

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Aplikovaná geologie



Mgr. František Chalupa

**Aproximace statických modulů hornin z dynamických modulů stanovených
akustickou karotáží pomocí T-matrix modelu**

Approximation of static moduli of rocks from dynamic moduli determined by sonic
well logging using T-matrix model

Typ závěrečné práce:

Disertační práce

Vedoucí práce/Školitel:

doc. RNDr. Jan Vilhelm, CSc.

Praha 2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 26.4.2019

Podpis

Poděkování

Tento výzkum byl částečně financován z grantu č. 356214, poskytnutého Grantovou Agenturou Univerzity Karlovy (GAUK). Dále bych chtěl poděkovat především mému školiteli Doc. RNDr. Janu Vilhelmovi CSc. za jeho neochvějnou podporu během celé doby, kdy jsem tuto práci dával dohromady. Poděkování si rozhodně zaslouží též Ing. Igor Novák z Velkolomu Čertovy Schody, který vždy vyšel vstříc všem požadavkům, které jsem v rámci terénního výzkumu měl a RNDr. Martin Procházka a RNDr. Michal Pitrák Ph.D. z karotážní divize firmy Aquatest a.s., kteří mi vyšli vstříc s karotážními měřeními a měli dost trpělivosti s mými hojnými šťouravými dotazy. Velký dík patří Mgr. Matěji Petružálkovi (tehdy ještě ne Ph.D.) za nenahraditelnou pomoc s laboratorními měřeními. V posledních chvílích, kdy už se čas povážlivě krátil, mi vytrhl trn z paty Jakub Merten M.Sc., který mi pomohl s korekcemi, zjednodušením a zesrozumitelněním anglických částí textu. Ještě chci poděkovat také prof. Mortenu Jakobsenovi, který si našel čas a pomohl mi s pochopením několika zásadních věcí ve výpočtu T-matrix modelu a jeho převedení do MATLABu.

Nakonec, ale neméně důležitě, musím uvést, že nic z výše uvedeného by nebylo možné bez podpory mojí rodiny, které tímto patří velký dík na závěr.

Obsah

Poděkování.....	3
Abstrakt (CZ).....	5
Abstract (EN).....	6
1 Úvod.....	7
2 Statické a dynamické moduly hornin.....	8
3 Porušení horninového masivu a jeho vliv na moduly.....	13
4 T-matrix model.....	15
4.1 Teoretický popis modelového výpočtu.....	15
4.2 Specifikace použité varianty T-matrix modelu.....	19
5 Provedené práce a příprava vstupních dat pro modelování.....	22
5.1 Výběr vhodné experimentální lokality.....	22
5.1.1 Měření na lokalitě Velkolom Čertovy Schody 2011.....	23
5.1.2 Geologická situace a podmínky výběru místa pro vrt K-1 v lomu Kosov.....	26
5.2 Vyhroubení vrtu K-1 a petrografický popis jádra.....	27
5.3 Karotážní měření na lokalitě Kosov, vrt K-1.....	30
5.3.1 Specifikace použitých karotážních metod a vybavení.....	30
5.3.2 Zpracování a možnosti použití dat z provedených karotážních měření.....	34
5.3.3 Naměřená karotážní data a jejich zpracování.....	36
5.4 Vzorkování vrtného jádra a laboratorní měření.....	38
5.4.1 Stanovení hustot a posouzení porozity matrice.....	40
5.4.2 Analýzy provedené na výbrusech a jejich výsledky.....	41
5.4.3 Specifikace statických zatěžovacích zkoušek v laboratoři.....	45
5.4.4 Specifikace dynamických laboratorních zkoušek.....	47
6 Praktická realizace výpočtu modelu T-matrix na lokalitě Kosov.....	50
7 Výsledky výpočtů a jejich diskuse.....	58
8 Závěr.....	64
Seznam použité literatury.....	65

Abstrakt (CZ)

Práce se zabývá využitím T-matrix modelu k odhadu statických modulů hornin ve vrtu z dynamických modulů stanovených pomocí akustické karotáže. Navrženým postupem je možné stanovit hodnoty modulů, které jsou blízké hodnotám statických modulů, které by byly zjištěny zatěžovací zkouškou.

Postup je postavený na úvaze, že neporušená hornina o dostatečné pevnosti v prostém tlaku σ_c a dostatečně vysoké hodnotě statického Youngova modulu E_s , vykazuje víceméně lineární elastické chování. V takovém případě jsou hodnoty statických a dynamických modulů totožné. Tato skutečnost byla experimentálně ověřena pro horniny s hodnotami σ_c a E_s v řádu vyšších desítek MPa respektive GPa. V případě přítomnosti porušení v takovéto hornině se ale její chování stává nelineárně elastickým. Míra této nelinearity roste s rostoucí mírou porušení. Důsledkem toho je, že mezi hodnotami statických a dynamických modulů vznikne rozdíl.

Ke stanovení tohoto rozdílu je využito T-matrix modelu. To je model založený obecně na anizotropní matici s elipsoidálními inkluzemi, které se mohou navíc navzájem ovlivňovat. Výsledkem modelování jsou hodnoty elastických konstant, které se označují jako efektivní moduly. Tyto moduly zahrnují i vliv pórovitosti a poruch v hornině, a tak slouží jako odhad statických modulů.

Vstupními daty pro zkonstruování a výpočet T-matrix modelu jsou, kromě dynamických modulů z akustické karotáže, i data ze souboru dalších karotážních metod, které přinášejí informaci o litologii a jejich změnách podél osy vrtu a údaje o porozitě a hustotě zastížených hornin. Dále jsou použity statické moduly stanovené na vybraných vzorcích z vrtného jádra a akustický sken stěny vrtu, ze kterého je interpretována přítomnost trhlin.

Vrtný profil je na základě výsledků interpretace karotážních dat zjednodušen a rozdělen na kvazihomogenní vrstvy. V rámci těchto vrstev jsou z vrtných jader vybrány jednotlivé vzorky, na kterých jsou následně stanoveny statické moduly jednoosou zatěžovací zkouškou v laboratoři. Z těchto statických modulů a rozdělení do vrstev je sestaven výchozí vrstevnatý model. Stanovená porozita podél osy vrtu je společně s nalezenými trhlínami vyhodnocena do tzv. porozity efektivního média.

Ověření navrženého postupu bylo provedeno na experimentálním vrtu, vyhloubeném v silurských vápencích. Z vrtného jádra byly odebrány kromě vzorků pro sestavení a kalibraci modelu navíc i kontrolní vzorky, které posloužily pouze k ohodnocení funkčnosti modelu. Spočtené hodnoty efektivních modulů v příslušné hloubkové úrovni byly porovnávány s hodnotami statických modulů stanovených laboratorně na kontrolních vzorcích. Porovnání dynamických a efektivních hodnot Youngova modulu s hodnotami statických modulů ukázalo, že u většiny kontrolních vzorků došlo ke zmenšení původního rozdílu, který činil až 40 % hodnoty statického modulu, na méně než 10%.

Abstract (EN)

This thesis deals with an approximation of static moduli in wells from dynamic moduli determined by acoustic well logging using T-matrix model. Proposed approach makes possible to determine moduli values, which are close to values of static moduli, which would be determined by loading tests.

This approach is based on an idea, that an intact rock with sufficiently high compressional strength σ_c and sufficiently high value of static Young's modulus E_s , manifests more or less linear elastic behaviour. In such case, the values of static and dynamic moduli are identical. This fact has been experimentally verified for rocks with values of σ_c and E_s in order of higher tens of MPa and GPa respectively. In case of a rock damage presence in such rock, its behaviour becomes nonlinearly elastic. The amount of nonlinearity is proportional to increasing amount of rock damage. This results in the difference between values of static and dynamic moduli.

T-matrix model is used to quantify this difference. This model is based on an anisotropic rock matrix with ellipsoidal inclusions. These inclusions can affect each other. The result of this model calculation is a group of values of elastic constants, which we call effective moduli. These effective moduli include the effect of porosity in the rock as well and they serve as an estimate of static moduli.

Input data for T-matrix model construction and calculation are based on several following parameters. Firstly it is acoustic well logging providing dynamic moduli. Secondly it is data from the set of other well logging methods which provide information about lithology and its changes along the borehole and porosity and density data of rocks in which the borehole is situated. Further on, static moduli determined by loading tests on selected core samples and acoustic scan of borehole wall from which presence of cracks is interpreted, are used.

Based on results of well logging data interpretation, the borehole profile is simplified and divided into quasihomogeneous layers. Within these layers, individual core samples are selected on which static moduli are determined by uniaxial static loading tests in laboratory. By combination of these static moduli and layered profile, the initial layered model is put together. Determined porosity of rock along the borehole is interpreted, in combination with detected cracks, into so called effective medium porosity.

Verification of proposed approach has been carried out on experimental well, drilled in Silurian limestones. Aside from core samples used for putting together the model and its calibration, a set of control samples has been taken. These served for model functionality evaluation only. Effective moduli values calculated in depths respective to control samples have been compared to static moduli values, determined on these samples in laboratory. The final comparison of dynamic and effective values of Young's modulus with static values showed significant mitigation of initial difference. For majority of control samples, the difference dropped from initial value of around 40 % of static modulus value, to less than 10 %.

1 Úvod

Mechanické vlastnosti horninového prostředí jsou jedním z parametrů, které jsou nezbytné pro projektovou přípravu inženýrských děl na povrchu země i v podzemí. Proto je věnována velká pozornost i metodám, kterými se tyto parametry stanovují. Podrobný rozbor klasických metod testování hornin lze nalézt v (Hawkes, Mellor 1970). Zejména v případě náročných staveb je důležitá spolehlivost a reprezentativnost výsledků a současně při výběru metod stanovení těchto parametrů rozhoduje i jejich časová a finanční náročnost. Jednou z často používaných metod je akustická karotáž se záznamem plného vlnového obrazu (FWS - Full Wave Sonic). Jejím výsledkem je stanovení rozložení hodnot dynamických modulů podél profilu vrtu. Z inženýrského hlediska je ale stále vyžadováno zejména stanovení hodnot deformačních (statických) modulů (Fei et al. 2016, Fjær, Holt 1994, Zhang, Bentley 2005, Karam 2004, Holt et al. 2013) které by v daném místě byly naměřeny polní nebo laboratorní zatěžovací zkouškou, protože tyto zkoušky přímo simulují namáhání horninového masivu stavbou nebo, v případě rezervoáru, těžbou. K tomuto účelu jsou navrhovány a používány různé metody přepočtu hodnot dynamických modulů na odpovídající hodnoty deformačních (statických) modulů. V praxi využívanou možností je využití vztahu získaného ze vzájemné korelace statických a dynamických modulů, případně ze vzájemné korelace dynamických modulů s porozitou, uváděné například v pracích (Grujić 1974, Fjær 2009).

Teorie, na jejímž základě jsou vyhodnocována naměřená data z dynamických měření i statických zkoušek, je v naprosté většině případů mechanika elastického kontinua ve formě lineárního Hookeova zákona. Některé horninové materiály se ale od tohoto lineárního chování významně odlišují. Při nelineárním chování se moduly jeví jako závislé na metodě použité k jejich stanovení, a to je i příčinou rozdílu mezi statickými a dynamickými moduly.

V této práci je popsán model horninového prostředí tvořený pevnými horninami s lokálním porušením puklinami nebo systémy puklin. Vlivem těchto nehomogenit s rostoucím přetvořením narůstá míra nelinearity elastického chování materiálu a od určité velikosti deformace již nejsou s dostatečnou přesností splněny podmínky platnosti lineárního Hookeova zákona.

Navržený model proto vychází v první řadě z dynamických modulů, stanovených pomocí FWS. Na základě výsledků dalších karotážních metod je model doplněn o rozložení porozity podél vrtného profilu a rovněž o polohu a klasifikaci puklin nebo puklinových zón.

Vzhledem k faktu, že měření ve vrtu poskytuje data pouze ve směru osy vrtu, je model koncipován jako vrstevnatý s vrstvami kolmými na osu vrtu. Lze říci, že na vzdálenost hloubky průniku použitých metod do stěny vrtu tato geometrie většinou s dostatečnou přesností platí. Míra nelinearity elastického chování zkoumané horniny je do modelu vnesena ve formě modulů zjištěných statickými jednoosými zkouškami na vzorcích z vrtného jádra. Následně je výpočet uskutečněn pomocí T-matrix modelu, kdy pro jednotlivé hloubkové úrovně dynamického karotážního FWS měření je zahrnut vliv nehomogenit a hodnota dynamického modulu je o tyto vlivy "opravena". Výslednou hodnotu modulu potom nazýváme hodnotou efektivní. Tato hodnota je blízká hodnotě statického modulu.

Celý postup je prezentován na příkladu konkrétního experimentálního měření na lokalitě lom Kosov u Berouna, který leží ve středních Čechách. Ověření správnosti výpočtu efektivních modulů je provedeno jejich porovnáním se skutečně stanovenými statickými moduly.

Celý výše popsany problém byl, včetně návrhu řešení tvořícího náplň této práce, prezentován na konferenci International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (ICNEM) v roce 2012 (Chalupa 2012). Výsledky byly dále publikovány v časopisech Acta Montanistica Slovaca (Chalupa et al. 2017) a International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences (Chalupa et al. 2018).

2 Statické a dynamické moduly hornin

Dynamickými moduly se zde rozumí moduly zjištěné měřením na principu šíření elastické vlny materiálem při použití velmi malého přetvoření (v řádu 10^{-6} ; (Stewart et al. 1980) a způsobené silou trvající pouze po krátký časový interval, daný frekvencí elastické vlny. Pro měření v laboratoři nebo in-situ bývají používány ultrazvukové či sonické frekvence, případně i nižší frekvence, vše záleží na rozměrech vzorku a účelu měření. Tato měření jsou snadno realizovatelná a k vyhodnocení používají teorii elastického kontinua, nejčastěji ve formě aproximace materiálu pomocí homogenního izotropního média chovajícího se podle lineárního Hookeova zákona. Takto bylo postupováno při využívání seismických měření ke stanovení elastických modulů už od třicátých let dvacátého století (např. Zisman 1933a, Zisman 1933b, Ide 1936). Ve výše zmíněném případě dynamických měření v rámci seismického průzkumu in-situ má tento přístup často

nevelkou odchylku od reálného chování horniny v neporušeném stavu. Vzhledem k vlnovým délkám vln, které jsou v tomto odvětví obvykle využívány (desítky metrů a větší) lze očekávat, že se vliv trhlin na časech průchodu elastických vln znatelně neprojeví.

Statickými moduly jsou naproti tomu moduly zjištěné měřeními při řádově větších přetvořeních (přetvoření v řádu až 10^{-2} ; Karam 2004, Fjær 2009), kdy silové působení na materiál probíhá v řádu minut. Měření je typicky prováděno za užití lisu a je možné je provádět v laboratoři nebo in-situ. Hojným způsobem určování statických elastických modulů jsou laboratorní jednoosé zatěžovací zkoušky. Díky velkému rozšíření v praxi mají tato měření podrobně propracovanou metodiku (Hawkes, Mellor 1970, Gercek 2007). Podmínka malé odchylky od lineárního chování popsaného lineárním Hookeovým zákonem zde často není platná přes jakýkoli širší interval napětí.

Při srovnání výsledků těchto dvou způsobů měření je v případě hornin většinou doložen nelineární průběh stress-strain závislosti v případě statické zkoušky a rozdíl v absolutních hodnotách elastických modulů, přestože je měření provedeno na totožném materiálu.

Příčiny tohoto rozdílu jsou podrobně popsány v práci (Fjær 2019). Fjær zde definuje 5 vlivů, které jsou příčinou výše popsaného rozdílu. Jde jednak o vlivy podmíněné postupem provedení zkoušky vedoucí ke stanovení modulu - rychlost přetváření, podmínky drénování vzorku, velikost přetvoření dosaženého během zkoušky. Dále jsou definovány vlivy podmíněné vlastnostmi zkoumané horniny - vliv heterogenit a anizotropie. Tyto vlivy v případě většiny standardně prováděných statických zatěžovacích zkoušek působí společně, izolovaně je lze zkoumat pouze při provádění zkoušek speciálně za tím účelem navržených. Fjær zde doplňuje výsledky svého předchozího zkoumání rozdílů mezi dynamickými a statickými moduly u slabě zpevněných pískovců (Fjær 2009), kdy jako dominantní vliv uváděl rozdílnou míru přetvoření, ke kterému dojde při těchto dvou způsobech zkoumání elastických vlastností.

Při pohledu na průběh stress-strain křivky stanovené pomocí jednoosé statické zatěžovací zkoušky a porovnání hodnot statických modulů z ní stanovených s hodnotami odpovídajících modulů dynamických lze dobře pozorovat projevy působení výše uvedených vlivů. Rozdíl v hodnotách statických a dynamických modulů je z velké části zapříčiněn skutečností, že velikosti přetvoření dosažené během měření jsou ve statickém případě o několik řádů vyšší, než v případě měření dynamického. Rozdíl vznikne v momentě, kdy na širším intervalu napětí, použitém během

statického měření, přestanou být s dostatečnou přesností splněny podmínky platnosti lineárního Hookeova zákona (Tutuncu et al. 1998). Dílčím, ale důležitým faktorem ovlivňujícím tvar stress-strain křivky může být přítomnost trhlin, které se v reakci na změny napětí mohou otvírat a zavírat. Různé trhliny se aktivují při různých napětích a jejich prostřednictvím může do hry vstoupit i historie předchozího namáhání a přetváření horniny (Walsh 1965a). To se děje často například u porušených hornin obsahujících trhliny nebo v případě slabě zpevněných hornin.

Lze říci, že v naprosté většině případů jsou hodnoty modulů stanovené dynamickou zkouškou vyšší než hodnoty získané statickými metodami (Karam 2004, Tutuncu et al. 1998, Martínez-Martínez et al. 2012). Může se ovšem stát, že tomu tak není. (Lam dos Santos et al. 2013) porovnávali výsledky stanovování elastických modulů umělých kamenů a opakovaně získali jednoosou zkouškou vyšší hodnoty statických modulů oproti modulům stanoveným dynamicky pomocí měření časů průchodu ultrazvuku vzorkem. Rozdíl překračoval 10 % hodnoty statického modulu. Konkrétně šlo o umělé kameny složené z polymerové matrix obsahující minerální zrna.

Pokud jsou horniny kompaktní, je experimentálně potvrzeno, že shoda mezi dynamickými a statickými moduly může být významná (Zisman 1933a, Ide 1936, Cheng, Johnston 1981, Al-Shayea 2004, Ciccotti, Mulargia 2004). V takovém případě lze bez problému použít ke stanovení statických modulů teorii elastického kontinua a lineární Hookeův zákon (Zisman 1933b). Čím je hornina kompaktnější, tím je shoda lepší. Při velmi nízkém stupni porušení horniny je tato shoda patrná už při relativně nízkých napětích v rámci statické zkoušky, jelikož nedochází k výraznému ovlivnění počáteční části stress-strain křivky během postupného uzavírání trhlin a dokud nezačne při vyšších napětích docházet k porušování vzorku, průběh celé křivky je velmi blízký lineárnímu. Tento fakt je potvrzen analogií se strojírenskou praxí, kde jsou proměřovány velmi kompaktní materiály jako ocel a běžně je užíváno obou mechanismů měření se zcela shodným výsledkem (Ledbetter 1993). Podle (Tutuncu et al. 1998) se u sedimentárních hornin objevuje závislost hodnot modulů na frekvenci a velikosti přetvoření použitých k jejich stanovení. Zkoumány byly porézni pískovce z různých lokalit, v suchém a saturovaném stavu. Rozdíl mezi hodnotami dynamických a statických modulů pak roste s mírou porušení horniny (Fjær, Holt 1994, Pola et al. 2014). V práci (Pola et al. 2014) je tato skutečnost názorně demonstrována na rychle zvětrávajících vulkanitech. Příčinou vyšší hodnoty dynamického modulu oproti hodnotě statického může být například

skutečnost, že pokud jsou při statické zkoušce na počátku zatěžovacího cyklu trhliny otevřené, stress-strain závislost je do značné míry řízena tuhostí trhlín během jejich postupného zavírání. Teprve v momentě jejich uzavření je míra přetvoření vzorku v důsledku změny napětí určována elastickými moduly původního materiálu měřené horniny. Naproti tomu prozařování elastickou vlnou o dostatečně vysoké frekvenci není přítomností trhlín ovlivněno (Pyrak-Nolte, Nolte 1992, Worthington 2008, Vilhelm et al. 2013). Výsledkem je odpovídající rozdíl mezi hodnotami statických a dynamických elastických modulů (Gercek 2007, Kujundzić, Grujíc 1966, Olsen et al. 2004, Heap et al. 2014). Pokusy o nalezení přímého vztahu mezi statickými a dynamickými moduly vedly k výsledkům v podobě empirických rovnic (van Heerden 1987, Eissa, Kazi 1988, Wang 2000 - souhrn těchto vztahů je uveden v Karam 2004) nebo k jistému druhu kalibrace postavené na vzájemné korelaci hodnot statických a dynamických modulů pro daný materiál s velice lokální platností (Grujíc 1974, Jizba 1991, Al-Shayea 2004, Fjær 1999, Ameen et al. 2009, Martínez-Martínez et al. 2012). Je ovšem nutné poznamenat, že pokud jsou vztahy výše uvedeného typu k dispozici, jejich velmi opatrným použitím je možné dosáhnout dobrých výsledků, jako publikovali např. (Rasouli, Sutherland 2013).

Pokud porovnáme obtížnost a časovou náročnost provedení statického a dynamického měření, dynamická měření jsou zpravidla snáze realizovatelná (Stan-Kłeczek 2016, Konečný et al. 2015). Platí to jak pro laboratorní, tak in-situ měření a rozdíl v obtížnosti může být pro běžně používané postupy i obvyklé přístrojové vybavení značný.

Z hlediska velikosti, a tedy reprezentativnosti měřeného vzorku, je patrná výhoda in-situ zkoušek oproti laboratorním. Terénní měření postihuje obvykle znatelně větší objem horniny, než zkušební tělíska v laboratoři, a tak je potlačen možný vliv takových heterogenit v hornině, které v dimenzích zkušebního tělíska v laboratoři nelze postihnout. Při terénním měření navíc odpadá možná změna vlastností materiálu vzorku způsobená při jeho odebrání a také odpadají změny, ke kterým může dojít v časovém intervalu mezi odebráním vzorku a provedením laboratorního měření. Naproti tomu nevýhodou in-situ zkoušek bývá zpravidla nižší přesnost v porovnání s laboratorním měřením. V případě laboratorních měření zkouška probíhá za jasně definovaných podmínek, ale vždy je nutné pečlivě posuzovat podobnost laboratorních a terénních podmínek.

Podle (Sone, Zoback 2013) proto nemusí laboratorně stanovené moduly plně odpovídat modulům, které by hornina vykazala v podmínkách in-situ.

Vypovídací hodnotu všech typů měření lze navýšit rozšířením statisticky vyhodnocovaného souboru měření. Tak je možné například snížit vliv vzorků nebo míst v masivu s lokálně anomálními vlastnostmi. S ohledem na náročnost provedení bývá snazší navyšovat počet realizovaných dynamických zkoušek, než statických. Konkrétně měřením akustické karotáže se záznamem plného vlnového obrazu (FWS) lze získat velmi početný soubor hodnot, v tomto případě dynamických modulů, s krokem měření tak jemným, že lze záznam přes vrtný profil považovat v podstatě za spojitý (viz např. Bała, Jarzyna 1996). Tato metoda je vzhledem k množství dat, které je schopna poskytnout, časově mnohem efektivnější než metody statické a podstatná část vlivů spojených s problematikou kvality vzorků je v tomto případě potlačena kvantitou získaných dat a nemá šanci se projevit.

Z těchto důvodů existuje již delší dobu snaha najít souvislost mezi statickými a dynamickými moduly, která by umožňovala z dynamických modulů stanovovat moduly statické. Tímto problémem pro různé typy materiálů a za odlišných podmínek se zabývá například práce (Martínez-Martínez et al. 2012) na karbonátech (vápencích, mramorech, travertinech a dolomitech). Autoři provedli stanovení dynamického a statického Youngova modulu na horninách ve zdravém stavu a poté ještě ve stavu "zvětralém", který byl dosažen vystavením vzorku tepelnému namáhání a krystalizačním tlakům Na_2SO_4 . Následně je prezentován vztah pro stanovení statického Youngova modulu, kde je původní dynamická hodnota korigována na základě experimentálně stanoveného koeficientu útlumu seismického signálu. Práce (Zhang, Bentley 2005) zkoumá tento problém z hlediska Poissonova čísla na více typech hornin. Konkrétně je zde studován vliv pórů a jejich tvaru na změnu hodnoty Poissonova čísla oproti hodnotě Poissonova čísla původní matrix horniny bez pórů. Dále je zde zkoumána vzájemná korelace mezi Youngovým modulem a Poissonovým číslem. Výsledky ukazují, že tyto dva parametry ve většině případů nekorelují a pouze u některých hornin je možné určitý stupeň korelace pozorovat. Platí to ovšem pouze pro horniny v suchém stavu a v oboru vysokých hodnot Youngova modulu, v tomto případě vyšších než cca 50 GPa. V práci (Fjær, Holt 1994) je problém rozpracován z hlediska vlivu prokluzujících trhlin ve smyslu (Walsh 1965a), který se projevuje až při vyšších napětích. Takové

trhliny a napětí se mohou v hornině v důsledku tektonického vývoje masivu kumulovat. Tato napětí mají potom vliv na stav trhlin v masivu a jejich prostřednictvím mohou významně ovlivnit i rychlost šíření elastických vln v masivu a její anizotropii. Pokud je v těchto a podobných pracích nabídnuto nějaké řešení problému, jde o doporučení, že za předpokladu dostatku experimentálních dat, je možné pro konkrétní lokalitu nalézt funkční korelační vztah mezi dynamickými a statickými moduly nebo porozitou.

3 Porušení horninového masivu a jeho vliv na moduly

Výchozí myšlenka přepočtu dynamických modulů na statické je založena na analýze různého vlivu porušení na stress-strain charakteristiku zatěžovaného materiálu a na šíření elastických vln v něm. Lze vycházet z faktu, že při interpretaci elastických modulů z FWS v hornině je možné v neporušených intervalech považovat rozdíl mezi statickými a dynamickými hodnotami za zanedbatelný a dynamické hodnoty zde reprezentují skutečné vlastnosti horniny i z hlediska statických zkoušek. Toto bylo potvrzeno například výsledky měření provedených v rámci této disertační práce v roce 2011 (viz kapitola 5.1.1). Naproti tomu tam, kde hornina není neporušená, se dynamické a statické moduly odlišují. Místa porušení mohou být spolehlivě indikována pomocí různých geofyzikálních metod. Pokud je prováděno karotážní měření, obvykle to není jen metoda FWS samostatně, ale celý komplex karotážních metod registrujících různé vlastnosti horninového masivu, postavených na různých fyzikálních principech. Pomocí vhodných metod lze měřit ty vlastnosti horninového masivu, které se mění při porušení a zvětrávání. Tyto vlastnosti identifikují a vymezí porušené intervaly, kde je očekáván podstatný rozdíl mezi hodnotami statických a dynamických elastických modulů (Han 1986, Sams, Andrea 2001, Vanorio et al. 2003, Agersborg et al. 2009 a jiní).

Z hlediska identifikace porušení horninového masivu pomocí geofyzikálních metod je vhodné rozdělit ho do dvou kategorií. První je mechanické porušení, minerální složení v tomto případě zůstává nezměněné. Tento typ porušení se projevuje přítomností trhlin různého měřítko. Popraskání se projevuje změnami v objemové hmotnosti (hustotě), porozitě, elektrické vodivosti nebo odporu (v případě, že výplň pórů má odlišnou vodivost resp. odpor než hornina), útlumu a rychlostech seismických vln (záleží na velikosti porušené zóny vzhledem k vlnové délce) a trhliny

je možné detekovat ve stěně nezapaženého vrtu (akustické a případně kamerové karotážní metody viz kapitola 5.3.1). Přítomnost dlouhých tenkých trhlin v jinak lineárním elastickém médiu podstatně mění jeho objemovou stlačitelnost (Walsh 1965b). Taktéž mechanismus klouzání stěn trhlin po sobě je významným činitelem měnícím mechanické vlastnosti (Walsh 1965a).

Druhou kategorií je fyzikálně chemické porušení - zvětrávání. V tomto případě dochází ke změnám v minerálním složení. V důsledku toho může docházet k objemovým změnám, kdy zpravidla poklesne hustota a může vzrůst porozita (Gupta, Sehagiri Rao 2000, Bozkurtoğlu et al. 2013), nebo se zvýší obsah jílových minerálů, což se může projevit jako zvýšení gama aktivity a vodivosti (resp. snížení měrného elektrického odporu) horniny. Často se vyskytující jílové minerály jako např. illit váží v krystalové struktuře draslík a jsou relativně dobře vodivé pro elektrický proud. Mohou vzniknout zvětráváním horniny in-situ nebo mohou být do rozevřených puklin při povrchu zaneseny prosakující vodou. Prostorový rozsah tohoto typu porušení je většinou výrazně větší než rozsah lokálních diskontinuit a trhlínových zón spojených s mechanickým porušením, jeho projevy jsou patrné na poklesu rychlostí elastických vln a vzrůstu jejich útlumu (Pola et al. 2014).

Problematika zvětrávání je důkladně rozpracovaná v knize (Bridge, Demicco 2008). (Ceryan 2012 a Nishiyama, Kusuda 1996) kromě jiných parametrů používají změny v rychlostech podélných vln, porozity a objemové hmotnosti pro kvantifikaci míry zvětrání horniny.

Obě kategorie porušení se málokdy objevují odděleně, obvykle se kombinují.

Porušení trhlínami registruje hustotní karotáž jako změny hustoty. V případě zvětrávání jsou do registrovaných změn hustoty ještě promítnuty změny minerálního složení. Nezávisle na hustotní karotáži je pomocí neutron-neutron karotáže registrováno porušení jako změny porozity horniny. Sonda FWS v případě přítomnosti porušení zaznamená pokles rychlostí seismických vln a zpravidla i vzrůst jejich útlumu. Akustický televizor ABI lokalizuje tvar a polohu nehomogenit, nejčastěji trhlin a žil. Odporová nebo indukční karotáž je schopna identifikovat navětralé intervaly jako oblasti zvýšené vodivosti.

4 T-matrix model

K zavedení vlivu porušení do modelu původně neporušeného elastického prostředí je možné využít T-matrix model, který je popsán v (Jakobsen et al. 2003a, Jakobsen et al. 2003b a Jakobsen 2012). K podobnému účelu by šlo využít i jiné modely, např. Differential Effective medium (DEM), průměry Voigt/Hill/Reuss, - viz (Mavko et al. 2009). Model T-matrix byl vybrán, protože je obecnější než například metoda DEM (Differential Effective Medium - Hornby et al. 1994, Berryman et al. 2002). Metodu DEM je navíc možné za určitých předpokladů z T-matrixu odvodit (Jakobsen et al. 2003a). Výpočet pomocí T-matrixu navíc stabilně funguje při vyšších koncentracích inkluzí, než pro jaké lze bezproblémově použít model DEM. V případě volby výpočtu pomocí řešení zvaného OPA (Optical Potential Approximation), které vede na řešení typu Hashin-Strikman, se výsledek blíží výsledkům dobře známých modelů Voigt/Hill/Reuss, které použili například (Gommesen et al. 2007 a Hossain et al. 2012). T-matrix byl vybrán na úkor těchto velmi rozšířených modelů z důvodu, že jeho teoretické pozadí je mnohem lépe fyzikálně podloženo než zejména Hillův průměr. Dalším důvodem pro jeho použití je, že jeho implementace např. do prostředí MATLAB je relativně jednoduchá.

T-matrix model vychází z teorie rozptylování kvant a umožňuje modelovat médium, uvnitř kterého se nachází konečné množství inkluzí určitého geometrického tvaru a hodnot elastických modulů. Těchto typů inkluzí může být více a mohou se mezi sebou lišit tvarem, orientací v prostoru i hodnotami modulů.

Inkluze mohou reprezentovat různé typy trhlin (penny-shaped, thin cracks, apod.), zploštěné jílové částice, izometrická zrna prachu a písku nebo jiné částice heterogenní vzhledem k elastickým modulům okolní matrix. S použitím znalostí elastických modulů všech zahrnutých inkluzí a matrix je pak možné určit efektivní elastické moduly takto sestaveného kompozitu.

4.1 Teoretický popis modelového výpočtu

Model prostředí vychází z lineárního vztahu mezi napětím a deformací. Jelikož je prostředí nehomogenní, je třeba uvažovat, že složky elastického tenzoru čtvrtého řádu C jsou funkcemi souřadnic x v prostoru. Výpočet je postaven na počítání odchylek složek elastického tenzoru C od libovolného zvoleného referenčního elastického tenzoru $C^{(0)}$. Pokud uvažujeme, že lokální

elastický tenzor $C(x)$ se mění na vzdálenostech dostatečně malých ve srovnání s rozměry vzorku nebo vlnovou délkou použité elastické vlny a tudíž se materiál v tomto měřítku chová jako homogenní, můžeme napsat

$$C(x) = C^{(0)} + \delta C(x) \quad (1)$$

Základní vztah napětí $\sigma(x)$ - přetvoření $\epsilon(x)$ lze zapsat jako

$$\sigma(x) = C(x)\epsilon(x)$$

Za předpokladu, že rovnice (1) platí pro makroskopické měřítko, lze provést průměrování $\sigma(x)$ a $\epsilon(x)$ v makroskopicky homogenním materiálu a dostaneme

$$\langle \sigma(x) \rangle = C^* \langle \epsilon(x) \rangle \quad ,$$

kde C^* reprezentuje tenzor efektivních elastických modulů (odpovídá $C(x)$ v (1)), respektive

$$\langle \sigma \rangle = C^{(0)} \langle \epsilon \rangle + \langle \delta C \epsilon \rangle \quad (2)$$

(špičaté závorky reprezentují tenzor zprůměrovaný v prostoru, který díky tomu již nezávisí na prostorových souřadnicích x). Zde zavedeme lokální tenzor $T(x)$, čtvrtého řádu jako

$$\delta C(x)\epsilon(x) = T(x)\epsilon^{(0)} \quad , \quad (3)$$

takže dosazením (3) do (2) obdržíme

$$\langle \sigma \rangle = C^{(0)} \langle \epsilon \rangle + \langle T \rangle \epsilon^{(0)}$$

(tenzor $\epsilon^{(0)}$ je definován analogicky k tenzoru $C^{(0)}$ uvedenému výše). Tenzor $T(x)$ vyjádřený jako

$$T(x) = \delta C(x) + \delta C(x) \int_{\Omega} G^{(0)}(x-x') T(x') dx'$$

se nazývá T-matrix. $G^{(0)}(x-x')$ je Greenova funkce přes oblast Ω . Když teď zjednodušíme předpoklad, že $C(x)$ se libovolně mění v prostoru na to, že $C(x)$ je v prostoru po částech konstantní, dostaneme se ke konceptu inkluzí uzavřených v okolním elastickém médiu.

Populace inkluzí může být rozdělena do rodin indexovaných $r = 1..F$. V každé z rodin jsou zařazeny inkluze se společným tenzorem elastických modulů $C^{(r)}$, geometrickým tvarem a prostorovou orientací. V případě, že máme n inkluzí typu r , které se nacházejí v pozicích α (respektive zabírají oblasti $\Omega_{\alpha}^{(r)}$ z prostoru Ω), odchylku složek elastického tenzoru definovanou v rovnici (1) lze vyjádřit

$$\delta C(x) = \sum_{r=1}^F \sum_{\alpha=1}^{n^{(r)}} \delta C_{\alpha}^{(r)}(x) \quad ,$$

kde

$$\delta C_{\alpha}^{(r)}(x) = \delta C^{(r)}(x) \theta^{(r)}(x - x_{\alpha}^{(r)})$$

a

$$\delta C^{(r)} = C^{(r)} - C^{(0)} \quad ,$$

kde

$\theta^{(r)}(x - x_{\alpha}^{(r)})$ je charakteristická funkce oblasti $\Omega_{\alpha}^{(r)}$, což znamená že $\theta^{(r)}(x - x_{\alpha}^{(r)}) = 1$ pokud $x \in \Omega_{\alpha}^{(r)}$, jinak $\theta^{(r)}(x - x_{\alpha}^{(r)}) = 0$.

Ve smyslu T-matrix tenzoru analogicky obdržíme

$$\delta T(x) = \sum_{r=1}^F \sum_{\alpha=1}^{n^{(r)}} \delta T_{\alpha}^{(r)}(x) \quad ,$$

kde

$$T_{\alpha}^{(r)}(x) = T(x) \theta^{(r)}(x - x_{\alpha}^{(r)}) \quad . \quad (4)$$

Kombinací výše uvedených rovnic můžeme zapsat řešení pro skupinu tvořenou dvěma tělesy založené na dvoubodové statistice. V našem případě jde o dvě inkluze označené indexy α , r , respektive β , s (definovány pro druhou inkluzi analogicky k α , r) a řešení můžeme zapsat jako

$$T_{\alpha}^{(r)}(x) \approx t_{\alpha}^{(r)}(x) + t_{\alpha}^{(r)}(x) \int_{\Omega} G^{(0)}(x - x') \sum_{s, \beta} t_{\beta}^{(s)}(x') (1 - \delta_{rs} \delta_{\alpha\beta}) dx' \quad ,$$

kde nově zavádíme takzvaný přechodový tenzor (t-matrix)

$$t_{\alpha}^{(r)}(x) = \delta C_{\alpha}^{(r)}(x) + \delta C_{\alpha}^{(r)}(x) \int_{\Omega} G^{(0)}(x - x') t_{\alpha}^{(r)}(x') dx' \quad . \quad (5)$$

Tento tenzor je uvnitř inkluze konstantní. V případě jediné inkluze je přechodový tenzor analogický k T-matrix tenzoru popsanému výše a lze s ním zacházet stejně. Výpočet hodnot Greenovy funkce je zde odvozen z práce (Kroner 1986), kde je provedeno odvození pro sférický tvar inkluze, obecnější odvození pro sferoidní tvar inkluze je provedeno s použitím vzorců odvozených v (Mura 1982). V případě jediné inkluze lze tedy s použitím přechodového tenzoru přepsat rovnici (3) jako

$$\delta C_{\alpha}^{(r)}(x) \epsilon_{\alpha}^{(r)}(x) = t_{\alpha}^{(r)}(x) \epsilon_{\alpha}^{(0)} \quad ,$$

kde $\epsilon_{\alpha}^{(r)}(x)$ je tenzor přetvoření pro jedinou inkluzi typu r obklopenou homogenním médiem (matrix). Potom kombinací rovnic (4) a (5) a integrací přes Ω , dostaneme řešení

$$t^{(r)} = (I - \delta C^{(r)} G^{(r)})^{-1} \delta C^{(r)} \quad ,$$

kde I je jednotkový tenzor čtvrtého řádu. Pokud vezmeme v úvahu větší počet inkluzí a použijeme výše zmíněný dvoubodový přístup, dostaneme se k

$$T(x) \approx T_1(x) + T_2(x) \quad .$$

Na cestě ke stanovení efektivních modulů potřebujeme opět vypočítat zprůměrované tenzory

$$\langle T \rangle \approx \langle T_1 \rangle + \langle T_2 \rangle \quad ,$$

kde

$$\langle T_1 \rangle = \sum_r t^{(r)} v^{(r)} \quad (6)$$

a

$$\langle T_2 \rangle = \sum_r \sum_s t^{(r)} \int_{\Omega} G^{(0)}(x - x_{\alpha}^{(r)}) \langle \bar{\theta}^{(r)}(x) \bar{\theta}^{(s)}(x') \rangle t^{(s)} dx' - \sum_r t^{(r)} \tilde{G}^{(r)} t^{(r)} \quad . \quad (7)$$

$\bar{\theta}^{(r)}(x)$ v (7) lze vyjádřit jako

$$\bar{\theta}^{(r)}(x) = \sum_{\alpha} \theta^{(r)}(x - x_{\alpha}^{(r)}) \quad ,$$

a jde o indikační funkce pro inkluze typu r (fázi r). $v^{(r)}$ v (6) je relativní objemová frakce

fáze r

$$v^{(r)} = \langle \bar{\theta}^{(r)}(x) \rangle \quad .$$

Greenova funkce v (7)

$$\tilde{G}^{(r)} = v^{(r)} G^{(r)} \quad .$$

Výchozím bodem pro stanovení efektivních modulů je rovnice

$$(\delta C^*)^{-1} = \langle T \rangle^{-1} + \bar{G} \quad .$$

Za předpokladu, že

$$\delta C^* \approx \delta C_T^*$$

lze odvodit rovnici

$$C_T^* = C^{(0)} + \sum_r t^{(r)} v^{(r)} \left\{ I + \left[\sum_s t^{(s)} v^{(s)} \right]^{-1} \sum_u \sum_v t^{(u)} v^{(u)} G_d^{(uv)} t^{(v)} v^{(v)} \right\}^{-1} \quad . \quad (8)$$

Zde je Greenova funkce

$$G_d^{(uv)} = \int_{\Omega_d^{(uv)}} G^{(0)}(x - x') dx'$$

vypočítávána s podmínkou $x \in \Omega_d^{(uv)}$, kde $\Omega_d^{(uv)}$ je "ochranný" elipsoid zamezující

vzájemnému překrývání inkluzí. Rovnice (8) reprezentuje v tomto případě takzvanou OPA

aproximaci (optical potential approximation), kde efektivní moduly odpovídají optickým potenciálům. OPA řešení je v explicitním tvaru, není nutné iterovat. Tato rovnice též naznačuje, že efekt prostorové distribuce vstupující do výpočtu ve členu objemových frakcí je efektem vyššího řádu než efekt tvaru inkluzí. Toto je patrné po úpravě rovnice (8) na

$$C_T^* = C^{(0)} + \sum_r t^{(r)} v^{(r)} - \sum_r \sum_s t^{(r)} v^{(r)} G_d^{(rs)} t^{(s)} v^{(s)} + O[(v^{(r)})^3] , \quad (9)$$

kde O je tzv. Big O notace, která vyjadřuje rychlost růstu funkce neboli její řád. Pokud předpokládáme, že prostorová distribuce je stejná pro všechny páry interagujících inkluzí zjistíme, že

$$G_d^{(rs)} = G_d \quad (10)$$

pro všechna r a s . Rovnice (8) a (9) se potom zjednoduší na

$$C_T^* = C^{(0)} + \left[\sum_r t^{(r)} v^{(r)} \right] \left\{ I + G_d \left[\sum_s t^{(s)} v^{(s)} \right] \right\}^{-1}$$

a

$$C_T^* = C^{(0)} + \sum_r t^{(r)} v^{(r)} - \left(\sum_r t^{(r)} v^{(r)} \right) G_d \left(\sum_s t^{(s)} v^{(s)} \right) + O[(v^{(r)})^3] .$$

Pokud položíme $C^{(0)} = C_T^*$, rovnice (8) a (9) se zjednoduší na dvě současně platící

podmínky

$$\sum_r t_*^{(r)} v^{(r)} \left\{ I + \left[\sum_s t_*^{(s)} v^{(s)} \right]^{-1} \sum_u \sum_v t_*^{(u)} v^{(u)} G_d^{(uv)} t_*^{(v)} v^{(v)} \right\}^{-1} = 0 \quad (11)$$

a

$$\sum_r t_*^{(r)} v^{(r)} - \sum_r \sum_s t_*^{(r)} v^{(r)} G_d^{(rs)} t_*^{(s)} v^{(s)} \approx 0 . \quad (12)$$

Toto řešení reprezentuje CPA aproximaci (coherent potential approximation). Tento tvar řešení je implicitní, v rámci výpočtu je nutné iterovat. Dolní index "*" v (11) a (12) označuje fakt, že veličiny $t^{(r)}$ a $G_d^{(rs)}$ mají teď být vypočítávány pro homogenní referenční médium, které má stejné elastické moduly jako efektivní médium.

Podrobné odvození lze nalézt v (Jakobsen et al. 2003a).

4.2 Specifikace použité varianty T-matrix modelu

Získané efektivní moduly charakterizují obecně anizotropní prostředí. Při praktickém měření pomocí karotážní sondy FWS jsou ale dynamické moduly stanoveny pouze ve směru

rovnoběžném s vrtem (většinou vertikálním) a sonda nerozlišuje případnou polarizaci s-vln (viz kapitola 5.3.1). Sonda vysílá i registruje signál přes výplach, tedy bez směrového omezení ve směru kolmo k ose vrtu. Výsledek měření proto nezávisí na pootočení sondy ve vrtu. Podobně ani vrtná jádra nebyla odebírána jako orientovaná.

Případná anizotropie měřeného materiálu byla zkoumána dynamickými laboratorními měřeními ve třech směrech (viz tabulka 13 v kapitole 5.4.4) a analýzami výbrusů (viz kapitola 5.4.2). Rozdíly ve stanovených rychlostech šíření p- a s- vln nepřekročily 15% stanovené maximální hodnoty, většinou se pohybovaly v prvních jednotkách procent. Na výbrusech nebyla pozorována žádná přednostní orientace zrn v hornině.

Anizotropie horniny byla tedy vyloučena jako nepřilíš důležitá a tudíž lze materiál s dostatečnou přesností považovat za izotropní. Tím byl vyloučen vliv anizotropie elastických vlastností horniny dle (Fjær 2019).

Z tohoto důvodu byly všechny vstupní elastické tenzory, použité pro výpočet T-matrix modelu, převedeny do izotropní formy.

T-matrix model byl pro výpočty v této práci upraven pro variantu izotropních kulových inkluzí, čímž došlo k podstatnému zjednodušení praktického výpočtu t-tenzoru podle

$$\bar{\tau}^{(\rho)} = \int_0^{\pi} d\theta \sin(\theta) \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{2\pi} d\phi O^{(\rho)}(\theta, \psi, \phi) \{ I - [C^{(\rho)}(\theta, \psi, \phi) - C^{(0)}] G(\theta, \psi, \phi, \alpha^{(\rho)}) \}^{-1} [C^{(\rho)}(\theta, \psi, \phi) - C^{(0)}] . \quad (13)$$

θ, ψ, ϕ jsou zde Eulerovy úhly popisující orientaci inkluzí v dotčené rodině indexu ρ . $O^{(\rho)}$ je orientační distribuční funkce (ODF) příslušné rodiny inkluzí. $C^{(\rho)}$ je tenzor elastických modulů inkluze, $C^{(0)}$ je tenzor okolní matrix. G je Greenův tenzor pro danou rodinu inkluzí zohledňující jejich orientaci a tvar. I je jednotkový tenzor.

Na tomto místě je nutné poznamenat, že výpočty nebyly realizovány s tenzory ve formátu C_{ijkl} (3x3x3x3), ale pomocí Kelvinovy notace ve formátu matic 6x6. K přepsání tenzorů do formy matic byl použit postup podle (Auld 1990), který v něm rovněž definuje konvence Eulerových úhlů, které jsou v tomto textu použity.

Díky tomu, že ve výpočtu figurovaly jen izotropní elastické tenzory, které jsou rotačně invariantní, bylo možné vynechat kroky řešící otočení tenzorů do požadované polohy odpovídající prostorové orientaci příslušné inkluze (rovnice (46) respektive (85) v Jakobsen et al. 2003a). Pro

případ izotropních (rotačně invariantních) inkluzí kulového tvaru dostaneme rovnice

$$C^{(\rho)}(\theta, \psi, \phi) = C^{(\rho)}(0, 0, 0) \quad (14)$$

a

$$G(\theta, \psi, \phi, 1) = G(0, 0, 0, 1) \quad (15)$$

Dosažením (14) a (15) se výpočet výše uvedené rovnice (13) podstatně zjednoduší. Jelikož všechny inkluze aproximujeme pomocí oblátních nebo prolátních sferoidů (případně koulí), které mají pouze jednu jedinečnou osu (nejkratší, respektive nejdelší), kolem které jsou rotačně invariantní, lze z výpočtu vyloučit úhel ϕ (položit $\phi = 0$). Po substituci $\xi = \cos(\theta)$ a za předpokladu, že rozdělení orientací inkluzí je symetrické kolem osy $\theta = 0$, tudíž je nezávislé na hodnotě úhlu ψ , dostaneme $O^{(\rho)}$ jako funkci proměnné $\xi - O^{(\rho)}(\xi)$. Výsledkem je pak rovnice

$$\bar{t}^{(\rho)} = 2\pi \int_{-1}^1 d\xi \int_0^{2\pi} d\psi \left[\frac{1}{8\pi^2} + \sqrt{\frac{5}{2}} P_2(\xi) W_{200} + \sqrt{\frac{9}{2}} P_4(\xi) W_{400} \right] \times \{ I - [C^{(\rho)}(0, 0, 0) - C^{(0)}] G(0, 0, 0, 1) \}^{-1} [C^{(\rho)}(0, 0, 0) - C^{(0)}] \quad (16),$$

kde W_{lmn} jsou koeficienty zjednodušených Legendrových funkcí a P_l jsou Legendrovy polynomy řádu l . Tvar G_d^{rs} je určen tvarem (elipsoidem) pravděpodobnostní funkce p^{rs} , která popisuje prostorovou pravděpodobnost, že v okolí dané inkluze typu s nalezneme inkluzi typu r . V případě že i pravděpodobnostní funkce má kulový tvar, je Greenova funkce počítána na kouli, a to i Greenova funkce G_d^{uv} vyjadřující interakci dvou inkluzí odlišného typu v rovnici (8), respektive G_d^{rs} v rovnicích (9) a (10). V izotropním (dokonale neuspořádaném) prostředí tomu tak je.

Koncové průměrování bylo provedeno dle rovnice (8) označované jako OPA. Tento způsob výpočtu byl vybrán z důvodu menší výpočetní náročnosti, kde není nutné při výpočtu iterovat (viz kapitola 4.1).

Vzhledem ke zjištění, že efektivní porozita zkoumaných hornin pro vodu je zanedbatelná (viz kap. 5.1.1), nebyla v modelu použita modifikace pro pohyb kapaliny v pórovém prostoru popsaná v (Jakobsen et al. 2003b) a byl vyloučen vliv podmínek drénování vzorků podle (Fjær 2019).

Vzorce pro stanovení efektivních hodnot Youngova modulu a Poissonova čísla ve vertikálním směru pro transversálně izotropní prostředí s osou symetrie orientovanou shodně s osou vrtu jsou:

$$E_{ef} = C_T^*(3,3) - 2C_T^*(1,3)C_T^*(1,3)/(C_T^*(1,1) + C_T^*(1,2)) \quad - \text{efektivní Youngův modul}$$

a

$$\nu_{ef} = C_T^*(1,3)/(C_T^*(1,1) + C_T^*(1,2)) \quad - \text{efektivní Poissonovo číslo.}$$

Tyto vzorce se pro izotropní tenzor zjednoduší na:

$$E_{ef} = C_T^*(1,1) - 2C_T^*(1,2)C_T^*(1,2)/(C_T^*(1,1) + C_T^*(1,2))$$

respektive

$$\nu_{ef} = C_T^*(1,2)/(C_T^*(1,1) + C_T^*(1,2)) \quad .$$

Z použitého izotropního tenzoru elastických konstant přepočteného pomocí modelu jsou pak odvozeny dva efektivní elastické moduly pro každou hloubkovou úroveň ve vrtu.

5 Provedené práce a příprava vstupních dat pro modelování

5.1 Výběr vhodné experimentální lokality

Kritériem pro výběr experimentální lokality, kde měl být vyhlouben vrt zpracováváný v rámci této práce, bylo zastížení hornin s různým stupněm porušení. V rámci vrtného profilu měly být zastíženy horniny v neporušeném i porušeném stavu. Zároveň mělo jít o horniny dostatečně kompaktní, aby z vrtného jádra bylo možné zhotovit tělesa pro laboratorní měření. U takto kompaktního materiálu byl rovněž předpoklad, že nelineárnost chování horniny v neporušeném stavu bude relativně slabá, vhodná pro odzkoušení nového postupu modelování nelineárně elastického chování způsobeného dominantně porušením.

Testovány byly postupně dvě lokality. První lokalitou byl Velkolom Čertovy Schody, druhou lokalitou byl lom Kosov u Berouna. První lokalita se ukázala jako nevhodná z hlediska aplikace modelu horninového masivu s proměnlivou mírou porušení, protože horniny zde byly prakticky neporušené. Případný vliv porušení těžbou zde byl pod rozlišovací schopností použitého vybavení. Na druhé lokalitě byla skutečně proměnlivá míra porušení hornin pozorována a na datech z této lokality bylo možné takový model použít a testovat.

5.1.1 Měření na lokalitě Velkolom Čertovy Schody 2011

V dubnu 2011 byla provedena měření na dvou vrtech ve vápencovém lomu Velkolom Čertovy schody (VLČS). Tato měření měla za úkol otestovat možnosti dostupného karotážního vybavení a ukázat, zda je schopné zaznamenat projevy porušení horninového masivu v důsledku těžby. Konkrétně šlo o dva vrty hloubky 15 m, vzdálené od sebe 100 m. Vrty V-1 a V-2 byly vrtány bezjádrově průměrem 112 mm a paženy PVC pažnicemi o vnějším/vnitřním průměru 90/81,4 mm. Pažnice měly dvě lepené spojky ve vzdálenostech po 5 m. Tyto spojky zároveň díky svému vnějšímu průměru (106 mm) sloužily jako středící kroužky a díky použité technologii lepení spojů celé pažení neobsahovalo žádný kovový prvek, který by mohl rušit karotážní měření. Laboratorní vzorky byly odebrány na povrchu z příslušných vrstev zastižených vrtnými profily. Díky náklonu vrstev cca 20° ve směru příčném ke spojnici obou vrtů vycházely horniny zastižené vrtem na povrch nedaleko od ústí vrtu. Z měření sklonu a směru sklonu vrstev bylo možné určit hloubku ve vrtném profilu a tyto závěry byly potvrzeny porovnáním tvaru získaných karotážních křivek z obou vrtů. Výsledky interpretace těchto měření ukázaly následující skutečnosti: výsledky karotážních měření byly mezi oběma vrty dobře vzájemně korelovatelné, byly zachyceny detaily s rozlišením odpovídajícím možnostem použité sondy.

- při společné interpretaci více metod se podařilo získat velice přesný výsledek s vysokou vypovídací hodnotou. Úroveň detailů společně interpretovaných karotážních dat plně postačuje pro aplikaci ve stavebnictví. Bylo zjištěno, že hustotní karotáž mívá občas nestabilní odezvu, kterou lze eliminovat opakovaným měřením. To souhlasí se závěry v práci (Karam 2004).
- velice kompaktní a litologicky monotónní masiv, ve kterém byly vrty vyhloubeny, se z hlediska mechanických vlastností choval téměř lineárně, prostor k vyzkoušení funkčnosti modelu zahrnujícího porušení horniny byl velmi malý. Při porovnávání statických a dynamických modulů byla často zjištěna velice dobrá shoda. Porušení v důsledku těžby bylo oproti očekávání velice slabé. Bylo tak zjištěno, že pro účel testování navrženého modelu je nutné vyhloubit vrt v méně kompaktním a litologicky pestřejším horninovém masivu.

Výsledky jsou prezentovány v tabulce 1 a porovnání statických modulů z jednoosých

laboratorních zkoušek a dynamických modulů z laboratorních měření a z FWS je prezentováno v tabulce 2.

- v podmínkách výše popsaného horninového masivu bylo zjištěno, že hodnoty modulů nezávisí na frekvenci. Rozsah frekvencí vln zaznamenaných v rámci karotážních měření ve vrtu sondou FWS se pohyboval kolem 20 kHz. Při laboratorních měřeních na zkušebních tělískách se rozsah frekvencí zaznamenaných vln pohyboval přibližně v rozmezí 200 - 300 kHz.

Moduly stanovené v případě dynamických metod jsou v obou případech prakticky identické. Zjištěný průměrný rozdíl mezi E_D z laboratoře a FWS v Tabulce 2 je 2 GPa; pro zjištěné hodnoty E_D jde o relativní chybu 2 - 3 % (relativní chyba je definována vzhledem k vyšší z hodnot). Porovnáním hodnot v_D byl zjištěn průměrný rozdíl 0,007, což odpovídá relativní chybě 2 %. Jakmile se objeví porušení sestávající z rozpukání a navětrání horniny, a to v míře detekovatelné použitým vybavením, hodnoty modulů se od sebe začnou lišit. Potvrdilo se, že v případě jako tento výše lze vliv rychlosti přetváření dle (Fjær 2019) zanedbat, v horninách s menší tuhostí jeho vliv narůstá.

Tabulka 1: Výsledky měření na lokalitě VLČS (vrty V-1, V-2); ve dvojici řádků pod sebou je pro rychlosti podélných (v_p) a příčných (v_s) vln a z nich stanovené dynamické moduly (index "D") vždy uveden nejprve výsledek měření na vzorcích v laboratoři a poté výsledek odpovídajícího karotážního měření FWS ve vrtech. Dále jsou uvedeny odpovídající statické moduly stanovené jednoosými zkouškami na vzorcích v laboratoři (index "S") a hustoty ρ . Uvedeny jsou průměrné hodnoty a jejich směrodatné odchylky s.

vzorek	v_p [m.s ⁻¹]	s(v_p) [m.s ⁻¹]	v_s [m.s ⁻¹]	s(v_s) [m.s ⁻¹]	v_p/v_s	ρ [g.cm ⁻³]	v_D	s(v_D)	v_s	s(v_s)	E_D [GPa]	s(E_D) [GPa]	E_S [GPa]	s(E_S) [GPa]
FS	6324	22,6	3244	31,3	1,95	2,66	0,32	0,005	0,20	0,012	74,0	1,0	63,9	4,6
FWS (FS)	6275	34,6	3150	17,7	1,99	2,66	0,33	0,005	-	-	70,2	0,6	-	-
FT	6335	75,3	3361	26,0	1,88	2,69	0,30	1,216	0,27	0,078	79,2	1,2	71,5	4,2
FWS (FT)	6350	71,4	3347	19,8	1,90	2,69	0,31	0,003	-	-	79,2	1,5	-	-

Tabulka 2: Srovnání odchylek mezi hodnotami modulů získanými dynamicky na vzorcích v laboratoři (index "D"), dynamicky karotáží (index "FWS") a jednoosými zkouškami na vzorcích v laboratoři (index "S"). Relativní chyby δ jsou normovány vzhledem k vyšší porovnávané hodnotě.

porovnávané hodnoty modulů	průměrný rozdíl Δv [-]	směrodatná odchylka $s(\Delta v)$ [-]	relativní chyba $\delta(v)$ [%]	průměrný rozdíl ΔE [GPa]	směrodatná odchylka $s(\Delta E)$ [GPa]	relativní chyba $\delta(E)$ [%]
FS_D-FS_{FWS}	0,010	0,0101	3	3,8	1,61	5
FS_D-FS_S	0,125	0,0166	39	10,1	5,56	14
$FS_{FWS}-FS_S$	0,135	0,0166	41	6,3	5,18	9
FT_D-FT_{FWS}	0,003	0,0052	1	0,0	2,71	0
FT_D-FT_S	0,034	0,0805	11	7,8	5,39	10
$FT_{FWS}-FT_S$	0,038	0,0809	12	7,7	5,66	10

- vrty nesmějí být zapažené. Přes dobré centrování pažnic (s odchylkou do prvních mm) a absenci jakýchkoli kovových součástek bylo měření ovlivněno a interpretace ztížena (např. metoda ABI - na akustickém obrazu byly patrné "šmouhy" způsobené nedokonalým centrováním sondy vůči stěně vrtu, hustotní karotáž - místy deformovaný tvar křivky; příčinou deformace je nejspíše prachovitý a jemně písčité materiál (vápencová drť) splavený do vrtu dešťovou vodou, který se zachytil za pažnicí, v místě zúžení mezery mezi pažnicí a stěnou vrtu, způsobeným přítomností spojek pažnice a nad těmito spojkami). Navíc nebylo možné měřit odporovou karotáž a kamerové metody.
- objemové hmotnosti v suchém a v saturovaném stavu se díky velmi malé efektivní porozitě pro vodu (celková porozita byla do 3 %) liší jen nepatrně. Průnik vody do vnitřní části vzorku se omezoval jen na hloubku prvních milimetrů, i když vzorky byly kvůli saturaci pórového prostoru ponechány pod vodu několik týdnů. Tato skutečnost byla ověřena při měřeních jednoosých zkoušek v lisu v saturovaném stavu, kdy došlo k porušení zkušebního válečku. Bezprostředně po porušení, při prohlídce fragmentů vzorku, byla makroskopicky patrná tenká vrstvička na povrchu vzorku, kam voda pronikla a vnitřek vzorku byl suchý. Proto bylo rozhodnuto, že na vlhkost, která panuje ve vrtu při karotážním měření, nebude při laboratorních měřeních brán ohled. To samozřejmě platí v případě, pokud bude doloženo, že horniny vrtného profilu mají porozitu srovnatelnou s porozitou hornin použitých při zkouškách zmíněných výše.

Na základě výše shrnutých zkušeností z pilotních měření byl pro vyhloubení hlavního experimentálního vrtu tohoto projektu vybrána jiná lokalita, a to lom Kosov u Berouna.

5.1.2 Geologická situace a podmínky výběru místa pro vrt K-1 v lomu Kosov

Lom Kosov se nachází asi 2 km jižně od města Beroun. Je zahlouben do západních svahů elevací Holý Vršek, Na Čihadle a Velký Kosov. Z hlediska regionální geologie patří lokalita do regionu Barrandienu, regionální jednotky paleozoika Barrandienu, regionální subjednotky pražské pánve. Její podloží je tvořeno sedimentárními a vulkanickými horninami silurského stáří. Pokryv tvoří pouze vrstva deluviálních sedimentů charakterů štěrkovitých jíílů, případně zahliněných sutí, dosahující mocnosti prvních metrů. Většina lomu se nachází v horninách kopaninského souvrství, v jeho západní části na nejspodnější etáži je obnaženo podložní motolské souvrství, na východě v nejvyšších partiích lomu se nachází souvrství přídolské.

Motolské souvrství je zastoupeno tmavými jílovitými břidlicemi, někdy silně prachovitými a směrem k bázi nadložního kopaninského souvrství vápnitými.

Kopaninské souvrství se zde nachází ve spodní části ve vulkanogenním vývoji tvořeném bazaltovými tufy a tufity (tzv. bazální vulkanická série) s ojedinělými polohami a vložkami vápnitých břidlic a vápenců. Výše pak ve vývoji karbonátovém (tzv. karbonátová série) obzoru E. beaumonti tvořeném u báze střídáním vápnitých břidlic a vápenců, směrem vzhůru pak ubývá břidlic a dominují vápence (Schejbal 1954, Hraba, Schejbal 1954, Nedvěd, Tesař 1955, Fechtner, Nedvěd 1956).

Přídolské souvrství je zastoupeno silně vrstevnatými až lavicovitými tmavě šedými vápenci s ojedinělými polohami vápnitých břidlic.

Vrstevní sled, ve spodní části zahrnující horniny motolského souvrství a horniny při bázi kopaninského souvrství, je proniknut žilami bazaltů - tzv. diabasů. Výše se potom nacházejí tufy a tufity vulkanické série kopaninského souvrství. Vulkanická příměs je přítomna ještě i ve vyšších polohách v podobě tufitických břidlic a vulkanogenní složky ve vápnitých břidlicích (Chlupáč et al. 1992, Chlupáč et al. 2002, Kříž 1992).

Po pečlivém vyhodnocení možností uvnitř lomu a finančních možností projektu bylo vybráno místo na vrchní etáži lomu. Bylo třeba se vyhnout souvislému porušení z boku, které by

bylo přítomné, pokud by bylo vrtáno příliš blízko stěny nad nižší etáží. Toto porušení by komplikovalo měření tím, že by při příliš velké hustotě puklin v celém intervalu nebylo možné udržet ve vrtu vodní sloupec přes celý měřený interval, což některé použité karotážní metody vyžadují. Dále je pro ověření funkčnosti modelu nezbytně nutné, aby byl ve vrtu zastížen alespoň jeden reprezentativní hloubkový interval, kde je masiv co nejméně porušený, aby bylo možné porovnávat změnu elastických vlastností daného materiálu s rostoucí mírou porušení. Zároveň s rostoucí vzdáleností od stěny nižší etáže (směrem k VSV) rychle narůstala mocnost karbonátového vrstevního sledu. Záměr byl zastihnout ve spodní polovině vrtu co největší množství vápnitých břidlic a případně podložních tufů a tufitů, aby byl sled typově pestrý a bylo možné provádět měření na několika odlišných horninách.

5.2 Vyhloubení vrtu K-1 a petrografický popis jádra

Ve dnech 29.7.-31.7.2014 byl vyhlouben na vybraném místě vrt K-1. Vrtáno bylo jádrově, rotačně, bez příklepu, aby získaná jádra byla v co nejméně porušeném stavu. Svrchní část profilu o mocnosti 2 m tvořená převážně navážkou a zcela rozvolněným horninovým masivem byla odvrtána tvrdokovovou korunkou, na sucho, průměrem 175 mm. Zakončena byla v momentě, kdy nebylo pochyb, že byl zastížen podložní horninový masiv a že v dále nehrozí nestabilní chování stěn vrtu od této úrovně níže. Hlavní podmínkou úspěšného provedení karotážních měření, která byla stanovena na základě výsledků provedených pilotních měření v roce 2011 (viz kapitola 5.1.1) byla nutnost mít dostatečně stabilní stěnu vrtu, aby nebylo nutné vrt zapažit a měření mohlo proběhnout v nezapaženém vrtu. Svrchní část byla tedy zapažena PVC pažnicí o průměru 160 mm, protože se dalo důvodně předpokládat, že by po zaplnění vodou došlo dříve nebo později ke zhroucení stěny vrtu a jeho zavalení v tomto úseku. Dále bylo vrtáno diamantovou korunkou o průměru 112 mm s vodním výplachem do konečné hloubky 16 m. Po dovrtání byl vrt vodním výplachem vyčištěn a v intervalu 2 - 16 m ponechán bez pažení.

Zhruba od hloubky 8 m pod úrovní terénu začalo docházet k malým ztrátám výplachu, které se projeví tím, že v této úrovni se během 24 hodin ustálila hladina vody (výplachu) v původně kompletně zaplněném vrtu.

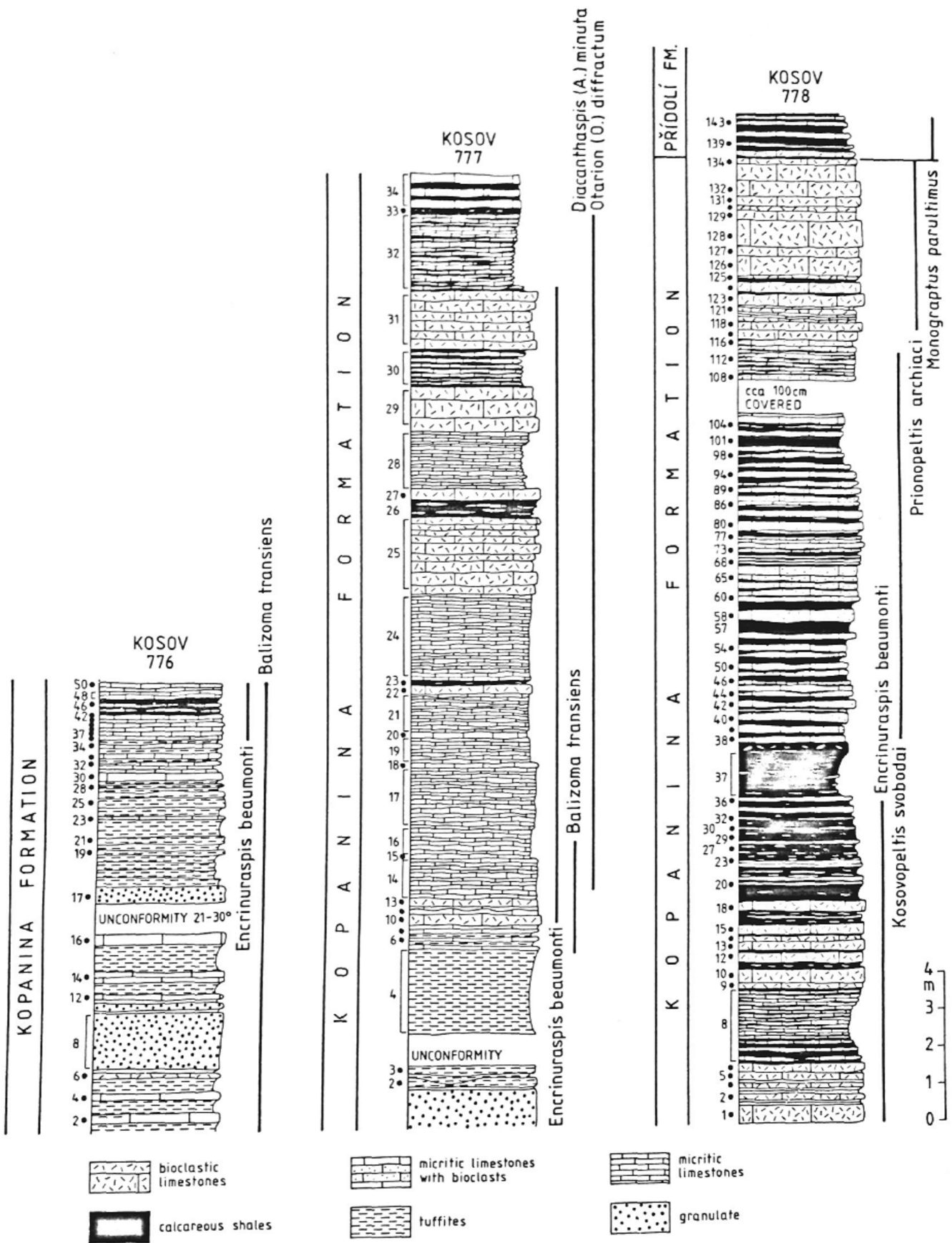
Přes celý vrtný profil byl prováděn odběr jádra. Výnos jádra snížily některé ztráty (v břidličných vrstvách anebo při příliš dlouhém návrtu), kdy došlo k jeho rozpadu, na 77 %. Jádra

byla uložena do vzorkovnic a popsána. Byla pořízena fotodokumentace. Popis je uveden v Tabulce 3.

Tabulka 3: Petrografický popis vrtu K-1

VRSTVA (m)	Vrt K-1		
	Souřadnice: S-JTSK a Bpv podle GPS		
	Y(m)	X(m)	Z(m)
	770974,46	1055618,50	374,00
0,00-0,10	hlinitý štěrk, drnová vrstva		
0,10-1,05	navážka - hlinitý štěrk ostrohranný, štěrkovitý jíl		
1,05-1,70	šedý mikritický vápenec		
1,70-1,90	hnědý okrově skvrnitý jíl, slabě prachovitý s úlomky šedého mikritického vápence		
1,90-4,30	šedý mikritický vápenec		
4,30-4,70	šedý mikritický vápenec s příměsí bílých bioklastů vzrůstající směrem k bázi vrstvy		
4,70-4,85	tmavě šedá vápnitá břidlice		
4,85-5,85	šedý mikritický vápenec s příměsí bílých bioklastů vzrůstající směrem k bázi vrstvy		
6,05-6,30	šedá světle laminovaná tufitická břidlice		
6,30-6,50	šedý mikritický vápenec s příměsí bílých bioklastů		
6,50-13,00	šedý, místy světle šedý mikritický vápenec s příměsí bílých bioklastů, vyhojenými puklinami s mikritickými i sparitickými výplněmi		
13,20-13,70	šedá světle laminovaná tufitická břidlice		
13,70-14,60	šedý, místy světle šedý mikritický vápenec s příměsí bílých bioklastů, vyhojenými puklinami s mikritickými i sparitickými výplněmi		
14,60-15,80	světle šedý hrubozrnější (sparitický) vápenec s příměsí bioklastického materiálu a s puklinami vyhojenými kalcitem a částečně zoxidovaným pyritem - porušená zóna		
15,80-16,05	šedý, místy světle šedý mikritický vápenec s příměsí bílých bioklastů, vyhojenými puklinami s mikritickými i sparitickými výplněmi		
Hl.p.v. naražena	Nemohlo být zjištěno, vrtáno na výplach.		
Hl.p.v. ustálena	Výplachová voda ustálena v hloubce 8,00 m.		
Vzorky zemin	výnos jádra 77 %, vzorky viz. kapitola 5.4		
Poznámka	hloubeno 29. - 31.7.2014; vápence ve svrchní části vrtu bituminózní		

Popsaný geologický profil odpovídá profilu 777 popsanému Křížem ve stěně etáže asi 30 m od vrtu K-1 Kříž 1992. Profil je vyobrazen na obrázku 1. Celý vrtný profil odpovídá kopaninskému souvrství.



Obrázek 1: Geologické profily stěn v lomu Kosov popsané v (Kříž 1992)

5.3 Karotážní měření na lokalitě Kosov, vrt K-1

Po dokončení vrtu K-1 v něm byla provedena měření následujícími karotážními metodami.

Následující popisy metod jsou převzaty a upraveny ze závěrečné zprávy o měření společnosti Aquatest, (Pitrák, Procházka 2014).

5.3.1 Specifikace použitých karotážních metod a vybavení

- **gama karotáž (GK)**

Jde o měření sumární přirozené radioaktivity hornin, která je úměrná zastoupení radioaktivních prvků v běžných horninách, především draslíku ^{40}K , jenž je obsažen hlavně v draselných živcích, jílech, ale i v jiných alumosilikátech a dále produktů přeměn přírodních přeměnových řad ^{235}U , ^{238}U a ^{232}Th . Měřená gama kvanta jsou zachycována scintilačním detektorem. Pomocí kalibrace je naměřený počet impulzů za minutu převeden na $\mu\text{Gy}\cdot\text{hod}^{-1}$.

- **neutron-neutron karotáž (NNK)**

Měří se množství zpomalených (tepelných) neutronů prošlých horninou z izotopického zdroje rychlých neutronů $^{241}\text{Am-Be}$, který je umístěn v měřicí sondě (60 cm pod detektorem). Naměřené četnosti neutronů (v $\text{imp}\cdot\text{min}^{-1}$) jsou v běžných horninách nepřímo úměrné obsahu vodíku v hornině, protože vodík má schopnost zpomalovat neutrony. Jde o celkový obsah vodíku obsaženého ve vodě vyplňující pórový prostor, různé pukliny a podrcené zóny, vodík vázaný v krystalové mřížce jílových minerálů, případně vodík vázaný v uhlovodících. Vysoký signál je typický pro kompaktní horniny. Pokud jsou póry mimo blízké okolí vrtu vyplněny především vzduchem, je jejich projev slabý, často až zanedbatelný. Stanovené hodnoty porozity se pak blíží spíše porozitě matrice horniny - v tomto případě vápence. Naopak, nízké hodnoty jsou registrovány proti polohám silně porušených hornin (chemicky i mechanicky zvětralých), proti horninám s vysokou porozitou a také proti polohám jílu. Hodnoty porozity vypočtené na základě kalibračního vztahu platného pro použitou sondu korespondovaly s hodnotami porozity stanovenými laboratorně na celistvých vzorcích bez trhlin.

- **karotáž magnetické susceptibility (KMS)**

Metoda měří magnetickou susceptibilitu hornin. V hodnotě této veličiny se citlivě promítají změny obsahu magneticky aktivních minerálů v hornině, zejména feromagnetických.

- ***gama-gama karotáž - hustotní (GGK)***

Měří se množství sekundárního gama záření, které projde horninou od zdroje tvořeného radioizotopem ^{137}Cs ke scintilačnímu detektoru. V případě hornin je díky průměrnému protonovému číslu prvků, z nichž se skládají, dominantním typem interakce procházejícího gama záření s atomy Comptonův rozptyl. Četnost detekovaných částic gama záření je v takovém případě nepřímo úměrná elektronové hustotě proměřovaného prostředí (Schlumberger 1996). Pomocí kalibrace lze místo elektronové hustoty měřit přímo objemovou hmotnost. Sonda je zkonstruována tak, že vzdálenost mezi zářičem a detektorem je 40 cm. Hloubkový dosah měření do stěny vrtu je potom cca 20 cm. Sonda je pomocí výsuvného ramena přitisknuta ke stěně vrtu, aby byl zajištěn kontakt s horninou a byl tak vyloučen rušivý vliv vrstvy kapaliny či vzduchu mezi sondou a stěnou vrtu. Metoda se využívá pro zjišťování objemové hmotnosti hornin a rovněž pro zjišťování přítomnosti zapažnicové cementace, jílového těsnění nebo obsypu, které mají výrazně vyšší objemovou hmotnost než nevyplněný (nebo jen částečně vyplněný) prostor za pažnicí.

- ***elektrická odporová karotáž (Rap)***

Měří se zdánlivý měrný elektrický odpor potenciálovou sondou se dvěma rozestupy elektrod: 10 a 41 cm. Výhodou kratšího rozestupu je vyšší rozlišovací schopnost a možnost zaznamenat i tenké vrstvy. Výhodou delšího rozestupu je větší hloubkový dosah metody, měřená hodnota se blíží více skutečnému měrnému elektrickému odporu horniny, protože větším hloubkovým dosahem se potlačuje vliv vrstvy horniny bezprostředně obklopující vrt a tvořící jeho stěnu. Vlastnosti této vrstvy mohou být ovlivněny samotným vrtem nebo vrtným výplachem.

- ***indukční karotáž (IK)***

Metoda patří do skupiny elektromagnetických metod, které měří sekundární elektromagnetické pole vzniklé v horninovém prostředí po vybuzení primárním polem. Metoda reaguje na vodivost hornin, a to i v suchých vrtech a ve vrtech zapažených plastovou pažnicí. Sonda převádí odezvu prostředí na elektrické impulsy jejichž registrovaný počet za jednotku času ($\text{imp} \cdot \text{min}^{-1}$) je úměrný vodivosti a recipročně úměrný elektrickému odporu hornin. Z teorie elektromagnetického pole, na které je metoda

postavena, plyne, že metoda reaguje na vodivost v mocnině 1,5, zatímco klasické odporové metody s konduktivním zaváděním elektrického proudu do horniny reagují na odpor v mocnině 1 (Ohmův zákon). Má tedy potenciálně vyšší citlivost na změny vodivosti. Nízké hodnoty vodivosti jsou typické pro pevné krystalické horniny a kompaktní vápence. S přibývajícím zvětráním se zvyšuje i vodivost. Kromě litologie má na průběh křivky indukční karotáže vliv také jílová izolace, případně prázdný prostor za pažnicí. Jílová izolace a prázdný prostor za pažnicí vyplněný vodou zvyšují vodivost. Měřeno bylo se dvěma rozestupy cívek 50 a 120 cm. Výhody rozdílných rozestupů cívek jsou analogické jako v případě metody Rap uvedené výše, pokud zaměníme elektrický odpor za vodivost.

- **kavernometrie (KM)**

Měří se průměr vrtu buď pomocí přítlačného ramene hustotní sondy anebo samostatnou tříramennou sondou. Ramena jsou před měřením kalibrována na kroužcích o známém průměru. Touto metodou lze zjistit polohy více rozpukané a kavernující.

- **analogová akustická karotáž (KAS)**

Měří se rozdílový průběhový čas akustického signálu mezi dvěma vysílači a přijímačem a také útlum energie akustického signálu. První vysílač je vzdálen od přijímače 100 cm a druhý 150 cm a nachází se na opačné straně sondy než první vysílač. Frekvence vysílaného signálu je 20 kHz. Přenos signálu mezi stěnou vrtu a sondou zajišťuje výplach vrtu. Z průběhového času se určí rychlost podélné vlny. Útlum akustického signálu v $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$ se určuje z poměru amplitud první půlvlny registrovaných příčných vln od prvního a druhého vysílače. Díky nedokonalé elastickému chování horniny na trhlinách zde dochází ke ztrátám seismické energie a útlum amplitudy procházející elastické vlny je tedy přímo úměrný porušení horniny puklinami.

- **digitální akustická karotáž se záznamem plného vlnového obrazu (FWS)**

Sonda registruje plný průběh akustického signálu na třech přijímačích. První je vzdálen od vysílače 60 cm a další dva přijímače jsou rozmístěny s rozestupem 20 cm. Frekvence vysílaného signálu je 20 kHz. Přenos signálu mezi stěnou vrtu a sondou zajišťuje výplach vrtu. Z korelační analýzy relativních časových posunů záznamů z jednotlivých přijímačů (metoda semblance) je možné určit čas příchodu a rychlost podélné i příčné seismické vlny.

V důsledku přenosu signálu přes výplach (akustické médium), není registrována žádná informace ohledně polarizace přijímaných vln, speciálně s-vln. Stanovení rychlosti případné s_2 -vlny je teoreticky možné, ale v naprosté většině případů bývají data interpretována na základě modelu izotropního média, tj. pouze p- a s- vlna. Při použití křivky hustotní karotáže je potom možné aplikací lineárního Hookeova zákona odvozeného pro izotropní elastické kontinuum vypočítat elastické moduly, zpravidla Youngův modul E a Poissonovo číslo ν .

- **orientovaný akustický skener stěny vrtu (Acoustic Borehole Imager - ABI)**

Sonda skenuje stěnu vrtu pomocí odraženého fokusovaného akustického paprsku o frekvenci 1,2 MHz. Výsledkem měření jsou dva orientované obrazy stěny vrtu. První z těchto obrazů poskytuje údaje o čase, který byl nutný pro překonání dráhy mezi sondou a stěnou vrtu. Při známé rychlosti akustické vlny ve vodě je možné z tohoto času vypočítat orientovaný poloměr vrtu a vytvořit tak přesný otisk tvaru vrtného jádra. Druhý orientovaný obraz vrtné stěny přináší informaci o amplitudě odražené vlny. Množství energie, kterou odražená vlna nese zpět do senzoru sondy, je závislé na stavu stěny vrtu nebo pažnice. Každá puklina, vrstevní plocha, foliace, nebo podobná nehomogenita ve stěně vrtu se projeví zpravidla poklesem amplitudy odražené vlny. Výsledkem takového měření je interpretace poloh plošných nehomogenit (trhliny, žíly), jejich sklonů vůči směru vrtu a směrů jejich sklonů. Sonda je vybavena inklinometrickým senzorem, a proto je výstupem také plynulý záznam úklonu a azimutu úklonu osy vrtu.

- **optická kamera**

Pořizuje videozáznam s rozlišením 320x240 bodů. Sonda má možnost natočení objektivu a doostření do strany, je tedy možné si prohlédnout zajímavá místa ve stěně vrtu podrobněji. Záznam je na výstupu kódován kodekem MSMPEG4V1 do formátu .avi.

Kromě metody ABI a optické kamery byly všechny metody použité na vrtu K-1 měřeny s délkou kroku 5 cm mezi jednotlivými záměry. Prvně dvě zmíněné pak měly délku kroku měření 1 cm. Všechny metody kromě optické kamery byly měřeny ve vrtu zaplněném výplachem (vodou). V případě optické kamery byl vrt zaplněn pouze částečně, protože dočerpáním vody do vrtu by došlo ke zviření nečistot ve vodě a zhoršení viditelnosti. Kamerový záznam má stejnou hodnotu při snímání ve vzduchu jako v čisté vodě.

Použité sondy jsou výrobky firem W&R Brno (IK a KMS), ELGI Budapešť (GGK, GK, NNK a KAS), Advanced Logic Technology (FWS a ABI), Robertson Geologging (optická kamera) a Aquatest a.s.(Rap).

5.3.2 Zpracování a možnosti použití dat z provedených karotážních měření

Data byla zpracována a interpretována autorem ve spolupráci s RNDr. Michalem Pitrákem PhD. z karotážní divize firmy AQUATEST a.s.. Naměřená data jsou souhrnně graficky znázorněna na obrázku 2. Níže jsou uvedeny komentáře ke zpracování dat získaných jednotlivými metodami a k jejich dalšímu využití.

- ***gama karotáž (GK)***

Byla opravena na změny průměru vrtu pomocí lineárního součinitele zeslabení záření gama. V karbonátové části vrtného profilu byl obsah jílových minerálů (jílovitost) velmi nízký, což potvrdily analýzy provedené na výbrusech (viz kapitola 5.4.2). Z tvaru křivky je patrné, že výkyvy v jednotlivých vrstvách jsou nepodstatné, nebylo tudíž potřeba zavádět žádnou opravu na jílovitost proměnlivou v rámci jednotlivých vrstev.

- ***neutron-neutron karotáž (NNK)***

Sonda byla zkalibrována na stanovení neutronové pórovitosti pomocí dat získaných v laboratoři. Použity byly objemové hmotnosti zjištěné na válečcích, měrné hmotnosti stanovené v pyknometru a objemové hmotnosti vypočtené z analýz složení provedených na výbrusech (viz kapitola 5.4).

- ***karotáž magnetické susceptibility (KMS)***

Z tvaru křivky je patrné, že v karotážním profilu nebyly nikde zachyceny významné anomálie. Profil lze tedy prohlásit za homogenní z hlediska magnetických vlastností. Data tudíž nebyla dále použita.

- ***gama-gama karotáž - hustotní (GGK)***

Kalibrace metody byla ověřena na stejných laboratorních datech na jakých byla prováděna kalibrace NNK (viz. výše). Měření bylo provedeno 3x, aby byla vyloučena nestabilita odezvy této metody zjištěná měřeními v roce 2011. Stejně jako tehdy k tomuto jevu skutečně došlo. Zpracovaná data byla poté použita ke stanovení hodnot objemové hmotnosti dále použitých pro výpočet dynamických elastických modulů stanovených pomocí karotáže přes celý karotážní profil.

- **elektrická odporová karotáž (Rap)**
 Bylo měřeno se dvěma rozestupy elektrod, respektive dvěma hloubkovými dosahy a dvěma vertikálními rozlišeními. Díky tomu bylo možné použít křivky k rozčlenění profilu na jednotlivé vrstvy. Sonda s vyšším rozlišením v tomto případě zachycovala i variace hodnoty odporu menší vlnové délky a amplitudy v rámci vrstvy.
- **indukční karotáž (IK)**
 Stejně jako v případě elektrické odporové karotáže i tato metoda byla měřena se dvěma rozestupy cívek, respektive dvěma hloubkovými dosahy a vertikálními rozlišeními. Jelikož jsou tomto případě rozestupy cívek větší než v případě Rap, vertikální rozlišení je horší, i když metoda je principiálně citlivější na změny vodivosti než Rap. Křivky jsou tedy hladší. Jejich relativní tvary byly společně s křivkami Rap použity k rozčlenění karotážního profilu na vrstvy.
- **kavernometrie (KM)**
 Výsledky měření byly použity pro výpočet hodnot hustoty z GGK a porozity z NNK. Taktéž pro opravu hodnot GK na změny průměru vrtu.
- **analogová akustická karotáž (KAS)**
 Vzdálenost mezi vysílači a přijímačem je v případě této sondy několikanásobně větší než u digitální sondy FWS, výsledkem je tedy zhlazenější křivka rychlosti respektive útlumu. Jelikož tato sonda byla dlouhou dobu s úspěchem používána ke stanovování útlumu amplitudy registrovaného akustického signálu, křivky, které poskytla, sloužily jako srovnávací při vyhodnocování dat naměřených digitální sondou FWS. Software pro vyhodnocování dat naměřených sondou FWS sám o sobě neumožňuje vypočtení útlumu amplitudy registrovaného akustického signálu. Toto vyhodnocení bylo provedeno dodatečně v programovacím prostředí MATLAB a porovnáním s tvarem křivek z KAS byla ověřována funkčnost použitého algoritmu.
- **digitální akustická karotáž se záznamem plného vlnového obrazu (FWS)**
 Výsledkem zpracování dat naměřených touto sondou byly rychlosti p- a s-vlny ve směru podél vrtu. Tyto rychlosti byly pak společně s hodnotami objemové hmotnosti z GGK použity k výpočtu dynamických elastických modulů - Poissonova čísla (ν) a Youngova modulu (E). Pokud nebude prostředí izotropní, sonda poskytuje neúplný elastický tenzor,

respektive pouze jeho složku rovnoběžnou s osou vrtu. Pro doplnění tenzoru se nabízejí dvě možnosti. Podle výsledků měření ve více směrech na orientovaných vzorcích v laboratoři lze buď zanedbat anizotropii jako slabou a sestavit tenzor jako izotropní anebo naopak doplnit zbylé složky anizotropního tenzoru. V případě vrtu K-1 byla na základě laboratorních výsledků použita první možnost.

- **orientovaný akustický skener stěny vrtu (Acoustic Borehole Imager - ABI)**

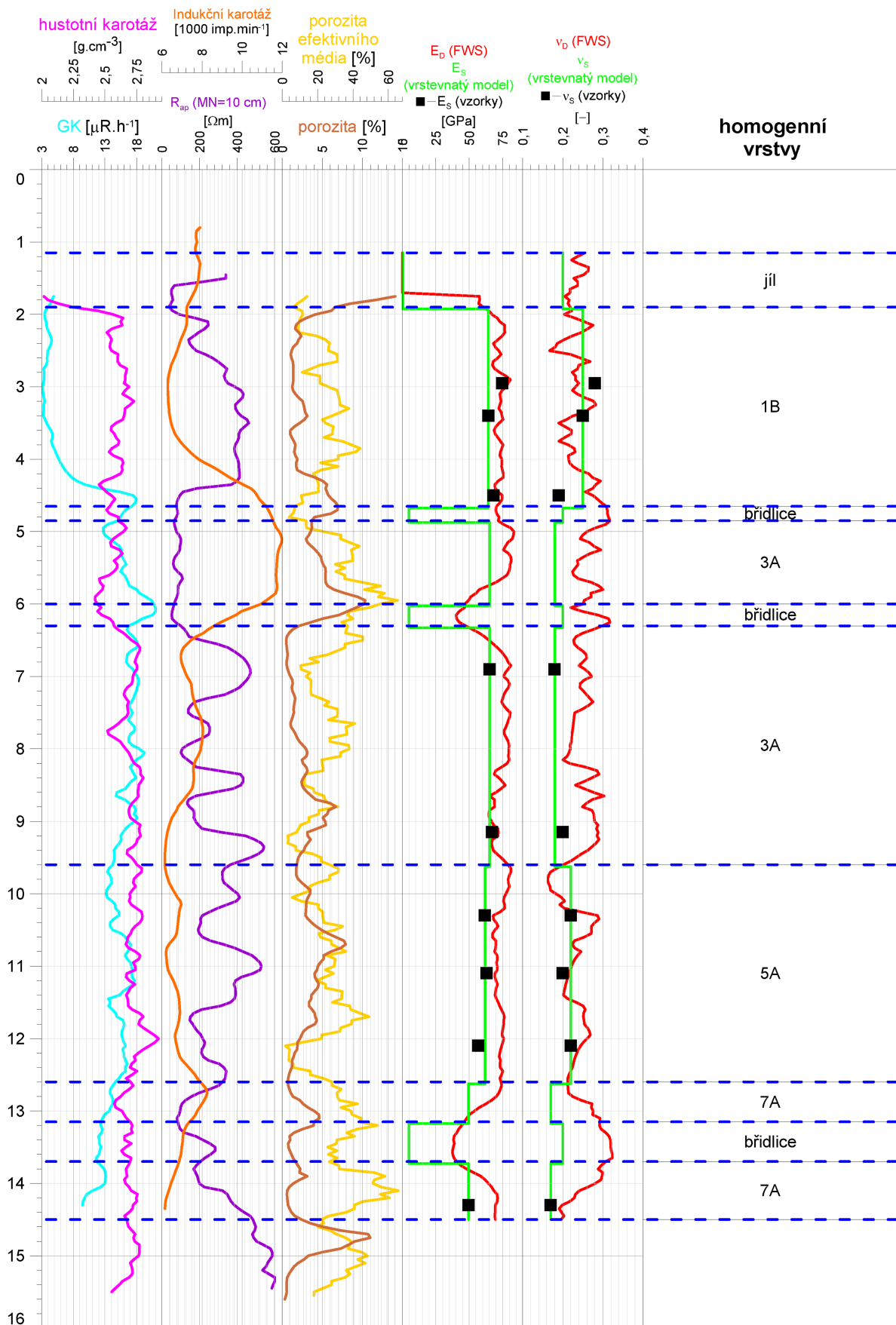
V obraze stěny vrtu získaném touto metodou byly na základě míry útlumu signálu vymezeny rovinné nehomogenity (trhliny nebo žíly) rozdělené do čtyř kategorií podle míry významnosti. Tato metoda je schopna bezpečně detekovat porušené zóny a trhliny. Získané výsledky byly porovnávány s výsledky interpretace měření FWS a KAS (rychlosti p - a s -vln, útlum s -vln), zda jsou s nimi konzistentní. Po tomto ověření posloužily k výpočtu porozity efektivního média, která měla jako vstupní parametr do T-matrix modelu vnést kvantifikaci porušení horninového masivu (viz kapitola 6).

- **optická kamera**

Videozáznam z optické kamery byl k dispozici pro vizuální kontrolu vrtného profilu, kdy v kombinaci s ostatními karotážními metodami bylo možné doplnit chybějící informace. Této možnosti bylo využito zejména v místech, kde došlo ke ztrátě jádra.

5.3.3 Naměřená karotážní data a jejich zpracování

Karotážními měřeními byl detailně zmapován zkoumaný profil z hlediska fyzikálních vlastností hornin, ve kterých byl vyhlouben. Naměřená karotážní data a výsledky včetně dělení profilu na vrstvy jsou souhrnně graficky znázorněny na obrázku 2.



Obrázek 2: Grafické znázornění dat naměřených karotážními metodami a vstupní vrstevnatý model sestavený z hodnot statických modulů stanovených v laboratoři na zkušebních tělískách z vrtného jádra. Hranice jednotlivých vrstev jsou vyznačeny modrou přerušovanou čarou. Označení vzorků podle kterých byly jednotlivým vrstvám přiřazeny hodnoty statických modulů jsou vyznačeny v prvním sloupci vpravo (Chalupa et al. 2018).

Aplikací postupů uvedených v kapitole 5.3.2 byly získány nejprve výsledky metod použitých pro základní dělení zkoumaného profilu na jednotlivé vrstvy (GK, Rap, IK, NNK, KMS, KAS a FWS). Vrtný profil byl s použitím karotážních metod rozdělen na homogenní vrstvy, kde se fyzikální vlastnosti (jako elektrický odpor, hustota, dynamické moduly) horniny příliš nemění (obrázek 2). S ohledem na toto rozdělení do vrstev byly interpretovány výsledky metod, které měly poskytnout vstupy do T-matrix modelu - zejména byl podle něj sestaven výchozí vrstevnatý vrtný profil přiřazující každé vrstvě konstantní hodnotu statických modulů.

Z pohledu dvou kategorií porušení - mechanické a chemické zvětrání - popsanych v kapitole 3 bylo zjištěno, že naprostá většina porušení detekovaného ve vrtu K-1 patří do kategorie mechanického porušení.

Projevy mechanického porušení byly zachyceny zejména sondou ABI, kde bylo detekováno velké množství diskontinuit, a také se projevilo na křivkách útlumu z FWS a KAS. Poklesy hustoty spojené s rozpukáním a v malé míře zvětráním masivu byly zachyceny GGK. Hodnoty hustot přímo posloužily, společně s rychlostmi p - a s -vln z FWS, ke stanovení křivek dynamických elastických modulů, které jsou označovány E_D a ν_D . Dále byla z hodnot hustoty stanovena křivka porozity, která byla společně s křivkou porozity stanovenou pomocí NNK použita v modelu.

Pomocí GK a elektrických metod bylo zjištěno, že profil ve kterém byl vrt vyhlouben je možné rozdělit do vrstev uvnitř kterých nebylo nutné zavádět opravy na výkyvy jílovitosti nebo jiných změn v minerálním složení jako důsledků porušení zvětráním, které by podstatně ovlivňovaly gama aktivitu nebo odpor respektive vodivost horniny. Ani makroskopický popis jádra neodhalil opak. (viz tabulka 3).

5.4 Vzorkování vrtného jádra a laboratorní měření

Po popsání vrtného jádra byly z tohoto jádra odebrány vzorky tak, aby byl celý vrtný a karotážní profil rovnoměrně pokrytý. Zároveň byla snaha o ovzorkování všech zastižených horninových typů. Byly odebrány vzorky pro statické jednoosé zkoušky v lisu, pro stanovení měrné hmotnosti v pyknometru a pro zhotovení dvojic výbrusů - vždy vzájemně kolmé horizontální a vertikální. Z rozpisu vzorků uvedeného v tabulce 4 je patrné, že bylo odebráno celkem 10 vzorků k vyhotovení zkušebních tělísek pro jednoosé zkoušky, 5 vzorků pro stanovení měrné hmotnosti v pyknometru a 4 vzorky pro zhotovení výbrusů.

Tabulka 4: Seznam odebraných vzorků

jednoosá zkouška + prozařování ultrazvukem			
označení vz.	hloubka od [m]	hloubka do [m]	stručná petrografická charakteristika
1A	2,83	3,00	mikritický vápenec s bioklasty, bituminózní
1B	3,48	3,61	mikritický vápenec s bioklasty, bituminózní
2A	4,51	4,67	sparitický vápenec s bioklasty
3A	6,80	7,00	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu
4C	8,90	9,20	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu
5A	10,02	10,24	sparitický vápenec, s bioklasty a příměsí pyritu
5B	11,03	11,15	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu
6A	12,00	12,20	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu
7A	14,38	14,51	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu
7B	15,00	15,13	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu
pyknometr			
P-1	3,10	3,10	mikritický vápenec s bioklasty, bituminózní
P-2	5,80	5,80	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu
P-3	9,80	9,80	sparitický vápenec, s bioklasty a příměsí pyritu
P-4	15,80	15,80	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu
P-5	4,70	4,70	břidlice tufitická s bioklasty (úlomky vápnitých schránek)
výbrusy			
1C	3,40	3,47	mikritický vápenec s bioklasty, bituminózní
2A	4,51	4,67	sparitický vápenec s bioklasty
3A	6,80	7,00	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu
7A	14,38	14,51	mikritický vápenec se sparitickými výplněmi, bioklasty a příměsí pyritu

Pro měření statických modulů byla z odebraných vzorků připravována zkušební tělíska tvaru válce o rozměrech 100 x 50 mm (výška x průměr). Celkem bylo vyrobeno 10 válečků, jejich přesné rozměry, hmotnosti a objemové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Rozměry, hmotnosti a objemové hmotnosti připravených válečků

označení vzorku	výška [mm]	průměr [mm]	hmotnost [g]	objemová hmotnost [g.cm ⁻³]
1A	100,2 8	51,99	572,07	2,688
1B	98,74	52,09	562,84	2,675
2A	100,1 6	51,96	570,46	2,686
3A	99,81	51,99	589,08	2,781
4C	100,1 8	51,98	575,27	2,707
5A	100,3 2	51,95	571,98	2,690
5B	100,4 1	51,98	573,84	2,694
6A	100,2 4	51,97	572,56	2,693
7A	98,53	51,97	588,72	2,817
7B	100,5 2	51,97	580,12	2,721

5.4.1 Stanovení hustot a posouzení porozity matrice

V případě válcových vzorků byla vážením stanovena objemová hmotnost. Měřeními v pyknometru bylo možné stanovit měrnou hmotnost neboli hustotu matrice. Objemové hmotnosti válečků jsou uvedeny v tabulce 5, měrné hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 6. Dále byly stanoveny hustoty matrice na základě minerálního složení určeného na výbrusech (podrobnosti viz kapitola 5.4.2). Výpočet byl proveden při použití hustot minerálů podle (Mavko et al. 2009 a Schön 1996). Výsledky stanovení jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 6: Měrné hmotnosti stanovené pomocí pyknometru

označení vzorku	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	2,677	2,762	2,751	2,749	2,756

Tabulka 7: Hustoty matrice vypočtené z procentuálních zastoupení minerálů určených na výbrusech

označení vzorku	1C	2A	3A	7A
hustota matrice [g.cm ⁻³]	2,713	2,713	2,865	2,727

Znalost výše uvedených hustot byla využita ke kontrole kalibrace hustotní karotáže a kalibraci neutron-neutron karotáže. Hustotní karotáž byla kontrolně kalibrována přímo na objemové

hmotnosti stanovené na válečcích. Poté byly ze křivky hustotní karotáže odečteny hodnoty odpovídající intervalu, odkud byl odebrán vzorek pro pyknometr nebo výbrus a z každé této hodnoty byla pomocí odpovídající hodnoty měrné hmotnosti nebo hustoty matrice vypočtena porozita pro danou hloubkovou úroveň. Na tyto hodnoty byla posléze kalibrována neutron-neutron karotáž. Z archivních zpráv bylo zjištěno, že ve zkoumaných horninách se pórovitost má pohybovat v prvních jednotkách % v případě vápenců a břidlic, a až kolem 10 % v případě vulkanitů (Hraba, Schejbal 1954).

Nově na výbrusech ze vzorků z lokality Kosov nebyly pod optickým ani pod elektronovým mikroskopem patrné žádné systematicky propojené póry (viz kapitola 5.4.2).

5.4.2 Analýzy provedené na výbrusech a jejich výsledky

Byly zhotoveny celkem čtyři dvojice výbrusů, vždy v jedné hloubkové úrovni vertikálně a horizontálně orientovaných (viz tabulka 4). Všechny čtyři dvojice byly snímkovány pomocí optického a skenovacího elektronového mikroskopu (TESCAN Vega v laboratoři SEM Ústavu petrologie a strukturní geologie PŘF UK). Výsledky analýz jsou pro jednotlivé dvojice výbrusů (vzorky) uvedeny v tabulkách 8 - 11.

Vzorek 1C

Vzorek vápence obsahuje cca 32 % bioklastů a jejich úlomků, které jsou roztroušeny v jemnozrnné matrix. Klasy mají velikost do 3,5 mm. Je patrné zvrstvení, více méně paralelní s horizontální rovinou. Vzorek je protkán mladšími kalcitovými žilkami, obvykle vertikálními, místy jsou přítomny stylolity (švy tlakového rozpouštění), též vertikálně orientované.

Většinu pórů lze aproximovat koulí s poloměrem 2-5 μm - vyplňují prostory mezi jednotlivými zrny. Větší póry (tvoří cca 15 % pórového prostoru) lze aproximovat prolátním sferoidem s nejdelší poloosou délky 20-30 μm a s kratšími poloosami zhruba polovičními. Okolo 5 % pórového prostoru tvoří póry na rozhraních mezi dvěma fázemi (minerály). Ty by bylo možné aproximovat oblátním sferoidem s krátkou poloosou délky cca 3 μm a delšími poloosami délky cca 10 μm .

Tabulka 8: Vzorek 1C - přibližné mineralogické složení včetně velikosti zrn

minerál	zastoupení [%]	velikost zrna (min - medián - max) [μm]
kalcit	83,4	(3) - 80
dolomit	7,6	(2) - 15 - 30
křemen	3,7	(2) - 10
albit	3,9	(2) - 12
pyrit	0,6	(1) - 4 - 11
ilmenit	0,1	2 - 13

odhad porozity: 0,47 %
max. velikost porů: 50 μm

Vzorek 2A

Vzorek vápence je tvořen bioklasty, zvrstvení je víceméně horizontální. Klasty jsou roztroušeny nerovnoměrně.

Většina pórů vyplňuje prostory mezi zrny a lze je aproximovat koulí nebo mírně prolátním sferoidem s poloměrem/delší poloosou do 5 μm.

Výjimečně větší póry lze aproximovat mírně prolátním sferoidem s delší poloosou cca 10-20 μm, případně i koulí.

Tabulka 9: Vzorek 2A - přibližné mineralogické složení včetně velikosti zrn

minerál	zastoupení %	velikost zrna (min - medián - max) [μm]
kalcit	92,1	(5) - 20 - 900
křemen	5,0	(2) - 10 - 50
dolomit	2,5	(2) - 10 - 25
pyrit	0,2	(2) - 5 - 10
apatit	0,1	5 - 20

odhad porozity: 0,28 %

Vzorek 3A

Vzorek vápence je tvořen bioklasty, které dosahují až velikosti 3 cm, s několika generacemi kalcitových žil. Výrazná je přítomnost pyritu, který obvykle sleduje zvrstvení, je rozptýlen velmi nehomogenně.

Většina pórů vyplňuje prostory mezi zrny a lze je aproximovat koulí nebo mírně prolátním

sferoidem s poloměrem/delší poloosou délky 1 - 10 μm . V blízkosti pyritu póry s delší poloosou okolo 25 - 30 μm . Ty tvoří cca 5 % pórového prostoru.

Tabulka 10: Vzorek 3A - přibližné mineralogické složení včetně velikosti zrn

minerál	zastoupení %	velikost zrna (min - medián - max) [μm]
kalцит	89,0	(2) - 10 - 140
dolomit	0,5	(2) - 5 - 20
křemen	1,6	(2) - 25
albit	1,8	(2) - 5 - 30
pyrit	6,8	(2) - 20 - 460
ilmenit	0,1	5 - 30
apatit	0,1	5 - 40
muskovit	0,1	(2) - 5 - 10
K-živec	0,1	(2) - 10

odhad porozity: 0,81 %

Vzorek 7A

Vzorek vápence obsahuje menší množství bioklastů, patrné je zvrstvení šikmé vůči horizontále. Oproti předchozím vzorkům je zde přítomen chlorit.

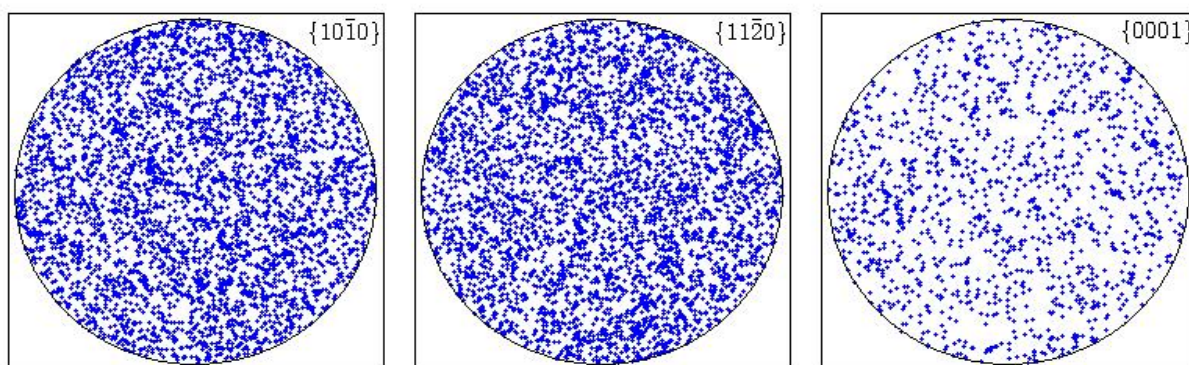
Většina pórů vyplňuje prostory mezi zrny a lze je aproximovat koulí s poloměrem 1 - 5 μm . Větší póry, které tvoří až 30 % pórového prostoru lze aproximovat koulí nebo mírně prolátním sferoidem s poloměrem/delší poloosou délky 10 - 25 μm .

Tabulka 11: Vzorek 7A - přibližné mineralogické složení včetně velikosti zrn

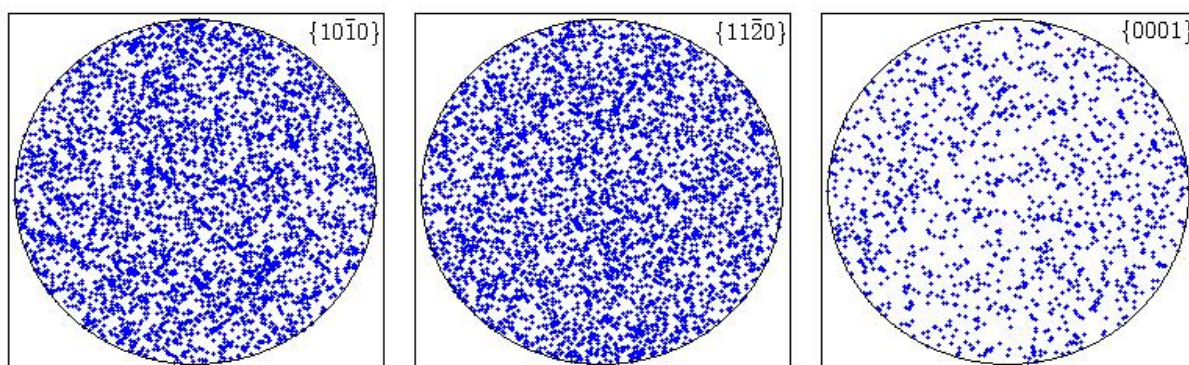
minerál	zastoupení %	velikost zrna (min - medián - max) [μm]
kalцит	92,5	(2) - 40 - 230 - (500)
chlorit	4,5	(5) - 50 - 200
křemen	1,1	(2) - 5 - 130
albit	1,1	(2) - 5 - 40
pyrit	0,4	(5) - 25 - 150
ilmenit	0,4	(2) - 20 - 60

odhad porozity: 0,19 %

Ve všech vzorcích je přítomen také organický uhlík, který nelze použitou metodou vyčíslit. Jeho zastoupení ovšem není nijak zásadní. Protože se pomocí optického mikroskopu nepodařilo najít nějaké výraznější uspořádání zrn byly na dvou výbrusech provedeny pomocí skenovacího elektronového mikroskopu analýzy ve zpětně odražených elektronech (EBSD). Výsledkem jsou stereogramy se směry krystalografických os jednotlivých zrn vůči základním krystalografickým směrům trigonální soustavy (obrázek 3 a obrázek 4). Ve stereogramu jsou vyneseny orientace jednotlivých krystalových ploch (označených Bravaisovými symboly v pravém horním rohu každého stereogramu) bodově analyzovaných zrn kalcitu. Vzhledem k množství dat jsou póly těchto ploch znázorněny pomocí Schmidovy projekce (na spodní polokouli). Orientace vynesené ve stereogramu jsou vztaheny k souřadnému systému vzorku. Tento směr je v našem případě definován směrem osy vrtu. Směry horizontálních os je možné zvolit libovolně, protože vzorky vrtného jádra nebyly odebírány jako orientované.



Obrázek 3: Vzorek 1C - stereogramy s orientacemi krystalografických os jednotlivých zrn



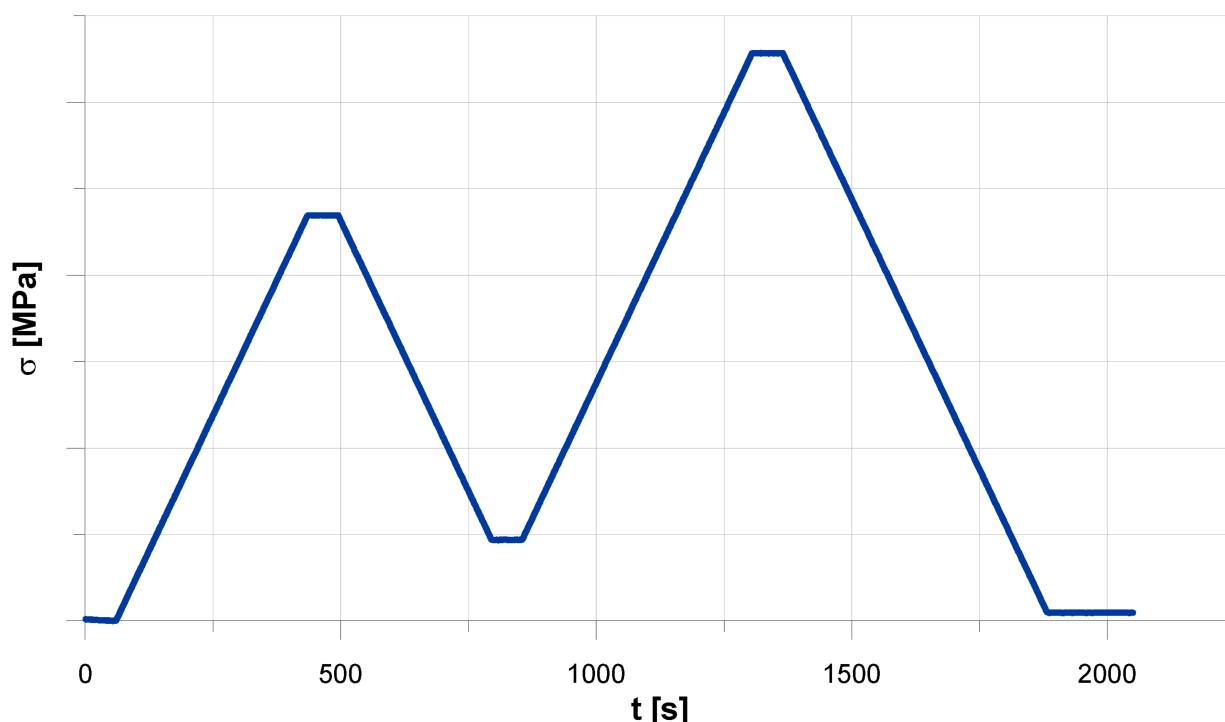
Obrázek 4: Vzorek 7A - stereogramy s orientacemi krystalografických os jednotlivých zrn

Z obou obrázků je jasně patrné náhodné rozložení orientací, kde se ani pomocí EBSD nedá určit žádná přednostní orientace stavby. Na základě těchto analýz a výše prezentovaných zjištění,

že většinu pórů lze aproximovat koulí, bylo rozhodnuto, že aproximace struktury horniny v malém měřítku (do cca 2 cm) jako dokonale neuspořádané bude s dostatečnou přesností vyhovovat.

5.4.3 Specifikace statických zatěžovacích zkoušek v laboratoři

Metodika a názvosloví měření popsaných níže vychází z (Hawkes, Mellor 1970). Měření byla prováděna pomocí lisu MTS-815 v laboratoři Geologického ústavu AV ČR v.v.i. na Puškinově náměstí, Praha 6. Axiální přetvoření bylo měřeno dvojicí protilehlých LVDT senzorů a radiální přetvoření bylo měřeno senzorem osazeným na řetízku v polovině výšky válečku. LVDT senzor měří přímo změnu vzdálenosti břitů spočívajících svísele na plášti válcového zkušební tělíska, jejichž vzdálenost se mění se změnou délky zkušební tělíska. Senzor osazený na řetízku naproti tomu měří změny obvodu válce. Zkoušky byly prováděny v režimu řízeného zatěžování. Všechny vzorky byly zatěžovány podle shodného protokolu měření, který zahrnoval dva zatěžovací cykly s konstantní rychlostí zatěžování a odlehčování $8 \text{ kN}\cdot\text{min}^{-1}$ či-li $62,8 \text{ kPa}\cdot\text{s}^{-1}$. V prvním cyklu bylo zatěžováno na 50 % předpokládané σ_c (σ_c pevnost v prostém tlaku), ve druhém cyklu na 70 % předpokládané σ_c vzorku. Grafické znázornění zatěžovacího protokolu zkoušek viz obrázek 5).



Obrázek 5: Grafické znázornění zatěžovacího protokolu jednoosých statických zkoušek v lisu v laboratoři. Tvar průběhu zatěžování byl totožný pro všechny provedené zkoušky, pouze hodnoty maximálního napětí σ byly měněny podle odhadované σ_c jednotlivých vzorků. Z tohoto důvodu je svislá osa zobrazena pouze jako relativní.

Pevnost σ_c byla odhadnuta na základě archivních měření na horninách z lokality VLČS (výsledky měření na vzorcích z VLČS realizovaných v roce 2000 z archivu laboratoře Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR na Puškinově náměstí - v té době ještě Ústavu Struktury a Mechaniky Hornin) a výsledků pilotních měření z roku 2011 zmíněných v kapitole 5.1.1. Během celého měření byl vzorek osazen ultrazvukovými snímači a byla zaznamenávána akustická emise během zatěžování pro případ, že by se vzorek začal porušovat. V takovém případě by nebyla splněna podmínka měření v režimu elastické deformace, zatěžování by bylo zastaveno a příslušný rozsah napětí by byl z vyhodnocování zkoušky vyloučen. Splnění této podmínky zaručuje fyzikální správnost aplikace T-matrix modelu, kam potřebujeme jako vstupní data moduly neporušeného materiálu matrice horniny (viz. kapitola 4.1). Rozsahy použitých napětí a jim odpovídající velikosti dosažených přetvoření jsou uvedené v tabulce 12. Z těchto hodnot byly následně stanovovány statické moduly, které jsou označovány E_S a ν_S . Moduly byly vždy interpretovány pouze z přibližně lineárních úseků stress-strain křivek. Jde o tečné moduly v okolí 50 % σ_c v souladu s (Hawkes, Mellor 1970).

Tabulka 12: Rozsahy napětí a přetvoření použité pro stanovení statických modulů a výsledné hodnoty statických modulů

označení vzorku	σ_{min} [MPa]	σ_{max} [MPa]	axiální přetvoření (σ_{min}) [microstrain]	axiální přetvoření (σ_{max}) [microstrain]	radiální přetvoření (σ_{min}) [microstrain]	radiální přetvoření (σ_{max}) [microstrain]	E_S [GPa]	ν_S [-]
1A	26,4	32,9	304,29	386,64	35,87	54,84	74,8	0,28
1B	21,5	32,7	322,79	496,94	56,25	91,93	64,3	0,25
2A	26,8	37,7	440,03	598,18	41,09	66,06	68,2	0,19
3A	17,2	32,7	288,25	527,42	38,83	74,56	65,3	0,18
4C	10,2	37,7	167,53	577,49	33,33	101,42	67,0	0,20
5A	28,6	37,8	449,97	593,92	60,93	87,17	61,8	0,22
5B	17,0	37,4	150,52	471,95	59,33	113,16	62,9	0,20
6A	4,9	50,0	124,81	907,08	46,05	191,29	56,6	0,22
7A	27,5	32,7	626,56	733,05	24,30	39,72	49,5	0,17

Vyhodnocením získaných dat byly stanoveny statické elastické moduly uvedené v tabulce 12. Vyhodnocovány byly všechny zatěžovací i odlehčovací úseky celého zkušebního cyklu. Rozdíly mezi moduly určenými z prvního zatěžování a ze zatěžování druhého diskutované v článku (Sone, Zoback 2013) zde v případě vzorků 1A, 1B a 4C byly zanedbatelné, v případě

vzorků 2A, 3A, 5A, 5B, 6A a 7A byly v řádu prvních jednotek GPa (pozitivní i negativní). Rozdíly lze prohlásit za nevýznamné, jelikož se pohybují maximálně kolem 10 % hodnoty modulu. Je nutné poznamenat, že všechny vzorky vykazovaly dobrou end-point memory. To znamená, že po dosažení maximální hodnoty napětí v rámci prvního zatěžovacího cyklu, kdy byla dosažena určitá hodnota přetvoření (axiálního či radiálního), je provedeno odlehčení. Následuje zatěžování v rámci druhého zatěžovacího cyklu a pokud při opětovném dosažení maximální hodnoty napětí z prvního zatěžovacího cyklu je hodnota přetvoření shodná jako v prvním zatěžovacím cyklu, materiál vykazuje dobrou end-point memory. Stress-strain křivka druhého zatěžovacího cyklu se tak v tomto bodě plynule napojuje na stress-strain křivku z prvního zatěžovacího cyklu a pokračuje dále podobně, jako kdyby v rámci prvního zatěžovacího cyklu nebylo provedeno odlehčení a bylo monotónně zatěžováno dále do vyšších napětí.

Malé rozdíly mezi moduly stanovenými z prvního a druhého zatěžování lze zdůvodnit tím, že byl kladen důraz na měření celé statické zkoušky v režimu elastické deformace, kde nedochází k podstatným trvalým změnám v objemu či tvaru vzorku způsobenými zatěžováním. V tabulce 12 jsou uvedeny statické moduly stanovené ze zatěžovací větve druhého zatěžovacího cyklu. Druhé zatěžovací větve byly použity, protože je zde menší riziko ovlivnění výsledku chybami způsobenými např. dosedáním vzorku a podstav s ultrazvukovými snímači na čelisti lisu a interval napětí, ze kterého mohou být moduly určovány, je potenciálně širší.

U každého vzorku je uveden interval napětí, na kterém bylo prováděno vyhodnocení. Tento interval byl určen podle rozsahu lineární části křivky radiálního přetvoření, protože tato křivka byla (oproti křivkám axiálních přetvoření) v některých případech postižena chybou měření v důsledku nesprávné funkce čidla radiálního přetvoření (občas došlo k dočasnému zaseknutí měřicího řetízku). Díky znalosti chování snímače radiální deformace z kalibračních měření na duralovém válečku bylo možné omezením intervalu napětí vliv chyb tohoto typu významně potlačit.

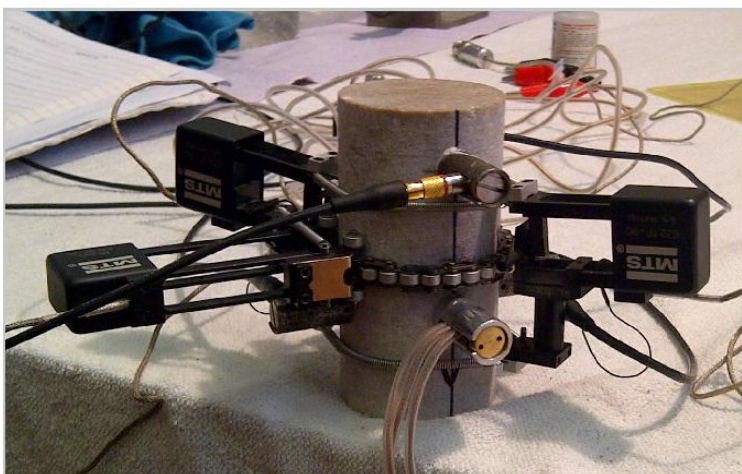
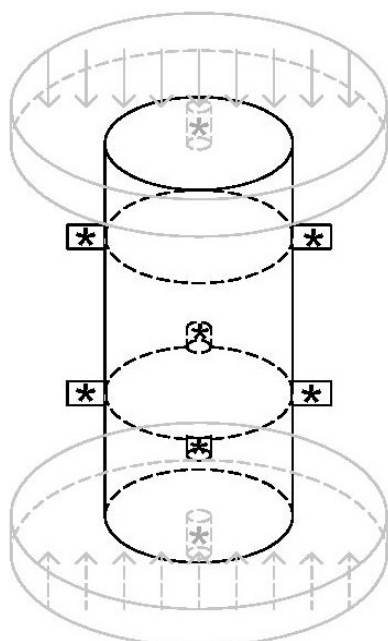
5.4.4 Specifikace dynamických laboratorních zkoušek

Použité laboratorní dynamické zkoušky stojí na principu měření času průchodu elastické vlny zkušebním tělískem od pulzního zdroje k přijímači. Vzhledem k rozměrům zkušebních tělísek - první centimetry až decimetry - se používají elastické vlny ultrasonických frekvencí, které mají dostatečně malou vlnovou délku. Jde o frekvence v řádu stovek kHz až prvních MHz a jsou

používány piezokeramické snímače. Dalším důsledkem rozměrů zkušebních tělísek, na kterých jsou prováděna laboratorní měření je, že je můžeme považovat za homogenní. V důsledku toho můžeme předpokládat, že dráha (seismický paprsek), podél které se šíří předmětná elastická vlna mezi zdrojem a přijímačem je přímková. Tato měření nemají za cíl zkoumat lokální nehomogenity zkušebního tělíska, ale stanovit jakési průměrné vlastnosti zkoumaného materiálu. Pokud je velikost zkušebního tělíska dostatečně velká vzhledem k velikosti nehomogenit v něm, tak toto zkušební tělísko dobře reprezentuje vlastnosti zkoumaného materiálu. Z času průchodu elastické vlny po dráze známé délky lze následně stanovit rychlost šíření dané elastické vlny. Při znalosti objemové hmotnosti zkoumané horniny a rychlostí p- a s-vln lze vypočítat dynamické moduly horniny. V případě izotropní horniny jde typicky o Youngův modul a Poissonovo číslo. Jak už bylo zmíněno v kapitole 2, hodnoty takto získaných dynamických modulů jsou zpravidla vyšší, než hodnoty statické, získané pomocí jednoosých zatěžovacích zkoušek popsanych v kapitole 5.4.3.

Tato měření lze provádět buď za nulového napětí pomocí zařízení s přítlačnými snímači anebo i během statické zatěžovací zkoušky. V případě měření během zatěžování v lisu jsou používány snímače v držácích nalepených na válcovém plášti zkušebního tělíska a dva snímače umístěné vůči zkušebnímu tělísku axiálně, v čelistech lisu. Všechny vzorky byly těmito snímači osazeny, protože tyto snímače primárně sloužily ke sledování akustické emise (viz kapitola 5.4.3). Geometrie rozmístění snímačů je zobrazena na obrázku 6.

Hloubky, z nichž byly odebrány vzorky zkoumané v této práci, se pohybují maximálně v prvních desítkách metrů, což má za následek velmi malé hodnoty vertikálního napětí způsobeného hmotností nadloží. Z tohoto důvodu byla ultrazvuková prozařování realizována na válcových zkušebních tělískách pro statické zatěžovací zkoušky, a to před zahájením zatěžování. Frekvence prozařovacího signálu byla 1 MHz a bylo měřeno v pulzním režimu. Měření času příchodu p- i s- vlny probíhalo ve třech směrech - jedno ve směru osy válečku a dvě vzájemně kolmé v radiálních směrech. Snímače byly přítlačné, pro zlepšení kontaktu byla použita kontaktní pasta.



Obrázek 6: Schématické vyobrazení geometrie rozmístění ultrazvukových snímačů na válcovém zkušebním tělísku (vlevo). Pozice snímačů jsou vyznačeny "*". Ilustrační foto plně osazeného vzorku před vložením do lisu (vpravo). Snímače sloužily k registraci akustické emise.

Měřeními ve třech směrech byla testována anizotropie materiálu z hlediska rychlosti šíření elastických vln. Ve výsledku byla zjištěna pouze slabá anizotropie rychlosti měřených vzorků, bylo tedy rozhodnuto, že je v pořádku anizotropii zanedbat. Všechny naměřené rychlosti jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13: Hodnoty rychlostí v_p a v_s stanovené při nulovém napětí ve třech vzájemně kolmých směrech

označení vzorku	svislý směr		kolmý směr 1		kolmý směr 2	
	v_p [m.s ⁻¹]	v_s [m.s ⁻¹]	v_p [m.s ⁻¹]	v_s [m.s ⁻¹]	v_p [m.s ⁻¹]	v_s [m.s ⁻¹]
1A	6145	3367	6144	3424	6102	3429
1B	6297	3443	6243	3462	6248	3521
2A	6056	3354	5879	3419	6199	3378
3A	5899	3352	5360	3571	6144	3442
4C	5934	3260	6159	3433	5800	3281
5A	5655	3195	5671	3243	6111	3377
5B	6005	3301	6114	3406	5947	3345
6A	5448	3096	5358	3097	5379	3161
7A	5084	3054	5280	3414	5314	3165

6 Praktická realizace výpočtu modelu T-matrix na lokalitě Kosov

Praktická realizace modelového výpočtu je prezentována na datech z měření v lomu Kosov.

Vstupními parametry modelu jsou hodnoty dynamických modulů z FWS (Youngův modul E_D a Poissonovo číslo ν_D), hodnoty porozity, údaje o trhlinách z ABI a hodnoty statických elastických modulů známé v určitých místech (Youngův modul E_S a Poissonovo číslo ν_S). Hodnoty dynamických modulů přímo vstupují do modelu, zatímco porozitní data a data z ABI jsou zpracovány do takzvané porozity efektivního média, která reprezentuje porušení trhlinami.

Při sestavování T-matrix modelu byly nejprve efektivní hodnoty modulů počítány v místech, kde byly známy statické hodnoty modulů, stanovené na zkušebních tělískách odebraných z vrtného jádra (Chalupa et al. 2017). Tak bylo možné provést kalibraci modelu. Teprve po tomto ověření byl proveden výpočet přes celý vrtný (karotážní) profil.

Pro stanovení hodnot porozity se vycházelo z měření neutronové karotáže dle metodiky popsané v kapitole 5.3.1. Kvůli velké vzdálenosti mezi zdrojem neutronů a detektorem (60 cm) sonda poskytuje zhlazenou křivku porozity bez lokálních maxim způsobených jednotlivými trhlinami. Z tohoto důvodu bylo nutné do výpočtu porozit zavést vliv trhlín detekovaných pomocí sondy ABI. Kategorizací trhlín a stanovením jejich porozitního příspěvku do modelu byla vypočtena takzvaná porozita efektivního média.

Výpočet porozity efektivního média probíhá v klouzavém okně podél vrtného profilu. Délka tohoto okna byla stanovena tak, aby odpovídala délce měřicí báze sondy FWS. Karotážní sonda FWS registruje rozdíly v časech příchodu elastické vlny na třech přijímačích s rozestupy po 20 cm (viz kapitola 5.3.1). Celková vzdálenost, kterou prošel vyhodnocovaný seismický signál je tedy maximálně 40 cm. Délka klouzavého okna byla proto zvolena 40 cm. Tento rozměr je též v relaci k vlnové délce registrovaných P-vln. Z hlediska rozlišení se u seismického signálu bere jako minimum polovina vlnové délky ($\lambda/2$). Při frekvenci registrované vlny kolem 12 kHz a rychlosti v_P zhruba $6\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se $\lambda/2$ pohybuje kolem 25 cm. Frekvence registrovaných vln bývají ale často i nižší, což má při konstantní rychlosti za následek nárůst vlnové délky.

Klouzavé okno pro výpočet porozity efektivního média se pohybuje přes celou hloubku vrtnu s krokem stejným, jako je krok karotážního měření FWS (v daném případě byl krok 5 cm). Signál,

který byl registrován karotážní sondou, tedy musel projít všemi trhlinami, které se nacházejí uvnitř klouzavého okna v jeho aktuální pozici. Jelikož přetvoření způsobené průchodem elastické vlny je řádově menší než pokud bychom na vzorku ze stejného materiálu provedli jednoosou zatěžovací zkoušku, lze očekávat, že trhliny se na výsledku dynamického měření mohly projevit pouze v omezené míře. Uvnitř klouzavého okna je v rámci jednoho kroku spočtena celková porozita efektivního média jako součet dílčích příspěvků všech detekovaných trhlín, které v dané pozici klouzavé okno zahrnuje. Porozita, detekovaná pomocí neutronové karotáže, je považována za porozitu neporušené horniny. Příspěvek nehomogenit - trhlín (případně žil) je detekován sondou ABI. Každá takto detekovaná trhlina v sobě zahrnuje i porušenou zónu v jejím bezprostředním okolí, kde dochází k útlumu seismického signálu. Velmi často jde o několik milimetrů mocnou zónu tvořenou paralelními tenkými trhlinami, která se díky menšímu rozlišení akustického signálu sondy ABI zobrazí jako celistvý objekt.

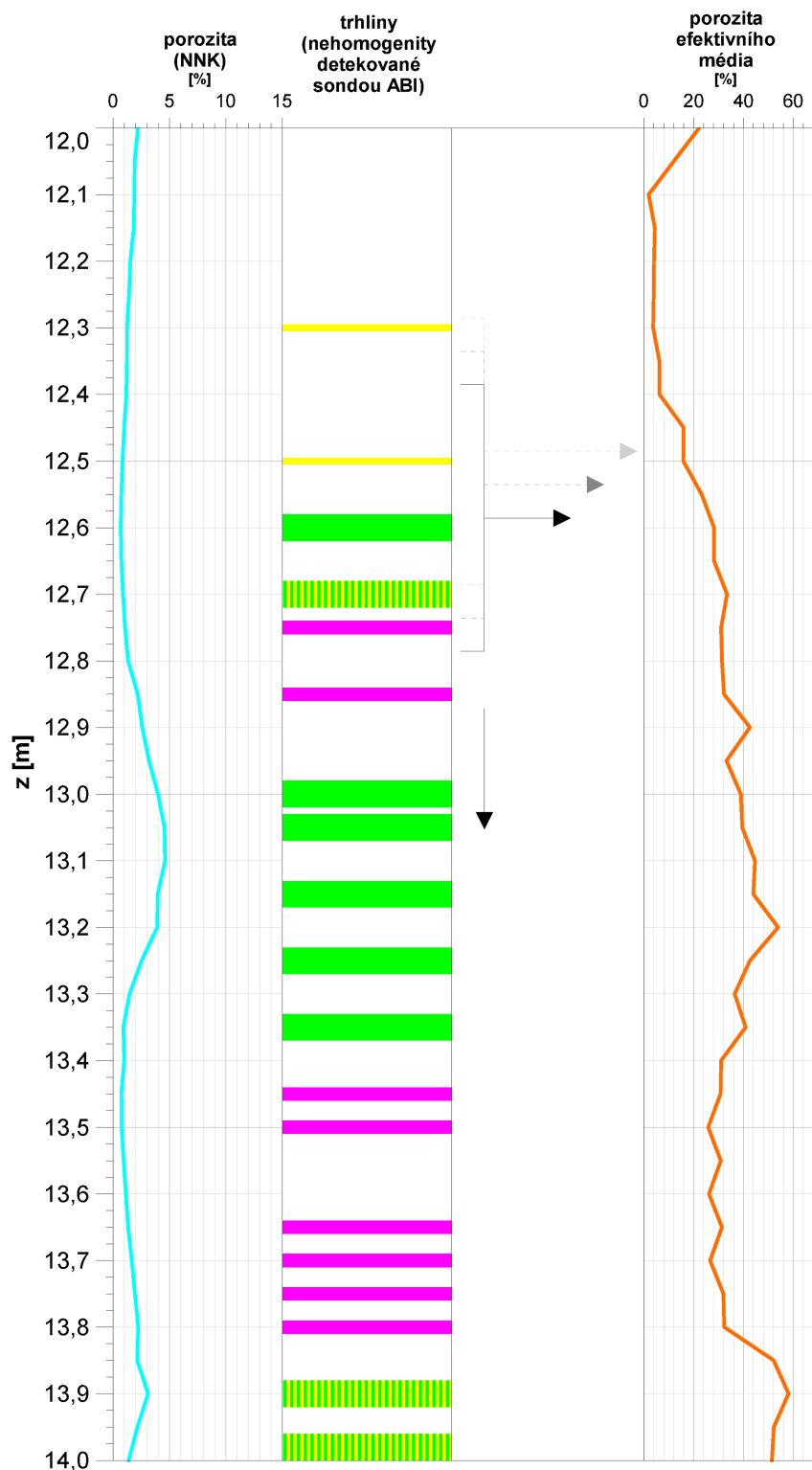
Pro výpočet modelu bylo reálné prostředí zjednodušeno. Jako výplň trhlín byla v těsné blízkosti vrtu uvažována voda, dále od vrtu vzduch. Obě sondy (FWS a ABI) totiž k měření vyžadují vrt zaplněný výplachem - vodou, kvůli zajištění přenosu signálu do stěny vrtu. Průsaková vzdálenost se většinou pohybuje v řádu prvních centimetrů. Trhliny jsou často založeny na vrstevních plochách pokrytých tenkou slíinitou nebo břidličnou vrstvou. Malé ztráty výplachu, zaznamenané během vrtání a popsané v kapitole 5.2, svědčí o tom, že ve valné většině případů nejsou trhliny propustné pro vodu na vzdálenost větší než několik cm do okolí vrtu. Kromě vzduchu část výplně tedy tvoří i jílovitý materiál. Vzhledem k velkému kontrastu mezi nízkou hodnotou Youngova modulu jílu oproti vysokým hodnotám Youngova modulu v okolním vápenci (v jílu se tyto hodnoty pohybují v jednotkách MPa, ve vápenci v desítkách GPa), byl pro zjednodušení modelového výpočtu jílovitý podíl zahrnut do porozity. Některé detekované nehomogenity mají charakter trhlín vyhojených kalcitem, jedná se tedy o žíly. V tomto případě má výplň z hlediska elastických a pevnostních parametrů minimální kontrast s okolním vápencem a zpravidla je trhlina vyplněna beze zbytku.

Trhliny detekované sondou ABI byly na základě míry útlumu amplitudy seismického signálu a zjištěné tloušťky rozděleny do čtyř kategorií - velmi výrazná trhlina, středně výrazná trhlina, málo výrazná trhlina a žíla. Každá z uvedených kategorií je reprezentována průměrnou tloušťkou trhliny

na obrazu ze sondy ABI - 40, 20 a 10 mm ve stejném pořadí. Tloušťka žil byla vzhledem k výše zmíněnému minimálnímu kontrastu položena rovna 0 mm.

Pro jednotlivé kategorie trhlín byla poté spočtena hodnota porozity, která odpovídá přítomnosti jedné trhlíny na intervalu klouzajícího okna. To bylo provedeno jako poměr průměrné tloušťky trhlíny v dané kategorii k délce klouzavého okna (40 cm). Takto byly kategoriím trhlín přiřazeny hodnoty porozity 10 % (velmi výrazná; průměrná tloušťka trhlíny na ABI obrazu byla 40 mm), 5 % (středně výrazná; průměrná tloušťka trhlíny na ABI obrazu byla 20 mm) a 2,5 % (málo výrazná; průměrná tloušťka trhlíny na ABI obrazu byla 10 mm). Porozitní příspěvek žil vyhojených kalcitem byl položen rovný 0 %. Celkový příspěvek všech trhlín různých kategorií přítomných na intervalu délky klouzavého okna se spočítá součtem jim odpovídajících porozit.

Po nastavení těchto parametrů kategorií trhlín bylo možné pro každou polohu klouzavého okna provést součet porozity z neutronové karotáže s příspěvky detekovaných trhlín. Mechanismus výpočtu porozity efektivního média je znázorněn na obrázku 7. Výsledkem výpočtu je křivka porozity efektivního média přes celý vrtný profil. Jelikož jde v zásadě o výpočet klouzavého váženého průměru, lze ho snadno realizovat například v tabulkovém procesoru (např. Excel či Calc). Porozita efektivního média je do modelu zaváděna ve formě rodin inkluzí, které jsou uzavřeny v okolním efektivním médiu a mají parametry výplně pórového prostoru.

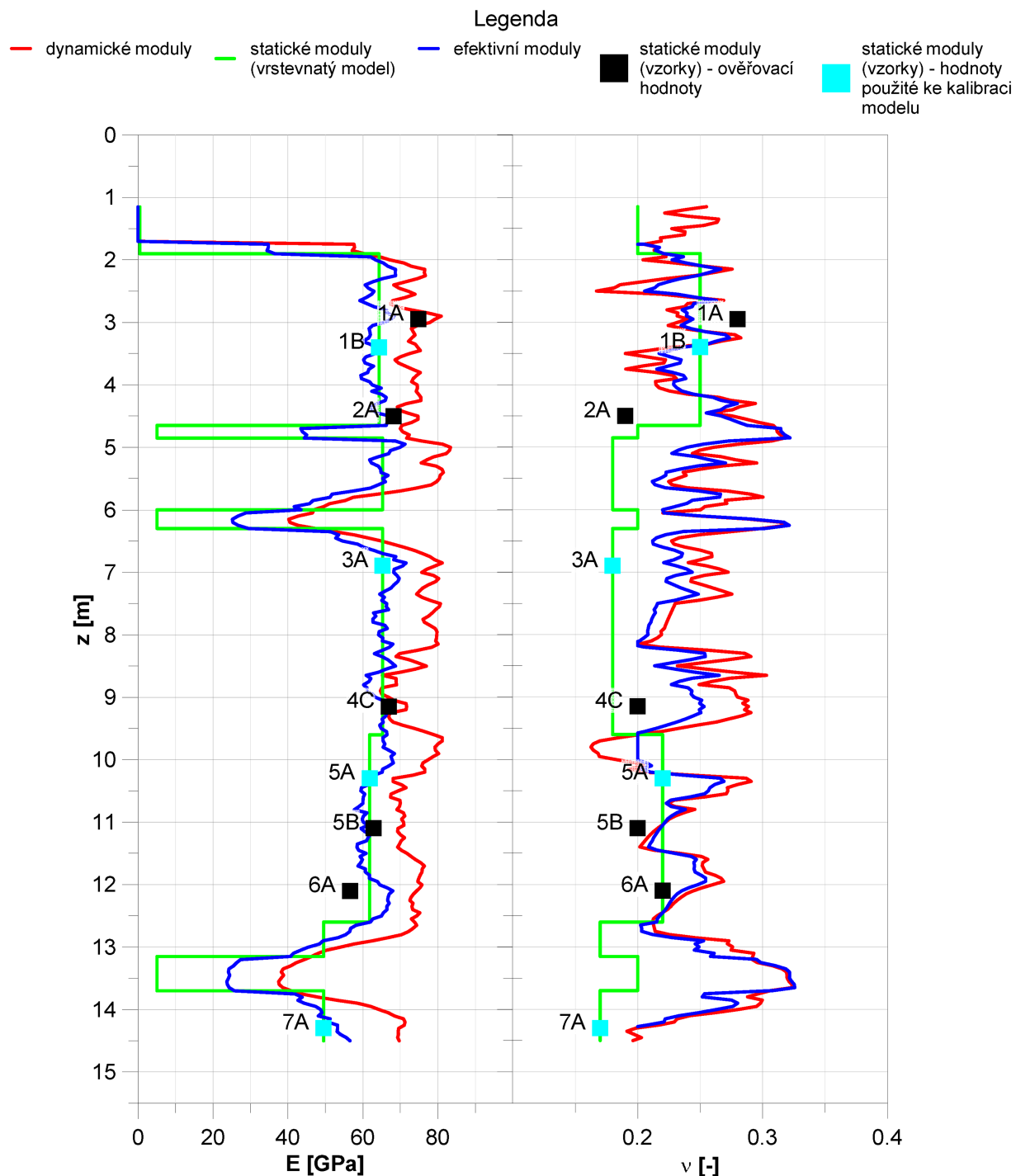


Legenda - významnost trhlin

- velmi výrazná nehomogenita
- středně výrazná nehomogenita
- méně výrazná nehomogenita
- ▨ kombinace více nehomogenit

Obrázek 7: Znárodnění mechanismu výpočtu porozity efektivního média. Výpočet je prováděn ve 40 cm dlouhém klouzavém okně. Hodnota porozity efektivního média je určena jako součet porozity z NNK a příspěvků všech trhlin detekovaných sondou ABI, které se nacházejí uvnitř klouzavého okna. Příspěvek každé z trhlin je převeden na porozitu pomocí klasifikace trhlin do předem definovaných kategorií.

Hodnoty statických modulů byly stanoveny na zkušebních tělískách (viz kapitola 5.4.3). Následně byly vrstvám ve vrtném profilu, které byly vymezeny na základě výsledků karotážních měření (viz kapitola 5.3.2), tyto statické moduly přiřazeny. Pro vytvoření výchozí vrstevnaté křivky statických modulů byla využita data z pouze čtyř z celkem devíti odebraných vzorků (1B, 3A, 5A, 7A; v Tabulce 14 a 15 vyznačeny "**"). Zbýlých pět vzorků (1A, 2A, 4C, 5B, 6A; viz Tabulka 14 a 15) bylo označeno jako kontrolní vzorky a data z nich byla použita k porovnání, zda výsledky výpočtu (efektivní moduly) odpovídají skutečným statickým modulům, stanoveným na kontrolních vzorcích. Vznikla tak vrstevnatá křivka statických modulů (zelená) zobrazená na obrázku 8, která zahrnuje navíc i vrstvy s podstatně nižší hodnotou Youngova modulu tvořené tufitickými břidlicemi, ze kterých se ani v jednom případě nepodařilo odebrat vzorky vrtného jádra pro laboratorní měření. Jde o vrstvy v hloubkových intervalech 4,70-4,85 m, 6,05-6,30 m a 13,20-13,70 m. Použité hodnoty statických modulů odpovídají horninám stejné části vrstevního sledu, ve kterém byl vrt K-1 vyhlouben, ale byly zjištěny na horninách, které se nacházejí o několik km dále v břidličném vývoji bez dominantního podílu karbonátů. Zde byly v minulosti zkoumány, a tak bylo možné vyjít z údajů o jejich modulech uvedených ve zprávách (Baloun et al. 1989, Dudík et al. 2007).



Obrázek 8: Křivky elastických modulů. Statické moduly odpovídají původní vstupní křivce vrstevnatého modelu, dále jsou zobrazeny křivka dynamických modulů z FWS a křivka vypočtených efektivních modulů. Pozice vzorků vrtného jádra jsou vyznačeny a je rozlišeno mezi vzorky použitými pro vstupní vrstevnatý model nebo jako vzorky kontrolní (Chalupa et al. 2018).

Prostředí mezi trhlinami je charakterizováno pomocí této vrstevnaté křivky, protože hodnoty takto zjištěných statických modulů v sobě zahrnují případný vliv porušení horniny v celém jejím objemu, například vlivem zvětrání.

Jak bylo postupně uváděno v předchozím textu, podařilo se vyloučit 3 z pěti vlivů, které dle

(Fjær 2019) způsobují rozdíly mezi hodnotami statických a dynamických modulů. Vyloučením vlivů rychlosti přetváření, podmínek drénování vzorků a anizotropie zbývá modelováním odstranit pouze vliv rozdílných velikostí přetvoření dosažených během statických a dynamických zkoušek a vliv heterogenit. První z vlivů je do modelu zaveden pomocí vrstevnaté křivky statických modulů. Druhý z vlivů je pak hlavním cílem výpočtu T-matrix modelu, který řeší vliv heterogenit (inkluzí, trhlin) uvnitř horniny (elastického média).

Vlastní výpočet v programovacím prostředí MATLAB probíhá následujícím způsobem:

- dynamické moduly reprezentují referenční prostředí (tenzor $C^{(0)}$ v odvození v kapitole 4.1) jehož fluktuace modelem T-matrix počítáme. Při použití Kelvinovy notace jde tedy o matici 6x6 pro každou hloubkovou úroveň, kterých bylo ve vrtu K-1 změřeno 268 - v tomto případě vznikne tedy trojrozměrná matice o dimenzích 6x6x268.
- do matice stejných dimenzí je vložen i vrstevnatý model vrtného profilu vytvořený z hodnot statických modulů stanovených zatěžovacími zkouškami na zkušebních tělískách v laboratoři. Vznikne tak tenzor $C^{(vz)}$. Tyto tenzory zahrnují i moduly břidličných vrstev, kde byla použita archivní data.
- dále máme k dispozici již vypočtenou efektivní porozitu horniny podél vrtu ve formě vektoru, který má dimenze 268x1.
- nyní je nutné spočítat tenzory Greenovy funkce pro všechny hloubkové úrovně v hornině jejíž elastické vlastnosti jsou určeny tenzorem $C^{(0)}$. Vznikne tenzor G, který má opět shodné dimenze jako tenzor $C^{(0)}$. K výpočtu jsou použity vzorce dle (Mura 1982).
- dalším krokem je vyčíslení přechodového tenzoru $\bar{t}^{(p)}$ definovaného v rovnici (13) v kapitole 4.2 . Vzhledem ke zjištění, že makroskopicky lze zkoumanou horninu považovat za izotropní - elastické tenzory jsou z hlediska orientace v prostoru invariantní a inkluze mají sférický tvar, k výpočtu můžeme použít konstantní ODF. K vyčíslení koeficientů zjednodušených Legendrových funkcí a Legendrových polynomů bylo použito symbolických výpočtů a symbolické integrace z nástroje Symbolic Math toolbox. Integrace podle Eulerových úhlů - v našem případě pouze úhel ψ a substituovaná proměnná ξ - byla provedena numericky, obdélníkovou metodou s absolutní tolerancí 10^{-6} .

- na závěr již bylo možné pomocí výsledků všech výše popsaných výpočtů vyčíslit rovnici (8), kde je již prováděna pouze sumace a maticová inverze. Maticová inverze je prováděna pomocí operátorů MATLABu `mldivide` a `mrdivide`.

Maticový výpočet vždy probíhá pro jednu hloubkovou úroveň - v tomto případě v dimenzích 6x6 postupně pro všech 268 hloubkových úrovní, které indexuje třetí dimenze.

Výpočtem popsaným výše potom získáme hodnoty efektivních modulů. Stejně jako v případě dynamických modulů z FWS jsou to křivky přes celý vrtný profil.

Výchozí a vypočtené moduly jsou uvedeny v Tabulce 14. V tabulce se nacházejí průměrné hodnoty dynamických a efektivních modulů z blízkého okolí odběru vzorku. Jde o interval v délce do 20 cm (až 4 záměrné body v karotáži), ve kterém leží místo odběru vzorku (střed zkušebního tělíska připraveného z odebraného vrtného jádra). Pokud jsou v daném místě potřebné karotážní křivky bez výrazných výkyvů, je interval kratší (shodně s délkou zkušebního tělíska 10 cm).

Mocnosti břidličných vrstev dosahovaly prvních desítek centimetrů, v tom případě je průměr počítán z celé zjištěné mocnosti břidličné vrstvy. Tímto způsobem byl potlačen vliv chyb v určení přesné hloubky odběru vrtného jádra a určování přesné hloubky v karotáži. Zjištěné posuny vrtného jádra byly zapříčiněny především ztrátami jádra v břidličných vrstvách. V případě některých vzorků byl průběh karotážních křivek v hloubce jejich odběru složitý, plný fluktuací. Průměrováním byl vliv těchto fluktuací potlačen. V případě statických modulů jde o jednu hodnotu modulů E_s a ν_s stanovenou pro příslušný vzorek.

Tabulka 14: Výchozí a vypočtené moduly. Moduly označené pruhem jsou průměrnými hodnotami přes interval o mocnosti do 20 cm v blízkém okolí odběru vzorku. Horní index "FWS" značí, že jde o dynamické moduly z karotážního měření. Ke konstrukci výchozího vrstevnatého modelu byly použity pouze vzorky s označením "***".

vzorek	\bar{E}_D^{FWS} [GPa]	E_S [GPa]	\bar{E}_{ef} [GPa]	\bar{v}_D^{FWS} [-]	v_S [-]	\bar{v}_{ef} [-]
1A	78,8	74,8	66,9	0,23	0,28	0,24
1B*	74,7	64,3	63,5	0,23	0,25	0,24
2A	73,6	68,2	66,2	0,28	0,19	0,27
břidlice (4,70-4,85 m)	71,2	5,0	44,2	0,31	0,20	0,32
břidlice (6,05-6,30 m)	43,3	5,0	27,0	0,28	0,20	0,28
3A*	79,1	65,3	69,6	0,25	0,18	0,23
4C	71,6	67,0	67,8	0,29	0,20	0,25
5A*	69,5	61,8	60,4	0,28	0,22	0,26
5B	70,2	62,9	60,4	0,22	0,20	0,22
6A	74,0	56,6	67,0	0,24	0,22	0,23
břidlice (13,20-13,70 m)	39,6	5,0	24,9	0,31	0,20	0,32
7A*	69,5	49,5	53,4	0,20	0,17	0,19

7 Výsledky výpočtů a jejich diskuse

V první fázi výpočtu byla stanovena porozita efektivního média. Výsledná křivka je zobrazena v obrázku 7. Spočtené hodnoty porozity efektivního média jsou ve srovnání s běžnými hodnotami skutečné porozity hornin výrazně vyšší. Důvodem je fakt, že statické moduly, použité jako vstupní hodnoty v modelu T-matrix, máme k dispozici pouze z relativně pevnějších intervalů vrtného profilu. V těch lze odebrat vrtné jádro způsobilé pro výrobu zkušebních tělísek do laboratoře. Z více porušených měkčích intervalů se obvykle nedaří takový vzorek získat.

Pokud se v rámci vrstvy reprezentované statickým modulem příslušného vzorku nacházejí dílčí polohy nebo porušená místa, kde je hornina díky porušení nebo složení měkčí, než byl materiál vzorku, projeví se tato místa na záznamech z metody ABI. Toto nastane za předpokladu, že rozdíl v hodnotě Youngova modulu převažující horniny a výplně trhlin je podobně významný jako rozdíl v hodnotě Youngova modulu jílu a vápence popsany v předchozí kapitole (tj. rozdíl jednotek MPa proti desítkám GPa). V takovém případě porozita efektivního média vnáší do výpočtu nejen chování pórových prostor v hornině (ať už jde o póry nebo o trhliny), ale funguje i

jako oprava na tuhost matrix horniny v daném místě. Mohlo se totiž stát, že nahrazením skutečných statických modulů horniny v daném místě statickými moduly zjištěnými na vzorku, byla skutečná matrix nahrazena materiálem s vyšší tuhostí.

V kompaktních úsecích vrtného profilu se porozita efektivního média blíží porozitě stanovené v laboratoři a neutron-neutron karotáží, zatímco v porušených úsecích podstatně narůstá.

Výpočtem T-matrix modelu byla získána křivka efektivních elastických modulů. V obrázku 8 je vynesena společně s křivkou původních dynamických modulů a se statickými moduly vrstevnatého modelu. Graf je rozdělen na dvě části, v jedné jsou vyneseny hodnoty Youngova modulu a ve druhé hodnoty Poissonova čísla. Přepočet na efektivní moduly lze zhruba vyjádřit tak, že původní červené křivky dynamických modulů (FWS) se posunuly (hodnoty poklesly) směrem k zelené křivce vrstevnatého modelu (statické moduly) a vedly k získání modré výsledné křivky efektivních modulů.

V případě efektivního Youngova modulu je pokles hodnot ve srovnání s dynamickým Youngovým modulem jasně patrný. Pro Poissonovo číslo není pokles mezi efektivními a dynamickými tak jednoznačný. V určitých intervalech k němu došlo, ale jinde je změna zanedbatelná nebo dokonce došlo k malému nárůstu. Toto se v případě Youngova modulu neděje. Zelená a červená křivka se sice kříží v blízkosti břidličných vrstev, ale zde jde pouze o efekt shlazení skokové změny hodnot Youngova modulu na rozhraní dvou vrstev. Tato skutečnost potvrzuje výsledky (Fei et al. 2016), kde bylo zjištěno, že zatímco statické a dynamické hodnoty Youngova modulu spolu uspokojivě korelují, v případě Poissonova čísla ze stejných měření žádná korelace nebyla patrná. Z těchto důvodů se i zde hlavní pozornost soustřeďuje na analýzu spočtených efektivních Youngových modulů.

Jak vyplývá z obrázku 8, reprezentují hodnoty statického Youngova modulu, stanovené v laboratoři na vzorcích, v horní polovině vrtu (do hloubky cca 8 m) elastické vlastnosti nejkompaktnějších úseků vrtného profilu. V rámci vrstev, na které byl profil rozdělen, se vzorky vždy nacházejí na hloubkové úrovni lokálního maxima na křivce dynamického Youngova modulu. V případě Poissonova čísla je situace analogická, místo lokálních maxim jde v tomto případě o lokální minima. Tato skutečnost odpovídá úvaze, že pro odběr vzorků z vrtu jsou nejvhodnější

kompaktní intervaly. Z těch lze s největší pravděpodobností obdržet jádro vhodné pro zhotovení zkušebních tělísek. Ve spodní části vrtu, kde míra porušení hornin byla celkově vyšší, tato korelace není patrná. S tím, jak vzrůstá porušení horniny, šance na získání vhodného jádra (především z hlediska rozměrů) klesá. Zejména pokud spolu sousedí nadložní vrstva vysoké pevnosti σ_c a podložní vrstva nízké pevnosti σ_c , dojde při vrtání v důsledku pevnostního kontrastu ke značnému poškození jádra z podložní vrstvy v okolí kontaktu vrstev. V našem případě byl tento kontakt tvořen nadložní vrstvou vápence a podložní vrstvou jílovité nebo tufitické břidlice. Mocnosti vrstev břidlice byly maximálně první desítky centimetrů. Ze žádného získaného jádra, obsahujícího břidlice, nebylo možné připravit zkušební tělíška. V rámci realizovaného experimentu se tedy nepodařilo stanovit statické moduly pro břidlice. Pro výpočet modelu byly použity archivní hodnoty statických modulů tufitických břidlic (viz kapitola 6). Tyto hodnoty jsou dobře viditelné v obrázku 8 jako výrazné poklesy na zelené křivce Youngova modulu.

Pokud nebyla mocnost vrstev břidlic příliš malá, projeví se v určité míře i na červené křivce dynamických modulů. Za pozornost stojí skutečnost, že na červené křivce Youngova modulu se nejtenčí ze zaznamenaných břidlicových vrstev téměř neprojevuje, zatímco na červené křivce Poissonova čísla se v této úrovni nachází maximum. Toto maximum se v úrovni břidlicových vrstev objevuje vždy a Poissonovo číslo v těchto místech dosahuje nejvyšších hodnot na celém profilu. Efekt zkreslení křivek při malé mocnosti vrstev je při karotážních měřeních běžný. Pokud má sonda určitou vzdálenost mezi zdrojem měřeného signálu a přijímačem, dochází v rámci tohoto intervalu ke shlazení skutečných hodnot měřené veličiny. Pokud není trhlina nebo tenká dílčí vrstva velmi kontrastní, její projev může být nevýrazný. Situace se zlepšuje, pokud mocnost dílčí vrstvy začne být srovnatelná s délkou intervalu mezi zdrojem a přijímačem dané sondy. Výše popsané skutečnosti dobře ilustrují hodnoty v Tabulce 14 - rychlý pokles hodnoty dynamického Youngova modulu z FWS (\bar{E}_D^{FWS}) s rostoucí mocností břidličné vrstvy.

Jedna z výhod použití modelu T-matrix k vyhodnocování efektivních modulů horniny v okolí vrtu z akustické karotáže tedy je, že je možné do něj zahrnout i vrstvy, které na původní křivce dynamických modulů nemusí být příliš patrné. Vrstvy lze vymezit na základě vyhodnocení informací z vrtného jádra, metody ABI a případně z kamerového záznamu a výsledků ostatních provedených karotážních měření. Pokud máme z těchto zdrojů informaci o přítomnosti takové

vrstvy, můžeme ji do modelu zahrnout.

Použitím T-matrix modelu k výpočtu efektivních modulů hornin zastížených ve vrtném profilu bylo dosaženo několika zlepšení, zejména na křivce Youngova modulu:

- Hodnoty efektivních modulů jsou na většině vrtného profilu srovnatelné se statickými moduly stanovenými na vzorcích. V břidličných vrstvách s nízkou pevností σ_c nebylo dosaženo úplné shody efektivních a statických hodnot Youngova modulu (podrobněji v Tabulce 15).
- Křivky efektivních modulů obsahují výrazně více informací o vrtném profilu, než původní křivky dynamických modulů. Díky vložení nalezených málo pevných vrstev do modelu se zlepšila jejich viditelnost na křivce efektivního Youngova modulu. Společně s litologickou informací o vrstvách ve vrtném profilu (z vrtného jádra nebo z metody ABI) jsou takto bezpečně indikovány vrstvy s nízkou pevností σ_c . Interpretované křivky dynamického Youngova modulu tuto informaci do určité míry zobrazují, na křivce efektivního Youngova modulu došlo ale k podstatnému zvýraznění těchto vrstev (viz Obrázek 8).

Tabulka 15: Porovnání výchozích dynamických modulů z karotáže a efektivních modulů z T-matrix modelu se statickými moduly stanovenými na vzorcích. Porovnání je prováděno pro průměrné hodnoty dynamických nebo efektivních modulů vrstvy o mocnosti do 20 cm v místě odběru příslušného vzorku. Tyto průměrné moduly jsou označeny pruhem. δ značí relativní chyby normované hodnotou příslušného statického modulu. Ke konstrukci výchozího vrstevnatého modelu byly použity pouze vzorky s označením "*".

vzorek	$\bar{v}_D^{FWS} - v_S$ [-]	$\delta(\bar{v}_D^{FWS} - v_S)$ [%]	$\bar{v}_{ef} - v_S$ [-]	$\delta(\bar{v}_{ef} - v_S)$ [%]	$\bar{E}_D^{FWS} - E_S$ [GPa]	$\delta(\bar{E}_D^{FWS} - E_S)$ [%]	$\bar{E}_{ef} - E_S$ [GPa]	$\delta(\bar{E}_{ef} - E_S)$ [%]
1A	-0,046	-16,4	-0,039	-14,1	4,0	5,4	-7,9	-10,5
1B*	-0,019	-7,5	-0,011	-4,4	10,4	16,3	-0,8	-1,2
2A	0,090	47,2	0,079	41,5	5,4	7,9	-2,0	-2,9
břidlice (4,70-4,85 m)	0,114	56,9	0,117	58,6	66,1	1311,8	39,1	776,7
břidlice (6,05-6,30 m)	0,081	1,6	0,083	1,7	38,3	760,0	22,0	436,1
3A*	0,073	40,5	0,050	27,8	13,8	21,2	4,3	6,7
4C	0,086	43,1	0,051	25,3	4,6	6,8	0,8	1,1
5A*	0,062	28,3	0,044	19,8	7,7	12,5	-1,4	-2,2
5B	0,018	8,9	0,019	9,5	7,3	11,5	-2,5	-4,0
6A	0,023	10,4	0,014	6,5	17,4	30,8	10,4	18,4
břidlice (13,20-13,70 m)	0,113	56,5	0,115	57,7	34,6	686,4	19,8	393,6
7A*	0,026	15,2	0,019	11,2	20,0	40,4	3,9	8,0

V Tabulce 15 je vidět, že výpočtem efektivních modulů bylo dosaženo podstatného zlepšení shody se statickými moduly. Pro porovnání jsou zde uvedeny odchylky hodnot dynamických a efektivních modulů od hodnot modulů statických. Dynamické moduly reprezentují výchozí stav při standardní interpretaci akustické karotáže a efektivní moduly interpretaci zlepšenou o T-matrix model. Porovnávány jsou v případě dynamických a efektivních modulů průměrné hodnoty z blízkého okolí místa odběru vzorku. Odchylky jsou vyjádřeny ve formě absolutního rozdílu (chyby), relativní chyby byly spočteny normováním příslušnou hodnotou statického modulu. Na většině hodnot odchylek je patrné podstatné zlepšení.

V případě Youngova modulu se u většiny vzorků absolutní rozdíly zmenšily z hodnot kolem 10 GPa, maximálně až 20 GPa, na první jednotky GPa. Relativní chyba dosahující až 40,4 % se snížila pod 10 %. Toto platí pro vzorky 1B, 2A, 3A, 4C, 5A, 5B, 7A. Jde tedy jak o vzorky použité pro sestavení vstupní křivky statických modulů, tak o kontrolní vzorky ponechané k ověření funkčnosti modelového výpočtu. Pro vzorek 1A došlo k příliš velkému snížení hodnoty efektivního Youngova modulu a relativní chyba narostla. Je nutné podotknout, že vzorek 1A má ze všech vzorků významně nejvyšší hodnotu statického Youngova modulu (74,8 GPa; viz Tabulka 14) a shoda s hodnotou původně stanoveného dynamického Youngova modulu z FWS je velmi dobrá. V případě takto rigidního materiálu se zdá být nejlepším řešením neprovádět výpočet efektivního modulu a využít faktu zmiňovaného v kapitole 1 - že pro materiály s vysokými hodnotami Youngova modulu (v našem případě se zdá, že nad 70 GPa) je shoda mezi statickou a dynamickou hodnotou vzhledem k přesnosti stanovení dostačující. Kompaktní vrstvy reprezentované horninou takovýchto vlastností by bylo možné z modelového výpočetního profilu vyjmout.

Naproti tomu při pohledu na průběhy křivek Youngova modulu na obrázku 8 je patrný výše zmíněný fakt, že odebraný vzorek často reprezentuje kompaktní interval s jednou z nejvyšších hodnot pevností σ_c a Youngova modulu v rámci vrstvy.

To je přesně případ vrstvy reprezentované vzorkem 1A, který se nachází na jednom ze dvou dílčích maxim. Na první pohled to vypadá, že výsledek modelování má pro vzorek 1A horší shodu se statickou hodnotou než původní dynamický modul. Díky nalezeným trhlinám jsou výsledné efektivní hodnoty na podstatné části vrstvy nižší než hodnota statického modulu vzorku 1A. Proto je rozdíl mezi průměrnou efektivní a statickou hodnotou v absolutní hodnotě větší než

mezi průměrnou dynamickou a statickou hodnotou. Vzhledem ke tvaru původní křivky E_D se lze domnívat, že křivka E_{ef} lépe odpovídá skutečnému statickému Youngovu modulu vrstvy. Tento fakt je platný i pro zobecňování srovnání efektivních modulů v okolí míst odběru vzorků s příslušnými statickými moduly na celé vrstvy reprezentované příslušnými vzorky. Je tedy nutné brát srovnání průměrných hodnot s rezervou a konfrontovat ho s porovnáním skutečných průběhů křivek jednotlivých modulů zobrazených na Obrázku 8.

Hodnota efektivního Youngova modulu v okolí vzorku 6A nedosáhla tak výrazného zlepšení jako u vzorků okolních. Relativní chyba se snížila z 30,8 % na 18,4 %. Důvodem je fakt, že tento vzorek nebyl použit ve výchozí křivce statických modulů a okolní vzorky 5A a 7A nereprezentovaly příliš dobře jeho vlastnosti. Z hlediska hodnoty statického Youngova modulu se vzorek 6A nachází mezi vzorky 5A a 7A (řazeno sestupně). Výpočet efektivního modulu v místě vzorku 6A byl proveden v rámci vrstvy reprezentované vzorkem 5A. Ten má vyšší hodnotu statického Youngova modulu než 6A a proto nebylo snížení efektivní hodnoty odpovídající.

Tato skutečnost ilustruje, že použitý model funguje nejlépe, pokud jsou ve vstupní křivce zahrnuty statické moduly všech odlišných ovzorkovaných vrstev, případně správně použity vlastnosti stejných hornin ze sousedních částí zkoumaného profilu pro vrstvy neovzorkované. Uvnitř takto dobře podmíněných vrstev je potvrzena dobrá funkčnost modelu.

Břidlicové vrstvy se od okolních vápenců liší velkým kontrastem z hlediska pevnosti σ_c a Youngova modulu. Vyjádřeno rozdílem v hodnotě statického Youngova modulu jde o cca 70 GPa. Přestože pokles hodnoty spočteného efektivního modulu v těchto vrstvách byl značný, rozdíl mezi statickým a efektivním Youngovým modulem je stále v řádu násobků statické hodnoty modulu. Tomu odpovídají i vysoké hodnoty relativních chyb normované touto nízkou hodnotou statického modulu.

V případě Poissonova čísla nedošlo ke zmenšení rozdílu mezi statickou a efektivní hodnotou, hodnoty relativních chyb dokonce nepatrně vzrostly - o první desetiny až jednotky procent. Z praktického hlediska nedošlo k žádné významné změně. Efektivní moduly v těchto vrstvách tedy nelze považovat za ekvivalentní modulům statickým.

V praxi lze využít alespoň fakt, že změny na křivkách efektivních modulů umožňují identifikaci a vymezení vrstev s malou pevností σ_c a nízkou hodnotou Youngova modulu. Takto je

interpretátor upozorněn, že se v profilu nacházejí vrstvy vyžadující další pozornost. V těchto vrstvách s malou pevností σ_c lze doporučit ověření, do jaké míry se efektivní moduly shodují se statickými. Toto je jisté omezení celkového přínosu navrhovaného modelu, přesto lze výsledky v těchto vrstvách využít alespoň k omezení počtu nutných statických měření.

Mimo tyto vrstvy s anomálně nízkými moduly lze využít efektivní hodnoty modulů spočtené pomocí T-matrix modelu k dalším geotechnickým výpočtům. Díky modelu jsou použitelné hodnoty modulů dostupné pro celý profil a ne pouze v místech odběru vzorků pro statické zkoušky.

Tyto výsledky byly publikovány v článku (Chalupa et al. 2018).

8 Závěr

Provedený výzkum prokázal možnost využití modelu T-matrix ke stanovování efektivních modulů hornin přepočtem z dynamických modulů stanovených akustickou karotáží se záznamem plného vlnového obrazu (FWS). Nutnými vstupními daty pro provedení modelového výpočtu jsou výsledky interpretace dalších karotážních měření, zejména stanovení porozity a detekce přítomnosti trhlin pomocí akustického skeneru stěny vrtu. Vedle toho je potřeba laboratorní jednoosou zatěžovací zkouškou stanovit statické moduly vybraných reprezentativních hornin pro konstrukci výchozího vrstevnatého profilu. Na zkoumaném vrtném profilu vrtu K-1 bylo dosaženo významné shody mezi modelovanými efektivními moduly a statickými moduly stanovenými na vzorcích z vrtného jádra. Tato shoda byla velmi významná na většině vrtného profilu tvořeného vápenci; v břidličných vrstvách s výrazně nižší pevností σ_c a nižší hodnotou Youngova modulu než okolí došlo pouze k částečnému přiblížení efektivních modulů k modulům statickým.

Dalším přínosem výpočtu T-matrix modelu je detailnější zobrazení průběhu efektivních modulů ve zkoumaném profilu podél vrtu. Na základě doplňujících informací z vrtného jádra a akustického televizoru bylo možné vložit do modelu vrstvy s nízkou pevností σ_c a nízkým Youngovým modulem. Tyto vrstvy se neprojevyly na původních křivkách dynamických modulů z karotáže natolik výrazně, aby bylo možné jejich projevy na křivkách bez pochybností identifikovat. Pouze v případě větší mocnosti byl projev těchto vrstev na křivkách dynamických modulů patrný. Výpočtem efektivních modulů byly tyto projevy zvýrazněny a hodnoty efektivních modulů se v nich více blížily statickým.

Pro praktické využití byly tímto postupem získány efektivní moduly vhodné pro výpočty v celém vrtném profilu, s výjimkou vrstev s nízkou pevností σ_c a nízkým Youngovým modulem. Ty byly díky výpočtu spolehlivě vymezeny. Je však nutné ověřit, nakolik se efektivní moduly v rámci těchto vrstev blíží skutečným statickým modulům dané vrstvy.

Seznam použité literatury

- Agersborg, R., Johansen, T. A., Jakobsen, M., 2009: Velocity variations in carbonate rocks due to dual porosity and wave-induced fluid flow, *Geophysical Prospecting*, Vol. 57, Issue 1, Pages 81-98, European Association of Geoscientists and Engineers, ISSN 1365-2478
- Al-Shayea, N. A., 2004: Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock, *Engineering Geology*, Vol. 74, Issue 1-2, Pages 139-156, Elsevier, ISSN 0013-7952
- Ameen, M. S., Smart, B. G. D., Somerville, J. Mc., Hammilton, S., Naji, N. A., 2009: Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia), *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 26, Issue 4, Pages 430-444, Elsevier, ISSN 0264-8172
- Auld, B. A., 1990: *Acoustic Fields and Waves in Solids*, F. Krieger, Malabar, ISBN 978-0-898-74782-9
- Bała, M., Jarzyna, J., 1996: Application of Acoustic Full Wavetrains for the Determination of Lithology, Reservoir and Mechanical Parameters of Formation, *Geophysical Prospecting*, Vol. 44, Issue 5, Pages 761-787, European Association of Geoscientists and Engineers, ISSN 1365-2478

- Baloun, A., Caithaml, L., Hanuš, E., 1989: Čertovy Schody – Vápenka, Komín 180 m – odplynění pecí, Inženýrskogeologický průzkum, Keramoprojekt Praha, Česká Geologická Služba - Geofond
- Berryman, J. G., Pride, S. R., Wang, H. F., 2002: A differential scheme for elastic properties of rocks with dry or saturated cracks, *Geophysical Journal International*, Vol. 151, Issue 2, Pages 597-611, Oxford University Press, ISSN 1365-246X
- Bozkurtoğlu, E., Özdamar, Ş., Ünal Ercan, H., 2013: Prediction of weathering development in metarhyolites of the Ilgın (Konya) area, SW Turkey, *Turkish Journal of Earth Sciences*, Vol. 22, Issue 2, Pages 264-276, Scientific and Technological Research Council of Turkey, ISSN 1303-619X
- Bridge, J., Demicco, R., 2008: *Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits*, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-85780-2
- Ceryan, S., 2012: Weathering Indices for Assessment of Weathering Effect and Classification of Weathered Rocks: A Case Study from NE Turkey, *In: Dar, A. I., 2012: Earth Sciences*, Pages 19-44, IntechOpen, Rijeka, HR, ISBN 978-953-307-861-8
- Ciccotti, M., Mulargia, F., 2004: Difference between Static and Dynamic Elastic Moduli of a Typical Seismogenic Rock, *Geophysical Journal International*, Vol. 157, Issue 1, Pages 474-477, Oxford University Press, ISSN 1365-246X
- Dudík, F., Horáček, M., Horák, L., 2007: Praha - Beroun, nové železniční spojení. Závěrečná zpráva o předběžném geotechnickém, geofyzikálním a hydrogeologickém průzkumu, GeoTec-GS a.s., Praha, Česká Geologická Služba - Geofond
- Eissa, E. A., Kazi, A., 1988: Relations Between Static and Dynamic Young's Moduli of Rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, Vol. 25, Issue 6, Pages 479-482, Elsevier, ISSN 0148-9062
- Fechtner, V., Nedvěd, Z., 1956: Průzkumu cementářských surovin v okolí Králova Dvora v letech 1955 – 1956. Lokalita Kosov. (V. etapa), Nerudný průzkum Brno, Česká Geologická Služba - Geofond
- Fei, W., Huiyuan, B., Jun, Y., Yonghao, Z., 2016: Correlation of Dynamic and Static Elastic Parameters of Rock, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 21, Issue 4, Pages 1551-1560, World Wide Web of Geotechnical Engineers, ISSN 1089-3032
- Fjær, E., 1999: Static and dynamic moduli of weak sandstones, *The 37th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, Vail, Colorado, *In: Fjær, E., 2009: Static and Dynamic Moduli of a Weak Sandstone*, *Geophysics*, Vol. 74, Issue 2, Pages WA103-WA112, Society of Exploration Geophysicists, ISSN 1942-2156
- Fjær, E., 2009: Static and Dynamic Moduli of a Weak Sandstone, *Geophysics*, Vol. 74, Issue 2, Pages WA103-WA112, Society of Exploration Geophysicists, ISSN 1942-2156
- Fjær, E., 2019: Relations between static and dynamic moduli of sedimentary rocks, *Geophysical Prospecting*, Vol. 67, Issue 1, Pages 128-139, European Association of Geoscientists and Engineers, ISSN 1365-2478
- Fjær, E., Holt, R. M., 1994: Rock Acoustics and Rock Mechanics: Their Link in Petroleum Engineering, *The Leading Edge (Online)*, Vol. 13, Issue 4, Pages 255-258, Society of Exploration Geophysicists, ISSN 1938-3789
- Gercek, H., 2007: Poisson's ratio values for rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 44, Issue 1, Pages 1-13, Elsevier, ISSN 1365-1609
- Gommesen, L., Fabricius, I. L., Mukerji, T., Mavko, G., Pedersen, J. M., 2007: Elastic Behaviour of North Sea Chalk: A Well-log Study, *Geophysical Prospecting*, Vol. 55, Issue 3, Pages 307-322, European Association of Geoscientists and Engineers, ISSN 1365-2478
- Grujić, N., 1974: Ultrasonic testing of foundation rock, , *Proc. of 3rd ISRM Congress*, Denver, Washington DC, *In: Barton, N., 2007: Rock quality, seismic velocity, attenuation, and anisotropy*, Pages 98-99, Taylor & Francis/Balkema, London, UK, ISBN 0-203-96445-4

- Gupta, A. S., Sehagiri Rao, K., 2000: Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state, *Engineering Geology*, Vol. 56, Issue 3-4, Pages 257-274, Elsevier, ISSN 0013-7952
- Han, D., 1986: Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments, Stanford University, Dissertation
- Hawkes, I., Mellor, M., 1970: Uniaxial Testing in Rock Mechanics Laboratories, *Engineering Geology*, Vol. 4, Issue 3, Pages 177-285, Elsevier, ISSN 0013-7952
- Heap, M. J., Baud, P., Meredith, P. G., Vinciguerra, S., Reuschlé, T., 2014: The permeability and elastic moduli of tuff from Campi Flegrei, Italy: implications for ground deformation modelling, *Solid Earth*, Vol. 5, Issue 1, Pages 25-44, European Geosciences Union, ISSN 1869-9529
- Holt, R. M., Fjær, E., Bauer, A., 2013: Static and Dynamic Moduli - so equal, and yet so different, *In: Pyrak-Nolte, L. J., Chan, A., Dershowitz, W., Morris, J., Rostami, J., eds., 2013: 47th U.S. Symposium on Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2013*, Pages 2252-2259, Curran Associates Inc, New York, NY, ISBN 978-1-62993-118-0
- Hornby, B. E., Schwartz, L. M., Hudson, J. A., 1994: Anisotropic effective-medium modeling of the elastic properties of shales, *Geophysics*, Vol. 59, Issue 10, Pages 1570-1583, Society of Exploration Geophysicists, ISSN 1942-2156
- Hossain, Z., Mukerji, T., Fabricius, I. L., 2012: Vp-Vs relationship and amplitude variation with offset modelling of glauconitic greensand, *Geophysical Prospecting*, Vol. 60, Issue 1, Pages 117-137, European Association of Geoscientists and Engineers, ISSN 1365-2478
- Hraba, B., Schejbal, J., 1954: Průzkumu cementářských surovin v okolí Králova Dvora v roce 1954 – prostor Kosov (IV. etapa), Nerudný průzkum Brno, Česká Geologická Služba - Geofond
- Chalupa, F., 2012: Prediction of Static Moduli in Near Surface Jointed Rocks from Full Wave Sonic and Other Well Log Data, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Vol. 16, Issue 1, Pages 1-8, Acoustic Society of America, ISSN 1939-800X
- Chalupa, F., Vilhelm, J., Petružálek, M., Bukovská, Z., 2017: Determination of static moduli in fractured rocks by T-matrix model, *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 22, Issue 1, Pages 22-31, Technical University of Košice, ISSN 1335-1788
- Chalupa, F., Vilhelm, J., Petružálek, M., Bukovská, Z., 2018: Application of T-matrix model for static moduli approximation from dynamic moduli determined by sonic well logging, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 112, Pages 281-289, Elsevier, ISSN 1365-1609
- Cheng, C. H., Johnston, D. H., 1981: Dynamic and Static Moduli, *Geophysical Research Letters*, Vol. 8, Issue 1, Pages 39-42, American Geophysical Union, ISSN 1944-8007
- Chlupáč, I., Brzobohatý, R., Kovanda, J., Stráník, Z., 2002: *Geologická minulost České republiky*, Academia Praha, ISBN 80-200-0914-0
- Chlupáč, I., Havlíček, V., Kříž, J., Kukul, Z., Štorch, P., 1992: *Paleozoikum Barrandienu (Kambrium-Devon)*, Vydavatelství Českého Geologického Ústavu Praha, ISBN 80-7075-055-3
- Ide, J. M., 1936: Comparison of Statically and Dynamically Determined Young's Modulus of Rocks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 22, Issue 2, Pages 81-92, Proceedings of the National Academy of Sciences, ISSN 1091-6490
- Jakobsen, M., 2012: T-matrix approach to seismic forward modelling in the acoustic approximation, *Studia Geophysica et Geodaetica*, Vol. 56, Issue 1, Pages 1-20, Springer, ISSN 1573-1626
- Jakobsen, M., Hudson, J. A., Johansen T. A., 2003a: T-Matrix Approach to Shale Acoustics, *Geophysical Journal International*, Vol. 154, Issue 2, Pages 533-558, Oxford University Press, ISSN 1365-246X
- Jakobsen, M., Johansen, T. A., McCann C., 2003b: The acoustic signature of fluid flow in complex porous media, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 54, Pages 219-246, Elsevier, ISSN 0926-9851

- Jizba, D. L., 1991: Mechanical and acoustical properties of sandstones and shales, Stanford University, Dissertation
- Karam, S. G., 2004: Effects of Borehole Stability on Well Log Data, Massachusetts Institute of Technology, MSc Thesis
- Konečný, P., Lednická, M., Souček, K., Staš, L., Kubina, L., Gribovszki, K., 2015: Determination of dynamic Young's modulus of vulnerable speleothems, *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 20, Issue 2, Pages 156-163, Technical University of Košice, ISSN 1335-1788
- Kroner, E., 1986: Statistical modelling, *In: Gittus, J., Zarka, J., 1986: Modelling Small Deformations of Polycrystals*, Pages 229-291, Elsevier, London, UK, ISBN 978-94-009-4181-6
- Kříž, J., 1992: Silurian field excursions: Prague Basin (Barrandian), Bohemia, National Museum of Wales, ISBN 9780720003734
- Kujundžić, B., Grujić, N., 1966: Correlation between static and dynamic investigations of rock mass "in situ", LNEC, Proc. of 1st ISRM Congress, Lisbon, Portugal, *In: Barton, N., 2007: Rock quality, seismic velocity, attenuation, and anisotropy*, Pages , Taylor & Francis/Balkema, London, UK, ISBN 0-203-96445-4
- Lam dos Santos, J. P., Amaral, P.M., Diogo, A. C., Rosa, L. G., 2013: Comparison of Young Moduli of Engineered Stones using Different Test Methods, *Key Engineering Materials*, Vol. 548, Pages 220-230, Trans Tech Publications, ISSN 1662-9795
- Ledbetter, H., 1993: Dynamic vs. static Young's moduli: a case study, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 165, Issue 1, Pages L9-L10, Elsevier, ISSN 0921-5093
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., García-del-Cura, M. A., 2012: Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 71, Issue 2, Pages 263-268, International Association for Engineering Geology and the Environment, ISSN 1435-9537
- Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., 2009: *The Rock Physics Handbook*, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-86136-6
- Mura, T., 1982: *Micromechanics of Defects in Solids*, Nijhoff, Zoetermeer, ISBN 978-94-009-3489-4
- Nedvěd, Z., Tesař, F., 1955: Předběžná zpráva o průzkumu liteňských břidlic na Kosově – I. etapa, Nerudný průzkum Brno, Česká Geologická Služba - Geofond
- Nishiyama, T., Kusuda, H., 1996: Application of a fluorescent technique to the study of the weathering process, *Engineering Geology*, Vol. 43, Issue 4, Pages 247-253, Elsevier, ISSN 0013-7952
- Olsen, C., Fabricius, I. L., Krogsbøll, A., Prasad, M., 2004: Static and dynamic Young's Modulus for Lower Cretaceous chalk. A low frequency scenario, AAPG International Conference, Cancun, Mexico
- Pitřák, M., Procházka, M., 2014: Lom Kosov u Berouna, Karotážní měření pro zjištění geomechanických vlastností a litologie, včetně speciálních metod: Akustické karotáže se záznamem plného vlnového obrazu, Akustického orientovaného skeneru stěny vrtu a Optické vrtné kamery, Aquatest a.s., divize 32
- Pola, A., Crosta, G. B., Fusi, N., Castellanza, R., 2014: General characterization of the mechanical behaviour of different volcanic rocks with respect to alteration, *Engineering Geology*, Vol. 169, Pages 1-13, Elsevier, ISSN 0013-7952
- Pyrak-Nolte, L. J., Nolte, D. D., 1992: Frequency dependence of fracture stiffness, *Geophysical Research Letters*, Vol. 19, Issue 3, Pages 325-328, American Geophysical Union, ISSN 1944-8007
- Rasouli, V., Sutherland, A., 2013: Geomechanical Characteristics of Gas Shales: A Case Study in the North Perth Basin, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 47, Issue 6, Pages 2031-2046, Springer Vienna, ISSN 1434-453X
- Sams, M. S., Andrea, M., 2001: The effect of clay distribution on the elastic properties of

- sandstones, *Geophysical Prospecting*, Vol. 49, Issue 1, Pages 128-150, European Association of Geoscientists and Engineers, ISSN 1365-2478
- Schejbal, J., 1954: Zpráva o průzkumu cementářských surovin v okolí Králova Dvora, lokalita Kosov. Stav k 30.6.1954, Nerudný průzkum Brno, Česká Geologická Služba - Geofond
- Schlumberger, 1996: Log Interpretation Principle/Applications, Schlumberger Wireline & Testing, Pages 5-9 to 5-10
- Schön, J., H., 1996: Physical Properties of Rocks, Fundamentals and Principles of Petrophysics, Pergamon Press, Inc, ISBN 978-0080443461
- Sone, H., Zoback, M. D., 2013: Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks – Part 1: Static and dynamic elastic properties and anisotropy, *Geophysics*, Vol. 78, Issue 5, Pages D381-D392, Society of Exploration Geophysicists, ISSN 1942-2156
- Stan-Kłeczek, I., 2016: The study of the elastic properties of carbonate rocks on a base of laboratory and field measurement, *Acta Montanistica Slovaca*, Vol. 22, Issue 1, Pages 22-31, Technical University of Košice, ISSN 1335-1788
- Stewart, R., Toksöz, M. N., Timur, A., 1980: Strain Dependent Attenuation: Ultrasonic Observations and Mechanism Analysis, presented at the 50th annual meeting SEG, Houston, Texas, *In: Cheng, C. H., Johnston D. H., 1981: Dynamic and Static Moduli, Geophysical Research Letters*, Vol. 8, Issue 1, Pages 39-42, American Geophysical Union, ISSN 1944-8007
- Tutuncu, A. N., Podio A. L., Gregory A.R., Sharma M. M., 1998: Nonlinear Viscoelastic Behavior of Sedimentary Rocks, Part I: Effect of Frequency and Strain Amplitude, *Geophysics*, Vol. 63, Issue 1, Pages 184-194, Society of Exploration Geophysicists, ISSN 1942-2156
- van Heerden, W. L., 1987: General Relations Between Static and Dynamic Moduli of Rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, Vol. 24, Issue 6, Pages 381-385, Elsevier, ISSN 0148-9062
- Vanorio, T., Prasad, M., Nur, A., 2003: Elastic properties of dry clay mineral aggregates, suspensions and sandstones, *Geophysical Journal International*, Vol. 155, Issue 1, Pages 319-326, Oxford University Press, ISSN 1365-246X
- Vilhelm, J., Rudajev, V., Lokajíček, T., Živor, R., 2013: Velocity dispersion in fractured rocks in a wide frequency range, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 90, Pages 138-146, Elsevier, ISSN 0926-9851
- Walsh, J. B., 1965a: The Effect of Cracks on the Uniaxial Elastic Compression of Rock, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 70, Issue 2, Pages 399-411, American Geophysical Union, ISSN 2156-2202
- Walsh, J. B., 1965b: The Effect of Cracks on the Compressibility of Rock, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 70, Issue 2, Pages 381-389, American Geophysical Union, ISSN 2156-2202
- Wang, Z., 2000: Dynamic versus Static Elastic Properties of Reservoir Rocks, *In: Nur, A., editor, Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir Rocks, Vol. 3 - Recent Developments*, Pages: 531-539, Society of Exploration Geophysicists
- Worthington, M.H., 2008: Interpreting seismic anisotropy in fractured reservoirs, *First Break*, Vol. 26, Issue 7, Pages 57-63, European Association of Geoscientists and Engineers, ISSN 1365-2397
- Zhang, J. J., Bentley, L. R., 2005: Factors Determining Poisson's Ratio, Consortium for Research in Elastic Wave Exploration Seismology (CREWES) Research Report, Vol.17, Ch. 62
- Zisman, W., 1933a: Comparison of the Statically and Seismologically Determined Elastic Constants of Rocks, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 19, Issue 7, Pages 680-686, United States National Academy of Sciences, ISSN 1091-6490
- Zisman, W., 1933b: Young's Modulus and Poisson's Ratio With Reference to Geophysical Applications, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 19, Issue 7, Pages 653-665, United States National Academy of Sciences, ISSN 1091-6490