

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta**

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

Studijní program: Geologie, Obor: Aplikovaná geologie



**Bc. Martin Krupička**

**STANOVENÍ ANIZOTROPIE TUHOSTI BRNĚNSKÉHO  
TÉGLU POMOCÍ BENDER ELEMENTŮ**

**STIFFNESS ANISOTROPY OF BRNO TEGEL DETERMINED BY  
BENDER ELEMENTS**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jan Najser, Ph.D.

Praha, 2020

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním autorským dílem. Veškerá literatura a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury a v práci řádně citovány. Tato práce nebyla použita k získání jiného či stejného titulu. Souhlasím s využitím této práce pro další studijní a vědecké účely.

Martin Krupička

V Praze, srpen 2020

Podpis: .....

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji mému původnímu školiteli, Ing. Janu Boháčovi, CSc., za odborné vedení, věcné připomínky a vstřícné jednání během laboratorních experimentů. Rovněž děkuji jeho nástupci RNDr. Janu Najserovi, Ph.D. za pomoc, odborné vedení a veškeré rady a ochotu při finalizaci této práce. Poděkování patří dále Mgr. Matěji Petružálkovi, Ph.D. za rady v souvislosti s měřením bender elementy a Ing. Josefu Rottovi, Ph.D. za konzultace ohledně anizotropie zemin. V neposlední řadě děkuji Univerzitě Karlově za veškeré zdroje a prostředky. Tato práce vznikla za podpory grantů GAČR P105/12/1705 a GAČR P105/11/1884.

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá stanovením smykových modulů brněnského neogenního jílu (téglu) v různých směrech a určením jeho anizotropie tuhosti. Jako základní měřítko anizotropie tuhosti je v této práci uvažován stupeň anizotropie  $\alpha_G$  daný poměrem smykového modulu v horizontálním ( $G_{hh}$ ) a vertikálním směru ( $G_{vh}$ ).

V rámci práce byla prováděna měření rychlosti smykových vln na neporušených vertikálně a horizontálně orientovaných vzorcích brněnského téglu v triaxiální komoře pomocí piezokeramických snímačů, tzv. bender elementů. Jako pokročilá metoda pro určení míry anizotropie materiálu byl při měřeních využíván i další pár bender elementů, osazovaný horizontálně na boční stěny vzorku v triaxiální komoře.

Na základě těchto měření byly stanoveny hodnoty smykových modulů  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  pro různé úrovně napětí. Poměrem smykových modulů pak byl určen stupeň anizotropie  $\alpha_G \approx 1,43$  pro daná napětí, jako nejspolehlivější hodnota zjištěná z vlastních experimentů.

Rešeršní část práce stručně shrnuje dosavadní poznatky z výzkumů fyzikálních a mechanických vlastností brněnského téglu.

## SUMMARY

This Thesis deals with the determination of shear moduli of Brno Neogene clay (“tegel”) in various directions and the determination of its stiffness anisotropy. The basic measure of stiffness anisotropy in this thesis is considered to be the degree of anisotropy  $\alpha_G$  given by the ratio of shear moduli in the horizontal ( $G_{hh}$ ) and vertical direction ( $G_{vh}$ ).

Measurements of shear wave velocity were performed on undisturbed vertically and horizontally oriented samples of the Brno tegel in triaxial cell using piezoceramic sensors, so-called bender elements. As an advanced method for determining the degree of anisotropy of the material, another pair of bender elements was used in the measurements, mounted horizontally on the side walls of the sample in the triaxial cell.

Based on these measurements, the values of shear moduli  $G_{hh}$  and  $G_{vh}$  for different stress levels were determined. The ratio of shear moduli then determined the degree of anisotropy  $\alpha_G \approx 1,43$  for the given stresses, as the most reliable value based on performed experiments.

Literature review part of the thesis briefly summarizes the existing findings from research of physical and mechanical properties of the Brno tegel.

# OBSAH

1.	ÚVOD.....	1
2.	TUHOST A SMYKOVÝ MODUL.....	2
2.1	Anizotropie tuhosti.....	4
2.2	Měření tuhosti.....	6
3.	MĚŘENÍ RYCHLOSTI SMYKOVÝCH VLN POMOCÍ BENDER ELEMENTŮ.....	8
3.1	Měření anizotropie tuhosti pomocí BE.....	11
3.2	Určování času průchodu smykové vlny.....	14
3.2.1	Měření v časové oblasti.....	14
3.2.2	Měření ve frekvenční oblasti.....	16
3.2.3	Faktory ovlivňující signál a výsledky měření BE.....	17
4.	SMYKOVÝ MODUL A ANIZOTROPIE TUHOSTI JÍLŮ.....	22
5.	ŠIRŠÍ OBLAST ZÁJMU.....	27
5.1	Geologie širší oblasti zájmu.....	27
5.1.1	Český masiv.....	28
5.1.2	Západní Karpaty a karpatská předhlubeň.....	29
5.1.3	Vývoj karpatské předhlubně.....	30
5.2	Inženýrsko-geologické poměry zájmové oblasti.....	31
5.2.1	Kvartérní pokryvy v užší zájmové oblasti v okolí místa odběru vzorků.....	31
5.2.2	Hydrogeologické poměry.....	32
6.	POPIS A GEOTECHNICKÉ VLASTNOSTI BRNĚNSKÉHO NEOGENNÍHO JÍLU - TĚGLU.....	32
6.1	Mineralogické složení a základní popisné charakteristiky.....	33
6.2	Pevnostní charakteristiky téglu.....	38
6.3	Stlačitelnost, překonsolidace a součinitel zemního tlaku v klidu $K_0$ .....	39
6.4	Tuhost brněnského téglu a anizotropie tuhosti.....	43
7.	VLASTNÍ LABORATORNÍ ZKOUŠKY.....	50
7.1	Použité vybavení a přístroje.....	50
7.1.1	Triaxiální komora a GDS kontroléry.....	50
7.1.2	Bender elementy a související elektronika.....	52
7.1.3	Lokální snímače deformací LVDT.....	53
7.1.4	Kalibrace přístrojů.....	53

7.2	Odběr a příprava vzorků.....	55
7.2.1	Příprava neporušených vzorků.....	57
7.2.2	Příprava rekonstituovaného vzorku.....	59
7.3	Metodika a průběh triaxiálních zkoušek a měření BE .....	60
7.3.1	Použití horizontálních BE a LVDT .....	62
7.3.2	Měření BE při vlastních triaxiálních zkouškách .....	64
7.3.3	Průběh jednotlivých zkoušek .....	66
7.4	Výsledky měření a diskuze .....	68
7.4.1	Odečet času průchodu smykové vlny.....	68
7.4.2	Stanovení vzdálenosti průchodu smykové vlny .....	69
7.4.3	Smykové moduly a anizotropie tuhosti z jednotlivých zkoušek .....	70
7.4.4	Diskuze.....	76
8.	ZÁVĚR.....	82
9.	SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ.....	83

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Charakteristická křivka tuhosti znázorňující typické rozsahy přetvoření pro jednotlivé zkušební metody a stavby (upraveno z Atkinson, 2000; doplněno z Dyvik a Madshus, 1985).....	3
Obr. 2: Rozdíl měření deformací při a) běžné triaxiální zkoušce; b) při zkoušce s pomocí lokálních snímačů deformací přímo na vzorku (upraveno z Atkinson, 2007). ....	7
Obr. 3: Schéma konstrukce vysílacího bender elementu (Lings a Greening, 2001). ....	9
Obr. 4: Schéma zapojení vysílacího a přijímacího BE pro generování a zachycování smykových vln;.....	9
Obr. 5: a) Detail uchycení BE v podstavě triaxiální komory (upraveno z Ng, 2004);.....	10
Obr. 6: Schéma celého měřicího aparátu; $\lambda$ – vlnová délka, L – vzdálenost šíření vlny, t – čas průchodu vlny; šipka naznačuje směr pohybu vlny vzorkem umístěným v triaxiální komoře (upraveno z Piriyakul, 2010). ....	11
Obr. 7: Schéma měření anizotropie tuhosti v různých směrech s různou polarizací smykových vln na orientovaných vzorcích (Jovičić a Coop, 1998).....	12
Obr. 8: Možnosti umístění vertikálních a horizontálních bender elementů a propagace různě polarizovaných vln v různých směrech na jednom vzorku (upraveno z Ng, 2004 a Yamashita et al., 2009). ....	13
Obr. 9: Schéma osazení BE pro stanovení anizotropie tuhosti za předpokladu transversální izotropie; a) vertikálně orientovaný vzorek, vertikální BE pro měření $v_h$ , horizontální BE pro měření $h_h$ ; b) horizontálně orientovaný vzorek, vertikální BE pro měření $h_h$ , horizontální BE pro měření $v_h$ . ....	13
Obr. 10: Metoda prvního nasazení (Yamashita et al., 2009). ....	15
Obr. 11: Typický výstupní signál S-vlny ovlivněný efektem blízké zóny; A – první výchylka, B – první lokální maximum, C – nula po prvním maximu, D – první dominantní peak (Lee a Santamarina, 2005). ....	15
Obr. 12: Metody stanovení času průchodu signálu vzorkem; a) princip peak-to-peak a metody prvního nasazení; b) princip metody vzájemné korelace (Yamashita et al., 2009). ....	16
Obr. 13: Metoda fázového posunu spektra (Yamashita et al., 2009). ....	17
Obr. 14: Měření rychlosti smykové vlny pomocí BE s registrací odražené podélné vlny (upraveno z Lee a Santamarina 2005). ....	18
Obr. 15: „Overshooting“ při měření BE na poloskalní hornině; obdélníkový vstupní signál (Jovičić et al., 1996).....	19
Obr. 16: Měření BE na rekonstituovaném jílu a typický seismogram bez projevu „overshootingu“; a) obdélníkový puls; b) sinový puls (upraveno z Viggiani a Atkinson, 1995). ....	19
Obr. 17: Vliv frekvence vstupního sinového signálu na tvar výstupního signálu a na místo příchodu střížné vlny při ovlivnění (pro frekvenci 1,8 kHz) efektem blízké zóny (upraveno z Jovičić et al., 1996). ....	20
Obr. 18: Ovlivnění výstupního seismogramu efektem blízké zóny a „overshootingem“; měření BE na překonsolidovaném „Boom clay“ při různých frekvencích vstupního signálu (upraveno z Piriyakul, 2010).....	21
Obr. 19: Smykové moduly, rekonstituovaný Gaultský jíl; a) $G_{hh}$ a $G_{hv}$ vs. $p'$ při odlehčování a následném znovu zatěžování; b) Poměry $G_{hh}$ a $G_{hv}$ ( $\alpha_G$ ) a poměry $G_{vh}$ a $G_{hv}$ , při lineární regresi konstantní s rostoucím $p'$ (Pennington et al., 1997).....	24
Obr. 20: Smykové moduly z měření BE, neporušený Gaultský jíl při anizotropním zatížení (dáno poměrem $\sigma'_h$ a $\sigma'_v$ , kdy bylo $\sigma'_v = 120$ kPa) (Pennington et al., 1997). ....	24
Obr. 21: Smykové $G_{hh}$ , $G_{vh}$ $G_{hv}$ z měření BE na neporušených orientovaných vzorcích Londýnského jílu (Jovičić a Coop, 1998). ....	25
Obr. 22: Geologická mapa znázorňující kontakt Západních Karpat a Českého masivu (Pavlová, 2011). ....	28
Obr. 23: Stratigrafické schéma neogénu v karpatské předhlubni (Brzobohatý, 1997 in Chlupáč et al., 2002).....	30
Obr. 24: Křivka zrnitosti neogenního jílu z lokality Židenice (Krčmová, 1990).....	34
Obr. 25: Zrnitostní křivka neogenního jílu z lokality Boby centrum Brno (Boháč et al., 1995).....	34

Obr. 26: Křivka zrnitosti neogenního jílu z lokality Královopolských tunelů, podíl frakce: jíl 44,9 %, prach 50,8 %, písek 4,3 % (Pavlík a Rupp 2003 in Svoboda, 2010).....	35
Obr. 27: Křivky zrnitosti brněnského téglu z hloubek 24, 27, 36 m pocházejících z vrtu V1 zhotoveného v areálu společnosti Geotest a.s. ve Šmahově ulici v Brně (Černíková, 2014). ....	36
Obr. 28: Zrnitostní křivka brněnského téglu z lokality Královopolských tunelů, podíl frakce: jíl 58,5 %, prach 40,9 %, písek 0,6 % (Pavlová, 2014). ....	37
Obr. 29: Závislost tuhosti brněnského téglu na přetvoření (Boháč et al., 1995). ....	44
Obr. 30: a) Sečná tuhost brněnského téglu v oboru malých přetvoření z měření LVDT při $p' = 500$ kPa; b) srovnání měření LVDT při 275 kPa s predikcí hypoplastického modelu (Svoboda, 2010). ....	45
Obr. 31: Vývoj tuhosti brněnského téglu v oboru malých přetvoření v závislosti na středním napětí (Svoboda, 2010). ....	45
Obr. 32: Vypočtené hodnoty $E_h$ pro $\alpha_G = 1,35$ ; neodvodněný smyk: VZ1(36 m), VZ2 (24 m); odvodněný smyk: VZ3, VZ4 (24 m), VZ5, VZ6 (11 m) (Mohyla, 2014). ....	47
Obr. 33: Vypočtené hodnoty $v_{hh}$ pro $\alpha_G = 1,35$ ; VZ3, VZ4 (24 m), VZ5, VZ6 (11 m) (Mohyla, 2014). ....	47
Obr. 34: Závislost tuhosti v oboru velmi malých přetvoření na středním efektivním napětí stanovená z měření bender elementy a porovnání s lineární předpovědí hypoplastického modelu (Svoboda, 2010). ....	48
Obr. 35: a) Schéma konvenčního triaxiálního přístroje (Atkinson, 1993); b) Schéma triaxiálního přístroje modifikovaného o vertikální a horizontální BE (upraveno z Leong et al, 2009). ....	51
Obr. 36: Triaxiální komora používaná při svých měřeních pomocí BE (vpravo) a GDS kontroléry (vlevo) s logovacím počítačem. ....	51
Obr. 37: Používané vertikální a horizontální bender elementy. ....	52
Obr. 38: Fotografie celého měřicího systému BE v triaxiální komoře. ....	53
Obr. 39: Určení zpoždění vstupního signálu na osciloskopu a elektrického impulsu měřením při kontaktu vysílacího a přijímacího BE.....	54
Obr. 40: Kalibrační křivka v lineární části čtení LVDT snímače. ....	55
Obr. 41: Místo odběru vzorků – poloha vrtu V1 (Mapy.cz, 3. 8. 2020). ....	55
Obr. 42: Geologická dokumentace vrtu V1 (Geotest, a.s., 2012). ....	56
Obr. 43: Aparát pro vyřezávání triaxiálních vzorků (Head, 1994). ....	58
Obr. 44: Připravený neporušený vzorek brněnského téglu (zatím bez drážek pro BE). ....	59
Obr. 45: Způsob vyřezání drenážního filtračního papíru na plášti vzorku (Head, 1998). ....	61
Obr. 46: a) Perforovaná membrána se zakreslenou orientací budoucího vzorku a BE; b) Membrána s přilepenými horizontálními BE a utěsněnou perforací. ....	63
Obr. 47: a) Kompletně osazený neporušený vzorek téglu před uzavřením komory s vertikálními a horizontálními BE upevněnými pomocí držáku, včetně snímače LVDT pro měření axiální deformace vzorku; b) Detail kompletně osazeného vzorku téglu v již napuštěné triaxiální komoře. ....	63
Obr. 48: Neporušený vzorek téglu v triaxiální komoře osazený pouze vertikálními BE. ....	64
Obr. 49: Příklad zobrazení vstupního (žlutě) a výstupního (zeleně) signálu a odečet času průchodu smykové vlny na obrazovce osciloskopu při měření BE. ....	66
Obr. 50: Příklad normovaných a synchronizovaných výstupních signálů; červená čára je určené místo prvního nasazení pro odečet průchodu smykové vlny při vstupních signálech 3, 5, 7, 9 kHz ( 5HrVr21m, $p' = 285$ kPa) ....	69
Obr. 51: Křivky izotropní stlačitelnosti pro jednotlivé vzorky. ....	70
Obr. 52: Smykový modulu $G_{hh}$ z měření BE na neporušeném vzorku 1Hor7m v závislosti na $p'$ . ....	70
Obr. 53: Smykové moduly $G_{hh}$ a $G_{vh}$ z měření BE na neporušeném vzorku 2VrHr36m v závislosti na $p'$ ; poškozené BE. ....	71
Obr. 54: Smykový modul $G_{hh}$ z měření BE na neporušeném vzorku 3Hor36m v závislosti na $p'$ . ....	72
Obr. 55: Smykový modul $G_{vh}$ z měření BE na neporušeném vzorku 4Vert24m v závislosti na $p'$ . ....	72
Obr. 56: Smykové moduly $G_{hh}$ a $G_{vh}$ z měření BE na neporušeném vzorku 5HrVr21m v závislosti na $p'$ . ....	73

Obr. 57: Smykové moduly $G_{hh}$ a $G_{vh}$ z měření BE na neporušeném vzorku 6HrVr21m v závislosti na $p'$ .....	74
Obr. 58: Smykové moduly $G_{hh}$ a $G_{vh}$ z měření BE na neporušeném vzorku 7HrVr24m v závislosti na $p'$ .....	75
Obr. 59: Smykový modul $G_{vh}$ z měření BE na rekonstituovaném vzorku Rek1 v závislosti na $p'$ .....	75
Obr. 60: Srovnání všech smykových modulů $G_{hh}$ a $G_{vh}$ v závislosti na $p'$ z měření BE na všech vzorcích. ....	77
Obr. 61: Srovnání dopočítaného $\alpha_G$ z poměru lineárních trendů $G_{hh}$ a $G_{vh}$ z měření vertikálními BE a $\alpha_G$ stanoveného na jednotlivých vzorcích s použitím vertikálních i horizontálních BE, v závislosti na $p'$ .....	78
Obr. 62: Srovnání lineárních trendů z vlastních měření vertikálními BE s $G_{vh}$ z měření vertikálními BE Svobody (2010) a Rotta (2012, nepublikováno).....	79

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Smykové moduly $G_{hh}$ a $G_{hv}$ a stupně anizotropie Londýnského jílu z měření BE, neporušené vzorky, konsolidace $K_0 > 1$ (upraveno z Gasparre, 2005). ....	26
Tab. 2: Smykové moduly $G_{hh}$ a $G_{hv}$ a jejich poměry ( $\alpha_G$ ) z výsledků měření BE na Londýnském jílu pro jednotlivá stádia izotropní a anizotropní konsolidace, neporušené vzorky (Nishimura, 2005).....	26
Tab. 3: Srovnání mineralogického složení téglů z různých archivních zdrojů (data převzata z Horák a Hrdý, 1982; Boháč et al., 1995; Koubová et al., 2003 in Svoboda, 2010; Černíková, 2014; Pavlová, 2014).....	33
Tab. 4: Shrnutí indexových vlastností brněnského jílu z různých lokalit v oblasti Brna. (data převzata z Horák a Hrdý, 1982; Krčmová, 1990; Boháč a Feda, 1995; Svoboda, 2010; Černíková, 2014; Mohyla, 2014; Pavlová, 2014; Faktorová et al., 2019). ....	37
Tab. 5: Zatřídění brněnského téglu z různých lokalit (data převzata z Horák a Hrdý, 1982; Krčmová, 1990; Svoboda, 2010; Pavlová, 2014; Faktorová et al., 2019). ....	38
Tab. 6: Pevnostní charakteristiky brněnského téglu; *nejedná se o skutečnou reziduální pevnost, ale o odhad z triaxiální zkoušky při přetvoření 25 % (data převzata z Feda et al., 1995; Svoboda, 2010; Fencel, 2012; Faktorová et al., 2019). ....	39
Tab. 7: Parametry stlačitelnosti brněnského téglu (data převzata z Boháč et al., 1995; Feda et al., 1995; Svoboda, 2010; Pavlová, 2014; Faktorová et al., 2019).....	40
Tab. 8: Překonsolidační napětí a OCR z různých lokalit (data převzata z Erbenová, 2006; Míča et al., 2010; Svoboda, 2010; Novák, 2012; Krupička, 2012; Boháč a Pavlová, 2012; Černíková, 2014; Pavlová, 2014; Malát et al., 2016). ....	41
Tab. 9: Hodnoty $K_0$ stanovené na základě různých metod (data převzata z Erbenová, 2006; Svoboda, 2010; Boháč a Pavlová, 2012; Novák, 2012; Krupička, 2012; Rott et al., 2015; Malát et al., 2016). ....	43
Tab. 10: Shrnutí postupu jednotlivých zkoušek prováděných na vzorcích téglu. ....	67
Tab. 11: Stupeň anizotropie $\alpha_G$ z poměru $G_{hh}$ a $G_{vh}$ stanovených BE na vzorku 2VrHr36m; nespolehlivé kvůli poškození BE. ....	71
Tab. 12: Stupeň anizotropie $\alpha_G$ z poměru $G_{hh}$ a $G_{vh}$ stanovených BE na vzorku 5HrVr21m.....	73
Tab. 13: Stupeň anizotropie $\alpha_G$ z poměru $G_{hh}$ a $G_{vh}$ stanovených BE na vzorku 6HrVr21m.....	74
Tab. 14: Stupeň anizotropie $\alpha_G$ z poměru $G_{hh}$ a $G_{vh}$ stanovených BE na vzorku 7VrHr24m. ....	75

# SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

BE: bender element(y)	$w$ : přirozená vlhkost
$c'_{cr}$ : soudržnost v kritickém stavu	$w_L$ : vlhkost na mezi tekutosti
$c'_p$ : vrcholová soudržnost	$w_P$ : vlhkost na mezi plasticity
$C_e$ : index stlačitelnosti	$X(T)$ : vstupní signál
$C_e^*$ : číslo křivosti	$Y(T)$ : výstupní signál
$CC_{xy}(\tau)$ : funkce vzájemné korelace	$\alpha, \alpha_G$ : stupeň anizotropie
$c_d$ : koeficient difuze	$\alpha'_G$ : stupeň anizotropie z cross-hole měření
$C_u$ : číslo nestejnornosti	$\delta_{ij}$ : Kroneckerovo delta
$c_v$ : součinitel konsolidace	$\Delta t$ : rozdíl času
$C_a$ : index sekundární stlačitelnosti	$\epsilon_a$ : axiální přetvoření
$E$ : Youngův modul (tuhost při malých přetvořeních)	$\epsilon_{ij}$ : tenzor relativní deformace
$E_h$ : Youngův modul v horizontálním směru	$\epsilon_r$ : radiální přetvoření
$E_s$ : sečný Youngův modul	$\epsilon_s$ : smykové přetvoření
$E_t$ : tečný Youngův modul	$\epsilon_v$ : objemové přetvoření
$E_v$ : Youngův modul ve svislém směru	$\theta$ : relativní objemová deformace
$G$ : smykový modul	$\lambda$ : vlnová délka
$G_0, G_{max}$ : počáteční (maximální) smykový modul (tuhost při velmi malých přetvořeních)	$\lambda^*$ : směrnice čáry NCL
$G_{hh}$ : smykový modul v horizontální (izotropní) rovině	$\lambda^{**}$ : Laméuv koeficient
$G_{hv}$ : ekvivalent smykového modulu ve svislé rovině	$\nu$ : Poissonovo číslo
$G_{vh}$ : smykový modul ve svislé rovině	$\nu_{hh}$ : Poissonovo číslo pro horizontální přetvoření vlivem horizontálního napětí
$hh$ : směr a polarizace smykových vln hh	$\nu_{hv}$ : Poissonovo číslo pro svislé přetvoření vlivem horizontálního napětí
$hv$ : směr a polarizace smykových vln hv	$\nu_{vh}$ : Poissonovo číslo pro horizontální přetvoření vlivem svislého napětí
$I_A$ : index koloidní aktivity	$\rho_d$ : objemová hmotnost vysušené zeminy
$I_C$ : stupeň konzistence	$\rho_s$ : specifická objemová hmotnost (zdanlivá hustota pevných částic)
$I_P$ : index plasticity	$\rho_{sat}$ : objemová hmotnost saturované zeminy
$k$ : hydraulická vodivost	$\sigma'^*_{v max}$ : pseudo-překonsolidační napětí
$K$ : objemový modul	$\sigma'_v$ : vertikální efektivní napětí
$K_0$ : součinitel zemního tlaku v klidu	$\sigma'_h$ : horizontální efektivní napětí
$L$ : vzdálenost šíření vlny, délka vzorku	$\sigma'_{v max}$ : překonsolidační napětí
LVDT: lokální snímač(e) deformací (linear variable differential transformer)	$\sigma_a$ : axiální napětí
OCR: stupeň překonsolidace	$\sigma_{ij}$ : tenzor napětí
OCR*: stupeň překonsolidace z pseudo-překonsolidačního napětí	$\sigma_r$ : radiální napětí
$p'$ : střední efektivní napětí	$\tau$ : velikost vzájemného posunu signálů
$q$ : deviátorové napětí	$\varphi'_{cr}$ : úhel vnitřního tření v kritickém stavu
$R_d$ : poměr vyjadřující vliv efektu blízké zóny	$\varphi'_p$ : vrcholový úhel vnitřního
S: stupeň nasycení	$\varphi'_{rez}$ : reziduální pevnost (úhel vnitřního tření)
t: čas	
$T$ : délka integračního intervalu	
$v/h$ : směr a polarizace smykových vln vh	
$v, v_s$ : rychlost smykové vlny	

# 1. ÚVOD

V rámci mé diplomové práce se zabývám především stanovením anizotropie tuhosti brněnského neogenního jílu, tzv. téglu při velmi malých přetvořeních.

Tuhost zeminy vyjadřuje vztah mezi napětím a přetvořením. Jedná se o důležitou materiálovou charakteristiku zeminy, jež má s velikostí přetvoření nelineární vývoj. Tuhost při velmi malých přetvořeních je vyjádřena maximálním smykovým modulem  $G_0$ , který je možné stanovit na základě propagace seismických smykových vln materiálem.

Při zjištění smykových modulů v různých směrech je pak možné stanovit rovněž míru anizotropie téglu, která je vyjádřena stupněm anizotropie  $\alpha_G$ , daným poměrem smykového modulu v horizontálním směru  $G_{hh}$  a vertikálním směru  $G_{vh}$ . Znalost tuhosti v celém rozsahu přetvoření a anizotropie tuhosti hraje důležitou roli v komplexních inženýrských aplikacích, jako jsou predikce deformací při stavbě tunelů a podzemních stěn a podává informaci o vývoji deformací v závislosti na napětí. Zjištěné údaje proto slouží také jako vstupní parametry pro kalibraci numerických modelů. Hodnoty stanovené v rámci této diplomové práce jsou využity jako parametry modelu v rámci širšího projektu na PřF UK, jehož cílem bylo stanovení součinitele  $K_0$  pomocí zpětné numerické analýzy Královopolských tunelů v Brně.

Hlavním cílem mé práce je tak experimentální stanovení smykových modulů na neporušených vzorcích téglu v různých směrech ( $G_{hh}$  a  $G_{vh}$ ) a posouzení míry anizotropie na základě měření rychlosti smykových vln pomocí snímačů, tzv. bender elementů, které jsou schopné smykové vlny generovat a registrovat. Jedná se o piezokeramické snímače, které jsou vždy v páru osazeny v triaxiální komoře, přičemž vždy jeden bender element funguje jako vysílač smykové vlny a jeden jako její přijímač.

Měření probíhala na vertikálně a horizontálně orientovaných vzorcích připravených z neporušeného materiálu. Provedly se rovněž pokročilé zkoušky s druhým párem bender elementů umístěným na bocích vzorku v horizontálním směru. Tato metoda teoreticky umožňuje přímé stanovení stupně anizotropie na jediném vzorku.

V první části rešerše jsou popsány teoretické základy tuhosti a smykového modulu a nelinearita v souvislosti s oborem přetvoření. Dále je rozebrána problematika anizotropie tuhosti a možnosti stanovení tuhosti pro různé obory přetvoření. V další kapitole jsou do detailu popsány možnosti a metody měření rychlosti smykových vln pomocí bender elementů. Následující kapitola shrnuje poznatky o anizotropii tuhosti jílu na základě prací dalších autorů. Vzhledem k rozsáhlému výzkumu téglu, který probíhal na Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užitě geofyziky PřF UK, jsem v rámci diplomové práce provedl stručné, ale komplexní shrnutí veškerých dosavadních poznatků o jeho charakteristikách a parametrech. Účelem je především sdružení informací do jednoho celku a usnadnění hledání zdrojů případným budoucím výzkumníkům. Tato pasáž tak tvoří poměrně rozsáhlou část rešerše diplomové práce, nad rámec jejího primárního zaměření. Další kapitoly práce jsou věnovány popisu použitého vybavení a přístrojů, přípravě vzorků, metodice prováděných zkoušek, prezentaci výsledků měření a jejich diskuzi a porovnání s archivními informacemi z rešeršní části pro podání závěrů.

## 2. TUHOST A SMYKOVÝ MODUL

Tuhost (z anglického „stiffness“), nám udává vztah mezi přírůstkem napětí a přetvoření (Atkinson 1993). Jakékoli těleso se při změně zatížení deformuje. Deformaci můžeme rozdělit na elastickou (pružnou) a anelastickou (plastickou). Při elastické deformaci dochází po odlehčení k navrácení materiálu do původního stavu. Elastická deformace je definována Hookovým zákonem, jež má pro izotropní elastické kontinuum zobecněný tvar:

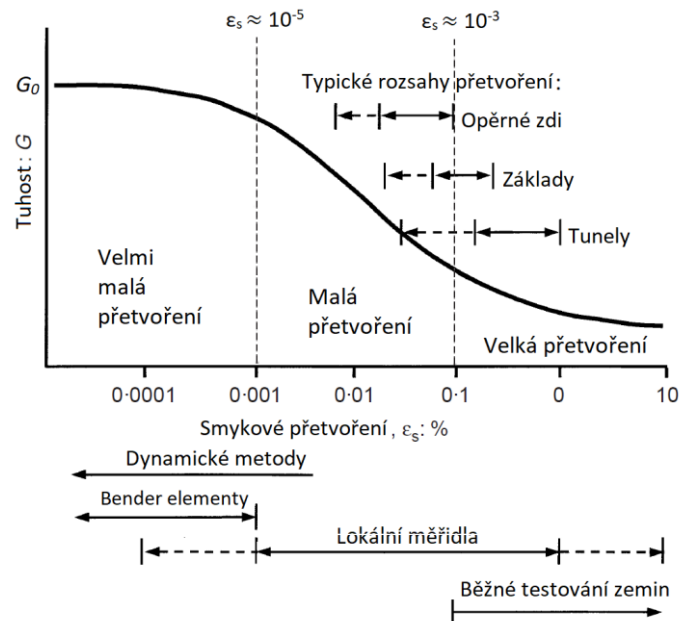
$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \theta + 2G \varepsilon_{ij} \quad (2.1),$$

kde  $\sigma_{ij}$  je tenzor napětí,  $\delta_{ij}$  je Kroneckerovo delta,  $\theta$  je relativní objemová deformace,  $\varepsilon_{ij}$  je tenzor relativní deformace,  $\lambda^{**}$  a  $G$  jsou Laméovy koeficienty, přičemž  $G$  je smykový modul. Většina materiálů se chová podle Hookova zákona do dosažení napětí na tzv. mezi úměrnosti, po níž už probíhá deformace anelastická (nevratná). Z Hookova zákona je zřejmé, že smykový modul představuje vyjádření vztahu mezi smykovým napětím a smykovým přetvořením, čili v podstatě odpor, který těleso klade proti smykové deformaci.

V praxi je běžné pro smykový modul, charakterizující daný vzorek zeminy, uvádět jednu konstantní hodnotu. Hodnota smykového modulu je ovšem závislá na velikosti přetvoření a ve skutečnosti tedy konstantní není. Závislost tuhosti na relativním smykovém přetvoření popisuje Atkinson (1993), Atkinson (2000) jako tzv. křivku tuhosti (viz Obr. 1). Na křivce tuhosti jsou přibližně vyznačeny jednotlivé regiony s odlišným chováním zeminy, resp. tuhosti – velmi malá přetvoření, malá přetvoření a velká přetvoření.

Z Obr. 1 vyplývá, že jednotlivé metody stanovování smykového modulu, lišící se mírou smykové deformace, ke které při jejich provádění dochází, poskytují odlišné výsledky hodnoty smykového modulu.

Smykový modul náležící do oblasti velmi malých přetvoření je konstantní a je nezávislý na velikosti přetvoření. Nazývá se maximální (nebo také počáteční) smykový modul a obvykle se označuje  $G_0$  nebo  $G_{max}$ . Maximálnímu smykovému modulu odpovídá smykový modul zjištěný z rychlosti seismických vln procházejících materiálem. V české literatuře je takto stanovený modul označován též jako dynamický smykový modul, neboť dochází k dynamickému zatěžování. Průchodem seismické vlny se zemina přetváří lineárně a deformace je vratná, čili dochází k elastickému přetvoření a elastické deformaci.



Obr. 1: Charakteristická křivka tuhosti znázorňující typické rozsahy přetvoření pro jednotlivé zkušební metody a stavby (upraveno z Atkinson, 2000; doplněno z Dyvik a Madshus, 1985).

V regionu malých a především velkých přetvoření nejsou hodnoty smykového modulu konstantní, nýbrž velikost smykového modulu klesá s rostoucím smykovým přetvořením. Těmto hodnotám odpovídá modul zjištěný ze zkoušek, kde se měří deformace statickým zatížením, a nazývá se obvykle v české literatuře smykovým modulem statickým (přetvárným). Nevhodná interpretace zkoušek pro stanovení smykového modulu statickým zatížením však poskytuje jako výsledek pouze jednu číselnou hodnotu smykového modulu, uvažovanou jako hodnotu konstantní, což je v rozporu s teorií (Obr. 1) a skutečností, jelikož tuhost při provádění těchto zkoušek je během postupné deformace proměnlivá (klesá s rostoucím přetvořením). Takto zjištěná hodnota smykového modulu je vždy nižší než skutečná hodnota  $G_0$ .

Maximální smykový modul při velmi malých přetvořeních je považován za jeden ze základních parametrů určujících chování zeminy. Tuhost v celém rozsahu oborů přetvoření je považována za klíčovou charakteristiku pro řešení geotechnických problémů, jako jsou sedání, deformace a interakce konstrukcí se základovou půdou. Používá se při numerickém modelování k simulaci sedání, deformací základů a tunelů. Rovněž se jedná o důležitý parametr v předpovědích reakce zemin na dynamické zatěžování, jako jsou například zemětřesení, výbuchy nebo vibrace strojů apod.

Moderním přístupem, používaným především pro numerické modelování chování zemin při zatížení, je využívání celé křivky tuhosti ve formě různých smykových modulů (resp. přetvárných modulů vyjadřujících tuhost) závislých na míře přetvoření na rozdíl od jedné konstantní hodnoty smykového modulu. Pro sestavení celé křivky tuhosti určité zeminy je třeba znát chování a smykový modul zeminy ve všech oblastech přetvoření.

Z definice je zřejmé, že smykový modul je značně závislý na úrovni napětí, přičemž s rostoucím napětím jeho hodnota nelineárně roste, jak potvrzují například zjištění Viggiani a Atkinson (1995) a rovněž mnoha dalších autorů, jejichž závěry jsou uvedeny dále v textu.

Smykový modul je závislý také na hodnotě čísla pórovitosti. S měnícím se napětím sice dochází i ke změně pórovitosti, ovšem vliv na tuhost nelze vyjádřit pouze změnou napětí. Zemina při stejné úrovni napětí a s rozdílnou pórovitostí může vykazovat odlišnou tuhost. Se snižujícím se číslem pórovitosti totiž dochází k nárůstu kontaktních ploch mezi zrny, což má za následek zvýšení tuhosti (Rott a Mašín, 2012). Při opakovaném zatěžování a odlehčování tak stejné vzorky mají vyšší hodnoty smykového modulu při stejném středním efektivním napětí  $p'$ , jelikož se snížilo číslo pórovitosti.

Na hodnoty maximálního smykového modulu má také vliv míra překonsolidace zeminy, resp. stupeň překonsolidace OCR. Prozatím nebyla žádným autorem nalezena jednoznačná metoda či funkce určující vztah mezi překonsolidací a tuhostí. Vzhledem k tomu, že během překonsolidace dochází ke snížení čísla pórovitosti, lze všeobecně říci, že vyšší OCR značí vyšší tuhost zeminy, kvůli snížení pórovitosti. Pro jednoznačné stanovení jeho vlivu je třeba brát v úvahu historii zatěžování a případné další vlivy stárnutí zeminy.

## 2.1 Anizotropie tuhosti

Graham a Houlsby (1983) definují izotropní elastický materiál jako takový, jehož elastické vlastnosti jsou nezávislé na směru os, ke kterým se vztahují. Izotropie tak vyjadřuje nezávislost materiálových vlastností na směru a izotropní materiál vykazuje stejné vlastnosti bez ohledu na svou aktuální orientaci. Elastický izotropní materiál, resp. jeho chování, může být plně charakterizován vždy dvěma nezávislými elastickými proměnnými, a to Youngovým modulem  $E$  a Poissonovým číslem  $\nu$ , nebo objemovým modulem  $K$  a smykovým modulem  $G$ . Jejich vzájemné vztahy vyjadřují rovnice (2.2) a (2.3). Při izotropní elasticitě dochází vlivem změny středního napětí ke změně objemu. Objemový modul popisuje vztah objemového přetvoření  $\varepsilon_v$  a změny středního efektivního napětí  $p'$ . Smykový modul popisuje vztah mezi smykovým napětím a smykovým přetvořením, resp. deviátorovým napětím  $q$  a smykovým přetvořením  $\varepsilon_s$  (při zjednodušení invariantů tenzorů pro triaxiální zkoušku).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.2)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2.3)$$

Materiál, jehož elastické vlastnosti jsou závislé na jeho orientaci, pak můžeme popsat jako anizotropní. Anizotropie tak vyjadřuje odlišné chování materiálu v různých směrech - v případě tuhosti různou tuhost v různých směrech.

Dle vzniku anizotropie tuhosti můžeme u zemin rozlišovat anizotropii vrozenou („inherent anisotropy“) a anizotropii získanou („induced anisotropy“). Vrozená (někdy také strukturní) anizotropie je vyvolána vlivem přirozeného vývoje struktury zeminy, anizotropním uložením částic a historií napětí a přetvoření. Získaná anizotropie je čistě výsledkem aktuálních anizotropních napjatostních podmínek a je nezávislá na historii napětí a přetvoření (Jovičić a Coop, 1998).

Matice tuhosti, obecně vyjadřující přírůstky napětí a přetvoření, má pro anizotropní materiál 6x6 komponent a musí být symetrická, díky čemuž může být anizotropní elastický materiál plně popsán 21 nezávislými parametry (Graham a Houlsby, 1983).

Mnohé materiály nicméně vykazují jednodušší formy anizotropie, což přináší další zjednodušení matice tuhosti. Transverzální izotropie (v zahraniční literatuře často zvaná cross-anizotropie, případně ortotropie) nastává, pokud má materiál stejné vlastnosti v určité rovině. Vlastnosti materiálu ve všech směrech rovnoběžných s touto rovinou jsou stejné a odlišují se vlastnosti na tuto rovinu kolmé. Pro vzorek materiálu tedy můžeme najít osu symetrie, kolem níž když rotuje, nemění se jeho vlastnosti v žádném směru. Transverzální izotropii můžeme uvažovat pro většinu zemin, včetně jílu. Vycházíme z předpokladu, že tyto byly sedimentovány vertikálně a vystaveny stejnému napětí ve všech horizontálních směrech, a při transversální anizotropii zemin tak obvykle existuje vertikální osa symetrie a horizontální izotropní rovina (Graham a Houlsby, 1983), (Rott a Mašín, 2012).

Pro transversální izotropii je možné najít až 8 materiálových proměnných matice tuhosti, z nichž 5 je nezávislých (Lings et al., 2000):

- $G_{vh}$  Smykový modul ve svislé rovině,
- $G_{hv}$  Ekvivalent smykového modulu ve svislé rovině,
- $G_{hh}$  Smykový modul v horizontální (izotropní) rovině,
- $E_v$  Youngův modul ve svislém směru,
- $E_h$  Youngův modul v horizontálním směru,
- $\nu_{vh}$  Poissonovo číslo pro horizontální přetvoření vlivem svislého napětí,
- $\nu_{hv}$  Poissonovo číslo pro svislé přetvoření vlivem horizontálního napětí,
- $\nu_{hh}$  Poissonovo číslo pro horizontální přetvoření vlivem horizontálního napětí,

Existence izotropní roviny je pak implikována na základě rovnice (2.2) vztahem:

$$G_{hh} = \frac{E_h}{2(1 + \nu_{hh})} \quad (2.4).$$

Požadavek na symetrii matice tuhosti dále vede ke vztahu:

$$\frac{\nu_{vh}}{E_v} = \frac{\nu_{hv}}{E_h} \quad (2.5)$$

a pro transversální izotropii pro homogenní materiál musí platit podmínka:

$$G_{vh} = G_{hv} \quad (2.6),$$

pročež může být matice tuhosti při transversální izotropii plně definována pomocí pěti nezávislých materiálových parametrů (Rott a Mašín, 2012).

Laboratorní zkoušky někdy nepotvrzují platnost vztahu (2.6), jak poukazují Rott a Mašín (2012) a vysvětlují rozdíl v hodnotách modulů spíše možným vlivem nehomogenit na základě Simpson et al. (1996), nebo okrajových podmínek dle Kuwano a Jardine (2002), případně i ne zcela přesnou formou transversální izotropie podle Arroyo a Wood (2004).

Míra anizotropie může být racionálně vyjádřena poměrem smykových modulů, Youngových modulů nebo Poissonových čísel v různých směrech jako stupeň anizotropie  $\alpha$  daný vztahem (2.7) odvozeným z empirických vztahů dle Graham a Houlsby (1983).

$$\alpha = \frac{G_{hh}}{G_{vh}} = \sqrt{\frac{E_h}{E_v}} = \frac{\nu_{hh}}{\nu_{vh}} \quad (2.7)$$

Ze vztahu (2.7) je patrné, že pokud zjišťujeme pro daný materiál hodnoty  $\alpha > 1$ , materiál vykazuje vyšší tuhost v horizontálním směru a obráceně pokud  $\alpha < 1$ , pak je materiál tužší ve směru vertikálním.

Pro poměr smykových modulů v horizontální a svislé rovině si pak můžeme definovat vztahem (2.8) stupeň anizotropie  $\alpha_G$ .

$$\alpha_G = \frac{G_{hh}}{G_{vh}} \quad (2.8)$$

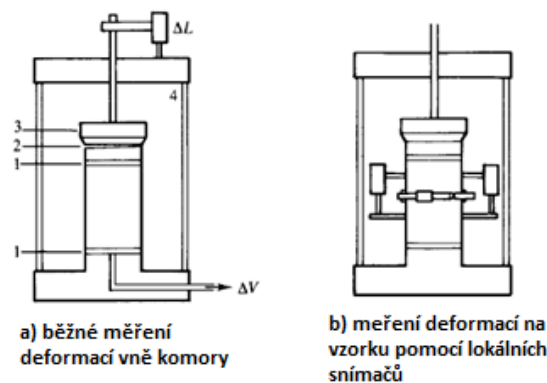
Stupeň anizotropie  $\alpha_G$  bude považován za základní měřítko anizotropie v rámci této diplomové práce, jelikož je daný právě poměrem smykových modulů, jež budou zjišťovány na orientovaných vzorcích brněnského jílu z rychlosti smykových vln pomocí měření bender elementy. U jílu se předpokládá pouze malý vliv získané anizotropie (Rott a Mašín, 2012), a proto je stupeň anizotropie zřejmě možné do jisté míry považovat za skutečný materiálový parametr jen minimálně závislý na úrovni napětí. Tomu nasvědčují i převzatá experimentální data (viz kapitola 4), na rozdíl od hodnot smykových modulů, které jsou závislé na středním napětí.

## 2.2 Měření tuhosti

Vhodnou metodou zjišťování tuhosti při velkých přetvořeních je ze stanoveného napět'o-přetvárného diagramu z běžné triaxiální zkoušky provedené v konvenční nebo hydraulické triaxiální komoře, kde

můžeme kontrolovat počáteční stav, určovat axiální a radiální napětí působící na vzorek a měřit deformace (Atkinson 1993). Deformace jsou v tomto případě měřeny vně komory a kvůli přesnosti dat není možné je interpretovat pro tuhost při malých a velmi malých přetvořeních. Vystávají tak problémy až při měření malých a velmi malých přetvoření, nutných ke stanovení celé křivky tuhosti, tedy především přetvoření menších než 0,001. Pro tyto obory přetvoření je nutné při testování v triaxiální komoře využívat speciálních zařízení (měřidel), které jsou v přímém kontaktu se vzorkem. Při jejich použití potom již přestává být problémem rozlišení či přesnost měřících zařízení, ale jde spíše o chyby vyvolané pohyby vzorku v komoře, dosedáním na rozhraních loadcell/podstavy komory/filtrační destičky/vzorek, případně nejednoznačné určení aktuálního stavu a rozměrů vzorku.

Pro měření tuhosti až do úrovně malých přetvoření jsou využívány lokální snímače deformací LVDT, umístěné přímo na vzorku uvnitř komory (viz Obr. 2). Lokální snímače odečítají deformace přímo na triaxiálním vzorku a oproti měřením vně komory poskytují přesnější měření deformací zejména v oblasti malých přetvoření. Ze známého přírůstku deformace a známého přírůstku napětí je pak možné stanovit hodnotu tuhosti (obvykle jako Youngova modulu  $E$ ) při velkých i malých přetvořeních, jejíž hodnota je proměnlivá právě s přetvořením, díky čemuž je možné vynést celou křivku tuhosti (viz Obr. 1) pro obor malých a velkých přetvoření. Měření pomocí lokálních snímačů deformace poskytuje reálnější (vyšší) hodnoty v oboru malých přetvoření než měřidla posunu vně komory a je vhodné pro stanovení přetvoření až do úrovně  $10^{-3}$ , spadající právě do regionu malých přetvoření (Atkinson, 2000). V případě osazení LVDT ve vertikálním i horizontálním směru je pak možné dle změřených deformací při izotropním zatížení dále stanovit Poissonovo číslo dané poměrem mezi přetvořením ve směru přitěžování a příčným přetvořením.



Obr. 2: Rozdíl měření deformací při a) běžné triaxiální zkoušce; b) při zkoušce s pomocí lokálních snímačů deformací přímo na vzorku (upraveno z Atkinson, 2007).

V oboru velmi malých přetvoření, kdy lze chování zeminy považovat za zcela elastické, se pohybujeme přibližně v rozsahu přetvoření menších než  $10^{-5}$  (viz Obr. 1). Tuhost odpovídající tomuto rozsahu pak popisujeme maximálním smykovým modulem  $G_0$ . Na základě teorie šíření smykové vlny izotropním elastickým kontinuem můžeme hodnotu smykového modulu  $G_0$  zeminy vyjádřit vztahem:

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2 \quad [\text{Pa}] \quad (2.9),$$

kde  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^3$ ] je objemová hmotnost a  $v_s$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je rychlost smykové vlny.

Určování smykového modulu z rychlosti seismických smykových vln (S) je již dlouhou dobu běžně praktikovanou metodou. Pro určování rychlosti smykových vln je třeba do vzorku, či do masivu umístit nějaký zdroj a snímač smykových vln. V současnosti existuje několik metod pro určování rychlosti střižné vlny.

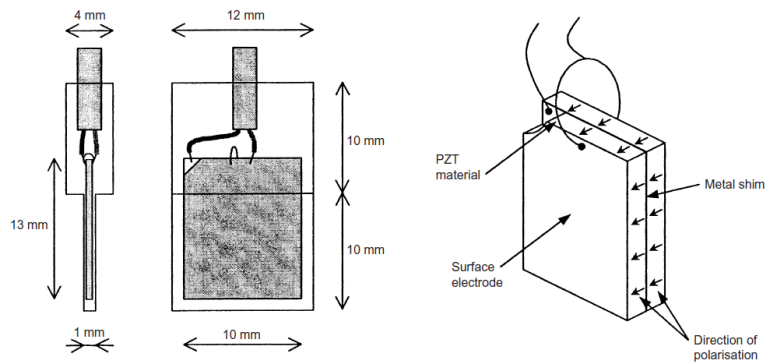
Nejběžnější využívanou laboratorní metodou je měření pomocí tzv. bender elementů (BE). Tyto piezokeramické snímače se ukázaly jako vhodný vysílač i přijímač smykových vln a jsou běžně osazovány do standardní triaxiální komory pro stanovení  $G_0$  zemin, případně v kombinaci s dalšími měřidly pro stanovení celé křivky tuhosti. Měření rychlosti a určování  $G_0$  v různých směrech na vzorcích brněnského jílu je hlavním tématem této diplomové práce, a proto je postup měření a popis všech součástí měřící aparatury s BE detailně rozepsán v kapitole 3 a v části vlastních laboratorních experimentů.

Další laboratorní metodou měření rychlosti smykových vln je měření pomocí tzv. „resonant columns“. Populárními polními metodami pro měření rychlosti střižných vln in-situ jsou měření ve vrtech, například tzv. cross-hole (měření mezi vrty), down-hole (kde je zdroj smykové vlny na povrchu a vlna je registrována ve vrtu), či up-hole (kdy je zdroj ve vrtu a signál registrován na povrchu). Z neinvazivních polních metod, jež nevyžadují provádění vrtu, se pak jedná o klasické metody geofyziky pomocí geofonů, kdy jsou zdroj i snímače umístěny na povrchu a metody mělké refrakční seismiky.

### **3. MĚŘENÍ RYCHLOSTI SMYKOVÝCH VLN POMOCÍ BENDER ELEMENTŮ**

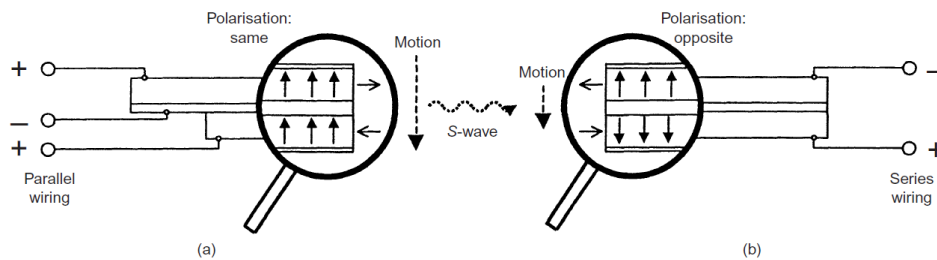
Měření rychlosti smykových vln pomocí bender elementů (BE) představili poprvé Shirley a Hampton (1978) a dnes je považováno za spolehlivou a rozšířenou metodu pro stanovení smykového modulu při velmi malých přetvořeních. V této metodě je využíváno elektromechanických vlastností piezokeramických hmot, které BE obsahují.

Samotné bender elementy sestávají ze dvou tenkých destiček z piezokeramického materiálu spojených dohromady, mezi nimiž je jedna plošná elektroda, a dále dvou elektrod na vnějších plochách destiček. Všechny komponenty jsou zality pryskyřicí, která funguje jako izolátor a zabraňuje vodivému kontaktu mezi okolním prostředím a bender elementy. Popsaná konstrukce BE podle Dyvik a Madshus (1985) je v současnosti asi nejvíce používaná a popisují ji například i Lings a Greening (2001). Schematicky je zobrazena na Obr. 3, z něhož jsou patrné i obvyklé rozměry elementů.



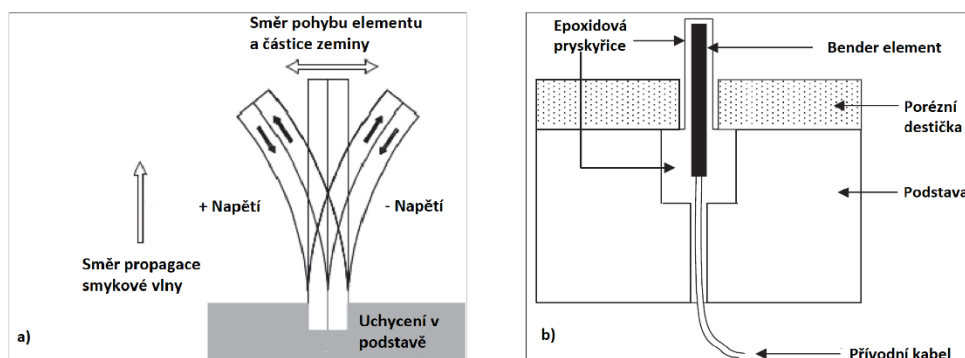
Obr. 3: Schéma konstrukce vysílacího bender elementu (Lings a Greening, 2001).

Piezoelektrický materiál přetváří elektrické napětí svou deformací na mechanickou energii (vysílací BE) anebo naopak transformuje mechanickou deformaci, které je vystaven, na elektrické napětí (přijímací BE). Elektrody mohou být zapojeny buďto paralelně nebo sériově, což ovlivňuje chování elementu a nejlepší možnosti jeho využití. Při sériovém zapojení je směr polarizace piezoelektrických destiček opačný a při paralelním zapojení je směr polarizace destiček stejný. V případě paralelního zapojení BE podává vyšší amplitudu kmitu elementu pro daný vstupní signál a je tak výhodnější ho využívat jako vysílač. Sériové zapojení je pak lepší pro využití BE jako přijímače, jelikož pro určitou deformaci (ohyb elementu) vytváří vyšší napětí (Brignoli et al., 1996). V této kombinaci zapojení, jež je patrné na schématu na Obr. 4, jsou BE využívány pro generování a zachycování smykových (neboli příčných, či střížných) vln.



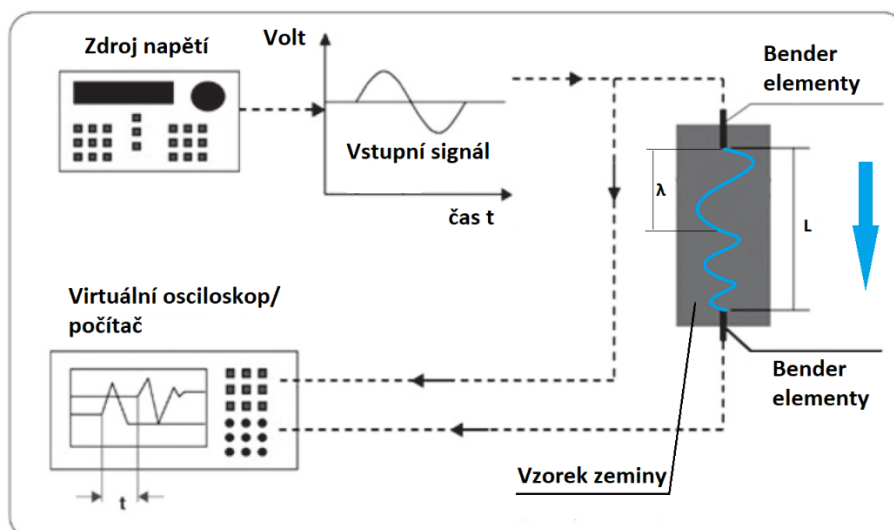
Obr. 4: Schéma zapojení vysílacího a přijímacího BE pro generování a zachycování smykových vln; a) vysílač, b) přijímač (Lings a Greening, 2001).

Elektrické napětí (vstupní signál) přicházející do vysílacího BE způsobí prodloužení jedné a zkrácení druhé piezokeramické destičky, čímž dojde k odpovídajícímu ohybu a rozkmitání bender elementu, jak je patrné na Obr. 5a. Již poměrně tradičně jsou BE umístovány v podstavách triaxiální komory tak, že vysílač, resp. přijímač je uchycen ve spodní, resp. horní podstavě způsobem, jaký je znázorněn na Obr. 5b a jeho kmitající část přesahuje při zkoušce do vzorku umístěného mezi podstavami komory.



Obr. 5: a) Detail uchycení BE v podstavě triaxiální komory (upraveno z Ng, 2004);  
 b) Schéma funkce a ohybu BE (upraveno z Kramer, 1996).

Vstupní signál, ve formě časově proměnného napětí, je generován zdrojem elektrického napětí, kterým může být například generátor funkce, generátor pulsu či zvuková karta počítače. Vstupní signál rozkmitáním vysílacího BE vyvolá šíření smykové vlny vzorkem, která následně po průchodu vzorkem excituje přijímací element. Ten se vlivem působení vlny ohýbá/rozkmitá a generuje měřitelné napětí. Velikost zrychlení ohybu přijímacího elementu je úměrná tomuto napětí. Výstupní signál jako časový průběh elementem generovaného napětí putuje do zesilovače a poté je zobrazen na virtuálním osciloskopu v počítači společně se vstupním signálem. Schéma celého měřicího aparátu je patrné na Obr. 6. Čas průchodu vlny vzorkem  $t$  je možné odečíst ze zobrazení signálů v osciloskopu. Vzdálenost šíření vlny vzorkem  $L$  odpovídá vzdálenosti do vzorku přesahujících konců bender elementů, jak uvádějí Viggiani a Atkinson (1995), tedy přímé délce vzorku mezi konci BE, a čas průchodu vlny je lineárně závislý na délce vzorku. Jejich závěry stanovení vzdálenosti odpovídají i původním zjištěním dle Dyvik a Madshus (1985) a tento postup je volen i dalšími autory, jako například Brignoli et al. (1996), Kawaguchi et al. (2001), Pennington et al. (2001) a Lee a Santamarina (2005). Žádné alternativy k tomuto postupu nejsou běžně využívány nebo doporučovány. Rio (2006) ve své disertační práci na základě podrobného testování velkého množství vzorků různých rozměrů uvádí, že jako  $L$  by měla být uvažována vzdálenost mezi centry dynamického tlaku BE, přičemž tato centra se nachází přibližně v 60 % délky do vzorku přesahujících bender elementů. Petružálek (2006) v rámci své diplomové práce rovněž měřil rychlosti smykových vln na různých dlouhých vzorcích a doporučuje používat jako vzdálenost šíření vlny rozměr mezi středy bender elementů (polovinami délek do vzorku přesahujících částí BE). Tyto závěry se však nepodařilo další rešerší potvrdit a vhodné tak pravděpodobně nadále zůstává použití původního postupu.



Obr. 6: Schéma celého měřicího aparátu;  $\lambda$  – vlnová délka,  $L$  – vzdálenost šíření vlny,  $t$  – čas průchodu vlny; šipka naznačuje směr pohybu vlny vzorkem umístěným v triaxiální komoře (upraveno z Piriyaikul, 2010).

Ze známého času  $t$  a vzdálenosti  $L$  můžeme spočítat rychlost smykové vlny  $v_s$  dle základního vztahu (3.1).

$$v_s = \frac{L}{t} \quad (3.1)$$

Jak je zmíněno výše, vzdálenost, kterou musí smyková vlna vzorkem urazit, je teoreticky poměrně jednoznačná. Pro určení času průchodu vlny na základě vstupního a výstupního signálu existuje více používaných postupů a tyto jsou blíže rozebrány v kapitole 3.2.

### 3.1 Měření anizotropie tuhosti pomocí BE

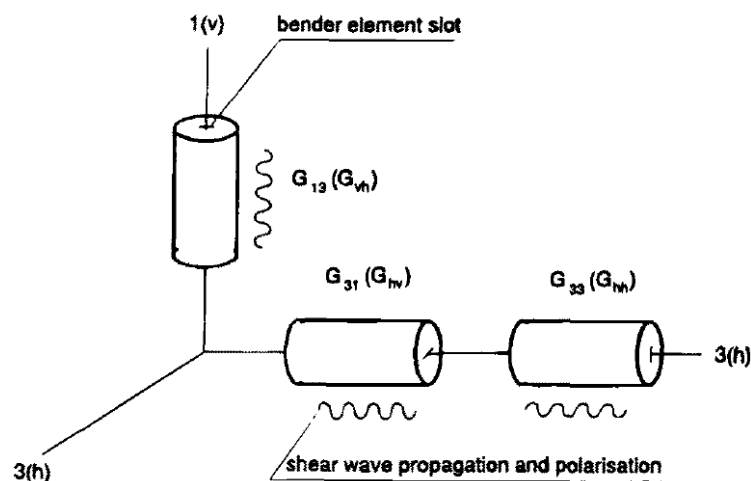
Anizotropii tuhosti při malých přetvořeních je možné stanovit na základě rychlosti smykových vln s různou polarizací propagovaných vzorkem v různých směrech, jak uvádějí už Sanchez-Salinerio et al. (1986). Výpočet smykového modulu pak probíhá na základě vztahu:

$$G_{ij} = \rho \cdot (v_{ij})^2 \quad (3.2),$$

kde,  $i$  a  $j$  vyjadřují směry a polarizace smykové vlny procházející vzorkem a odpovídající smykové moduly. V závislosti na orientaci bender elementů, a tak polarizaci a na směru šíření smykové vlny lze vyhodnotit smykový modul v různých směrech, na základě čehož je možné určit anizotropii tuhosti. Konkrétně je potom možné stanovovat smykové moduly  $G_{vh}$ ,  $G_{hh}$  a  $G_{hv}$  na základě rychlosti střížných vln  $v_s$  ve směrech a s polarizací  $vh$ ,  $hh$  a  $hv$ .

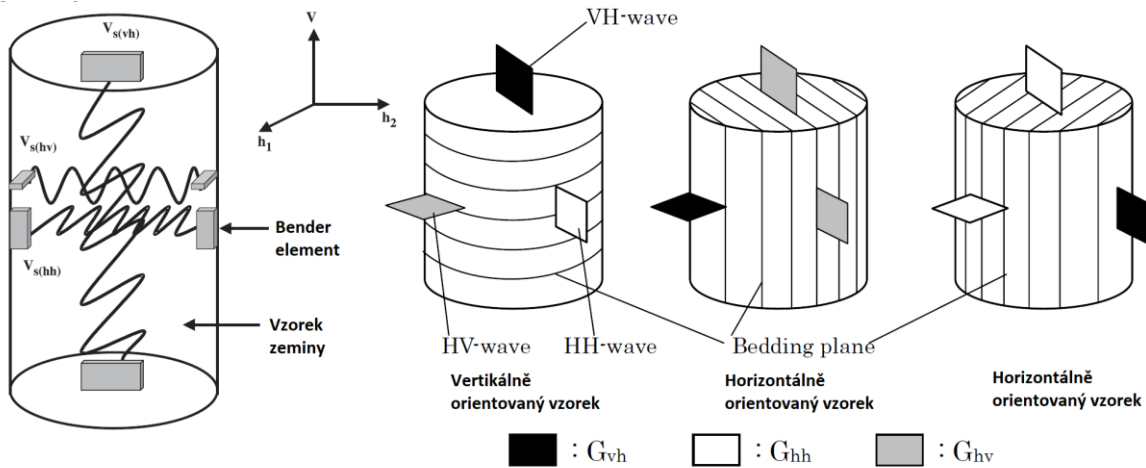
Jednou z možností je provádět měření ve standardní triaxiální komoře s BE osazenými v podstavách komory. V takovém případě je nutné připravit různě orientované vzorky a měření provést na každém zvlášť. Tento postup zvolili například Jovičić a Coop (1998), kteří měřili smykový modul pomocí BE

na vzorcích Londýnského jílu vyřezaných jak ve vertikálním, tak v horizontálním směru vzhledem k uložení in situ, resp. vzhledem ke směru působení vertikálního napětí vlivem gravitace. Pro horizontálně orientovaný vzorek je třeba osadit bender elementy takovým způsobem, aby polarita generovaných smykových mohla reprezentovat tuhost v obou horizontálních směrech ( $G_{hh}$  a  $G_{hv}$ ), viz Obr. 7. Jelikož se smykové moduly zjišťují na odlišných vzorcích, které nemusí mít zcela identické vlastnosti, například vlivem určitých nehomogenit, můžou být měřené parametry tuhosti tímto faktem ovlivněny. Přesto je, především na vzorcích ze stejných míst a obdobných hloubek, které se jeví homogenně, možné předpokládat dobrou využitelnost této metody pro stanovení anizotropie tuhosti.



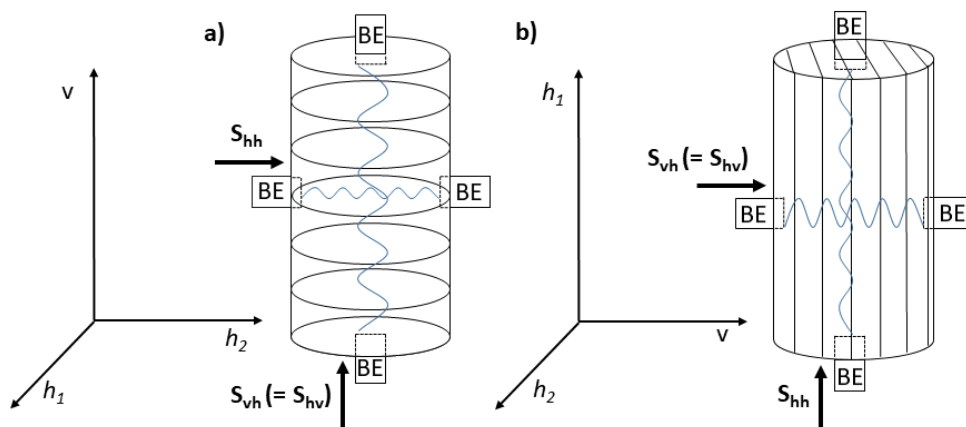
Obr. 7: Schéma měření anizotropie tuhosti v různých směrech s různou polarizací smykových vln na orientovaných vzorcích (Jovičić a Coop, 1998).

Progresivní metodou především právě při zjišťování anizotropie tuhosti je osazení dalšího páru, případně i více párů BE elementů v triaxiální komoře. Tímto způsobem postupovali při výzkumu anizotropie různých zemín například Pennington et al. (1997), Pennington et al. (2001), Ng (2004), Piriyaikul, K., 2006, Gasparre (2005), Gasparre et al. (2007), Yamashita et al. (2009), Teng et al. (2014) a jedná se tak již o poměrně zaběhnutou metodu. Princip a umístění bender elementů je znázorněn na Obr. 8. V podstavách triaxiální komory je umístěn jeden pár bender elementů stejně jako v přechodím případě (dále jen „vertikální BE“), ale rovněž jsou osazeny i další páry na bočních stranách vzorku (dále jen „horizontální BE“). Horizontální BE mohou být orientovány různými směry, a tak generovat různě polarizované vlny. Zároveň je stále možné používat i různě orientované vzorky. Při použití takovéto sestavy je pak možné stanovit smykové moduly ve všech třech směrech ( $G_{vh}$ ,  $G_{hv}$ ,  $G_{hh}$ ) na jednom vzorku a získat tak informaci o hodnotě stupně anizotropie  $\alpha_G$  přesně pro konkrétní materiál a určenou hodnotu teoreticky považovat za nejvěrohodnější.



Obr. 8: Možnosti umístění vertikálních a horizontálních bender elementů a propagace různě polarizovaných vln v různých směrech na jednom vzorku (upraveno z Ng, 2004 a Yamashita et al., 2009).

Při předpokladu transversální izotropie neboli cross-anizotropie (viz kapitola 2.1) pro brněnský tégel, kdy ( $G_{vh} = G_{hv}$ ), je potom dostačující pro stanovení anizotropie tuhosti při velmi malých přetvořeních, reprezentované stupněm anizotropie  $\alpha_G$ , použití dvou párů bender elementů. Jednoho páru vertikálních s polarizací a směrem šíření vln  $vh$  a jednoho páru horizontálních s polarizací a směrem  $hh$  při vertikálně orientovaném vzorku. Schematicky je tato instrumentace znázorněna na Obr. 9a. V případě horizontálně orientovaného vzorku pak analogicky připadá v úvahu použití jednoho páru vertikálních BE s polarizací a směrem  $hh$  a horizontálních s polarizací a směrem  $vh$  (viz horizontálně orientovaný vzorek na Obr. 9b). Použití třetího páru bender elementů je nadbytečné. Nicméně v případě použití tří párů bender elementů je možné využít tento třetí pár s polarizací a směrem vln  $hv$  pro ověření předpokladu cross-anizotropie (Pennington et al., 1997), protože výsledky měření rychlosti smykových vln a stanovené smykové moduly by měly být ve shodě se směrem  $vh$ .



Obr. 9: Schéma osazení BE pro stanovení anizotropie tuhosti za předpokladu transversální izotropie; a) vertikálně orientovaný vzorek, vertikální BE pro měření  $vh$ , horizontální BE pro měření  $hh$ ; b) horizontálně orientovaný vzorek, vertikální BE pro měření  $hh$ , horizontální BE pro měření  $vh$ .

## 3.2 Určování času průchodu smykové vlny

Obecně lze rozdělit metody určování času průchodu na základě zpracování signálů v časové oblasti („time domain techniques“) nebo frekvenční oblasti („frequency domain techniques“).

Jednotlivé používané metody shrnují přehledně například Yamashita et al. (2009) společně s jejich deskripcí a přináší také podrobné porovnání stanovených výsledků metod s koncentrací na konzistentnost při experimentech prováděných na stejném materiálu a za stejných podmínek.

Detailněji jsou jednotlivé metody popsány v dalších bodech této kapitoly.

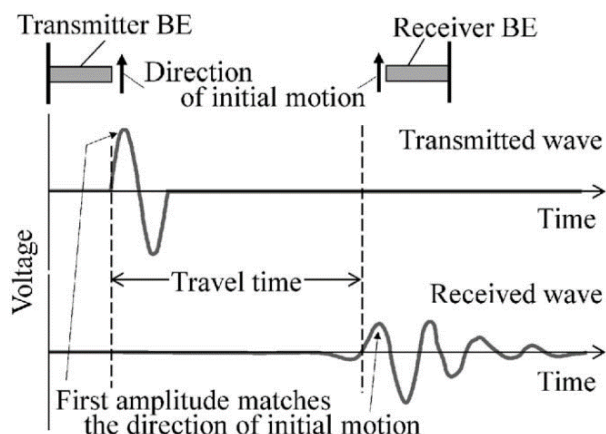
V dnešní době je jako vstupní signál nejvíce využíváný sinový impuls, jelikož signál obdélníkového impulsu využíváný v minulosti vedl často k výraznému zkreslení registrovaného signálu (Blewett et al., 2000). Frekvenční spektrum sinového impulsu, na rozdíl od obdélníkového, tvoří převážně jedna frekvenční komponenta a je tak výhodné pro měření materiálů s vyšší tuhostí, protože můžeme volit velikost frekvence (Petružálek, 2006) a omezit tak zkreslení výstupního signálu vlivem nežádoucích jevů, popsaných dále v této kapitole. Při měření se používají běžně frekvence vstupních signálů v rozmezí 1 – 20 kHz o amplitudě budícího elektrického napětí 10 V nebo 20 V (Petružálek, 2006).

### 3.2.1 Měření v časové oblasti

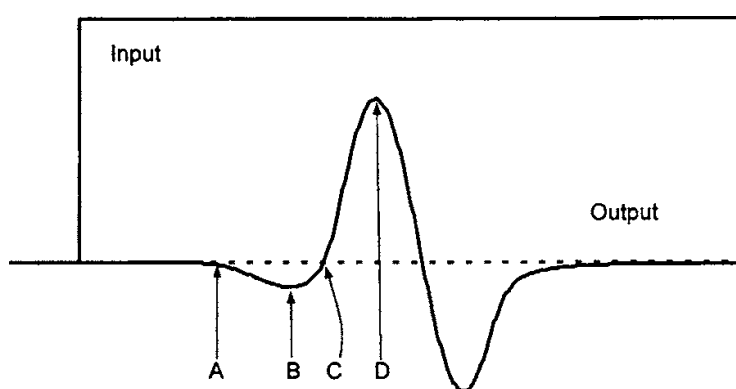
Při určování času průchodu smykové vlny podle zpracování dat v časové oblasti je nutné nejprve nalézt čas vzniku vlny, odečítaný ze vstupního signálu, a čas příchodu vlny, odečítaný z výstupního signálu. Čas průchodu vlny je daný rozdílem těchto dvou časů. Jedná se tak o časový interval mezi počátkem vybuzení vysílacího elementu elektrickým impulsem a prvním příchodem vlny na přijímací element. Základní používané metody v časové oblasti jsou v podstatě tři: metoda prvního nasazení vlny znamenající hledání časového rozdílu prvního nasazení vstupního a výstupního signálu („first arrival method“ nebo také „start-to-start method“), metoda srovnání vrcholů amplitudy signálů („peak-to-peak method“) a metoda vzájemné korelace vstupního a výstupního signálu („cross correlation method“).

#### **Metoda prvního nasazení („first arrival method“)**

K určení času průchodu vlny pozorujeme místo prvního nasazení výstupního signálu, který odpovídá příchodu smykové vlny. Zaznamenání tohoto prvního nasazení je zobrazeno na Obr. 10. V praxi však často není určení místa prvního nasazení zcela snadné a jednoznačné, protože výstupní signál může být ovlivněn zkreslením kvůli interferenci různých vln propagovaných vzorkem a ovlivněn efektem blízké zóny, jak poukazují na základně experimentů Viggiani a Atkinson (1995) a Jovičić et al. (1996). Typický výstupní signál (obdélníkového pulsu, nicméně pro sinový puls s vlivem efektu blízké zóny je výsledek obdobný, viz kapitola 3.2.3) a nejednoznačnost bodu pro určení prvního nasazení jsou patrné na Obr. 11. Různí autoři pak předkládají odlišný přístup k interpretaci těchto bodů.



Obr. 10: Metoda prvního nasazení (Yamashita et al., 2009).



Obr. 11: Typický výstupní signál S-vlny ovlivněný efektem blízké zóny; A – první výchylka, B – první lokální maximum, C – nula po prvním maximu, D – první dominantní peak (Lee a Santamarina, 2005).

Prvotní práce interpretující měření BE braly bod A jako první nasazení. Viggiani a Atkinson (1995) navrhuje uvažovat jako první nasazení bod B, ale zároveň je také třeba brát v úvahu, že efektu blízké zóny je možné se v určitých případech vyhnout vhodnou volbou frekvence, viz Obr. 17. Bod B využívá rovněž například Piriyaikul (2010). Naopak Kawaguchi et al. (2001) a Lee a Santamarina (2005) považují bod B za nesprávný, právě protože se jedná o projev efektu blízké zóny, a používají bod C jako místo prvního nasazení. V případě výrazně horší čitelnosti výstupního signálu a nemožnosti lokalizace bodu C Kawaguchi et al. (2001) doporučují použít průměrný čas průchodu nacházející se mezi body B a D. Stanovení doby průchodu signálu z prvního nasazení je tak závislé na selekci konkrétního bodu pro odečet času, kterou provádí vyhodnocující osoba. To může vést ke vzniku určité chyby v měření, jak poukazují Alvarado a Coop (2012). Jedná se přesto stále o hojně využívanou metodu umožňující vyhodnocení výsledků bez následných složitějších analýz signálů.

### Metoda „peak-to-peak“

Stanovení času průchodu signálu metodou peak-to-peak je obdobné jako pro metodu prvního nasazení a je využívána viz například Viggiani a Atkinson (1995). Doba průchodu je uvažována jako časový

rozdíl mezi prvním maximem vstupního signálu a prvním maximem dominantní vlny výstupního signálu. Princip této metody je znázorněn na Obr. 12 společně s metodou vzájemné korelace i se srovnáním s metodou prvního nasazení (start-to-start).

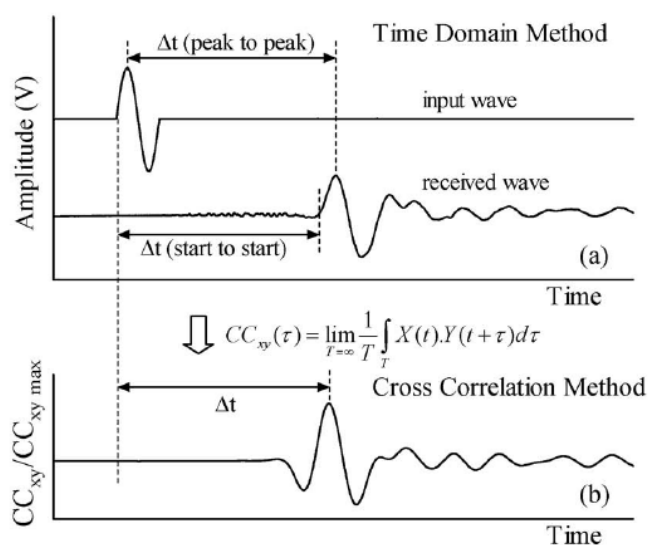
### **Metoda vzájemné korelace vstupního a výstupního signálu („cross correlation“)**

Tato metoda, jejíž teoretický základ položili Sanchez-Salinerio et al. (1986), je založena na podobnosti mezi vstupním a výstupním signálem. Podobnost je využívána použitím integrační funkce vzájemné korelace těchto signálů pro hledání doby průchodu smykové vlny.

Funkce vzájemné korelace  $CC_{xy}(\tau)$  může být vyjádřena vztahem:

$$CC_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T X(T) \cdot Y(T + \tau) dT \quad (3.3),$$

kde  $\tau$  je velikost vzájemného posunu signálů,  $T$  je délka integračního intervalu,  $X(T)$  je vstupní signál a  $Y(T)$  je výstupní signál. Vzájemná korelace  $CC_{xy}(\tau)$  je funkcí časového zpoždění  $\tau$  a časový posun v absolutním maximu funkce vzájemné korelace udává čas průchodu smykové vlny (Viggiani a Atkinson, 1995). Výsledek při použití tohoto principu je znázorněn na Obr. 12 společně s porovnáním metody peak-to-peak a prvního nasazení.



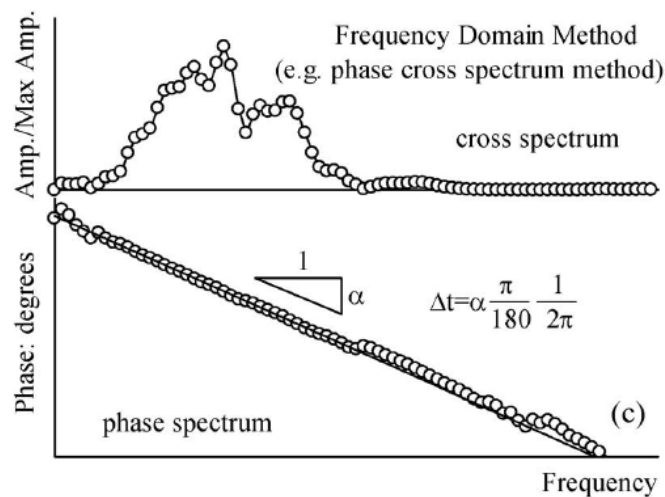
Obr. 12: Metody stanovení času průchodu signálu vzorkem; a) princip peak-to-peak a metody prvního nasazení; b) princip metody vzájemné korelace (Yamashita et al., 2009).

### **3.2.2 Měření ve frekvenční oblasti**

Dle interpretace ve frekvenční oblasti jsou využívána pro stanovení času průchodu vlny vzorkem frekvenční spektra signálů s použitím specifických budících signálů. Jedná se o metodu fázového posunu spektra („phase cross spectrum method“). Zpravidla je generován harmonický kontinuální signál o určité frekvenci, či s časově proměnnou frekvencí. Vychází se z předpokladu, že pro určitou délku

periody harmonického signálu je možné k určení času průchodu využít fázové zpoždění mezi budícím signálem a signálem, který prochází vzorkem, v případě, že je čas průchodu harmonického signálu menší, než právě délka jeho periody (Viggiani a Atkinson, 1995). Příklad využití metody fázového posunu spektra je zobrazen na Obr. 13.

Dle Yamashita et al., 2009 jednotlivé metody měření v časové oblasti na stejných vzorcích mohou vykazovat mezi sebou značné odchylky ve výsledcích. Čas průchodu vlny získaný metodou prvního nasazení se může výrazně lišit i v případě, kdy maximum vzájemné korelace signálů odpovídá výsledku sklonu fázového posunu spektra. Fázový posun spektra bude odpovídající, pouze pokud jsou si frekvence vstupní a první příchozí vlny rovny. Jak konstatuje Petružálek (2006) na základě vlastních měření a analýzy archivních zdrojů, interpretace ve frekvenční oblasti pro určení času průchodu smykové vlny se obecně neukazuje jako vhodná.



Obr. 13: Metoda fázového posunu spektra (Yamashita et al., 2009).

### 3.2.3 Faktory ovlivňující signál a výsledky měření BE

Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují propagaci smykových vln vzorkem a mohou mít nepříznivý vliv na měření pomocí bender elementů v triaxiální komoře a možnou interpretaci výsledků. Mezi ty nevýznamnější činitele můžeme zařadit především jev zvaný „overshooting“ a efekt blízké zóny („near field effect“), kterým byla věnována pozornost v rámci mnohých studií.

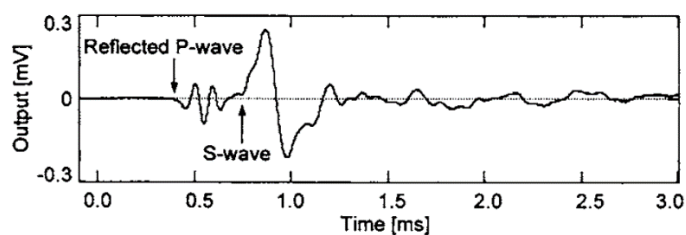
Na výsledky měření může mít podstatný vliv geometrie testovaného vzorku (Rio, 2006). Geometrie vzorku je však dána možnostmi samotného triaxiálního aparátu, ve kterém jsou BE osazeny.

Při generování vstupní vlny může docházet ke zpoždění mezi prvním nasazením vstupního signálu zobrazeným na osciloskopu a samotným elektrickým impulsem. Takovéto zpoždění je možné pozorovat během měření při přímém kontaktu vysílacího a přijímacího bender elementu. Jedná se o zpoždění zřejmě vlivem polarizace vysílacího elementu v řádech jednotek mikrosekund. Toto zpoždění měřicího systému se běžně zanedbává, jelikož standardní vzorky osazované v triaxiální komoře (76 mm resp. 38 mm) vykazují dobu průchodu vlny v řádech stovek mikrosekund (Petružálek, 2006). Na základě

vlastních měření interferometrem pak Petružálek (2006) uvádí, že může rovněž docházet ke zpoždění aktivace vysílacího elementu, které může dosahovat průměrně až 20 mikrosekund. Velikost tohoto zpoždění narůstá s rostoucí tuhostí testovaného materiálu.

Výsledky měření mohou být ovlivňovány rezonanční frekvencí. Ta je závislá na vlastnostech samotných bender elementů a také na vlastnostech dané zeminy. Mezi parametry, které mají vliv na rezonanční frekvenci, patří objemová hmotnost bender elementu, výška a šířka bender elementu, objemová hmotnost zeminy, Poissonovo číslo a rychlost šíření střížné vlny (Lee a Santamarina, 2005). Volba vstupního sinového signálu o stejné nebo podobné frekvenci, jaká je rezonanční frekvence bender elementů, zlepšuje odezvu přijímacího elementu a doporučuje se tak pro použití při měření v časové oblasti (Lee a Santamarina, 2005).

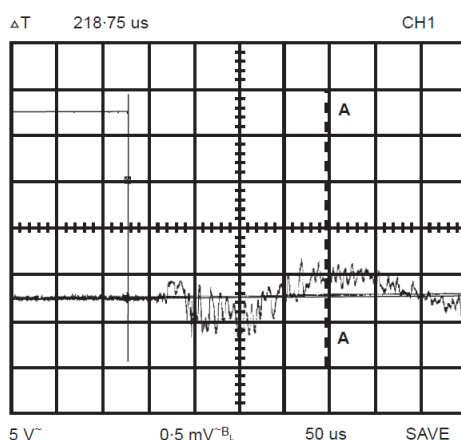
Vysílací bender element vytváří smykovou vlnu (S-vlnu) ale společně je generována také podélná vlna (Sanchez-Salínero et al., 1986). Podélná neboli kompresní vlna (P-vlna) má podstatně vyšší rychlost šíření a její přítomnost může ovlivnit měření smykových vln. Vysílací bender element v triaxiální komoře v podstatě vysílá střížnou vlnu v podélném směru přímo proti přijímacímu elementu a svým kmitem a kompresí materiálu na plochách BE také generuje podélné vlny v příčném směru, tedy přibližně kolmo a šikmo na plochy BE. Kvůli tomu může vznikat na rozhraních vzorku a komory široké spektrum přeměněných, odražených, nebo lomených vln, které mohou dosahovat vyšších rychlostí, než měřená smyková vlna, a pak s touto rovněž interferovat a znesnadnit, či znemožnit identifikaci jejího prvního nasazení. Obr. 14 dokumentuje registraci složité interferenční vlny, kde vzhledem k malým rozměrům vzorku nedochází k ztlumení jednotlivých vlnových komponent. Možná interference závisí například na geometrii komory, nasycení a geometrii vzorku a aktuálních napjatostních podmínkách (Lee a Santamarina, 2005).



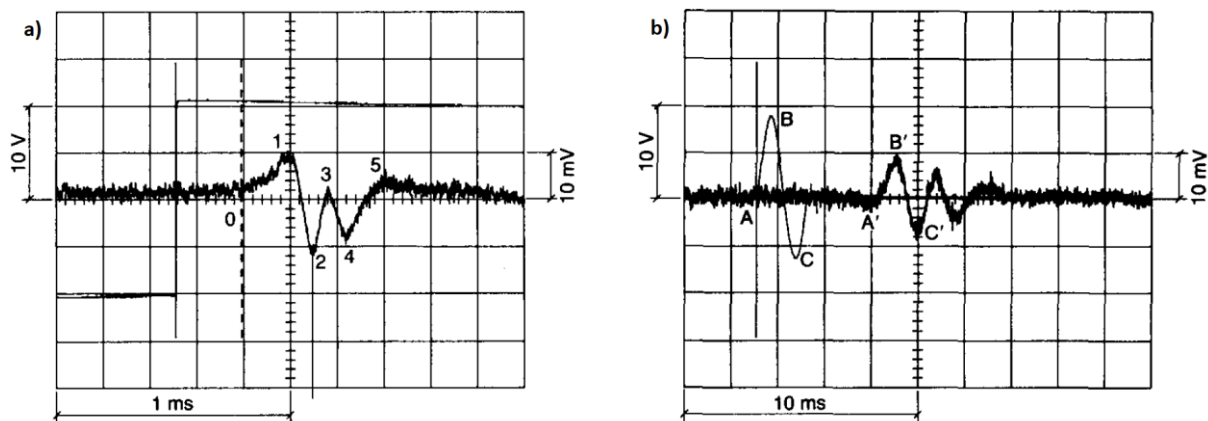
Obr. 14: Měření rychlosti smykové vlny pomocí BE s registrací odražené podélné vlny (upraveno z Lee a Santamarina 2005).

Seismogram výstupního signálu je závislý na frekvenčním spektru vstupního signálu. Jeden z jevů znesnadňující identifikaci místa příchodu smykové vlny v seismogramu výstupního signálu je v literatuře označován jako efekt blízké zóny („near field effect“) poprvé prezentovaný Sanchez-Salínero et al. (1986) a dále zkoumaný například Viggiani a Atkinson (1995), Jovičić et al. (1996), Greening a Nash (2004). Další nežádoucí známý jev je zvaný „overshooting“ dle Jovičić et al. (1996). „Overshooting“ způsobuje takové zkreslení registrovaného výstupního signálu, že nelze ze seismogramu rozpoznat jednotlivé možné body prvního nasazení a znemožňuje tak odečet času příchodu

střížné vlny. Ovlivnění možnosti čtení seismogramu je dobře patrné na Obr. 15 dle Jovičić et al. (1996) při měření BE. Vstupním signálem je zde obdélníkový puls generující smykovou vlnu procházející poloskalní horninou. Ve výstupním signálu není možné kvůli „overshootingu“ najít žádné referenční body prvního nasazení příchozí vlny a odečíst tak čas průchodu. Pro obdélníkový signál se tento jev projevuje výrazněji než pro sinový signál, protože doba náběhu obdélníku, která je ideálně nulová, odpovídá nekonečné frekvenci (Jovičić et al., 1996). Pro srovnání je uveden na Obr. 16a výstupní signál z měření Viggiani a Atkinson (1995) na rekonstituovaném jílu pro obdelníkový vstupní puls a na Obr. 16b také typický výstupní signál pro sinový puls bez nežádoucího zkreslení vlivem overshootingu a efektu blízké zóny (viz dále). Body A, B, C na vstupním signálu dobře odpovídají bodům A', B', C' výstupního signálu a je možné bez problému rozlišit první nasazení a odečíst čas průchodu vlny.



Obr. 15: „Overshooting“ při měření BE na poloskalní hornině; obdelníkový vstupní signál (Jovičić et al., 1996).



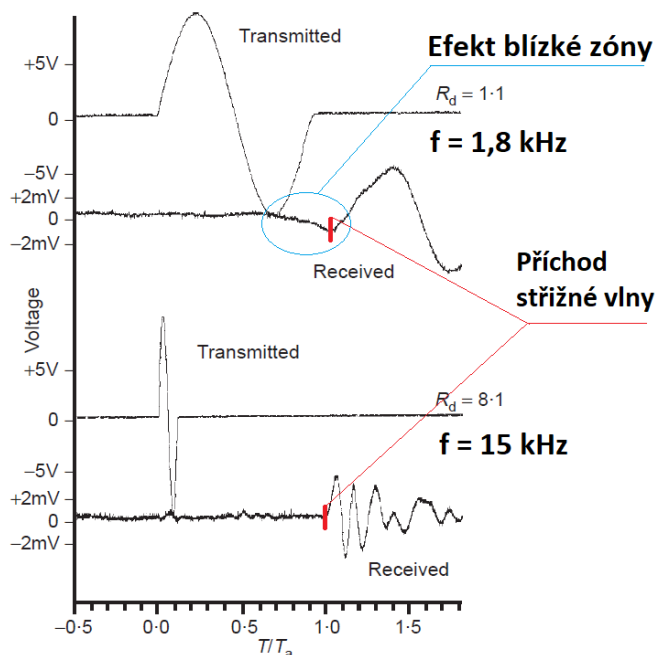
Obr. 16: Měření BE na rekonstituovaném jílu a typický seismogram bez projevu „overshootingu“; a) obdelníkový puls; b) sinový puls (upraveno z Viggiani a Atkinson, 1995).

Limitující frekvence, při které se začíná „overshooting“ projevovat, závisí na relativních impedancích zeminy a bender elementu. Čím vyšší je tuhost zkoušeného materiálu, tím nižší frekvence stačí k projevu „overshootingu“ (Jovičić et al., 1996).

Sanchez-Salineró et al. (1986) popsali ovlivnění výstupního signálu vlivem registrace rychle tlumené podélné vlny před registrací samotné smykové vlny tak, že během svých experimentů na izotropním elastickém materiálu rozdělili prostor na blízkou a vzdálenou zónu („near field“ a „far field“). Pro omezení zkreslení výstupního signálu je žádoucí pohybovat se při měření v regionu vzdálené zóny. Efekt blízké zóny vyjadřují jako interferenci mezi vlnami, které vyvolávají stejný pohyb částic, ale šíří se různými rychlostmi a utlumují různými rychlostmi. Vliv tohoto jevu lze vyjádřit poměrem  $R_d$ , dle Jovičić et al. (1996), který je definovaný vztahem:

$$R_d = \frac{L}{\lambda} = \frac{L \cdot f}{v_s} \quad (3.4),$$

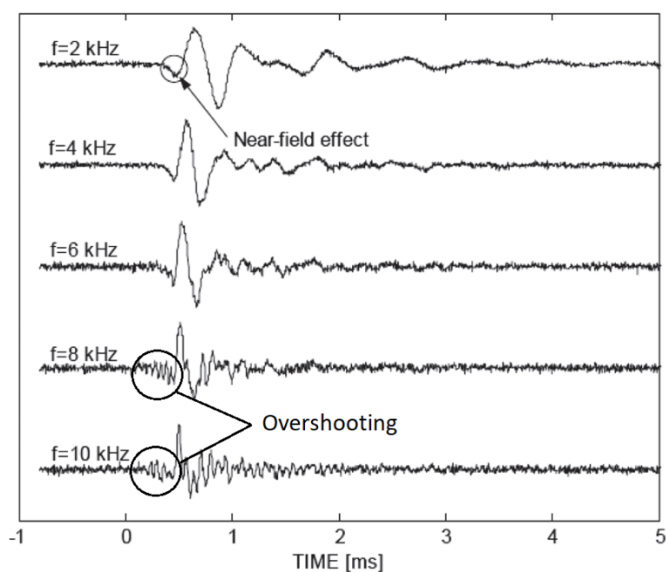
kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $f$  je frekvence,  $v_s$  je rychlost smykové vlny a  $L$  je vzdálenost šíření vlny vzorkem. Nižší hodnoty  $R_d$  vedou k významnému efektu blízké zóny, zatímco u vyšších hodnot  $R_d$  je příchod smykové vlny jednoznačný a vliv efektu blízké zóny zanedbatelný, jak je patrné na Obr. 17. Zde je výstupní signál pro  $R_d = 1,1$  při  $f = 1,8$  kHz, dle teoretického předpokladu, ovlivněn efektem blízké zóny a pro  $R_d = 8,1$  při  $f = 15$  kHz nikoliv. Názory na to, při jaké hodnotě  $R_d$  se začne tento fenomén projevovat, se různí. Dle Sanchez-Salineró et al. (1986) by měl být dostatečný  $R_d > 2$ . Arulnathan et al., (1998) oproti tomu soudí, že by měla být dostačující hodnota  $R_d > 1$ , což ale neodpovídá právě Obr. 17. Vliv tohoto jevu je tak nutné spíše stanovit v rámci nastavení každého měřicího aparátu a případně upravovat parametry pro jeho eliminaci, či zvolit vhodné metody odečtu času průchodu z výstupního signálu.



Obr. 17: Vliv frekvence vstupního sinového signálu na tvar výstupního signálu a na místo příchodu střížné vlny při ovlivnění (pro frekvenci 1,8 kHz) efektem blízké zóny (upraveno z Jovičić et al., 1996).

Omezení vlivu efektu blízké zóny, a tak dosažení měření v regionu vzdálené zóny, je možné teoreticky dosáhnout zvětšením vzdálenosti mezi vysílacím a přijímacím bender elementem, snížením vlnové délky, potažmo zvýšením frekvence. Při měření BE v triaxiální komoře jsou možnosti zvětšení vzdálenosti mezi nimi (velikosti vzorku) velice omezené a rychlost šíření smykových vln je dána studovaným materiálem a aktuálním stavem napjatosti. Jedinou měnitelnou proměnnou tak zůstává frekvence vstupního signálu. Dalším potenciálním způsobem jak zmenšit vliv blízké zóny, jež navrhli Jovičić et al. (1996), je deformace vstupního sinového pulsu, a to snížením amplitudy prvního cyklu vlnové délky pulsu. Vlivem této deformace pak nemusí docházet ke zkreslení výstupního signálu (neprojeví se první lokální maximum před příchodem samotné vlny).

Při měření BE v triaxiální komoře a času průchodu smykové vlny vzorkem se tak snažíme najít sinový signál o vhodné frekvenci, která by eliminovala zkreslení vlivem efektu blízké zóny (dostatečně vysoká frekvence), ale zároveň, aby nedocházelo ke zkreslení ani vlivem „overshootingu“ (frekvence nesmí být příliš vysoká). Pokud není výstupní signál ovlivněn ani efektem blízké zóny, ani „overshootingem“, nachází se bod pro odečet času příchodu smykové vlny v místě prvního nasazení výstupního signálu. Problematika měření na materiálech s vyšší tuhostí je zřetelná na Obr. 18, kde bylo měření BE prováděno na vzorku překonsolidovaného tuhého jílu „Boom clay“. Při nižších frekvencích se v signálu projevuje efekt blízké zóny a při vyšších je pak signál zkreslen kvůli „overshootingu“ a není možné rozeznat čas příchodu střížné vlny. U materiálů vykazujících vyšší tuhost musíme provádět odečty časů v blízké zóně. V takovém případě se pak bod odečtu času příchodu smykové vlny nachází, stejně jako pro obdelníkový puls, v místě první inverze dominantní vlny výstupního signálu (Petružálek, 2006), který odpovídá bodu B na Obr. 11. Pro zvýšení jistoty měření je doporučeno provádět měření při více různých vstupních frekvencích, přičemž měřené časy průchodu by měly být stejné pro různé frekvence.



Obr. 18: Ovlivnění výstupního seismogramu efektem blízké zóny a „overshootingem“; měření BE na překonsolidovaném „Boom clay“ při různých frekvencích vstupního signálu (upraveno z Piriyakul, 2010).

Během postupného využívání měření pomocí bender elementů různými autory vznikaly i různé výše zmíněné metody a procedury pro stanovení skutečného času průchodu vlny vzorkem a interpretaci měření bender elementy ve snaze nalézt proces, který by byl jednoznačný. Ač jsou měření pomocí bender elementů dnes již velice rozšířená, neexistuje prozatím všeobecně všemi uznávaná či doporučovaná metoda.

#### 4. SMYKOVÝ MODUL A ANIZOTROPIE TUHOSTI JÍLŮ

Mnoho přirozeně uložených jílů bylo vystaveno v důsledku sedimentace historii jednorozměrného zatížení ve směru gravitace (Jovičić a Coop, 1998). Depoziční proces zeminy pak způsobuje vrozenou anizotropii, danou uložením částic, u níž můžeme předpokládat izotropní horizontální rovinu. Proto tuhost jílů považujeme obvykle za transversálně izotropní a hodnoty  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  by měly být stejné, viz kapitola 2.1. Je však třeba vést v patrnosti, že transversální izotropie může být až přílišným zjednodušením skutečné situace, jelikož například odklon směru napětí od roviny nebo významná vrstevnatost materiálu může vést k nerovnosti  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  (Simpson et al., 1996).

Sully a Campanella (1995) zkoumali anizotropii a vliv in-situ napětí na rychlost smykových vln prováděním down-hole a cross-hole in-situ měření. Došli k závěru, že hodnoty rychlosti smykové vlny v různých rovinách (směrech) jsou primárně řízeny strukturální vrozenou anizotropií, zatímco míra napětím získané anizotropie je téměř zanedbatelná.

Problematikou anizotropie tuhosti měkkého Taipeiského jílu („Taipei clay“) se zabírali Teng et al. (2014). Bender elementy měřili rychlosti smykových vln jak ve směru  $vh$ , tak ve směrech  $hh$  a  $hv$  na různě orientovaných rekonstituovaných vzorcích v  $K_0$  konsolidované triaxiální zkoušce a i při nedrénovaných smykových zkouškách. Smykový modul  $G_{hh}$  byl stanoven vždy vyšší než  $G_{vh}$ . Hodnoty stupně anizotropie se po skončení konsolidace pohybovaly v rozmezí 1,15 až 1,44. Dle zjištění Teng et al. (2014) měly vzorky s vyšším stupněm překonsolidace OCR tendenci k vyšší míře anizotropie a zvyšování  $K_0$  konsolidačního napětí způsobovalo pokles míry anizotropie.

Hori et al. (2006) porovnávali anizotropii písků a jílů z měření bender elementy ve třech směrech. Dle jejich výsledků se vyznačují jíly všeobecně vyšší anizotropií než písky, pravděpodobně v závislosti na obsahu jílové frakce a minerálů a tvaru zrn, kdy stupeň anizotropie roste s obsahem jílových minerálů. Míra anizotropie tuhosti rekonstituovaných jílů se snižovala s rostoucím izotropním napětím. U jílů nicméně ani při vyšších napětích nedošlo k jejímu vymizení. Hodnoty měřených smykových modulů neporušených vzorků měkkého jílu z Pisy („Pisa clay“) podávaly relativně konstantní  $\alpha_G \approx 1,2$  pro různá napětí, opět za platnosti zvyšování tuhosti se zvyšujícím se napětím.

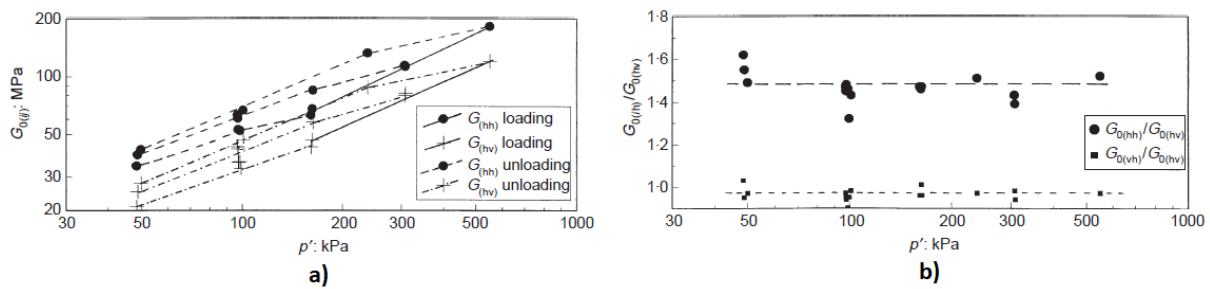
Jak uvádějí Kuwano a Jardine (2002), míra získané anizotropie, daná rozdílem deviátorového a středního napětí, je podstatně vyšší pro písky než pro jíly, resp. jíly se vyznačují minimální získanou anizotropií. Tyto poznatky potvrzují dále i výsledky Teachavorasinskun a Lukkanaprasit (2008) na měkkém Bangkoksském jílu (Bangkok clay), kteří měřili  $G_{vh}$  při izotropní konsolidaci i smykové zkoušce. Naměřené hodnoty  $G_{vh}$  při vyšším deviátorovém napětí během smykové zkoušky byly

srovnatelné jako při izotropní zkoušce. Naproti tomu Choo et al. (2011) pak popsali během smykové zkoušky mírně se měnící hodnoty  $G_{hh}$  avšak opět bez výraznějšího vlivu změny deviátorového napětí na  $G_{vh}$ .

Neporušené vzorky měkkého Chicagského jílu („Chicago clay“), u nichž analyzovali anizotropii tuhosti Kim a Finno (2012), vykazovaly při  $K_0$  konsolidovaných zkouškách poměrně vysoký rozptyl hodnot  $\alpha_G$  od 1 do 1,4 s průměrem 1,15. Autoři posuzují jíl jako transversálně izotropní.

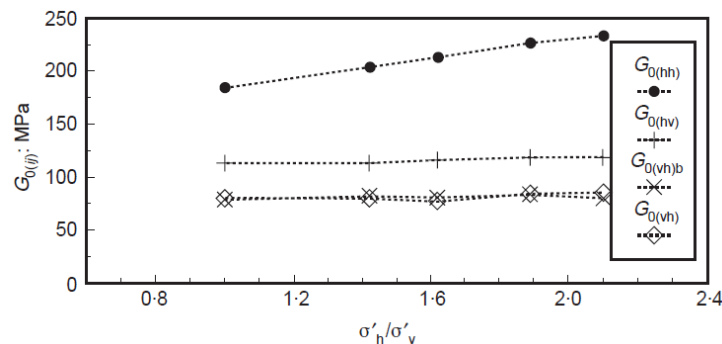
Vzhledem k tomu, že materiálem zkoumaným v této diplomové práci je pevný vysoce překonsolidovaný jíl (tégel), jsou vhodná pro možná srovnání výsledků z jeho testování a případné další úvahy archivní data ze zkoušek prováděných na podobném materiálu. Za takový materiál můžeme považovat například vysoce překonsolidovaný Gaultský jíl („Gault clay“), Bostonský jíl („Boston blue clay“), Boom clay a Londýnský jíl („London Clay“). Především Londýnský jíl je brněnskému téglu pravděpodobně nejpodobnější. Jedná se o materiál, jehož parametry jsou dobře prozkoumány v rámci prací mnoha autorů například z Imperial College London. Jedná se o vysoce plastický, pevný, překonsolidovaný jíl obdobného stáří a geneze (Nishimura, 2005) jako tégl. Londýnský jíl sedimentoval během eocénu a tvoří výplň Hampshirské a Londýnské pánve, jež se nachází při dolním toku Temže. Jeho dobrá prozkoumanost je dána hlavně výskytem v oblasti Londýna, kde tvoří základovou půdu mnoha náročných geotechnických staveb.

Stanovením anizotropie tuhosti z měření bender elementy v různých směrech na vysoce překonsolidovaném Gaultském jílu se zabývali Pennington et al. (1997). Vzorky osazovali axiálními BE a i dvěma páry horizontálních BE s různou polarizací vln pro ověření rovnosti smykových modulů  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  a stanovení  $G_{hh}$ . Prováděli zkoušky při izotropním i anizotropním zatěžování jak na neporušených vzorcích pro stanovení vrozené anizotropie, tak na rekonstituovaném materiálu, jehož přípravou (jednoosou konsolidací) byla anizotropie indukována. Na rekonstituovaných vzorcích pozorovali odlišné hodnoty smykových modulů při odlehčování a znovu zatěžování vzorku (překonsolidaci) než pouze při přitěžování (normální konsolidaci), viz Obr. 19a, což odpovídá i pozorováním Viggiani a Atkinson (1995). Dle autorů to potvrzuje předpoklad, že anizotropie je výsledkem struktury jílu v důsledku jednorozměrné depozice. Na Obr. 19b jsou pak patrné poměry  $G_{hh}$  a  $G_{hv}$  ( $\alpha_G$ ) a poměry  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$ , které zůstávají s rostoucím středním napětím v podstatě konstantní. Rekonstituované vzorky vykazovaly obdobné hodnoty  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  a signifikantně vyšší hodnoty  $G_{hh}$  (Obr. 19b), což značí vznik transversální izotropie.



Obr. 19: Smykové moduly, rekonstituovaný Gaultský jíl; a)  $G_{hh}$  a  $G_{hv}$  vs.  $p'$  při odlehčování a následném znovu zatěžování; b) Poměry  $G_{hh}$  a  $G_{hv}$  ( $\alpha_G$ ) a poměry  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$ , při lineární regresi konstantní s rostoucím  $p'$  (Pennington et al., 1997).

Výsledky měření smykových modulů Pennington et al. (1997) na neporušených vzorcích jsou vyneseny v grafu na Obr. 20. Autoři potvrzují, že tuhost je značně závislá na úrovni napětí a stupeň anizotropie se zvyšuje s anizotropním zatěžováním, jak je rovněž patrné na Obr. 18a, kde vyšší horizontální napětí při zkoušce indukuje vyšší tuhost v horizontálním směru.

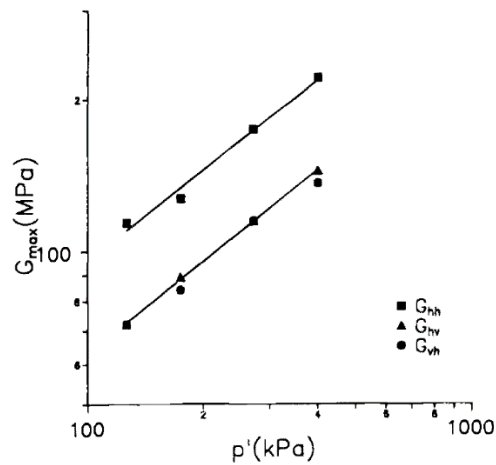


Obr. 20: Smykové moduly z měření BE, neporušený Gaultský jíl při anizotropním zatížení (dáno poměrem  $\sigma'_h$  a  $\sigma'_v$ , kdy bylo  $\sigma'_v = 120$  kPa) (Pennington et al., 1997).

Landon a DeGroot (2006) měřili rychlosti smykových vln v různých směrech pomocí speciálních přenosných bender elementů na blokových neporušených vzorcích Bostonského jílu. Hodnoty  $G_{hh}$  z těchto měření byly konzistentně vyšší než hodnoty  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  s průměrných stupněm anizotropie 1,68 a průměrným poměrem  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  rovným 1,20. Rozdílné hodnoty  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  jsou přičítány výskytu nehomogenit v materiálu jako schránky živočichů, organický materiál a prachová frakce. Pomocí stejných zkoušek dále analyzovali i měkký „Onsøy clay“ a stanovili průměrné hodnoty  $\alpha_G = 1,55$ , přičemž hodnoty stanovených  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  byly stejné. Měkký australský „Burswood Clay“ nevykazoval žádnou míru anizotropie, resp. dokonce  $\alpha_G < 1$ , což však bylo zřejmě způsobeno nepřesností v měření přenosnými BE.

Měřením bender elementy na neporušených a rekonstituovaných vzorcích Londýnského jílu se zabývali Jovičić a Coop (1998). Zkoušky probíhaly v triaxiálních komorách na vertikálně a horizontálně orientovaných vzorcích, které byly izotropně konsolidované. Jimi stanovené smykové moduly  $G_{hh}$ ,  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  jsou zaneseny na Obr. 21. Jak je patrné,  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  jsou téměř stejné ve shodě s teorií cross-anizotropie a  $G_{hh}$  nabývá vyšších hodnot. Se zvyšujícím se středním napětím se tuhost zvyšuje, ale stupeň

anizotropie je konstantní. U rekonstituovaných vzorků pak autoři pozorovali mírnou tendenci k poklesu stupně anizotropie při vyšším středním napětí.



Obr. 21: Smykové  $G_{hh}$ ,  $G_{vh}$   $G_{hv}$  z měření BE na neporušených orientovaných vzorcích Londýnského jílu (Jovičić a Coop, 1998).

Wongsaroj et al. (2004) zkoumali anizotropní chování Londýnského jílu na neporušených vzorcích. Jejich zjištění ukázala konzistentní rovnost  $G_{vh}$  a  $G_{hv}$  a vždy vyšší hodnoty  $G_{hh}$  s  $\alpha_G$  v rozmezí 1,5 a 2,0 a prokázali závislost tuhosti na napětí.

V rámci své rozsáhlé dizertační práce na Imperial College London se zabýval studiem anizotropie tuhosti také Gasparre (2005). Na základě rešerše prací jiných autorů uvádí rovněž  $\alpha_G$  nabývající hodnot 1,5 až 2 a považuje tyto za očekávatelné. Mimo jiné prováděl měření vertikálními i horizontálními bender elementy v triaxiální komoře na neporušených vzorcích Londýnského jílu rekonsolidovaných na stanovené původní geostatické napětí při  $K_0 > 1$ . Výsledné hodnoty smykových modulů na jílu z různých míst odběru a různých hloubek společně s hodnotami  $\alpha_G$  jsou shrnuty v Tab. 1.

Litologická jednotka	Test	Hloubka	$G_{hh}$	$G_{hv}$	$G_{hh}/G_{hv}$ ( $\alpha_G$ )
		[m]	[MPa]	[MPa]	
C	7gUC	7	87	47	1.9
	7gUE	7	86	47	1.8
B <sub>2(c)</sub>	11gUC	11	128	70	1.8
	12.5gUC	12.5	115	59	1.9
B <sub>2(a)</sub>	22.6gUC	22.6	170	81	2.1
	23gUE	23	159	75	2.1
	24g37DC	24	180	91	2.0
	24g37DC*	36	189	94	2.0
	31.4gUE*	31.4	190	94	2.0
A <sub>3</sub>	36.3gUE	36.3	211	102	2.1
	36.5gDC	36.5	228	117	2.0

Tab. 1: Smykové moduly  $G_{hh}$  a  $G_{hv}$  a stupně anizotropie Londýnského jílu z měření BE, neporušené vzorky, konsolidace  $K_0 > 1$  (upraveno z Gasparre, 2005).

Nishimura (2005) rovněž stanovoval smykové moduly v různých směrech na Londýnském jílu v rámci své doktorské práce. Využíval k tomu také měření vertikálními a horizontálními bender elementy na neporušených vzorcích v triaxiální komoře a to jak při izotropní konsolidaci, tak konsolidaci  $K_0 > 1$ . Jeho výsledky jsou shrnuty v Tab. 2. Jak vidno, se zvyšujícím napětím rostou hodnoty smykových modulů. S hloubkou prakticky nejsou pozorovány změny stupně anizotropie, pouze nárůst tuhosti v závislosti na napětí. Izotropní konsolidace měla pak na míru anizotropie také minimální vliv a drobným odchylkám stupně anizotropie docházelo až při anizotropní rekonsolidaci.

Depth [m]	Test	Before isotropic re-consolidation			After isotropic re-consolidation			After anisotropic re-consolidation		
		$G_{vh}$ [MPa]	$G_{hh}$ [MPa]	$G_{hh}/G_{vh}$	$G_{vh}$ [MPa]	$G_{hh}$ [MPa]	$G_{hh}/G_{vh}$	$G_{vh}$ [MPa]	$G_{hh}$ [MPa]	$G_{hh}/G_{vh}$
5.3	TE5	32	62	1.9	38	79	2.1	41	84	2.1
8.2	TE4	42	71	1.7	54	96	1.8	58	109	1.9
10.6	TE7	48	86	1.8	57	113	2.0	57	125	2.2
13.6	TE6	-	-	-	-	-	-	71	144	2.0
16.1	TE2	58	110	1.9	61	109	1.8	61	109	1.8
20.9	TE1	73	136	1.9	78	155	2.0	77	158	2.1
27.9	TE3	74	133	1.8	84	152	1.8	87	162	1.9
28.2	TE9	77	143	1.9	88	173	2.0	88	173	2.0
29.1	TE8	77	139	1.8	83	153	1.8	83	169	2.0

Tab. 2: Smykové moduly  $G_{hh}$  a  $G_{hv}$  a jejich poměry ( $\alpha_G$ ) z výsledků měření BE na Londýnském jílu pro jednotlivá stadia izotropní a anizotropní konsolidace, neporušené vzorky (Nishimura, 2005).

Hight et al. (2007) určovali smykové moduly Londýnského jílu z měření BE v triaxiální komoře a porovnávali je s výsledky z resonant columns a polních cross-hole a down-hole měření. Hodnoty  $\alpha_G$  z in-situ měření měly podstatně větší rozptyl od hodnot 1,4 až po 2,4. Výsledky laboratorních zkoušek pak vynesly hodnoty 1,7 až 2,2 s největším počtem výsledků v rozmezí 1,8 až 2,1. Stanovené  $G_{vh}$

z měření resonant columns bylo obdobné, resp. zpravidla mírně vyšší než z měření BE. Autoři poukazují na nelinearitu vývoje tuhosti vlivem diskontinuit a porušení masivu.  $G_{hh}$  z měření BE nabývalo hodnot zhruba 100 až 200 MPa v závislosti na hloubce odběru, potažmo na středním napětí, a  $G_{vh}$  pak hodnot řádů desítek až 100 MPa.

Vynikající shrnutí o poznacích anizotropie tuhosti širokého spektra různých měkkých a pevných jíílů podle experimentů prováděných dalšími autory na neporušených vzorcích nebo rekonstituovaném materiálu, přinášejí Mašín a Rott (2014). Na základě těchto shrnutí vyvozují několik následujících závěrů o možném vývoji anizotropie tuhosti a stupně anizotropie. Měkké (normálně konsolidované) jíily vykazují značnou míru získané anizotropie a s rostoucím  $K_0$  zvyšující se hodnotu  $\alpha_G$ . Pevné (překonsolidované) jíily pak vykazují podobné chování, ale získaná anizotropie se projevuje v mnohem menší míře. Pokud je anizotropie již vyvinuta, nelze ji snadno odstranit izotropním nebo  $K_0 > 1$  zatěžováním. Při dosažení stavu normálně konsolidované zeminy pak dochází k mírným změnám ve stupni anizotropie. Při překonsolidaci a odlehčování při konstantním poměru napětí jsou změny stupně anizotropie zanedbatelné.  $K_0$  zatěžování původně strukturně izotropního rekonstituovaného jíilu vede ke vzniku vrozené anizotropie.

## 5. ŠIRŠÍ OBLAST ZÁJMU

V minulosti již byl prováděn rozsáhlý výzkum týkající se chování a parametrů brněnského téglu v souvislosti s budováním Kralovopolských tunelů v Brně, které jsou součástí Velkého městského okruhu Brno. Během tohoto výzkumu byly odebírány neporušené vzorky přímo v místě výstavby tunelů a vzešla tak mnohá experimentální data a následně výsledky numerických analýz, které uvádí například Svoboda (2010) a Novák (2012). Žádná z těchto prací se však nezabývala studiem anizotropie tuhosti zeminy, tudíž bylo pro další výzkum a zkoušky nutno odebrat nové vzorky.

Lokalita výstavby tunelů již není nadále přístupná, a proto byl materiál pro provádění mých laboratorních zkoušek odebrán z vrtu zhotoveného v listopadu 2012 v areálu společnosti Geotest, a.s., na adrese Šmahova 1244/112, Brno-Slatina, 62700.

Místo odběru se nachází přibližně 8,5 km jihovýchodně od již dokončených Kralovopolských tunelů, v literatuře se lze setkat také s pojmenováním lokality jako tunel VMO Dobrovského. Díky homogenitě masivu brněnského téglu je možné předpokládat, že vlastnosti zeminy zde jsou obdobné jako v lokalitě Kralovopolských tunelů (Rott et al., 2015).

### 5.1 Geologie širší oblasti zájmu

Z regionálně-geologického pohledu se město Brno nalézá na styku dvou významných geologických jednotek – Českého masivu a Západních Karpat. Širší geologická situace a kontakt těchto dvou jednotek jsou znázorněny na mapě na Obr. 22. Na horniny krystalinika (brunovistulika) brněnského masivu

v oblasti zájmu nasedají vrstvy mořského spodnobadenského miocénu o mocnosti až několika stovek metrů (Chlupáč et al., 2002).



Obr. 22: Geologická mapa znázorňující kontakt Západních Karpat a Českého masivu (Pavlová, 2011).

### 5.1.1 Český masiv

Ze západu zasahuje do města Brna východní okraj Českého masivu. Tato jednotka, označovaná jako brněnský masiv, je na mapě charakterizována jako trojúhelníkovité těleso rozprostírající se přibližně mezi obcemi Boskovice, Miroslav a Brno (Mitrenga a Rejl, 1993). Ze západu je brněnský masiv omezen tektonickým zlomem boskovické brázd, z jihovýchodu na něj transgresně nasedají usazené horniny karpatské předhlubně a z východu pak paleozoické horniny.

Brněnský masiv tvoří horniny kadomské orogeneze, které náleží do geologické jednotky brunovistulika. Brunovistulikum se táhne od Krakova ze severu až po Dunaj na jihu. Dle geofyzikálních údajů pak jednotka brunovistulika zasahuje na východě daleko pod Západní Karpaty až po preapeninský lineament (Müller et al., 2000). V S-J směru je celý masiv rozdělen centrální metabazitovou zónou na dvě části, v nichž jsou hojně zastoupeny horniny metamorfního pláště. Část masivu nacházející se východně od metabazitové zóny je slavkovský terán, jež je tvořen biotitickými a alkalicko-vápenitými granodiority a tonality a vystupuje na povrch jen na východě brněnského masivu. Západním směrem od zóny se nachází dyjský masiv, hojně vystupující na povrch. Horniny dyjského masivu se příliš neliší od hornin

slavkovského teránu. Jsou zastoupeny biotitickými a dvojslídnyými granodiority a granity. Samotnou metabazitovou zónu, táhnoucí se přímo přes Brno, tvoří efuzivní horniny (metabazity, žilné metaryolity, metadolerity) na východě a bazické intruzivní horniny (metagabra, metadiority) na západě. Dle doloženého stáří se jedná o nejstarší horniny brunovistulika a zóna je reliktem kadomské ofiolitové jizvy (Müller et al., 2000; Pavlová, 2011). Do aktuální pozice na východě Českého masivu se brněnský masiv dostal během variské orogeneze (před cca 400-330 mil. let) při kolizi dnešních bloků brunovistulika a moldanubika (Müller et al., 2000).

Na původní magmatity a metamorfity masivu sedimentovaly v průběhu spodního devonu vápence, které dnes tvoří Moravský kras. Vápence byly dále překrývány sedimentací drob a štěrků staršího karbonu. Kvůli vyoření kontinentu ve spodní křídě pak následně docházelo k erozi a krasovnění vápenců. Na počátku alpinského vrásnění ve svrchní křídě a v neogénu došlo k opětovnému zaplavení území mořem (Chlupáč et al., 2002).

### **5.1.2 Západní Karpaty a karpatská předhlubeň**

Jak je zmíněno výše, z jihovýchodu Český masiv omezuje geologická jednotka Západních Karpat spadající rovněž do širší zájmové oblasti. Jedná se o jednotku výrazně mladší, vznikající za odlišných paleogeografických a geotektonických podmínek než Český masiv. Na území České republiky tato zasahuje jen svým západním okrajem ve Slezsku a na východní Moravě. Celkově se však jedná o soustavu táhnoucí se od Himálaje až po Pyreneje. Charakteristickým znakem Západních Karpat je flyšové pásmo.

Počátek vývoje Západních Karpat započal po variské orogenezi, ale k hlavní fázi formování došlo během alpinského vrásnění, přičemž nejvýraznější vývoj probíhal v období svrchní křídě až terciéru. K vývoji této jednotky dále docházelo postupnou mořskou sedimentací ve změlčujících se flyšových pánvích i v průběhu neogénu, při současném tektonickém posunu paleogenních podloží na Český masiv. Během neogénu se rovněž tvořily i zcela nové pánve, podmíněné zpravidla systémem tektonických linií. V tektonických depresích se utvořila Vídeňská pánev a vlivem nasunování příkrovů vznikla před jejich čely karpatská předhlubeň. (Chlupáč et al., 2002).

Karpatská předhlubeň je okrajovým výběžkem pánve na periferii evropské desky v předpolí flyšových jednotek. Táhne se z jihu od Rakouska, přes Českou republiku a na severu až na území Polska. Je protažena ve směru SV-JZ a SZ-JV, přičemž v současnosti se v Česku rozprostírá v oblasti Ostravska a Opavska a v oblasti Moravské a Vyškovské brány a moravských úvalů. V rámci předhlubně se vyskytují také dílčí miocenní pánve.

V průběhu neogénu, přesněji během miocénu, zalilo poklesovou oblast dnešního Brněnska neogenní moře, což zapříčinilo rozsáhlou sedimentaci jílu, pískovců a štěrků až několik set metrů mocných. Na tyto vrstvy se nasunuly s koncem vrásnění (před cca 16,5 mil. let) horniny flyšového pásma (Chlupáč et al., 2002). Stratigrafie karpatské předhlubně a především její jižní a střední části, relevantní pro oblast Brna, je patrná na schématu na Obr. 23.



jež vznikla při poklesu předpolí před čely flyšových příkrovů Karpat. Následně došlo k přerušení sedimentace při krátké regresi, načež nastal pokles předpolí Českého masivu a poté rychlé zaplavení dosahující až daleko na západ. V druhé fázi transgrese pak sedimentovaly hnědozelené a šedo zelené nevrstvené tégly, jež obvykle nasedají ostře na své podloží. Sedimentační sled tak začíná v hlubokých depresích předbadenského povrchu sutěmi a brekciemi s převážně kontinentálním původem. Ve vyšších vrstvách sedimentovaly mořské klastické uloženiny jako štěrky a písky do mocnosti cca 175 m. V hlubokých částech pánve vzdálenějších od břehu docházelo k sedimentaci právě vápnatých jíílů – téglů (Chlupáč et al., 2002) a také k usazování písčítých a řasových vápenců (Müller et al., 2000). Kromě zmíněných hornin se ve stratigrafických vrstvách badenu vyskytují také evapority a materiál vulkanického původu.

Chlupáč et al. (2002) líčí tégly jako mořské jílovité usazeniny hemipelagického původu, které obsahují bohatou mikrofaunu. Místně se tégly liší podle obsahu jílové frakce, zbytků lastur a podle míry bioturbace (Boháč a Pavlová, 2012). Podle Nehyby et al. (2008) je rozmístění téglů rovnoměrné v celé nánosové oblasti, přičemž nabývají nejvyšší mocnosti 600 m.

Po sedimentaci v době badenu bylo nadloží brněnských téglů v průběhu pliocénu a kvartéru denudováno, což vedlo k jejich překonsolidaci. Docházelo k erozi původně téměř nezpevněných sedimentů a jejich celková mocnost tak není zachována (Müller et al., 2000). Odhady mocnosti nadloží téglů, které bylo erodováno a vedlo k překonsolidaci, se značně liší a jejich stanovením se zabývají např. Pavlová (2011), Boháč a Pavlová (2012), Černíková (2014) a Malát et al. (2016).

## **5.2 Inženýrsko-geologické poměry zájmové oblasti**

Z pohledu inženýrské geologie jsou v oblasti významné především studované tégly, resp. souvrství těchto jíílů do hloubky prvních desítek metrů rozšířené v rozsahu celého území a na nich spočívající kvartérní pokryvy, jež mohou být zastiženy například ražbou nebo výstavbou. Vlastnosti brněnského téglu jsou podrobně popsány v kapitole 6.

### **5.2.1 Kvartérní pokryvy v užší zájmové oblasti v okolí místa odběru vzorků**

Vzhledem k urbanizaci je v oblasti místa odběru vzorků velice znatelný vliv člověka. Do hloubek přibližně 1 m se vyskytují zpravidla antropogenní navážky nebo ornice. Ornice mívá obvyklý charakter, jedná se o humózní hlínu. Navážky mají povahu směsné hlíny s proměnlivým obsahem stavebního materiálu jako je dřevo, či beton, případně písku a štěrku s příměsí ornice. Pod navážkami se většinou nachází přirozené pokryvné vrstvy, kterými jsou sprašové hlíny ukládané během pleistocénu eolickou činností. V podloží spraší se vyskytují jílovité hlíny a jíly zpravidla eolicko-deluviální smíšené geneze. Jedná se o zvětraliny neogenních jíílů a přeplavené sprašové pokryvy starší geneze, často s obsahem drobných zrněk štěrku a úlomků cicvárů. Bázi kvartérního pokryvu zastupují nesouvislé, často zahliněné a zajílované štěrkovité a štěrkopískové sedimenty fluviálního původu (Pavlík et al. 2004).

### 5.2.2 Hydrogeologické poměry

V neogenních jílech v podstatě neexistuje oběh podzemní vody. V poměru s nadloží tvořeným kvarterními sedimenty jsou hydrogeologickým izolátorem a podzemní voda je vázaná na fluviální štěrkovité a štěrkopískové sedimenty při bázi kvartéru, jež mají vlastnosti velmi dobrých kolektorů (koeficient  $10^{-4}$  až  $10^{-3}$  m/s) s charakterem statických zásob vody. Nejedná se však o kolektory průběžné, nýbrž jen o čočky, které jsou plošně velmi omezené a také uzavřené v nepropustných vrstvách jílu a jílovitých hlín, což zamezuje pohybu podzemní vody. V případě, že se ve sledu vrstev nevyskytují fluviální propustné uloženiny, váže se pohyb podzemní vody k rozhraní jílu a spraší a navážek a je ovlivněn hlavně většími srážkovými úhrny (Pavlík et al. 2004). Ač by se dle těchto informací mohlo zdát, že téglu vodu neobsahují, je třeba mít vždy na paměti, že se zpravidla jedná o zeminy vodou v podstatě téměř nasycené, na což poukazuje například Svoboda (2010) v rámci svých experimentů, resp. je lze za nasycené považovat. Absolutního nasycení ( $S_r = 1$ ) není prakticky možné v laboratorních podmínkách dosáhnout, jak uvádí Mohyla (2014). Jedná se nicméně o zeminy jen velmi málo propustné s hydraulickou vodivostí v hodnotách  $10^{-9}$  až  $10^{-11}$  m/s.

## 6. POPIS A GEOTECHNICKÉ VLASTNOSTI BRNĚNSKÉHO NEOGENNÍHO JÍLU - TÉGLU

Tégl je z hlediska inženýrské geologie vápnitý, prachovitý, nevrstevnatý jíl. Čerstvá, povětrnostním vlivům nevystavená zemina je modrošedé nebo zelenošedé barvy (Pavlík et al. 2004), tuhé až tvrdé konzistence s proměnlivým obsahem  $\text{CaCO}_3$  (Boháč a Pavlová, 2012). Ve vyšších přípovrchových vrstvách pak může mít nahnědlou, hnědošedou až béžovou barvu. Barva a odstíny se mohou lišit dle lokalit a hloubek odběru. Skvrnitost nebo šmouhování jílu je zapříčiněno vnikáním limoniticky zbarvených roztoků do systému trhlinek navětralého a tektonicky porušeného horninového prostředí z vrstev nadloží.

Průzkumnými pracemi prováděnými v souvislosti s budováním Královopolských tunelů bylo zjištěno, že jílový masiv je značně tektonicky postižený, místy až v několik desítek metrů mocných zónách, přičemž významné tektonické plochy jsou vyhlazené s rýhováním ve směru pohybu (Pavlík et al. 2004). Dle Pavlíka et al. (2004) je dále možné u neporušených vzorků téglu pozorovat rozpad blokovitý až nepravidelně drobně úlomkovitý, jež je nerovný a miskovitě prohnutý, nezřídka s radiálně paprscitými strukturami, což potvrzují i osobní zkušenosti během práce se vzorky.

V hloubkách přibližně od 10 až 20 m se v jílu vyskytují krystaly sádrovce velké až několik centimetrů, jež v téglu pravděpodobně vznikly sekundárně při oxidaci sulfidů během diagenese.

Pavlík et al. (2004) považují za rizikovou z hlediska deformací schopnost téglu bobtnat a smršťovat se, která je zapříčiněna přítomností expandujících jílových minerálů. K dalším vlastnostem téglů patří vysoká stlačitelnost a nízká pevnost. Z geotechnického pohledu se jedná o nepříznivé vlastnosti potenciálně ovlivňující negativním způsobem podmínky výstavby v tomto materiálu. Pro stavby je tak

často nutné využívat možností speciálních způsobů zakládání, jejichž provádění je založeno na inženýrsko-geologickém průzkumu, vyžadujícím podrobné polní i laboratorní zkoušky materiálu. Brněnské tégly se také vyznačují vysokou mírou překonsolidace, přičemž je třeba rozlišovat zdánlivou překonsolidaci způsobenou post-sedimentačními procesy stárnutí zeminy (např. creep) a překonsolidaci skutečnou, která vznikla mechanickým odlehčením (např. denudací nadloží) a tedy reálnou změnou maximálního napětí, kterému byla zemina v minulosti vystavena.

V následujících kapitolách jsou shrnuty vlastnosti, popis a parametry brněnského téglu z mnoha archivních zdrojů, které mohou poskytnout čtenáři představu o jeho možném geomechanickém chování.

## 6.1 Mineralogické složení a základní popisné charakteristiky

V Tab. 3 jsou shrnuty výsledky mineralogických analýz prováděných na brněnském téglu v rámci minulých výzkumů v oblasti Brna, podávající informace o mineralogickém složení.

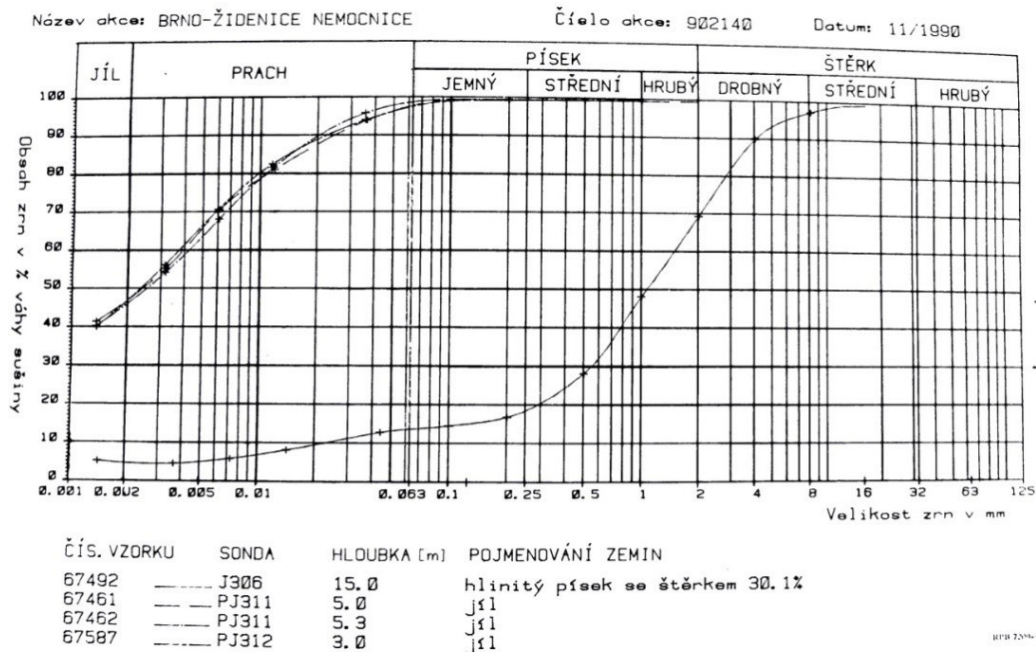
Horák a Hrdý (1982)		Montmorillonit (%)	Illit (%)	Kaolinit (%)	Chlorit (%)	Křemen (%)	Kalcit (%)	-	-	Živce (%)	Oxidy a sulfidy železa (%)
		20-30	10-15	10	5	11-16	10-15	-	-	10	~ 5
Boháč et al. (1995)		Montmorillonit (%)	Illit (%)	Kaolinit (%)	Chlorit (%)	Křemen (%)	Kalcit (%)	-	-	Živce (%)	Oxidy a sulfidy železa (%)
		-	22	23	max.10	17	20	-	-	~ 8	-
Koubová et al. (2003) in Svoboda (2010)		Smektit (%)	Illit (%)	Kaolinit (%)	Chlorit (%)	Křemen (%)	Kalcit (%)	Dolomit (%)	Muskovit (%)	Živce, hematit, pyrit (%)	
		~ 15	~ 7,5	~ 5	~ 2,5	21,7-24,5	15,5-17,5	6,5-7,2	6,2-8,6	max.15	
Černíková (2014)		Smektit (%)	-	Kaolinit (%)	Klino-chlorit (%)	Křemen (%)	Kalcit (%)	Dolomit (%)	Muskovit (%)	Albit (%)	Basanit (%)
	hloubka 24 m	15	-	3	4	27	29	3	8	11	0
	hloubka 27 m	0	-	10	2	33	35	3	7	7	2
	hloubka 36 m	7	-	7	1	23	31	2	26	0	2
Pavlová (2014)		Montmorillonit (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		27-37	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 3: Srovnání mineralogického složení téglů z různých archivních zdrojů (data převzata z Horák a Hrdý, 1982; Boháč et al., 1995; Koubová et al., 2003 in Svoboda, 2010; Černíková, 2014; Pavlová, 2014)

Dle Horáka a Hrdého (1982) ve složení dominuje z jílových minerálů montmorillonit, následovaný illitem a kaolinitem a posléze chloritem. Z dalších minerálů je pak nejhojnější křemen a kalcit, poté živce a dále oxidy a sulfidy železa.

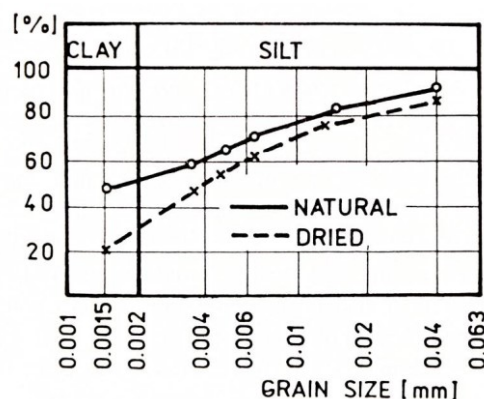
Na Obr. 24 je vynesena zrnitostní křivka neogenního jílu dle zkoušek prováděných Krčmovou (1990) na lokalitě Brno-Židenice, která se nachází přibližně 4 km SZ od místa odběru vzorků zkoumaných

v rámci této diplomové práce. Je zde patrná mírná převaha prachovité složky nad jílovitou s malým podílem písku.



Obr. 24: Křivka zrnitosti neogenního jílu z lokality Židenice (Krčmová, 1990)

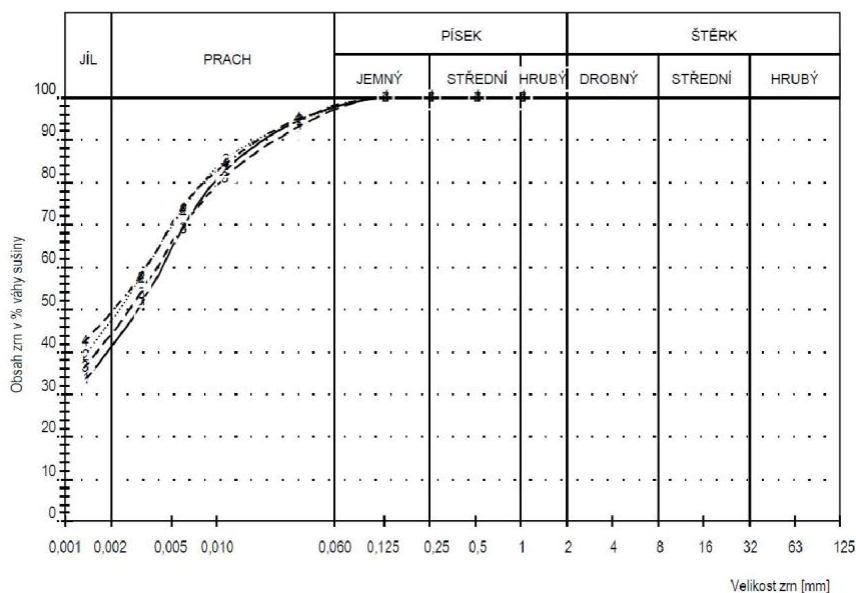
Boháč et al. (1995) pak předkládají výsledky v dobré shodě s Krčmovou (1990). Převládajícími jílovými minerály jsou podle nich kaolinit a illit, dále chlorit a z ostatních minerálů je zastoupen opět hlavně křemen, kalcit a živce. Křivka zrnitosti Boháče et al. (1995) je zobrazena na Obr. 25. Je opět v dobré shodě s výsledky předchozí práce s přibližným podílem jílové frakce 52 % a zbytek tvoří frakce prachu (a minimální podíl ostatních frakcí), přičemž zkoušky byly prováděny na neogenním jílu odebraném během průzkumu pro stavbu Boby centra v Brně.



Obr. 25: Zrnitostní křivka neogenního jílu z lokality Boby centrum Brno (Boháč et al., 1995).

Svoboda (2010) ve své dizertační práci prezentuje data Koubové et al. (2003). Podle těchto dat z rentgenové difrakční analýzy je dominantním jílovým minerálem smíšeně-vrstevný illit/smektit, jehož

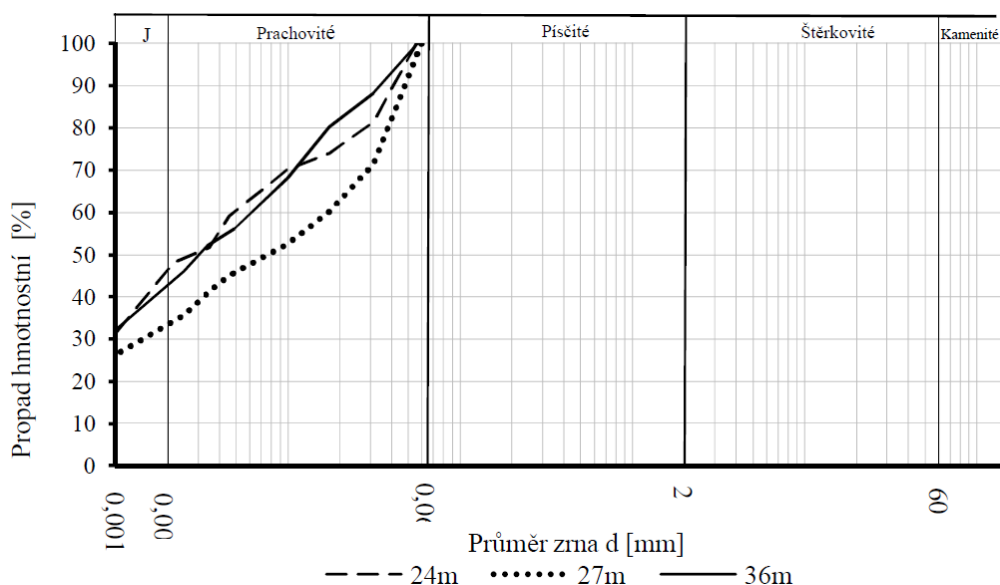
expandibilita 75-90 % značí poměr smektitu 82 % (expandující vrstvy) a 18 % illitu (neexpandující vrstvy). Dle silikátové analýzy je obsah smektitu tvořen v celém množství montmorillonitem a celkový obsah montmorillonitu byl stanoven na přibližně 15 hmot. % a illitu na 7,5 hmot. % spolu s nižším podílem dalších jílových minerálů (kaolinit a chlorit). Rozpočítáním silikátových analýz se ukázal jako celkově převládající křemen, po němž následoval kalcit a dále ovšem i dolomit, muskovit a opět živec, pyrit a hematit. (Koubová et al., 2003 in Svoboda, 2010). Na Obr. 26 je vykreslena zrnitostní křivka stanovená Pavlíkem a Ruppem (2003) na vzorcích neogenního jílu odebraných při průzkumu pro stavbu Královopolských tunelů, kterou předkládá Svoboda (2010), podle níž lze tégl označovat i jako jílovitý prachovec s mírnou převahou frakce prachu (50,8 %) nad podílem jílu (44,9 %) spolu s malým podílem písku (4,3 %). Hodnoty indexových parametrů zmiňované dále v Tab. 4, prováděl přímo Svoboda (2010) na vzorcích téglu odebraných na lokalitě Královopolských tunelů a konstatuje jejich dobrou shodu s výsledky laboratorních zkoušek prováděných firmou Geotest a.s. při průzkumu pro stavbu tunelů.



Obr. 26: Křivka zrnitosti neogenního jílu z lokality Královopolských tunelů, podíl frakce: jíl 44,9 %, prach 50,8 %, písek 4,3 % (Pavlík a Rupp 2003 in Svoboda, 2010).

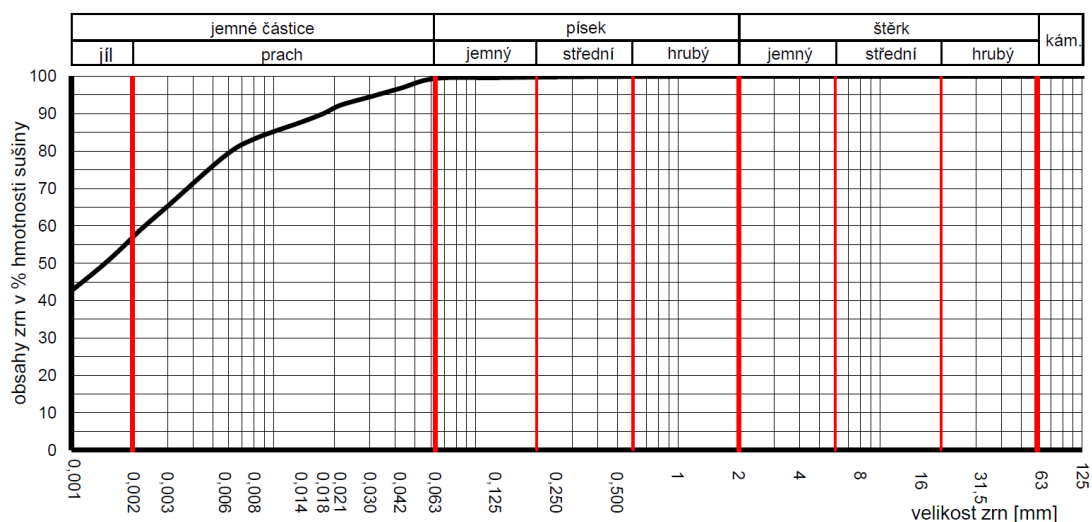
Výsledky RTG difrakční analýzy Černíkové (2014), kterou prováděla na vzorcích ze tří různých hloubek, ukázaly jako nejvíce zastoupený kalcit, následovaný křemenem a poté jílovými minerály (smektit – kromě vzorku z hloubky 27 m, kaolinit, klinochlorit). Ve všech vzorcích byl také identifikován muskovit a dolomit v proměnlivém množství. Ve vzorku z hloubky 36 m nebyl oproti ostatním detekován albit, a naopak u vzorku z 24 m chyběl basanit, vyskytující se v malém množství v ostatních vzorcích. Nebyly však potvrzeny oxidy, sulfidy či hydroxidy železa jako u zdrojů předchozích, nicméně při přípravě vzorků Černíková (2014) narazila na krystaly sulfidů železa, což přítomnost železa v materiálu potvrdilo, a rovněž na krystaly sádrovce. Všechny vzorky obsahují vysoký podíl  $\text{CaCO}_3$ . Z hlediska chování a vlastností brněnského téglu je pak nejzajímavější absence

expandibilního smektitu u vzorku z hloubky 27 m (Černíková, 2014). Zrnitostní analýza provedená Černíkovou (2014) na vzorcích téglu z různých hloubek je patrná na Obr. 27. Vzorky z hloubky 24 m a 36 m mají obdobný průběh křivek s podílem jílové frakce zhruba 44 %. Vzorek z hloubky 27 m pak vykazuje přibližně o 10 % nižší podíl jílové frakce, což rovněž poukazuje na určitou odchylku u vzorku z této hloubky oproti ostatním. Ve všech vzorcích nicméně převládá frakce prachovitá nad frakcí jílovitou, s malým podílem frakce písku. Brněnský tégl testovaný Černíkovou (2014) pochází ze stejné lokality a vrtu (vrt V1 Šmahova, Brno-Slatina), jako vzorky brněnského téglu zkoušené v rámci této diplomové práce.



Obr. 27: Křivky zrnitosti brněnského téglu z hloubek 24, 27, 36 m pocházejících z vrtu V1 zhotoveného v areálu společnosti Geotest a.s. ve Šmahově ulici v Brně (Černíková, 2014).

Pavlová (2014) se zaměřovala především na bobtnání jílu, a proto uvádí pouze obsah převládajícího montmorillonitu (s korekcí na možnou přítomnost illitu) stanovený RTG difrakcí metodou RIR, který se dle jejích výsledků pohybuje mezi 27-37 %. Analýza zrnitosti prováděná Pavlovou (2014) dává zrnitostní křivku zobrazenou na Obr. 28, kde v tomto případě převažuje podíl jílu (58,5 %) nad podílem prachu (40,9 %) s minimálním propadem písku (0,6 %). Číslo nestejnozrnitosti ( $C_u$ ) je 9,0 a číslo křivosti ( $C_c^*$ ) je 0,8. Vzorky téglu zkoušené Pavlovou (2014) byly odebrány z vrtu „J1“ z lokality Královopolských tunelů na straně Žabovřesk v blízkosti křižovatky ulic Žabovřeská, Dobrovského, a Hradecká.



Obr. 28: Zrnitostní křivka brněnského téglu z lokality Královopolských tunelů, podíl frakce: jíl 58,5 %, prach 40,9 %, písek 0,6 % (Pavlová, 2014).

Hodnoty přirozené vlhkosti  $w$ , Atterbergových (konzistenčních) mezí, konkrétně vlhkosti na mezi tekutosti  $w_L$  a vlhkosti na mezi plasticity  $w_P$  a z těchto mezí získaných indexových parametrů  $I_P$  (index plasticity,  $I_C$  (stupeň konzistence) a dále také index koloidní aktivity  $I_A$ , stanovené na vzorcích téglu z různých lokalit v oblasti Brna z několika archivních zdrojů jsou shrnuty v Tab. 4.

	$w$ (%)	$w_P$ (%)	$w_L$ (%)	$I_P$	$I_C$	$I_A$	Lokalita	
Horák a Hrdý (1982)	23,2 - 34,9	29,8 - 43	72,6 - 81,4	-	-	-	oblast Brna	
Krčmová (1990)	24,3 - 31,0	24,2 - 37,9	74,0 - 89,0	41,5 - 53,1	0,92- 1,16	-	Brno Židenice	
Boháč a Feda (1995)	-	-	78 (hl. 10 m) 71 (hl. 24 m)	44	-	-	Boby centrum Brno	
Svoboda (2010)	29,9 - 31,6	33,7 - 34,6	74,3 - 76,7	39,7 - 42,1	0,96 - 1,08	-	Královopolské tunely	
Černíková (2014)	24 m	29	31	56	25	1,10	0,515	Brno Slatina
	27 m	28	30	40	10	1,20	0,289	Brno Slatina
	36 m	27	35	61	26	1,30	0,577	Brno Slatina
Mohyla (2014)	27,1 - 32,2	-	-	-	-	-	Brno Slatina	
Pavlová (2014)	30,7	32,6	73,9	41,2	1,00	-	Královopolské tunely	
Faktorová et al. (2019)	-	34,3	63,9	-	-	-	Brno Černá pole	

Tab. 4: Shrnutí indexových vlastností brněnského jílu z různých lokalit v oblasti Brna. (data převzata z Horák a Hrdý, 1982; Krčmová, 1990; Boháč a Feda, 1995; Svoboda, 2010; Černíková, 2014; Mohyla, 2014; Pavlová, 2014; Faktorová et al., 2019).

Tab. 5 udává zařazení brněnského téglu z několika různých lokalit dle Horáka a Hrdého (1982), Krčmové (1990), Svobody (2010) a Pavlové (2014).

	Zatřídění dle			
	ČSN 72 1002	ČSN EN ISO 14688-2	ČSN 73 6133/ ČSN 73 1001	lokality
Horák a Hrdý (1982)	jíl	-	-	oblast Brna
Krčmová (1990)	-	-	F8 CV	Brno Židenice
Svoboda (2010)	-	clSi	F8 CV	Královopolské tunely
Pavlová (2014)	-	Cl	F8 CV	Královopolské tunely
Faktorová et al. (2019)	-	Cl	-	Brno Černá pole

Tab. 5: Zatřídění brněnského téglu z různých lokalit (data převzata z Horák a Hrdý, 1982; Krčmová, 1990; Svoboda, 2010; Pavlová, 2014; Faktorová et al., 2019).

Z výše zmíněných dat z archivních zdrojů a výzkumů je zřejmé, že jílový masiv oblasti Brna je poměrně homogenní vzhledem k tomu, že jednotlivé analýzy probíhaly na vzorcích z různých lokalit a hloubek. Brněnský tégl je tak všeobecně možno popsat jako vysoce až velmi vysoce plastický prachovitý jíl nebo jílovitý prachovec zpravidla pevné až tvrdé konzistence s proměnlivým podílem prachovité složky, jež se pohybuje v rozmezí přibližně 40 – 60 %. Jeho přirozená vlhkost se obvykle nachází velmi blízko spodní hranice vlhkosti na mezi plasticity.

Dalším materiálovým parametrem je specifická objemová hmotnost (hustota pevných částic)  $\rho_s$ . Svoboda (2010) uvádí pro tégl hodnotu  $2660 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  stanovenou ČGS a Pavlová (2014) hodnotu  $2750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 6.2 Pevnostní charakteristiky téglu

Pevnost je jednou ze základních geotechnických charakteristik. Údaje o pevnostních charakteristikách brněnského téglu jsou shrnuty v Tab. 6. Jedná se o zkoušky efektivní pevnosti. Při porovnávání výsledků od jednotlivých autorů je nutné brát v potaz, že se jedná o vzorky z různých lokalit a hloubek. Toto je třeba zohledňovat především v porovnávání hodnot vrcholové pevnosti, která je závislá na stavu zeminy. Obecně lze říci, že velikost koheze jílu narůstá s hloubkou a efektivní vrcholová pevnost není závislá jen na stupni konzistence, ale je ovlivněna přítomností predisponovaných smykových ploch (Poul, 2009). Parametry kritické a reziduální pevnosti jsou pak závislé přímo na materiálu a jejich rozdíly by tak měly být dány odlišnostmi v materiálu. Z toho vyplývá skutečnost, která je rovněž patrná z výsledků, totiž že hodnoty kritické pevnosti jsou v rámci jednotlivých výzkumů v lepší shodě a je tyto tak možné případně přejímat, při předpokladu stejného materiálu. Odlišnosti pak tedy mohou být způsobeny rozdíly v materiálu a také rozdíly v metodice a průběhu jednotlivých zkoušek a typů přístrojů. Feda et al. (1995) měřili vrcholovou smykovou pevnost brněnského neogenního jílu, resp. vrcholový úhel vnitřního tření  $\varphi'_p$  a vrcholovou soudržnost  $c'_p$ , na vzorcích z lokality Boby centra Brno. U jílu z hloubky větší než 20 m byla naměřena mnohonásobně vyšší soudržnost (184 kPa) než v hloubkách pod 20 m (18 kPa), což autoři připisují stmelení materiálu a hypotéze, že jíly z větších hloubek jsou intaktní oproti rozpukaným jílu z vyšších vrstev. Úhel vnitřního tření v kritickém stavu  $\varphi'_{cr}$  pak Feda et al. (1995) stanovili na  $26,7^\circ$  se soudržností  $c'_{cr}$  rovnou 3,8 kPa, přičemž zde by v souladu s teorií bylo vhodnější

pro lepší stanovení kritické obálky pevnosti použít hodnotu 0 kPa a obálku pevnosti prokládat počátkem (nulovými napětími). Reziduální pevnost  $\varphi'_{rez}$  autoři stanovili ze zkoušek v translační smykové krabici na rekonstituovaném téglu. Hodnoty vrcholové pevnosti stanovené Svobodou (2010) triaxiální zkouškou na neporušených vzorcích z lokality Královopolských tunelů mají výrazně nižší hodnoty. Svoboda (2010) stanovil kritickou a reziduální pevnost na rekonstituovaných vzorcích téglu při triaxiální zkoušce a v rotačním smykovém přístroji. Reziduální pevnost v rotačním smykači je nadhodnocena kvůli předčasnému přerušení zkoušky. V případě reziduální pevnosti z triaxiální zkoušky se jedná o ustálenou po vrcholovou pevnost při přetvoření velikosti 25 %, což dle mého soudu není realistické a při této míře přetvoření nemohlo být reziduální pevnosti dosaženo, na což poukazuje i její na jíl poměrně vysoká hodnota. Výsledky kritické pevnosti Svobody (2010) jsou v dobré shodě s pozdějšími daty měřeními na rekonstituovaném materiálu Fenclem (2012), který vyhodnocoval kritickou a reziduální pevnost téglu ze standardních triaxiálních zkoušek, triaxiálních zkoušek s kluznými destičkami a zkoušek v rotačním a dále také translačním smykovém přístroji. Faktorová et al. (2019) zjišťovali pevnost v kritickém stavu na rekonstituovaném téglu z lokality Černá pole triaxiální zkouškou.

	Typ zkoušky/poznámka	$\varphi'_p$ (°)	$c'_p$ (kPa)	$\varphi'_{cr}$ (°)	$\varphi'_{rez}$ (°)	Lokalita
Feda et al. (1995)	Triaxiální zkoušky, Translační smykový přístroj, neporušené/rekonstituované vzorky	28,5	18,2	26,7	14,5	Boby centrum Brno
	hloubka < 20 m	27,6	183,9			
Svoboda (2010)	Triaxiální zkouška CIUP, neporušené vzorky (hloubka 15 a 19,5 m)	23,5	52	-	-	Královopolské tunely
	Triaxiální zkouška CIUP, rekonstituovaný	-	-	18,9	11,3*	
	Rotační smykový přístroj, rekonstituovaný	-	-	19,9	12	
Fencel (2012)	Triaxiální zkouška CIUP, rekonstituovaný	-	-	21	-	Královopolské tunely
	Triaxiální zkouška s kluznými destičkami	-	-	23,5	-	
	Rotační smykový přístroj, rekonstituovaný	-	-	19,8	9,5	
	Translační smykový přístroj, rekonstituovaný	-	-	21,7	6,9	
Faktorová et al. (2019)	Triaxiální zkouška CIUP, rekonstituovaný	-	-	25,5	-	Brno Černá pole

Tab. 6: Pevnostní charakteristiky brněnského téglu; \*nejedná se o skutečnou reziduální pevnost, ale o odhad z triaxiální zkoušky při přetvoření 25 % (data převzata z Feda et al., 1995; Svoboda, 2010; Fencel, 2012; Faktorová et al., 2019).

### 6.3 Stlačitelnost, překonsolidace a součinitel zemního tlaku v klidu $K_0$

Mezi další základní charakteristiky zemin patří parametry popisující stlačitelnost. Jedná se o parametry  $N$ ,  $\lambda^*$ ,  $\kappa^*$ , jež definují sklon a pozici izotropní čáry normální stlačitelnosti (NCL) a čáry odlehčení. Parametr  $\lambda^*$  je charakterizován jako směrnice čáry NCL a parametr  $\kappa^*$  jako směrnice čáry odlehčení a znovu přitížení.  $N$  je hodnota  $\ln(1+e)$  pro jednotkové napětí v rovině  $\ln(1+e)$  vs.  $\ln p'$  (Svoboda a Mašín 2008). Dalšími parametry, které charakterizují jednoosou stlačitelnost, závislémi však na oboru napětí, jsou například index stlačitelnosti  $C_c$  popisující závislost změny čísla pórovitosti na změně

efektivního napětí (vynesené v logaritmickém měřítku), index sekundární stlačitelnosti  $C_\alpha$  vyjadřuje závislost změny čísla pórovitosti na změně času (vynesené v logaritmickém měřítku) a dále okamžitý index stlačitelnosti pro odlehčení  $C_r$  je sklon odlehčovací větve při oedometrické zkoušce. Parametr  $c_v$  je součinitel konsolidace určující rychlost konsolidace a  $c_d$  je koeficient difuze, který charakterizuje difuzní kolaps při konsolidaci. Stlačitelností brněnského téglu se zabývali například Boháč et al. (1995), Feda et al. (1995), Svoboda (2010), Pavlová (2014), Faktorová et al. (2019). Parametry a indexové hodnoty stlačitelnosti stanovené těmito autory při zkouškách na neporušených vzorcích a rekonstituovaném materiálu z různých lokalit jsou shrnuty v Tab. 7. Oedometrická zkouška Pavlové (2014) na neporušeném vzorku byla dlouhodobou zkouškou (více než 2 roky) pro pozorování sekundární stlačitelnosti při geostatickém napětí a jedná se tak o parametry v oblasti překonsolidace a nikoliv na NCL, jako je tomu u rekonstituovaných vzorků ostatních autorů. Oedometrická zkouška Svobody (2010) na neporušeném vzorku naopak byla prováděna až do vyšších napětí než je běžný rozsah za účelem stanovení překonsolidačního napětí a jedná se tak o parametry na NCL. Hodnotu  $C_r$  pak Pavlová (2014) stanovila na základě převzatých dat od Krupičky (2012), který zjišťoval překonsolidační napětí při zatěžování neporušených vzorků v oedometru vysokými napětími.

	Zkouška/ poznámka	$\lambda^*$ (-)	$\kappa^*$ (-)	$N$ (-)	$C_c$ (-)	$C_r$ (-)	$C_\alpha$ (-)	$c_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$c_d$ (m <sup>2</sup> /s)	Lokalita
Boháč et al. (1995)	oedometr, rekons.	-	-	-	0,40	-	0,016	-	-	Boby centrum
Feda et al. (1995)	oedometr, triax. neporušený	-	-	-	-	-	0,0015 - 0,0075	2,25 - 0,02 · 10 <sup>-8</sup>	-	Boby centrum
Svoboda (2010)	oedometr, neporušený	0,128	0,01	1,51	-	-	-	-	-	Královopolské tunely
Pavlová (2014)	oedometr, rekons.	-	-	-	0,40	-	-	1,23 · 10 <sup>-7</sup>	1,7 · 10 <sup>-11</sup>	Královopolské tunely
	oedometr, neporušený	-	-	-	-	0,0960	0,0008 - 0,0044	2,34 · 10 <sup>-7</sup>	1,2 · 10 <sup>-11</sup>	Královopolské tunely
Faktorová et al. (2019)	oedometr, rekons.	0,085	0,016	-	0,5	0,073	-	-	-	Brno Černá pole

Tab. 7: Parametry stlačitelnosti brněnského téglu (data převzata z Boháč et al., 1995; Feda et al., 1995; Svoboda, 2010; Pavlová, 2014; Faktorová et al., 2019).

Jak je již zmíněno výše v kapitole 5.1.3 a v úvodu této kapitoly, brněnské tégly se vyznačují značnou překonsolidací. Za účelem stanovení míry překonsolidace je možné tuto odvozovat na základě geologických a paleontologických metod, odhadu mocnosti původního nadloží, laboratorních měření chování zeminy, in situ měření chování masivu, anebo pomocí zpětné analýzy v rámci numerického modelování. Míru překonsolidace je možné vyjádřit tzv. stupněm překonsolidace OCR, jenž je definován jako poměr maximálního předchozího (překonsolidačního) napětí  $\sigma'_{v\max}$ , resp. pseudo-překonsolidačního napětí  $\sigma'^*_{v\max}$  a aktuálního vertikálního efektivního napětí in-situ  $\sigma'_v$  – jeho hodnota je tak závislá i na hloubce. Zdánlivé, nebo také pseudo-překonsolidační napětí je překonsolidační napětí stanovené z křivek stlačitelnosti z oedometrické zkoušky, které není oproštěno od vlivu sekundárního

stlačení (creepu). OCR\* stanovené z pseudo-překonsolidačního napětí je pak vyšší než reálné OCR ze skutečného překonsolidačního napětí. Stanovením překonsolidačního napětí a OCR se zabývali například Erbenová (2006), Míča et al. (2010), Novák (2012) Svoboda (2010), Boháč a Pavlová (2012), Černíková (2014), Pavlová (2014), Malát et al. (2016), jejichž výsledky jsou obsahem Tab. 8 a jasně poukazují na určitou, avšak nejednoznačnou míru překonsolidace brněnského jílu.

	Hloubka (m)	Zkouška/ poznámka	$\sigma'_{v}$ (kPa)	$\sigma'^{*}_{v \max}$ (kPa)	$\sigma'_{v \max}$ (kPa)	OCR* (-)	OCR (-)	Lokalita
Erbenová (2006)	12	oedometr (nízká napětí)	-	337	-	3,7	-	Brno Křenová
	24		-	463	-	2,3	-	Brno Šilingrovo nám.
Míča et al. (2010)	12,5 - 24	in-situ presiometr	-	-	-	6	-	Královopolské tunely
	27		-	-	-	4	-	
Svoboda (2010)	15	oedometr	275	1800	-	6,5	-	Královopolské tunely
Boháč a Pavlová (2012)	15	rešerše a odhad	275	-	900	-	3,3	Královopolské tunely
Novák (2012)	18,7	oedometr	335	2000	-	5,9	-	Královopolské tunely
	-	model, závislost na $K_0$ ze zpětné numerické analýzy	335	-	2700 - 11390	-	8,1 - 34,2	
Krupička (2012)	15,9	oedometr	300	1650	-	5,5	-	Královopolské tunely
Černíková (2014)	7	oedometr	-	3000	-	22,8	-	Brno Slatina
	14		-	3100	-	13,9	-	
	21		-	3850	-	13,5	-	
	24		-	4000	-	12,9	-	
	27		-	5400	-	16	-	
	30		-	4400	-	12	-	
	33		-	4500	-	11,5	-	
	36		-	5200	-	12,5	-	
	38		-	6000	-	13,8	-	
	41		-	7300	-	15,8	-	
	47		-	7950	-	15,4	-	
Malát et al. (2016)	14	oedometr	124	2100	1300	16,9	10,5	Královopolské tunely
	21		185	3950	2600	21,4	14,1	
	24		211	5400	4050	25,6	19,2	
	27		238	7050	5550	29,6	23,3	
	30		264	3900	2300	14,8	8,7	
	33		290	5000	3450	17,2	11,9	
	36		317	4850	2700	15,3	8,5	
	38		334	5050	4000	15,1	12,0	
	41		361	8950	7100	24,8	19,7	

Tab. 8: Překonsolidační napětí a OCR z různých lokalit (data převzata z Erbenová, 2006; Míča et al., 2010; Svoboda, 2010; Novák, 2012; Krupička, 2012; Boháč a Pavlová, 2012; Černíková, 2014; Pavlová, 2014; Malát et al., 2016).

Z Tab. 8 je patrné, že výsledky jednotlivých autorů se značně liší, především v závislosti na zvolené zkoušce a její přesné metodice a následném vyhodnocení. Pro srovnávání hodnot  $\sigma'_{v \max}$  (resp.  $\sigma'^{*}_{v \max}$ ) a OCR je nutné zavádět předpoklady a brát na zřetel postup, jakým bylo výsledku dosaženo. Především je vždy nutné rozlišovat, zda bylo stanovováno zdánlivé, či skutečné překonsolidační napětí. Zdánlivé

překonsolidační napětí nadhodnocuje míru překonsolidace, nicméně je jeho hodnota stále běžně využívána.

Již mnoho autorů se v minulosti snažilo dopátrat součinitele zemního tlaku v klidu  $K_0$ , definovaného aktuálním poměrem horizontálního a vertikálního napětí in situ, jehož hodnota by byla pro brněnský tégl typická a bylo by ji možno považovat za skutečnou hodnotu  $K_0$ , vystihující aktuální napjatostní poměry zeminového masivu. Jejich výsledky jsou shrnuty v Tab. 9. Nejběžnější využívanou a spolehlivou empirickou metodou pro výpočet hodnoty  $K_0$ , avšak pro normálně konsolidované zeminy, je pomocí vztahu (6.1) dle Jákyho (1948), který vyjadřuje závislost  $K_0$  na úhlu vnitřního tření.

$$K_{0NC} = (1 - \sin \varphi') \quad (6.1)$$

Pro výpočet  $K_0$  překonsolidovaných zemin je pak často využíván empirický vztah (6.2), jenž představili Mayne a Kulhawy (1982), ve kterém je mimo úhlu vnitřního tření zohledněn i vliv překonsolidace v podobě OCR. Předpoklad tak je, že překonsolidace zvyšuje aktuální horizontální napětí v masivu a tak hodnotu  $K_0$ , což je také nejčastěji uznávaný názor (Krupička, 2012). Zjištění skutečného stavu překonsolidace však není zcela jednoznačné a experimentální data (viz Tab. 8) často vystihují pouze zdánlivou překonsolidaci a nadhodnocují hodnotu OCR a tak i hodnotu  $K_0$ . Tento vztah tak není možné jednoduše použít pro všechny překonsolidované zeminy a především ne pro studovaný brněnský tégl, kde faktory jako stárnutí zeminy a sekundární stlačení způsobují vyšší zdánlivou míru překonsolidace (Boháč a Pavlová, 2012; Krupička, 2012; Pavlová, 2014). Vztahy založené na OCR by tak neměly být automaticky používány pro výpočet  $K_0$ , jelikož by mohly vést ke značnému nadhodnocení výsledku (Rott et al., 2015).

$$K_{0OC} = (1 - \sin \varphi') \cdot OCR^{(\sin \varphi')} \quad (6.2)$$

Dle těchto vztahů je možné dopočítávat  $K_0$  z různých kombinací  $\varphi'$  a OCR zmíněných v Tab. 6 a Tab. 8, přičemž by měl být vždy používán  $\varphi'_{cr}$  (Mesri a Hayat, 1993), jakožto skutečný parametr zeminy a OCR určený ze skutečného překonsolidačního napětí  $\sigma'_{vmax}$ . Jákyho (1948) vztah nám může napomoci při odhadu  $K_0$  jako jeho minimální hodnoty pro danou zeminu, teoreticky odpovídající napjatostním poměrům v době sedimentace, ještě než došlo k překonsolidaci. Taková minimální hodnota pak v podstatě uvažuje, že veškerá překonsolidace je způsobena creepem nebo stárnutím. Výsledky ze zpětných numerických analýz, především při použití pokročilých hypoplastických modelů se zavedenou anizotropií tuhosti, které využívají při svých analýzách Rott et al. (2015) nebo Malát et al. (2016), pak napovídají, že hodnota  $K_0$  brněnského jílu bude ve skutečnosti pravděpodobně nižší než ta určená dle vztahu (6.2) a bude se blížit spíše  $K_0$  normálně konsolidované zeminy. Toto platí i pro případy, kdy do tohoto vztahu dosazujeme domnělou skutečnou hodnotu OCR (nižší než zdánlivou), bez vlivu faktorů stárnutí zeminy, určenou ze skutečného překonsolidačního napětí. V určení správné hodnoty  $K_0$  téglu, resp. každého tuhého překonsolidovaného jílu, pomocí nějakého jednoduchého empirického vztahu, tak

stále přetrvávají dva zásadní problémy. Jedním z nich je, že doposud stále platí tvrzení Mayne a Kulhawy (1982), že není možné jednoznačně stanovit skutečné překonsolidační napětí konkrétní zeminy nějakou zkušební metodou, ale pouze ho odhadovat na základě znalosti místní geologie a historie zatížení. Při určování běžnými metodami (oedometr) tak stále ovlivňuje hodnoty překonsolidačního napětí ne zcela známou mírou creep a stárnutí zeminy. Druhým problémem pak je, že názory na to, jak samotná překonsolidace ovlivňuje vývoj  $K_0$  se rovněž stále různí (Krupička, 2012) a její reálný efekt na vývoj  $K_0$  není znám. Jelikož jednotlivé výzkumy podávají rozporuplné hodnoty, problematika stanovení  $K_0$  pro brněnský jíł zůstává stále otevřena. Bližší rozbor problematiky geologické historie, překonsolidace a  $K_0$  brněnského těglu je však nad rámec této diplomové práce.

	Metoda/poznámka	$K_0$
Erbenová (2006)	empiricky z OCR a $\varphi'$ , $K_{OOC}$ dle Mayne-Kulhawy (1982)	0,82 - 0,83
	empiricky z OCR a $\varphi'$ , další vztahy	0,78 - 0,97
Svoboda (2010)	empiricky z OCR a $\varphi'$ , $K_{OOC}$ dle Mayne-Kulhawy (1982)	1,25
	empiricky z OCR a $\varphi'$ , $K_{ONC}$ dle Jáky (1948)	0,66
Boháč a Pavlová (2012)	empiricky, rešerše a odhad OCR, $K_{OOC}$ dle Mayne-Kulhawy (1982)	0,99
Novák (2012)	hypoplastický model, indukovaná anizotropie	1,37 a 1,45
	hypoplastický model, izotropní	1,70 a 2,35
Krupička (2012)	empiricky z OCR a $\varphi'$ , $K_{ONC}$ dle Jáky (1948)	0,6
	empiricky z OCR a $\varphi'$ , $K_{OOC}$ dle Mayne-Kulhawy (1982)	1,19
	poměr $\sigma'_{v\max}$ a $\sigma'_{h\max}$ , dle Zeevaert (1953)	0,79
Rott et al. (2015)	empiricky z OCR a $\varphi'$ , $K_{ONC}$ dle Jáky (1948)	0,63
	empiricky z OCR a $\varphi'$ , $K_{OOC}$ dle Mayne-Kulhawy (1982)	1,3
	hypoplastický model, zavedena anizotropie tuhosti	0,60 (pro $\alpha_G=1,70$ ) 0,75 (pro $\alpha_G=1,45$ ) 0,81 (pro $\alpha_G=1,35$ )
Malát et al. (2016)	hypoplastický model, zavedena anizotropie tuhosti	0,58 - 0,75

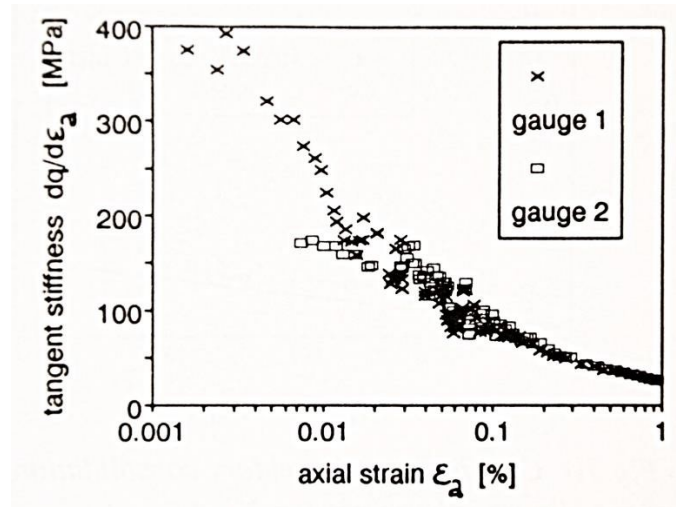
Tab. 9: Hodnoty  $K_0$  stanovené na základě různých metod (data převzata z Erbenová, 2006; Svoboda, 2010; Boháč a Pavlová, 2012; Novák, 2012; Krupička, 2012; Rott et al., 2015; Malát et al., 2016).

## 6.4 Tuhost brněnského těglu a anizotropie tuhosti

Z předcházejících kapitol je zřejmé, že chování, vlastnostem a parametrům brněnského jílu se věnoval nespočet autorů v rámci mnoha publikací a výzkumů. Velice málo z nich se však zabývalo studiem tuhosti brněnského těglu v oboru malých a velmi malých přetvoření a především anizotropie tuhosti při malých a velmi malých přetvořeních, jež jsou hlavním tématem této diplomové práce.

Tuhostí brněnského jílu se zabírali v rámci svého výzkumu Boháč et al. (1995) a Boháč a Feda (1995), kteří uvádějí na neporušeném vzorku z lokality Boby centra Brno hodnotu  $E = 140$  MPa, která představuje tečný Youngův modul pro axiální přetvoření  $\varepsilon_a = 0,03 - 0,04$  %. Pro jeho stanovení

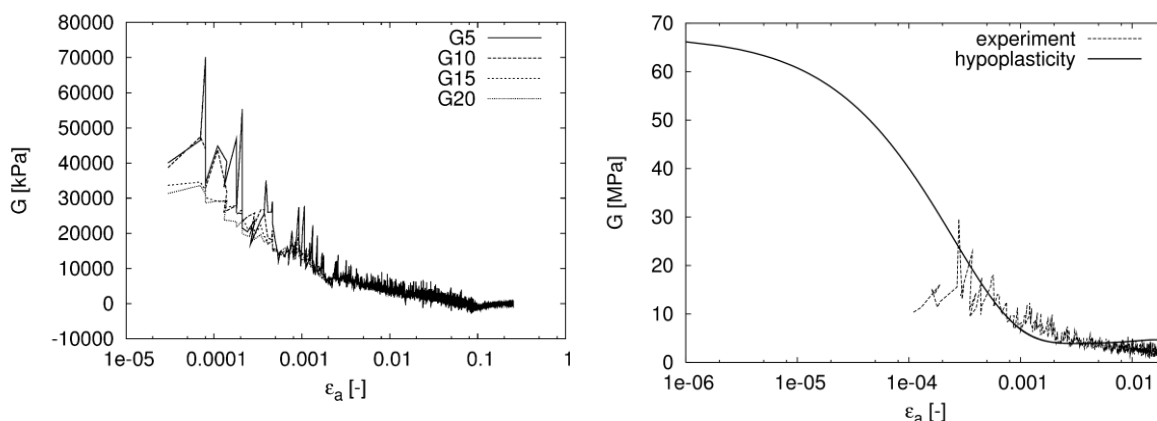
využívali lokální snímače deformací založené na Hallově jevu. V souladu s teorií pozorovali postupný pokles tuhosti s rostoucím přetvořením, což je patrné z výsledků měření na Obr. 29.



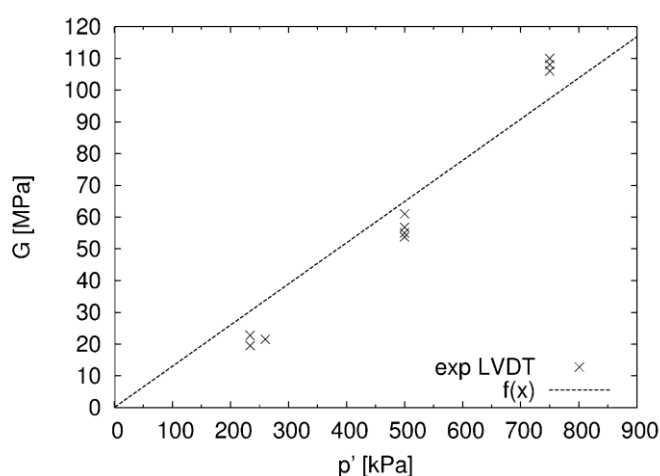
Obr. 29: Závislost tuhosti brněnského téglu na přetvoření (Boháč et al., 1995).

Svoboda (2010) stanovoval tuhost téglu v oboru malých přetvoření pomocí lokálních snímačů deformací (LVDT) a tuhost v oboru velmi malých přetvoření na základě měření bender elementy (BE) na neporušených vzorcích z lokality Královopolských tunelů (tunel VMO Dobrovského).

Výsledky jeho měření LVDT a určená hodnota tuhosti v prostoru  $G$  vs.  $\varepsilon_a$  na neporušeném vzorku konsolidovaném na  $p' = 500$  kPa při neodvodněné triaxiální zkoušce jsou vyneseny na Obr. 30a. Data nejsou zhlazena žádnou funkcí a křivky reprezentují sečný Youngův modul  $E$  v úseku zmíněného počtu měření (například G15 odpovídá sečné tuhosti přes 15 měření provedených v intervalu jedné minuty). Svoboda (2010) poukazuje na rozptyl naměřených dat a konstatuje, že může být způsoben kombinací několika faktorů, jako je membrána, na níž jsou připevněny snímače, nebo rozhraními mezi jednotlivými částmi soustavy přístroj-vzorek apod. Z měřených dat je opět patrný pokles tuhosti s rostoucím přetvořením. Zvýšený rozptyl dat pro měření blízkí se oboru velmi malých přetvoření ( $10^{-5}$ ) pak rovněž signalizuje, že měření lokálními snímači LVDT přestávají být vhodná a výsledky reprezentativní pro tyto hodnoty přetvoření, kvůli nepřesnosti samotných LVDT. Je tak nutné přistoupit k měření jinými vhodnými metodami, jako je měření rychlosti smykové vlny pomocí bender elementů. Obr. 30b pak znázorňuje simulaci poklesu tuhosti s přetvořením predikovanou hypoplastickým modelem v porovnání s měřením lokálními snímači při  $p' = 275$  kPa. Na Obr. 31 je zobrazen v zásadě lineární nárůst tuhosti v regionu malých přetvoření v závislosti na růstu efektivního středního napětí. Svoboda (2010) neuvádí přesné hodnoty modulu tuhosti, ale z grafu na Obr. 31 je možné odečíst, že v oboru malých přetvoření jsou přibližně v rozmezí 20 až 110 MPa pro běžný rozsah středního efektivního napětí 250 až 800 kPa. Z Obr. 30b je potom možné odhadnout tuhost při malých přetvořeních na přibližně 10 až 30 MPa pro  $p' = 275$  kPa.



Obr. 30: a) Sečná tuhost brněnského téglu v oboru malých přetvoření z měření LVDT při  $p' = 500$  kPa; b) srovnání měření LVDT při 275 kPa s predikcí hypoplastického modelu (Svoboda, 2010).



Obr. 31: Vývoj tuhosti brněnského téglu v oboru malých přetvoření v závislosti na středním napětí (Svoboda, 2010).

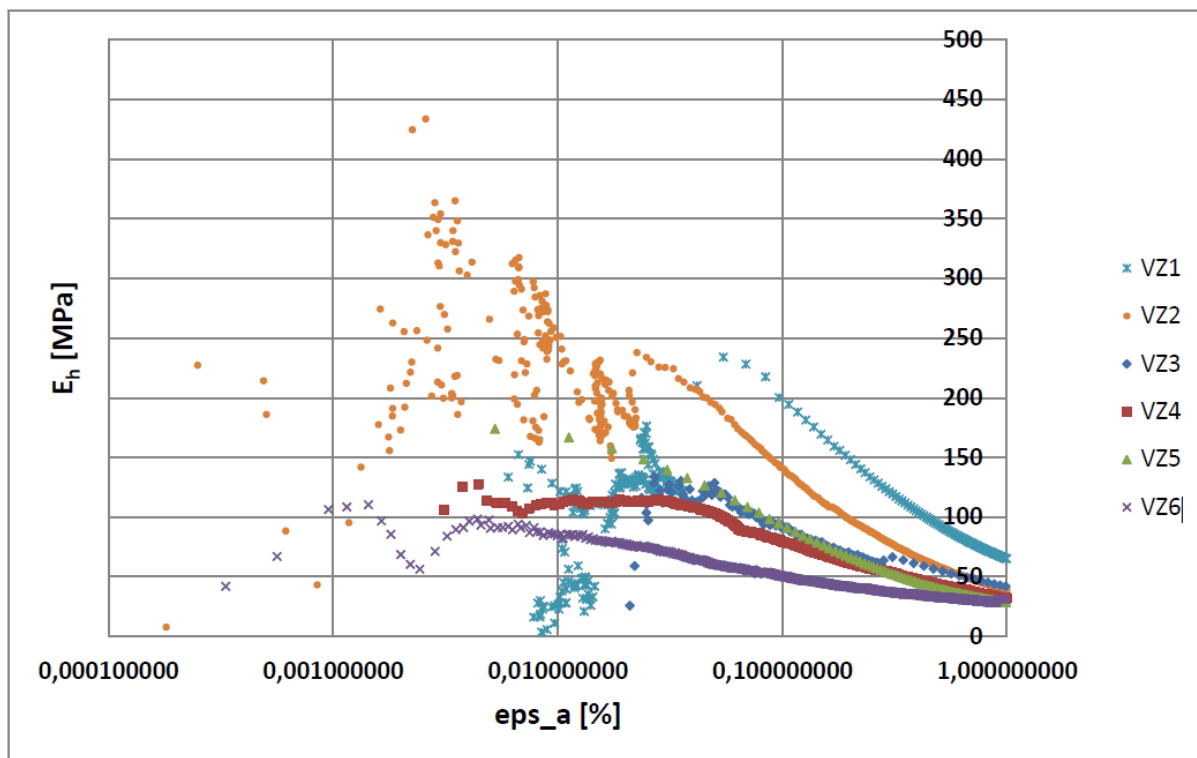
Stanovením tuhosti v oboru malých přetvoření se zabýval také Mohyla (2014) ve své diplomové práci, jejímž cílem bylo především stanovení tečného Youngova modulu  $E_t$ , sečného Youngova modulu  $E_s$ , Poissonova čísla  $\nu$  a anizotropie tuhosti pomocí lokálních snímačů deformací LVDT. Jeho zkoušky byly prováděny v rámci stejného grantového projektu a výzkumu jako pro tuto diplomovou práci. Vzorky byly odebrány z identického vrtu a prováděny tak na témže materiálu z podobných hloubek odběru. Na základě zkoušek stlačitelnosti při izotropních podmínkách (tzv. izotropních sond), kdy je zvyšováno a následně snižováno všesměrné izotropní napětí působící na vzorek, Mohyla (2014) zjistil výraznou anizotropní odezvu zkoušeného téglu na toto izotropní zatěžování z měření přetvoření pomocí axiálních a radiálních snímačů LVDT. Jelikož byla při těchto zkouškách ve směru axiálním přetvoření výrazně větší než ve směru radiálním, svědčí to o vyšší tuhosti téglu v horizontálním směru. Na základě experimentálních dat Mohyly (2014) z měření deformací pomocí LVDT na téglu uvádějí Rott et al. (2015) poměr axiálního a radiálního přetvoření hodnoty 0,6 pro izotropní konsolidaci. Další parametry se Mohyla (2014) pokoušel zjistit na základě tzv. odvozených axiálních sond, kde bylo zvyšováno a snižováno axiální napětí na vzorek v oboru pružného chování zeminy a pozorovány

axiální a radiální deformace, resp. přetvoření. Z grafů dle těchto zkoušek je možné odhadovat hodnoty Poissonova čísla, pohybující se v rozmezí -0,1 až 0,2 při axiálním přetvoření do řádů setin procent, přičemž záporné hodnoty mohou být dané oscilací měření. V závislosti na míře přetvoření nabývalo, dle grafů,  $E_t$  hodnot zhruba do 100 až 150 MPa (s extrémy až 400 MPa v počátku odlehčovací fáze) a  $E_s$  pak přibližně hodnot 35 až 75 MPa. Mohyla (2014) dále uvádí pro tyto zkoušky výrazné navýšení tuhosti vlivem axiálního přitížení, které pozoroval při počáteční fázi následného odlehčování, což dobře ilustruje odezvu materiálu na historii napětí.

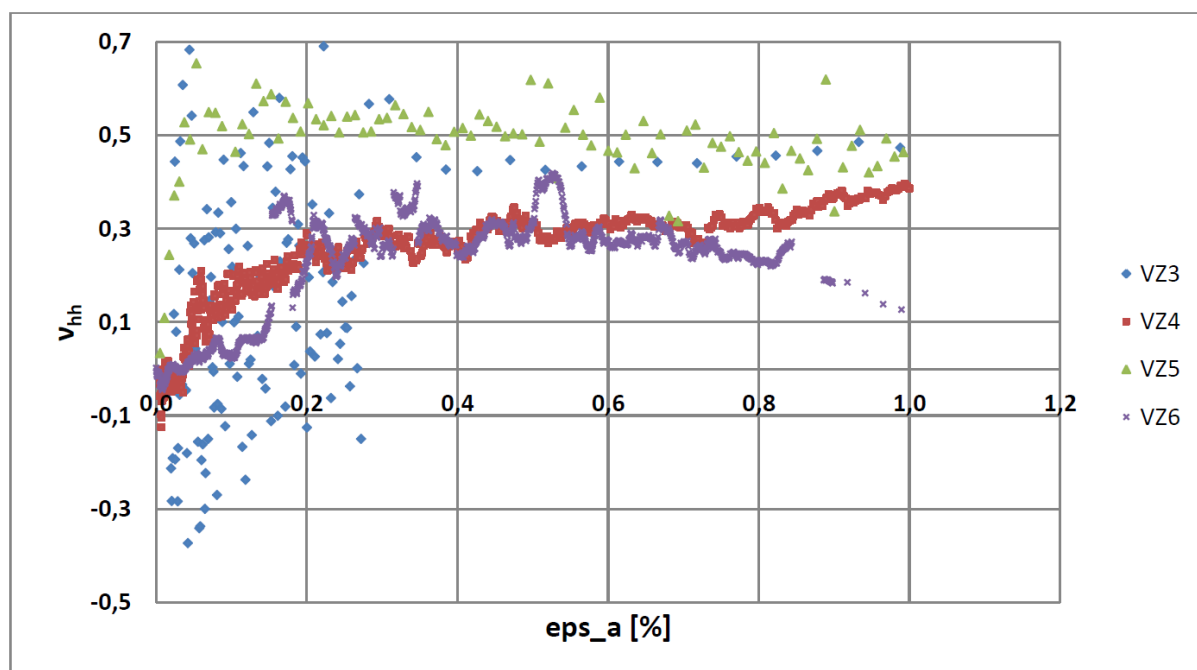
U všech vzorků Mohyla (2014) prováděl i zatěžování až do smykového porušení nadále s lokálním měřením deformací. Z výsledků těchto zkoušek stanovil ustálené hodnoty  $\nu = 0,2$  až  $0,35$  při přetvoření 1 %. Kvůli velkému rozptylu dat se mu nepodařilo stanovit počáteční  $E_t$  při malých přetvořeních. Počáteční nedrénovaný  $E_s$  Mohyla (2014) z výsledků hrubě odhaduje na 150 MPa při  $\varepsilon_a = 0,02$  % (pro vzorky z hloubky 24 a 36 m). Počáteční drénovaný  $E_s$  stanovil u dvou vzorků z hloubky 24 m na 78 MPa při  $\varepsilon_a = 0,01$  %, resp. 82 MPa při  $\varepsilon_a = 0,04$  % a u vzorku z hloubky 11 m  $E_s$  hodnoty 62 MPa při  $\varepsilon_a = 0,006$  %. Při všech smykových zkouškách byl dobře patrný pokles tuhosti s rostoucím přetvořením.

Všeobecně se Mohyla (2014) potýkal s velkým rozptylem dat především pro měření v oboru malých přetvoření, jehož příčinu připisuje pravděpodobně nepřesnosti LVDT snímačů, ale nepodařilo se ji jednoznačně určit.

Výsledky všech Mohylových (2014) zkoušek se vztahují k Youngovým modulům ve svislém směru  $E_v$  v referenci k uložení materiálu in-situ. Na základě součinitele  $\alpha_G = 1,35$  z poměru měřených smykových modulů pro tégl dle Rotta a Mašina (2013) pak Mohyla (2014) dopočítal hodnoty Youngova modulu ve směru horizontálním  $E_h$  a Poissonovo číslo pro horizontální přetvoření vlivem hypotetického horizontálního napětí  $\nu_{hh}$ , jejichž výsledky jsou zobrazeny na Obr. 32 a Obr. 33. Autor bohužel neuvádí přesný postup tohoto výpočtu. Vychází z  $\alpha_G$ , který je daný poměrem smykových modulů, nicméně pro Youngův modul a Poissonovo číslo je tento poměr odlišný a z práce není jasné, jak při počítání  $E_h$  a  $\nu_{hh}$  postupoval.



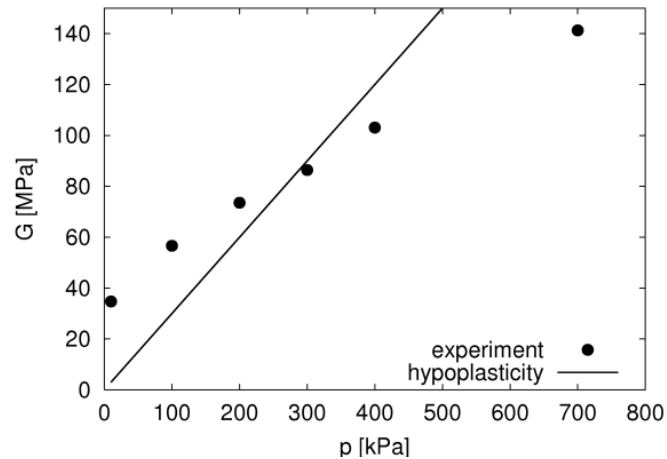
Obr. 32: Vypočtené hodnoty  $E_h$  pro  $\alpha_G = 1,35$ ; neodvodněný smyk: VZ1 (36 m), VZ2 (24 m); odvodněný smyk: VZ3, VZ4 (24 m), VZ5, VZ6 (11 m) (Mohyla, 2014).



Obr. 33: Vypočtené hodnoty  $v_{hh}$  pro  $\alpha_G = 1,35$ ; VZ3, VZ4 (24 m), VZ5, VZ6 (11 m) (Mohyla, 2014).

Svoboda (2010) dále prováděl na neporušeném vzorku brněnského jílu měření pomocí vertikálních bender elementů a stanovoval tak počáteční smykový modul  $G_0$  ve vertikálním směru na základě rychlosti šíření smykové vlny, tedy tuhost v rozsahu velmi malých přetvoření (menších než  $\sim 10^{-5}$ ). Výsledky měření při středním efektivním napětí do 700 kPa jsou vyneseny na Obr. 34. Svoboda (2010)

uvádí hodnotu  $G_0 = 80$  MPa při napětí  $p' = 275$  kPa, kterou využil při kalibraci modelu, resp. dopočítání dalších parametrů modelu, jelikož toto geostatické napětí odpovídá hloubce tunelu, který byl uvažován v numerické analýze. Jak je rovněž patrné na Obr. 34, modelem vypočtené hodnoty svým lineárním nárůstem neodpovídají trendu experimentálně naměřených hodnot  $G_0$ .



Obr. 34: Závislost tuhosti v oboru velmi malých přetvoření na středním efektivním napětí stanovená z měření bender elementy a porovnání s lineární předpovědí hypoplastického modelu (Svoboda, 2010).

Jak je již zmíněno v kapitole 2.1, stupeň anizotropie  $\alpha_G$  je možné považovat za základní měřítko anizotropie tuhosti a tento koeficient je využíván pro kalibraci numerických modelů (Rott a Mašín, 2012). Na základě podrobné rešerše zahraničních experimentálních dat měření parametrů podobných materiálů jako je brněnský tégl (Londýnský a Gaultský jíl) předpokládali Rott a Mašín (2012) pro tégl hodnotu  $\alpha_G \approx 2$  a navrhli tuto hodnotu užívat v numerických analýzách v případě nedostupnosti experimentálních dat. Pro smykové moduly při velmi malých přetvořeních lze pak podle této rešerše očekávat pro brněnský jíl hodnoty  $G_{vh} \approx 40$  až 120 MPa a  $G_{hh} \approx 80$  až 230 MPa, samozřejmě v závislosti na aktuálním napětí. Měřené hodnoty  $G_{hh}$  jsou konzistentně podstatně vyšší než hodnoty  $G_{vh}$ , což poukazuje na vyšší tuhost přírodních jílu v horizontálním směru a tedy, že anizotropie tuhosti daná strukturou zeminy je poměrně vysoká a pro tégla tak je téměř jisté  $\alpha_G > 1$ . Rott a Mašín (2013) později stanovili podle prvotních měření v laboratořích mechaniky zemin Přírodovědecké fakulty UK na vzorcích téglu hodnotu  $\alpha_G = 1,35$ , při měření vertikálními bender elementy na horizontálně orientovaném vzorku, kterou posléze využívali pro kalibraci hypoplastického modelu a zpětnou numerickou analýzu za účelem stanovení součinitele  $K_\theta$ . Rott et al. (2015) pak použili při kalibraci numerického modelu  $\alpha_G = 1,45$ . Zde je důležité upozornit, že tato hodnota vychází z průběžných výsledků měření  $G_{vh}$  a  $G_{hh}$  stanovených v rámci této diplomové práce.

Odlíšný přístup pro stanovení anizotropie téglu využívali Rott et al. (2015), kteří mimo jiné určovali stupeň anizotropie  $\alpha'_G$  z cross-hole měření in-situ v několika hloubkových úrovních na lokalitě ve Šmahově ulici v Brně. Stupeň anizotropie  $\alpha'_G$  je zde daný poměrem druhých mocnin rychlostí smykových vln v různých směrech měřených při prozařování seismickými vlnami mezi vrty. Autoři

dospěli k hodnotě  $\alpha'_G$  v intervalu 1,20 až 1,30. Jedná se o hodnotu stanovenou pro celou část masivu mezi vrty, která zahrnuje vliv případných diskontinuit a nehomogenit v makro měřítku.

Z výše uvedených informací z literatury (v kapitole 2, 4 a 6.4), ať už ze zkoušek prováděných na samotném téglu, nebo na podobných jílech, je možné očekávat při experimentech přibližné  $G_{vh}$  v rádech desítek až 200 MPa a  $G_{hh}$  násobně vyšší v rozmezí zhruba 100 až 300 MPa pro běžný rozsah napětí odpovídající geostatickému napětí v hloubkách relevantních z hlediska inženýrské geologie. Hodnota  $\alpha_G$  se pak bude pravděpodobně pohybovat v rozmezí 1,2 – 2 a bude poměrně konzistentní i při zvyšující se izotropní napjatosti.

## 7. VLASTNÍ LABORATORNÍ ZKOUŠKY

### 7.1 Použité vybavení a přístroje

V následující kapitole jsou shrnuty a popsány přístroje a vybavení laboratoře mechaniky zeminy PřF UK, které jsem používal při laboratorních experimentech.

#### 7.1.1 Triaxiální komora a GDS kontroléry

Všechny laboratorní zkoušky jsem realizoval v konvenčním triaxiálním přístroji, resp. komoře. Nejedná se o pravý triaxiální přístroj, jelikož nelze kontrolovat napětí ve všech třech směrech, jak plyne z dalšího textu, ale v oboru mechaniky zemin je jako triaxiální přístroj zmiňován, případně i jen jako jeho součást – triaxiální komora.

Schéma běžného triaxiálního přístroje je zobrazeno na Obr. 35a. Běžný triaxiální přístroj se skládá především z triaxiální komory a mechanického lisu. Uvnitř plexisklové komory je umístěn mezi podstavami vzorek zeminy v nepropustné membráně. Mezi podstavou a vzorkem se nachází porézní destičky umožňující drenáž a disipaci pórových tlaků. Díky kontrolovanému tlaku vody v komoře (komorový tlak) můžeme vzorek vystavit vesměrnému (radiálnímu) napětí  $\sigma_r$ , přičemž membrána kolem vzorku zajišťuje nepropustnost, ale dovolí vzorku deformovat se. V místě podstav je membrána utěsněna O-kroužky. Do podstav jsou vedeny hadičky, které umožňují odvádět drénovanou vodu ze vzorku a kontrolovat sytící tlak, čili pórový tlak, pomocí GDS kontroléru (hydraulické tlakové jednotky). Radiální napětí působí na vzorek ze všech stran a umožňuje tak izotropní zatížení. Do horní podstavy je osazen píst vyvedený ven z komory. Celá komora je umístěna v mechanickém lisu a rámu. Pomocí lisu je možné vzorek zeminy přes píst zatěžovat napětím působícím ve vertikálním směru  $\sigma_a$ , jež je rovné součtu deviátorového napětí  $q$  a radiálního napětí  $\sigma_r$ . Střední efektivní napětí  $p'$ , využívané pro popis napěťových stavů v rámci této práce, vychází z modifikovaného prvního invariantu tenzoru napětí ve zjednodušení pro axisymetrický stav při triaxiální zkoušce a stanoví se dle vztahu (7.1).

$$p' = \frac{\sigma_a + 2\sigma_r}{3} \quad (7.1)$$

Výše popsaná aparatura umožňuje jak izotropní zatěžování při nulovém deviátorovém napětí, tak anizotropní zatěžování až do porušení smykem. Při osazení lokálních snímačů deformace LVDT přímo na vzorek je pak triaxiální komora vhodná pro stanovení tuhosti v oboru malých přetvoření (viz kapitola 2.2).

V případě mnou prováděných zkoušek měření bender elementy bylo prováděno pouze izotropní zatěžování vzorku, bez zvyšování axiálního napětí, kdy platí  $\sigma_a = \sigma_r$  a jedná se tak jen o všesměrné napětí vyvozené komorovým tlakem. Mechanický lis a rám v takovém případě není třeba a triaxiální komora může být umístěna mimo ně.



Komorový a sytící tlak je vyvozován pomocí GDS kontrolérů. Jedná se o hydraulické digitální zařízení, které umožňuje měnit a měřit tlak a objem pomocí čerpání vody do vzorku a do komory hadičkami. Do GDS kontroléru je rovněž drénována voda vytlačená ze vzorku během konsolidace, přičemž v tomto případě kontrolér udržuje stálý sytící tlak a měří objem vody vytlačené ze vzorku. Data z GDS kontrolérů jsou logována v počítači. Používané GDS kontroléry jsou vyfoceny na Obr. 36.

### 7.1.2 Bender elementy a související elektronika

Při mých zkouškách byly využívány vertikální bender elementy vsazené přímo do středu těla podstavy triaxiální komory a utěsněné vnitřními O-kroužky. Horizontální BE byly vedeny přímo prostorem komory až ke vzorku, přičemž byly opatřeny zelenou silikonovou gumou, která umožňovala lepší uchycení ke vzorku a utěsnění perforované membrány. Oba typy bender elementů jsou vyfoceny na Obr. 37. Vyrobito a dodalo je Geotechnical Engineering Research Centre, City University London, UK.

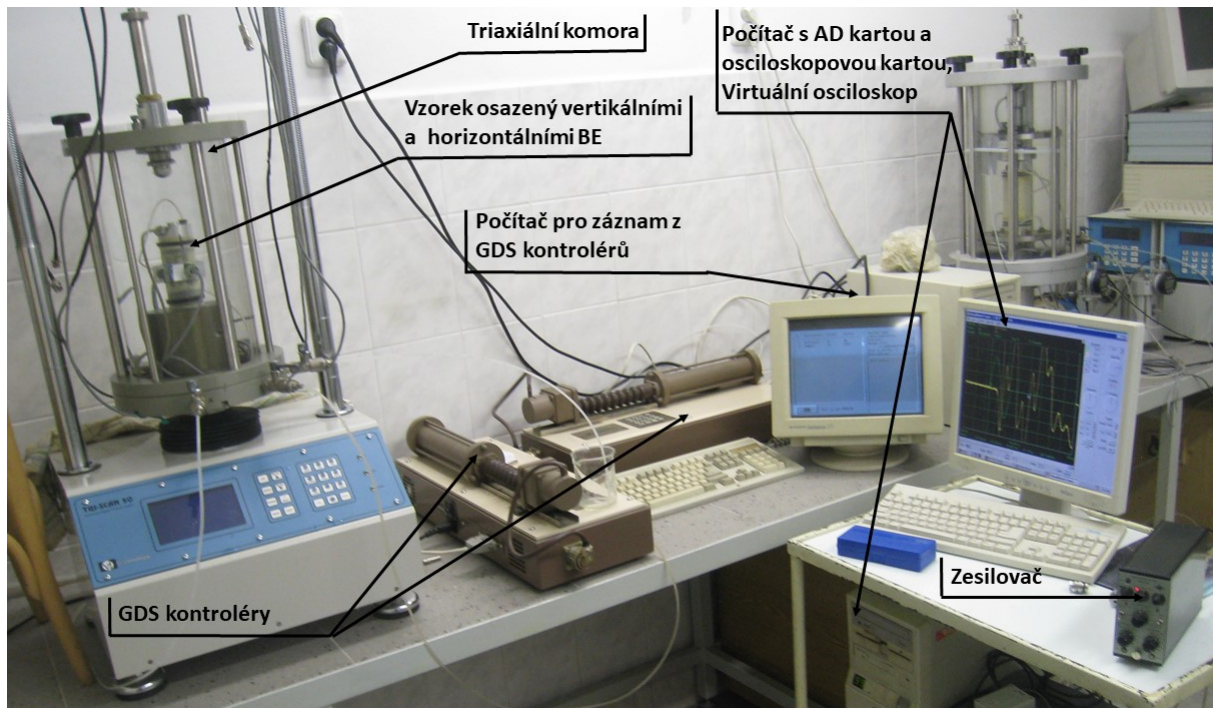


Obr. 37: Používané vertikální a horizontální bender elementy.

Použité součásti měřicího systému jsou stejné, jako popisuje Petružálek (2006). Zdrojem elektrického napětí pro generování smykových vln sinovým pulsem byla počítačová AD karta AD14DSP, JanasCard. Registrace vstupního a výstupního signálu probíhala přes dvoukanalovou osciloskopovou kartou NI 5102 za použití virtuálního osciloskopu VirtualBench od společnosti National Instruments. Tento osciloskopový program umožňuje odečet časů na výstupním a vstupním signálu a také záznam dat do souboru ASCII. Jelikož ve VirtualBench nelze měnit maximální amplitudu digitalizace (jež je 10 V peak to peak) a amplituda výstupního signálu je v řádech jednotek mV, musí být výstupní signál před osciloskopem zesilován zesilovačem. Pro tento účel byl použit zesilovač Charge Amplifier Type 2635 od firmy Brüel & Kjaer, kterým je možné zesílit signál až tisíckrát při konstantní amplitudové

i frekvenční charakteristice a způsobuje otočení polarity výstupního signálu. Fotografie celého měřicího systému je na Obr. 38.

Veškerá kabeláž měřicího systému BE musí být stíněná a uzemněná pro zamezení elektrického šumu.



Obr. 38: Fotografie celého měřicího systému BE v triaxiální komoře.

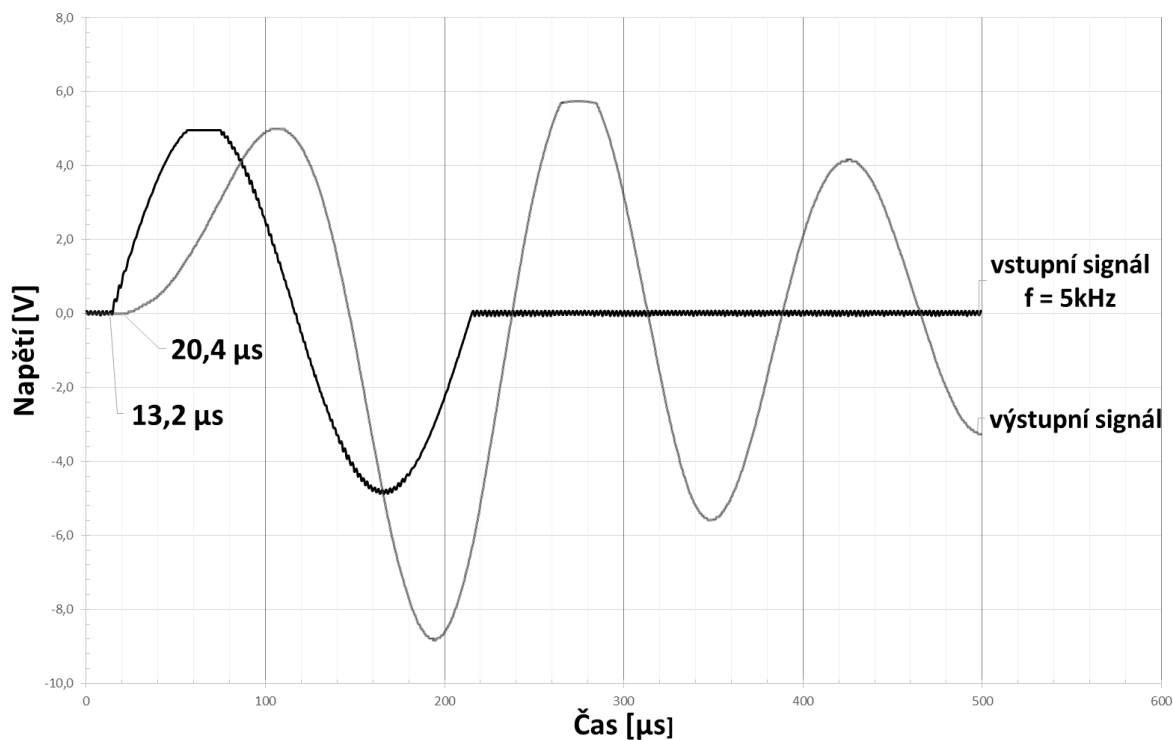
### 7.1.3 Lokální snímače deformací LVDT

Pro zpřesnění měření objemových změn vzorku byl při několika zkouškách využit také lokální snímač deformace LVDT (linear variable differential transformer) od společnosti RDP electronics umístěný v triaxiální komoře, který měřil axiální posuny horní podstavy při konsolidaci. Principem snímače je indukce, kdy je feromagnetické jádro (kovová tyčka) vlivem deformace vzorku posouváno mezi cívkami, a tím indukuje různé napětí. Dle změn výstupního napětí je pak na základě kalibrace určován posun jádra v lineárním rozsahu přijímače (který je cca 10 mm).

### 7.1.4 Kalibrace přístrojů

Všechny zkoušky a kalibrace byly prováděny v klimatizované místnosti, kde byla udržována konstantní teplota 24 °C.

Pro ověření možnosti zanedbání zpoždění mezi prvním nasazením vstupního signálu na osciloskopu a polarizací elementu (viz 3.2.3) jsem provedl měření při přímém kontaktu vysílačího a přijímacího BE při frekvenci vstupního signálu 5kHz. Odečet rozdílu času byl proveden v místě prvního nasazení vstupního a výstupního signálu. Jedná se hodnotu zpoždění přibližně 7  $\mu$ s, což odpovídá rešeršním údajům a toto zpoždění bude při měření zanedbáváno.

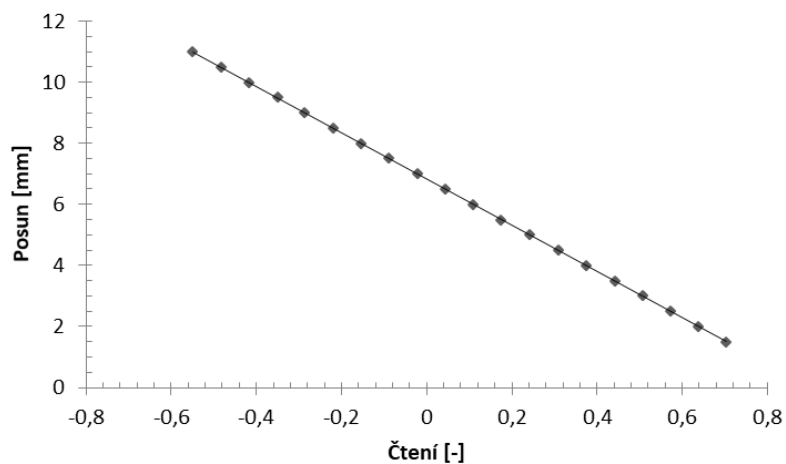


Obr. 39: Určení zpoždění vstupního signálu na osciloskopu a elektrického impulsu měřením při kontaktu vysílacího a přijímacího BE.

Před každou zkouškou jsem zcela vypustil GDS kontrolér, znovu napustil čerstvou destilovanou vodou, následně jsem vynuloval hodnotu tlaku v kontroléru při otevřené výpusti a nastavil jako nulovou referenční hodnotu tlaku atmosférický tlak v místnosti.

Porézní drenážní destičky jsem přímo před osazováním vzorku do triaxiální komory a iniciací zkoušky vyčistil v ultrazvukové čističce a následně ještě vyvařil v destilované vodě, aby byly zcela nasycené.

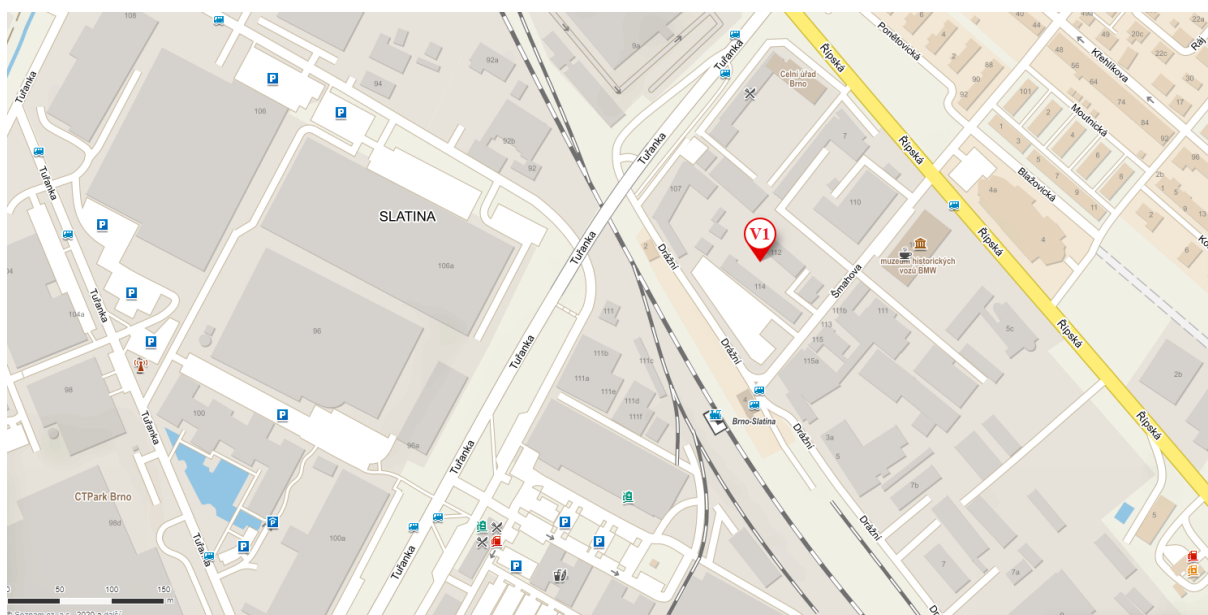
Před zkouškou jsem rovněž prováděl kalibraci LVDT snímače pomocí mikrometrického měřidla. Měřidlo má nejmenší rozlišení čtení posunu 0,01 mm. Při kalibraci je snímač LVDT pevně uchycen proti měřidlu a feromagnetické jádro je zasouváno do snímače do jednotlivých úrovní (zvolil jsem krok 0,5 mm). Na počítači se zaznamenávají čtení snímače pro každý krok. Jelikož hodnoty čtení snímače mírně oscilují i bez změny posunu jádra, je hodnota těchto čtení zprůměrována. Tímto způsobem stanovíme, jakému čtení snímače odpovídá určitá hodnota posunu, přičemž je nutné se pohybovat v lineární části křivky čtení snímače. Výstup kalibrace ve formě křivky v lineární části je vyneseno v grafu na Obr. 13. V tomto nastavení je pak možné měřit posuny v rozsahu do 10 mm.



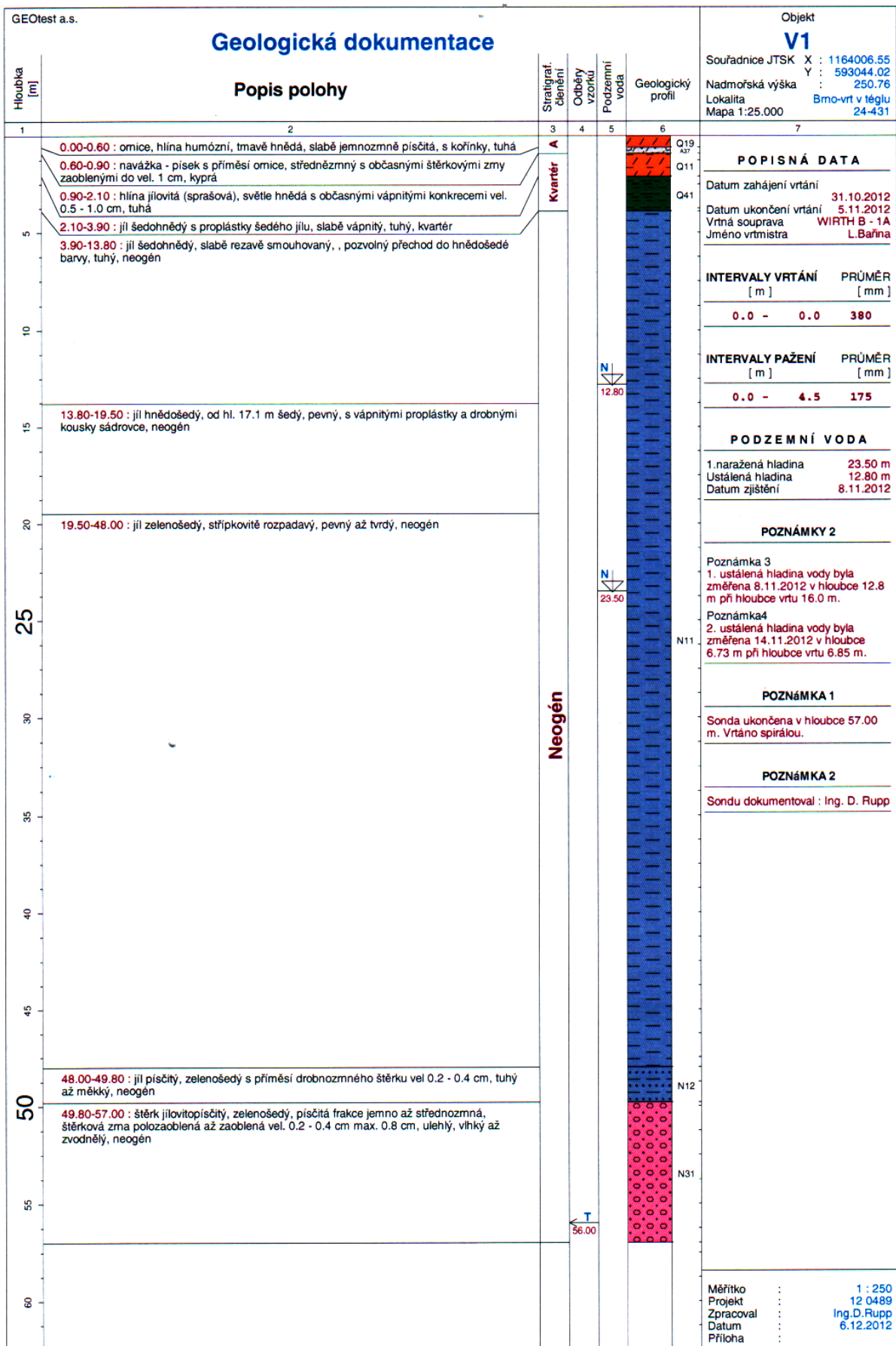
Obr. 40: Kalibrační křivka v lineární části čtení LVDT snímače.

## 7.2 Odběr a příprava vzorků

Materiál pro mé laboratorní zkoušky byl odebrán z vrtu provedeného v listopadu 2012 v areálu společnosti Geotest, a.s., na adrese Šmahova 1244/112, Brno-Slatina 62700 na souřadnicích 49.1708947°N, 16.6826144°E. Na Obr. 41 je zobrazena poloha vrtu V1 a na Obr. 42 geologická dokumentace tohoto vrtu.



Obr. 41: Místo odběru vzorků – poloha vrtu V1 (Mapy.cz, 3. 8. 2020).



Obr. 42: Geologická dokumentace vrtu V1 (Geotest, a.s., 2012).

Veškerá manipulace s materiálem vzorků během jejich přípravy probíhala v místnosti s klimatizací udržující stálou teplotu 24 °C, aby se zpomalilo jejich vysychání. Materiál, který nebyl právě zpracováván, byl vždy co nejrychleji důkladně zabalen do plastové fólie a uložen do chladničky, aby se zabránilo vysychání.

Mým cílem bylo připravit vertikálně a horizontálně orientované neporušené vzorky brněnského téglu a také rekonstituovaný vzorek připravený z téhož materiálu pro měření v triaxiální komoře.

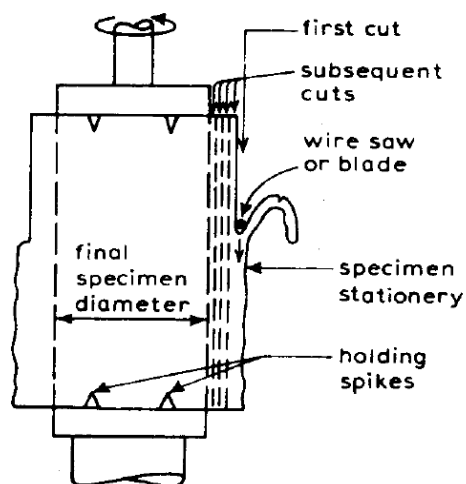
### **7.2.1 Příprava neporušených vzorků**

Vrtné jádro bylo odebráno do tenkostěnného ocelového odběráku průměru 120 mm, zabaleno do plastové fólie a přepraveno do laboratoře mechaniky zemin PŘF UK. V laboratoři jsme s kolegy studenty vrtné jádro vytlačili pomocí hydraulického lisu a nařezali drátovou pilou na válce výšky zhruba 100 mm a následně rozčtvrtili ve dvou na sobě kolmých směrech na čtyři stejné části pro přípravu vertikálně orientovaných vzorků.

Pro přípravu horizontálně orientovaných vzorků jsem válce ještě přeřízl v příčném směru na výšku 50 mm a potom pilou rozpůlil v podélném směru na dvě části stejných rozměrů.

Ideální by bylo využívat materiál pouze ze středu vrtného jádra, aby se zamezilo použití okrajových částí jádra, kde obecně hrozí větší míra porušení vrtným procesem. Vizuálně však vrtné jádro vykazovalo jen mírné poškození přímo na povrchu, nezasahující výrazně směrem ke středu. Zmíněný postup jsme zvolili pro získání co největšího možného počtu kvalitních vzorků.

Dále jsem postupoval v souladu s doporučeními dle Heada (1994) pro přípravu standardních triaxiálních vzorků. Připravené nařezané bločky materiálu jsem zkrátil do roviny na výšku přibližně 85 mm a poté osadil do aparátu (viz Obr. 43), který umožňuje uchycení vzorku v podélném směru a jeho otáčení kolem své osy, přičemž uchycení bylo provedeno tak, aby osa otáčení byla co nejbližší středu vrtného jádra – pro omezení vlivu poruch po okrajích vrtného jádra. Mezi podstavami tohoto přístroje jsou svislé kovové lišty, jež umožňují přesné vedení obráběcího nástroje (nože) a opracování do požadovaných rozměrů. Postupným otáčením a ořezáváním tenkých vrstev materiálu jsem vytvořil válečky průměru 38 mm. Tyto válečky jsem pak v ideálním případě zkrátil na přesnou délku 76 mm, čímž jsem získal standardní triaxiální vzorek průměru 38 mm a délky 76 mm. Vzorky musí být nejprve ořezány na požadovaný průměr a až potom zkráceny na požadovanou délku, aby se odstranila část porušená bodci obráběcího nástroje.



Obr. 43: Aparát pro vyřezávání triaxiálních vzorků (Head, 1994).

Samotné opracování vzorků se ukázalo jako velice problematické z důvodu velké míry rozpukání a křehkosti téglu a přítomnosti krystalů sádrovce velikosti cca od 1 mm do 15 mm. Porušení materiálu mohlo být způsobeno jak přírodními diskontinuitami, tak vlivem vrtání a uvolnění napětí nebo následné manipulace s jádrováky. Krystaly sádrovce znemožňovaly ořezávání a často došlo k poškození vzorku v důsledku vypadnutí kusu sádrovce nebo k rozpadu vlivem predisponovaných ploch. U mnoha potenciálních vzorků tak došlo v některé z fází přípravy k rozpadnutí, rozlomení nebo uštípnutí části vzorku a tyto pak již nebylo možné použít jako neporušené vzorky. Rozpukání se nejvíc vyskytovalo u vrtného jádra z hloubek větších než 37 m a tento materiál nebylo vůbec možné použít pro přípravu neporušených triaxiálních vzorků.

Celkem se mi podařilo připravit a poté osadit 7 neporušených vzorků z hloubek 7 m, 21 m, 24 m a 36 m. Vzorky nebyly vždy standardní délky (76 mm), jelikož je kvůli poškození v průběhu přípravy bylo nutné zkrátit. Konkrétní rozměry jednotlivých vzorků jsou zmíněny v další kapitole popisující zkoušky.

Jeden z připravených neporušených vzorků po ořezání je jako příklad vyfocen na Obr. 44.

U horizontálně orientovaných vzorků bylo nutné po celou dobu důsledně sledovat orientaci původní horizontální roviny, aby při zkoušce bylo možné osadit BE ve správném směru, se správnou polarizací smykových vln ( $hh$ ). Původní horizontální rovinu jsem si průběžně při manipulaci se vzorky označoval na podstavách a bocích válečků fixou nebo jemnou rýhou vytvořenou nožem.

Pro vertikálně orientované vzorky a měření vln s orientací a polarizací  $vh$  nepředstavuje nekontrolovaná rotace vzorku kolem vertikální osy problém. Zde bylo pouze nutné udržet svislou osu vzorku rovnoběžně se směrem vertikálního napětí in-situ, resp. s osou vrtu. Pro měření  $hh$  na těchto vzorcích bylo pak třeba jen určit horizontální rovinu kolmou na tuto svislici.

Pro osazení bender elementů jsem pak vyřezal modelářským nožem do každého vzorku přesnou drážku 3 mm x 12 mm, hlubokou 2 mm (resp. 3 mm), která umožnila zapuštění části BE přesahující do vzorku. Drážku jsem vytvářel vždy přesně uprostřed podstav vzorku (pro vertikální BE), nebo v polovině výšky

vzorku na stěnách vzorku (pro horizontální BE) a musela být správně orientovaná. V případě vertikálně orientovaných vzorků a měření  $vh$  nezáleželo na určení základní orientace drážky, ale musela být shodná na horní i dolní podstavě vzorku, tedy tak, aby osazené BE byly paralelně přesně proti sobě. Pro měření smykových vln  $hh$  na vertikálně orientovaných vzorcích musí být drážka (na bočních stěnách vzorku) rovnoběžná s jeho svislou osou tak, aby potom BE kmitaly rovnoběžně s horizontální rovinou.

V případě horizontálně orientovaných vzorků musí být drážka v jeho podstavách kolmá na původní horizontální rovinu opět tak, aby kmit BE byl paralelní s touto rovinou. U drážek na bocích vzorku v tomto případě nezáleží na jejich orientaci, ale z hlediska lepšího kontaktu BE se vzorkem jsem tyto drážky rovněž dělal rovnoběžné se svislou osou, stejně jako u vertikálně orientovaných vzorků.



Obr. 44: Připravený neporušený vzorek brněnského téglu (zatím bez drážek pro BE).

### 7.2.2 Příprava rekonstituovaného vzorku

Pro doplňkovou zkoušku jsem připravil také jeden rekonstituovaný vzorek.

Na jeho přípravu jsem použil zbytky a odřezky z přípravy neporušených vzorků, které jsem rozmělnil nožem a rukou na drobné kousky. Poté jsem z misky s materiálem vybral viditelné úlomky sádrovců. Od sádrovce očištěnou drť téglu jsem smíchal s destilovanou vodou a potom nechal tuto směs promíchávat v hnětači na těsto několik hodin. Během míchání jsem průběžně doléval další destilovanou vodu a vybíral případné další kousky sádrovce až do vzniku homogenní pasty s vlhkostí nad mezí tekutosti. Takto připravenou pastu jsem potom nalil do kovové trubky průměru 38 mm (odpovídající průměru standardního triaxiálního vzorku) a zatížil závažím vyvolujícím axiální napětí 100 kPa při umožnění volného odtoku vody spodkem trubky, čímž docházelo k rekonsolidaci materiálu. Rekonsolidace probíhala až do ustálení deformací. V jejím průběhu bylo třeba do trubky dolévat vodu, aby nedošlo k vyschnutí materiálu. Po skončení rekonsolidace jsem již tuhou pastu vytlačil z trubky

a vzniklý dlouhý válec zkrátil na přesnou délku 76 mm, čímž vzniknul vertikálně orientovaný rekonstituovaný vzorek standardních rozměrů pro triaxiální zkoušku.

### 7.3 Metodika a průběh triaxiálních zkoušek a měření BE

Všechny realizované zkoušky jsem uskutečnil v laboratořích mechaniky zemin PŘF UK. Ve všech případech se jednalo o standardní izotropní konsolidaci v triaxiálním přístroji popsaném v kapitole 7.1.1. Během všech zkoušek byla v místnosti pomocí klimatizace udržována stálá teplota 24 °C.

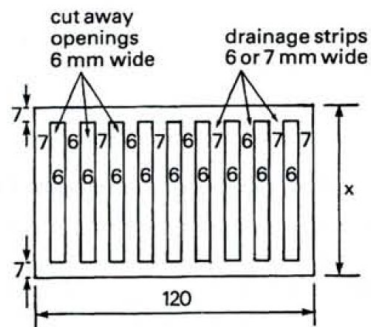
Pro všechny zkoušky jsem používal čerstvou destilovanou vodu, jak pro sycení samotného vzorku, tak pro napouštění komory. To především proto, aby se co nejvíce oddálila možná tvorba plísní a hnití vody, jelikož zkoušky měly trvání v řádech týdnů až měsíců a tento nežádoucí jev byl pozorován při předchozích zkušenostech v laboratoři.

Celkem jsem provedl sedm triaxiálních zkoušek na neporušených vzorcích a jednu na rekonstituovaném vzorku. Každá jedna celá triaxiální zkouška na určitém vzorku, od osazení vzorku do triaxiální komory až po jeho vyndání, měla trvání zhruba 2 měsíce v závislosti na počtu zatěžovacích stupňů a době konsolidace v každém zatěžovacím stupni. Samotná konsolidace v každém stupni trvala přibližně týden. Přímo před osazováním neporušených vzorků do triaxiální komory jsem vyřezal drážky pro zapuštění BE (viz 7.2.1). Drážky jsem těsně před osazováním naplnil pastou z rekonstituovaného téglu a zarovnal s povrchem vzorku. Do vzorku přesahující části BE jsem pak při osazování zatlačil do drážky vyplněné rekonstituovaným materiálem, což mělo přispět k co nejlepšímu kontaktu mezi BE a vzorkem.

Bender elementy byly osazovány tak, aby v daném páru byly orientované přesně paralelně proti sobě. Při měření rychlosti vln ve směru  $hh$  byly orientovány tak, aby jejich podélná hrana byla kolmo na horizontální rovinu vzhledem k původnímu uložení vzorku, tedy paralelně s osou vrtu. U horizontálních BE pak byla jejich podélná hrana vždy rovnoběžně s podélnou osou vzorku.

Vzorek jsem zvažil a změřil jeho výšku a průměr posuvným měřidlem. Vždy jsem prováděl šest měření výšky a devět měření průměru na různých místech. Výsledný průměr a výška jsou zprůměrovaná hodnota jednotlivých měření.

Poté jsem na horní i dolní podstavy a plášť vzorku umístil mírně navlhčený filtrační papír, který se používá u zemin s nízkou propustností a má urychlovat konsolidaci dle doporučení manuálu Head (1998). Z filtračního papíru byly vyřezány podle šablony proužky tak, aby nepokrýval více než 50 % pláště vzorku způsobem vyobrazeným na Obr. 45. Ve filtračním papíru na podstavách jsem musel předem vyříznout díru umožňující prostup bender elementu.



Obr. 45: Způsob vyřezání drenážního filtračního papíru na plášti vzorku (Head, 1998).

V průběhu této manipulace se vzorkem bylo nutné stále sledovat jeho orientaci, resp. nyní už především orientaci připravených drážek, kterou jsem si nakonec poznačil na filtrační papír. Následně jsem na vzorek umístil nepropustnou latexovou membránu, na podstavy triaxiální komory jsem uložil připravené drenážní destičky a vzorek ve správné orientaci osadil do triaxiální komory. Latexovou membránu jsem poté utěsnil na horní a dolní podstavě dvěma O-kroužky, čímž se vodotěsně izolovalo prostředí vzorku a komory. Před samotným osazením vzorku jsem odvědušnil celý systém komory propláchnutím všech hadiček a vývodů vody.

Potom jsem triaxiální komoru uzavřel, napustil vodou a ihned aplikoval komorový tlak navýšený o hodnotu sytícího tlaku ve vzorku a zatížil vzorek určeným efektivním napětím, aby se zabránilo případnému bobtnání vzorku při kontaktu s vodou. Počáteční sytící tlak ve vzorku byl vždy nastaven na hodnotu 10 kPa. Hodnota sytícího tlaku je uvažována jako hodnota pórového tlaku ve vzorku. Efektivní napětí působící izotropně na vzorek je tak rovno rozdílu komorového a sytícího tlaku.

Pro dosažení nasycení vzorku byl následně postupně zvyšován sytící tlak na hodnotu 300 kPa, resp. 500 kPa za současného zvyšování komorového tlaku stejnou rychlostí pomocí GDS kontrolérů (funkce RAMP), tak aby zůstala zachována stejná hodnota efektivního napětí. Nejprve jsem zvolil sytící tlak 300 kPa, ale na základě zkušeností kolegy Mohyly (2014), který měřil i nasycení obdobných vzorků téglu, jsem při dalších zkouškách upravil hodnotu sytícího tlaku na 500 kPa.

Po syčení vzorku po určitou dobu pak byl zvyšován komorový tlak na hodnotu určených efektivních napětí v jednotlivých zatěžovacích stupních a umožněna konsolidace až do ustálení deformací.

Po doběhnutí konsolidace a provedení měření v určeném posledním zatěžovacím stupni jsem zkoušku ukončil, vypustil vodu, vyjmul vzorek z triaxiální komory, zbavil membrány a filtračního papíru, změřil stejným postupem jako před zkouškou a zvážil. Následně jsem ho nechal vysušit v peci po dobu 24 hodin při 109 °C a poté opět zvážil pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a čísla pórovitosti.

Přesný průběh zkoušek na jednotlivých vzorcích je popsán v dalších částech této kapitoly.

### 7.3.1 Použití horizontálních BE a LVDT

Použití dalšího páru horizontálních bender elementů nebylo v době provádění mých experimentů prozatím na PřF UK nikdy dříve zkoušeno a jedná se tak o první nasazení této metody pro testování zemin na PřF UK.

Při zkouškách, kde jsem využíval zároveň i horizontální bender elementy, bylo velice problematické jejich osazování v kombinaci s nasazením membrány. Membránu bylo nutné perforovat průbojníkem, aby skrz ní bylo možné prostrčit BE a umožnit tak jeho kontakt se vzorkem. Následně bylo nutné perforaci opět utěsnit. Pro utěsnění jsem po prostrčení BE v zelené gumě vytáhl „rukávek“ membrány z okolí perforace, který jsem přetáhl co nejdále přes těleso bender elementu. Membránu jsem na styku s gumou podlepil lepidlem na neopren, které se ukázalo jako nejlépe spojující oba materiály. Přes „rukávek“ jsem následně nasadil O-kroužek zajišťující jeho přilnutí k tělesu bender elementu. Celý spoj včetně O-kroužku jsem poté ještě oblepil akvaristickým silikonem. Další O-kroužek jsem pak přidal ještě jako pojistku pro utěsnění zelené gumy na BE a pro zajištění držáku BE (viz dále).

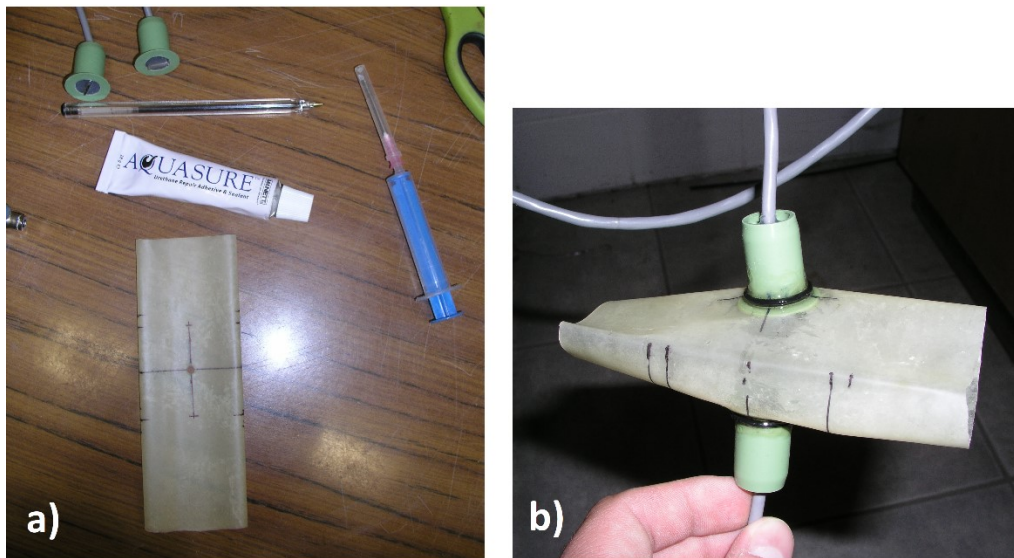
U několika prvotních vzorků jsem se pokoušel nejprve osadit vzorek v perforované membráně na podstavu triaxiální komory a až poté prostrčit a přilepit bender elementy. Během těchto pokusů došlo k destrukci několika jinak již zcela připravených vzorků. Přítlak hran BE proti sobě směrem do vzorku při manipulaci s membránou během utěšňování způsobil rozšípnutí vzorku a ten již nebyl použitelný.

U dalších vzorků jsem aplikoval odlišný postup, kdy jsem nejprve prostrčil BE perforací a utěsnil, a až následně do membrány vpravil vzorek. To znamenalo, že jsem si předem na membránu musel přesně zakreslit rozměry budoucího vzorku a orientaci bender elementů (viz Obr. 46a), které pak bylo nutné v této orientaci přilepit a nechat dostatečně dlouho (alespoň do druhého dne) zaschnout lepidlo a silikon. Výsledek je patrný na fotografii na Obr. 46b. Až poté jsem mohl přistoupit k osazení vzorku do komory a navlékání připravené membrány s BE. Pro osazování pak bylo třeba asistence více lidí, kteří přidržovali jednotlivé části komory a vzorek za současného opatrného roztahování a navlékání membrány.

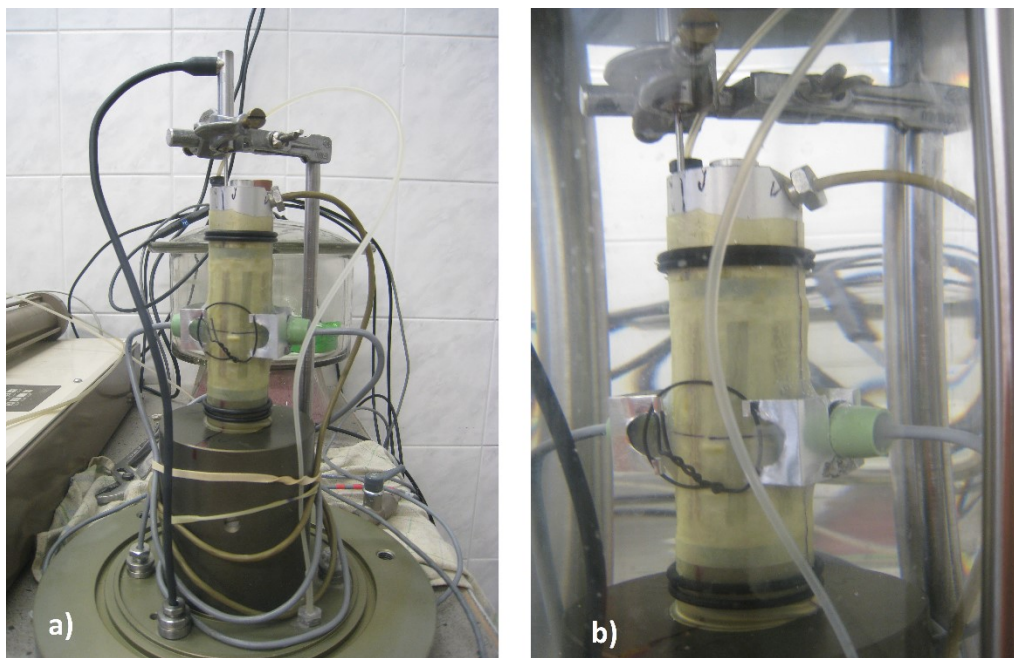
Pro lepší přichycení horizontálních BE ke vzorku a jejich udržení ve správné pozici jsem si vyrobil ze slabého plechu držák, který se nasadil na těleso BE na každé straně vzorku. Následným utažením smyčky z drátku se docílilo rovnoměrného přilnutí bender elementů ke vzorku ve správné poloze.

Pro zpřesnění znalosti o rozměrech vzorku v průběhu zkoušky jsem při dvou posledních zkouškách použil jeden snímač lokální deformace LVDT. Ten jsem připevnil pomocí laboratorního držáku uchyceného do báze komory nad horní podstavu. Jádru snímače tak bylo v přímém kontaktu s horní podstavou a při stlačování vzorku se vysouvalo směrem dolů. Tímto způsobem snímač měřil axiální deformace při konsolidaci a nebylo nutné vycházet pouze z objemových změn měřených GDS kontrolérem, resp. bylo možné srovnat aktuální rozměry stanovené z měření podle kontroléru a podle snímače. To přispělo k větší jistotě v určení aktuálních rozměrů vzorku při měření BE v každém zatěžovacím stupni.

Na Obr. 47a je vyfocen jako příklad kompletně osazený neporušený vzorek s vertikálními BE v podstavcích a horizontálními BE po stranách vzorku uchycenými pomocí držáku, včetně snímače LVDT pro měření axiální deformace vzorku před uzavřením triaxiální komory a zahájením zkoušky. Na Obr. 47b je pak detailní fotografie stejného vzorku po uzavření a napuštění komory vodou. Na Obr. 48 je pak vyfocen vzorek v triaxiální komoře osazený pouze párem vertikálních bender elementů v podstavcích komory.



Obr. 46: a) Perforovaná membrána se zakreslenou orientací budoucího vzorku a BE; b) Membrána s přilepenými horizontálními BE a utěsněnou perforací.



Obr. 47: a) Kompletně osazený neporušený vzorek téglu před uzavřením komory s vertikálními a horizontálními BE upevněnými pomocí držáku, včetně snímače LVDT pro měření axiální deformace vzorku; b) Detail kompletně osazeného vzorku téglu v již napuštěné triaxiální komoře.



Obr. 48: Neporušený vzorek téglu v triaxiální komoře osazený pouze vertikálními BE.

### 7.3.2 Měření BE při vlastních triaxiálních zkouškách

Jako vzdálenost šíření smykové vlny jsem uvažoval přímou vzdálenost mezi konci bender elementů (viz. kapitola 3). Proto bylo vždy nutné od rozměru vzorku ve směru prozařování odečíst délku přesahujících konců BE, která je v součtu u vertikálních bender elementů 3,6 mm (pro jeden BE z páru 1,8 mm) a u horizontálních 5,4 mm (pro jeden BE z páru 2,7 mm). Rychlost smykové vlny  $v_s$  (buďto ve směru  $hh$ , nebo  $vh$ ) jsem pak počítal na základě vztahu:

$$v_s = \frac{L - L_{BE}}{t} \quad (7.2),$$

kde  $L$  je aktuální rozměr vzorku (výška, nebo průměr podle typu osazených BE),  $L_{BE}$  je součet délek volných konců BE přesahujících do vzorku a  $t$  je stanovený čas průchodu smykové vlny.

Ze stanovené rychlosti smykové vlny jsem potom s užitím aktuální objemové hmotnosti saturované zeminy  $\rho_{sat}$  počítal hodnoty  $G_{vh}$  a  $G_{hh}$  podle vztahů (7.3) nebo (7.4).

$$G_{vh} = \rho_{sat} \cdot v_{vh}^2 \quad (7.3)$$

$$G_{hh} = \rho_{sat} \cdot v_{hh}^2 \quad (7.4)$$

Při měření bender elementy jsem věnoval pozornost určení aktuálních rozměrů a objemové hmotnosti vzorku, aby stanovená rychlost průchodu vlny dle vztahu (7.2) a smykový modul dle vztahů (7.3) a (7.4) reflektovaly co nejlépe aktuální skutečný stav, ve kterém se vzorek nachází.

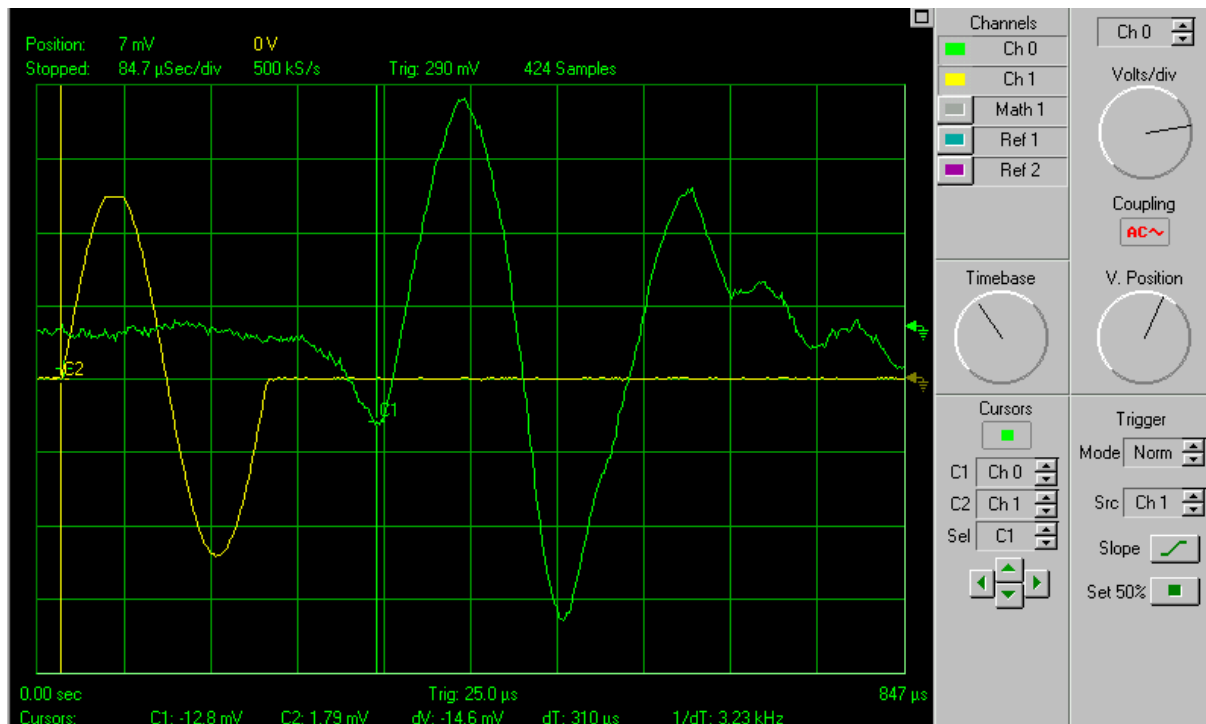
Pro určení aktuálních rozměrů jsem vycházel z objemových změn (objemu vody vytlačené ze vzorku při konsolidaci) zaznamenaných GDS kontrolérem. Ze známé změny objemu v každém konsolidačním stupni jsem pak dopočítal aktuální výšku a průměr vzorku při uvažování poměru axiálního a radiálního přetvoření hodnoty 0,6 pro izotropní konsolidaci dle experimentálních dat z měření deformací pomocí LVDT na téglu dle Rott et al. (2015). Výpočet probíhal na základě vztahu (7.5) pro invariant tenzoru přetvoření při zjednodušení pro axisymetrický stav v triaxiální komoře, kde  $\varepsilon_v$  je objemové přetvoření,  $\varepsilon_a$  je axiální přetvoření a  $\varepsilon_r$  je radiální přetvoření.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r \quad (7.5)$$

Při sycení vzorku však není možné jednoznačně stanovit změny rozměrů vzorku, jelikož GDS kontrolér dotuje vzorek vodou pro dosažení nasycení. Objemové změny, které kontrolér vykazuje, jsou nejednoznačnou hodnotou mezi objemem vody dodané do vzorku a vody ze vzorku vytlačené během rekonsolidace při iniciálním efektivním napětí. U neporušených vzorků lze předpokládat určité objemové změny v důsledku jejich vyjmutí z přirozeného prostředí a stejně tak při jejich rekonsolidaci na původní napětí. Z důvodu popsaného výše však není možné tyto změny spolehlivě určit pomocí GDS kontroléru. S ohledem na konzistenci vzorků (pevná až tvrdá) lze předpokládat pouze velmi malé objemové změny během sycení. Pro potřeby vlastních zkoušek jsem dále uvažoval počáteční rozměry vzorku po sycení a rekonsolidaci stejné jako z měření posuvným měřidlem před osazením do komory. Objemovou hmotnost saturevané zeminy  $\rho_{sat}$  jsem rovněž aktualizoval pro výpočty smykového modulu v každém zatěžovacím kroku. Její výpočet probíhal na základě aktuálních rozměrů a pórovitosti, stanovené ze známé hmotnosti suchého vzorku při užití zdánlivé specifické objemové hmotnosti téglu  $\rho_s = 2660 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  dle Svobody (2010).

Pro zjišťování času průchodu smykové vlny  $t$  jsem využíval metodu interpretace signálů v časové oblasti s odečtem času v místě prvního nasazení (viz kapitola 3.2.1). Tuto metodu jsem zvolil jako pravděpodobně nejspolehlivější dle informací z literatury a v rámci práce v laboratoři nejlépe proveditelnou. Během každého měření jsem pro vstupní signál používal sinový puls s amplitudou budicího napětí 10 V frekvence 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 a 20 kHz s účelem pozorování vlivu zvolené frekvence na zkreslení výstupního seismogramu a potom volby vhodné frekvence umožňující odečet času. Odečtení času příchodu smykové vlny znamená nalezení místa ve výstupním signálu, kde dochází k prvnímu nasazení. Vzhledem k tuhosti materiálu a velikosti vzorků bylo prakticky vždy nutné provádět odečet času v blízké zóně, přičemž při vyšších frekvencích byl výstupní signál ovlivněn „overshootingem“, který odečet času znemožňoval (dále viz kapitola 7.4.1) Na základě pokusných měření při výše zmíněných frekvencích jsem pak zvolil frekvence dobře umožňující odečet času, který byl potom zahrnut do výpočtů. Jako místo prvního nasazení pro odečet času ze signálu ovlivněného efektem blízké zóny jsem uvažoval bod B (viz Obr. 11), tedy místo prvního lokálního maxima dominantní vlny registrované ve výstupním signálu. Odečet časů průchodu smykové vlny jsem prováděl přímo na obrazovce osciloskopu. Příklad signálů na osciloskopu a odečet času jsou zobrazeny na Obr.

49. Výstupní signál musel být vhodným způsobem zesílen a posunut po vertikální ose (napětí) tak, aby bylo možné provést toto přímé vizuální srovnání. Na osciloskopu se pro odečet času umístí první měřící bod do místa prvního nasazení vstupního signálu a druhý měřící bod do místa prvního nasazení výstupního signálu. Čas průchodu smykové vlny je pak dán rozdílem času  $\Delta t$  mezi těmito dvěma body.



Obr. 49: Příklad zobrazení vstupního (žlutě) a výstupního (zeleně) signálu a odečet času průchodu smykové vlny na obrazovce osciloskopu při měření BE.

### 7.3.3 Průběh jednotlivých zkoušek

Označení zkoušek, resp. vzorků je kódováno pro snadnější orientaci v interpretovaných výsledcích. První číslo značí číslo vzorku, zkratka vyjadřuje orientaci vzorku spolu se směry měřených smykových vln a rovněž použitý typ BE. Číslo na konci značí hloubku odběru vzorku.

Zkratka „Vert“ znamená vertikálně orientovaný vzorek osazený vertikálními BE pro stanovení  $G_{vh}$ .

Zkratka „Hor“ je pro horizontálně orientovaný vzorek osazený vertikálními BE pro stanovení  $G_{hh}$ .

Zkratka „VrHr“ značí vertikálně orientovaný vzorek osazený vertikálními BE pro stanovení  $G_{vh}$  a zároveň osazený i horizontálními BE pro stanovení  $G_{hh}$ .

Zkratka „HrVr“ vyjadřuje horizontálně orientovaný vzorek osazený vertikálními BE pro stanovení  $G_{hh}$  a zároveň osazený i horizontálními BE pro stanovení  $G_{vh}$ .

Například zkouška/vzorek s označením „5HrVr21m“ značí pátý zkoušený neporušený horizontálně orientovaný vzorek z hloubky 21 m osazený vertikálními bender elementy pro zjišťování hodnoty  $G_{hh}$  i horizontálními bender elementy pro zjišťování  $G_{vh}$ .

Jediný rekonstituovaný vzorek je označen „Rek1“.

Podmínky a konkrétní postup a nastavení jednotlivých zkoušek jsou shrnuty v tabulce Tab. 10 spolu s počátečními rozměry a stavem vzorků.

Vzorek	1Hor7m	2VrHr36m		3Hor36m	4Vert24m	5HrVr21m		6HrVr21m		7VrHr24m		Rek1
<b>Orientace vzorku</b>	hor.	ver.		hor.	ver.	hor.		hor.		ver.		ver.
<b>Hloubka</b>	7 m	36 m		36 m	24 m	21 m		21 m		24 m		-
<b>Rozměry [mm] d x h</b>	38,71 x 77,80	37,42 x 55,61		38,66 x 31,28	37,10 x 68,44	37,10 x 76,10		36,50 x 76,30		35,70 x 54,10		37,53 x 76,13
$\rho_d$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	1378	1483		1422	1472	1485		1440		1493		1179
w [%]	35,56	29,5		29,2	29,5	29,5		32,1		29,7		42,6
e [-]	0,93	0,83		0,87	0,81	0,79		0,85		0,78		1,21
<b>Měření deformací</b>	GDS	GDS		GDS	GDS	GDS		GDS + LVDT		GDS + LVDT		GDS
<b>Osazené BE</b>	ver.	ver.	hor.	ver.	ver.	ver.	hor.	ver.	hor.	ver.	hor.	ver.
<b>Měření G</b>	G <sub>hh</sub>	G <sub>vh</sub>	G <sub>hh</sub>	G <sub>hh</sub>	G <sub>vh</sub>	G <sub>hh</sub>	G <sub>vh</sub>	G <sub>hh</sub>	G <sub>vh</sub>	G <sub>vh</sub>	G <sub>hh</sub>	G <sub>vh</sub>
<b>Sytící tlak [kPa] (dny)</b>	300 (6)	50 (5)		300 (24)	500 (10)	500 (5)		500 (7)		500 (6)		300 (4)
<b>Počáteční p' [kPa]</b>	50	50		370	300	285		290		300		100
<b>Zatěžovací kroky p' [kPa] (izotropní kons.)</b>	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000	100, 200		470, 570, 670, 770, 870, 970, 1070, 1170	400, 500, 600, 700, 800, 900	385, 485, 585, 685, 785		390, 490		400, 500, 600, 700, 800		200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900,

Tab. 10: Shrnutí postupu jednotlivých zkoušek prováděných na vzorcích téglu.

U všech zkoušek byl po osazení proveden RAMP (postupné navyšování komorového a sytícího tlaku) rychlostí 1kPa/50s za udržování stálého efektivního napětí. Pouze u rekonstituovaného vzorku jsem zvolil rychlost 1kPa/20s.

Při zkoušce na vzorku 2VrHr36m jsem hned v počátku při sycení pozoroval vykapávání vody z komory přímo skrz kabely vedoucí k horizontálním bender elementům. Kvůli netěsnostem jsem zvolil RAMP rychlostí 1kPa/50sec na sytící tlak pouze 50 kPa a komorový tlak 100 kPa, tedy při udržování stálého efektivního napětí 50 kPa. Vzorek se poté sytil 5 dní. Kvůli nízkému počátečnímu napětí došlo k bobtnání, jeho určení z objemových měření GDS kontrolérů není jednoznačné, ale rozměry vzorku po zkoušce byly větší než na začátku. Vzhledem k nízkému sytícímu tlaku vzorek zřejmě nebyl nasycený. Kvůli netěsnosti jsem pokusně navýšil efektivní napětí ve dvou zatěžovacích krocích na 100 kPa a 200 kPa a provedl pokusná měření. Poté byla zkouška ukončena.

Data z této zkoušky vzhledem k problémům s průsaky a nemožnosti sycení pravděpodobně nejsou relevantní. Po této zkoušce bylo nutné opravit kabeláž, ve které byla voda a znovu zajistit těsnost BE.

U ostatních interpretovaných zkoušek jsem žádné průsaky ani tečení nepozoroval.

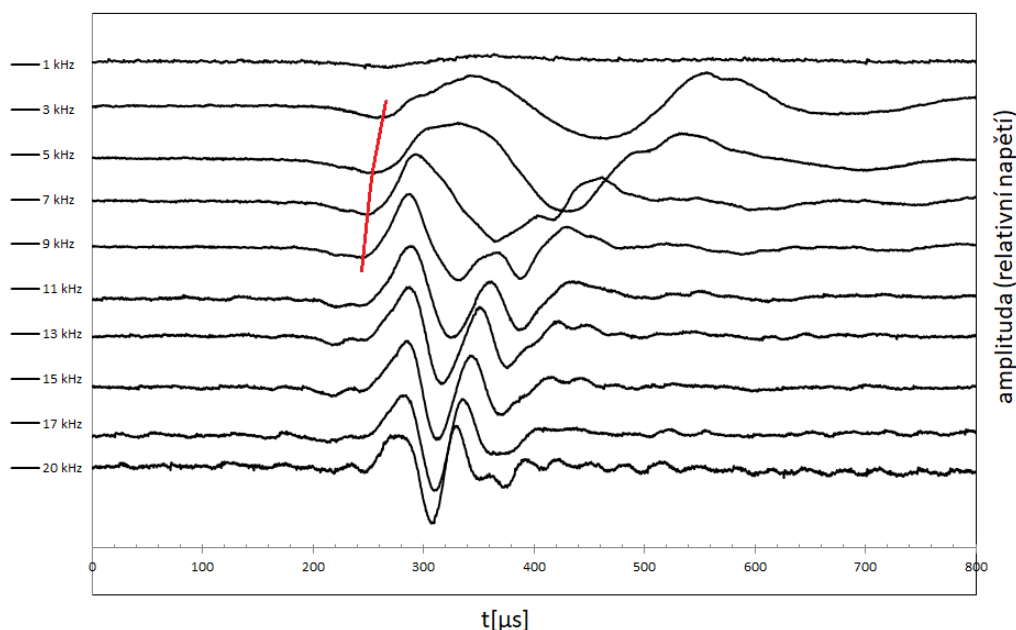
Rovněž k bobtnání došlo pouze u vzorku 2VrHr36m, u dalších zkoušek nikoliv, naopak ostatní vzorky spíše mírně konsolidovaly, což bylo podpořeno i měřením LVDT snímačem.

Snímač LVDT měřící deformaci v podélném směru vzorku směru byl osazen u zkoušky 6HrVr21m, kde měřil v podstatě horizontální přetvoření vztaheno k původnímu uložení vzorku. U zkoušky 7VrHr24m snímač měřil deformaci skutečně ve vertikálním směru vzhledem k původnímu uložení vzorku in-situ. Jako doplňkové měření jsem realizoval i jednu zkoušku na rekonstituovaném vzorku rekonsolidovaném při 100 kPa. Pomocí vertikálních BE v podstavách komory se měřila rychlost smykových vln ve směru  $vh$  a nezáleželo na jejich orientaci. Pro bender elementy v tomto případě nebylo nutné vytvářet drážku, jelikož bylo možné jejich přečnívající konce do vzorku přímo zatlačit. Původním plánem bylo osazení i páru horizontálních BE na boční stěny vzorku pro případné ověřování získané anizotropie a především korektnosti měření horizontálním párem BE. Horizontální pár BE se ale ani po několika pokusech nepodařilo osadit, jelikož při natahování membrány s BE došlo vždy k poškození vzorku.

## 7.4 Výsledky měření a diskuze

### 7.4.1 Odečet času průchodu smykové vlny

Jak je již zmíněno výše, při každém měření jsem využíval frekvence vstupního signálu 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 a 20 kHz. Pro všechny frekvence se ve většině případů projevoval efekt blízké zóny a čas průchodu tak bylo nutné odečítat v místě první lokální amplitudy dominantní vlny. Při frekvenci 1 kHz bylo první lokální maximum obvykle málo zřetelné a jeho určení nejednoznačné. V případě frekvencí vyšších než 10 kHz (resp. vyšších než používaných 11 kHz) se většinou začal projevovat „overshooting“ a nebylo možné určit místo prvního nasazení. Příklad seismogramu z kombinace výstupních signálů odpovídající vstupním signálům různých frekvencí je uveden na Obr. 50. Frekvence vstupního signálu 3, 5, 7, 9 kHz se ukázaly jako nejvhodnější a umožňovaly poměrně snadný a jednoznačný odečet času průchodu smykové vlny na obrazovce osciloskopu při všech měřeních. Kvůli jednotnosti výsledků tak byly časy průchodu  $t$  užití ve výpočtech odečítány vždy pro tyto čtyři frekvence a hodnoty zprůměrovány.

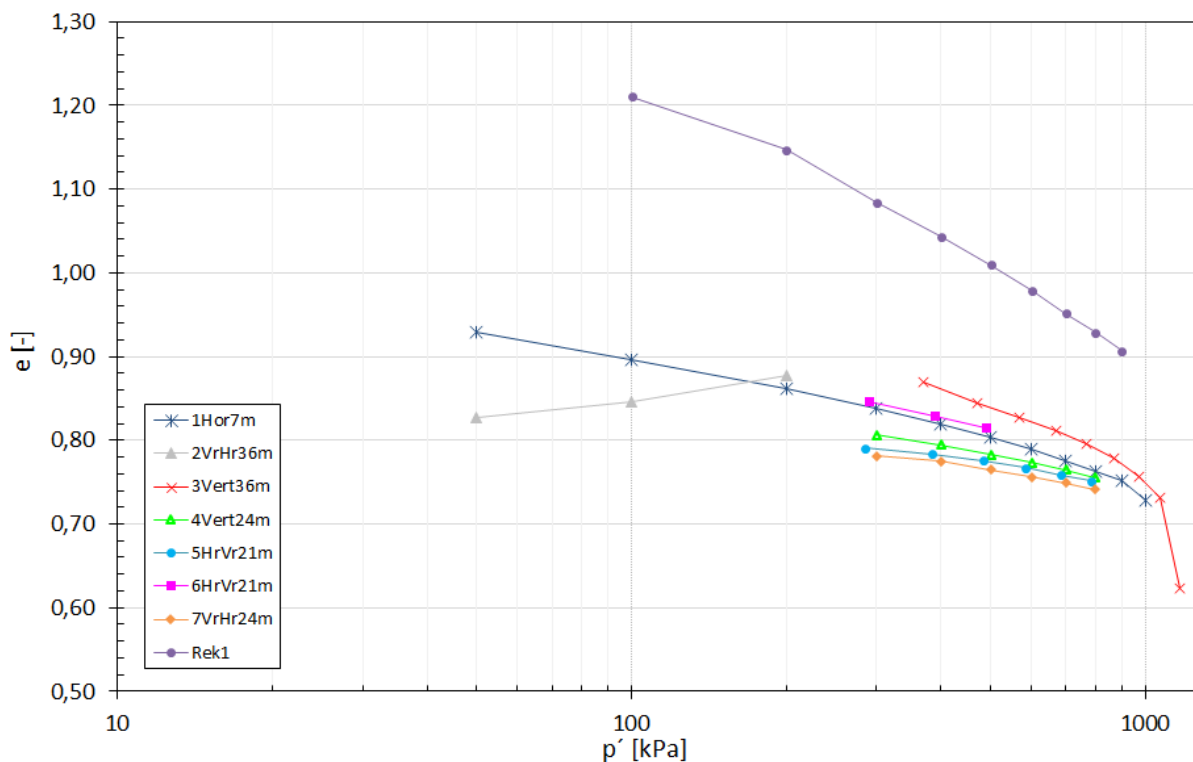


Obr. 50: Příklad normovaných a synchronizovaných výstupních signálů; červená čára je určené místo prvního nasazení pro odečet průchodu smykové vlny při vstupních signálech 3, 5, 7, 9 kHz (5HrVr21m,  $p' = 285 \text{ kPa}$ ).

#### 7.4.2 Stanovení vzdálenosti průchodu smykové vlny

Při stanovování co nejpřesnější vzdálenosti šíření smykové vlny jsem vycházel z objemových změn a měření snímačem LVDT. Po srovnání se ukázalo, že obě metody poskytují poměrně obdobné výsledky a vzhledem k poměrně malým deformacím během konsolidace rozdíly změn rozměrů vzorku ovlivňují výsledné smykové moduly v poměrně malé míře. Průměrná relativní odchylka vypočtených modulů při uvažování změny délky a průměru vzorku (vzdálenosti šíření vlny) z obou způsobů byla přibližně 1,5 % a největší přibližně 8 %. Vzhledem k tomu, že snímač LVDT neměřil deformace přímo na vzorku, ale na horní podstavě komory, nebyla přetvoření oproštěna od vlivu dosedání rozhraní. Změřené hodnoty tak neudávaly přesné změny rozměrů vzorku. Pro stanovení stupně anizotropie je podstatné především zachování konzistentního postupu a měření pro stanovení smykových modulů, jelikož se jedná o jejich poměr. Uplatnění jedné nebo druhé metody pro každou zkoušku vede pak v podstatě k posunu absolutních hodnot  $G$  jedním, nebo druhým směrem, přičemž jejich poměr je relativně zachován. Jelikož snímač LVDT byl osazen jenom u zkoušek 6HrVr21m a 7VrHr24m, vycházejí všechny prezentované výsledky pro zachování jednotnosti postupu ze stanovení deformací a změn vzdálenosti průchodu smykové vlny na základě objemových změn a objemových přetvoření podle záznamu objemu vody zaznamenané GDS kontroléry.

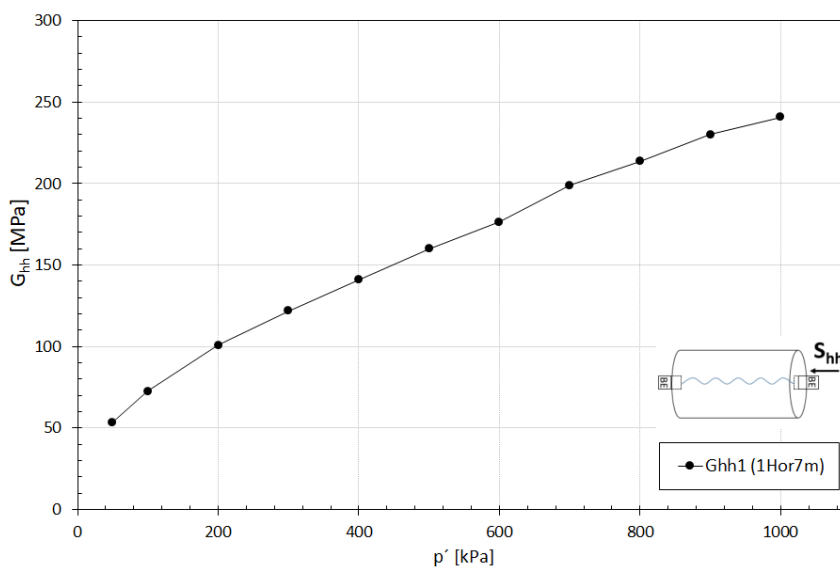
Z určených aktuálních rozměrů bylo potom možné stanovit čísla pórovitosti po konsolidaci v jednotlivých napěťových krocích pro každý vzorek a stanovit křivky izotropní stlačitelnosti charakterizující stav materiálu při jednotlivých měřeních bender elementy. Tyto křivky stlačitelnosti jsou vyneseny na Obr. 51.



Obr. 51: Křivky izotropní stlačitelnosti pro jednotlivé vzorky.

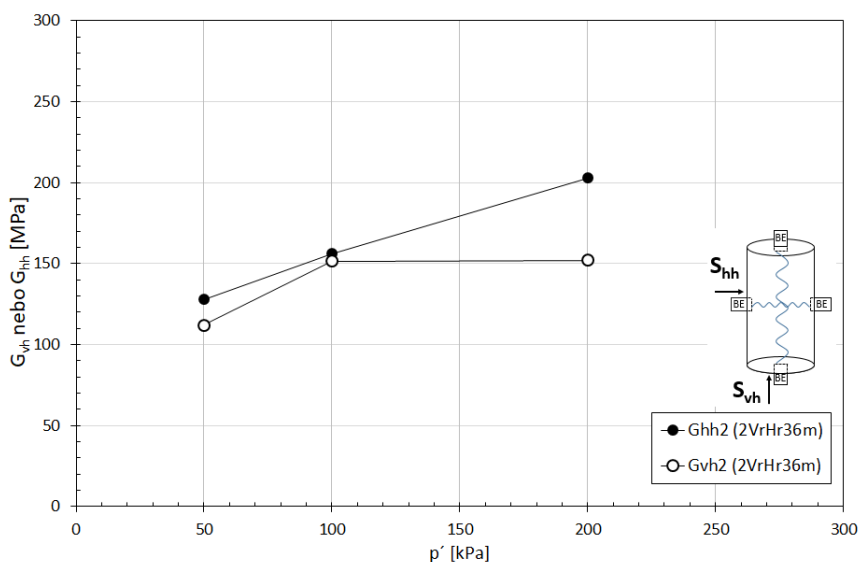
### 7.4.3 Smykové moduly a anizotropie tuhosti z jednotlivých zkoušek

Stanovené hodnoty smykového modulu  $G_{hh}$  na vzorku 1Hor7m jsou vyneseny v grafu na Obr. 52. Dle očekávání docházelo k nárůstu tuhosti s rostoucím efektivním napětím a jeho hodnoty se pohybovaly v rozmezí 50 MPa až 250 MPa. Jedná se o hodnoty nižší, než jsem pro tégлы očekával. Vzorek byl z poměrně malé hloubky a při jeho zpracování bylo možné pozorovat měkčí konzistenci a při zkoušce poměrně velkou stlačitelnost (nižší tuhost).



Obr. 52: Smykový modulu  $G_{hh}$  z měření BE na neporušeném vzorku 1Hor7m v závislosti na  $p'$ .

Výsledky z měření smykových modulů  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  na vzorku 2VrHr36m v závislosti na středním efektivním napětí jsou zobrazeny v grafu na Obr. 53. Jak již bylo zmíněno v přechozí kapitole, hned v iniciální fázi zkoušky došlo netěsnosti měřicího systému a vytékání vody z komory přímo skrz kabely vedoucí k horizontálním bender elementům. I přes tento problém bylo možné změřit rychlosti smykových vln a stanovit hodnoty smykových modulů. Jak je však z grafu patrné, poškození mělo na funkci BE zřejmě podstatný vliv a trend vývoje tuhosti s napětím nebyl srovnatelný s výsledky ostatních zkoušek. Výsledná hodnota  $G_{hh}$  se z měření jevila jako konstantní při zatížení z 50 kPa na 100 kPa a hodnota  $G_{vh}$  naopak byla neměnná při změně napětí ze 100 kPa na 200 kPa. Hodnoty stupně anizotropie určené na tomto vzorku společně s odpovídajícími smykovými moduly jsou zaneseny do Tab. 11. Výsledky nepovažuji za spolehlivé kvůli pravděpodobnému poškození BE a tyto nebudou dále uvažovány.  $\alpha_G = 1,03$  při 100 kPa a odpovídající moduly pak jistě poukazuje na nesprávnost měření z důvodu poruchy měřicího systému.

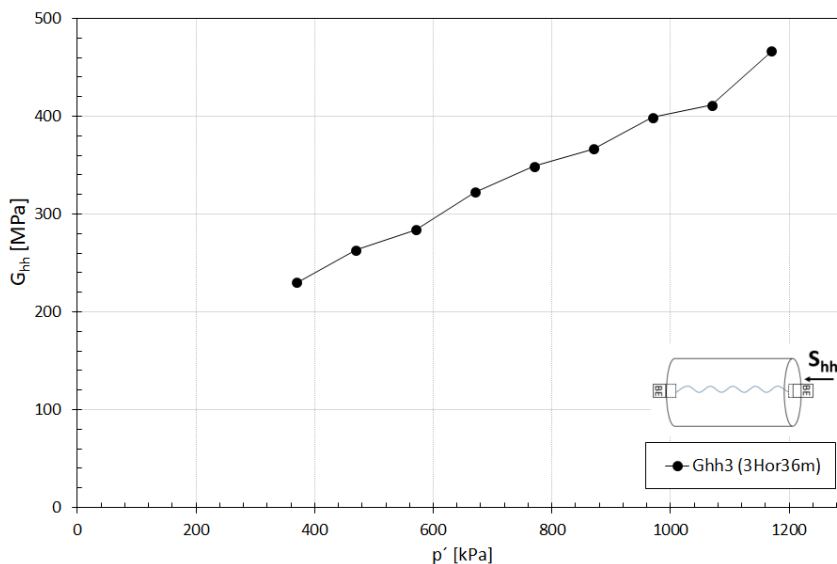


Obr. 53: Smykové moduly  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z měření BE na neporušeném vzorku 2VrHr36m v závislosti na  $p'$ ; poškozené BE.

$p'$ [kPa]	$G_{hh}$ [MPa]	$G_{vh}$ [MPa]	$\alpha_G$ [-]
50	128	112	1,14
100	156	151	1,03
200	203	152	1,33

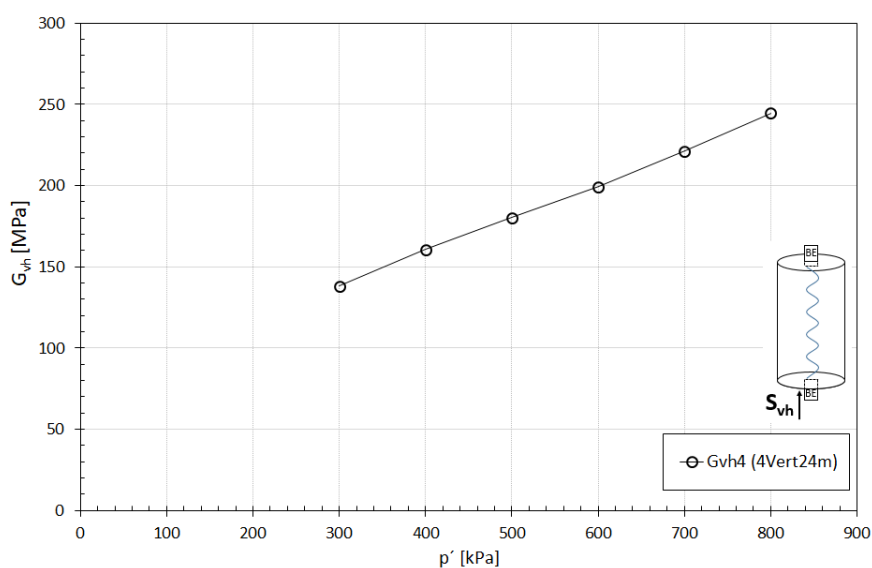
Tab. 11: Stupeň anizotropie  $\alpha_G$  z poměru  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  stanovených BE na vzorku 2VrHr36m; nespolehlivé kvůli poškození BE.

Smykové moduly  $G_{hh}$  stanovené z měření vertikálními BE na neporušeném horizontálně orientovaném vzorku 3Hor36m, vynesené v grafu na Obr. 54, odpovídají předpokládaným hodnotám. Vykazují výraznou a poměrně lineární závislost na středním napětí. Pro napětí 370 kPa až 1170 kPa se pohybují v rozmezí 230 až 467 MPa.



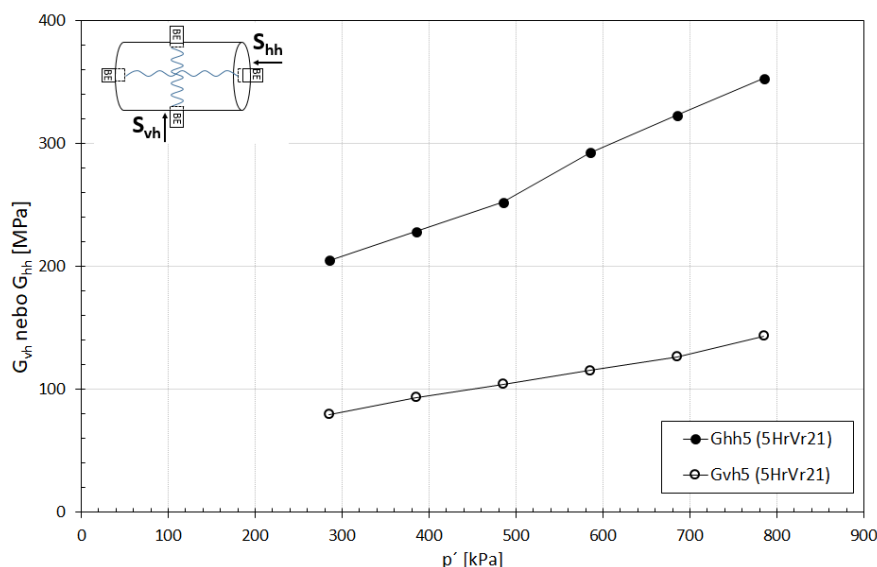
Obr. 54: Smykový modul  $G_{hh}$  z měření BE na neporušeném vzorku 3Hor36m v závislosti na  $p'$ .

Na Obr. 55 jsou znázorněny hodnoty  $G_{vh}$  stanovené na vertikálně orientovaném vzorku 4Vert24m pomocí vertikálních BE. Tyto hodnoty dobře odpovídají očekávaným smykovým modulům ve vertikálním směru, v rozmezí 138 MPa až 243 MPa pro obor středního napětí 300 až 800 kPa a jsou znatelně nižší než  $G_{hh}$  stanovené na přechozím vzorku, což rovněž odpovídá očekáváním. Nárůst tuhosti s napětím je opět jasně zřetelný a rovněž se jedná o poměrně lineární trend.



Obr. 55: Smykový modul  $G_{vh}$  z měření BE na neporušeném vzorku 4Vert24m v závislosti na  $p'$ .

Při zkoušce na horizontálně orientovaném neporušeném vzorku 5HrVr21m byly osazeny vertikální i horizontální BE pro stanovení  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  přímo na jednom vzorku. Výsledky jsou patrné na v grafu na Obr. 56. Hodnoty  $G_{hh}$  v rozmezí 205 až 355 MPa pro napětí 285 až 785 kPa odpovídají očekáváním, přičemž výrazná závislost na napětí je opět evidentní. Stanovené hodnoty  $G_{vh}$  jsou podstatně nižší a pohybují se v hodnotách 80 až 143 MPa pro napětí 285 až 785 kPa. Vypočtený stupeň anizotropie určený z výsledků této zkoušky pro každý zatěžovací stupeň je zaznamenán v Tab. 12. Vypočtené hodnoty jsou pro všechny úrovně napětí poměrně konzistentní a průměrná hodnota  $\alpha_G = 2,50$ . Jedná se o výsledky v rozporu s očekáváním, kvůli poměrně nízkým hodnotám  $G_{vh}$ .



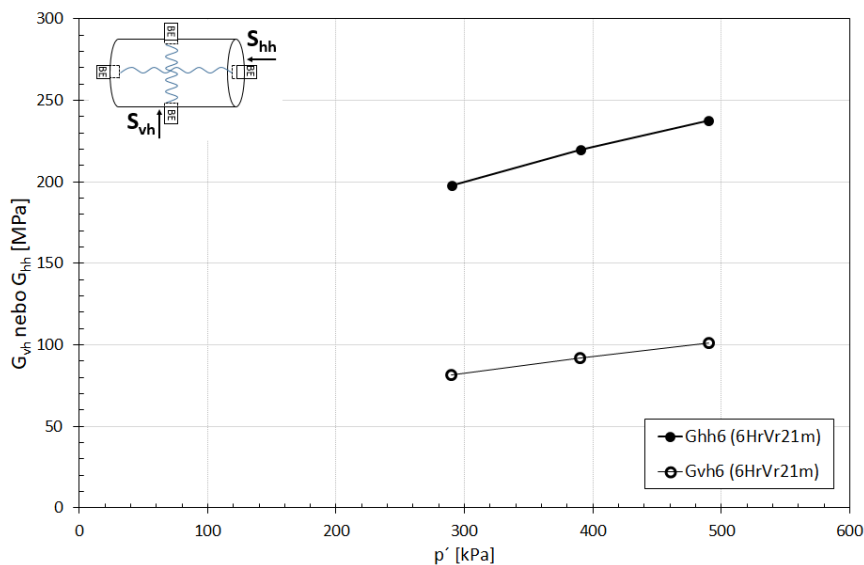
Obr. 56: Smykové moduly  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z měření BE na neporušeném vzorku 5HrVr21m v závislosti na  $p'$ .

$p'$ [kPa]	$G_{hh}$ [MPa]	$G_{vh}$ [MPa]	$\alpha_G$ [-]
285	205	80	2,58
385	228	93	2,44
485	252	104	2,42
585	293	115	2,54
685	323	127	2,55
785	353	143	2,46

Tab. 12: Stupeň anizotropie  $\alpha_G$  z poměru  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  stanovených BE na vzorku 5HrVr21m.

Stanovené smykové moduly  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z měření vertikálními a horizontálními BE na neporušeném horizontálně orientovaném vzorku 6HrVr21m stejným způsobem jako u předchozí zkoušky jsou vyobrazeny v grafu na Obr. 57.  $G_{hh}$  se pohybuje v očekávaných hodnotách mezi 198 MPa a 238 MPa pro střední efektivní napětí 290 až 490 kPa.  $G_{vh}$  je podstatně nižší o hodnotách 81 až 101 MPa pro stejný rozsah napětí. Oba smykové moduly vykazují jasnou závislost na úrovni napětí. Hodnoty  $\alpha_G$  spočtené pro každý zatěžovací stupeň na základě těchto modulů stanovených na tomto jednom vzorku jsou

zahrnutý v Tab. 13 s průměrnou hodnotou  $\alpha_G = 2,39$ . Opět se jedná o vyšší míru anizotropie, než jaká byla předpokládána, právě kvůli nízkým hodnotám  $G_{vh}$ .

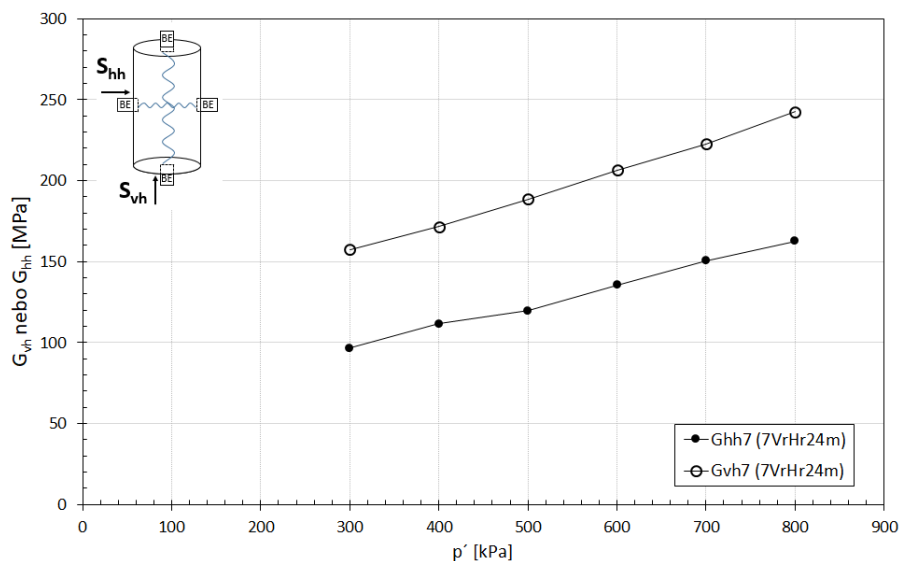


Obr. 57: Smykové moduly  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z měření BE na neporušeném vzorku 6HrVr21m v závislosti na  $p'$ .

$p'$ [kPa]	$G_{hh}$ [MPa]	$G_{vh}$ [MPa]	$\alpha_G$ [-]
290	198	81	2,43
390	220	92	2,38
490	238	101	2,35

Tab. 13: Stupeň anizotropie  $\alpha_G$  z poměru  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  stanovených BE na vzorku 6HrVr21m.

Graf na Obr. 58 představuje stanovené moduly  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  pro každý zatěžovací stupeň tentokrát na vertikálně orientovaném neporušeném vzorku 7HrVr24m pomocí vertikálních a horizontálních bender elementů. V tomto případě odpovídají stanovené  $G_{vh}$  mezi 157 až 243 MPa pro napětí 300 až 800 kPa dobře předpokládaným hodnotám ale hodnoty  $G_{hh}$  se vykazují jako výrazně nižší než očekávání a dosahující hodnot pouze 96 až 163 MPa pro totožná napětí a především jsou to hodnoty nižší než samotné  $G_{vh}$  na tomto vzorku. Při výpočtu stupně anizotropie jejich poměrem, zaneseným do Tab. 14 pro dané úrovně napětí to vede k obrácené míře anizotropie a  $\alpha_G < 1$  s průměrem  $\alpha_G = 0,65$ , což je zcela mimo předpoklady. Je patrná téměř identická míra růstu obou modulů spolu s napětím.

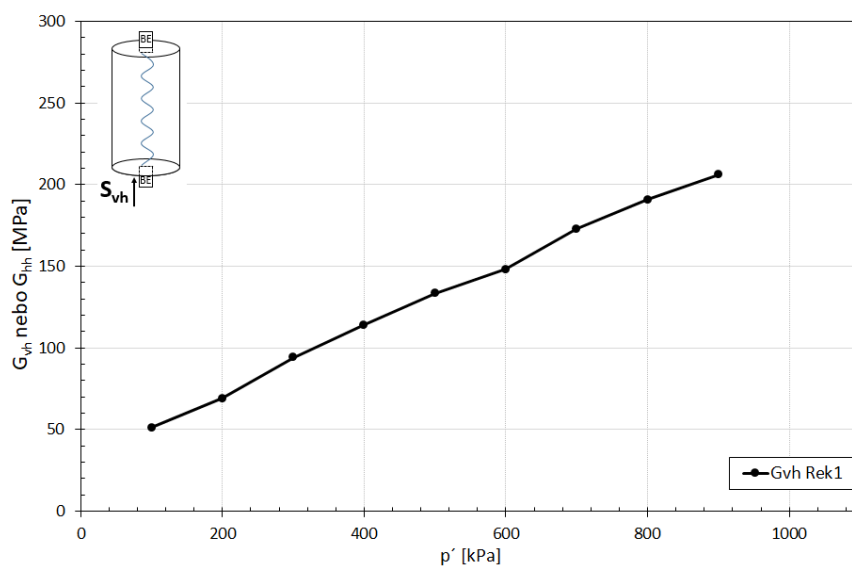


Obr. 58: Smykové moduly  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z měření BE na neporušeném vzorku 7HrVr24m v závislosti na  $p'$ .

$p'$ [kPa]	$G_{hh}$ [MPa]	$G_{vh}$ [MPa]	$\alpha_G$ [-]
300	96	157	0,61
400	112	172	0,65
500	120	189	0,63
600	136	207	0,66
700	151	223	0,68
800	163	243	0,67

Tab. 14: Stupeň anizotropie  $\alpha_G$  z poměru  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  stanovených BE na vzorku 7VrHr24m.

Hodnoty smykového modulu  $G_{vh}$  stanoveného na rekonstituovaném vzorku z měření vertikálními bender elementy jsou vyneseny v grafu na Obr. 59. Je zde opět patrný poměrně prudký nárůst tuhosti s rostoucím středním efektivním napětím.



Obr. 59: Smykový modul  $G_{vh}$  z měření BE na rekonstituovaném vzorku Rek1 v závislosti na  $p'$ .

#### 7.4.4 Diskuze

Na grafu na Obr. 60 jsou shrnuty všechny výše zmíněné smykové moduly  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  v závislosti na napětí. Graf umožňuje dobré vzájemné porovnání výsledků a využitelnosti stanovených hodnot pro posouzení míry anizotropie tuhosti.

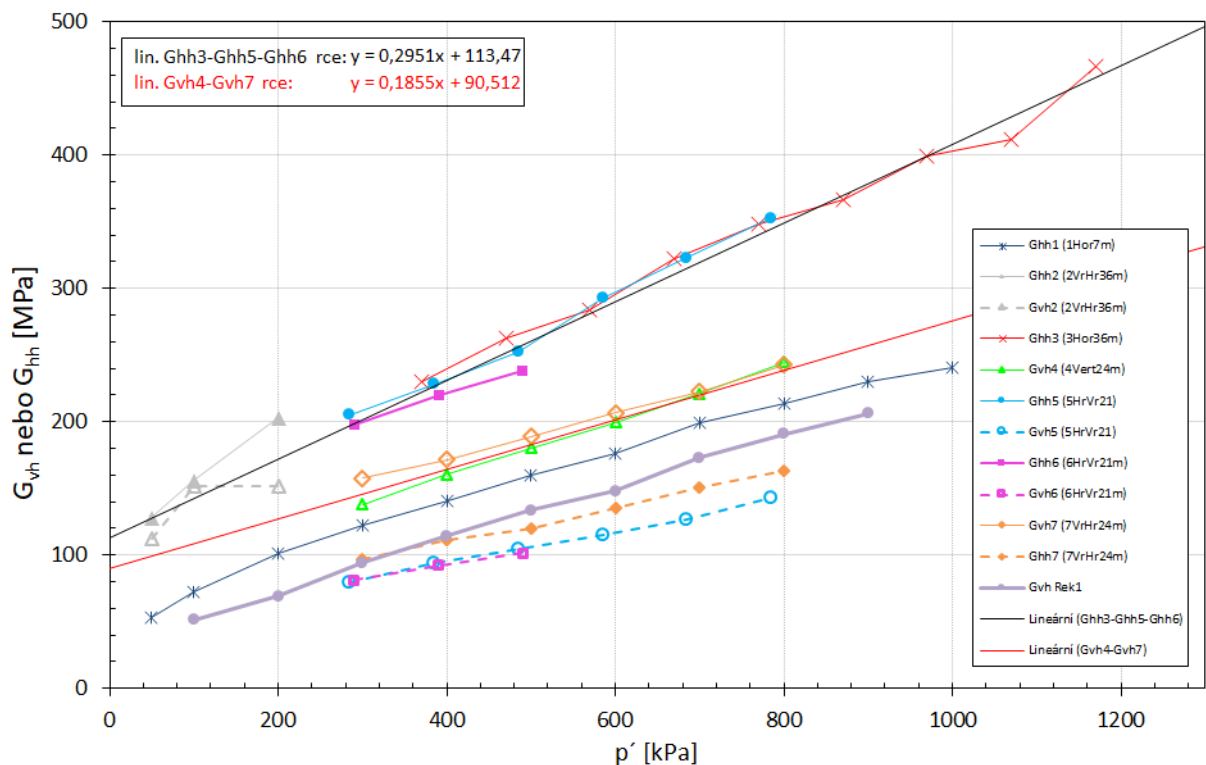
Výsledky měření na vzorku 2VrHr36m jsou pro názornost rovněž v Obr. 60 uvedeny, ale jak je již zmíněno, nejsou zahrnuty do dalších úvah, ač se jedná v případě napětí 50 kPa a 200 kPa o stupeň anizotropie v možných mezích a moduly odpovídají při srovnání s dalšími zkouškami přijatelným hodnotám tuhosti pro tato napětí.

Hodnoty stanovené na vzorku 1Hor7m vertikálními BE jsou nižší, než jaké jsem pro  $G_{hh}$  předpokládal a odpovídají spíše modulu  $G_{vh}$  z ostatních zkoušek. Křivka vývoje s napětím nemá v celém svém rozsahu lineární trend jako ostatní křivky. Vzhledem k odlišným fyzikálním charakteristikám (pórovitost a vlhkost, viz Tab. 10) nejsou hodnoty  $G_{hh}$  z této zkoušky zřejmě vhodné pro určování míry anizotropie porovnáváním s hodnotami  $G_{vh}$  stanovenými z ostatních zkoušek.

Hodnoty smykového modulu  $G_{vh}$  určené na rekonstituovaném vzorku jsou soustavně zhruba o 40 MPa nižší, než  $G_{hh}$  na vzorku 1Hor7m, ale křivky v podstatě kopírují podobný trend vývoje s napětím.

Další měření vertikálními bender elementy poskytují obecně konzistentní hodnoty smykových modulů  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  v očekávaných mezích u všech ostatních vzorků, přičemž  $G_{hh}$  z těchto měření je vždy vyšší než  $G_{vh}$  a také vykazuje rychlejší nárůst tuhosti spolu s přetvořením.

Smykové moduly  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z měření horizontálními bender elementy vykazují systematicky nižší hodnoty než analogické zkoušky provedené vertikální sadou BE. Přesto, že jsou všechny hodnoty z horizontálních BE výrazně nižší, mají tato data obdobné obecné charakteristiky (vyšší modul v horizontálním směru, nárůst s napětím, lineární charakter křivek) jako data z měření vertikálními BE. Křivky  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z horizontálních BE mají vzájemně téměř identický lineární trend vývoje s napětím, kdy  $G_{hh}$  na vzorku 7VrHr24m je konstantě přibližně o 30 MPa vyšší než  $G_{vh}$  u obou vzorků z hloubky 21 m, jež pak podávají prakticky totožnou tuhost pro stejná napětí.



Obr. 60: Srovnání všech smykových modulů  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  v závislosti na  $p'$  z měření BE na všech vzorcích.

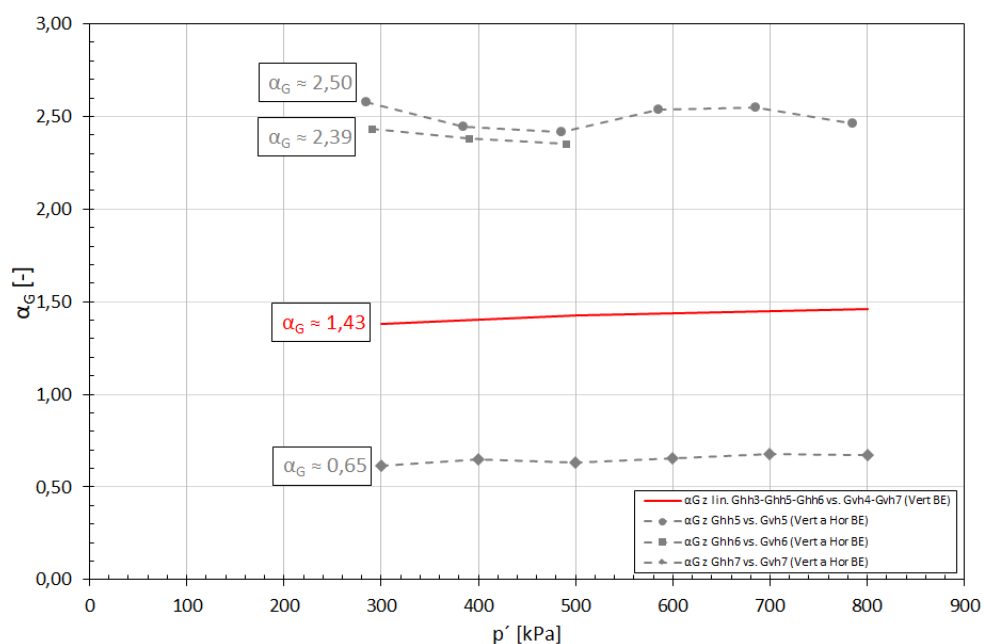
V důsledku odlišných výsledků získávaných z obou párů bender elementů nelze hodnoty stupně anizotropie z poměru  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z měření na vzorcích osazených vertikálními i horizontálními BE uvedené v přechodí kapitole jednoduše považovat za skutečnou a spolehlivou míru anizotropie daného materiálu. Teoreticky by se mělo jednat o nejlepší možné výsledky, protože jsou stanoveny na jednom vzorku, ale vzájemné porovnání výsledků z obou párů BE ukazují, že takto stanovaná míra anizotropie je zásadně ovlivněna různými měřeními rychlostmi vln z horizontálních a vertikálních BE a nikoliv skutečnou anizotropií zeminy. Tyto výsledky jsou vyneseny v grafu na Obr. 61. Průměrná hodnota stupně anizotropie 2,50 a 2,39 stanovená na horizontálně orientovaných vzorcích je podstatně vyšší než předpokládaná. Stupeň anizotropie stanovený na obráceně (vertikálně) orientovaném vzorku při užití obou párů BE by měl mít obdobné hodnoty, avšak tento dosahuje průměrné hodnoty pouze 0,65, ačkoliv je tento vzorek z velice podobné hloubky jako předchozí. Vysoký stupeň anizotropie u vzorků 5HrVr21m a 6HrVr21m je tedy pravděpodobně způsoben odlišnými výsledky, které konzistentně podává horizontální pár bender elementů. Případná nepřesnost v orientaci horizontálních BE by zde neměla hrát roli, protože i při jejich pootočení by případně  $G_{vh}$  mělo být rovno  $G_{hv}$ . Naopak obrácená míra anizotropie u vzorku 7VrHr24m je rovněž zřejmě zapříčiněna těmito odlišnými výsledky měření horizontálními BE, jelikož se jedná o obráceně orientované vzorky.

Pro pravděpodobně spolehlivější stanovení  $\alpha_G$  jsem z rovnic lineárních trendů  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z měření vertikálními BE na různě orientovaných vzorcích dopočítal hodnoty  $\alpha_G$  vycházející z poměru regresních přímek proložených hodnotami smykových modulů  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  změřených vertikálním párem BE na

vzorcích, které spolu nejlépe korelují (viz Obr. 60). Výsledek je patrný na grafu na Obr. 61. Takto stanovený stupeň anizotropie vykazuje mírný nárůst s rostoucím napětím, kvůli rychlejšímu růstu hodnoty  $G_{hh}$  oproti  $G_{vh}$  a pro zvolený rozsah napětí dosahuje průměrné hodnoty  $\alpha_G \approx 1,43$ . Stupeň anizotropie určený tímto způsobem považují za nejspolehlivější, vzhledem k tomu, že měření vertikálními bender elementy podávají obdobné hodnoty smykových modulu na různých vzorcích. Velice podobné hodnoty smykového modulu stanovené vertikálními BE na vzorcích z hloubek 21, 24 a 36 m poukazují na poměrně homogenní tuhost téglu v rámci těchto hloubkových úrovní a místa odběru a umožňují jejich vzájemné porovnávání a dopočítávání  $\alpha_G$  z jejich poměru.

Ve prospěch větší spolehlivosti měření vertikálními bender elementy pak rovněž mluví fakt, že i když jednotlivé orientované vzorky měly různou výšku (viz Tab. 10) a při jednotlivých zkouškách tak nebyla vzdálenost průchodu smykové vlny stejná, vedla měření k určení obdobných rychlostí smykové vlny procházející vzorkem a potažmo ve stanovení obdobných smykových modulů pro každý ze směrů prozařování vzorku ( $hh$  a  $vh$ ) dle jejich orientace.

Při všech měřeních horizontálními bender elementy byla vzdálenost průchodu smykových vln vzájemně téměř stejná, daná jednotným průměrem vzorků. Stanovené hodnoty  $G_{vh}$  horizontálními BE na vzorcích 5HrVr21m a 6HrVr21m jsou sice téměř stejné, ale není možné ověřit, zda je to dáno skutečně stejnou tuhostí, nebo spíše určenými rychlostmi vlny, které necharakterizují samotnou tuhost materiálu v tomto směru. Pro ověření by bylo vhodné provést měření horizontálními BE na vzorcích různé šířky a tím zjistit, jestli je skutečně měřena rychlost smykové vlny procházející přímo mezi bender elementy, či zda se nejedná o nějakou jinou (např. odraženou) vlnu, případně jestli nedocházelo k nějakému vodivému kontaktu mezi BE, který by ovlivňoval měření a stanovené hodnoty smykových modulů.

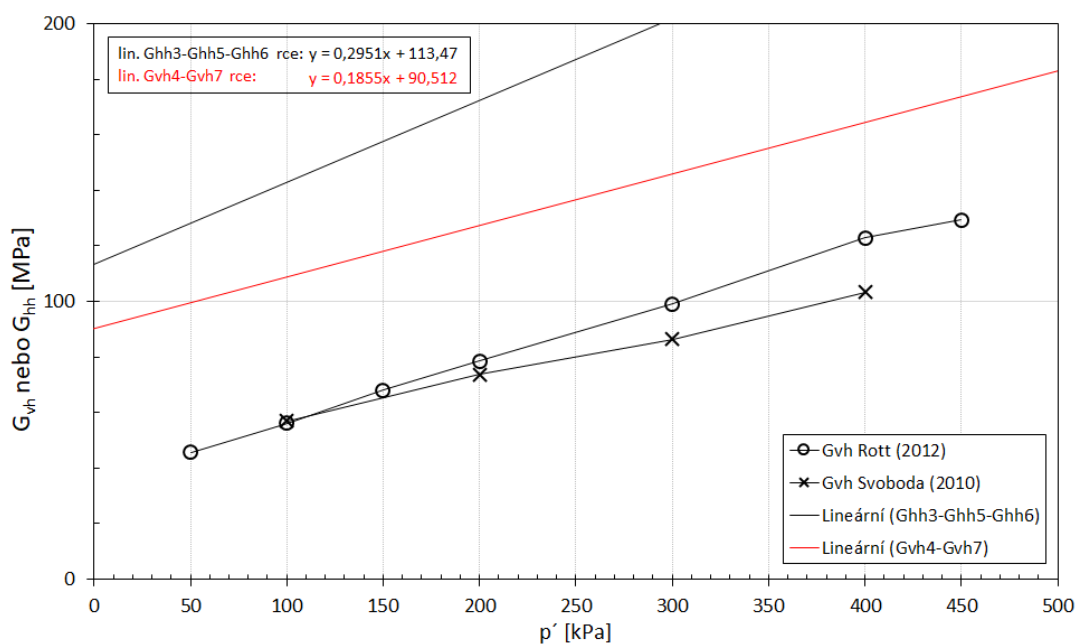


Obr. 61: Srovnání dopočítaného  $\alpha_G$  z poměru lineárních trendů  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  z měření vertikálními BE a  $\alpha_G$  stanoveného na jednotlivých vzorcích s použitím vertikálních i horizontálních BE, v závislosti na  $p'$ .

V podstatě ze všech kombinací stanovených smykových modulů  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  v rámci mých měření, ale případně i z převzatých měření tuhosti téglu by bylo možné jejich vzájemným poměrem vypočítávat stupeň anizotropie  $\alpha_G$  (pro určité efektivní napětí). Nicméně, pro co nejvěrohodnější určení jeho hodnoty by měly být smykové tuhosti  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  stanoveny vždy na co nejpodobnějších vzorcích odebraných ideálně ze stejného místa, aby byly tvořené co možná nejpodobnějším homogenním materiálem. Ač se tégлы jeví celkově jako poměrně homogenní, ne vždy to platí pro všechny jeho vlastnosti, jak je demonstrováno v následujícím textu.

V grafu na Obr. 62 jsou vyneseny lineární spojnice  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  určené při mých zkouškách pomocí vertikálních BE a jejich srovnání se smykovými moduly  $G_{vh}$ , které stanovili pomocí vertikálních BE Svoboda (2010) a Rott (2012, nepublikováno) na neporušených vertikálně orientovaných vzorcích z lokality Královopolských tunelů v blízkosti portálu u křižovatky ulic Dobrovského, Žabovřeská a Hradecká. Vzorek Svobody (2010) byl z hloubky 15,2 m a vzorek Rotta (2012, nepublikováno) z hloubky přibližně 12 m, přičemž jejich experimenty probíhaly v podobném oboru napětí. Vzhledem k obdobnému testovacímu programu (užití vertikálních BE) a srovnatelným okrajovým podmínkám (napětí), jako při mých experimentech, se zdá, že tuhost brněnského téglu není homogenní a může se odlišovat dle lokality, ale i dle hloubky odběru, což je i v souladu s mými měřeními na vzorku 1Hor7m, který vykazoval oproti ostatním vzorkům z větších hloubek podstatně nižší tuhost.

Homogenitu tak lze předpokládat u vzorků ze stejného místa a z obdobné nebo nejlépe stejné hloubky odběru. Určování stupně anizotropie na základě poměru  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  stanovených na vzorcích z různých lokalit, nebo různých hloubek (především v případě, že vzorky vykazují odlišné i další vlastnosti jako pórovitost a vlhkost) proto není vhodné.



Obr. 62: Srovnání lineárních trendů z vlastních měření vertikálními BE s  $G_{vh}$  z měření vertikálními BE Svobody (2010) a Rotta (2012, nepublikováno).

Všechny stanovené smykové moduly vykazují výraznou závislost na úrovni napětí. U většiny vzorků se jedná veskrze o lineární nárůst tuhosti spolu s napětím, pouze vzorek 1Hor7m a rekonstituovaný vzorek mají spíše nelineární závislost na napětí (dochází k postupnému útlumu rychlosti nárůstu tuhosti s napětím). Nelineární závislost tuhosti na napětí lépe odpovídá teorii, nicméně experimentální data z mých zkoušek, dále z předchozích měření smykového modulu na téglu (Svoboda, 2010), (Rott, 2012, nepublikováno), ale i data z měření zahraničními autory na téglu podobném Londýnském jílu, jaká uvádějí například (Jovičić a Coop, 1998), Gasparre (2005) nebo Nishimura (2005), vykazují spíše lineární závislost tuhosti na napětí. Lineární trendy křivek však mohou být zřejmě dány i rozsahem napětí, při kterém jsou měření prováděna. Při rozšíření rozsahu napětí o nižší a vyšší úrovně při měření by se možná začal projevovat mírně odlišný (zakřivený) trend.

Absolutní hodnoty stanovených smykových modulů  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  jsou v relativně dobré shodě s předpoklady na základě rešerše. Všeobecně dosahují pro daný obor napětí vyšších hodnot, než jaké by bylo možné očekávat při uvažování podobnosti s Londýnským jílem, pro který uvádí například Gasparre (2005) hodnoty  $G_{hh}$  87 až 228 MPa a  $G_{vh}$  hodnoty 47 až 117 MPa u vzorků z hloubek 7 až 36 m při napětích odpovídajících hloubce uložení. Nishimura (2005) uvádí pro Londýnský jíl vcelku podobné hodnoty  $G_{hh}$  v rozmezí 79 až 153 MPa a  $G_{vh}$  hodnoty 38 až 83 MPa pro vzorky z hloubek 5 až 29 m po izotropní rekonsolidaci při napětích odpovídajících hloubce uložení. Výsledky Jovičić a Coop (1998) naznačují  $G_{hh}$  Londýnského jílu v intervalu přibližně 110 až 220 MPa a  $G_{vh}$  mezi 50 až 150 MPa pro obor napětí zhruba 200 až 700 kPa. Vyšší hodnoty tuhosti brněnského téglu svědčí pravděpodobně i o podstatně vyšší míře jeho překonsolidace, což odpovídá zjištěním Malát et al. (2016). Jak je však již uvedeno výše, samotná tuhost brněnského jílu zřejmě není homogenní a hodnoty smykových modulů se mohou značně lišit dle místa a hloubky odběru.

Stanovený stupeň anizotropie  $\alpha_G \approx 1,43$  je nižší než predikce pro tégl, kterou odhadovali Rott a Mašín (2012) na základě rešerše anizotropie tuhosti rozličných jílu na hodnotu  $\approx 2$ . Stanovená hodnota je v poměrně dobré shodě s cross-hole měřeními prováděnými Rott et al. (2015) na téglu ze stejné lokality, kteří uvádějí pro tato měření in-situ hodnotu  $\alpha'_G$  rovnou 1,20 až 1,30. Měření in-situ podává však informaci spíše o chování určité části masivu, která je v rámci měření mezi vrty obsažena a zahrnuje například i vliv nehomogenit a tektonických poruch ve větším měřítku, které mohou vést ke změnám měřených hodnot. Laboratorní měření pak charakterizuje testovanou zeminu bez vlivu větších poruch a výsledky mohou být ovlivněny pouze menšími nehomogenitami uvnitř vzorku, jejichž vliv je však v porovnání s výraznějšími poruchami in-situ zřejmě zanedbatelný. Měření in-situ je možné srovnávat s měřeními v laboratoři, je však třeba brát v úvahu právě možný „scale effect“.

Možné chyby v samotném měření bender elementy mohou být spojeny s nepřesnostmi ve stanovení vzdálenosti průchodu smykové vlny nebo nejednoznačným místem určení prvního nasazení registrované příchozí vlny a interpretací doby průchodu vlny vzorkem. Vzhledem k tomu, že jsem měření prováděl za účelem stanovení míry anizotropie, bylo nutné především zachovávat jednotný

postup měření a vyhodnocení v rámci všech zkoušek tak, aby byly výsledky vzájemně dobře porovnatelné. Účelnost takového postupu pak dokazují obdobné výsledky z měření na různých vzorcích při stejných počátečních a okrajových podmínkách. V případě volby například jiného postupu vyhodnocení měření rychlosti smykových vln by došlo sice ke změně hodnot smykových modulů, ale jejich poměr by zůstal zachován a změna metodiky by tak neměla vliv stanovenou míru anizotropie.

Při měření bender elementy by neměly být zanedbávány změny rozměrů vzorku způsobené změnou napětí a konsolidací. Vzdálenost průchodu smykové vlny a objemová hmotnost zeminy je v takovém případě uvažována jako konstantní počáteční hodnota. Takový postup je jistě nesprávný, jelikož obě proměnné vstupují do výpočtu smykového modulu a v rámci experimentů by měla existovat snaha o co nejpřesnější určení aktuálního stavu vzorku, tak aby výsledky měření co nejlépe reprezentovaly skutečnou tuhost materiálu, leč určení aktuálních rozměrů není triviální.

Ideální by bylo při měření bender elementy použití axiálních a radiálních lokálních snímačů deformace LVDT připevněných přímo na vzorku. Tímto způsobem bychom získali přesnou informaci o rozměrech vzorku pro každé efektivní napětí i o vývoji jeho rozměrů během sycení a rekonsolidace, což by umožnilo větší přesnost stanovení rychlosti průchodu střížné vlny a následně i smykového modulu. V případě osazení těchto LVDT spolu s vertikálními i horizontálními BE by pak teoreticky bylo možné stanovit všechny materiálové parametry matice tuhosti transversálně izotropního materiálu pouze na jednom vzorku. Praktická realizace takové zkoušky je však problematická, vzhledem k již enormní náročnosti instrumentace vzorku a pravděpodobnosti jeho poškození. V triaxiálních komorách, jaké jsou k dispozici v laboratořích mechaniky zemin PřF UK, je pak taková zkouška neproveditelná, jelikož neposkytuje dostatek průchodů pro kabely a pravděpodobně ani dostatek místa na všechny přístroje uvnitř komory. Pro takto komplexní instrumentaci by musely být využity vzorky větších rozměrů testované v k tomu uzpůsobených větších komorách. V případě kombinace s měřením smykové pevnosti je ještě otázkou, zda by do vzorku přesahující konce BE neovlivňovaly výsledky smykové zkoušky, jelikož by pravděpodobně mohly zapříčinit vznik predisponované smykové plochy.

Jedním z podstatných zjištění této práce je, že jednotlivé páry bender elementů (vertikální a horizontální) poskytují systematicky odlišné výsledky. Tento rozpor by jistě bylo vhodné ověřit v budoucnu dalším zkušebním programem. Výsledky z měření vertikálními BE považuji za věrohodnější na základě dobré korelace výsledků na různých vzorcích a dřívějších poznatků o anizotropii brněnského téglu a anizotropii např. Londýnského jílu, který má do jisté míry podobné vlastnosti. K vyšší pravděpodobnosti spolehlivosti vertikálních bender elementů rovněž přispívá jejich nesrovnatelně snazší osazování a také více zkušeností mnoha autorů s tímto systémem, který je považován za běžnou praxi pro stanovení hodnoty maximálního smykového modulu.

## 8. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo stanovení anizotropie tuhosti brněnského téglu pomocí měření bender elementy v triaxiálním přístroji. V rámci rešeršní části práce jsem provedl komplexní shrnutí dosavadních poznatků o brněnském téglu a vytvořil tak přehled o jeho známých fyzikálních a mechanických charakteristikách - mineralogickém složení, zrnitosti, pevnostních charakteristikách, parametrech stlačitelnosti, míře překonsolidace, hodnotě  $K_0$  a tuhosti. Tato část rovněž slouží jako ucelený přehled o literatuře a autorech, kteří se studiu brněnského jílu věnovali.

Realizoval jsem a vyhodnotil celkem sedm zkoušek s měřením bender elementy v triaxiální komoře na orientovaných neporušených vzorcích a jednu na rekonstituovaném vzorku. Při čtyřech z těchto zkoušek byla využita pokročilá metoda pro určení míry anizotropie pomocí dalšího páru bender elementů (horizontálních) na bočních stěnách vzorku. Z měření jsem získal hodnoty smykových modulů v různých směrech, jejichž poměrem jsem pak stanovil možný stupeň anizotropie.

Potvrdilo se, že bender elementy jsou jistě vhodnou metodou k určování smykového modulu. Měření vertikálním párem bender elementů v podstavách komory probíhalo bez problémů. Bylo možné stanovit hodnoty  $G_{hh}$  a  $G_{vh}$  na několika horizontálně a vertikálně orientovaných vzorcích a měření poskytlo konzistentní výsledky o stupni anizotropie v očekávaných mezích.

Nepodařilo se však bohužel jednoznačně ověřit jednoduché nasazení a použitelnost horizontálních bender elementů. Výsledky z horizontálního páru BE udávaly vždy výrazně nižší smykové moduly než pár vertikálních BE bez ohledu na orientaci vzorku. Možnost jejich využití a vysvětlení rozdílných výsledků by bylo vhodné ověřit dalším výzkumem.

Převládající výsledky měření naznačují hodnoty  $G_{hh}$  přibližně v intervalu 200 až 350 MPa pro obor napětí 300 až 800 kPa a hodnoty  $G_{vh}$  zhruba v rozsahu 140 až 245 MPa pro napětí 300 až 800 kPa.

Za nejméně pravděpodobnější stanovenou hodnotu stupně anizotropie považuji  $\alpha_G \approx 1,43$ , určenou na základě měření vertikálními BE na různých vertikálně a horizontálně orientovaných vzorcích. Stupeň anizotropie zřejmě není zcela konstantní a dochází k pozvolnému růstu míry anizotropie se zvyšujícím se středním efektivním napětím, vlivem strmějšího trendu nárůstů  $G_{hh}$  oproti růstu  $G_{vh}$ . Stanovené hodnoty smykových modulů se odvíjí od času průchodu smykové vlny, ale jeho určení není jednoznačné a může se lišit v závislosti na zvoleném postupu měření a interpretace. Pro určení anizotropie je ale podstatné především zachovat jednotný postup.

Hodnoty smykových modulů jsou významně závislé na úrovni středního efektivního napětí, přičemž právě napětí má na tuhost naprosto zásadní vliv.

## 9. SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ

- Alvarado, G., Coop, M. R. (2012). On the performance of bender elements in triaxial tests. *Géotechnique*, 62(1), 1-17.
- Arroyo, M., Wood, D. M. (2004). Discussion: On the applicability of cross-anisotropic elasticity to granular materials at very small strains by R. Kuwano and RJ Jardine. *Géotechnique*, 54(1), 75-76.
- Arulnathan, R., Boulanger, R. W., Riemer, M. F. (1998). Analysis of bender element tests. *Geotechnical Testing Journal*, 21(2), 120-131.
- Atkinson, J. H. (1993). An introduction to The mechanics of soils and foundations. McGraw-Hill Book Company Europe, Maidenhead.
- Atkinson, J. H. (2000). Non-linear soil stiffness in routine design. *Géotechnique*, 50(5), 487-508.
- Atkinson, J. H. (2007). The mechanics of soils and foundations. CRC Press.
- Blewett, J., Blewett, I. J., Woodward, P. K. (2000). Phase and amplitude responses associated with the measurement of shear-wave velocity in sand by bender elements. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(6), 1348-1357.
- Boháč, J., Feda, J. (1995). Chování rozpukaných třetihorních jílu. 23. konference Zakládání staveb, Brno, 168-173.
- Boháč, J., Feda, J., Herle, I., Klablana, P. (1995). Properties of fissured Brno clay. Proceedings of the 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Copenhagen, 28 May - 1 June 1995. *Danish Geotechnical Society Bulletin*, (11), 19-24.
- Boháč, J., Pavlová M. (2012). Předdenudační mocnost a překonsolidace brněnského téglu. *Geotechnika* (1-2), 27-31.
- Brignoli, E. G., Gotti, M., Stokoe, K. H. (1996). Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers. *Geotechnical Testing Journal*, 19(4), 384-397.
- Brzobohatý, R. (1997). *Paleobatymetrie spodního badenu karpatské předhlubně na Moravě z pohledu otolitových faun*. In Hladilová Š., Dynamika vztahů marinního a kontinentálního prostředí. Brno: Masarykova univerzita Brno, 1997. p. 37-46.
- Černíková, M. (2014). *Kvazipřekonsolidační napětí vybraného profilu brněnského téglu pomocí edometrické zkoušky*. Diplomová práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha. 69 str.
- Dyvik, R., & Madshus, C. (1985). Lab Measurements of  $G_m$  x Using Bender Elements. In: Advances in the art of testing soils under cyclic condition. (pp 186-196). ASCE.

- Erbenová, S. (2006). *Faktory ovlivňující mechanické chování jílovitých zemin*. Doktorská disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Brno. 177 str.
- Faktorová, K., Chalmovský, J., Koudela, P., Míča, L. (2019). Initial investigation of the intrinsic geomechanical properties of soils in area of landslide Černá Pole. The 10th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques. pp 280 -284, Vilnius Gediminas Technical University.
- Feda, J., Boháč, J., Herle, I. (1995). Shear resistance of fissured Neogene clays. *Engineering Geology*, 39, 171-184.
- Fencl, M. (2012). *Pevnost brněnského jílu v kritickém stavu*. Diplomová práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha. 74 str.
- Gasparre, A. (2005). *Advance Laboratory Characterization of London Clay*. Doktorská disertační práce, University of London. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London.
- Gasparre, A., Nishimura, S., Minh, N. A., Coop, M. R., Jardine, R. J. (2007). The stiffness of natural London Clay. *Géotechnique*, 57(1), 33-47.
- Geotest, a.s. (2012). *Geologická dokumentace vrtu V1, Lokalita Brno-Slatina, vrt v téglu*. Sondu dokumentoval: Rupp, D.
- Graham, J., Houlsby, G. T. (1983). Anisotropic elasticity of a natural clay. *Géotechnique*, 33(2), 165-180.
- Greening, P. D., Nash, D. F. (2004). Frequency domain determination of G<sub>0</sub> using bender elements. *Geotechnical testing journal*, 27(3), 288-294.
- Head, K. H. (1994). *Manual of soil laboratory testing. Volume 2: permeability, shear strength and compressibility tests (Ed. 2)*. Halsted Press Ltd.
- Head, K. H. (1998). *Manual of soil laboratory testing. Volume 3: effective stress tests (Ed. 2)*. John Wiley & Sons.
- Hight, D. W., Gasparre, A., Nishimura, S., Minh, N. A., Jardine, R. J., Coop, M. R. (2007). Characteristics of the London Clay from the Terminal 5 site at Heathrow Airport. *Géotechnique*, 57(1), 3-18.
- Horák, V., Hrdý, J. (1982). *Geotechnické vlastnosti terciérních jílu z hlediska realizace podzemních kolektorů v Brně*. Brno a Geologie. DT ČSVTS Brno, Brno. 212 str.
- Hori, T., Yamashita S., Suzuki, T. (2006). Anisotropy of elastic moduli at small strain of sands and clays by. In *Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media: Proceedings of the International Symposium on Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media*. Ube, Japan, 12-14 September 2006 (p. 41). CRC Press.

- Chlupáč, I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z. (2002). Geologická minulost České republiky. Academia, Praha, 436 str.
- Choo, J., Jung, Y. H., Chung, C. K. (2011). Effect of directional stress history on anisotropy of initial stiffness of cohesive soils measured by bender element tests. *Soils and foundations*, 51(4), 737-747.
- Jáky J. (1948). Pressures in soils. In: Proc 2nd int conf soil mechanics, vol. 1. Rotterdam; 1948. p. 103-107.
- Jovičić, V., Coop, M. P. (1998). The measurement of stiffness anisotropy in clays with bender element tests in the triaxial apparatus. *Geotechnical Testing Journal*, 21(1), 3-10.
- Jovičić, V., Coop, M. R., Simić, M. (1996). Objective criteria for determining G max from bender element tests. *Geotechnique*, 46(2), 357-362.
- Kawaguchi, T., Mitachi, T., Shibuya, S. (2001). Evaluation of shear wave travel time in laboratory bender element test. In International Conference on soil mechanics and geotechnical engineering (pp. 155-158).
- Kim, T., Finno, R. J. (2012). Anisotropy evolution and irrecoverable deformation in triaxial stress probes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(2), 155-165.
- Koubová M., Boháček Z., Ondruš P. (2003). Charakteristika jílových minerálů z průzkumné štoly Jiřina pro stavbu silnice 1/42 VMO Dobrovského A. Česká geologická služba.
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall Upper Saddle River. New Jersey.
- Krčmová, B. (1990). Závěrečná zpráva projektu 72011. MS, Geofond. Praha.
- Krupička, M. (2012). Stanovení horizontálního napětí brněnského jílu oedometrickou zkouškou. Bakalářská práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha, 39 str.
- Kuwano, R., Jardine, R. J. (2002). On the applicability of cross-anisotropic elasticity to granular materials at very small strains. *Géotechnique*, 52(10), 727-749.
- Landon, M. M., DeGroot, D. J. (2006). Measurement of small strain shear modulus anisotropy on unconfined clay samples using bender elements. In GeoCongress 2006: Geotechnical engineering in the information technology age (pp. 1-6).
- Lee, J. S., Santamarina, J. C. (2005). Bender elements: performance and signal interpretation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(9), 1063-1070.
- Leong, E. C., Cahyadi, J., Rahardjo, H. (2009). Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender–extender elements. *Canadian geotechnical journal*, 46(7), 792-812.

- Lings, M. L., Greening, P. D. (2001). A novel bender/extender element for soil testing. *Géotechnique*, 51(8), 713-717.
- Lings, M. L., Pennington, D. S., Nash, D. F. T. (2000). Anisotropic stiffness parameters and their measurement in a stiff natural clay. *Géotechnique*, 50(2), 109-125.
- Malát, R., Rott, J., Černíková, M., Franců, J., Boháč, J., Mašín, D. (2016). Determination of erosion thickness by numerical back analysis: The case study of Badenian clays in the Carpathian Foredeep, Czech Republic. *Engineering Geology*, 214, 50-59.
- Mapy.cz (3. 8. 2020). www.mapy.cz.
- Mašín, D., Rott, J. (2014). Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays: review and a model. *Acta Geotechnica*, 9(2), 299-312.
- Mayne, P. W., Kulhawy, F. H. (1982).  $K_0$  – OCR relationships in soil. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 108(6), 851-872.
- Mesri G., Hayat T. M. (1993). The Coefficient of earth pressure at rest. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4), 647-666.
- Míča, L., Račanský, V., Chalmovský, J. (2010). Technological tunnel centre – numerical analysis by using different constitutive models. The 10th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, pp 1146-1152, Vilnius Gediminas Technical University.
- Mitřenga, P., Rejl, L. (1993). Brněnský masív. Geologie Moravy a Slezska: sborník příspěvků k 90. výročí narození prof. dr. Karla Zapletala. Vyd. 1., Moravské zemské muzeum, Brno. 168 s. ISBN 80-702-8050-6.
- Mohyla, T., 2014. *Přetvárné parametry brněnského téglu z malých deformací v trojosém přístroji*. Diplomová práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha. 81 str.
- Müller P., Novák Z., Bubík, M., Buriánková, K., Čurda J., Eliáš M., Gilíková H., Gregerová M., Grym, V., Hanák, J., Hanzl, P., Havlíček, P., Hrádek, M., Kadlec, J., Krejčí, O., Kvétoňová, E., Melichar, R., Müller, V., Müllerová, H., Novák, M., Otava, J., Pálenský, P., Petrová, P., Píše, J., Sedlák, J., Šmerdová, B., Valoch, K., Vít, J. (2000). Geologie Brna a okolí. Český geologický ústav, Praha, 90 + 12 str.
- Nehyba, S., Tomanová Petrová, P. a Zágoršek, K. (2008). Sedimentological and palaeocological records of the evolution of the south-western part of the Carpathian Foredeep (Czech Republic) during the Early Badenian. In: *Geological Quarterly*, 52(1), 45-60.
- Ng, C. W., Leung, E. H., Lau, C. K. (2004). Inherent anisotropic stiffness of weathered geomaterial and its influence on ground deformations around deep excavations. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(1), 12-24.

- Nishimura, S. (2005). Laboratory study on anisotropy of natural London Clay. Doktorská disertační práce, University of London, Imperial College London.
- Novák, V. (2012). Stanovení napjatosti v jílovitém masivu z měření posunů. Diplomová práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha, 90 str.
- Pavlík, J. a Rupp, D. (2003). Silnice I/42 Brno – VMO Dobrovského A, průzkumné štoly, Podrobný geotechnický průzkum. Závěrečná zpráva. GEOtest Brno, a.s.
- Pavlík, J., Klímeck, L. a Rupp, O. (2004). Geotechnický průzkum pro nejvýznačnější stavbu na velkém městském okruhu v Brně - tunel Dobrovského. *Tunel*, 13(2), 2-12.
- Pavlová, M. (2011). *Mocnost nadloží a překonsolidace brněnského jílu*. Bakalářská práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha, 29 str.
- Pavlová, M. (2014). *Sekundární stlačitelnost brněnského téglu*. Diplomová práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha. 99 str.
- Pennington, D. S., Nash, D. F. T., Lings, M. L. (1997). Anisotropy of G<sub>0</sub> shear stiffness in Gault Clay. *Géotechnique*, 47(3), 391-398.
- Pennington, D. S., Nash, D. F., Lings, M. L. (2001). Horizontally mounted bender elements for measuring anisotropic shear moduli in triaxial clay specimens. *Geotechnical testing journal*, 24(2), 133-144.
- Petružálek, M. (2006). Určení rychlosti smykové vlny na vzorcích zemin v triaxiálním přístroji. Diplomová práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha, 55 str.
- Piriyakul, K. (2006). *Anisotropic stress-strain behaviour of Belgian Boom clay in the small strain region*. Doktorská disertační práce, Ghent University.
- Piriyakul, K. (2010). A development of a bender element apparatus. *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 20, 363-369.
- Poul, I. (2009). *Vliv mineralogického složení na mechanické chování zemin*. Dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno. 141 str.
- Rio, J. F. M. E. (2006). *Advances in laboratory geophysics using bender elements*. Doktorská disertační práce, University of London, Imperial College London.
- Rott J., Vilhelm J., Malát R., Krupička M. (2015). Seismic cross-hole method as a useful tool for estimation of inherent stiffness anisotropy of overconsolidated clay. ALERT Workshop (poster), 28-30 September 2015, Aussois, France.

- Rott, J. (2012). *Laboratorní data z měření vertikálními bender elementy na neporušeném vzorku téglu*. Nepublikováno. Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha.
- Rott, J., Mašín, D. (2012). Anizotropie tuhosti jílu v oboru velmi malých přetvoření. *Geotechnika*, 4/2012, 23-31.
- Rott, J., Mašín, D. (2013). Zpětný výpočet součinitele bočního tlaku v klidu v brněnském jílu na základě konvergenčních měření. *Geotechnika*, 3-4/2013, 16-21.
- Rott, J., Mašín, D., Boháč, J., Krupička, M., Mohyla, T. (2015). Evaluation of  $K_0$  in stiff clay by back-analysis of convergence measurements from unsupported cylindrical cavity. *Acta Geotechnica*, 10(6), 719-733.
- Sanchez-Salineró, I., Roesset, J. M., Stokoe, K. H. I. (1986). Analytical studies of body wave propagation and attenuation [Report GR 86-15]. Austin: University of Texas.
- Shirley, D. J., & Hampton, L. D. (1978). Shear-wave measurements in laboratory sediments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(2), 607-613.
- Simpson, B., Atkinson, J. H., Jovicic, V. (1996). The influence of anisotropy on calculations of ground settlements above tunnels. In *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground* (pp. 591-594).
- Sully, J. P., Campanella, R. G. (1995). Evaluation of in situ anisotropy from crosshole and downhole shear wave velocity measurements. *Geotechnique*, 45(2), 267-282.
- Svoboda, T. (2010). *Numerický model NRTM tunelu v tuhém jílu*. Doktorská disertační práce, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha, 177 str.
- Svoboda, T., Mašín, D. (2008). Impact of a constitutive model on inverse analysis of a NATM tunnel in stiff clays. In *Proc. ITA-AITES World Tunnel Congress, Agra, India* (Vol. 2, pp. 627-636)
- Teachavorasinskun, S., Lukkanaprasit, P. (2008). Stress induced and inherent anisotropy on elastic stiffness of soft clays. *Soils and foundations*, 48(1), 127-132.
- Teng, F. C., Ou, C. Y., Hsieh, P. G. (2014). Measurements and numerical simulations of inherent stiffness anisotropy in soft Taipei clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(1), 237-250.
- Viggiani, G., Atkinson, J. H. (1995). Interpretation of bender element tests. *Géotechnique*, 45(1), 149-154.
- Wongsaroj, J., Soga, K., Yimsiri, S., & Mair, R. J. (2004). Stiffness anisotropy of London Clay and its modelling: Laboratory and Field. In *Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference: Proceedings of a three day conference on advances in geotechnical engineering, organised by the*

Institution of Civil Engineers and held at the Royal Geographical Society, London, UK, on 29–31 March 2004 (pp. 1205-1216). Thomas Telford Publishing.

Yamashita, S., Kawaguchi, T., Nakata, Y., Mikami, T., Fujiwara, T., Shibuya, S. (2009). Interpretation of international parallel test on the measurement of Gmax using bender elements. *Soils and foundations*, 49(4), 631-650.

Zeevaert, L. (1953). Theories and Hypotheses of General Character, Soil Properties, Soil Classification, Engineering Geology. In Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vol. 3, pp. 113-114).