tří fází. První fází jsou pevné částice, tedy jednotlivá zrna, a dalšími fázemi jsou voda a plyn obsažené v pórech mezi zrny.

Mikroskopická struktura jednotlivých typů zemin se odlišuje. Písečné zeminy jsou tvořeny jednotlivými zrny, mezi kterými působí odpudivé i přitažlivé síly vlivem interakce mezi atomy a molekulami v povrchových vrstvách zrn. Kontakty mezi zrny mohou být stmeleny také usazenými křemičitany a uhličitany, původně obsaženými v pórové vodě, které dále zvyšují vazby mezi zrny. V případě jílovitých zemin je struktura tvořena shluky částic jílovitých minerálů, mezi kterými působí kromě stejných sil jako u písků ještě významné chemické vazby závislé na konkrétním mineralogickém složení částic. I přes tuto odlišnou strukturu však oba typy zemin vykazují kvalitativně stejné chování při změně tuhosti se smykovým přetvořením (Benz, 2006).

Při určitém zatížení vznikají v dotykových plochách mezi jednotlivými zrny normálové a tangenciální síly. Při malých přetvořeních vznikají na ploškách mezi částicemi vlivem tření pouze malé pružné deformace a částice tak zůstávají v kontaktu. S narůstajícím smykovým přetvořením se však zvyšuje počet plošek, na kterých tangenciální síly od zatížení přesáhnou třecí síly mezi zrny a dojde k většímu vzájemnému posunu zrn a porušení vazeb mezi částicemi. Takovéto přetvoření je již plastické. Větší přetvoření jsou možná i proto, že ve vzorku postupně vznikají oblasti s jedním převládajícím směrem tangenciálních složek sil. Protože celková tuhost vzorku zeminy úzce souvisí se součtem tuhostí všech kontaktních ploch mezi částicemi, tak s porušením vazeb mezi jednotlivými zrny dochází i k celkovému poklesu tuhosti zeminy (Benz, 2006).

Názornou analogii tohoto jevu zvanou *Simpson's brick model*, který je graficky popsán na obr. 2-2, představil Simpson v roce 1992. Tato analogie spočívá v tom, že člověk tahá jedním směrem za různě dlouhé provázky, na jejichž konci jsou kostky. Při pohybu se nejprve natahují provázky a až po napnutí provázku dojde k pohybu příslušné kostky, a protože jsou provázky různě dlouhé, tak další kostky se rozpohybují s větším posunem

člověka. Pružná deformace představuje natažení provázku do té chvíle, než se pohne kostka na jeho konci. Naopak pohyb kostky představuje plastickou deformaci. Se vznikem lokální plastické deformace zároveň dojde u zemin k poklesu smykové tuhosti, jak bylo popsáno v předchozím odstavci. S ohledem na malý počet kostek v modelu této analogie je pokles tuhosti skokový, což lze vidět v grafu na obr. 2-2. Smykové přetvoření představuje posun člověka, který tahá za provázky a jednotlivé rozdíly úrovní poklesu tuhosti odpovídají podílu zrn z celkového počtu, který představuje kostka, která se právě pohnula. Stav, kdy se žádná kostka nepohybuje odpovídá velmi malým přetvořením, při kterých chování zeminy popisuje smykový modul G_0 . Analogie také ukazuje, že při změně směru pohybu člověka se provázky opět uvolní a pro určité malé deformace se opět materiál chová pružně (Simpson, 1992).



Obr. 2-2 Simpson's brick model. Vlevo se nachází zobrazení člověka tahajícího za provázky s kostkami. Vytvořeno podle (Simpson, 1992). Vpravo je zobrazena závislost smykové tuhosti na přetvoření, převzato od (Clarke, 2013).

2.1.1 Praktický význam hodnoty G_0

Zvýšená počáteční hodnota smykového modulu G_0 se jako deformační parametr používá v pokročilých numerických modelech pro přesnější určení přetvoření geotechnických konstrukcí. Často používaným modelem uvažujícím zvýšenou počáteční smykovou tuhost G_0 je *Hardening soil small strain model*, zkráceně HS-Small model. Tento model vznikl rozšířením modelu *Hardening soil*, zkráceně HS model, o vztahy popisující změny smykové tuhosti zemin při velmi malých přetvořeních. HS model je nelineární elasto-plastický materiálový model, který umožňuje také popis chování zeminy při odlehčení a opětovném přitížení s odlišnou tuhostí než při prvotním zatěžování (Benz, 2006).

Jak je vidět i na obr. 2-1, tak velký význam má uvažování počáteční hodnoty smykového modulu G_0 při výpočtech predikcí chování pažicích konstrukcí. Predikce chování kotvené pažicí konstrukce různými numerickými modely byla porovnána např. v článku (Plaxis bv, 2015), ze kterého vyplývá, že při použití HS-Small modelu byly predikované hodnoty vodorovných posunutí pažicí konstrukce až poloviční oproti predikcím HS modelu. Zároveň se hodnoty predikované HS-Small modelem výrazně méně lišily od hodnot naměřených inklinometry, v některých hloubkách se navíc s inklinometrickým měřením dobře shodovaly.

Benz (2009) porovnával predikce sedání mostní opěry podle modelů HS a HS-Small s extenzometrickým a geodetickým měřením skutečné konstrukce. Tato studie ukazuje dobrou shodu HS-Small modelu se skutečným chováním konstrukce, kdy byly hodnoty sedání srovnatelné. Naopak predikce HS modelu sedání výrazně nadhodnocovala, v některých místech konstrukce až pětinašobně.

Dalším možným využitím HS-Small modelu je numerické modelování tunelů a jejich poklesových kotlin. Predikce jednotlivých materiálových modelů porovnáva například El-Nahhas (2009). V tomto článku je modelovaná poklesová kotlina nad tunelem průměru 9,4 m v hloubce 18 m pod povrchem. Kromě HS modelu a HS-Small modelu byla počítána i predikce jednoduššího Mohr-Coulombova materiálového modelu. HS model i HS-Small model dobře predikovaly maximální hloubku poklesové kotliny v porovnání s měřením, na rozdíl od Mohr-Coulombova materiálového modelu, který vedl k menší hloubce poklesové kotliny. HS-Small model však oproti HS modelu lépe vystihoval příčný tvar poklesové kotliny, kdy predikoval strmější změnu deformací v blízkosti středu poklesové kotliny, což lépe odpovídalo měření. Porovnání predikcí poklesových kotlin tunelů prováděl i Shong-Loong (2016), který opět doporučuje HS-Small model pro nejlepší shodu s měřeními.

2.2 Zahrnutí piezokeramických snímačů do laboratorních zkoušek

V rámci této práce byly pro měření počátečního smykového modulu G_0 použity takzvané bender elementy, což jsou piezokeramické snímače. To jsou obecně prvky, ve kterých při mechanickém namáhání vzniká elektrické napětí a zároveň v případě, že jsou zapojeny v elektrickém obvodu, tak vlivem elektrického napětí dochází k jejich deformaci. Bender

elementy jsou konkrétně snímače, které se při připojení k elektrickému napětí ohýbají. Toho je dosaženo spojením dvou tenkých paralelních piezokeramických destiček zapojených pomocí plochých kovových elektrod takovým způsobem, že při průchodu proudem se jedna zkracuje a druhá prodlužuje. Pokud je bender element vystaven časově proměnnému, resp. střídavému napětí, tak kmitá podobně jako dané napětí (Lee, 2005).

Pro instalaci do aparatury laboratorního vybavení jsou bender elementy na jednom konci, kde jsou zároveň připojené elektrody, pevně umístěné v kovovém pouzdře, ze které vyčnívá plochá destička snímače, která tak působí jako ohýbaná konzola. Na obr. 2-3 je zobrazen jeden z použitých bender elementů před osazením do vzorku zeminy instalovaný v horní kovové podstavě a vyčnívající z drenážní destičky. Délka vyčnívající části bender elementu je 9,7 mm.



Obr. 2-3 Bender element požitý během zkoušek. Na tomto obrázku je instalován spolu s pouzdem v horní podstavě přípravku umožňující zatěžování vzorku.

Bender elementy umožňují měřit počáteční smykový modul proto, že existuje závislost mezi rychlostí příčného mechanického vlnění ve vzorku a smykovým modulem G . Smykové přetvoření při šíření příčného kmitání vyvolaného pohybem hrotu bender elementu dosahuje hodnot menších než 1×10^{-6} (Benz, 2006) a odvozený smykový modul je tedy přímo počátečním modulem G_0 . Závislost mezi smykovým modulem a rychlostí šíření příčného vlnění popisuje vztah:

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

kde ρ je objemová hmotnost vysušeného vzorku zeminy a v_s je rychlost příčného vlnění ve vzorku. Vlhkost vzorku nemá přímý vliv na měření, protože voda nemá smykovou tuhost a nemůže tedy vést příčné vlnění (Lade, 2016).

Měření pomocí bender elementů probíhá tak, že před zkouškou jsou na opačné strany vzorku zeminy osazeny bender elementy, jejichž vyčnívající část je zapíchnuta do vzorku. Následně v okamžiku měření smykového modulu G_0 je na jeden snímač vyslán elektrický signál, tedy časově proměnné napětí. Následný pohyb tohoto bender elementu sloužícího jako vysílač vyvolá ve vzorku vlnění, které po určité době dorazí k druhému bender elementu, který funguje jako přijímač a generuje elektrický signál podle přijatého mechanického vlnění.

Pro vytvoření signálu budícího první bender element slouží generátor signálu, který lze ovládat počítačem. Je možné si zvolit typ signálu, jako například jedna sinusová vlna, několik sinusových vln nebo obdélníkový signál, a u vybraného typu lze měnit i jeho parametry, např. frekvenci a amplitudu. Signál přijatý od druhého snímače je zaznamenán pomocí osciloskopu a následně je převeden do digitální podoby (Wille Geotechnik, 2012).

Stanovení rychlosti příčného vlnění v_s ze signálu přijatého druhým bender elementem se podrobně věnuje kap. 3 této práce.

2.2.1 Piezokeramické snímače při edometrické zkoušce

Edometrická zkouška je v oboru geotechniky dobře známým typem zkoušky pro určení deformačních parametrů zeminy a v České republice se její provádění řídí normou (ČSN EN ISO 17892-5, 2017). Vzorek zeminy je při této zkoušce umístěn uvnitř tuhého prstence z korozivzdorné oceli a je zatěžován jednotlivými přírůstky zatížení v axiálním směru.

Dle normy (ČSN EN ISO 17892-5, 2017) je standardním výstupem graf závislosti svislého poměrného přetvoření na aplikovaném svislém napětí, ze kterého se vyhodnocují hodnoty edometrického modulu E_{oed} mezi jednotlivými zatěžovacími stupni. Alternativním výstupem je graf závislosti čísla pórovitosti v závislosti na aplikovaném svislém napětí, které je vynášeno na logaritmické ose. Z tohoto grafu se vyhodnocuje jedna hodnota součinitele stlačitelnosti C_c pro větev prvotního zatěžování a jedna hodnota indexu odlehčení C_{cr} pro větve odlehčení, resp. opětovného přitížení. Hodnoty indexů stlačitelnosti a odlehčení se počítají podle stejného vzorce, ale každá pro jinou křivku v grafu:

$$C_i = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v}, \quad (2-3)$$

kde C_i je index stlačitelnosti nebo index odlehčení podle toho, která větev závislosti je vyhodnocována. Δe je změna čísla pórovitosti mezi dvěma vyhodnocovanými body závislosti a $\Delta \log \sigma_v$ je změna logaritmu svislého napětí mezi stejnými body. Záporné znaménko je v rovnici proto, že kladnému rozdílu logaritmů napětí odpovídá záporný rozdíl čísel pórovitosti. Závislost čísla pórovitosti na svislém napětí byla také stanovena a vyhodnocena pro zkoušky prováděné v rámci této práce v kapitole 6.7.

V rámci této práce bylo cílem rozšířit množství informací získaných z edometrické zkoušky o hodnoty smykového modulu G_0 v závislosti na svislém napětí vzorku. Podobná měření smykového modulu G_0 pomocí bender elementů implementovaných do edometrického přístroje prováděl např. Dyvik (1989) nebo Fam (1995).

Pro zkoušky zemin v této práci byl zvolen edometrický prstenec pro průměr vzorku 50 mm, zejména s ohledem na velikost dostupných vzorků zemin nebo síly nutné pro dosažení plánovaných napětí vzorku. Edometrický prstenec byl osazen jako tzv. pevný, což znamená, že na rozdíl od tzv. plovoucího prstence se jeho poloha vůči spodní podstavě vzorku v průběhu zkoušky neměnila.

V případě edometrických zkoušek je dle normy (ČSN EN ISO 17892-5, 2017) požadavek na poměr průměru vzorku k jeho výšce minimálně 2,5:1. To znamená při průměru vzorku 50 mm výšku maximálně 20 mm. Tato podmínka nebyla v případě osazení vzorku bender elementy dodržena. Hlavními důvody byla nutnost umístit dvě protilehlé destičky bender elementů o výšce přibližně 10 mm uvnitř vzorku na protilehlých podstavách vzorku a také požadavek na minimální vzdálenost bender elementů s ohledem na tzv. *Near-field effect*.

Near-field effect je jev, který souvisí se skutečností, že od zdroje mechanického kmitání se vlnění šíří vzorkem zeminy několika způsoby zároveň a v důsledku vede ke zkreslení přijatého signálu, které komplikuje vyhodnocení signálu. *Near-field effect* závisí na poměru vzdálenosti vysílače a přijímače signálu a vlnové délky signálu, který je nazýván normalizovaná vzdálenost n :

$$n = \frac{d}{\lambda}, \quad (2-4)$$

kde d je vzdálenost bender elementů a λ je vlnová délka, která závisí na rychlosti šíření vlnění a na jeho frekvenci. Negativní vliv tohoto jevu se snižuje s rostoucí normalizovanou vzdáleností a je považovaný za zanedbatelný, pokud je n větší než 1,6. V optimálním případě by n mělo být větší než 2. Normalizovanou vzdálenost n lze navýšit zvětšením vzdáleností bender elementů nebo zvýšením frekvence vlnění, protože rychlost šíření vlnění vzorkem je nezávislá na frekvenci vlnění. Obecně je výhodné použití větší frekvence vstupního signálu, ale při malé vzdálenosti bender elementů jsou požadované frekvence vysoké (Arroyo, 2003).

S ohledem na požadavek minimální normalizované vzdálenosti a stlačení vzorku zeminy během zkoušky byla zvolena počáteční výška vzorku přibližně 50 mm, které odpovídá vzdálenost mezi bender elementy 30 mm.

2.3 Hlavní faktory ovlivňující hodnotu G_0 a korelační vztahy

Základní korelační vztah pro výpočet hodnoty G_0 je modifikovaný vztah podle Hardin (1969):

$$G_0 = A * f(e) * OCR^k * \left(\frac{\sigma'}{p_{ref}}\right)^m, \quad (2-5)$$

kde A , k a m jsou korelační koeficienty, $f(e)$ je funkce popisující závislost na čísle pórovitosti, OCR je stupeň překonsolidace, σ' je střední efektivní napětí a p_{ref} je referenční napětí, za které se obvykle volí hodnota atmosférického tlaku 100 kPa (Benz, 2006).

Parametr m spolu se základem mocniny vyjadřuje závislost smykového modulu G_0 na aktuálním vnějším zatížením daného elementu zeminy. Jelikož za edometrických podmínek je horizontální radiální napětí ve vzorku, a tedy i střední napětí, svázáno se svislým napětím hodnotou koeficientu zemního tlaku v klidu, tak je možné místo hodnoty středního efektivního napětí uvažovat hodnotu svislého efektivního napětí. Tato změna se projeví v rozdílných hodnotách korelačních koeficientů rovnice (2-5), ale takový vztah také jednoznačně popisuje stav zeminy. V literatuře je často vyjadřována závislost smykového modulu G_0 měřeného pomocí edometrické zkoušky právě na hodnotě svislého efektivního napětí σ'_v , viz např. (Dyvik, 1989) a (Lee, 2020).

Důležitým členem rovnice, zejména u soudržných zeminy, je také hodnota stupně překonsolidace OCR spolu s korelačním koeficientem k . Tento člen umožňuje zavedení historie zatěžování daného elementu zeminy (Benz, 2006). Hodnota OCR je podílem maximálního svislého efektivního napětí ve vzorku v historii $\sigma'_{v,max}$ a aktuálního svislého efektivního napětí σ'_v , což lze zapsat rovnicí:

$$OCR = \frac{\sigma'_{v,max}}{\sigma'_v} \quad (2-6)$$

Dalším parametrem je závislost na čísle pórovitosti zeminy, které se podrobně věnoval Panuška (2018). Dle této práce, která se zabývala zejména nesoudržnými zeminami, je nejpoužívanější funkcí vlivu čísla pórovitosti funkce podle Hardina (1963):

$$f(e) = \frac{(a_h - e)^2}{1 + e}, \quad (2-7)$$

kde a_h je koeficient dle typu zeminy a e je číslo pórovitosti. Podle Benz (2006) se používá pro nesoudržné zeminy s oblými zrny hodnota a_h rovna 2,17. Pro nesoudržné zeminy s ostrohrannými zrny a soudržné zeminy se používá hodnota a_h rovna 2,97.

V literatuře se dále vyskytují funkce vlivu čísla pórovitosti ve tvaru:

$$f(e) = e^{-x}, \quad (2-8)$$

kde x je korelační koeficient (Benz, 2006).

V rámci této práce byly testovány pouze vzorky jílovitých zemin a vztah (2-5)

lze tedy pomocí rovnic (2-6) a (2-7) upravit do podoby:

$$G_0 = A * \frac{(2,97 - e)^2}{1 + e} * \left(\frac{\sigma'_{v,max}}{\sigma'_v} \right)^k * \left(\frac{\sigma'_v}{p_{ref}} \right)^m \quad (2-9)$$

Z této rovnice vyplývá, že v případě režimu prvotního zatěžování, například u rekonstituovaného vzorku, je člen s koeficientem k vyjadřující historii zatěžování roven jedné, neboť aktuální napětí je rovno maximálnímu napětí v historii. V tomto režimu se tedy koeficient k neuplatní. Vliv koeficientu k se projeví až v režimu odtížení a opětovného přitížení, při kterém je hodnota OCR větší než jedna.

Stav daného vzorku zeminy za edometrických podmínek z hlediska napětí a čísla pórovitosti lze jednoznačně popsat pomocí aktuálního napětí $\sigma'_{v,i}$, největšího napětí v historii zatěžování vzorku a jedné referenční hodnoty čísla pórovitosti. To lze ukázat za pomoci diagramu závislosti čísla pórovitosti na svislém efektivním napětí vynášeném na

logaritmické ose, jehož tvar je na obr. 2-4, kdy lze pro zvolené číslo pórovitosti e_i při svislém efektivním napětí $\sigma'_{v,i}$ odvodit vztah:

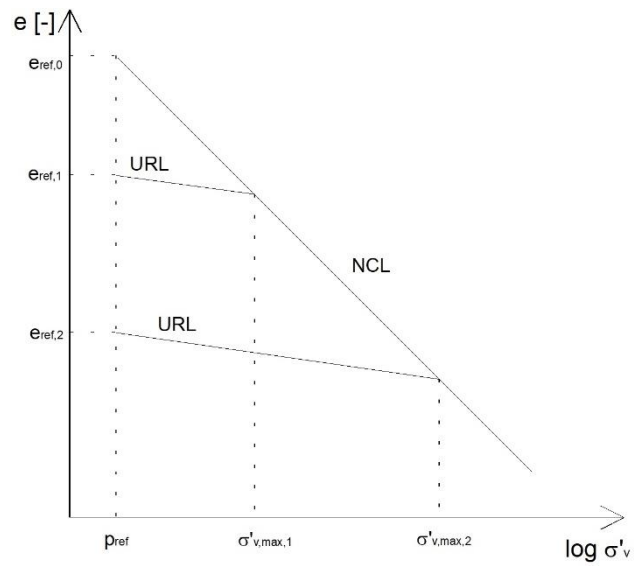
$$e_i = e_{ref,0} - \left(C_c * \log \frac{\sigma'_{v,max}}{p'_{ref}} - C_{cr} * \log \frac{\sigma'_{v,max}}{p'_{ref}} + C_{cr} * \log \frac{\sigma'_{v,i}}{p'_{ref}} \right), \quad (2-10)$$

kde C_c je index stlačitelnosti a C_{cr} je index odlehčení. Tyto indexy jsou konstantní pro danou zeminu. C_c se počítá jako sklon linie prvotního zatěžování (NCL) a C_{cr} je pak sklon linie odtížení, resp. opětovného přitížení (URL), v obou případech při logaritmickém zobrazení napětí. p'_{ref} je zvolené referenční napětí, obvykle o hodnotě 100 kPa, a $e_{ref,0}$ je číslo pórovitosti při referenčním napětí a při prvotním zatěžování, tedy na linii NCL. S ohledem na existenci jevu dotvarování, při kterém dochází k poklesu čísla pórovitosti při stálém napětí a spolu s číslem pórovitosti se posouvá i celá linie URL, je hodnotou OCR resp. $\sigma'_{v,max}$ myšlena zdánlivá hodnota, která může být oproti skutečnému maximálnímu dosaženému napětí v historii vlivem dotvarování zvýšená.

Z rovnice (2-10) je zřejmé, že kromě konstant pro daný vzorek zeminy je hodnota aktuálního čísla pórovitosti závislá pouze na aktuálním svislém efektivním napětí $\sigma'_{v,i}$ a na největším napětí v historii zatěžování $\sigma'_{v,max}$. Hodnotu $\sigma'_{v,max}$ lze podle rovnice (2-6) vyjádřit pomocí stupně překonsolidace OCR a aktuálního svislého napětí $\sigma'_{v,i}$. Číslo pórovitosti a hodnota OCR tedy nesou stejnou informaci o stavu zeminy, ve vztahu (2-9) lze proto nahradit hodnotu e hodnotou $e_{ref,0}$, čímž získáme vztah:

$$G_0 = A * \frac{(2,97 - e_{ref,0})^2}{1 + e_{ref,0}} * \left(\frac{\sigma'_{v,max}}{\sigma'_v} \right)^k * \left(\frac{\sigma'_v}{p_{ref}} \right)^m \quad (2-11)$$

Rovnice (2-11) byla použita při vyhodnocení všech zkoušek provedených v rámci této práce v kapitole 6.6.1, protože umožňuje snadné provádění predikcí chování zeminy v grafu závislosti modulu G_0 na svislém napětí.



Obr. 2-4 Závislost čísla pórovitosti na svislém efektivním napětí vynesném na logaritmické ose. Hodnoty čísla pórovitosti na svislé ose směrem dolů klesají.

3 ANALÝZA SIGNÁLU

Tato kapitola se zabývá metodami pro určení rychlosti šíření vlnění vzorkem zeminy. To probíhá vždy tak, že se porovnávají informace nesené signálem přivedeným na vysílající bender element, zvaný vstupní signál, a informace nesené v přijatém signálu na opačné straně vzorku druhým snímačem.

Rychlost se obecně spočítá dle známého vztahu:

$$v = \frac{L}{t}, \quad (3-1)$$

ve kterém L je dráha vlnění mezi dvěma body v prostoru, v nichž jsou zaznamenané signály z průchodu vlnění. V případě měření modulu G_0 pomocí bender elementů jde nejčastěji o vzdálenost jejich hrotů. t je doba šíření vlnění mezi těmito body. Určení doby šíření je obvykle složitější než určení vzdálenosti a používají se k němu metody popsané v další části této kapitoly. Pro vyhodnocení doby šíření vlnění je nezbytné, aby oba signály byly měřené od stejného časového okamžiku.

3.1 Dostupné metody

Visual Picking je často používaná metoda, která spočívá v prostém odečtení časového rozdílu mezi odpovídajícími si body na vyslaném a přijatém signálu a následném výpočtu rychlosti šíření ze vzdálenosti snímačů. Metodě se podrobněji věnuje kapitola 3.2.

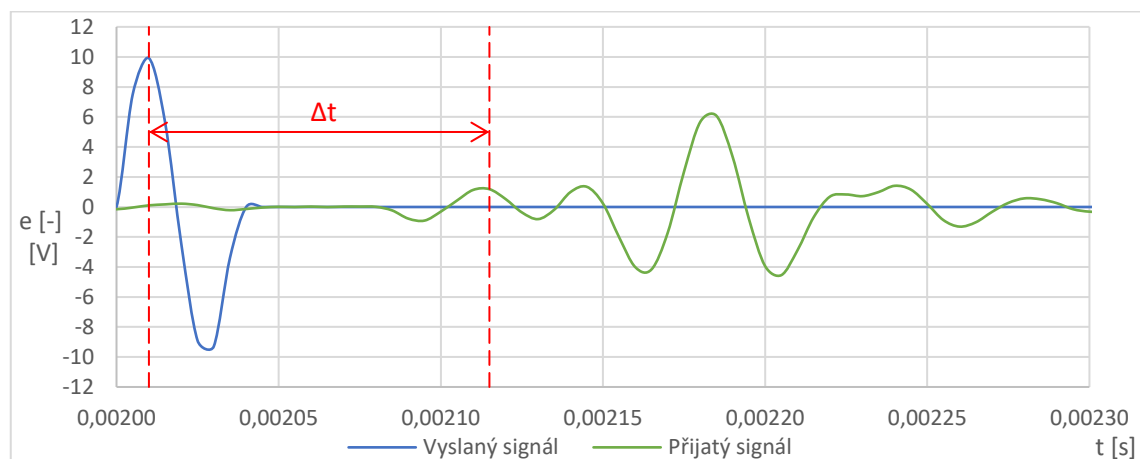
Další metodou je tzv. *Cross correlation*, jejíž podstatou je porovnávání míry podobnosti vyslaného a přijatého signálu. Vyhodnocení probíhá za využití transformace signálů do frekvenční oblasti pomocí Fourierovy transformace a určuje se koeficient podobnosti, anglicky zvaný *Cross correlation coefficient*, který je funkcí časového posunu mezi vyslaným a přijatým signálem. Doba šíření signálu je pak stanovena jako časový posun odpovídající maximální hodnotě koeficientu podobnosti. Problémem této metody je velká citlivost na *Near-field effect*, viz kap. 2.2.1, a podmínka, že tvar vyslaného a přijatého signálu musí být dostatečně podobný (Zapata-Medina, 2015). Kvůli relativně malé vzdálenosti bender elementů byl při měření pro nízké frekvence zjištěn *Near-field effect* a podmínka podobnosti obou signálů také nebyla obvykle splněna, protože přijatý signál je složitým interferenčním obrazcem. Tato metoda proto nebyla použita při vyhodnocení měření v této práci.

Metoda křížového spektra, anglicky *Cross spectrum*. Tato metoda také využívá Fourierovu transformaci, ale následně je doba šíření vlnění vzorkem určena ze sklonu funkce závislosti fázového posunu vyslaného a přijatého signálu na frekvenci. Na rozdíl od metody *Cross correlation* zde konečné vyhodnocení probíhá ve frekvenční oblasti místo časové. Této metodě se věnuje např. Da Fonseca (2009). Tato metoda byla použita jako hlavní metoda při vyhodnocení měření v rámci této práce zejména z důvodu možnosti eliminace fázového posunu způsobeného použitým osciloskopem a možnosti automatizace vyhodnocení touto metodou. Metoda je blíže popsána v kapitole 3.3.

3.2 Metoda Visual Picking

Základní princip této metody spočívá v určení časové vzdálenosti odpovídajících si bodů vlny mezi vyslaným a přijatým signálem. Určení daného bodu u vyslaného signálu je zpravidla jednoznačné, ale problematické je určení odpovídajícího bodu u přijatého signálu, který se obvykle tvarově značně odlišuje od vyslaného signálu. Určení odpovídajícího bodu je zpravidla prováděno volbou osoby vyhodnocující data, a proto je značně subjektivní (Lade, 2016).

Konkrétní variantou této metody je určení časového rozdílu mezi vrcholem vyslaného signálu a prvním výrazným vrcholem v záznamu přijatého signálu. Tato metoda byla použita jako doplňková při vyhodnocení zkoušek prováděných v rámci této práce. Princip vyhodnocení je znázorněn v příkladu na obr. 3-1.



Obr. 3-1 Princip vyhodnocení metodou Visual Picking. Doba šíření vlnění Δt je stanovena jako časová vzdálenost vrcholu vyslaného signálu a prvního výrazného vrcholu přijatého signálu. Vyslaný signál je frekvence 27 kHz, hodnoty u přijatého signálu jsou vynásobeny 50krát, protože přijatý signál dosahoval při měření běžně výrazně nižších výchylek než vyslaný.

Hlavním problémem této metody, spolu se subjektivním výběrem odpovídajícího bodu u přijatého signálu, je velká citlivost na *Near-field effect*, viz kap. 2.2.1, a skutečnost, že signál se vzorkem nešíří pouze přímočaře směrem k přijímači, ale šíří se všemi směry, odráží se od stěn vzorku a přijatý signál je pak tvořen superpozicí přímočarého signálu i mnoha dalších odražených vlnění a je proto značně odlišný od vyslaného signálu (Bonale, 2012).

Dalším problémem této metody je také rozlišení naměřených dat v časové oblasti (Zapata-Medina, 2015). Pro zkoušky zemin prováděné v rámci této práce bylo použito laboratorní vybavení se vzorkovací frekvencí signálu 200 kHz, čemuž odpovídá vzdálenost uložených dat v časové oblasti 5 μ s. Ze zkušeností při vyhodnocení naměřených dat vyplývá, že tato nejistota v určení přesného vrcholu vlny signálu může představovat odchylku určeného modulu G_0 v jednotkách MPa.

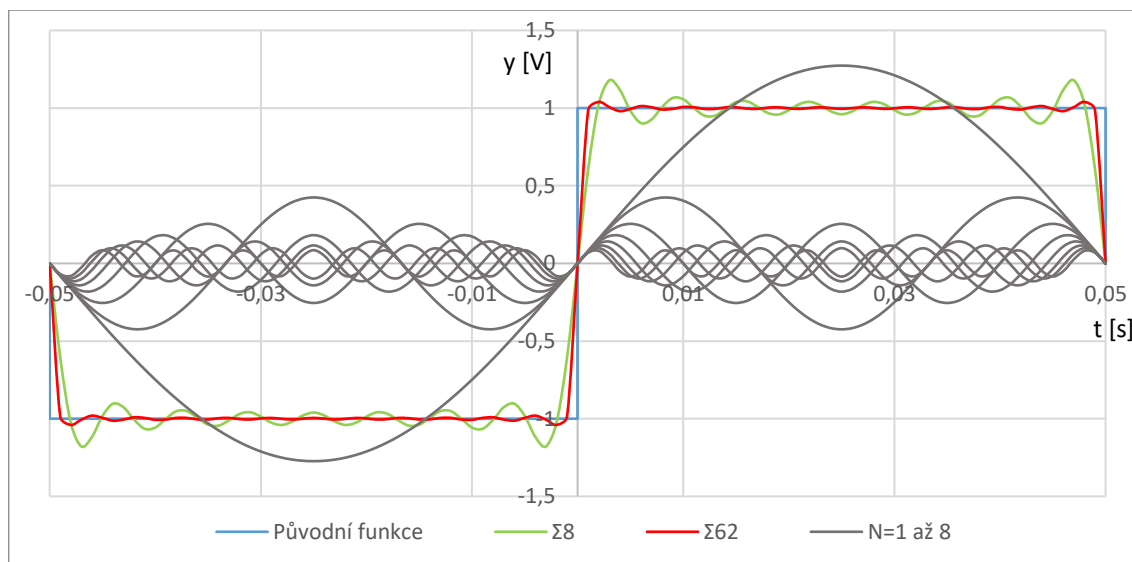
3.3 Analýza signálu pomocí rychlé Fourierovy transformace a křížového spektra

Fourierova transformace je obecně zobrazení, které každé funkci přiřazuje novou funkci, z jejíž vlastností lze vyčíst informace o původní funkci, které by z původní funkce nebylo možné zjistit (Klíč, 2002).

Význam Fourierovy transformace spočívá v tom, že umožňuje vyjádřit libovolnou funkci jedné proměnné jako součet mnoha různých komplexních exponenciál. Díky Eulerově vztahu:

$$e^{iv} = \cos v + i * \sin v , \quad (3-2)$$

kde i je imaginární jednotka a v je nezávisle proměnná, lze vyjádřit tuto libovolnou funkci také jako součet funkcí sinus a cosinus o různých frekvencích a amplitudách, jak je zobrazeno na obr. 3-2. Tento proces sestavení funkce z řady komplexních exponenciál popisuje inverzní Fourierova transformace. Fourierova transformace naopak rozkládá libovolnou funkci na řadu komplexních exponenciál (Hlaváč, 2020).



Obr. 3-2 Princip Fourierovy transformace. Šedou barvou je vyznačeno prvních 8 složek výsledného signálu odlišujících se frekvencí a amplitudou. Zelenou a červenou barvou jsou vyznačeny součty prvních 8 resp. 62 složek.

3.3.1 Teoretický princip a varianty Fourierovy transformace

Fourierova transformace komplexní funkce $s(t)$ je definovaná vztahem:

$$\mathcal{F}[s(t)] = S(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-2\pi i\nu t} dt, \quad (3-3)$$

kde $S(\nu)$ je Fourierův obraz funkce $s(t)$ a i je imaginární jednotka (Klíč, 2002). Nezávisle proměnná t je zpravidla čas s jednotkou sekunda [s] a nezávisle proměnná ν pak obvykle vyjadřuje frekvenci s jednotkou hertz [Hz].

Inverzní Fourierova transformace, která přiřadí k funkci $S(\nu)$ funkci $s(t)$, se odlišuje pouze znaménkem v exponentu integrandu:

$$\mathcal{F}^{-1}[S(\nu)] = s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu)e^{2\pi i\nu t} d\nu \quad (3-4)$$

Funkce $S(\nu)$ je obecně komplexní funkcí, tedy s funkčními hodnotami ve tvaru:

$$S(\nu) = \text{Re}S(\nu) + i * \text{Im}S(\nu), \quad (3-5)$$

kde $\text{Re}S(\nu)$ je reálná část hodnoty $S(\nu)$ a $\text{Im}S(\nu)$ je imaginární část hodnoty $S(\nu)$. Pro interpretaci Fourierovy transformace je důležité zavést následující funkce:

$$A(\nu) = |S(\nu)| = \sqrt{\text{Re}S(\nu)^2 + \text{Im}S(\nu)^2} \quad (3-6)$$

$$\Phi(\nu) = \arg S(\nu) = \arctg \left[\frac{\text{Im}S(\nu)}{\text{Re}S(\nu)} \right] \quad (3-7)$$

$$P(v) = |S(v)|^2 = A^2(v) \quad (3-8)$$

$A(v)$ se nazývá amplitudové spektrum a určuje amplitudu jednotlivých složek původního signálu. $\Phi(v)$ se nazývá fázové spektrum a určuje fázový posun jednotlivých složek původního signálu. $P(v)$ je výkonové spektrum, jinak zvané také autospektrum, které ukazuje výkon jednotlivých složek původního signálu, jde vždy o reálná čísla a jeho integrací je možné získat hodnotu energie přenášené signálem (vlněním). Tyto tři veličiny lze s výhodou graficky znázornit formou stejnojmenných grafů, tedy spekter (Klíč, 2002).

Diskrétní Fourierova transformace

Pro praktické využití je s ohledem na časovou náročnost ručního výpočtu nezbytný výpočet Fourierovy transformace pomocí počítače. Počítače pracují s diskrétními daty místo spojitých, zároveň jsou i data vstupního signálu zpravidla v diskrétní podobě. Proto se běžně používá diskrétní Fourierova transformace, zkráceně DFT. U té je integrál nahrazen Riemannovým integrálním součtem:

$$S(v_n) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} S(t_k) e^{-2\pi i \frac{nk}{N}}, n = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (3-9)$$

kde Δt je vzorkovací perioda signálu, tedy čas mezi dvěma sousedními zaznamenanými hodnotami signálu, N je počet dílků, na který je signál rozdělen, n a k jsou pořadnice jednotlivých diskrétních hodnot v časové a frekvenční oblasti (Klíč, 2002).

U DFT lze hodnoty nezávisle proměnné vyjádřit jako frekvence jednotlivých funkcí sinus nebo kosinus, na které je původní signál rozložen. Odpovídající frekvence f_n pro n -tou hodnotu funkce $S(v_n)$ se spočítá podle vztahu:

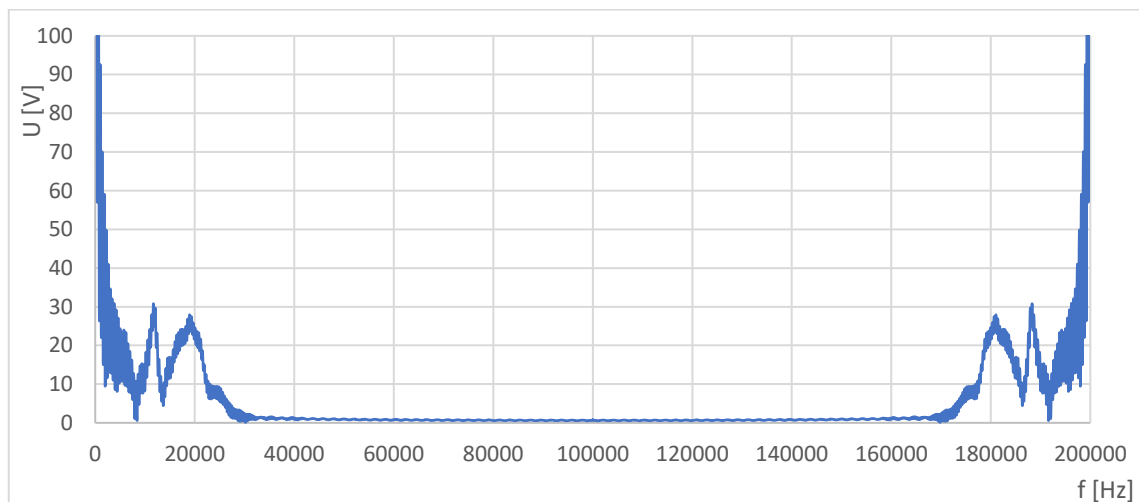
$$f_n = n * \frac{f_s}{N} = n * \frac{1}{\Delta t * N}, n = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (3-10)$$

kde f_s je vzorkovací frekvence signálu, která je rovna převrácené hodnotě vzorkovací periody signálu. Hodnota f_s/N zároveň charakterizuje rozlišení dat ve frekvenční oblasti, které při dané vzorkovací frekvenci roste s rostoucí délkou záznamu, tedy počtem hodnot (Erickson, 2020).

Diskrétní Fourierova transformace je transformace konečných posloupností komplexních čísel a jejím výsledkem je opět konečná posloupnost obecně komplexních čísel (Čížek, 1981). V DFT lze sestavit spektra pro interpretaci dat analogicky jako ve spojitě

variantě podle rovnic (3-6) až (3-8). Rozdíl je v tom, že nyní získáme pouze diskrétní data místo spojitéch funkcí (Klíč, 2002).

Pokud je Fourierova transformace prováděna nad reálným signálem, u něhož je tedy imaginární složka funkčních hodnot nulová, tak je amplitudové spektrum symetrické podle středu výsledného oboru frekvencí, jak je vidět na příkladu na obr. 3-3. Je to způsobeno skutečností, že druhá polovina hodnot Fourierovy transformace je komplexně sdružená s první polovinou a jde o oblast takzvaných záporných frekvencí, které však nemají praktický význam. Pro vyhodnocení signálu ve frekvenční oblasti tedy stačí pouze jedna polovina dat získaných pomocí Fourierovy transformace. Důsledkem je také skutečnost, že pro DFT je rozsah frekvencí složek, na které je původní signál rozložen, od 0 do $f_s/2$ (Smith, 1997).



Obr. 3-3 Ukázka amplitudového spektra signálu s $N=4096$ se zřetelně viditelnou symetrií podle hodnoty $f=100\,000$ Hz.

Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Při výpočtu diskrétní Fourierovy transformace podle rovnice (3-9) je náročnost výpočtu vyjádřena nutným počtem operací rovna $2 \cdot N^2$, což znamená N^2 komplexních součinů a N^2 komplexních součtů. Při velikosti vstupních dat v řádu tisíců hodnot je pak výpočet Fourierovy transformace i při počítačovém zpracování zdlouhavý. Efektivnější algoritmus nazvaný Rychlá Fourierova transformace, zkráceně FFT z anglického *Fast Fourier Transform*, představili v roce 1965 J. W. Cooley a J. W. Tukey (Čížek, 1981).

Algoritmus FFT využívá symetrií při výpočtu Fourierovy transformace a vyžaduje, aby počet členů signálu N byl roven m -té mocnině s určitým základem r :

$$N = r^m \quad (3-11)$$

Obecně je nejefektivnější základ $r=3$, ale pro výpočet pomocí počítačů pracujících s binárními hodnotami je nejvýhodnější základ $r=2$. Ten je trochu méně efektivní, ale má jiné výhody při zpracování algoritmu v počítači, a proto se používá nejčastěji. Algoritmus FFT vyžaduje $r \cdot N \cdot m$ operací, což je zejména pro větší hodnoty N velká úspora výpočetního výkonu a času oproti $2 \cdot N^2$ operací u obecné DFT. Např. pro 1024 prvků signálu tedy vyžaduje FFT přibližně 100x méně výpočetních operací a pro 16 384 prvků je to již více než 1000x méně operací (Cooley, 1965).

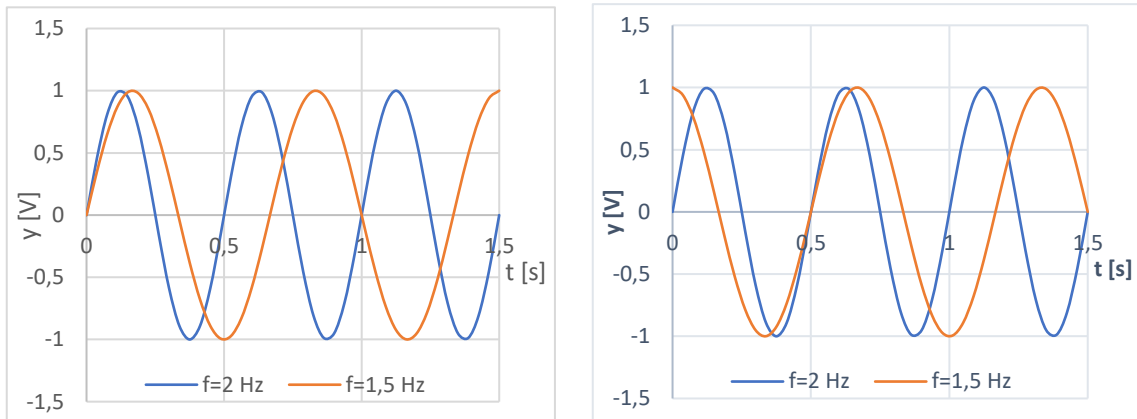
3.3.2 Určení rychlosti šíření signálu pomocí FFT

Rychlost šíření signálu prostředím mezi dvěma body lze určit pomocí metody fázového posunu ve frekvenčním spektru. Rychlost se obecně spočítá podle vzorce (3-1) a pro její vyhodnocení je kromě dráhy nutné určit dobu šíření vlnění, kterou lze odvodit ze sklonu křivky závislosti fáze, resp. fázového posunu vlnění na jeho frekvenci pomocí vztahu:

$$t = \frac{d\phi}{2\pi \cdot df} = \frac{dN}{df} = tg \alpha, \quad (3-12)$$

kde druhá rovnost platí, protože z fázového posunu Φ , s jednotkou [rad], lze spočítat počet vln prostým vydělením hodnotou 2π . Tato metoda předpokládá stejnou rychlost šíření vlnění prostorem pro všechny frekvence (Camacho-Tauta, 2015).

dN je diferenciální rozdíl počtu vln mezi měřenými body odpovídající dvěma vlněním s rozdílem frekvencí df . Protože frekvence vlnění vyjadřuje počet vln za jednotku času, tak lze rozdíl frekvencí df chápat jako počet vln, o který se budou rozcházet dvě vlnění s rozdílem frekvencí df za danou jednotku času (zpravidla sekundu), jak lze vidět na obr. 3-4. Když jsou tedy známy počty vln mezi měřenými body pro jednotlivé frekvence, tak je možné pomocí vztahu (3-12) určit dobu, za kterou daný rozdíl počtu vln vznikl. Pokud je navíc rozdíl frekvencí df dostatečně malý, tedy že mezi měřenými body prostoru je rozdíl počtu vln menší než jedna, tak je možné určit dobu šíření vlnění pouze z relativního rozdílu fáze. V případě porovnávání šíření vlnění různých frekvencí je nutné místo fáze porovnávat fázový posun mezi dvěma body prostoru, protože fáze jednotlivých vlnění v počátečním bodě prostoru se mohou lišit a rozdíl fází v druhém bodě prostoru by tedy neodpovídal rozdílu v počtu vln jednotlivých frekvencí mezi oběma body, jak lze vidět na obr. 3-4.



Obr. 3-4 Odlišné případy vlnění o dvou různých frekvencích. Na obrázku vlevo je počáteční fáze obou vlnění stejná. Na obrázku vpravo se na počátku fáze odlišuje o 90° . Fáze vlnění o frekvenci 1,5 Hz se na konci v jednotlivých případech odlišuje, ale fázový posun tohoto vlnění je v obou případech stejný, tedy $2,25 \cdot 2\pi$ rad.

Závislost fáze na frekvenci se nazývá fázové spektrum a lze ho spočítat z výstupu Fourierovy transformace podle rovnice (3-7). Pro získání závislosti fázového posunu dvou signálů, tedy záznamů vlnění ve dvou bodech prostoru, je však nutné spočítat takzvané křížové spektrum, anglicky *Cross Spectrum*. Křížové spektrum se počítá dle vztahu:

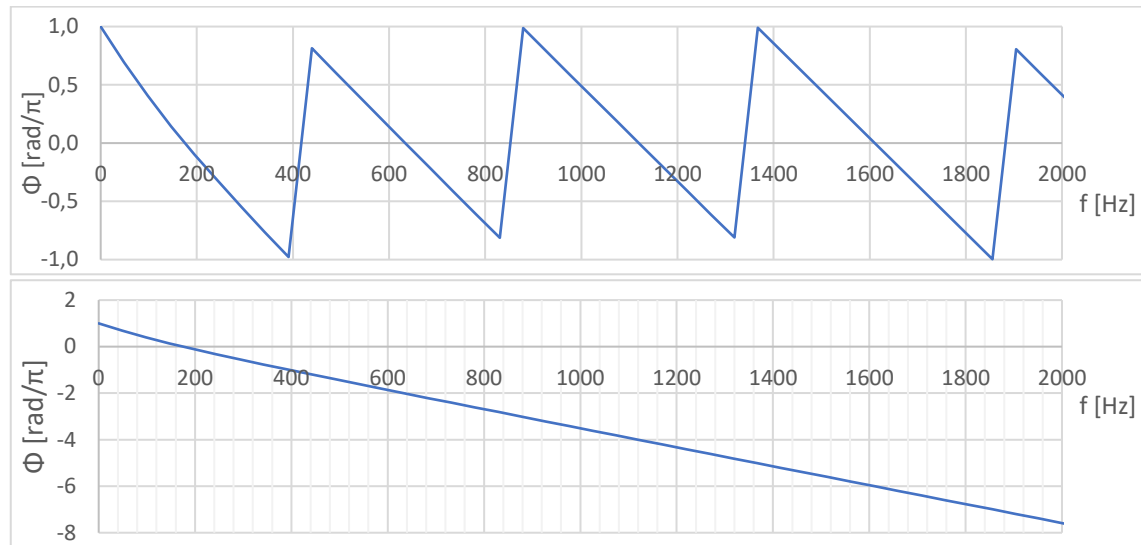
$$S_{AB}(f) = A^*(f) \cdot B(f), \quad (3-13)$$

kde $A(f)$ a $B(f)$ jsou Fourierovy transformace jednotlivých signálů, přičemž jde obecně o komplexní čísla. Hodnota $A^*(f)$ je komplexně sdružená k hodnotě $A(f)$ a výsledné hodnoty křížového spektra jsou opět obecně komplexní čísla (Herlufsen, 1984).

Křížové spektrum představuje základní funkci popisující souvislost mezi dvěma signály. Analogicky s rovnicí (3-6) lze pro křížové spektrum spočítat amplitudové spektrum, které odpovídá součinu amplitudových spekter jednotlivých signálů. Podobně jako v rovnici (3-7) lze spočítat také fázové spektrum, které v tomto případě představuje spektrum fázového posunu pro jednotlivé frekvence, které se používá pro určení doby šíření vlnění (Herlufsen, 1984).

Pomocí funkce arkustangens v rovnici (3-7) vznikne pouze spektrum v rozsahu funkčních hodnot $\langle -\pi; \pi \rangle$, které se nazývá sbalené (*wrapped*) spektrum. Pro určení sklonu fázového spektra je nutné jej rozbalit. To se provádí tak, že pokud je pro sousední frekvence rozdíl fází větší než π radiánů, tak se k druhé hodnotě připočítávají násobky $\pm 2\pi$ radiánů, dokud

není rozdíl hodnot menší než π radiánů (The MathWorks, Inc., 2021). Ukázka sbaleného a rozbaleného spektra je na obr. 3-5.



Obr. 3-5 Sbalené (nahore) a rozbalené (dole) fázové spektrum. Na svislé ose jsou zde násobky π -radiánů.

U skutečných měření při průchodu vlnění vzorkem zeminy konečné velikosti není sklon fázového spektra konstantní pro všechny frekvence vlivem odrazů a skládání vln šířících se vzorkem, ale je konstantní pouze na omezeném intervalu frekvencí. Tento interval byl při vyhodnocení měření v této práci určován primárně manuálně, ale později byl navržen i algoritmus pro automatické stanovení intervalu frekvencí s konstantním sklonem fázového spektra, který je popsán v kapitole 3.3.3.

3.3.3 Automatizované vyhodnocení sklonu fázového spektra skutečných signálů

Pro automatizování procesu určení intervalu frekvencí, na kterém je závislost fázového posunu na frekvenci konstantní, byl zvolen programovací jazyk *Python*. Kód v jazyce *Python* byl psán a laděn v software *MS Visual Studio Code*. Závěrečné stanovení modulu G_0 a porovnání jednotlivých měření bylo provedeno v programu *MS Excel*.

V následujícím popisu je vektorem myšlena jednorozměrná matice. V algoritmu jsou použity následující vektory:

- *frekvence_vek* – vektor frekvencí z křížového spektra
- *faze_vek* – vektor rozbalených fázových posunů z křížového spektra
- *faze_vek_cor* – vektor opravených fázových posunů o vliv nastavení LP filtru

dle kapitoly 6.1.2

- *interval_frek_vek* – vektor intervalů frekvencí
- *prum_1_der* – vektor průměrů prvních derivací kubické spline pro jednotlivé intervaly frekvencí z *interval_frek_vek*
- *sklon_vek* – vektor sklonů vyhodnocených pro jednotlivé faktory vyhlazení spline

Algoritmus pro určení sklonu závislosti fázového posunu na frekvenci pro křížové spektrum každého páru vyslaného a přijatého signálu funguje podle následujícího schématu:

- načtení *frekvence_vek* a *faze_vek*
- vytvoření *faze_vek_cor*
- cyklus přes faktor vyhlazení od 20 do 80 s krokem 2
 - výpočet kubického spline s daným faktorem vyhlazení pro opravené fázové spektrum podle vektorů *frekvence_vek* a *faze_vek_cor*
 - spočítání první derivace kubického spline
 - spočítání druhé derivace kubického spline
 - vytvoření *interval_frek_vek*
 - jsou vygenerovány všechny intervaly mezi frekvencemi od 7 kHz do 25 kHz s krokem 50 Hz a s délkami od 1 kHz do 7,5 kHz s krokem 100 Hz
 - odstranění intervalů frekvencí z *interval_frek_vek*, na kterých je průměrná hodnota druhé derivace spline větší než $2 \cdot 10^{-8}$
 - odstranění intervalů frekvencí z *interval_frek_vek*, na kterých je minimální hodnota první derivace spline záporná
 - odstranění intervalů frekvencí z *interval_frek_vek*, na kterých je směrodatná odchylka druhé derivace spline větší než 10^{-7}
 - výpočet *prum_1_der*
 - cyklus od 1 do 3
 - výpočet průměru a směrodatné odchylky pro *prum_1_der*
 - odstranění takových hodnot *prum_1_der*, které se odlišují od průměru *prum_1_der* o více, než je hodnota směrodatné odchylky hodnot *prum_1_der*
 - přidání průměru hodnot *prum_1_der* k vektoru *sklon_vek*

- cyklus od 1 do 3
 - výpočet průměru a směrodatné odchylky pro *sklon_vek*
 - odstranění takových hodnot z *sklon_vek*, které se odlišují od průměru *sklon_vek* o více než je hodnota směrodatné odchylky *sklon_vek*
- konečná hodnota průměru hodnot *sklon_vek* je stanoveným sklonem závislosti fázového posunu na frekvenci

Jednotlivé koeficienty v algoritmu byly naladěny tak, aby byla výsledkem hodnota sklonu odpovídající přímé části fázového spektra.

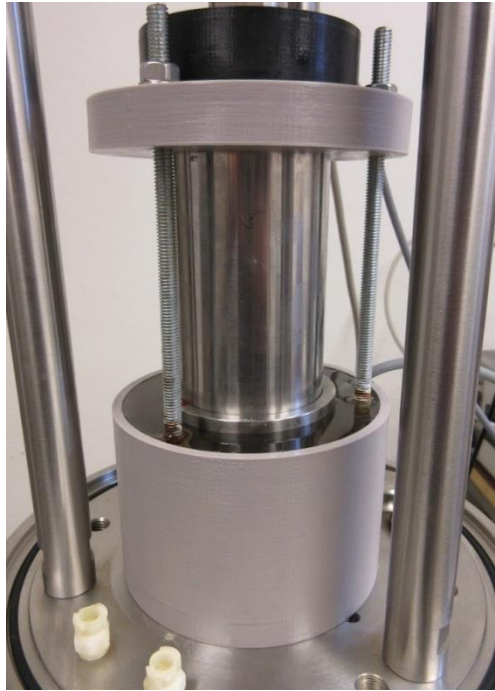
4 PŘÍPRAVEK PRO MĚŘENÍ G_0 ZA EDOMETRICKÝCH PODMÍNEK

Pro měření smykového modulu G_0 za edometrických podmínek bylo nutné navrhnout a vyrobit přípravek umožňující umístění bender elementů do podstav vzorku zeminy, přes které je nanášeno zatížení. Popis přípravku je v následující kapitole 4.1.

Celý přípravek byl vymodelován v software Autodesk Fusion 360 pro 3D modelování a CAD. V první fázi byly všechny části vyrobeny jako prototyp na 3D tiskárně. 3D tisk byl proveden technologií FFF, při které je materiál ve formě tiskové struny vytlačován nahřátou tiskovou hlavou a po jednotlivých vrstvách je nanášen do požadovaného tvaru. Jednotlivé výtisky jsou tvořeny takzvanými perimetry, což jsou paralelní vrstvy materiálu po obvodu výtisku, a vnitřní výplní, která obsahuje dutiny a umožňuje tak ušetření materiálu a tiskového času. Celková pevnost výtisku je určena zejména počtem perimetrů. Pro výrobu přípravku byl použit materiál PETG, tedy polyethylentereftalát s přidaným glykolem kvůli optimalizaci 3D tisku, který je jedním z nejběžnějších materiálů pro tuto metodu tisku a má dobré mechanické a technologické vlastnosti (Stříteský, 2019).

Tento plastový přípravek byl použit pro zkoušky rekonstituovaných vzorků a vzorků odebraných metodou jádrových vývrtů. Z důvodů možného poškození plastových podstav, a tedy i přerušení zkoušky, bylo svislé napětí vzorku omezeno na 1200 kPa. Tato hodnota byla zvolena na základě pokusného zatěžování samotné horní podstavy, kdy při větších zatíženích došlo k poškození podstavy. I v této plastové variantě byla použita trubka z korozivzdorné oceli a ocelové šrouby.

V druhé fázi byla horní a dolní podstava vzorku z důvodů velkého namáhání při větším zatížení vyrobena z korozivzdorné oceli. Obecně pro edometrické zkoušky jsou totiž požadované vyšší hodnoty svislého zatížení, kterých není možné s plastovým prototypem dosáhnout. Korozivzdorná ocel byla použita z důvodu dlouhodobého styku podstav s vodou během zkoušek a také s ohledem na cenu a dostupnost výroby v porovnání s jinými korozivzdornými kovy. S ohledem na cenu výroby ocelových částí a nízké mechanické namáhání nebyly vyrobeny z korozivzdorné oceli žádné další části přípravku, kromě dosedacího šroubu. Konečná varianta přípravku s osazeným vzorkem je zobrazena na obr. 4-1.



Obr. 4-1 Fotografie přípravku s osazeným vzorkem zeminy a kovovými podstavami.

Před výrobou ocelového přípravku byly zároveň optimalizovány některé detaily podstav s ohledem na možnosti výroby. V případě 3D tisku jde totiž o aditivní technologii, která je omezena přidáváním vrstev v jednom směru a zároveň nejsou optimální přečnickující části s velkým odklonem stěn od svislice. Je také výhodné minimalizovat množství materiálu s ohledem na jeho spotřebu a dobu tisku. U ocelové varianty probíhá výroba odebíráním materiálů z počátečního zárodku, například ve formě tyče či kvádrů. Cena materiálu je daná počátečním zárodkem a zbytečné odstraňování materiálu zvyšuje pracnost, tedy dobu a cenu práce. Takto se například odlišuje svislé drážkování horní podstavy, kdy u tištěné varianty bylo navrženo pouze několik výstupků pro centraci uvnitř trubky a v případě ocelové varianty bylo naopak zvoleno pouze vytvoření několika drážek pro umožnění zalití vzorku vodou, viz kap. 4.1.

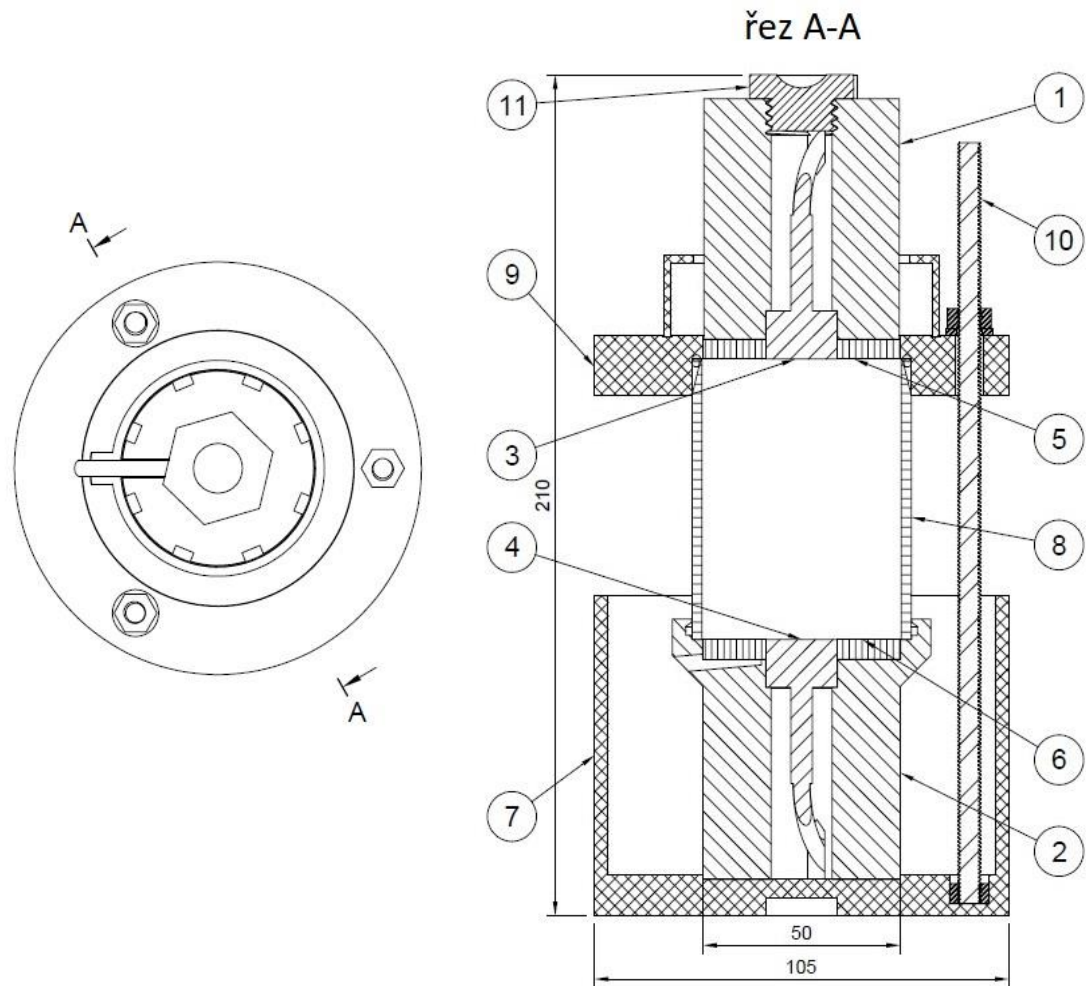
4.1 Popis přípravku

V této kapitole bude popsána pouze varianta přípravku s využitím podstav z korozi-vzdorné oceli, neboť celoplastová varianta plnila zejména funkci prototypu a odlišnosti v konstrukčních detailech nemají vliv na princip a funkčnost přípravku.

Přípravek se skládá z následujících částí, které jsou zobrazené na obr. 4-2:

- 1) Horní podstava – slouží k zatěžování vzorku ve svislém směru, je navržena tak, aby umožnila zabudování pouzdra bender elementu a průchod kabelu od bender elementu ke generátoru signálu. Pouzdro bender elementů je fixované vůči horní podstavě i vzorku pomocí osazení pouzdra bender elementu většího průměru, než jaký má dutina pro průchod kabelu uvnitř podstavy. Maximální vnější průměr horní podstavy je menší než vnitřní průměr trubky. Je tak možné zatěžovat vzorek zeminy menší výšky, než je výška trubky. Po vnějším obvodu podstavy jsou také svislé drážky pro snazší přístup vody od horního prstence k drenážní destičce.
- 2) Spodní podstava – podpírá vzorek s trubkou a svojí výškou zajišťuje umístění spodního bender elementu do vzorku bez poškození jeho datového kabelu. V horní části podstavy je rozšíření pro horizontální fixaci a centraci trubky se vzorkem. Pod horním rozšířením je po obvodu několik horizontálních kanálků pro přívod vody z vaničky ke spodní podstavě vzorku skrze drenážní destičku.
- 3) Horní bender element – včetně pouzdra a kabelu, není zobrazen samotný bender element vyčnívající z pouzdra do vzorku.
- 4) Spodní bender element – stejná funkce jako u horního bender elementu.
- 5) Horní drenážní destička – umožňuje odvodnění nebo sycení vzorku zeminy a zároveň přenos zatížení z horní podstavy na vzorek. Je v ní také otvor pro prostup pouzdra bender elementu.
- 6) Spodní drenážní destička – stejná funkce jako u horní drenážní destičky.
- 7) Vanička – po naplnění vodou umožňuje omezit vysychání vzorku zajištěním trvalého zavodnění spodní drenážní destičky a odvodňovacích kanálků uvnitř spodní podstavy. Jsou v ní také upevněné šrouby pro přidržování horního prstence.
- 8) Trubka – uvnitř je umístěn vzorek zeminy průměru 50 mm. Vzorek zeminy má obvykle menší výšku než trubka s ohledem na požadavky edometrické zkoušky. Jde o trubku z korozivzdorné oceli s hrotem pro vyřezávání vzorku zeminy potřebného průměru z původního vzorku větších rozměrů. Má stejný průměr jako edometrický prstenec, ale výšku 98 mm, což je výrazně více než 20 mm u standardního edometrického prstence pro průměr vzorku 50 mm.

- 9) Horní prstenec – jeho spodní část slouží k fixaci a stabilizaci trubky se vzorkem i spodní podstavu. Toho je dosaženo pomocí 3 šroubů pravidelně rozmístěných po obvodu prstence a ukotvených ve vaničce. Nástavec na jeho horní části vytváří nádobu umožňující zalévání horní podstavu vzorku pro zamezení jeho vysychání.
- 10) Šrouby – jsou upevněné ve vaničce a přidržují horní prstenec.
- 11) Dosedací šroub – slouží k přenosu zatížení z kulového čepu lisu na horní podstavu a uzavírá také otvor pro vstup kabelu v horní podstavě.



Obr. 4-2 Pohled shora na přípravek (vlevo) a příslušný svislý řez celou sestavou (vpravo). Jednotlivé očíslované části jsou popsány v kapitole 4.1. Jde o variantu s podstavami z korozivzdorné oceli.

5 PLÁN LABORATORNÍCH ZKOUŠEK A PŘÍPRAVA VZORKŮ

V rámci této práce byly provedeny tři sady laboratorních zkoušek pro odlišné typy vzorků zemin. Všechny typy vzorků pochází z jedné lokality, kterou je ulice Křenová v Brně, ale odlišují se způsobem odběru vzorku. Testované byly postupně rekonstituované vzorky, vzorky z jádrových vývrtů a neporušené vzorky. Jednotlivé typy vzorků jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách 5.1 až 5.3. Z hlediska klasifikace zemin jde podle (ČSN EN ISO 14688-2, 2005) o jílu (Cl) pevné konzistence a podle (ČSN 73 6133, 2010) jde o zeminu třídy F8, tedy jílu s vysokou plasticitou (CH).

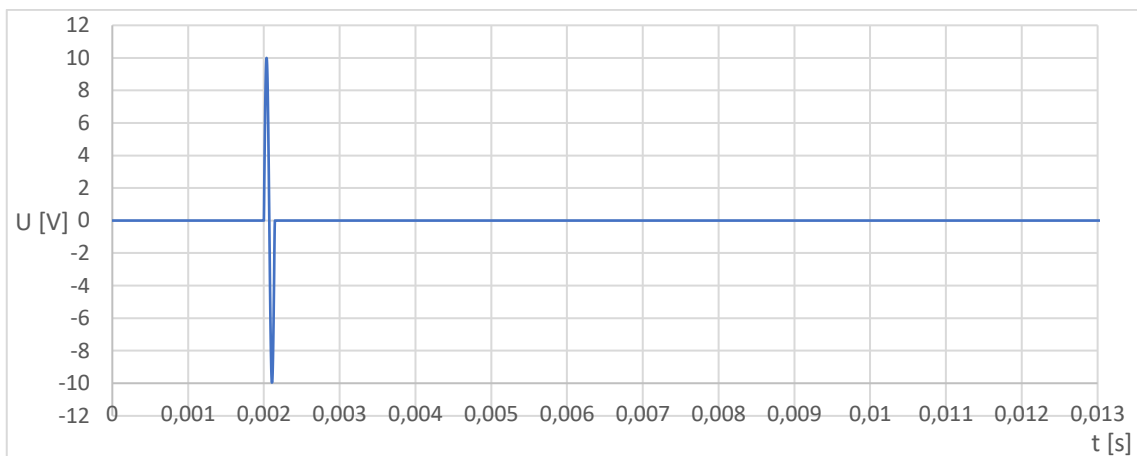
Pro každý typ vzorku byly provedeny dvě zkoušky v edometrickém přístroji, pro který byl navržen přípravek pro osazení senzorů umožňujících měření tuhosti zeminy při velmi malých přetvořeních, který je detailně popsán v kapitole 4. Vzhledem k tomu, že průběžně docházelo k úpravám a postupnému vývoji navrženého přípravku, tak se jednotlivé zkoušky odlišují sledem zatěžovacích stupňů i maximální hodnotou aplikovaného zatížení, která se postupně zvyšovala.

Základní délka zatěžovacího stupně byla 24 h, což je v běžně používaná doba při edometrické zkoušce dle (ČSN EN ISO 17892-5, 2017). Z důvodu několikatýdenní délky provádění zkoušky jednoho vzorku zeminy a rozhodnutí pro vyloučení vlivu LP filtru, který je u použitého osciloskopu manuálně ovládaný, bylo u zatěžovacích stupňů započatých v pátek provedeno vyhodnocení až v pondělí, protože změna nastavení LP filtru vyžaduje fyzickou přítomnost obsluhy. Podobná situace nastala v případě státního svátku, kdy opět došlo k prodloužení zatěžovacího stavu. Vlivu LP filtru se podrobněji věnuje kapitola 6.1.3.

Z důvodu ověření nezávislosti výsledku měření na zvoleném vyslaném signálu byly všechny sady měření prováděny s více nastaveními frekvence vyslaného signálu a pro pozdější vzorky byla navíc přidána měření s druhým tvarem vyslaného signálu.

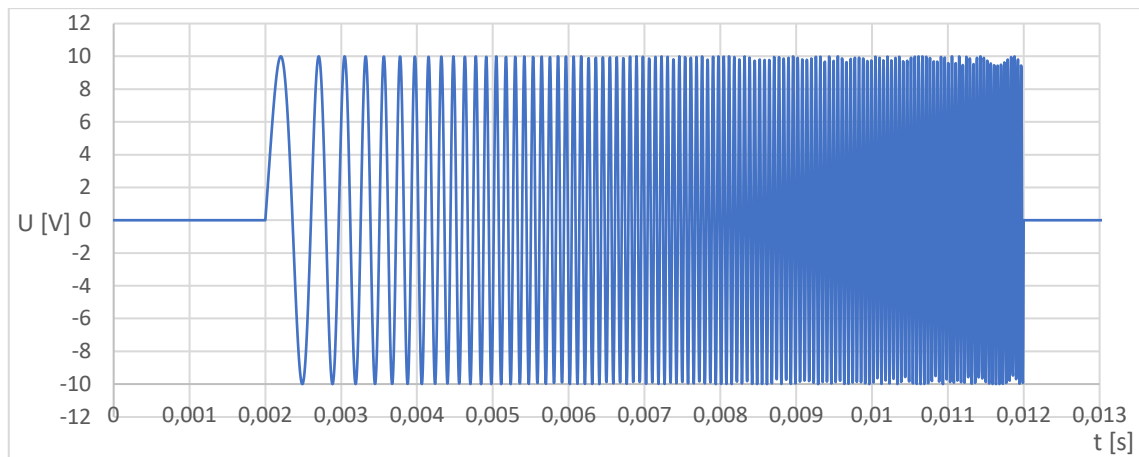
Prvním tvarem vyslaného signálu je jedna celá sinusová vlna. Ukázka takového signálu je na obr. 5-1. Pro ni byly zvoleny frekvence 7 kHz, 11 kHz, 15 kHz, 19 kHz a pro pozdější vzorky byly ještě přidány frekvence 23 kHz a 27 kHz. Ukázalo se, že přijaté signály odpovídající vyslaným signálům dvou nejnižších frekvencí mohou být zkrácené,

pravděpodobně vlivem jevu *Near-field effect*. V některých případech nebylo možné z takového signálu určit dobu šíření vlnění, případně se takto určená doba výrazně odlišovala od hodnot získaných vyhodnocením vyšších frekvencí, u kterých byla vzájemně srovnatelná. Protože je ale časová náročnost provedení sady měření jedné frekvence relativně malá, menší než jedna minuta, tak byly měření s těmito nízkými frekvencemi provedeny u všech vzorků. Vyhodnocení měření s vyslaným signálem tvaru jedné sinusové vlny bylo prováděno metodou *Visual Picking* i metodou křížového spektra.



Obr. 5-1 Vyslaný signál tvaru jedné sinusové vlny, v tomto případě o frekvenci 7 kHz.

Druhým použitým tvarem vyslaného signálu byl tzv. *linear sweep*. *Linear sweep* je signál pevné časové délky tvořený navazujícími sinusovými vlnami, u kterých se lineárně mění frekvence v rozsahu dvou zadaných hodnot. Příklad je uveden na obr. 5-2. Během měření byla použita délka signálu 0,01 sekundy a zvolené intervaly frekvencí jsou 11 až 19 kHz, 11 až 15 kHz a 11 až 13 kHz. U pozdějších vzorků byly ještě pro vzájemné srovnání experimentálně prováděny měření s vyslaným signálem s intervaly 19 až 23 kHz a 1 až 23 kHz. Odpovídající přijatý signál nelze vyhodnotit metodou *Visual Picking*, ale v této práci bylo vyhodnocení provedeno pouze metodou křížového spektra.



Obr. 5-2 Vyslaný signál tvaru linear sweep. Interval frekvencí je 1 až 23 kHz a celková délka signálu je 0,01 s. Odchytky v amplitudě v části s vysokými frekvencemi jsou dané vzorkovací frekvencí, kdy již v digitální podobě nebyl zaznamenán bod signálu přímo na vrcholu vlny.

Pro vyhodnocení zkoušek bylo nutné znát hodnoty některých veličin, které nebyly v této práci měřeny. První z nich je hustota pevných částic brněnského jílu ρ_s , která se využívá při výpočtu čísla pórovitosti. V článku (Horák, 1982) je pro brněnský jíl uváděn rozsah hustoty pevných částic 2570 až 2780 kg/m³. Svoboda (2010) udává hodnotu 2660 kg/m³. Pro vyhodnocení měření v této práci byl zvolen odhad 2700 kg/m³, který zároveň poskytuje realistické hodnoty stupně nasycení vzorku. Při použití menších hodnot hustoty pevných částic vycházel pro některé vzorky podle vztahu (5-1) stupeň nasycení S_r větší než 1.

$$S_r = \frac{\frac{w \cdot m_d}{\rho_{H_2O}}}{V - \frac{m_d}{\rho_s}}, \quad (5-1)$$

kde je dále w vlhkost vzorku, m_d hmotnost vysušeného vzorku, ρ_{H_2O} hustota vody a V objem vzorku.

Druhým parametrem je kritický úhel vnitřního tření zeminy ϕ' , který je nezbytný pro výpočet součinitele zemního tlaku a následně k určení středního napětí. Hodnota úhlu vnitřního tření byla převzata s hodnotou 24,6° z měření prováděných na vzorcích odebraných ze stejné lokality dříve na Ústavu geotechniky, Fakulty stavební, VUT v Brně v rámci práce (Rozmánek, 2020).

Vlhkost vzorků byla ve všech případech určena z materiálu odstraněného při úpravě rozměrů vzorku před osazením do edometrického přístroje, který byl vysoušen při teplotě 105 °C po dobu 24 h.

Výška každého z použitých bender elementů, která je umístěna ve vzorku zeminy, je 9,3 mm.

5.1 Rekonstituované vzorky

Rekonstituované vzorky jsou vzorky vytvořené v laboratoři z odebrané zeminy, která je rozmělněna a následně přivlhčena tak, že vznikne homogenní kaše. Tato kaše je následně konsolidovaná za podmínek jednoosé stlačitelnosti (Burland, 1990).

Výsledkem by měl být vzorek dostatečně tuhý, aby s ním bylo možné manipulovat a upravit jeho rozměry dle požadavků některé z plánovaných laboratorních zkoušek, jako je například triaxiální zkouška nebo edometrická zkouška (ČSN EN 1997-2, 2008).

Hlavním důvodem pro přípravu a zkoušení rekonstituovaných vzorků je možnost měřit takzvané vnitřní nebo také skutečné vlastnosti zemin, anglicky *intrinsic properties*, i v případě, že není k dispozici vzorek dostatečné kvality. Tyto vnitřní vlastnosti jsou pro danou zeminu konstantami a nezávisí tedy na stavu zeminy popsaném např. efektivním napětím a stupněm překonsolidace, případně číslem pórovitosti. Mezi vnitřní vlastnosti se řadí například index stlačitelnosti C_c nebo kritický úhel vnitřního tření ϕ'_{cr} (Boháč, 2009).

Vstupní surovinou mohou být například porušené vzorky. Před rozmělněním nemá být prováděno vysoušení vzorku při vysokých teplotách, při kterém by mohlo dojít ke změně mikroskopické struktury a vlastností materiálu. Podle Burlanda (1990) má být přivlhčením rozmělněné zeminy dosaženo 1 až 1,5–násobku vlhkosti na mezi tekutosti. Česká norma (ČSN EN 1997-2, 2008) udává dvojnásobek vlhkosti na mezi tekutosti. Takto připravená kaše je následně nalita do konsolidačního válce, kde je postupně zvyšováno zatížení. Obě podstavy vzorku mají být opatřeny drénováním, které zajistí odvodnění, aniž by unikaly částice zeminy.

Příprava a výroba rekonstituovaných vzorků nebyla předmětem této práce, ale byly využity vzorky vyrobené na Ústavu geotechniky, Fakulty stavební, VUT v Brně v rámci práce (Rozmánek, 2020). Původní porušené vzorky zeminy, ze kterých byl rekonstituovaný vzorek vyroben, byly odebrány z hloubky 15 m. Při přípravě rekonstituovaných vzorků byla použita kaše s vlhkostí upravenou na hodnotu 73 % a zemina následně konsolidovala ve válcích o vnitřním průměru 50 mm při svislém napětí

postupně zvyšovaném až na hodnotu 100 kPa. Ukázka použitého konsolidačního válce je na obr. 5-3.



Obr. 5-3 Konsolidační válec pro přípravu rekonstituovaných vzorků. Svislé tyče slouží k nanesení napětí na horní povrch vzorku.

Oba vzorky pro osazení do upraveného edometrického přístroje byly vytvořeny z jednoho rekonstituovaného vzorku větší výšky. V konsolidačním válci byly tedy umístěné původně nad sebou.

Při přípravě vzorku pro edometrickou zkoušku byl vzorek přetlačen z konsolidačního válce do trubky v upraveném edometrickém přístroji a zároveň byla upravena jeho délka. Nakonec byly v podstavách vzorku vytvořeny drážky pro umístění bender elementů.

Protože byly oba válce velmi podobného, avšak nikoliv přesně stejného průřezu, tak byla na začátku edometrické zkoušky provedena takzvaná rekonsolidace, při které se odstraní případné malé dutiny mezi vzorkem a trubkou edometrického přístroje. Je to procedura, při které je na vzorek po dobu 22 hodin aplikováno napětí odpovídající původnímu konsolidačnímu napětí, následně je na 2 hodiny napětí sníženo na nějakou nízkou hodnotu a pak je opět na 22 hodin aplikováno původní konsolidační napětí. U takového cyklu zatížení se pak vyhodnocuje změna osového přetvoření vzorku mezi dvěma po sobě následujícími zatěžovacími stupni o hodnotě původního konsolidačního napětí a je požadováno, aby tento rozdíl byl menší než $0,003 \cdot h_0$, kde h_0 je původní výška vzorku při

osazení vzorku do edometrického přístroje. Pokud je podmínka splněna, tak se pokračuje v plánovaném průběhu edometrické zkoušky. V případě, že podmínka není splněna, tak se rekonsolidační cyklus opakuje, dokud není rozdíl daných přetvoření dostatečně malý.

5.1.1 První zkouška rekonstituovaného vzorku

První zkouška byla provedena v přípravku ve variantě s plastovými podstavami a na mechanickém edometrickém přístroji, který je zobrazen na obr. 5-4. Zatěžování tedy probíhalo přidáváním jednotlivých závaží pomocí pákového mechanismu. Také čtení deformací probíhalo ručně z instalovaných indikátorových hodinek. Interval čtení deformací byl z počátku po změně zatížení 5 minut a dále byl postupně prodlužován až na 15 minut. Čtení deformací probíhalo pouze po dobu několika hodin před a za okamžikem změny zatížení, když byla fyzicky přítomná obsluha.

První rekonstituovaný vzorek měl při osazení následující vlastnosti:

počáteční výška vzorku: $h_0 = 49,3 \text{ mm}$

hmotnost vlhkého vzorku při osazení: $m = 169,4 \text{ g}$

vlhkost vzorku při osazení: $w = 47,0 \%$

objemová hmotnost vysušeného vzorku při uložení: $\rho_d = 1167 \text{ kg/m}^3$

číslo pórovitosti vzorku při uložení: $e = 1,31$

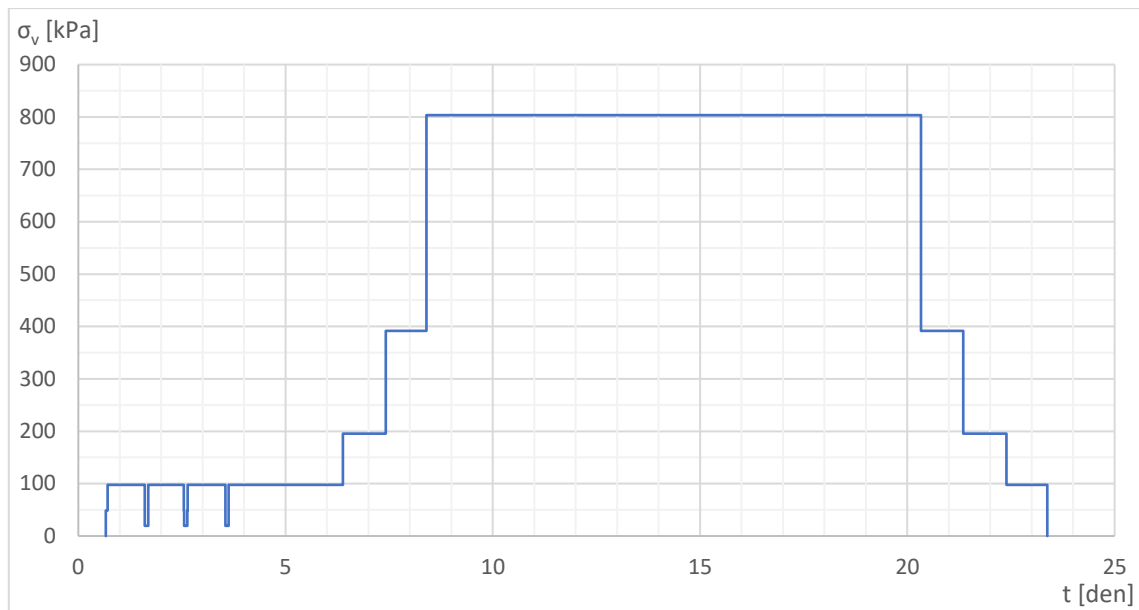
Protože byl použit mechanický edometrický přístroj, tak zatěžovací stavy nebyly přesně desítky nebo stovky kPa, ale od takto zaokrouhlených hodnot se odlišovaly v řádu jednotek kPa z důvodu hmotnosti dostupných závaží a charakteristik pákového mechanismu přístroje. Tyto odchylky však byly respektovány při vyhodnocení indexu stlačitelnosti C_c a indexu odlehčení C_{cr} i při vyhodnocení smykového modulu G_0 .



Obr. 5-4 Mechanický edometrický přístroj s pákovým mechanismem zatěžování. Na této fotografii bez osazeného vzorku a přípravku pro upevnění bender elementů.

Na počátku zkoušky byly provedeny tři rekonsolidační cykly, než bylo dosaženo podmínky maximálního rozdílu deformace $0,003 \cdot h_0$. Podmínka byla u posledního rekonsolidačního cyklu splněna i přesto, že hodnota deformace po opětovném přitížení na 100 kPa byla odečtena až po třech dnech. S ohledem na dostupná závaží byly rekonsolidační cykly prováděny mezi zatěžovacími stupni 100 kPa a 20 kPa.

Po rekonsolidaci byly naplánovány postupně zatěžovací cykly 200 kPa, 400 kPa a 800 kPa. První měření smykového modulu G_0 bylo provedeno krátce před přitížením vzorku na úroveň 200 kPa. Maximální hodnota zatížení byla zvolena s ohledem na možnosti přidávání závaží a také proto, že šlo o první zkoušku s 3D tištěnými podstavami vzorku. Nejvyšší zatížení bylo ponecháno na vzorku po dobu 12 dnů. Měření smykového modulu G_0 bylo u tohoto stupně provedeno po 24 hodinách od nanesení zatížení a pak podruhé těsně před odtížením vzorku. Následně bylo postupně provedeno odtížení vzorku. Poslední měření smykového modulu G_0 bylo provedeno na konci zatěžovacího stupně 100 kPa. Celý průběh zkoušky je zobrazen na obr. 5-5.



Obr. 5-5 Průběh zatěžování prvního rekonstituovaného vzorku. Hranice mezi dny odpovídá vždy půlnoci, jde tedy o pořadové dny zkoušky.

5.1.2 Druhá zkouška rekonstituovaného vzorku

Druhý rekonstituovaný vzorek byl zatěžován pomocí automatického zatěžovacího rámu, zobrazeném na obr. 5-6, a během zkoušky byl zároveň použitý lineární snímač dráhy s automatickým ukládáním dat. Pro ukládání dat byl zvolena frekvence záznamu 1,5 min. Příliš vysoká frekvence by vedla k velkému nárůstu množství dat, což následně komplikuje jejich zpracování. Při nanášení zatížení byla použita rychlost 3 kPa/min.

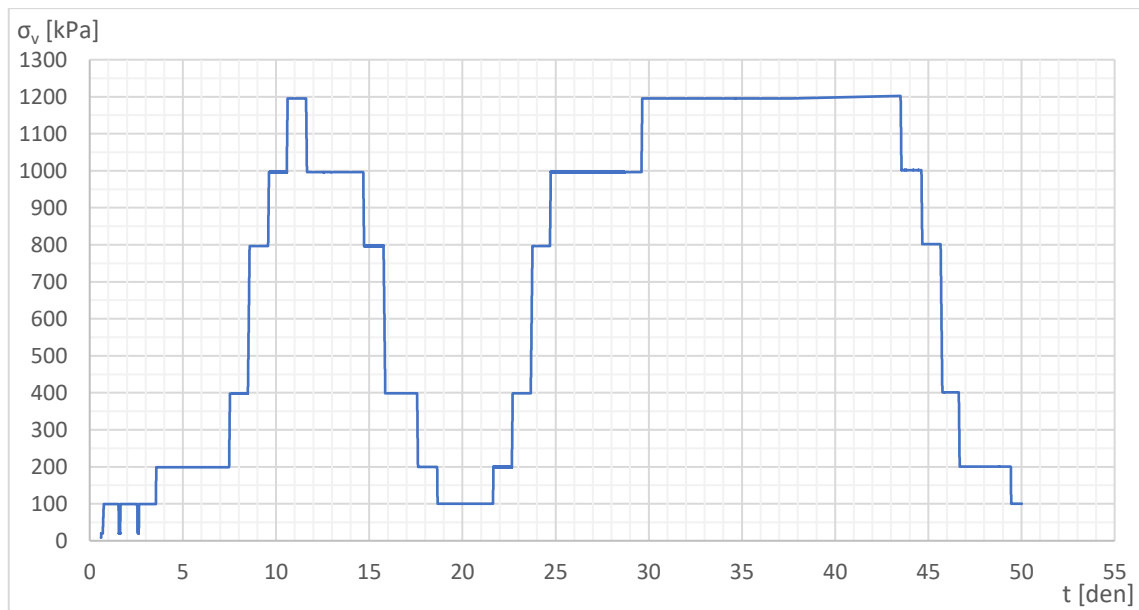


Obr. 5-6 Automatický zatěžovací rám používaný pro zkoušku druhého rekonstituovaného vzorku i všechny následující zkoušky.

Na začátku zkoušky bylo nutné provést dva rekonsolidační cykly pro splnění podmínky rozdílu deformací. Interval napětí při rekonsolidačním cyklu byl 20 až 100 kPa. Během zkoušky byly provedeny dva zatěžovací cykly se stupni 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa, 1000 kPa a 1200 kPa. Maximální hodnota zatížení byla zvolena z důvodu únosnosti 3D tištěných podstav přípravku. Stupeň 1000 kPa byl přidán, aby bylo možné sledovat chování podstav přípravku v oblasti zatížení blízcí se jeho únosnosti. Mezi zatěžovacími cykly proběhlo postupné odtížení na 100 kPa. Během prvního cyklu bylo na vzorku ponecháno maximální zatížení po dobu 24 hodin a při druhém cyklu bylo maximální zatížení ponecháno po dobu 14 dní. Celý časový průběh zkoušky je zobrazen na obr. 5-7.

Druhý rekonstituovaný vzorek měl při osazení následující vlastnosti:

počáteční výška vzorku:	$h_0 = 50,5 \text{ mm}$
hmotnost vlhkého vzorku při osazení:	$m = 165,3 \text{ g}$
vlhkost vzorku při osazení:	$w = 47,3 \%$
objemová hmotnost vysušeného vzorku při uložení:	$\rho_d = 1105 \text{ kg/m}^3$
číslo pórovitosti vzorku při uložení:	$e = 1,44$



Obr. 5-7 Časový průběh zatížení druhého rekonstituovaného vzorku. Na vodorovné ose jsou pořadové dny zkoušky s hranicemi vždy o půlnoci.

5.2 Vzorky z jádrových vývrtů

Druhý typ vzorku byl odebrán technologií rotačního jádrového vrtání s jednoduchým jádrovákem. Jádrovák s vrtnou korunkou je upevněn na konci vrtného soustředí, které je za současného otáčení zatlačeno do zeminy. Tato technologie je vhodná pro odběr jílovitých a obecně soudržných zemin. Obvykle je takto odebrán vzorek třídy kvality 4, ale za optimálních podmínek je možné dosáhnout až třídy kvality 2 (ČSN EN ISO 22475-1, 2006). Po odběru není takový vzorek uložen v žádném pouzdru, ale je vzduchotěsně zabalen pro zabránění změn vlhkosti.

Odběr vzorků nebyl předmětem této práce, ale byly použity vzorky ze skladu vzorků Ústavu geotechniky, Fakulty stavební, VUT v Brně.

Vzorky z jádrováku použité pro edometrickou zkoušku a měření modulu G_0 měly průměr přibližně 120 mm a výšku několikanásobně přesahující výšku vzorku potřebnou pro prováděné zkoušky. Z celého vzorku byla tedy nejprve oddělena příčným řezem část o výšce přibližně 70 mm, což je potřebná výška pro zkoušku včetně rezervy pro úpravy ploch podstav vzorku. Tento odříznutý válcový vzorek byl následně vložen do ocelové trubky stejného vnitřního rozměru jako je průměr vzorku z jádrováku. Pak byla do vzorku pomocí hydraulického lisu zatlačena trubka s břitem o vnitřním průměru 50 mm, ve které je vzorek umístěn během zkoušky. Poslední fází přípravy vzorku bylo jeho zkrácení na

výšku přibližně 50 mm a vytvoření drážek v podstavách pro vložení bender elementů. Protože byla trubka s břitem přímo zatlačena do většího vzorku a v této trubce byl vzorek následně testován, tak nebyla na začátku zkoušky prováděna rekonsolidace.

Oba vzorky byly testované v přípravku ve variantě s 3D tištěnými podstavami v automatickém zatěžovacím rámu a s osazeným lineárním snímačem deformací s pravidelným ukládáním dat. Frekvence ukládání dat byla zvolena 2 min. Při zatěžování a odtěžování byla nastavena rychlost 3 kPa/min.

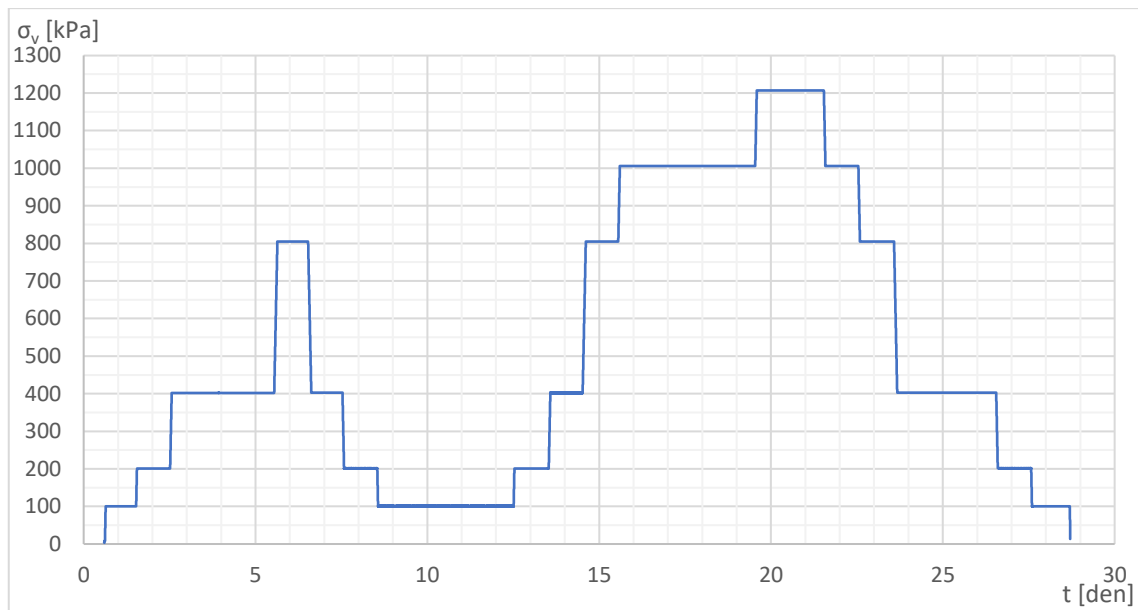
5.2.1 První zkouška vzorku z jádrového vývrtu

Vzorek pro tuto zkoušku byl odebrán z hloubky 11 až 12 m.

Časový průběh zkoušky je zobrazen na obr. 5-8. Při této zkoušce byly provedeny dva zatěžovací cykly s odlišnou maximální hodnotou svislého zatížení. Cílem bylo pozorovat chování zeminy při odtížení z odlišných maximálních úrovní svislého napětí. V prvním cyklu byla zvolena maximální hodnota 800 kPa a v druhém cyklu to bylo 1200 kPa. Vyšší hodnota nebyla zvolena z důvodu únosnosti 3D tištěných podstav přípravku.

První vzorek z jádrového vývrtu měl při osazení následující vlastnosti:

počáteční výška vzorku:	$h_0 = 49,7 \text{ mm}$
hmotnost vlhkého vzorku při osazení:	$m = 185,2 \text{ g}$
vlhkost vzorku při osazení:	$w = 36,5 \%$
objemová hmotnost vysušeného vzorku při uložení:	$\rho_d = 1365 \text{ kg/m}^3$
číslo pórovitosti vzorku při uložení:	$e = 0,98$



Obr. 5-8 Časový plán zkoušky s prvním vzorkem z jádrového vývrtnu. Na časové ose jsou uvedeny pořadové dny zkoušky s hranicí vždy o půlnoci.

5.2.2 Druhá zkouška vzorku z jádrového vývrtnu

Druhý vzorek z jádrového vývrtnu byl odebrán v hloubce 19,5 až 20 m.

Během této zkoušky byl proveden jeden zatěžovací cyklus, jak lze vidět na obr. 5-9. Maximální hodnota svislého napětí byla zvolena 1200 kPa ze stejných důvodů jako u předchozích zkoušek.

Druhý vzorek z jádrového vývrtnu měl při osazení následující vlastnosti:

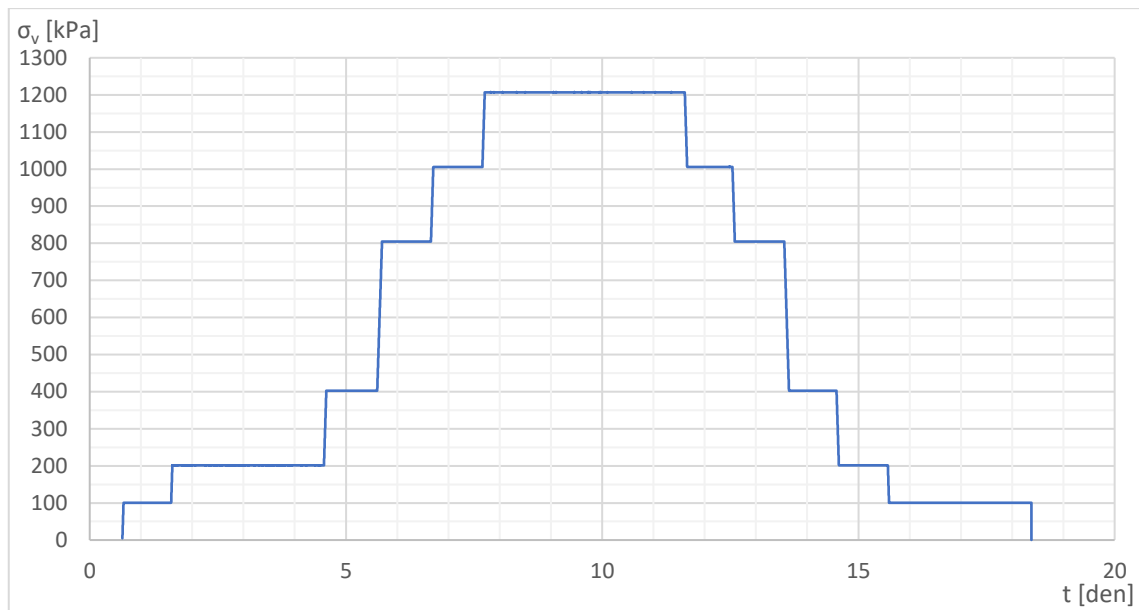
počáteční výška vzorku: $h_0 = 51,7 \text{ mm}$

hmotnost vlhkého vzorku při osazení: $m = 198,3 \text{ g}$

vlhkost vzorku při osazení: $w = 31,4 \%$

objemová hmotnost vysušeného vzorku při uložení: $\rho_d = 1459 \text{ kg/m}^3$

číslo pórovitosti vzorku při uložení: $e = 0,85$



Obr. 5-9 Časový průběh zkoušky druhého vzorku z jádrového vývrtu. Na časové ose jsou uvedeny pořadové dny zkoušky s hranicemi o půlnoci.

5.3 Neporušené vzorky

Neporušený vzorek je takový vzorek, u něhož nebyly vlivem odběru vzorku významně změněny vlastnosti zeminy. Dokonale neporušený vzorek není možné v praxi odebrat, ale za neporušený lze považovat vzorek třídy kvality 1 (ČSN EN ISO 22475-1, 2006).

Odběr neporušených vzorků probíhá pomocí speciálních odběrných přístrojů zpravidla ze dna vrtu provedeného některou z běžně používaných vrtných technologií, jako je např. jádrové vrtání. Touto méně citlivou technologií hloubení vrtů však nesmí být zasaženo do plánované hloubky odběru a před použitím odběrného přístroje musí být dno vrtu očištěno od porušené zeminy. Pro odběr vzorku třídy kvality 1 je zpravidla použit tenkostěnný odběrný přístroj, který je spuštěn do vrtu a zatlačen statickou silou do jeho dna. Po vytažení přístroje je vzorek, často i s kovovým pouzdrům, uzavřen a zabalen pro zamezení změny vlhkosti (ČSN EN ISO 22475-1, 2006).

Odběr neporušených vzorků nebyl předmětem této práce, ale byly použity vzorky ze skladu vzorků Ústavu geotechniky, Fakulty stavební, VUT v Brně. Ukázka neporušeného vzorku uzavřeného v pouzdru je na obr. 5-10. Během přepravy z místa odběru a uložení ve skladu byl ještě celý vzorek zabalen ve fólii pro omezení změn vlhkosti vzorku.



Obr. 5-10 Neporušený vzorek uvnitř pouzdra a uzavřený gumovými víky. Během skladování byl ještě celý vzorek včetně pouzdra a vík zabalen ve fólii pro omezení změn vlhkosti. Průměr vzorku je 125 mm.

Oba vzorky pro zkoušky byly vytvořeny z jednoho kusu neporušeného vzorku, který byl odebrán z hloubky 12,2 až 12,4 m.

Před osazením neporušeného vzorku do edometrického přístroje byl celý odebraný vzorek nejprve vytlačen z kovového pouzdra a příčným řezem zkrácen přibližně na výšku 70 mm. Úprava průměru vzorku nebyla provedena zatlačení trubky s břitem do odebraného vzorku jako u vzorků z jádrových vývrtů, ale celý odebraný vzorek byl postupně ořezán na průměr pouze mírně přesahující trubku s břitem a při zatlačení do této trubky již byla odstraňována pouze tenká vrstva zeminy. Nakonec byla výška vzorku zkrácena na přibližně 50 mm a v podstavách vzorku byly vytvořeny drážky pro umístění bender elementů.

Oba neporušené vzorky byly testovány v edometrickém přípravku pro měření smykového modulu G_0 ve variantě s kovovými podstavami. To umožnilo zvýšení maximálního svislého zatížení až na hodnotu napětí 2,4 MPa. Tato maximální hodnota byla již limitována maximálním přípustným zatížením siloměru automatického rámu.

5.3.1 První zkouška neporušeného vzorku

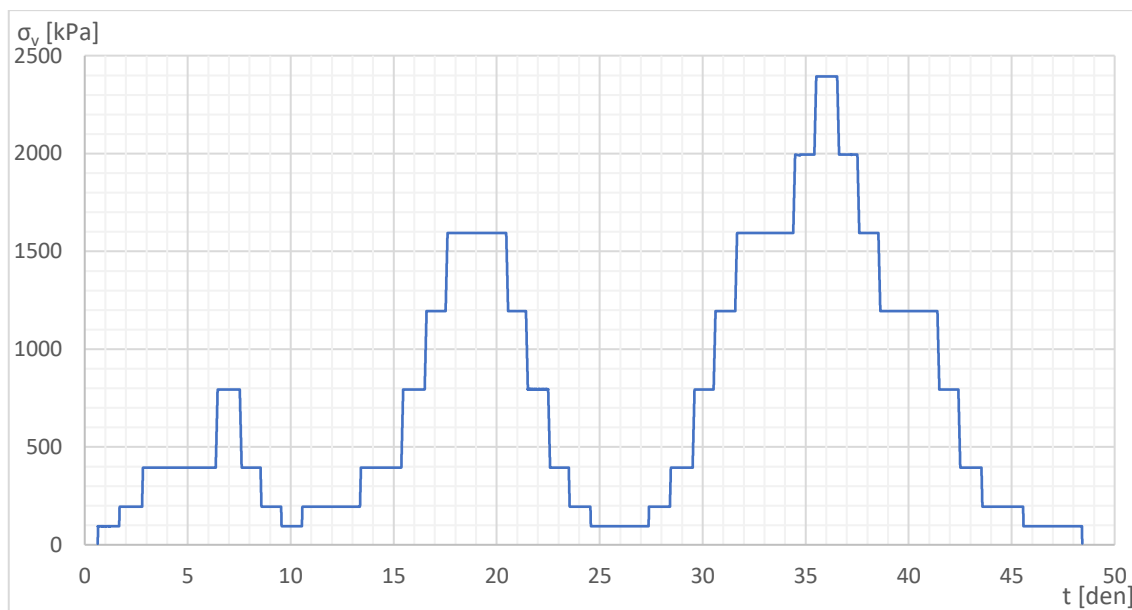
Během zkoušky prvního neporušeného vzorku proběhly tři zatěžovací cykly, u kterých bylo postupně zvyšováno maximální dosažené zatížení. Cílem bylo pozorovat chování vzorku při odtížení a opětovném přitížení s odlišnými maximálními hodnotami zatížení

dosaženými v minulosti. Průběh zkoušky je zobrazen na obr. 5-11. Maximální dosažená zatížení v jednotlivých cyklech byla 800 kPa, 1600 kPa a 2400 kPa. Nejnižším zatěžovacím stupněm bylo 100 kPa. Do hodnoty zatížení 800 kPa bylo zatížení následujícího stupně dvojnásobkem zatížení na předchozím stupni, ale pro vyšší zatížení byl zvolen konstantní rozdíl zatížení 400 kPa.

Odůvodněním zvolených zatěžovacích stupňů je získání podrobnějších dat o chování zeminy, než jaká by poskytlo tradiční schéma s dvojnásobnou hodnotou zatížení dalšího stupně oproti předchozímu, které je doporučeno i v normě (ČSN EN ISO 17892-5, 2017). V této normě je uvedeno i opodstatnění schématu s dvojnásobným zatížením následujícího stupně, které spočívá v dostatečné podrobnosti výsledků při zobrazení hodnot v grafu závislosti čísla pórovitosti na středním efektivním napětí s logaritmickou osou. Při vyhodnocení smykového modulu G_0 se však používají grafy s lineárními osami a pro dostatečnou podrobnost dat byly proto zvoleny konstantní rozdíly zatížení pro vyšší zatěžovací stupně.

První neporušený vzorek měl při osazení následující vlastnosti:

počáteční výška vzorku:	$h_0 = 48,7 \text{ mm}$
hmotnost vlhkého vzorku při osazení:	$m = 188,4 \text{ g}$
vlhkost vzorku při osazení:	$w = 30,3 \%$
objemová hmotnost vysušeného vzorku při uložení:	$\rho_d = 1476 \text{ kg/m}^3$
číslo pórovitosti vzorku při uložení:	$e = 0,83$



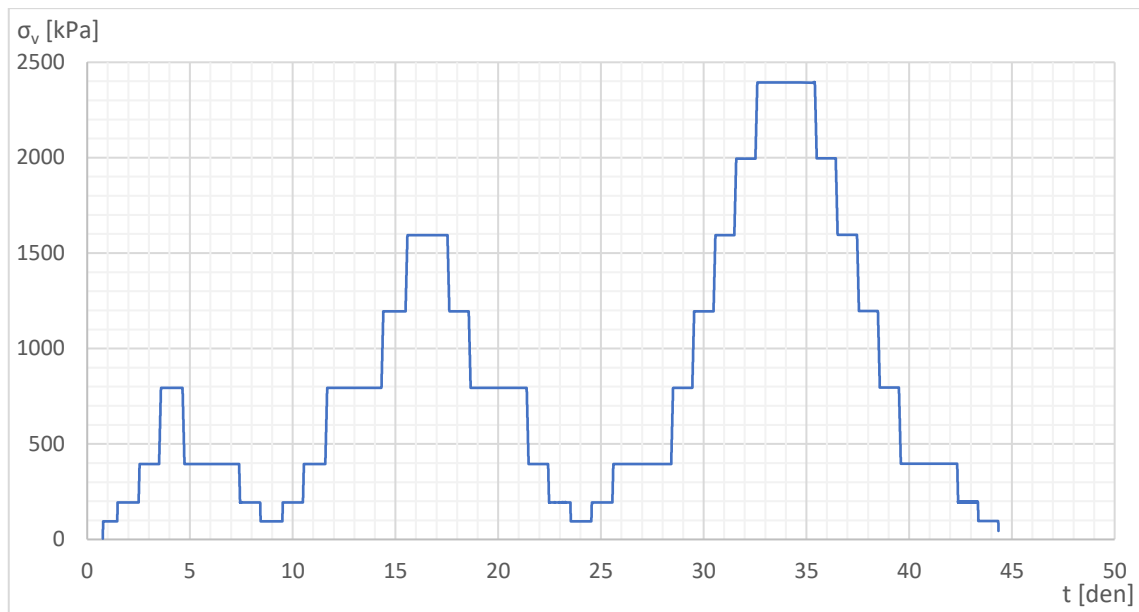
Obr. 5-11 Průběh zatěžování při zkoušce prvního neporušeného vzorku. Na časové ose jsou pořadové dny zkoušky s hranicemi o půlnoci.

5.3.2 Druhá zkouška neporušeného vzorku.

Pro zkoušku druhého neporušeného vzorku byl zvolen stejný plán zatěžování jako u prvního neporušeného vzorku, tedy tři zatěžovací cykly s maximálními hodnotami 800 kPa, 1600 kPa a 2400 kPa. Podrobný průběh zkoušky, zobrazený na obr. 5-12, se lišil pouze v tom, které zatěžovací stupně byly prodlouženy o dny, kdy nebylo možné provádět měření.

Druhý neporušený vzorek měl při osazení následující vlastnosti:

počáteční výška vzorku:	$h_0 = 48,7 \text{ mm}$
hmotnost vlhkého vzorku při osazení:	$m = 188,8 \text{ g}$
vlhkost vzorku při osazení:	$w = 32,19 \%$
objemová hmotnost vysušeného vzorku při uložení:	$\rho_d = 1458 \text{ kg/m}^3$
číslo pórovitosti vzorku při uložení:	$e = 0,85$



Obr. 5-12 Časový průběh zkoušky druhého neporušeného vzorku. Na horizontální ose jsou pořadové dny zkoušky s hranicemi o půlnoci.

6 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

6.1 Vyhodnocení smykového modulu G_0

Základním způsobem vyhodnocení měření byla metoda křížového spektra s využitím Fourierovy transformace a ručním určením intervalu frekvencí pro stanovení sklonu křivky závislosti fázového posunu na frekvenci. Průběžně byly zároveň výsledné hodnoty modulu G_0 určené metodou křížového spektra porovnávány s hodnotami určenými metodou *Visual Picking*. Proto byl také základním tvarem vyslaného signálu použitým pro vyhodnocení všech měření signál s jednou sinusovou vlnou. Do procesu vyhodnocení byly zavedené korekce, které jsou blíže popsány v kapitole 6.1.26.1.

Doplňkově byla pro vybrané vzorky vyhodnocena měření s vyslaným signálem tvaru *linear sweep* a dále byla vybraná měření vyhodnocena navrženým algoritmem, který je popsán v kapitole 3.3.3. Tato doplňková vyhodnocení byla porovnána s vyhodnocenými signály s jednou sinusovou vlnou.

6.1.1 Vzdálenost použitá pro určení rychlosti šíření signálu

Při rešerši bylo zjištěno, že většina autorů se shoduje na tom, že za dráhu šíření signálu v rovnici (3-1) by měla být považovaná vzdálenost hrotů bender elementů. Tato vzdálenost se spočítá odečtením dvojnásobku výšky destičky bender elementu od celkové výšky vzorku. Tento názor je popsán např. v (Dyvik, 1989) nebo (Camacho-Tauta, 2015). Zároveň se ukazuje, že při vyhodnocení metodou křížového spektra je stanovený smykový modul obvykle menší než při vyhodnocení metodou *Visual Picking* (Greening, 2003).

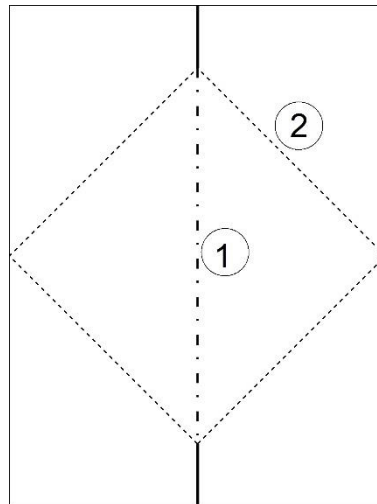
Existují ale i práce, ve kterých je uvažovaná vzdálenost šíření signálu delší než vzdálenost hrotů bender elementů. V tom případě je to obvykle vzdálenost hrotů bender elementů zvětšená o dvojnásobek poloviční délky bender elementu. Příklady takových prací jsou (Fam, 1995) nebo (Petružálek, 2006).

Petružálek (2006) se ve své práci věnuje způsobům a směrům šíření vlnění vzorkem zeminy. Hlavními způsoby šíření vlnění je příčné a podélné vlnění, přičemž v této práci

se udává, že bender elementy jsou konstruovány tak, že jsou citlivější na detekování příčných vln, které jsou pomalejší. První směr šíření příčných vln je přímý mezi hroty bender elementů. Další zmíněný směr šíření příčného vlnění je šikmo od vysílacího bender elementu s následným odrazem od pláště vzorku k hrotu přijímacího bender elementu. Tyto trajektorie vzorkem jsou zobrazeny na obr. 6-1. Pro přímou dráhu šíření je vzdálenost rovna vzdálenosti hrotů bender elementů a délka trajektorie L_{odr} ve variantě s odrazem od pláště vzorku se stanoví podle vztahu:

$$L_{odr} = 2 * \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (6-1)$$

kde L je vzdálenost hrotů bender elementů a d je průměr vzorku. Další možnou detekovanou trajektorií vlnění je příčné vlnění ve směru rovin bender elementů, které se jednou nebo vícekrát odrazí od postav vzorku.



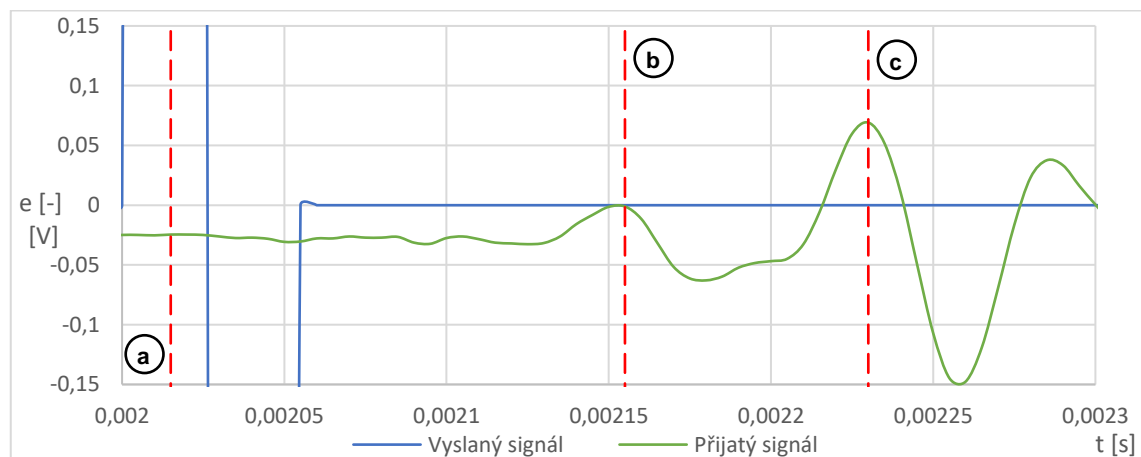
Obr. 6-1 Schéma trajektorií šíření příčného vlnění mezi hroty bender elementů. Trajektorie č. 1 je přímá a trajektorie č. 2 je šikmá s odrazem od pláště vzorku, navíc se šíří na obě strany od bender elementu. Svislé tučné úsečky představují destičky bender elementů. Vytvořeno podle (Petružálek, 2006).

Při vyhodnocení měření v mé práci při použití metody křížového spektra a uvažování délky trajektorie šíření signálu jako vzdálenost hrotů bender elementů byly vypočítané hodnoty smykových modulů několikanásobně nižší než očekávané. Konkrétně pro neporušený vzorek při středním efektivním napětí 100 kPa byla zjištěna hodnota smykového modulu 20 MPa. Počáteční smykový modul brněnských jíílů měřil Svoboda (2010) a jím určené hodnoty při středním efektivním napětí 100 kPa jsou přibližně 55 MPa.

Pravděpodobné vysvětlení a řešení tohoto rozdílu poskytuje typický tvar přijatého signálu naměřený v rámci mé práce, který je zobrazen na obr. 6-2. Z tohoto signálu je patrné, že prvním výraznějším vrcholem přijatého signálu je ten označený (b) a proto jej lze identifikovat jako vrchol vlny, která se šíří přímo mezi hroty bender elementů a dorazí jako první příčná vlna. Tento vrchol byl používán pro vyhodnocení metodou *Visual Picking*, při které byla zároveň použita dráha rovna vzdálenosti hrotů bender elementů.

Vrchol označený (c) byl na základě odpovídající délky trajektorie signálu při stejné rychlosti šíření homogenním materiálem identifikován jako příčná vlna jednou odražená od podstavy vzorku. Vrchol označený (c) je ale svou výchylkou dominantní, a proto má při vyhodnocení Fourierovou transformací větší váhu. Čas vyhodnocený metodou křížového spektra proto odpovídá signálu s delší trajektorií obsahující odraz od podstavy vzorku, která je zároveň rovna vzdálenosti podstav vzorku.

Pro vyhodnocení metodou křížového spektra následně byla používána vzdálenost podstav vzorku, která vedla zároveň k dobré shodě s metodou *Visual Picking* a vzájemné konzistentnosti stanovených hodnot modulu G_0 napříč úrovněmi napětí. Shoda s metodou *Visual Picking* byla velmi dobrá zejména u vzorků testovaných v přípravku ve variantě s ocelovými podstavami a při prvotním zatěžování ostatních vzorků. U větvi odtížení a opětovného přitížení prvních tří vzorků byla shoda nižší, tyto zkoušky ale mohly být ovlivněny také deformacemi 3D tištěných podstav přípravku, které byly pravděpodobně větší než u ocelových.



Obr. 6-2 Interpretace vrcholů v přijatém signálu. Svislá čára (a) označuje okamžik vrcholu vyslaného signálu, čára (b) značí okamžik identifikovaný jako vrchol přímého signálu a čára (c) značí okamžik vrcholu signálu odraženého od pláště válcového vzorku. Časový záznam je zkrácen. Vyslaný signál má frekvenci 19 kHz.

6.1.2 Korekce osové deformace pro vyhodnocení G_0

Vzhledem k tomu, že vlivem osové deformace při zatěžování se mění zároveň vzdálenost bender elementů, která má významný vliv na určení hodnoty modulu G_0 , tak byla prováděna korekce této vzdálenosti. Pro každou sadu měření pomocí vysílání signálů byla určena průměrná hodnota svislé poměrné deformace v době měření. Aktuální výška vzorku pak byla určena dle vztahu:

$$h = h_0 * (1 - \varepsilon), \quad (6-2)$$

kde h je aktuální výška vzorku, h_0 je počáteční výška vzorku a ε je poměrné přetvoření, které bylo počítáno pro účely stanovení indexu stlačitelnosti C_c a indexu odlehčení C_{cr} .

Tato korekce se projeví v obou členech rovnice (2-2) pro výpočet modulu G_0 . V rychlosti v se projeví změnou dráhy šíření signálu a v objemové hmotnosti ρ se projeví změnou objemu axiálně deformovaného válcového vzorku bez radiálních deformací. Platí tedy vztah:

$$G_0 = \rho * v_s^2 = \frac{m_d}{h * A} * \frac{d^2}{t^2}, \quad (6-3)$$

kde ρ je objemová hmotnost vysušeného vzorku, v_s je rychlost šíření vlnění, m_d je hmotnost vysušeného vzorku, h je aktuální výška vzorku, A je průřezová plocha vzorku, d je dráha šíření vlnění a t je doba šíření vlnění. V případě, že je dráha šíření vlnění uvažovaná stejná jako výška vzorku, tak je závislost modulu G_0 na aktuální výšce lineární. V případě, že je vzdálenost snímačů uvažována menší než aktuální výška vzorku, tak již závislost modulu G_0 na aktuální výšce vzorku lineární není, protože bender elementy se ve své rovině téměř nedeformují a poměrná změna vzdálenosti mezi hroty bender elementů je tedy odlišná od osového poměrného přetvoření celého vzorku.

6.1.3 Korekce vlivu LP filtru

Použitý osciloskop, který byl dodaný výrobcem bender elementů, je vybaven takzvaným *Low pass filtrem*, zkráceně LP filtrem. Tento filtr slouží k eliminaci rušivého vysokofrekvenčního šumu v přijatém signálu, což usnadňuje vizuální vyhodnocení přijatého signálu.



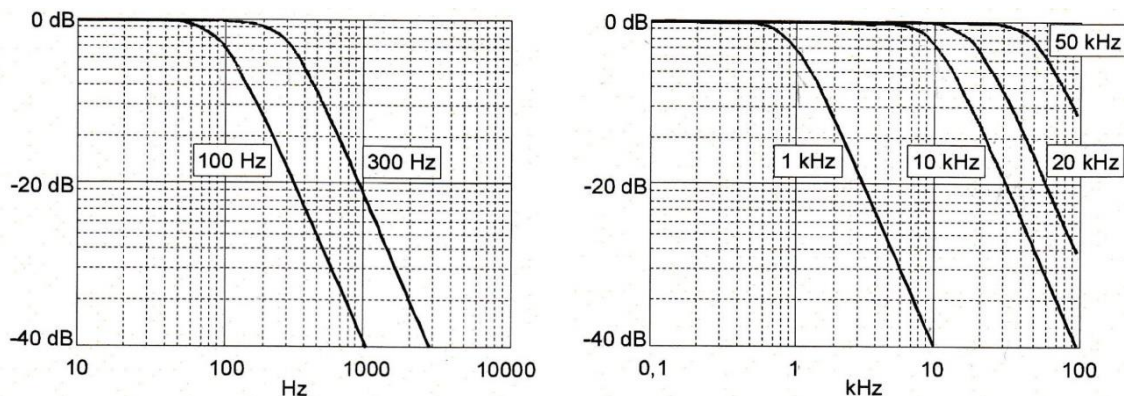
Obr. 6-3 Panel ovladače generátoru signálu a osciloskopu integrovaných do jednoho zařízení. První ovladač vlevo slouží k nastavení hodnoty LP filtru

Filtr je ovládaný hardwarovým otočným ovladačem na osciloskopu, viz obr. 6-3, a použitý model osciloskopu disponuje šesti hodnotami nastavení filtru: 100 Hz, 300 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz a 50 kHz. Hodnota nastavení LP filtru představuje frekvenci signálu, jejíž výkon je snížen o 3 dB, což odpovídá poklesu výkonu přibližně na polovinu dle vztahu:

$$A_p = 10 * \log \frac{P_2}{P_1} [dB], \quad (6-4)$$

kde A_p je poměr výkonů v decibelech, P_1 je původní výkon a P_2 je výsledný výkon.

Podrobná charakteristika útlumu frekvencí pro jednotlivá nastavení LP filtru je zobrazena v grafech na obr. 6-4. Poměr amplitud při zpracování LP filtrem je roven hodnotě odmocniny z poměru výkonů.

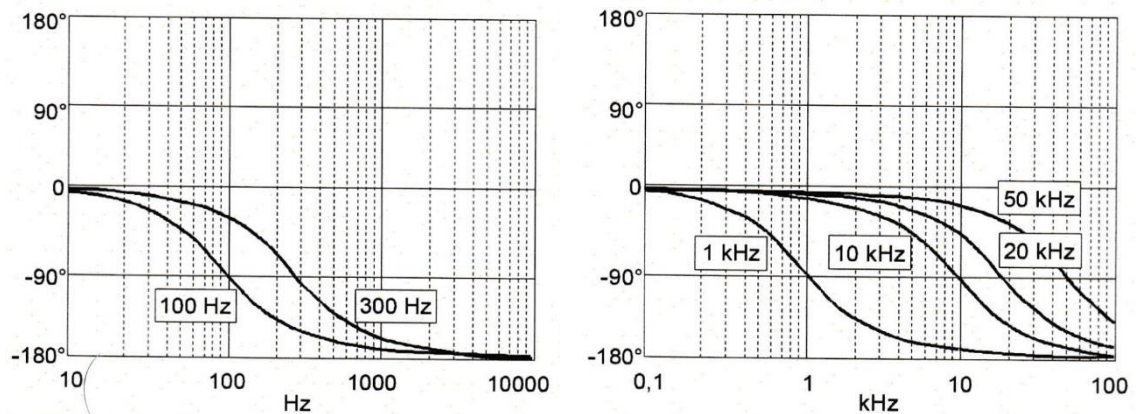


Obr. 6-4 Charakteristiky pro jednotlivá nastavení LP filtru. Grafy zobrazují závislost útlumu v dB na frekvenci v logaritmickém měřítku (Wille Geotechnik, 2012).

Součástí příručky od výrobce (Wille Geotechnik, 2012) je také tabulka hodnot frekvencí, které jsou utlumeny LP filtrem o 10 %, přičemž tyto frekvence jsou 0,7–násobkem hodnoty nastavení LP filtru. Toho se využívá při vyhodnocení metodou *Visual Picking*,

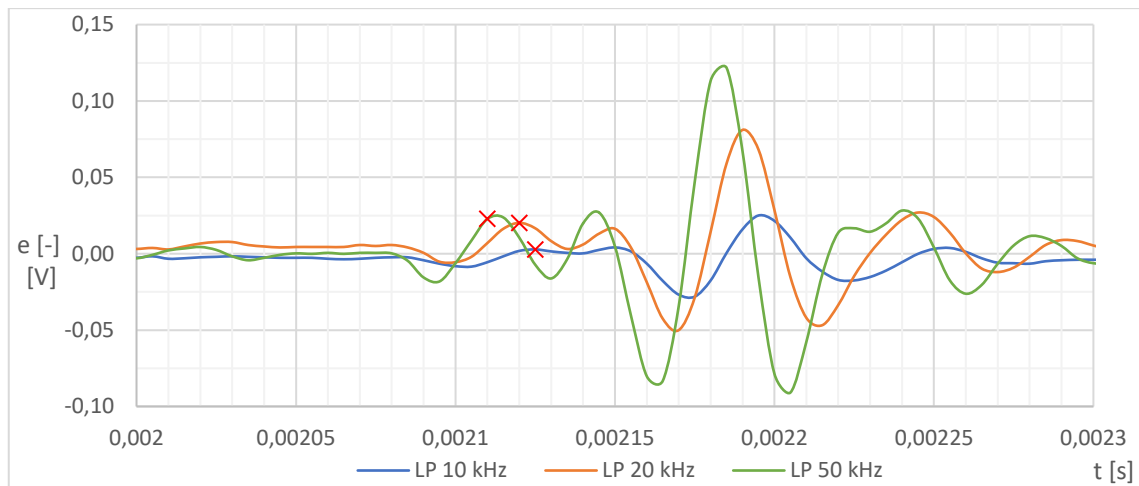
kdy použití vyslaného signálu s vhodnou frekvencí vede k jejímu utlumení v přijatém signálu vlivem zpracování o méně než 10 % a vysoké frekvence šumu jsou naopak silně potlačeny.

Při zpracování signálu LP filtrem dochází také k fázovému posunu zpracovávaného signálu, jehož velikost je závislá na frekvenci složky signálu a použitém nastavení LP filtru. Tato závislost je podrobně zobrazena na obr. 6-5.



Obr. 6-5 Závislost fázového posunu na frekvenci pro jednotlivá nastavení LP filtru dle výrobce osciloskopu (Wille Geotechnik, 2012).

Tento fázový posun ovlivňuje vyhodnocení měření v časové i frekvenční oblasti, neboť se projeví pouze u přijatého signálu a způsobuje tedy změnu fázového posunu mezi vyslaným a přijatým signálem. V časové oblasti při vyhodnocení metodou *Visual Picking* dochází s klesající hodnotou LP filtru k posunu prvního vrcholu v signálu tak, že se prodlužuje zdánlivá doba šíření signálu, jak je zobrazeno na obr. 6-6. V časové oblasti nelze zavést jednoduchým způsobem korekci, protože změna fázového posunu je daná ve frekvenční oblasti a skutečný přijatý signál je výrazně složitější než vyslaný signál. Z průběhů změny fázového posunu na obr. 6-5 je však patrné, že pro LP filtr s hodnotou 50 kHz je posun nejmenší a hodnota vycházející z měření s tímto LP filtrem by tedy měla být nejbližší skutečnosti.



Obr. 6-6 Vliv nastavení LP filtru na signál v časové oblasti. Červenými křížky jsou označeny první vrcholy pro jednotlivé signály. Lze rozeznat posun nejen prvního, ale i dalších odpovídajících si vrcholů se změnou LP filtru. Jde o signály přijaté za stejných podmínek v těsném sledu a odpovídají vyslanému signálu tvaru jedné sinusové vlny o frekvenci 27 kHz.

Pro vyhodnocení metodou křížového spektra ve frekvenční oblasti byla aplikována korekce fázového posunu pro každou diskretní frekvenci na základě dat zobrazených na obr. 6-5. Vzhledem k tomu, že data o vlivu LP filtru na fázový posun byla k dispozici pouze ve formě tištěného manuálu, tak pro účely vyhodnocení pomocí počítače byla provedena aproximace křivek pro jednotlivá nastavení LP filtru spojitou funkcí. Díky tomu lze určit hodnotu korekce pro libovolnou frekvenci prostým dosazením do rovnice. Pro aproximaci byla zvolena funkce vycházející ze sigmoidální funkce, která se jinak často používá jako přenosová funkce u algoritmů strojového učení a má obecný předpis ve tvaru:

$$y = \frac{1}{1+e^{-x}}, \quad (6-5)$$

kde y je závisle proměnná a x je nezávisle proměnná (Liu, 2020). Funkční hodnoty této funkce se pohybují mezi dvěma asymptotickými hodnotami 0 a 1, funkce tedy tvarem dobře odpovídá hledaným závislostem. Pro aproximaci funkcí fázového posunu vlivem LP filtru však bylo nutné sigmoidální funkci transformovat. Byla testována také aproximace funkcí arkus kotangens, která má také podobný tvar a dvě asymptotické hodnoty, avšak ani po transformacích nevykazovala dobrou shodu. Pro popis závislosti

změny fázového posunu na frekvenci pro jednotlivá nastavení LP filtru byla sigmoidální funkce upravena do podoby:

$$\phi = \left[\frac{c}{1 + e^{\frac{f^d - b}{a}}} - \left(90 + \frac{c}{2} \right) \right] * g * \frac{\pi}{180}, \quad (6-6)$$

kde Φ je změna fázového posunu vlivem LP filtru, f je frekvence, a , b , c , d , g jsou koeficienty lišící se pro jednotlivá nastavení LP filtru a poslední člen je převod ze stupňových jednotek na úhlové (radiány). Koeficienty byly určeny tak, aby výsledná funkce alespoň v očekávaném intervalu používaných frekvencí 7 kHz až 30 kHz co nejvíce odpovídala hodnotám z tištěného manuálu. Jednotlivé koeficienty pro používaná nastavení LP filtru 10 kHz, 20 kHz a 50 kHz jsou uvedeny v tab. 6-1. Ostatní možná nastavení LP filtru nebyla během zkoušek použita.

Tab. 6-1 Koeficienty aproximační funkce změny fázového posunu pro jednotlivá nastavení LP filtru.

hodnota LP filtru	10 kHz	20 kHz	50 kHz
a =	0,50	0,72	0,73
b =	2,28	3,20	3,80
c =	180	180	180
d =	0,38	0,42	0,37
g =	0,95	0,92	0,87

V průběhu vyhodnocování jednotlivých měření se ukázalo, že nejlepší shody určené doby šíření signálu je dosaženo v případě, že k fázovému posunu určenému metodou křížového spektra z vyslaného a přijatého signálu se pro každou frekvenci ve vyhodnocovaném intervalu přičte hodnota podle funkce (6-6), která je záporná. Příklad porovnání stanovených modulů G_0 je uveden v tab. 6-2, kde jednotlivé řádky představují násobitel přičítané korekce. Je patrné, že nejlepší shoda je v případě násobitele +1.

Tab. 6-2 Porovnání výsledných hodnot G_0 [MPa] pro jednotlivá nastavení LP filtru a násobitel korekce dle funkce (6-6). Jde o hodnoty z vyhodnocení prvního neporušeného vzorku při prvním svislém zatížení 100 kPa.

LP filtr	10 kHz	20 kHz	50 kHz
*(-1)	34,008	35,548	40,474
*0	38,540	39,093	42,099
*1	44,043	43,196	43,823

6.2 Stanovené moduly G_0 pro jednotlivé vzorky a diskuze

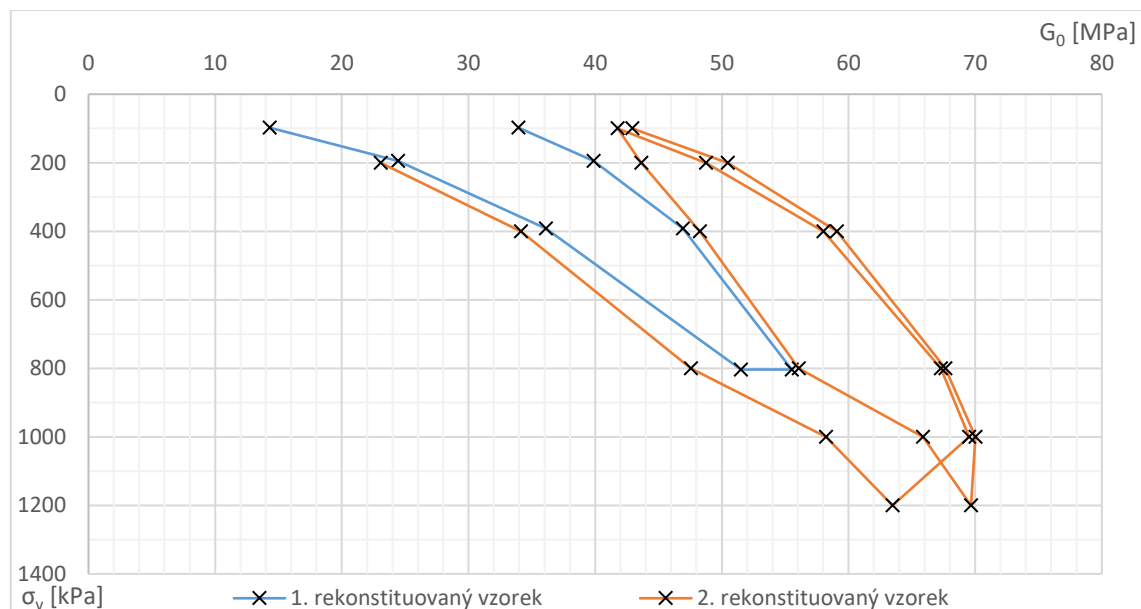
6.2.1 Rekonstituované vzorky

Stanovené hodnoty smykového modulu G_0 pro jednotlivé vzorky v závislosti na svislém napětí jsou zobrazené na obr. 6-7. U prvního rekonstituovaného vzorku bylo dosaženo maximálního svislého napětí 800 kPa a pro druhý vzorek byly provedeny dva zatěžovací cykly s maximálním svislým zatížením 1200 kPa.

U prvního rekonstituovaného vzorku byla zjištěna na prvním zatěžovacím stupni 100 kPa hodnota modulu G_0 15 MPa. Hodnota smykového modulu se s rostoucím zatížením postupně zvyšovala až na 52 MPa při svislém zatížení 800 kPa. Na tomto zatěžovacím stupni byl vzorek ponechán po dobu 12 dnů, během které došlo pravděpodobně vlivem dotvarování k nárůstu smykového modulu G_0 na 56 MPa. Při následném odtížení vzorek vykazoval vyšší hodnoty tuhosti než při prvotním zatížení a při druhém zatěžovacím stupni 100 kPa byla stanovena hodnota modulu G_0 34 MPa.

V případě druhého rekonstituovaného vzorku se při prvním zatěžovacím stupni v naměřeném signálu vyskytovala amplitudově výrazná výchylka téměř současně s přijatým signálem. Tento první rušivý impuls značně ovlivnil vyhodnocení metodou křížového spektra. V případě prvního zatěžovacího stupně nebylo možné v grafu závislosti fázového posunu na frekvenci identifikovat žádný úsek konstantního sklonu, a tedy ani stanovit hodnotu doby šíření signálu. U dalších zatěžovacích stavů se již tato počáteční výrazná výchylka nevykytovala a bylo možné provádět vyhodnocení modulu G_0 metodou křížového spektra.

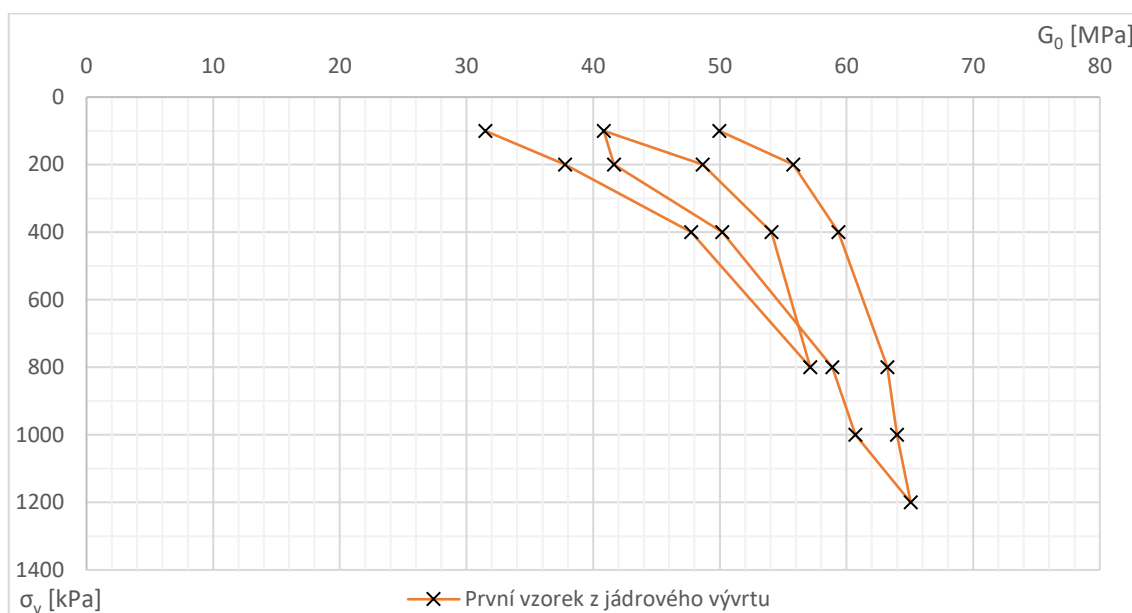
Rušivý impuls ovlivnil vyhodnocení metodou *Visual Picking* v menší míře a pomocí této metody byla stanovena při nastavení LP filtru 20 kHz hodnota smykového modulu G_0 12 MPa. V případě zatěžovacích stavů 200 kPa a 400 kPa byla hodnota modulu G_0 stanovena metodou *Visual Picking* při LP filtru 20 kHz přibližně o 10% nižší než v případě metody křížového spektra. Na základě toho je možné odhadnout hodnotu modulu G_0 pro první zatěžovací úroveň 100 kPa a metodu křížového spektra na 13 MPa. Chování druhého rekonstituovaného vzorku při prvotním zatěžování odpovídá prvnímu vzorku. U druhého vzorku ale bylo dosaženo maximálního svislého napětí 1200 kPa, při kterém byl naměřen modul G_0 o hodnotě 64 MPa. Při odtížení vykazoval vzorek opět vyšší tuhost než při prvotním zatížení. Protože maximální zatížení bylo ponecháno pouze po dobu 24 h a až první odlehčovací stupeň byl prodloužen, tak se zde předpokládaný vliv dotvarování projevil až při prvním odtěžovacím stupni, během kterého došlo k nárůstu modulu G_0 oproti maximálnímu zatížení. Během odtížení, následného opětovného přitížení a konečného odlehčení se v hodnotách modulu G_0 projevilo hysteretzní chování zemin. Při hysteretzi se zemina v zobrazení modulu G_0 na svislém napětí pohybuje po smyčce, kdy vykazuje během odtížení vyšší tuhost než při opětovném přitížení. Hysteretzní chování je možné typicky pozorovat i při odtížení a opětovném přitížení v zobrazení závislosti čísla pórovitosti na logaritmu svislého napětí.



Obr. 6-7 Závislost smykového modulu G_0 na svislém napětí pro rekonstituované vzorky. Hodnoty byly stanoveny metodou křížového spektra.

6.2.2 Vzorky z jádrového vývrtu

Průběh smykového modulu G_0 měřeného na prvním vzorku z jádrového vývrtu v závislosti na svislém napětí vzorku je zobrazen na obr. 6-8. Při odtížení ze zatěžovacího stavu 800 kPa a opětovném přitížení je v diagramu zřetelná hystereze. S přihlédnutím k nejistotě při určení hodnoty modulu G_0 v nízkých jednotkách MPa, je možné pozorovat, že při opětovném přitížení se tuhost zeminy pohybuje po stejné trajektorii jako při prvním zatížení. V průběhu zkoušky došlo k dalšímu výraznému zvýšení tuhosti při svislém napětí 100 kPa.



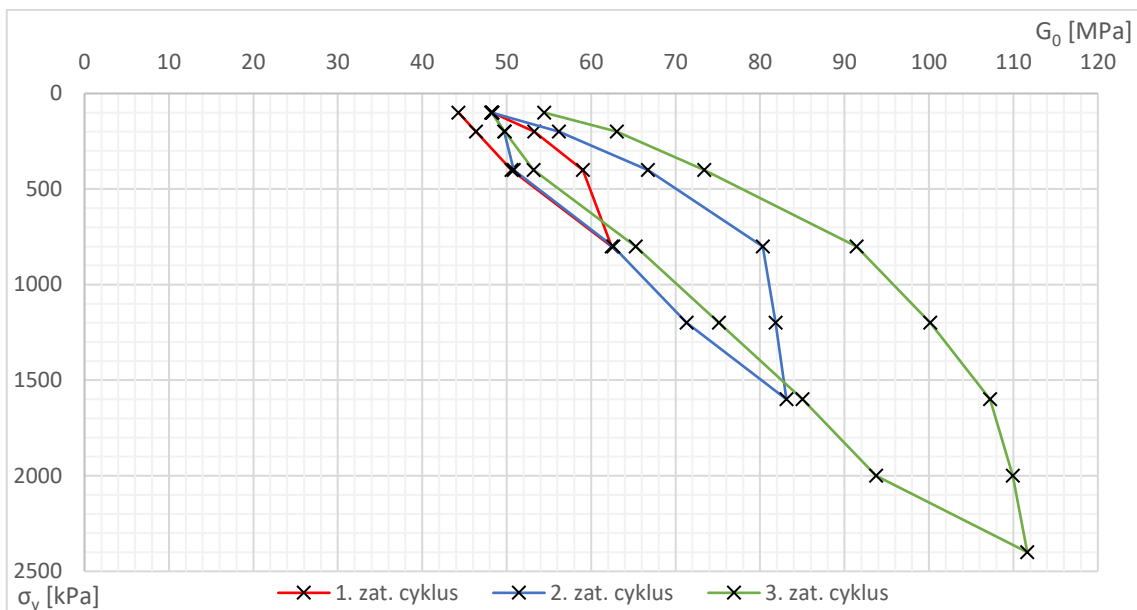
Obr. 6-8 Závislost smykového modulu G_0 na svislém napětí pro první vzorek z jádrového vývrtu. Hodnoty byly stanoveny metodou křížového spektra.

U druhého vzorku z jádrového vývrtu se v přijatém signálu vyskytovala velmi výrazná vlna téměř v okamžiku vyslané vlny v průběhu celé zkoušky. Výchylka této vlny byla silně dominantní v celém přijatém signálu, a proto bylo toto měření vyřazeno z vyhodnocení modulu G_0 . Po vyjmutí vzorku bylo u jednoho bender elementů zjištěno mírné vychýlení plochy snímače z roviny kolmé k podstavě a tento snímač byl proto pro další zkoušky nahrazen jiným.

6.2.3 Neporušené vzorky

Závislost naměřených hodnot modulu G_0 pro první neporušený vzorek je zobrazena na obr. 6-9. Na tomto obrázku jsou barevně odlišeny jednotlivé zatěžovací cykly provedené

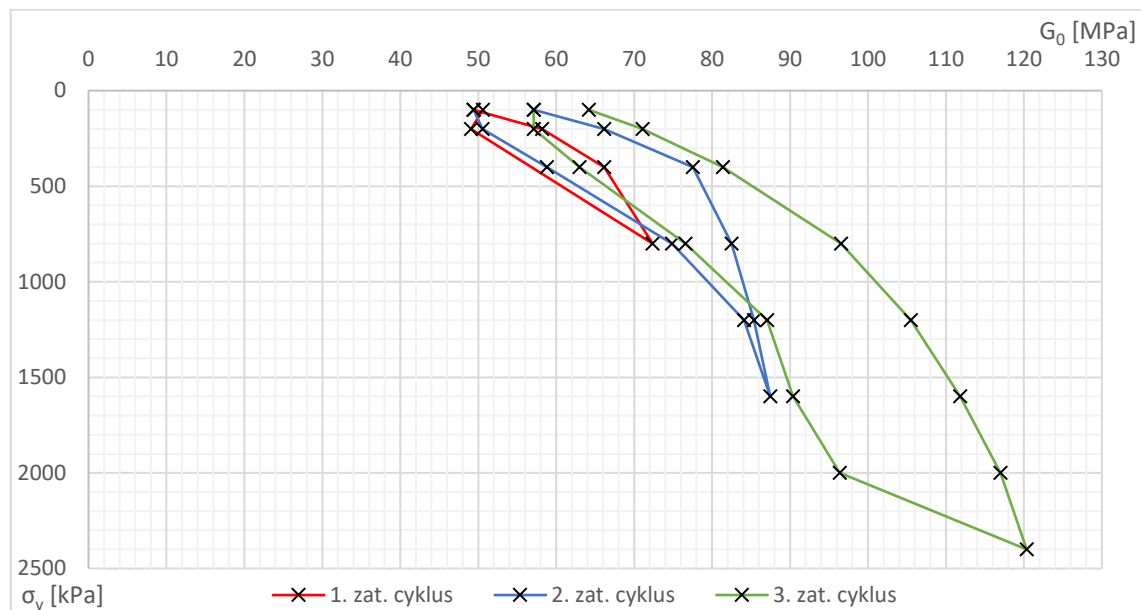
při zkoušce. Z obrázku vyplývá, že při přitěžování se ve všech třech cyklech, u nichž se postupně zvyšovalo maximální svislé napětí, hodnoty modulu G_0 pohybují po totožné křivce. Rozdíl nastává pouze u nejvyššího zatížení posledního zatěžovacího cyklu, kdy došlo ke zřetelnému zvýšení hodnoty modulu G_0 oproti předchozímu trendu. Příčinou tohoto zvýšení by mohlo být přiblížení se křivce prvotního zatěžování testované zeminy a dotvarování, což bude blíže diskutováno při porovnání s průběhem modulu G_0 u rekonstituovaných vzorků v kap. 6.6. Při odtížení a opětovném přitížení je opět zřetelné hysterezní chování.



Obr. 6-9 Závislost smykového modulu G_0 na svislém napětí vzorku pro první neporušený vzorek. Jednotlivé zatěžovací cykly jsou barevně odlišeny. Hodnoty byly stanoveny metodou křížového spektra.

Průběh hodnot modulu G_0 v závislosti na svislém napětí pro druhý neporušený vzorek je zobrazen na obr. 6-10. Pro přehlednost jsou barevně odlišeny jednotlivé zatěžovací cykly. Trend vývoje hodnot modulu G_0 během zkoušky odpovídá průběhu u prvního neporušeného vzorku. Při přitěžování u jednotlivých zatěžovacích stupňů se hodnoty modulu G_0 pohybují po jedné trajektorii a je zde také patrná hystereze během odtížení a opětovného přitížení. U druhého neporušeného vzorku také došlo k nárůstu hodnoty modulu G_0 u nejvyššího zatěžovacího stupně oproti předchozímu trendu. U druhého neporušeného vzorku byl ale zatěžovací stupeň 2400 kPa prodloužen na tři dny oproti jednomu dnu u prvního neporušeného vzorku a nárůst hodnoty modulu G_0 oproti tomu, co by odpovídalo trendu při přitěžování vzorku je u druhého vzorku větší. Větev přitěžování prvního vzorku také vykazuje více lineární chování než u druhého vzorku, ale

při uvážení přesnosti stanovení hodnot v řádu jednotek MPa se zdá být chování obou vzorků srovnatelné.



Obr. 6-10 Závislost smykového modulu G_0 na svislém napětí vzorku pro druhý neporušený vzorek. Jednotlivé zatěžovací cykly jsou barevně odlišeny. Hodnoty byly stanoveny metodou křížového spektra.

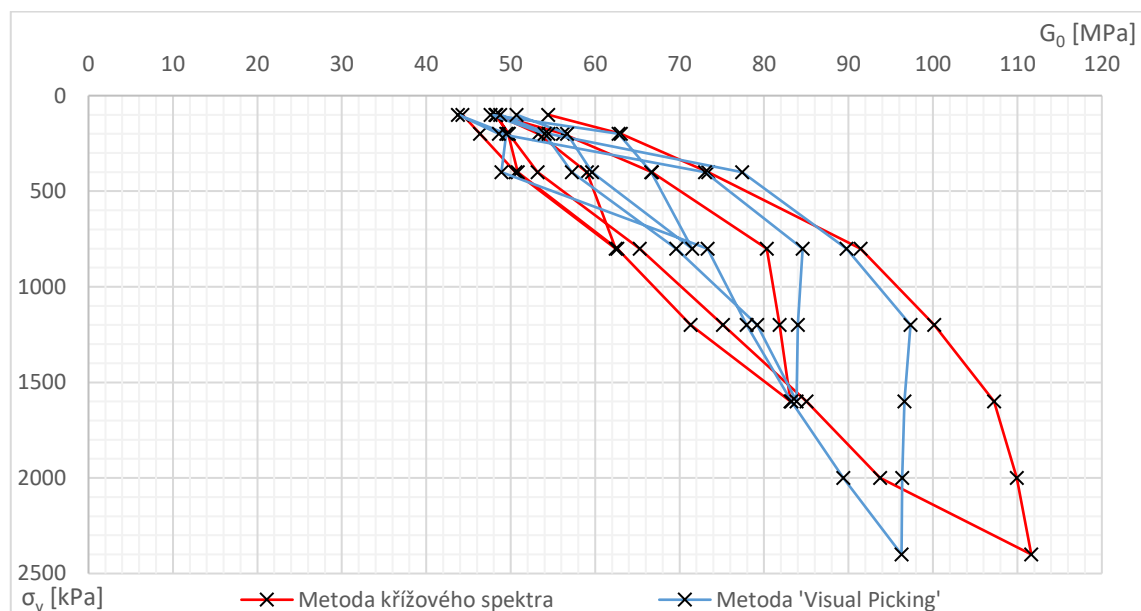
6.3 Porovnání s metodou *Visual Picking*

Při vyhodnocování probíhalo průběžně porovnávání hodnot stanovených metodou křížového spektra v manuálním režimu s metodou *Visual Picking*. Toto porovnání bylo možné pouze v případě použití vyslaného signálu tvaru jedné sinusové vlny, protože u tvaru *Linear Sweep* nelze metodu *Visual Picking* použít.

V případě metody *Visual Picking* byl použitý postup, při kterém byl ručně zvolen vrchol v záznamu signálu odpovídající přijetí vyslaného signálu. Následně byl zvolen časový interval, ve kterém se tento vrchol nachází a pomocí aplikace MS Excel byl vyhledán vrchol jako bod v zaznamenaných datech s nejvyšší hodnotou. Tento postup je rychlý a umožňuje efektivně zpracovat velké množství měření, ale přesnost takto určeného modulu G_0 je závislá na vzorkovací frekvenci zaznamenaných dat. Nejistota v určení modulu G_0 způsobená vzorkovací frekvencí dat závisí na druhé mocnině rychlosti šíření vlnění a během prováděných zkoušek byla v jednotkách MPa. V časové oblasti při vyhodnocení metodou *Visual Picking* je také v některých případech obtížné identifikovat vrchol odpovídající přijetí první příčné vlny.

Porovnání vyhodnocení modulu G_0 oběma metodami je provedeno na příkladu prvního neporušeného vzorku a je zobrazeno na obr. 6-11. U metody *Visual Picking* byla použita pouze měření s nastavením LP filtru 50 kHz, protože při tomto nastavení je fázový posun a zkreslení signálu při zpracování osciloskopem nejmenší.

Celkově je patrná dobrá shoda mezi oběma metodami s rozdíly v jednotkách MPa. Nejvýraznější rozdíl se vykytuje u nejvyššího dosaženého napětí. Při odpovídající tuhosti zeminy a relativně malé vzdálenosti snímačů po stlačení vzorku je ale hodnota G_0 značně citlivá na odchylky ve stanovení doby a dráhy šíření signálu. Rozlišení v časové oblasti vlivem vzorkovací frekvence odpovídá v tomto případě rozdílu hodnot modulu G_0 přibližně 10 MPa. Uvážení tohoto jevu může do značné míry vysvětlit rozdíly mezi oběma metodami v oblasti vysokých napětí.



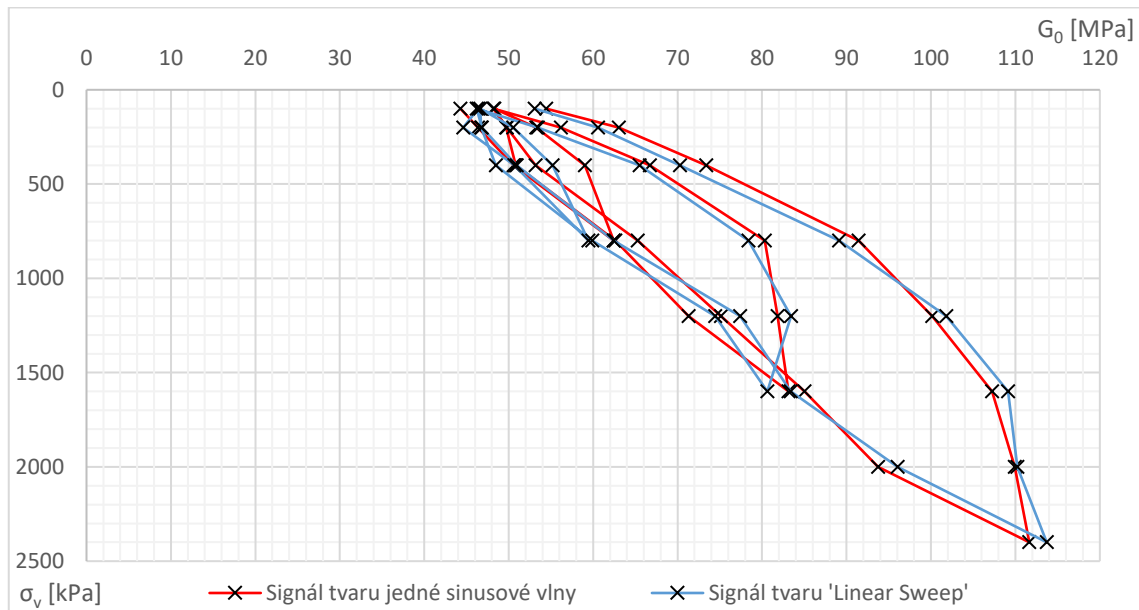
Obr. 6-11 Porovnání metody křížového spektra a metody *Visual Picking*. V případě metody křížového spektra bylo použito ruční určení sklonu závislosti fázového posunu na frekvenci. U metody *Visual Picking* byla použita měření s nastavením LP filtru 50 kHz. Jde o příklad vyhodnocení pro první neporušený vzorek. Tvar vyslaných vln byl jedna sinusová vlna.

6.4 Měření s vyslaným signálem tvaru linear sweep

Měření s vyslaným signálem tvaru *linear sweep* není možné vyhodnotit metodou *Visual Picking*, ale je nutné použít pouze metodu křížového spektra. Protože bylo zaváděno měření s vyslaným signálem tvaru *linear sweep* postupně v průběhu zkoušek, tak bylo dostupné pouze pro některé vzorky. V průběhu vyhodnocení se ukázalo, že zejména pro

větší šířku intervalu frekvencí ve vyslaném signálu obsahuje závislost fázového spektra na frekvenci delší a stabilnější intervaly konstantního sklonu v porovnání se signálem tvaru jedné sinusové vlny, což je výhodné při vyhodnocení modulu G_0 .

Příklad porovnání stanovených modulů G_0 pro oba tvary signálu pro první neporušený vzorek je zobrazen na obr. 6-12. Z porovnání vyplývá velmi dobrá shoda s odchylkami modulu G_0 pouze v nízkých jednotkách MPa.



Obr. 6-12 Porovnání modulů G_0 vyhodnocených na základě dvou tvarů vyslaných signálů. Prvním tvarem je jedna sinusová vlna a druhým je linear sweep. Jako příklad je uvedeno vyhodnocení prvního neporušeného vzorku.

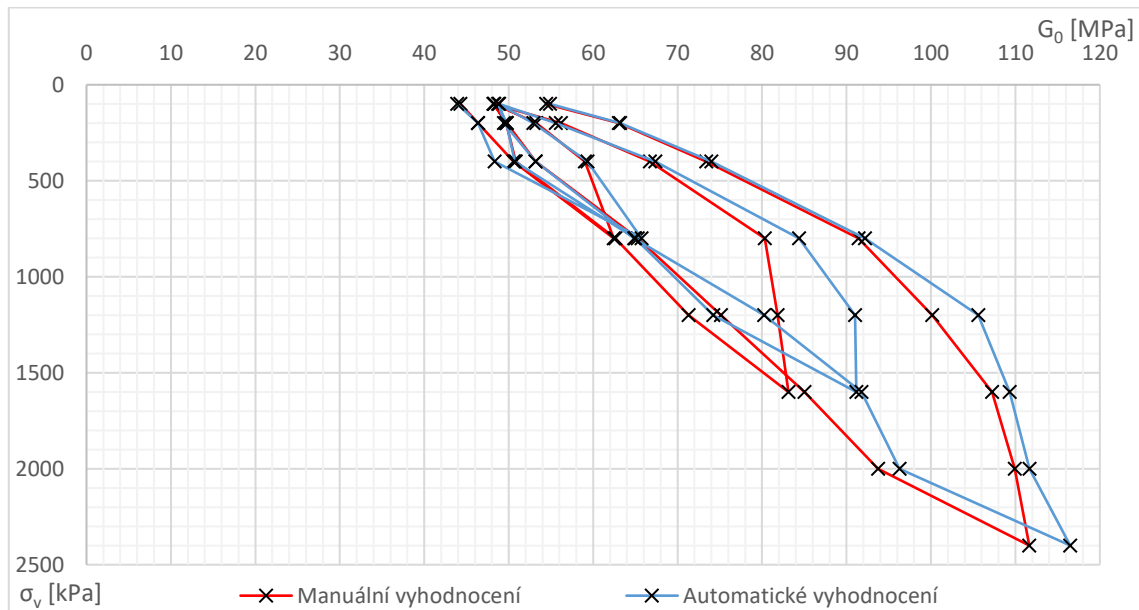
6.5 Vyhodnocení pomocí navrženého algoritmu

Na obr. 6-13 je uvedeno porovnání manuálního a automatizovaného vyhodnocení modulu G_0 metodou křížového spektra na příkladu zkoušky prvního neporušeného vzorku. Manuální a automatické vyhodnocení se odlišují ve způsobu určení sklonu křivky závislosti fázového posunu na frekvenci, ze kterého se následně určí hodnota modulu G_0 .

Při manuálním vyhodnocení byl pro každý zatěžovací stupeň určen ručně interval frekvencí posouzením, zda je na daném intervalu sklon křivky závislosti fázového posunu na frekvenci dostatečně stálý. Následně byl sklon určen na tomto intervalu metodou nejmenších čtverců.

V případě automatického vyhodnocení bylo určení sklonu provedeno počítačem pomocí navrženého algoritmu, který je popsán v kapitole 3.3.3.

Z obr. 6-13 je patrné, že pro nízká svislá zatížení vzorku jsou hodnoty stanovené oběma variantami vyhodnocení téměř totožné. U větších hodnot svislého zatížení jsou odchylky výraznější, ale s výjimkou několika hodnot v blízkosti vrcholu druhého zatěžovacího cyklu jsou pouze v nízkých jednotkách MPa.



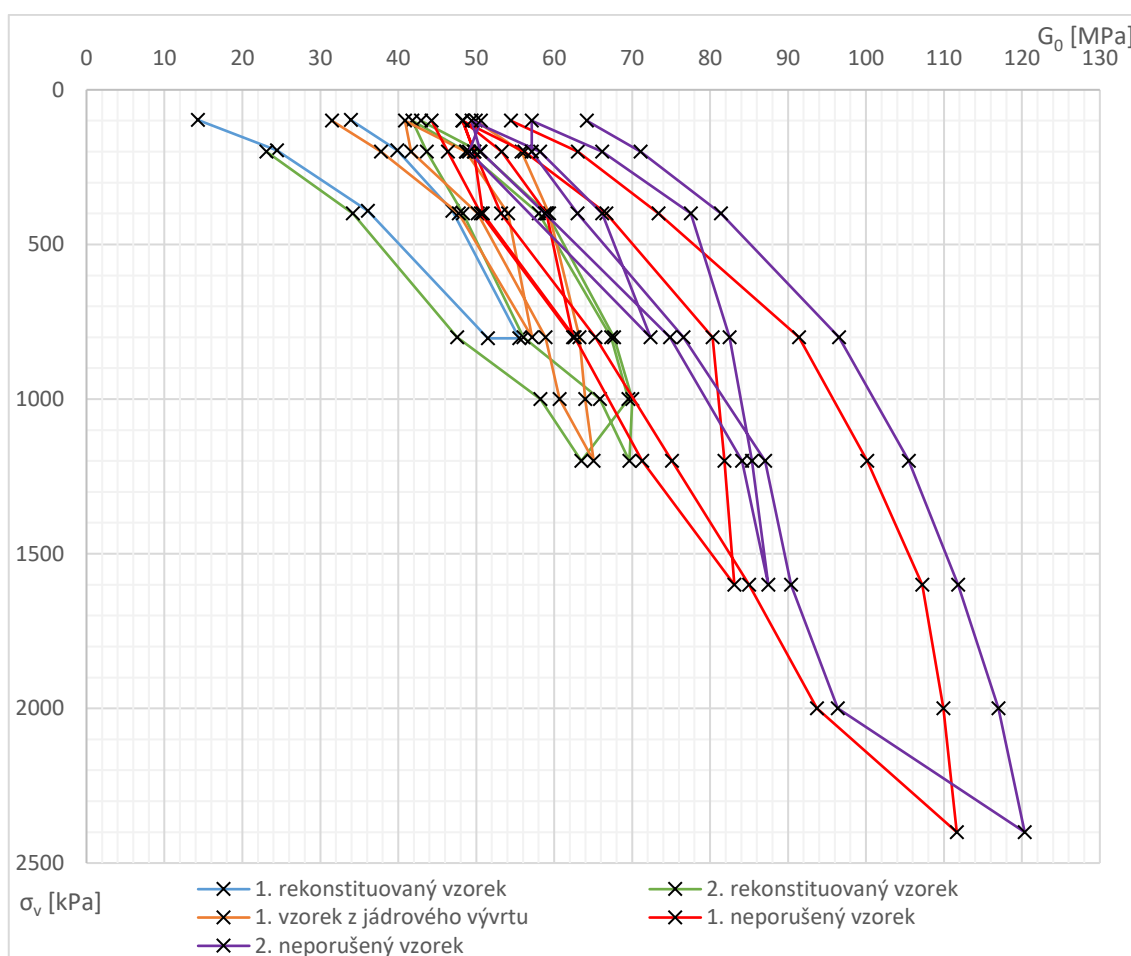
Obr. 6-13 Porovnání vyhodnocení modulu G_0 metodou křížového spektra s manuálním a automatickým určením sklonu křivky závislosti fázového posunu na frekvenci. Jako příklad je uvedeno vyhodnocení prvního neporušeného vzorku, tvar vyslaných vln byl jedna sinusová vlna.

6.6 Porovnání výsledků pro jednotlivé typy vzorků

Na obr. 6-14 jsou zobrazeny průběhy modulu G_0 pro všechny testované vzorky vyhodnocené metodou křížového spektra. Jednotlivé typy vzorků vykazují odlišné chování, ale jsou zde patrné jisté trendy. Modul G_0 je při nízkém svislém napětí u prvotního zatěžování rekonstituovaných vzorků v porovnání s ostatními typy vzorků velmi nízký. Při odtížení rekonstituovaných vzorků došlo k výraznému nárůstu hodnoty modulu G_0 , která se značně přiblížila hodnotám naměřených u ostatních typů vzorků. To je způsobeno tím, že při prvotním zatěžování je zemina normálně konsolidovaná, ale při odtížení a opětovném přitížení je již zemina v překonsolidovaném stavu, ve kterém má vyšší tuhost. V tab. 6-3 jsou dále porovnány hodnoty modulu G_0 při referenčním svislém napětí 100 kPa pro jednotlivé větve v průběhu zatěžování.

Tab. 6-3 Porovnání modulu G_0 [MPa] při referenčním svislém napětí 100 kPa pro jednotlivé vzorky a jednotlivé větve při zatěžování.

G_0 [MPa]	při 1. přitížení	před 2. přitížení	před 3. přitížení	po 3. přitížení
1. rekonstituovaný vz.	14	34	-	-
2. rekonstituovaný vz.	(13)	42	43	-
1. vzorek z vývrtnu	32	41	50	-
1. neporušený vzorek	44	48	48	54
2. neporušený vzorek	50	49	57	64



Obr. 6-14 Průběhy modulu G_0 v závislosti na svislém napětí pro všechny vzorky vyhodnocené metodou křížového spektra.

U rekonstituovaných vzorků je patrný nárůst modulu v čase v případě maximálního dosaženého zatížení, který je pravděpodobně způsoben dotvarováním.

Dotvarování je také pravděpodobně jedním z důvodů zvýšení modulu G_0 u neporušených vzorků při svislém zatížení 2400 kPa oproti trendu vývoje během předchozích přitěžovacích kroků. Druhou příčinou tohoto nárůstu může být skutečnost, že se svislé zatížení vzorku přiblížilo maximálnímu napětí, které bylo na neporušeném vzorku zeminy nanášeno v minulosti. V případě, že by bylo překročeno maximální napětí, kterému byl neporušený vzorek vystaven v minulosti, tak by se modul G_0 měl dále vyvíjet po křivce prvotního zatěžování zeminy, která má v zobrazení na obr. 6-14 menší sklon než trajektorie při odtížení a opětovném přitížení. Jedinou prokazatelně naměřenou částí křivky prvotního zatěžování zeminy jsou první přitěžovací větve rekonstituovaných vzorků, které byly provedeny do svislého zatížení 1200 kPa. Hodnoty pro křivku prvotního zatěžování zeminy při svislém napětí 2000 kPa až 2500 kPa je tak možné pouze odhadnout na základě jejího průběhu naměřeného u rekonstituovaných vzorků, což bylo provedeno při aproximaci naměřených hodnot matematickým vztahem v kapitole 6.6.1.

U prvního vzorku z jádrového vývrtu, který byl odebrán z podobné hloubky jako neporušené vzorky, byly při prvním přitěžování zjištěny hodnoty modulu G_0 větší než u rekonstituovaných vzorků, ale zároveň znatelně nižší než u neporušených vzorků, a to zejména u prvních dvou zatěžovacích stupňů.

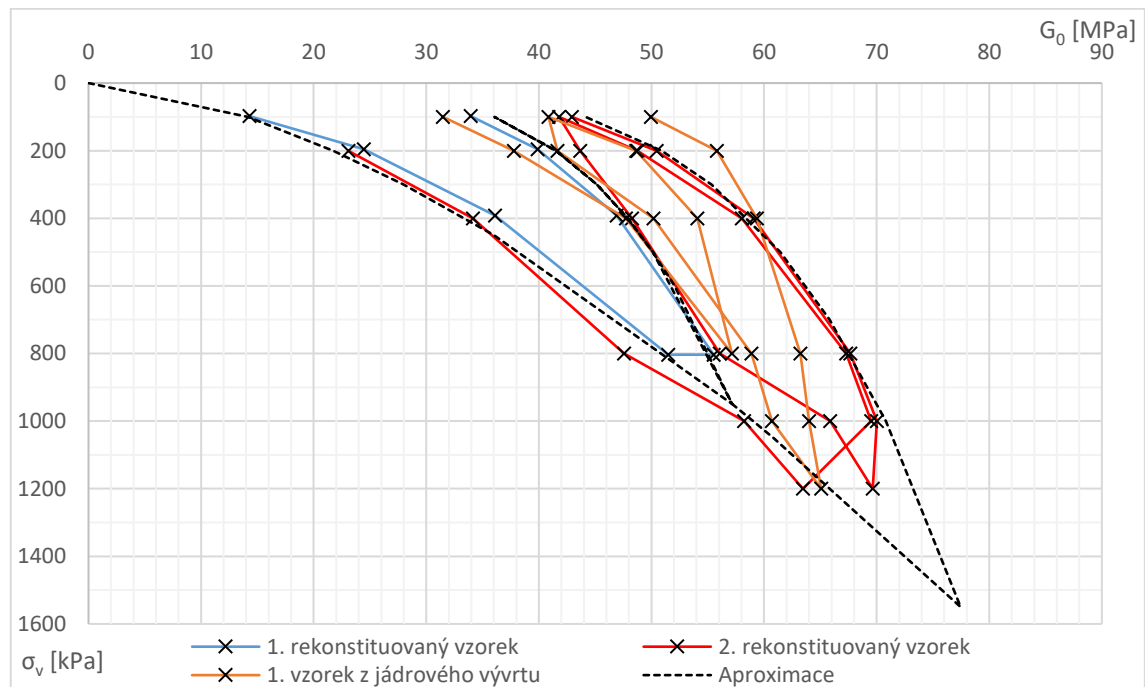
6.6.1 Aproximace výsledků matematickým vztahem

Pro naměřené hodnoty modulu G_0 z jednotlivých zkoušek byla provedena aproximace matematickým vztahem (2-11), který umožňuje popsat chování zeminy v závislosti na aktuálním svislém napětí a maximálním napětí, kterému byl vzorek vystaven v historii. Při aproximaci byly stanoveny hodnoty koeficientů A , k a m a použito referenční napětí p_{ref} 100 kPa. Číslo pórovitosti při prvotním zatěžování a referenčním svislém napětí bylo převzato ze zkoušky prvního rekonstituovaného vzorku, při které byla změřena hodnota 1,19. Vyčíslený aproximační vztah s relativně dobrou shodou s měřením má podobu:

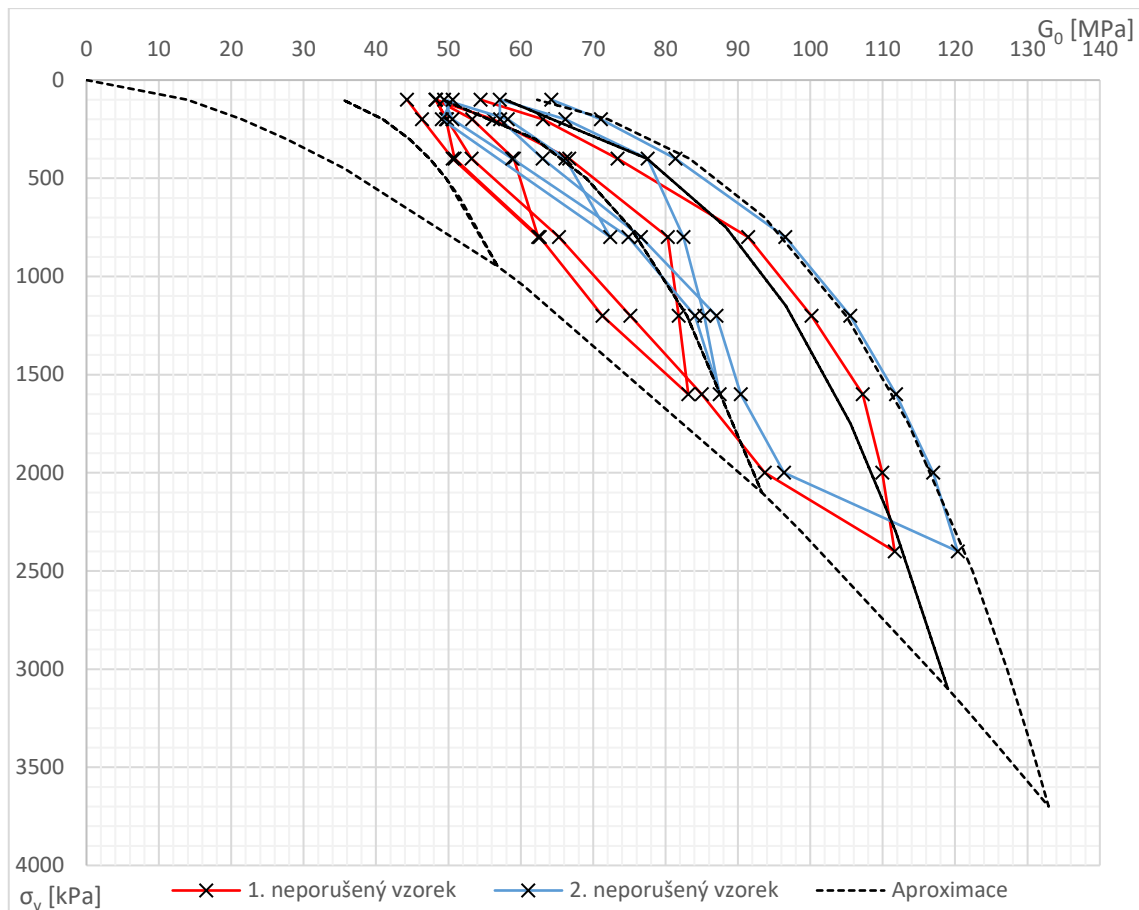
$$G_0 = 9,8 * \frac{(2,97-1,19)^2}{1+1,19} * \left(\frac{\sigma'_{v,max}}{\sigma'_v} \right)^{0,415} * \left(\frac{\sigma'_v}{100} \right)^{0,620} \text{ MPa} \quad (6-7)$$

Hodnoty napětí se do vztahu zadávají v [kPa]. Porovnání naměřených hodnot modulu G_0 pro jednotlivé provedené zkoušky s predikcemi vztahu (6-7) jsou provedeny na obr. 6-15 a obr. 6-16.

Vztah (6-7) umožňuje popsat křivku odlehčování, ale neumožňuje popsat hysterezi zemin, a tedy ani křivku opětovného přitížení. Aproximace byla provedena tak, aby vykazovala dobrou shodu na větvi odtížení.



Obr. 6-15 Závislost modulu G_0 na svislém napětí pro rekonstituované vzorky a první vzorek z jádrového vývrtu s vyznačeným průběhem aproximačního vztahu (6-7).



Obr. 6-16 Závislost modulu G_0 na svislém napětí pro neporušené vzorky s vyznačeným průběhem aproximačního vztahu (6-7).

Při provádění aproximace se ukázalo, že přesnost stanovení koeficientů rovnice je značně omezena délkou naměřené křivky prvotního zatěžování zeminy, která vyplývá z plánu zkoušek a postupného vývoje používaného přípravku pro implementaci bender elementů do edometrické zkoušky. Koeficient m , který popisuje nelinearitu větve prvotního zatěžování a částečně i větve odtížení, je s hodnotou 0,62 ve shodě s přehledem pro různé jíly, který sestavil Benz (2006), a kde m nabývá hodnot od 0,4 do 0,85. Pro koeficient k jsou ve stejném zdroji uvedené hodnoty pouze u malého množství zemin a jsou v rozsahu od 0,2 do 0,25. Koeficient k se s ohledem na tyto hodnoty zdá nadhodnocený, ale v případě mírně odlišné kombinace parametrů A a k by jej bylo možné snížit. Pro toto zpřesnění je ale nezbytné mít k dispozici delší úsek křivky prvotního zatížení.

Stanovené koeficienty však nejsou zcela srovnatelné, protože v literatuře je vztah vyjádřen v závislosti na středním efektivním napětí místo svislého napětí za edometrických podmínek, které je použito v této práci, a tento rozdíl se projeví zejména

v koeficientu A . Větve odtížení jsou navíc v literatuře obvykle řízeny zejména změnou čísla pórovitosti, ale v této práci bylo zvoleno řízení zdánlivým stupněm překonsolidace, protože umožňuje snazší predikce chování v zobrazení závislosti modulu G_0 na svislém napětí a tato odlišnost ve vztahu se projeví v parametru k .

U posledních větví odlehčení neporušených vzorků je také patrné nutné zdánlivé navýšení maximální hodnoty aplikovaného zatížení, kterým se kompenzuje nárůst modulu G_0 , zřejmě způsobený dotvarováním. Stejný jev lze pozorovat u větví odtížení rekonstituovaných vzorků.

6.6.2 Měření modulu G_0 pro brněnský jíl v dostupné literatuře

Bylo zjištěno, že měření smykového modulu G_0 pro brněnské jíly prováděl Svoboda (2010). Jeho výsledky jsou uvedeny na obr. 6-17, vzorek pocházel z lokality Královopolského tunelu v Brně a byl odebrán z hloubky 15,2 m.

Protože Svoboda udává smykový modul G_0 v závislosti na středním napětí, tak jsou pro porovnání hodnoty naměřené pro neporušené vzorky v edometrických podmínkách zobrazeny na obr. 6-17 také v závislosti na středním napětí za použití koeficientu zemního tlaku v klidu podle vztahu:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi'_{cr} \quad (6-8)$$

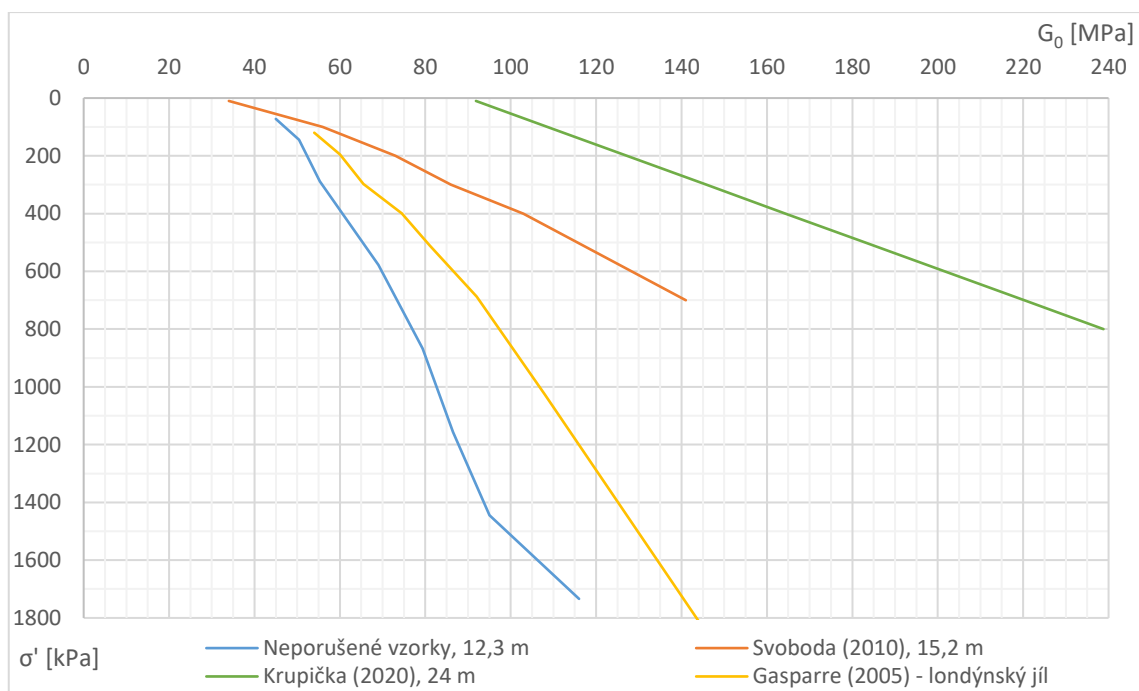
Použití této závislosti není zcela přesné, protože u překonsolidovaných zemin závisí koeficient zemního tlaku také na stupni překonsolidace, ale protože není dobře známa hodnota maximálního svislého napětí v minulosti pro brněnské jíly, tak byl použit vztah (6-8). Na obr. 6-17 jsou zobrazeny průměrné hodnoty modulu G_0 z přítěžovacích stupňů obou neporušených vzorků.

Z porovnání vyplývá, že hodnoty stanovené v případě této diplomové práce jsou pro referenční napětí srovnatelné s hodnotami stanovenými v práci (Svoboda, 2010), ale pro větší napětí byly naměřené hodnoty výrazně nižší.

Výsledky je možné dále porovnat s měřením smykového modulu G_0 pro brněnské jíly z lokality ulice Šmahova, které prováděl Krupička (2020). Ve své práci prováděl měření na několika neporušených vzorcích a stanovil výsledné hodnoty smykového modulu G_0 pro vertikální a horizontální směr a hloubku odběru 24 m. Krupička (2020) zjistil lineární závislost modulu G_0 ve svislém směru na napětí. Hodnoty stanovené ve svislém směru

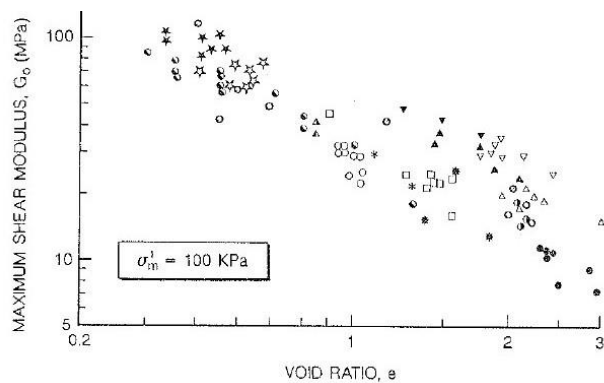
jsou zároveň výrazně vyšší než v práci (Svoboda, 2010). Krupička dále při porovnání s hodnotami uvedenými v práci (Svoboda, 2010) konstatuje, že tuhost brněnského jílu zřejmě značně závisí na konkrétní lokalitě a hloubce odběru. Obě měření zjištěná v literatuře také na rozdíl od této práce probíhala v triaxiálním přístroji.

V literatuře jsou také dostupné hodnoty smykového modulu G_0 pro londýnský jíl, který vykazuje podobné mechanické chování jako brněnský jíl (Svoboda, 2010). Hodnoty smykového modulu G_0 pro londýnský jíl zjištěné v práci (Gasparre, 2005) jsou také vyšší než v případě hodnot naměřených na prvním a druhém neporušeném vzorku za edometrických podmínek, ale sklony obou křivek jsou podobné.



Obr. 6-17 Porovnání měření modulu G_0 s literaturou v závislosti na středním efektivním napětí. Mimo neporušeného vzorku testovaného v této práci jsou zobrazeny další dvě měření na brněnském jílu a jedno měření na londýnském jílu, který má podobné mechanické vlastnosti.

Podle diagramu obvyklých hodnot modulu G_0 v závislosti na čísle pórovitosti vzorku při referenčním napětí 100 kPa z práce (Jamiołkowski, 1991), který je zobrazen na obr. 6-18, je patrná dobrá shoda pro neporušené vzorky testované v této práci s číslem pórovitosti 0,8 při referenčním napětí 100 kPa.

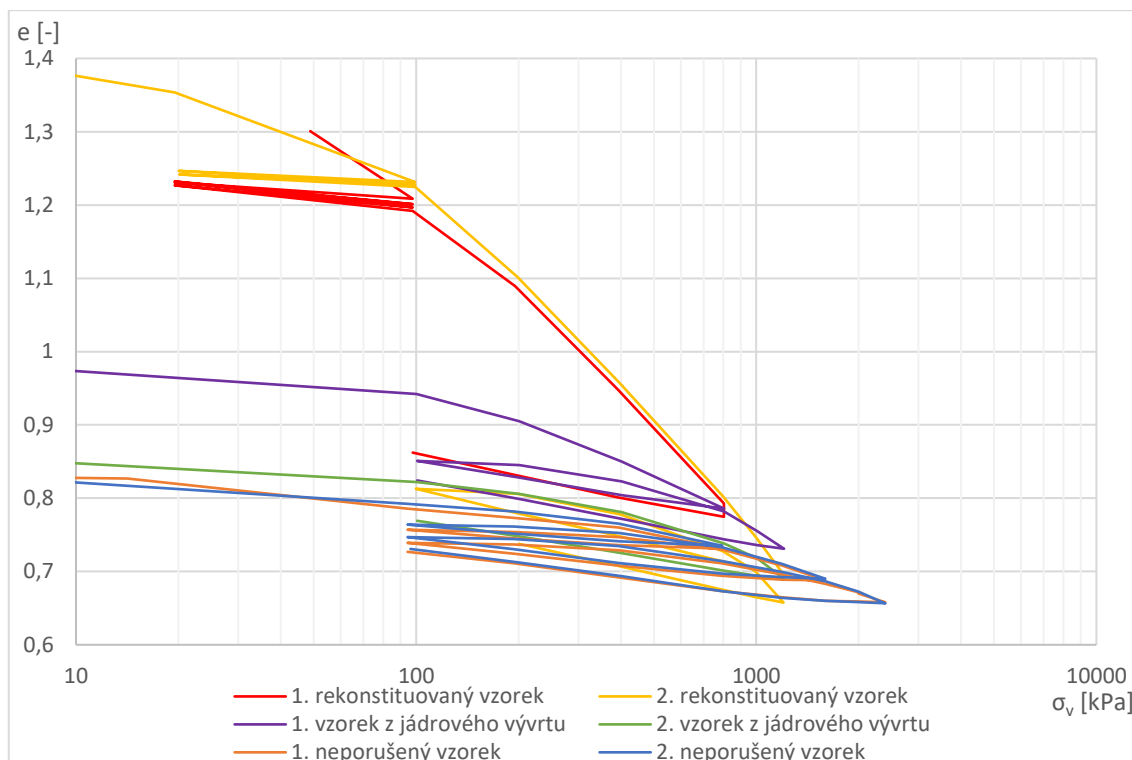


Obr. 6-18 Obvyklé hodnoty modulu G_0 v závislosti na čísle pórovitosti při referenčním napětí 100 kPa (Jamiolkowski, 1991).

6.7 Vyhodnocení jednoosé stlačitelnosti

Protože cílem práce bylo rozšíření edometrické zkoušky o další měřený parametr, kterým je počáteční smykový modul G_0 , tak byly kromě tohoto modulu určeny i standardní přetvárné charakteristiky, které se stanovují pomocí edometrické zkoušky. Těmito charakteristikami jsou index stlačitelnosti C_c a index odlehčení C_{cr} vypočtené pro jednotlivé zkoušky podle vztahu (2-3) na základě závislosti čísla pórovitosti na svislém napětí, která je zobrazena na obr. 6-19. Pro stejné typy vzorků jsou na tomto obrázku patrné dobré shody. Jedinou výjimkou jsou vzorky z jádrových vývrtů, kde je ale rozdíl způsoben výrazně odlišnou hloubkou, ze které byly vzorky odebrány.

U vzorku z prvního jádrového vývrtu bylo také zjištěno vyšší číslo pórovitosti než u neporušených vzorků, přestože oba typy vzorku pochází z přibližně stejné hloubky. U druhého vzorku z jádrového vývrtu je pak naměřené číslo pórovitosti srovnatelné s neporušenými vzorky, přestože vzorek z jádrového vývrtu pochází z téměř dvojnásobné hloubky. Nárůst čísla pórovitosti u vzorků z jádrového vývrtu je pravděpodobně důsledkem porušení vzorků při odběru jádrovým vrtáním.



Obr. 6-19 Závislost čísla pórovitosti na svislém napětí pro jednotlivé zkoušky. Osa svislého napětí je v logaritmickém měřítku.

Index stlačitelnosti C_c byl stanoven pro oba rekonstituované vzorky pro křivku prvotního zatížení pro koncové body intervalů od 100 kPa do maximální hodnoty dosažené při zkoušce. Pro ostatní typy vzorků nebyl index stlačitelnosti stanoven, protože se zřetelně v žádném intervalu nenachází na křivce prvotního zatěžování. Index odlehčení C_{cr} byl stanoven pro všechny zkoušky pro krajní body poslední větve odlehčení. Zjištěné hodnoty jsou zapsané v tab. 6-4.

Tab. 6-4 Hodnoty indexů stlačitelnosti a odlehčení pro jednotlivé zkoušky.

zkouška	C_c [-]	C_{cr} [-]
1. rekonstituovaný vzorek	0,44	0,10
2. rekonstituovaný vzorek	0,49	0,10
1. vzorek z jádrového vývrtu	-	0,09
2. vzorek z jádrového vývrtu	-	0,07
1. neporušený vzorek	-	0,05
2. neporušený vzorek	-	0,05

Tyto hodnoty se dobře shodují s výsledky, které prováděl pro stejný materiál Rozmánek (2020). Ve své práci zjistil pro brněnský jíl hodnoty $C_c = 0,44$ a $C_{cr} = 0,07$.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo měření hodnot smykového modulu G_0 na různých typech vzorků brněnského jílu s ohledem na využití v inženýrské praxi. Proto bylo měření prováděno v edometrickém přístroji, neboť v praxi vždy nejsou prováděné náročnější triaxiální zkoušky. Za tímto účelem byl navržen a vyroben přípravek umožňující osazení snímačů pro měření smykového modulu G_0 do edometrického přístroje, a to nejdříve jako 3D tištěný prototyp a později byl vyroben z korozivzdorné oceli. Vyhodnocení dat probíhalo metodou křížového spektra a průběžně byly výsledky porovnávány s metodou *Visual Picking*. Zároveň byl navržen algoritmus pro automatické vyhodnocení měření metodou křížového spektra. Nakonec byla provedena aproximace naměřených hodnot od všech vzorků jedním vztahem.

Z výsledků měření vyplynulo, že pro jednotlivé typy vzorků průběhy modulu G_0 v závislosti na svislém napětí vykazovaly společné trendy. Zejména u rekonstituovaných vzorků byl při odtěžování a opětovném přitěžování pozorován výrazný nárůst smykového modulu G_0 oproti prvotnímu zatěžování. Tím se hodnota modulu G_0 při referenčním napětí značně přiblížila hodnotě naměřené na počátku zkoušky neporušených vzorků.

Pro rekonstituované vzorky byly zjištěny v průběhu zkoušky hodnoty modulu G_0 při referenčním napětí 100 kPa od 14 MPa do 43 MPa s maximálním svislým napětím 1200 kPa. Pro vzorek z jádrového vývrtu byly při referenčním napětí zjištěny hodnoty modulu G_0 od 32 MPa do 50 MPa při maximálním svislém napětí 1200 kPa. U neporušených vzorků byly zjištěny hodnoty modulu G_0 při referenčním napětí od 44 MPa do 64 MPa při maximálním svislém napětí 2400 kPa.

Podle předpokladu aproximačního vztahu by se mělo chování rekonstituovaných a neporušených vzorků při dostatečně vysokém napětí sjednotit, čemuž odpovídá i trend vývoje modulu G_0 u obou typů vzorků. Z důvodu provedeného sledu zkoušek a postupného vývoje přípravku pro osazení bender elementů do edometrické zkoušky však nebylo u rekonstituovaných vzorků dosaženo zatížení odpovídajícímu zdánlivému překonsolidačnímu napětí neporušených vzorků. Úroveň dosaženého svislého napětí u rekonstituovaných vzorků také limituje přesnost stanovení koeficientů aproximačního vztahu.

Praktický význam aproximačního vztahu spočívá v tom, že se koeficienty tohoto vztahu stanoví na základě chování rekonstituovaného vzorku a pomocí vztahu lze poté na základě čísla pórovitosti, resp. zdánlivého stupně překonsolidace, odhadnout hodnoty smykového modulu G_0 pro zeminu v přirozeném uložení bez nutnosti provádět zkoušky na neporušeném vzorku.

V průběhu zkoušky druhého vzorku z jádrového vývrtu došlo k závadě na jednom z bender elementů a tato porucha následně znemožnila vyhodnocení modulu G_0 u této zkoušky.

Používanou délku trajektorie šíření signálu vzorkem při vyhodnocení metodou křížového spektra, kterou byla vzdálenost podstav vzorku, by bylo vhodné dále ověřit ve stejném přístroji při odlišné výšce vzorku. V případě zvětšení výšky vzorku však bude nutné kontrolovat a respektovat zvýšení doby konsolidace při změně zatížení.

Výsledky algoritmu pro automatické vyhodnocení sklonu křivky závislosti fázového posunu na frekvenci jsou v dobré shodě s manuálně určenými hodnotami. V průběhu výpočtů se však ukázala značná časová náročnost, kdy vyhodnocení jedné dvojice odpovídajících si signálů trvá přibližně jednu minutu, a zůstává zde tedy prostor pro optimalizaci rychlosti tohoto algoritmu.

V literatuře byly zjištěny dvě nezávislé práce, ve kterých byl stanoven průběh smykového modulu G_0 v závislosti na středním efektivním napětí pro brněnské jíly. Jednotlivé stanovené křivky v literatuře se značně odlišují vzájemně mezi sebou i v porovnání s průběhem modulu G_0 zjištěným v této práci pro neporušené vzorky. Rozdíly jsou významné zejména při větších hodnotách napětí. Jednotlivé vzorky však pocházejí z odlišných hloubek a byly odebrány na různých místech vzájemně vzdálených několik kilometrů. Dále byla měření z této práce porovnána s průběhem smykového modulu G_0 pro londýnský jíl, který je svým mechanickým chováním podobný brněnskému jílu. Hodnoty modulu G_0 jsou pro londýnský jíl také vyšší, ale sklonem i hodnotami je tato závislost nejbližší průběhu z měření prováděných v této práci.

I při větší výšce vzorku, než jakou doporučuje norma a než jaká je v praxi běžně používaná, byly v případě indexu stlačitelnosti C_c a indexu odlehčení C_{cr} zjištěny hodnoty dobře se shodující s měřeními, které byly na zemině ze stejného místa odběru prováděny dříve na Ústavu geotechniky, FAST, VUT v Brně v práci (Rozmánek, 2020).

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- ARROYO, Marcos, David WOOD a Paul GREENING, 2003. Source near-field effects and pulse tests in soil samples. *Géotechnique* [online]. **53**(3), 337-345 [cit. 2021-12-20]. ISSN 0016-8505. Dostupné z: doi:10.1680/geot.2003.53.3.337
- BENTLEY SYSTEMS, INC., 2019. *Plaxis 2D Connect Edition V20: Material Models Manual* [online]. [cit. 2021-12-18]. 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. 2021-12-18]. 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, **86**(1), 16-27 [cit. 2021-12-18]. ISSN 1437-0999. Dostupné z: doi:10.1002/bate.200910038
- BOHÁČ, Jan a David MAŠÍN, 2009. Numerické modelování jílového masívu: Část 1: Konstituční vztah a stanovení parametrů. *Zakládání* [online]. Zakládání staveb, **2009**(2), 6-9 [cit. 2021-12-31]. ISSN 1212 – 1711. Dostupné z: https://www.zakladani.cz/casopis/pdf/ZS_02_2009.pdf
- BONALE, Julien, Shane DONOHUE a Ciaran MCNALLY, 2012. Wavelet analysis of bender element signals. *Geotechnique* [online]. **62**(3), 243-255 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: doi:10.1680/geot.9.P.052
- BURLAND, John B., 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique* [online]. **40**(3), 329-378 [cit. 2021-12-31]. ISSN 0016-8505. Dostupné z: doi:10.1680/geot.1990.40.3.329
- CAMACHO-TAUTA, Javier, Hassan ALI, Giovanni CASCANTE a António DA FONSECA, 2015. *Frequency domain method in bender element testing – experimental observations* [online]. IOS Press [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: doi:10.3233/978-1-61499-601-9-398

CLARKE, Sam a Charles HIRD, 2013. Modelling Viscous Effects during and after Construction in London Clay. *Geotechnical Engineering* [online]. **44**(2), 48-54 [cit. 2021-12-18]. ISSN 0046-5828. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273888377_Modelling_Viscous_Effects_during_and_after_Construction_in_London_Clay

COOLEY, James a John TUKEY, 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of computation*. **1965**(19), 297-301. ISSN 1088-6842.

ČÍŽEK, Václav, 1981. *Diskrétní Fourierova transformace a její použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:a09ae950-1d55-11e4-8e0d-005056827e51>

ČSN 73 6133, 2010. *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 1997-2, 2008. *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí: Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Český normalizační institut.

ČSN EN ISO 14688-2, 2005. *Geotechnický průzkum a zkoušení: Pojmenování a zařídování zemin - Část 2: Zásady klasifikace*. Český normalizační institut.

ČSN EN ISO 17892-5, 2017. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin: Část 5: Zkouška stlačitelnosti v edometru postupným přitěžováním*. ÚNMZ.

ČSN EN ISO 22475-1, 2006. *Geotechnický průzkum a zkoušení - Odběry vzorků a měření podzemní vody - Část 1: Zásady provádění*.

DA FONSECA, António, Cristiana FERREIRA a Martin FAHEY, 2009. A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. *Geotechnical Testing Journal* [online]. ASTM, **32**(2) [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: [doi:10.1520/GTJ100974](https://doi.org/10.1520/GTJ100974)

DYVIK, Rune a T. OLSEN, 1989. Gmax measured in oedometer and DSS tests using bender elements. In: *12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* [online]. Rio De Janeiro, Brazil: ISSMGE [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/33/1989_01_0011.pdf

- EL-NAHHAS, Fathalla a Yasser EL-MOSSALLAMY, 2009. *The role of small strain constitutive model for predicting differential settlement of above tunnels* [online]. In: . Cairo, Egypt: 13th ICSGE, Thirteenth International Conference on Structural and Geotechnical Engineering [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: doi:10.13140/2.1.4956.0968
- ERICKSON, Jonathan C., 2020. *Discrete Fourier Transform (DFT)* [online]. In: . Lexington, Virginia, USA [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: https://erickson.academic.wlu.edu/files/courses2020/sigproc_s2020/readings/DFT_Intro.pdf
- FAM, Moheb a Carlos SANTAMARINA, 1995. Study of Geoprocesses with Complementary Mechanical Electromagnetic Wave Measurements in an Oedometer. *Geotechnical Testing Journal*. **18**(3), 307-314. Dostupné z: doi:10.1520/GTJ10999J
- GASPARRE, Apollonia, 2005. *Advanced laboratory characterisation of London clay*. London. Dostupné také z: <https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/45389>. Thesis of dissertation. Imperial College London. Str. 460.
- GREENING, P., David NASH, Nadia BENAHMED, Cristiana FERREIRA a António DA FONSECA, 2003. *Comparison Of Shear Wave Velocity Measurements In Different Materials Using Time And Frequency Domain Techniques*. Lyon: 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials. ISBN 978-90-5809-604-3. Dostupné z: doi:10.1201/NOE9058096043.ch47
- HARDIN, Bobby a William BLACK, 1969. Closure to: Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* [online]. ASCE, **95**(6), 1531-1537 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/304015201_Closure_to_Vibration_Modulus_of_Normally_Consolidated_Clay
- HARDIN, Bobby a Vincent DRNEVICH, 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal of the Soil Mechanics Foundations Division*. ASCE, **98**(7), 667-692. Dostupné z: doi:10.1061/JSFEAQ.0001760
- HARDIN, Bobby a F. RICHART, 1963. Elastic Wave Velocities in Granular Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE, **89**(1), 33-65. Dostupné z: doi:10.1061/JSFEAQ.0000493

HERLUFSEN, H, 1984. Dual Chanel FFT Analysis (part I): To Advance Techniques in Acoustical, Electrical and Mechanical Measurement. *Technical Review*. BRÜEL & KJÆR, **1984**(1). ISSN 007-2621. Dostupné také z: <https://www.bksv.com/media/doc/bv0013.pdf>

HLAVÁČ, Václav, 2020. *Fourierova transformace v 1D a 2D* [online]. In: . 2020. Praha: ČVUT, Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <https://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/12FourierTxCz.pdf>

HORÁK, Vladislav a Josef HRDÝ, 1982. Geotechnické vlastnosti terciérních jílu z hlediska realizace podzemních kolektorů v Brně. In: *Brno a geologie: Sborník příspěvků*. Brno: Dům techniky ČSVTS, s. 104-107.

JAMIOLKOWSKI, Michele, Serge LEROUÉIL a D.C.F. LO PRESTI, 1991. Design parameters from theory to practice. In: *Int. Conf. on Geotechnical Engineering for coastal development*. Port & Harbour Research Institute, s. 877-917.

KLÍČ, Alois, Karel VOLKA a Miroslava DUBCOVÁ, 2002. *Fourierova transformace: s příklady z infračervené spektroskopie*. Praha: VŠCHT. ISBN 978-80-7080-478-0.

KRUPÍČKA, Martin, 2020. *Stanovení anizotropie tuhosti brněnského téglu pomocí bender elementů*. Praha. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav hydrogeologie, inž. geologie a užitá geofyziky. Vedoucí práce Najser, Jan.

LADE, Paul V., 2016. *Triaxial testing of soils*. Chichester, West Sussex, England: Wiley Blackwell, s. 335-341. ISBN 978-1-119-10659-3.

LEE, Jong, Geunwoo PARK, Yong BYUN a Changho LEE, 2020. Modified Fixed Wall Oedometer When Considering Stress Dependence of Elastic Wave Velocities. *Sensors* [online]. Basel, Switzerland: MDPI, **21**(20) [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: [doi:10.3390/s20216291](https://doi.org/10.3390/s20216291)

LEE, Jong-Sub a J. SANTAMARINA, 2005. Bender Elements: Performance and Signal Interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* [online]. ASCE, **131**(9), 1063-1070 [cit. 2021-12-18]. ISSN 1943-5606. Dostupné z: [doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:9\(1063\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:9(1063))

LIU, Hui, 2020. *Robot Systems for Rail Transit Applications*. China: Elsevier Science, s. 283-328, 418 s. ISBN 978-0-12-822968-2.

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.

PETRUŽÁLEK, Matěj, 2006. *Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemin v triaxiálním přístroji*. Praha. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav hydrogeologie, inž. geologie a užití geofyziky.

PLAXIS BV, 2015. 2D FEM analysis compared with the in-situ deformation measurements: A small study on the performance of the HS and HSsmall model in a design. *Plaxis Bulletin* [online]. AN Delft, Netherlands: Plaxis bv, (38), 10-17 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/plaxis-soilvision-wiki/45481/2d-fem-analysis-compared-with-the-in-situ-deformation-measurements>

ROZMÁNEK, Filip, 2020. *Zkoušky geomechanických vlastností brněnského jílu na rekonstituovaných vzorcích*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky.

SHONG-LOONG, Chen, Lee SHEN-CHUNG a Wei YU-SYUAN, 2016. Numerical Analysis of Ground Surface Settlement Induced by Double-O Tube Shield Tunneling. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. ASCE, **30**(5). Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000732

SIMPSON, Brian, 1992. Retaining structures: displacement and design. *Géotechnique* [online]. **42**(4), 541-576 [cit. 2021-12-18]. ISSN 0016-8505. Dostupné z: doi:10.1680/geot.1992.42.4.541

SMITH, Steven W., 1997. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. San Diego: California Technical Publishing. ISBN 0-9660176-3-3. Dostupné také z: <https://www.dspguide.com/ch31.htm>

STRÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH, 2019. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research a.s. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou_490/

SVOBODA, Tomáš, 2010. *Numerický model NRTM tunelu v tuhém jílu*. Praha. Dostupné také z: <https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/47389/150007619.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Disertační práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta.

THE MATHWORKS, INC., 2021. Unwrap. In: *MathWorks* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/matlab/ref/unwrap.html>

WILLE GEOTECHNIK, 2012. *Bender elements: Amplifier Settings - User manual*. Göttingen: Wille Geotechnik.

ZAPATA-MEDINA, David, Taesik KIM a Carlos VEGA-POSADA, 2015. Analysis of Bender Element signals during triaxial testing. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia* [online]. (76), 107-113 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: [doi:10.17533/udea.redin.n76a13](https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a13)

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Závislost smykového modulu na smykovém přetvoření γ_s	12
Obr. 2-2 Simpson's brick model	14
Obr. 2-3 Bender element požitý během zkoušek	16
Obr. 2-4 Závislost čísla pórovitosti na svislém efektivním napětí	22
Obr. 3-1 Princip vyhodnocení metodou Visual Picking	24
Obr. 3-2 Princip Fourierovy transformace	26
Obr. 3-3 Ukázka amplitudového spektra signálu	28
Obr. 3-4 Odlišné případy vlnění o dvou různých frekvencích	30
Obr. 3-5 Sbalené a rozbalené fázové spektrum	31
Obr. 4-1 Fotografie přípravku s osazeným vzorkem zeminy a kovovými podstavami ..	35
Obr. 4-2 Pohled shora na přípravek a příslušný svislý řez celou sestavou	37
Obr. 5-1 Vyslaný signál tvaru jedné sinusové vlny	39
Obr. 5-2 Vyslaný signál tvaru linear sweep	40
Obr. 5-3 Konsolidační válec pro přípravu rekonstituovaných vzorků	42
Obr. 5-4 Mechanický edometrický přístroj s pákovým mechanismem zatěžování	44
Obr. 5-5 Průběh zatěžování prvního rekonstituovaného vzorku	45
Obr. 5-6 Automatický zatěžovací rám	46
Obr. 5-7 Časový průběh zatížení druhého rekonstituovaného vzorku	47
Obr. 5-8 Časový plán zkoušky s prvním vzorkem z jádrového vývrtu	49
Obr. 5-9 Časový průběh zkoušky druhého vzorku z jádrového vývrtu	50
Obr. 5-10 Neporušený vzorek uvntř pouzdra a uzavřený gumovými víky	51
Obr. 5-11 Průběh zatěžování při zkoušce prvního neporušeného vzorku	53
Obr. 5-12 Časový průběh zkoušky druhého neporušeného vzorku	54
Obr. 6-1 Schéma trajektorií šíření příčného vlnění	56
Obr. 6-2 Interpretace vrcholů v přijatém signálu	57
Obr. 6-3 Panel ovladače generátoru signálu a osciloskopu	59
Obr. 6-4 Charakteristiky pro jednotlivá nastavení LP filtru	59
Obr. 6-5 Závislost fázového posunu na frekvenci pro jednotlivá nastavení LP filtru	60
Obr. 6-6 Vliv nastavení LP filtru na signál v časové oblasti	61
Obr. 6-7 Závislost modulu G_0 na svislém napětí pro rekonstituované vzorky	64

Obr. 6-8 Závislost modulu G_0 na svislém napětí pro první vzorek z jádrového vývrtu .	65
Obr. 6-9 Závislost modulu G_0 na svislém napětí pro první neporušený vzorek.....	66
Obr. 6-10 Závislost modulu G_0 na svislém napětí pro druhý neporušený vzorek	67
Obr. 6-11 Porovnání metody křížového spektra a metody Visual Picking	68
Obr. 6-12 Porovnání modulů G_0 určených na základě dvou tvarů vyslaných signálů	69
Obr. 6-13 Porovnání vyhodnocení modulu G_0 metodou křížového spektra s manuálním a automatickým určením sklonu křivky závislosti fázového posunu na frekvenci	70
Obr. 6-14 Průběhy modulu G_0 v závislosti na svislém napětí pro všechny vzorky.....	71
Obr. 6-15 Závislost modulu G_0 na svislém napětí pro rekonstituované vzorky a první vzorek z jádrového vývrtu s vyznačeným průběhem aproximačního vztahu	73
Obr. 6-16 Závislost modulu G_0 na svislém napětí pro neporušené vzorky s vyznačeným průběhem aproximačního vztahu.....	74
Obr. 6-17 Porovnání měření modulu G_0 s literaturou.....	76
Obr. 6-18 Obvyklé hodnoty modulu G_0 v závislosti na čísle pórovitosti.....	77
Obr. 6-19 Závislost čísla pórovitosti na svislém napětí pro jednotlivé zkoušky	78

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 6-1 Koeficienty aproximační funkce pro jednotlivá nastavení LP filtru.....	62
Tab. 6-2 Porovnání hodnot G_0 pro jednotlivá nastavení LP filtru a násobitel korekce ..	63
Tab. 6-3 Porovnání modulu G_0 při referenčním svislém napětí pro jednotlivé vzorky..	71
Tab. 6-4 Hodnoty indexů stlačitelnosti a odlehčení pro jednotlivé zkoušky.....	78